



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ
ΕΚΣΚΑΦΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΕΔΑΦΙΣΕΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΥΑΓΓΕΛΟΥ ΜΑΧΑΙΡΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ :

Καθηγητής: Κωνσταντίνος Κομνίτσας

Χανιά Μάρτιος 2014

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία “Δυνατότητες Οικονομικής Αξιοποίησης Αποβλήτων Κατασκευών και Κατεδαφίσεων (ΑΚΚ)” εκπονήθηκε στα πλαίσια των διπλωματικών εργασιών της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Στην παρούσα εργασία μελετάται η ανακύκλωση των ΑΚΚ ώστε να παραχθούν δομικά υλικά εφάμιλλα των πρωτογενών στα πλαίσια της μετάβασης στην Κοινωνία της Ανακύκλωσης, με υψηλό επίπεδο αποδοτικότητας των πόρων.

Αντικείμενο της παρούσης εργασίας είναι η σύνθεση γεωπολυμερών δομικών υλικών με χρήση αποβλήτων ΑΚΚ.

Τα γεωπολυμερή είναι ανόργανα αργιλοπυριτικά πολυμερή, των οποίων η σύνθεση αποσκοπεί σε οικονομικά οφέλη, σε μεγάλο εύρος εφαρμογών, στην προστασία του περιβάλλοντος, καθώς και σε δημιουργία υλικών τα οποία παρουσιάζουν πλεονεκτήματα συγκριτικά με τα συμβατικά υλικά.

Με την ευκαιρία συγγραφής της εργασίας μου θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά εκείνους που με τη βοήθειά τους συνέβαλλαν στην ολοκλήρωση της.

Ιδιαίτερα θέλω να ευχαριστήσω:

- Τον καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης **κ. Κωνσταντίνο Κομνίτσα** που μου εμπιστεύτηκε την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και για την άριστη συνεργασία και την βοήθεια που μου παρείχε όλο αυτό το χρονικό διάστημα.
- Τον καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης **κ. Ζαχαρία Αγιουτάντη και τον Αναπληρωτή καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Μιχαήλ Γαλετάκη** για όλα όσα με δίδαξαν με όρεξη και ενδιαφέρον κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και για τη συμμετοχή τους ως μέλη της εξεταστικής επιτροπής.
- Την Επιστημονική Συνεργάτιδα Δρ. Μηχανικό Ορυκτών Πόρων **κα Δήμητρα Ζαχαράκη** που απασχολείται στην Ερευνητική Μονάδα Τεχνολογιών Διαχείρισης Μεταλλευτικών & Μεταλλουργικών Αποβλήτων & Αποκατάστασης Εδαφών της Σχολής Μηχανικών

Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης για τη συμβολή της στην εκτέλεση των πειραμάτων και στην αξιολόγηση των.

- Όλους τους συναδέλφους που με βοήθησαν στην υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος ευχαριστώ τους γονείς μου για την αμέριστη συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ευάγγελος Μαχαίρας

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	Σελ.
Συντομογραφίες.....	6
Πίνακες.....	7
Διαγράμματα.....	9
Σχήματα.....	10
Κεφάλαιο: 1.Εισαγωγή.....	11
Κεφάλαιο: 2. Νομοθεσία.....	14
2.1. Νομοθετικό πλαίσιο διαχείρισης αποβλήτων.....	14
2.2.Η στρατηγική της ΕΕ για τους Φυσικούς όρους.....	17
2.3 Νομοθετικό πλαίσιο εναλλακτικής διαχείρισης αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων.....	18
2.4. Παραγωγή και διαχείριση αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων.....	21
Κεφάλαιο: 3 Θεωρητικό Μέρος	24
3.1. Γενικά για Γεωπολυμερή Υλικά.....	24
3.2. Χημεία Γεωπολυμερών.....	25
3.2.1 Ο ρόλος των αλκαλίων.....	26
3.2.2 Ο ρόλος του νερού.....	26
3.2.3 Γεωπολυμερισμός.....	27
3.3. Ιδιότητες Γεωπολυμερών.....	28
3.4. Χρήσεις Γεωπολυμερών.....	30
Κεφάλαιο: 4.	
Παρουσίαση του Θέματος.....	31
Κεφάλαιο: 5 Πειραματικό Μέρος.....	33
5.1. Σχεδιασμός πειραμάτων.....	33
5.1.1. Γενικά.....	33
5.1.2 Χαρακτηρισμός των υλικών.....	34
5.1.2.1 Διάλυμα ενεργοποίησης.....	34
5.1.2.2 Απόβλητα υλικά.....	34
5.1.2.3 Ορυκτολογική σύσταση.....	36
5.1.2.4 Κοκκομετρία.....	38
5.2. Πειραματική διαδικασία.....	39
Κεφάλαιο: 6.Αποτελέσματα και συζήτηση.....	61
6.1. Γεωπολυμερή από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα.....	61

6.2. Γεωπολυμερή από ανακυκλωμένο Τούβλα.....	64
6.3. Γεωπολυμερή από ανακυκλωμένα Πλακίδια.....	67
6.4. Συγκριτική αξιολόγηση γεωπολυμερών από ανακυκλωμένα υλικά.....	69
6.5. Γεωπολυμερή από αναμεμιγμένα ΑΚΚ.....	73
6.6. Γεωπολυμερή από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα, ιπτάμενη τέφρα, σκωρία, και χαλαζιακή άμμο.....	75
Κεφάλαιο: 7. Συμπεράσματα	79
Παραρτήματα	82
Π.Ι. Εργασίες Ανάκτησης (Recovery) / Διάθεσης (Disposal) ΑΚΚ.....	83
Π.ΙΙ. Κατάταξη ΑΚΚ, σύμφωνα με τον ΕΚΑ.....	84
Βιβλιογραφία	85

Συντομογραφίες

ΑΕΚΚ	: Απόβλητα Εκσκαφών Κατασκευών & Κατεδαφίσεων
ΑΕΠΟ	: Απόφαση Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων
ΑΚΚ	: Απόβλητα Κατασκευών και Κατεδαφίσεων
ΓΓΔΕ	: Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων
Ε.Ε	: Ευρωπαϊκή Επιτροπή
Ε.Κ	: Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο
ΕΚΑ	: Ευρωπαϊκός Κατάλογος Αποβλήτων
ΕΣΔΑ	: Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων
ΚΕΔΕ	: Κεντρικό Εργαστήριο Δημοσίων Έργων
ΚΥΑ	: Κοινή Υπουργική Απόφαση
ΠΚ	: Δοκίμιο Πλακάκια ΚΟΗ
ΠΝ	: Δοκίμιο Πλακάκια ΝαΟΗ
ΠΕΣΔΑ	: Περιφερειακό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων
ΣΑΝ	: Δοκίμιο Σκυρόδεμα - Χαλαζιακή Άμμος - ΝαΟΗ
ΣΙΝ	: Δοκίμιο Σκυρόδεμα - Ιπτάμενη Τέφρα - ΝαΟΗ
ΣΚ	: Δοκίμιο Σκυρόδεμα - ΚΟΗ
ΣΝ	: Δοκίμιο Σκυρόδεμα - ΝαΟΗ
ΣΠΝ	: Δοκίμιο Σκυρόδεμα - Πλακάκια - ΝαΟΗ
ΣΣΝ	: Δοκίμιο Σκυρόδεμα - Σκωρία - ΝαΟΗ
ΣΤΝ	: Δοκίμιο Σκυρόδεμα - Τούβλα - ΝαΟΗ
ΣΤΠΝ	: Δοκίμιο Σκυρόδεμα - Τούβλα - Πλακάκια - ΝαΟΗ
ΤΚ	: Δοκίμιο Τούβλα - ΚΟΗ
ΤΝ	: Δοκίμιο Τούβλα - ΝαΟΗ
ΤΠΝ	: Δοκίμιο Τούβλα - Πλακάκια - ΝαΟΗ
ΥΑ	: Υπουργική Απόφαση
ΥΠΕΚΑ	: Υπουργείο Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής
ΧΑΔΑ	: Χώρος Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Αποβλήτων
ΧΥΤΑ	: Χώρος Υγειονομικής Ταφής Αποβλήτων
ΧΥΤΑΑ:	Χώρος Υγειονομικής Ταφής Αδρανών Αποβλήτων
ΧΥΤΥ	: Χώρος Υγειονομικής Ταφής Υπολειμμάτων

	ΠΙΝΑΚΕΣ	Σελ
Πίνακας 2.1	Στόχοι αξιοποίησης ΑΕΚΚ σύμφωνα με την ΚΥΑ 36259/1757/Ε103/2010	21
Πίνακας 2.2:	Παραγόμενες ποσότητες ΑΕΚΚ από οικοδομικές δραστηριότητες σε σύνολο χώρας (2011)(εκτίμηση ΥΠΕΚΑ)	22
Πίνακας 5.1:	Απόβλητα που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνθεση των γεωπολυμερών	33
Πίνακας 5.2:	Πρόσθετα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνθεση των γεωπολυμερών	33
Πίνακας 5.3:	Σύσταση διαλύματος Na_2SiO_3	34
Πίνακας 5.4.:	Χημική σύσταση πρώτων υλών	35
Πίνακας 5.5:	Τυπική χημική σύσταση σκωρίας σιδηρονικελίου	35
Πίνακας 5.6:	Τυπική χημική σύσταση Ιπτάμενης Τέφρας Λιγνιτικών Σταθμών	36
Πίνακας 5.7:	Κοκκομετρία υλικών	38
Πίνακας 5.8:	Ποσοτική σύσταση δοκιμών Σκυροδέματος ΣΚ	42
Πίνακας 5.9:	Ποσοτική σύσταση δοκιμών Σκυροδέματος ΣΝ	46
Πίνακας 5.10:	Ποσοτική σύσταση δοκιμών Τούβλων ΤΚ	48
Πίνακας 5.11:	Ποσοτική σύσταση δοκιμών Τούβλων ΤΝ	50
Πίνακας 5.12:	Ποσοτική σύσταση δοκιμών Πλακιδίων ΠΚ	52
Πίνακας 5.13:	Ποσοτική σύσταση δοκιμών Πλακιδίων ΠΝ	54
Πίνακας 5.14:	Ποσοτική σύσταση δοκιμών Σκυροδέματος - Τούβλων ΣΤΝ8Μ	56
Πίνακας 5.15:	Ποσοτική σύσταση δοκιμών Σκυροδέματος - Πλακιδίων ΣΠΝ8Μ	56
Πίνακας 5.16:	Ποσοτική σύσταση δοκιμών Τούβλων Πλακιδίων - ΤΠΝ8Μ	57
Πίνακας 5.17:	Ποσοτική σύσταση δοκιμών Σκυροδέματος - Τούβλων Πλακιδίων ΣΤΠΝ8Μ	58
Πίνακας 5.18:	Ποσοτική σύσταση δοκιμών Σκυροδέματος - Ιπτάμενης Τέφρας ΣΙΝ8Μ	58
Πίνακας 5.19:	Ποσοτική σύσταση δοκιμών Σκυροδέματος - Σκωρίας ΣΣΝ8Μ	59
Πίνακας 5.20:	Ποσοτική σύσταση δοκιμών Σκυροδέματος Χαλαζιακής Άμμου ΣΑΝ8Μ	60
Πίνακας 6.1:	Ελάχιστες τιμές αντοχής πρότυπων δοκιμών Σκυροδέματος	63
Πίνακας 6.2:	Ελάχιστες Αντοχές πρότυπων δοκιμών Τούβλων	66
Πίνακας 6.3:	Ελάχιστες Αντοχές πρότυπων δοκιμών Πλακιδίων	68
Πίνακας 6.4:	Βέλτιστες τιμές αντοχής σε θλίψη των δοκιμών	70

Πίνακας 6.5.1:	Αντοχές Δοκιμίων ST, SP TP και STP και λόγοι $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	74
Πίνακας 6.6.1:	Αντοχές δοκιμίων FA, SI και SA	76
Πίνακας 6.6.2:	Συγκριτική αξιολόγηση βέλτιστων τιμών αντοχής σε θλίψη	78

	ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ	Σελ.
Διάγραμμα 6.1:	Αντοχή σε θλίψη Σκυροδέματος σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση του καυστικού διαλύματος.	61
Διάγραμμα 6.2:	Αντοχή σε θλίψη Τούβλων σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση του καυστικού διαλύματος.	64
Διάγραμμα 6.3:	Αντοχή σε θλίψη Πλακιδίων σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση του καυστικού διαλύματος.	67
Διάγραμμα 6.5:	Αντοχή σε θλίψη δοκιμίων ΑΚΚ σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση του καυστικού διαλύματος.	73
Διάγραμμα 6.6:	Αντοχή σε θλίψη δοκιμίων σκυροδέματος-ιπτάμενης τέφρας(FA), σκυροδέματος-σκωρίας(SI) και σκυροδέματος-χαλαζιακής άμμου(SA) σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση του καυστικού διαλύματος.	75

ΣΧΗΜΑΤΑ		Σελ.
Σχήμα 2.1:	Συνολικός Στόχος Στρατηγικής της ΕΕ για τους Φυσικούς Πόρους.....	18
Σχήμα 2.2:	Ιεράρχηση των δράσεων για τη διαχείριση των αποβλήτων.....	19
Σχήμα 4.1:	Σχηματική παρουσίαση της διπλωματικής εργασίας.....	32
Σχήμα 5.1:	XRD αντιπροσωπευτικού δείγματος από σκυροδέματα (Q: χαλαζίας SiO_2 , C: ασβεστίτης CaCO_3).....	37
Σχήμα 5.2:	XRD αντιπροσωπευτικού δείγματος από τούβλα (Q: χαλαζίας SiO_2 , C: ασβεστίτης CaCO_3 , H: αιματίτης Fe_2O_3 , D: διοψίδιος $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$, A: αλβίτης $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$).....	37
Σχήμα 5.3:	XRD αντιπροσωπευτικού δείγματος από πλακάκια (Q: χαλαζίας SiO_2 , C: ασβεστίτης CaCO_3 , G: γύψος $\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$, O: ορθόκλαστο AlSi_3O_8).....	38

ΕΙΚΟΝΕΣ		
Εικόνα 5.1.	Δοκίμια Σκυροδέματος 8M KOH.....	43
Εικόνα 5.2.	Δοκίμια Σκυροδέματος 14M KOH.....	44
Εικόνα 5.3.	Δοκίμια Σκυροδέματος NaOH.....	47
Εικόνα 5.4.	Δοκιμίων Πλακιδίων KOH.....	53
Εικόνα 5.5	Δοκιμίων Πλακιδίων NaOH.....	55

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της αξιοποίησης των αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΚΚ) σε συνδυασμό με άλλα βιομηχανικά απόβλητα (πχ τέφρες λιγνιτικών σταθμών) για την δημιουργία γεωπολυμερών δομικών υλικών. Τα γεωπολυμερή δομικά υλικά ερευνώνται προκειμένου να διαπιστωθεί η καταλληλότητα χρησιμοποίησης τους σε δομικά έργα.

Τα γεωπολυμερή είναι ανόργανα αργιλοπυριτικά πολυμερή, τα οποία αποτελούν μια νέα κατηγορία δομικών υλικών με αξιόλογες ιδιότητες. Πρόκειται για υλικά τα οποία μελετώνται τα τελευταία 20 έτη και των οποίων η σύνθεση αποσκοπεί σε τεχνολογικά, περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη.

Τα πλεονεκτήματα των γεωπολυμερών υλικών έναντι των συμβατικών δομικών υλικών είναι κυρίως:

- Η υψηλή μηχανική αντοχή τους
- Η ανθεκτικότητά τους στη διάβρωση
- Η ανθεκτικότητά τους στη θερμική καταπόνηση
- Η εφαρμογή χαμηλού κόστους τεχνολογίας για την σύνθεσή τους
- Η αξιοποίηση χαμηλού κόστους πρώτων υλών για τη σύνθεσή τους (πχ απόβλητα ΑΚΚ, τέφρες κλπ) κ.α.

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα καθιστούν τα γεωπολυμερή που προέρχονται από την αξιοποίηση αποβλήτων ελκυστικά υλικά για δομικές χρήσεις.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία δημιουργήθηκαν δοκίμια γεωπολυμερών υλικών διαστάσεων (50mm x 50mm x 50mm) διαφορετικών συνθέσεων και ποσοτικών συνδυασμών αποτελούμενα από :

- Σκυρόδεμα (ΑΚΚ), NaOH ή KOH
- Τούβλα (ΑΚΚ), NaOH ή KOH
- Πλακάκια (ΑΚΚ), NaOH ή KOH
- Σκυρόδεμα, Τούβλα, NaOH
- Σκυρόδεμα, Πλακάκια, NaOH
- Τούβλα, Πλακάκια, NaOH

- Σκυρόδεμα, Τούβλα, Πλακάκια, NaOH
- Σκυρόδεμα, Ιπτάμενη Τέφρα, NaOH
- Σκυρόδεμα, Σκωρία, NaOH
- Σκυρόδεμα, Χαλαζιακή Άμμος, NaOH

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δοκιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

Η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνει επτά (7) κεφάλαια.

Επιγραμματικά το περιεχόμενο του κάθε κεφαλαίου είναι:

- **Κεφάλαιο: 1 Εισαγωγή.**

Σ' αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι γενικές πληροφορίες για την διπλωματική εργασία.

- **Κεφάλαιο: 2 Νομοθεσία.**

Σ' αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται:

- Το νομικό πλαίσιο της διαχείρισης των αποβλήτων
- Το νομικό πλαίσιο της διαχείρισης και ανακύκλωσης των ΑΚΚ
- Στοιχεία παραγωγής και ανακύκλωσης των ΑΚΚ.

- **Κεφάλαιο: 3 Θεωρητικό Μέρος.**

Σ' αυτό το κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στα γεωπολυμερή και κυρίως στην τεχνολογία των γεωπολυμερών δομικών υλικών, στη δομή, στη χημεία, στη σύνθεση και τις ιδιότητές τους.

- **Κεφάλαιο: 4 Παρουσίαση του Θέματος.**

Σ' αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας, καθώς και η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την υλοποίησή της.

- **Κεφάλαιο: 5 Πειραματικό Μέρος.**

Σ' αυτό το κεφάλαιο περιλαμβάνεται το πειραματικό μέρος της διπλωματικής εργασίας. Περιγράφονται αναλυτικά το πλήθος και η σύνθεση των δοκιμίων που σχεδιάστηκαν, η προετοιμασία της σύνθεσης και η παραγωγή τους.

- **Κεφάλαιο:6 Αποτελέσματα και συζήτηση**

Σ' αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές που υποβλήθηκαν τα διάφορα δοκίμια.

- **Κεφάλαιο: 7 Συμπεράσματα.**

Σ' αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κύρια συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας και αναφέρονται προτάσεις για μελλοντική αξιοποίηση και περαιτέρω διερεύνηση.

Κεφάλαιο 2: Νομοθεσία.

2.1. Νομοθετικό πλαίσιο διαχείρισης αποβλήτων

Η διαχείριση των αποβλήτων γενικά διέπεται από Οδηγίες και Κανονισμούς της ΕΕ και από Νόμους και Κοινές Υπουργικές Αποφάσεις (ΚΥΑ) της Εθνικής μας νομοθεσίας. Το 2012 εκδόθηκε ο νόμος 4042/2012 ΦΕΚ Α' 24/2012 με θέμα «Ποινική προστασία του περιβάλλοντος Εναρμόνιση με την Οδηγία 2008/99/ΕΚ Πλαίσιο παραγωγής και διαχείρισης αποβλήτων Εναρμόνιση με την Οδηγία 2008/98/ΕΚ Ρύθμιση θεμάτων Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής».

Με το νόμο 4042/2012 ενσωματώθηκε στο Εθνικό μας δίκαιο η Οδηγία 2008/98. Ο νόμος αυτός αποτελεί το νόμο πλαίσιο για τη διαχείριση όλων των αποβλήτων.

Τα κύρια σημεία του νόμου που αφορούν στην υπόψη διπλωματική εργασία είναι:

Οι ορισμοί

- **επεξεργασία:** οι εργασίες ανάκτησης ή διάθεσης, στις οποίες συμπεριλαμβάνεται η προετοιμασία πριν από την ανάκτηση ή τη διάθεση.
- **ανάκτηση:** οποιαδήποτε εργασία της οποίας το κύριο αποτέλεσμα είναι ότι απόβλητα εξυπηρετούν ένα χρήσιμο σκοπό αντικαθιστώντας άλλα υλικά τα οποία, υπό άλλες συνθήκες, θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν για την πραγματοποίηση συγκεκριμένης λειτουργίας ή ότι απόβλητα υφίστανται προετοιμασία για την πραγματοποίηση αυτής της λειτουργίας είτε στην εγκατάσταση είτε στο γενικότερο πλαίσιο της οικονομίας.
- **ανακύκλωση:** οποιαδήποτε εργασία ανάκτησης με την οποία τα απόβλητα μετατρέπονται εκ νέου σε προϊόντα, υλικά ή ουσίες που προορίζονται είτε να εξυπηρετήσουν και πάλι τον αρχικό τους σκοπό είτε άλλους σκοπούς. Περιλαμβάνει την επανεπεξεργασία οργανικών υλικών αλλά όχι την ανάκτηση ενέργειας και την επανεπεξεργασία σε υλικά που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα ή σε εργασίες επίχωσης.

και οι διατάξεις των άρθρων:

- **Άρθρο 24: Ευθύνη για τη διαχείριση των αποβλήτων**

1. Την ευθύνη για τη διαχείριση των αποβλήτων την έχουν οι αρχικοί παραγωγοί, οι κάτοχοι αποβλήτων όταν πραγματοποιούν οι ίδιοι την επεξεργασία των αποβλήτων ή όταν αναθέτουν την επεξεργασία σε έμπορο ή σε οργανισμό ή σε επιχείρηση (δημόσιο ή ιδιωτικό) που εκτελεί εργασίες επεξεργασίας αποβλήτων γίνονται δηλαδή κάτοχοι.

2. Όταν τα απόβλητα μεταφέρονται από τον αρχικό παραγωγό ή τον κάτοχο σε ένα ή περισσότερα νομικά πρόσωπα, για προκαταρκτική επεξεργασία, αυτό δεν σημαίνει ότι τα απόβλητα δεν πρέπει να υποβληθούν σε εργασίες ανάκτησης και διάθεσης.

• **Άρθρο 25:Διευρυμένη ευθύνη του παραγωγού**

1. Τα φυσικά ή νομικά πρόσωπα, τα οποία κατ' επάγγελμα αναπτύσσουν, κατασκευάζουν, μεταποιούν, επεξεργάζονται, πωλούν ή εισάγουν προϊόντα (παραγωγός του προϊόντος), φέρουν διευρυμένη ευθύνη παραγωγού. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να έχουν τη μέριμνα ώστε τα απόβλητα που προκύπτουν από τις δραστηριότητές τους

- να μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν,
- να είναι μειωμένα εφαρμόζοντας προγράμματα πρόληψης δημιουργίας αποβλήτων και
- να μπορούν να ανακτηθούν.

2. Για την εφαρμογή της διευρυμένης ευθύνης παραγωγού πρέπει να λαμβάνεται υπόψη:

- το τεχνικώς εφικτό και το οικονομικώς βιώσιμο,
- το σύνολο των επιπτώσεων στο περιβάλλον, στην ανθρώπινη υγεία και οι κοινωνικές επιπτώσεις και
- η διασφάλιση της εύρυθμης λειτουργίας της εσωτερικής αγοράς.

• **Άρθρο 26:Ανάκτηση**

1. Ο παραγωγός ή ο κάτοχος των αποβλήτων πρέπει να υποβάλλει τα απόβλητά του, κατά προτεραιότητα, σε εργασίες ανάκτησης.

2. Για να διευκολυνθεί η ανάκτηση, τα απόβλητα πρέπει να συλλέγονται χωριστά και, εάν είναι εφικτό από τεχνικής, περιβαλλοντικής και οικονομικής άποψης, να μην αναμιγνύονται

με άλλα απόβλητα ή με άλλα υλικά που έχουν διαφορετικές ιδιότητες.

- **Άρθρο 27:Επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση**

Έως το 2020 η προετοιμασία για την επαναχρησιμοποίηση, η ανακύκλωση και η ανάκτηση άλλων υλικών, συμπεριλαμβανομένων των εργασιών επίχωσης (backfilling) όπου γίνεται χρήση αποβλήτων για την υποκατάσταση άλλων υλικών, μη επικίνδυνων αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων εξαιρουμένων των υλικών που απαντώνται στη φύση και τα οποία ορίζονται στην κατηγορία 17 05 04 του καταλόγου αποβλήτων πρέπει να αυξηθεί κατ' ελάχιστον στο 70% κατά βάρος.

- **Άρθρο 29: Ιεράρχηση των δράσεων και των εργασιών διαχείρισης των αποβλήτων**

Απαγορεύεται η εγκατάλειψη, η απόρριψη και η ανεξέλεγκτη διαχείριση των αποβλήτων.

Για τη διαχείριση των αποβλήτων πρέπει να εφαρμόζονται κατά προτεραιότητα οι παρακάτω δράσεις:

α) πρόληψη,

β) προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση,

γ) ανακύκλωση,

δ) άλλου είδους ανάκτηση, όπως ανάκτηση ενέργειας, και

ε) διάθεση.

Πρέπει να λαμβάνονται μέτρα, τα οποία να προωθούν εναλλακτικές δυνατότητες που παράγουν το καλύτερο, από περιβαλλοντικής άποψης, αποτέλεσμα.

- **Άρθρο 43:Ειδικό τέλος ταφής**

1. Από 1^{ης} Ιανουαρίου 2014 επιβαρύνονται, οι οργανισμοί ή οι επιχειρήσεις με ειδικό τέλος ταφής ανά τόνο αποβλήτων που διαθέτουν σε ΧΥΤ χωρίς να έχουν προηγηθεί εργασίες επεξεργασίας (D13, R3, R4, R5, R12) **Παράρτημα Ι.**

Μεταξύ των αποβλήτων που υπόκεινται σε τέλος ταφής είναι και τα Απόβλητα Κατασκευών & Κατεδαφίσεων που αναφέρονται στο **Παράρτημα ΙΙ**

Το ειδικό τέλος ταφής ορίζεται, για το 2014, σε 35 € ανά τόνο διατιθέμενων αποβλήτων και αυξάνεται ετησίως κατά 5 € ανά τόνο έως του ποσού των 60 € ανά τόνο.

2. Τα υπολείμματα των εργασιών επεξεργασίας, που διατίθενται σε Χώρο Υγειονομικής Ταφής (ΧΥΤ), δεν επιβαρύνονται με το ειδικό τέλος ταφής.

3. Το ειδικό τέλος ταφής των αποβλήτων κατατίθεται στο «Πράσινο Ταμείο» του ν.3889/2010 (Α 182) και διατίθεται αποκλειστικά για τη χρηματοδότηση προγραμμάτων και έργων ανάκτησης και διάθεσης αποβλήτων.

2.2 Η στρατηγική της ΕΕ για τους Φυσικούς Πόρους.

Το Δεκέμβριο 2005 η ΕΕ υιοθέτησε τη στρατηγική για την πρόληψη και την ανακύκλωση των αποβλήτων [COM(2005) 666], μια από τις επτά θεματικές στρατηγικές του 6ου Προγράμματος Δράσης για το Περιβάλλον, και καθορίζει ως μακροπρόθεσμο στόχο ότι η ΕΕ θα καταστεί κοινωνία ανακύκλωσης, η οποία θα επιδιώκει την αποφυγή παραγωγής αποβλήτων και όταν θα παράγονται θα τα αξιοποιεί ως πόρο. Η ΕΕ συνδυάζει τη στρατηγική αυτή με δύο άλλες πρωτοβουλίες:

- την ολοκληρωμένη πολιτική προϊόντων και
- τη στρατηγική για την αειφόρο χρήση των φυσικών πόρων.

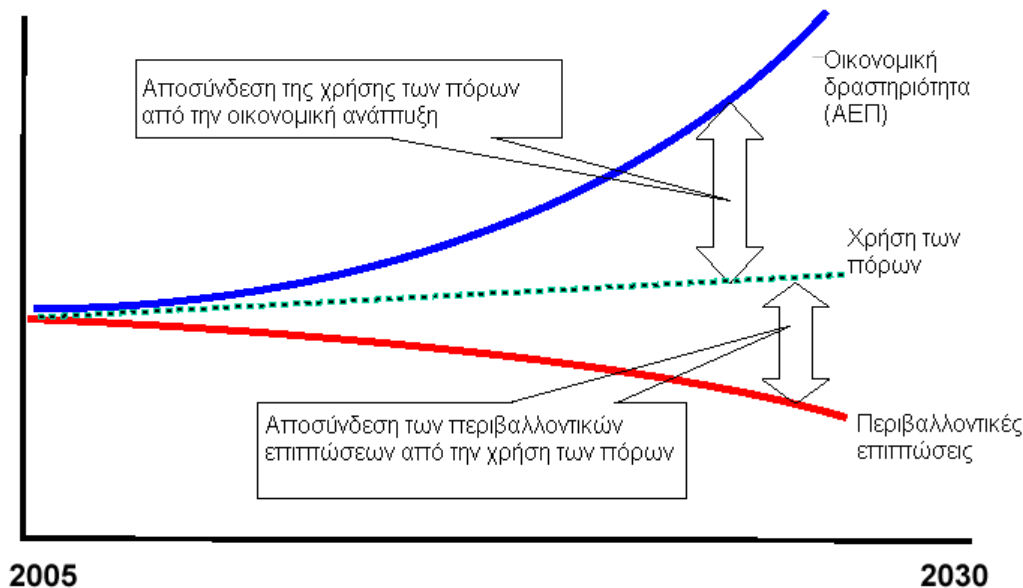
Η παράλληλη υλοποίηση των προαναφερόμενων πρωτοβουλιών προσβλέπει στον καλύτερο καθορισμό των ισορροπιών που απαιτούνται για τη διαχείριση των πόρων, των προϊόντων και των αποβλήτων.

Τα προαναφερόμενα διακατέχουν τη φιλοσοφία και το πνεύμα της Οδηγίας 2008/98 ΕΚ και του νόμου 4042 / 2012 που την έχει ενσωματώσει στην εθνική νομοθεσία και αποτυπώνονται παραστατικά στο επόμενο σχήμα 2.1.

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ανταποκρίνεται πλήρως στον στρατηγικό στόχο της ΕΕ που αποτυπώνεται σχηματικά παραπάνω. Η παραγωγή γεωπολυμερών δομικών υλικών με πρώτες ύλες βιομηχανικά απόβλητα και απόβλητα κατασκευών & κατεδαφίσεων συμβάλλει:

- Στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων αξιοποιώντας απόβλητα.
- Στη μείωση χρήσης φυσικών πόρων
- Στην αύξηση της οικονομικής δραστηριότητας

ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΣΤΟΧΟΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ ΤΗΣ Ε.Ε. ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΦΥΣΙΚΟΥΣ ΠΟΡΟΥΣ



Σχήμα : 2.1 Συνολικός Στόχος Στρατηγικής της ΕΕ για τους Φυσικούς Πόρους (ΥΠΕΚΑ 6^ο Πρόγραμμα δράσης της ΕΕ για το Περιβάλλον).
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2005:0670:FIN:EL:HTML>

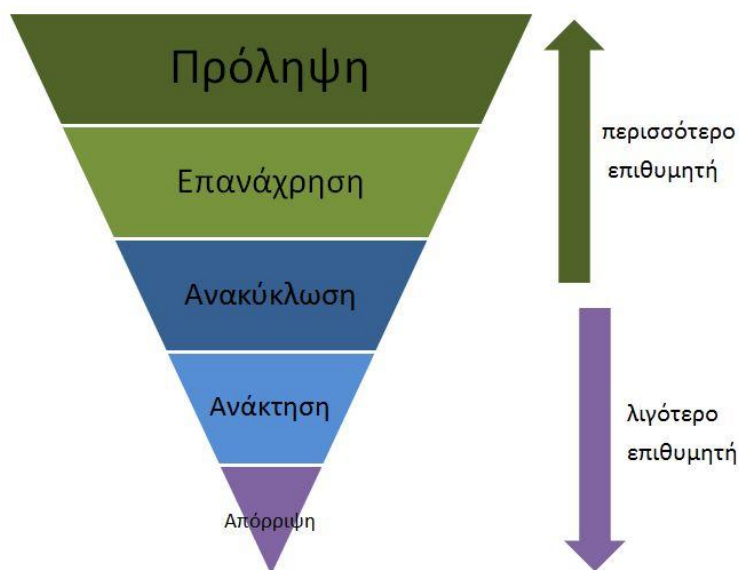
2.3. Νομοθετικό πλαίσιο εναλλακτικής διαχείρισης αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων

Η εναλλακτική διαχείριση αποβλήτων αφορά όλους τους πολίτες καθώς συνδέεται με τη χρήση διαφόρων προϊόντων για την εξυπηρέτηση των αναγκών τους. Πολλά είναι τα είδη των αποβλήτων που, αντί να διατίθενται σε Χώρους Ταφής, μπορούν να ανακυκλωθούν ή να επαναχρησιμοποιηθούν. Τα οφέλη από την ανακύκλωση είναι πολλαπλά. Δεν αφορούν μόνο την προστασία του περιβάλλοντος και την εξοικονόμηση των φυσικών πόρων, αλλά και την προστασία του κλίματος, την προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης και τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας.

Σύμφωνα με τον Ελληνικό Οργανισμό Ανακύκλωσης (ΕΟΑΝ) η εναλλακτική διαχείριση στην Ευρωπαϊκή Ένωση και στην Ελλάδα βασίζεται στην **ιεράρχηση των δράσεων και των εργασιών διαχείρισης των αποβλήτων** όπως αυτή απεικονίζεται στην παρακάτω πυραμίδα. Όσο υψηλότερα βρίσκεται μια επιλογή για τη διαχείριση των αποβλήτων τόσο περισσότερο επιθυμητή είναι. Η πυραμίδα διαχείρισης αποβλήτων αποτυπώνεται στην **Θεματική Στρατηγική της Ε.Ε. για την**

Πρόληψη και την Ανακύκλωση των Αποβλήτων που έχει μεταφερθεί στην εθνική νομοθεσία με τον **νόμο 4042/2012**.

Η βασική λογική της στρατηγικής είναι ότι τα απόβλητα δεν αποτελούν ένα άχρηστο βάρος αλλά έναν **πολύτιμο πόρο** που, αν αξιοποιηθεί σωστά, μπορεί να δώσει πολλαπλά οφέλη. Αυτός είναι ο λόγος που η απόρριψή τους σε χώρους υγειονομικής ταφής πρέπει να είναι η τελευταία διαθέσιμη επιλογή. Από την άλλη, κάθε επεξεργασία των αποβλήτων, όσο περιβαλλοντικά φιλική και αν είναι, καταναλώνει ενέργεια και πόρους, καταλήγοντας στο ότι η πρόληψη από την παραγωγή αποβλήτων δίνει τα περισσότερα πλεονεκτήματα.



Σχήμα: 2.2: Ιεράρχηση των δράσεων για τη διαχείριση των αποβλήτων Οδηγία 2008/98 ΕΕ και ν. 4042/2012. <http://www.eoan.gr/el/content/19>

Τα περισσότερα από τα απόβλητα που απορρίπτονται μπορούν να ανακυκλωθούν. Σήμερα στην Ελλάδα και για το πεδίο ενδιαφέροντος της διπλωματικής εργασίας υπάρχουν συνολικά **5 συστήματα εναλλακτικής διαχείρισης και ανακύκλωσης αποβλήτων εκσκαφών κατασκευών και κατεδαφίσεων(ΑΕΚΚ)**.

Το νομοθετικό πλαίσιο για την εναλλακτική διαχείριση αποβλήτων διέπεται από:

- Το Ν. 4042 / 2012. Νόμος πλαίσιο για τα απόβλητα.
- Το Ν. 2939 / 2001 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει και από
- Τα εκτελεστικά Π.Δ. και ΚΥΑ του Ν. 2939 / 2001 που έχουν εκδοθεί.

Η διαχείριση των ΑΕΚΚ ρυθμίζεται εκτός από την προαναφερόμενη νομοθεσία και από τις διατάξεις της ΚΥΑ 36259/1757/Ε103, όπως συμπληρώθηκε με το άρθρο 40 του Ν. 4030/2011 η οποία καλύπτει τα ΑΕΚΚ ανεξάρτητα από τη μορφή τους, τον όγκο, το βάρος ή τα επιμέρους υλικά από τα οποία συντίθενται, καθώς και τα στερεά απόβλητα που προκύπτουν από την κοπή μαρμάρων που προορίζονται για οικοδομικές εργασίες και περίσσεια σκυροδέματος, εφόσον δεν καλύπτονται από άλλες νομοθετικές πράξεις. Εξαιρούνται του πεδίου εφαρμογής της ΚΥΑ τα εξής:

α) ΑΕΚΚ τα οποία χαρακτηρίζονται ως επικίνδυνα, σύμφωνα με την παράγραφο 2 του άρθρου 2 της ΚΥΑ 13588/725/2006, ΦΕΚ 383 Β'/28-03-2006 και τον ευρωπαϊκό κατάλογο αποβλήτων (ΕΚΑ) Παράρτημα Ι της ΚΥΑ, η διαχείριση των οποίων καθορίζεται από τις σχετικές διατάξεις της κείμενης νομοθεσίας για τα επικίνδυνα απόβλητα.

β) Υλικά εκσκαφών και κατεδαφίσεων που προέρχονται από βιομηχανικές ή άλλες περιοχές και έχουν ρυπανθεί σε προηγούμενη χρήση από επικίνδυνες ουσίες ή ύλες και χαρακτηρίζονται ως επικίνδυνα, σύμφωνα με τους όρους και τη διαδικασία του άρθρου 6 της ΚΥΑ 13588/725/2006, η διαχείριση των οποίων καθορίζεται από τις σχετικές διατάξεις της κείμενης νομοθεσίας για τα επικίνδυνα απόβλητα.

γ) Τα απόβλητα που προκύπτουν από εργασίες έρευνας, εξαγωγής, επεξεργασίας και εναποθήκευσης των μεταλλευτικών πόρων και των βιομηχανικών ορυκτών, καθώς και από την εκμετάλλευση των λατομείων,

δ) Χώμα και άλλα φυσικά υλικά που έχουν εκσκαφθεί κατά τη διάρκεια κατασκευαστικών δραστηριοτήτων, εφόσον είναι βέβαιο ότι τα υλικά αυτά θα χρησιμοποιηθούν στη φυσική τους κατάσταση στο χώρο από τον οποίο έγινε η εκσκαφή,

2.4. Παραγωγή και διαχείριση αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων

2.4.1 Γενικά

Τα απόβλητα από εκσκαφές, κατασκευές και κατεδαφίσεις (ΑΕΚΚ) περιλαμβάνουν στερεά υλικά που προκύπτουν από τις οικοδομικές εργασίες (ανεγέρσεις, κατεδαφίσεις, ανακαινίσεις, επισκευές κτιρίων) και από έργα τεχνικών υποδομών (κατασκευή, αποξήλωση, ανακαίνιση οδικών αρτηριών, δικτύων αποχέτευσης, κλπ.), εκσκαφές και φυσικές καταστροφές. Τα ΑΕΚΚ κατατάσσονται στο κεφάλαιο 17 του

ευρωπαϊκού καταλόγου αποβλήτων(ΕΚΑ) και παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα ΙΙΙ.

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής το ενδιαφέρον εστιάζεται στα Απόβλητα Κατασκευών & Κατεδαφίσεων (ΑΚΚ).

Με βάση την ΚΥΑ 36259/1757/Ε103/2010 και το άρθρο 40 του Ν.4030/2011, καθορίζονται οι εθνικοί ποσοτικοί στόχοι συλλογής και αξιοποίησης των ΑΕΚΚ οι οποίοι, εξαιρουμένου του κωδικού 17 05 04 (ΕΚΑ), έχουν διαμορφωθεί όπως φαίνονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Στόχοι αξιοποίησης ΑΕΚΚ σύμφωνα με την ΚΥΑ 36259/1757/Ε103/2010.

Ημερομηνία	Ποσοστό * Επαναχρησιμοποίησης**, Ανακύκλωσης, Ανάκτησης Υλικών Αποβλήτων και Αξιοποίησης*
έως 01-01-2012	30%
έως 01-01-2015	50%
έως 01-01-2020	70%

*Το ποσοστό αφορά στο κατ' ελάχιστο ποσοστό ως προς το συνολικό βάρος των παραγόμενων ΑΕΚΚ στη χώρα.

**Σύμφωνα με τον Ν.4042/2012, χρησιμοποιείται ο όρος «προετοιμασία για την επαναχρησιμοποίηση».

2.4.2 Παραγωγή Αποβλήτων

Τα ΑΕΚΚ παράγονται από τις δραστηριότητες εταιρειών που κατατάσσονται κατά ΣΤΑΚΟΔ στον τομέα ΣΤ. (ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ) σύμφωνα με την ΕΛΣΤΑΤ.

Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν αναλυτικά στοιχεία για το σύνολο των παραγόμενων ποσοτήτων ΑΕΚΚ, το ΥΠΕΚΑ(Γραφείο Εναλλακτικής Διαχείρισης Αποβλήτων) έχει προβεί σε εκτίμηση των παραγόμενων αποβλήτων εκσκαφών κατασκευών και κατεδαφίσεων στο πλαίσιο σύνταξης της ετήσιας έκθεσης παραγωγής και διαχείρισης των ΑΕΚΚ στη χώρα.

Στον Πίνακα 2.2. παρατίθενται τα στοιχεία του ΥΠΕΚΑ για τις παραγόμενες ποσότητες ΑΕΚΚ από εργασίες εκσκαφών, κατασκευών, και κατεδαφίσεων κατά το έτος 2011.

Πίνακας 2.2 : Παραγόμενες ποσότητες ΑΕΚΚ από οικοδομικές δραστηριότητες σε σύνολο χώρας (2011) (εκτίμηση ΥΠΕΚΑ).

Απόβλητα Κατεδαφίσεων (t)	Απόβλητα εκσκαφών¹ (t)	Απόβλητα Κατασκευών (t)	ΑΕΚΚ Οικοδομικών δραστηριοτήτων (t)
722.841	8.252.244	583.606	9.558.692

Πηγή ΥΠΕΚΑ <http://www.eoan.gr/el/content/14>

(1)Στις εκσκαφές δεν περιλαμβάνονται εκσκαφές μεταλλείων.

Από τις προαναφερόμενες ποσότητες αποβλήτων για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας ενδιαφέρον έχουν μόνο τα Απόβλητα Κατασκευών & Κατεδαφίσεων (ΑΚΚ).

Οι πρακτικές διαχείρισης των ΑΚΚ είναι :

- Συλλογή και μεταφορά ΑΚΚ από αδειοδοτημένες εταιρείες συλλογής και μεταφοράς ΑΚΚ σε εγκεκριμένες μονάδες επεξεργασίας ή σε εγκεκριμένους χώρους αξιοποίησης ή διάθεσης.
- Διαλογή αδρανών και ανακυκλώσιμων υλικών (η οποία κατά περίπτωση δύναται να γίνεται στο εργοτάξιο – διαλογή στη πηγή)
- Επεξεργασία αδρανών (θραύση, κοσκίνιση)
- Τα ανακτημένα υλικά, οδηγούνται σε μονάδες ανακύκλωσης ή περαιτέρω επεξεργασίας
- Επεξεργασμένα αδρανή υλικά αποτελούν δευτερογενή προϊόντα προς πώληση / αξιοποίηση.
- Τα αδρανή κατάλοιπα που προκύπτουν από την επεξεργασία των ΑΕΚΚ, καθώς και τα χώματα και πέτρες και μπάζα εκσκαφών, αξιοποιούνται με τη χρήση τους, σε εργασίες επιχωματώσεων, αποκαταστάσεις ανενεργών και εν ενεργεία λατομείων, ανεξέλεγκτων χωματερών, επικαλύψεις χώρων υγειονομικής ταφής και εν γένει αναμόρφωση υποβαθμισμένων τοπίων ή αναπλάσεων χώρων.

Τα τελευταία έτη γίνονται προσπάθειες να διατεθούν τα αδρανή κατάλοιπα που προκύπτουν από την επεξεργασία των ΑΚΚ σε ανενεργά λατομεία και να χρησιμοποιούνται για την αποκατάστασή τους.

Κεφάλαιο: 3. Θεωρητικό Μέρος

3.1. Γενικά για Γεωπολυμερή Υλικά

Τα γεωπολυμερή ανακαλύφθηκαν τη δεκαετία του 1970, είναι άμορφα υλικά ισοδύναμα των ζεόλιθων και η δομή τους περιλαμβάνει εναλλασσόμενα τετράεδρα AlO_4 και SiO_4 . Εμφανίζουν υψηλή μηχανική αντοχή, ανθεκτικότητα σε διάβρωση από οξέα και σε υψηλές θερμοκρασίες, χαμηλή υδατοπερατότητα κλπ. Πιστεύεται ότι μπορούν να αντικαταστήσουν αρκετά από τα προϊόντα τσιμέντου τα επόμενα χρόνια.

Ο Joseph Davidovits ήταν ο πρώτος που ανέπτυξε αυτά τα υλικά και καθιέρωσε τον όρο «γεωπολυμερές». Η τεχνολογία σύμφωνα με την οποία παράγονται αυτά τα υλικά ονομάζεται “γεωπολυμερισμός” λόγω των ομοιοτήτων που παρουσιάζει με τη φυσική διεργασία της γεωσύνθεσης (Davidovits 1999a) και για το λόγο αυτό τα παραγόμενα υλικά είναι γνωστά ως “γεωπολυμερή”. Η δημιουργία των γεωπολυμερών υλικών ήταν αποτέλεσμα έρευνας για την ανάπτυξη πυράντοχων, μη αναφλέξιμων και ανθεκτικών σε υψηλές θερμοκρασίες υλικών για χρήση τους στην παραγωγή δομικών στοιχείων κτιρίων και σηράγγων. Η παραγωγή γεωπολυμερών σε βιομηχανική κλίμακα δεν έχει επιτευχθεί λόγω των διαφοροποιήσεων που παρατηρούνται στις μηχανικές και θερμικές ιδιότητες των τελικών προϊόντων (Duxson et al., 2005a).

Η διερεύνηση της δομής και της χημείας των γεωπολυμερών αποτελεί ένα πολύπλοκο αντικείμενο, για το οποίο έχουν πραγματοποιηθεί πολλές έρευνες τα τελευταία περίπου 20 χρόνια.

Τα γεωπολυμερή είναι ανόργανα πολυμερή υλικά. Ο γεωπολυμερισμός είναι μια χημική αντίδραση μεταξύ διαφόρων αργιλοπυριτικών υλικών με αλκαλικά πυριτικά μέταλλα κάτω από ισχυρές αλκαλικές συνθήκες κατά την οποία σχηματίζονται πολυμερικοί δεσμοί Si-O-Al-O- .

Ο χρόνος αντίδρασης είναι μικρός και η μάζα των υλικών που χρησιμοποιείται μετατρέπεται σε άμορφη ύλη ή ύλη με ημικρυσταλλικές τρισδιάστατες αργιλοπυριτικές δομές. Το αποτέλεσμα της αντίδρασης εξαρτάται από τη θερμοκρασία συμπύκνωσης. Τα κύρια πλεονεκτήματα του γεωπολυμερισμού είναι:

- οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται, είναι πολύ απλές και βρίσκονται εύκολα,

- οι πολύ καλές ιδιότητες των γεωπολυμερών υλικών που δημιουργούνται.

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή των γεωπολυμερών υλικών σε θλίψη είναι:

- η συγκέντρωση των αλκαλίων στο διάλυμα ενεργοποίησης που χρησιμοποιείται,
- η ορυκτολογική σύσταση των πρώτων υλών και των πρόσθετων υλικών,
- ο χρόνος ωρίμανσης,
- η περιεκτικότητά τους σε νερό,
- η θερμοκρασία παρασκευής τους καθώς και
- η χρονική διάρκεια της θέρμανσης κατά την παρασκευή και τη γήρανσή τους.

Τα υλικά που παράγονται με γεωπολυμερισμό αποτελούν μια νέα κατηγορία υλικών προϊόντων με πολύ βελτιωμένες ιδιότητες.

Τα γεωπολυμερή προϊόντα βρίσκουν εφαρμογές σε διάφορους τομείς λόγω των βελτιωμένων ιδιοτήτων τους, οι οποίες εξαρτώνται από τις πρώτες ύλες και το διάλυμα ενεργοποίησης που χρησιμοποιείται κατά τη σύνθεση. Οι ιδιότητές τους είναι εφάμιλλες αντίστοιχων ιδιοτήτων αρκετών συμβατικών υλικών.

Εκτός από τις ιδιότητες των γεωπολυμερών προϊόντων, ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαδικασία και ο τρόπος παρασκευής τους τόσο για τους επιστήμονες όσο και για την βιομηχανία γιατί αποτελεί μια νέα τεχνολογία που μπορεί να εφαρμοστεί και να δώσει λύσεις.

3.2. Χημεία Γεωπολυμερών

Σύμφωνα με τον Ikeda (1998), για τη δημιουργία γεωπολυμερών υλικών οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται είναι:

- φυσικά (αργιλο-πυριτικά) ορυκτά, ή κατάλληλα απόβλητα (βιομηχανικά, κατασκευών και κατεδαφίσεων κλπ),
- Πληρωτικά ή πρόσθετα υλικά για τη προσθήκη ιόντων Al^{3+} στο γεωπολυμερικό μίγμα.
- Διάλυμα ενεργοποίησης δηλαδή διάλυμα υδροξειδίου ενός αλκαλίου (συνήθως νατρίου ή καλίου),
- Διάλυμα πυριτικού νατρίου ή καλίου, το οποίο δρα ως συνδετικό υλικό, αλκαλικός ενεργοποιητής, πλαστικοποιητής ή μέσο διάχυσης.

- Νερό (η βέλτιστη ποσότητα νερού είναι αυτή η οποία εξασφαλίζει οριακά καλή ανάμειξη και ομοιογένεια του μίγματος).

Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση των γεωπολυμερών υλικών δεν απαιτούν ιδιαίτερη επεξεργασία. Ξηραίνονται ή λειοτριβούνται και στη συνέχεια αναμιγνύονται.

Για να πραγματοποιηθεί η γεωπολυμερική σύνθεση γίνεται ανάμειξη των πρώτων υλών με τα πληρωτικά υλικά, και τα διαλύματα .

Στο γεωπολυμερικό μίγμα δρα το διάλυμα ενεργοποίησης δηλαδή γίνεται αλκαλική ενεργοποίηση. Το διάλυμα ενεργοποίησης (υδροξείδιο νατρίου ή καλίου) διαλυτοποιεί τα αναμεμιγμένα υλικά (Α΄ ύλες).

Το διάλυμα πυριτικού νατρίου ή καλίου δρα ως συνδετικό υλικό, αλκαλικός ενεργοποιητής.

3.2.1 Ο ρόλος των αλκαλίων

Στις αντιδράσεις γεωπολυμερισμού, θεωρητικά, μπορεί να συμμετέχει οποιοδήποτε αλκάλιο, όμως συνηθίζεται η χρήση καλίου ή νατρίου. Ο καθορισμός του αλκαλίου που θα χρησιμοποιηθεί για τη σύνθεση των γεωπολυμερών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, κυρίως από το είδος των πρώτων υλών και τις εφαρμογές των τελικών προϊόντων (Van Jaarsveld, 2000).

Τα αλκάλια ελέγχουν και επηρεάζουν σχεδόν όλα τα στάδια του γεωπολυμερισμού. Δεν πρέπει να υπάρχει περίσσεια αλκαλίων επειδή μπορεί να σχηματιστούν ανθρακικά αλκάλια από το ατμοσφαιρικό CO_2 και συνεπώς να διακοπεί η διαδικασία πολυμερισμού.

Η αύξηση της περιεκτικότητας του (NaOH) στη σύνθεση των γεωπολυμερικών υλικών επιδρά θετικά στην μηχανική αντοχή τους. Η θετική αυτή επίδραση του (NaOH) έχει ένα ανώτατο όριο.

Η περιεκτικότητα του (NaOH) στη σύνθεση των γεωπολυμερών διαμορφώνει το λόγο $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$.

3.2.2 Ο ρόλος του νερού

Ο ρόλος του νερού είναι ουσιαστικός σε όλα τα στάδια της διεργασίας του γεωπολυμερισμού. Η παρουσία του νερού δημιουργεί το κατάλληλο υδατικό περιβάλλον για τη διαδικασία της διάλυσης Si και Al , από την επιφάνεια των κόκκων του στερεού, και την έναρξη του πολυμερισμού.

3.2.3 Γεωπολυμερισμός

Ο γεωπολυμερισμός περιλαμβάνει τα εξής στάδια (κάποιες φορές συμβαίνουν ταυτόχρονα):

1. Διαλυτοποίηση των στερεών λόγω δράσης των καυστικών διαλυμάτων με αποτέλεσμα την απελευθέρωση Si και Al και το σχηματισμό ευκίνητων πρόδρομων ενώσεων.
2. Μερικός προσανατολισμός των ευκίνητων πρόδρομων ενώσεων καθώς και μερική εσωτερική αναδιάρθρωση των αλκαλικών δομών polysialates.
3. Πολυμερισμός μεταξύ των διαλυτοποιημένων Si, Al και των διαλυτών πυριτικών ενώσεων των διαλυμάτων ενεργοποίησης.
4. Σχηματισμός άμορφων έως ημι-κρυσταλλικών δομών μέσω συμπολυμερισμού των αργιλικών και πυριτικών ενώσεων σε συνθήκες υψηλού pH.
5. Σχηματισμός gel από τις πολυμερισμένες αργιλο-πυριτικές ενώσεις
6. Στερεοποίηση του αργιλο-πυριτικού gel.

Η συγκέντρωση του διαλυτοποιημένου πυριτίου επηρεάζει την κατανομή του πορώδους στα γεωπολυμερή, δηλαδή χαμηλές συγκεντρώσεις οδηγούν συνήθως στο σχηματισμό gel μίγματος χαμηλού πορώδους και αντίστροφα (Duxson et al., 2005b). Ωστόσο, υψηλές περιεκτικότητες σε πυριτικές ενώσεις είναι απαραίτητες για τη σύνθεση των γεωπολυμερών και κυρίως σε περιπτώσεις κατά τις οποίες χρησιμοποιείται διάλυμα Na_2SiO_3 . Η αύξηση της περιεκτικότητας διαλυμένου SiO_2 στη σύνθεση των γεωπολυμερών υλικών οδηγεί βαθμιαία στην πλήρη ανάπτυξη τρισδιάστατου πολυμερούς πλέγματος και παράγονται υλικά με υψηλή μηχανική αντοχή. Η ανάπτυξη μηχανικής αντοχής στα γεωπολυμερή συνδέεται άμεσα με τη δημιουργία πυριτικών συμπλόκων η οποία ευνοείται σε αλκαλικές τιμές του pH σε υψηλές τιμές Si (Panias et al., 2007).

Κατά την αλκαλική διαλυτοποίηση των πρώτων υλών ο λόγος Si/Al καθορίζει την τελική αντοχή. Τα αδιάλυτα σωματίδια παραμένουν συνδεδεμένα στη γεωπολυμερική μήτρα με αποτέλεσμα η σκληρότητα των κόκκων να επιδρά θετικά στην αντοχή.

Ο χρόνος στερεοποίησης ενός γεωπολυμερικού μίγματος καθορίζεται κυρίως από το διαθέσιμο αργίλιο. Υψηλή περιεκτικότητα σε αργίλιο, οδηγεί στο σχηματισμό προϊόντων με χαμηλή αντοχή. Ουσιαστικά, τα

διαθέσιμα διαλυτοποιημένα ιόντα Si και Al καθορίζουν τις ιδιότητες των γεωπολυμερών οι οποίες επηρεάζονται σε σημαντικό βαθμό από κάθε μεταβολή των συγκεντρώσεων των ιόντων.

Επίσης οι συνθήκες ωρίμανσης κατά τον γεωπολυμερισμό αποτελούν σημαντική παράμετρο του μηχανισμού καθώς καθορίζουν τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των προϊόντων. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, δημιουργούνται άμορφες ή υαλώδεις δομές με φτωχές μηχανικές ιδιότητες, ενώ σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 100 °C σχηματίζονται ημικρυσταλλικές δομές με άριστες ιδιότητες.

3.3. Ιδιότητες Γεωπολυμερών

Η τεχνολογία σύνθεσης των γεωπολυμερών είναι χαμηλού κόστους ενώ ο εξοπλισμός που απαιτείται είναι σχετικά απλός (Davidovits, 1988b; Smith and Comrie, 1988). Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες των γεωπολυμερών προϊόντων εξαρτώνται από τον τύπο, τη φυσική και τη χημική μορφή των πρώτων υλών.

Η θερμοκρασία που απαιτείται για τη σύνθεση των γεωπολυμερών κυμαίνεται μεταξύ 25 και 80 °C χωρίς άσκηση εξωτερικής πίεσης.

Η εφαρμογή εξωτερικής πίεσης γίνεται σε περιπτώσεις κατά τις οποίες το πορώδες του τελικού προϊόντος πρέπει να είναι πολύ χαμηλό για συγκεκριμένες εφαρμογές (Davidovits and Davidovics, 1988).

Τα γεωπολυμερή ανάλογα με τις συνθήκες σύνθεσής τους στερεοποιούνται σε ελάχιστο χρονικό διάστημα και αποκτούν αντοχή σε μονοαξονική θλίψη περίπου ίση με 20 MPa μετά από 4 ώρες σε θερμοκρασία δωματίου.

Συνήθως το 70 % της τελικής αντοχής αποκτάται κατά τις τέσσερις πρώτες ώρες της στερεοποίησης (Davidovits, 1994e).

Εκτός από το σύντομο χρόνο στερεοποίησης και τη χαμηλή τιμή πορώδους, σε σύγκριση με το τσιμέντο, τα γεωπολυμερή εμφανίζουν μικρό ποσοστό συρρίκνωσης κατά τη στερεοποίηση.

Τα γεωπολυμερή χαρακτηρίζονται από σκληρότητα 4-7 στην κλίμακα Mohs, είναι θερμικά σταθερά, εμφανίζουν ομοιογένεια επιφάνειας και ευκολία διάπλασης συνεπώς είναι χρήσιμα στην κατασκευή κεραμικών και στην κατασκευή κτιριακών εγκαταστάσεων (Davidovits, 1988a; 1988d).

Με τη χρήση των κατάλληλων πρώτων υλών και των βέλτιστων συνθηκών σύνθεσης, τα γεωπολυμερή αποκτούν επιθυμητές ιδιότητες

όπως υψηλή πρώιμη αντοχή και ανθεκτικότητα σε ψύξη και θέρμανση (Davidovits, 1988c). Επιπλέον παρουσιάζουν υψηλή ανθεκτικότητα σε διάβρωση από οξέα η οποία είναι μεγαλύτερη αυτής του τσιμέντου Portland.

Η ανθεκτικότητα των γεωπολυμερών σε υψηλές θερμοκρασίες έχει πολύ μεγάλη σημασία γιατί ενώ δεν επηρεάζεται η αντοχή τους, και δεν διασπώνται έως τους 1000 °C σε αντίθεση με το σκυρόδεμα που αρχίζει να διασπάται στους 300 °C (Davidovits, 1999c; Kurz et al., 1999).

Τα γεωπολυμερή υλικά μπορούν να βρουν μεγάλο εύρος βιομηχανικών χρήσεων λόγω των φυσικών, χημικών και μηχανικών ιδιοτήτων τους.

Τα γεωπολυμερή αποτελούν μια νέα κατηγορία υλικών, που εκτός από πολύ καλές μηχανικές αντοχές εμφανίζουν βελτιωμένες και πολλές άλλες ιδιότητες σε σχέση με τα συμβατικά δομικά υλικά.

Μερικές από αυτές τις ιδιότητες των γεωπολυμερών προϊόντων που έχουν μελετηθεί από ερευνητές είναι:

- Η υψηλή μηχανική αντοχή λόγω του αργιλοπυριτικού άμορφου δικτύου,
- Η ανθεκτικότητα στη θέρμανση και στη φωτιά (θερμική καταπόνηση),
- Η σταθερότητα σε θερμοκρασίες πάνω από 1200-1400 °C, λόγω του νανοπορώδους που επιτρέπει στο φυσικά και χημικά συνδεδεμένο νερό να μετακινείται και να εξατμίζεται χωρίς να καταστρέφει το υλικό,
- Η χαμηλή θερμική διαστολή σε θερμοκρασίες μέχρι 800 °C,
- Το μικρό πορώδες,
- Οι υψηλές αρχικές αντοχές,
- Ο σύντομος χρόνος στερεοποίησης και η αμελητέα συρρίκνωση,
- Η ανθεκτικότητα στα οξέα και στη διάβρωση,
- Η καλή ανθεκτικότητα σε εναλλαγές (κύκλους) ψύξης-θέρμανσης,
- Η μεγάλη σκληρότητα κατά Mohs,
- Η προσροφητική ικανότητα,
- Η χαμηλή υδροπερατότητα, ιδιότητα που καθιστά τα γεωπολυμερή κατάλληλα για αδρανοποίηση βαρέων και τοξικών μετάλλων,
- Η σημαντική αντοχή στη θραύση,
- Η καλή συνάφεια με άλλα υλικά, και συγκεκριμένα, τα γεωπολυμερή με λόγο Si/Al =2, με τα φυσικά πετρώματα και τα γεωπολυμερή με λόγο Si / Al >20 με μέταλλα,

- Η μικροπορώδης δομή η οποία διαπιστώνεται από την μικρή φαινόμενη πυκνότητα,
- Η ευκολία μορφοποίησης του γεωπολυμερικού μίγματος,
- Η χαμηλού κόστους τεχνολογία της σύνθεσής τους και ο απλός εξοπλισμός.

3.4. Χρήσεις Γεωπολυμερών

Η χρήση γεωπολυμερών προϊόντων που παράγονται από βιομηχανικά και άλλα απόβλητα, αυξάνεται συνεχώς και έτσι η διερεύνηση για την κατανόηση της δομής τους γίνεται όλο και πιο επιτακτική.

Τα γεωπολυμερή λόγω των μηχανικών ιδιοτήτων τους, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και να βρουν εφαρμογές στο βιομηχανικό τομέα. Χρησιμοποιούνται σε πολλούς τομείς όπως η βιομηχανία πλαστικών, τα χυτήρια, τα δομικά έργα.

Τα γεωπολυμερή προϊόντα χρησιμοποιούνται ως οικοδομικά υλικά υψηλής αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες, ανθεκτικά στη διάβρωση σε όξινα περιβάλλοντα, ως πλάκες επίστρωσης (Heidrich, 2002).

Χρησιμοποιούνται επίσης ως προϊόντα με ιδιότητες συγκρίσιμες με αυτές του τσιμέντου, όπως υψηλή αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, ταχεία στερεοποίηση, χαμηλή υδατοπερατότητα, αντοχή στη διάβρωση από οξέα. Επίσης λόγω του χαμηλού κόστους σύνθεσης τα γεωπολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιπλέον και στις ακόλουθες εφαρμογές:

1. Στην κατασκευή δομικών επιφανειών.
2. Στην κατασκευή και αντικατάσταση δομικών υλικών όπως τα τούβλα, με παραπλήσιες ή και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες.
3. Στην κατασκευή φραγμάτων, ή έργων εκτροπής υδάτων.
4. Στην επιφανειακή κάλυψη ΧΥΤΑ και ανεξέλεγκτων χώρων διάθεσης αποβλήτων (ΧΑΔΑ) λόγω της πολύ μικρής υδατοπερατότητας και της αντοχής τους στη διαβρώση.
5. Στην ενδιάμεση κάλυψη αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής αποβλήτων (ΧΥΤΑ).
6. Ως υλικά μόνωσης πυθμένα και πρανών ΧΥΤΑ λόγω της χαμηλής υδατοπερατότητας που εμφανίζουν.
7. Ως υλικά κατασκευής πεζοδρομίων λόγω χαμηλού κόστους.
8. Ως υλικό στερεοποίησης και σταθεροποίησης επικίνδυνων αποβλήτων.

Κεφάλαιο: 4. Παρουσίαση του Θέματος

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στις παραγράφους 2.1, 2.2 και 2.3 του Κεφαλαίου 2 για τη διαχείριση των αποβλήτων έχουν θεσπιστεί μέτρα, πολιτικές και κατευθύνσεις σύμφωνα με τις οποίες:

- Επιβάλλεται η ανάκτηση υλικών από τα απόβλητα και η ανακύκλωσή τους πριν αυτά διατεθούν σε χώρους ταφής,
- Επιβάλλεται τέλος ταφής για τα απόβλητα που δεν έχουν υποστεί εργασίες ανάκτησης και διατίθενται ανεπεξέργαστα σε ΧΥΤΑ,
- Το τέλος ταφής έχει προσδιοριστεί μεταξύ των άλλων αποβλήτων και στα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΚΚ),
- Προωθείται η στρατηγική της ΕΕ για τους φυσικούς πόρους σύμφωνα με την οποία τα απόβλητα αντιμετωπίζονται ως πόροι αντικαθιστώντας τους φυσικούς πόρους προκειμένου να οδηγηθεί η ΕΕ σε μια κοινωνία της ανακύκλωσης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην έρευνα για την αντικατάσταση των φυσικών πόρων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή δομικών υλικών με την αξιοποίηση των αποβλήτων.

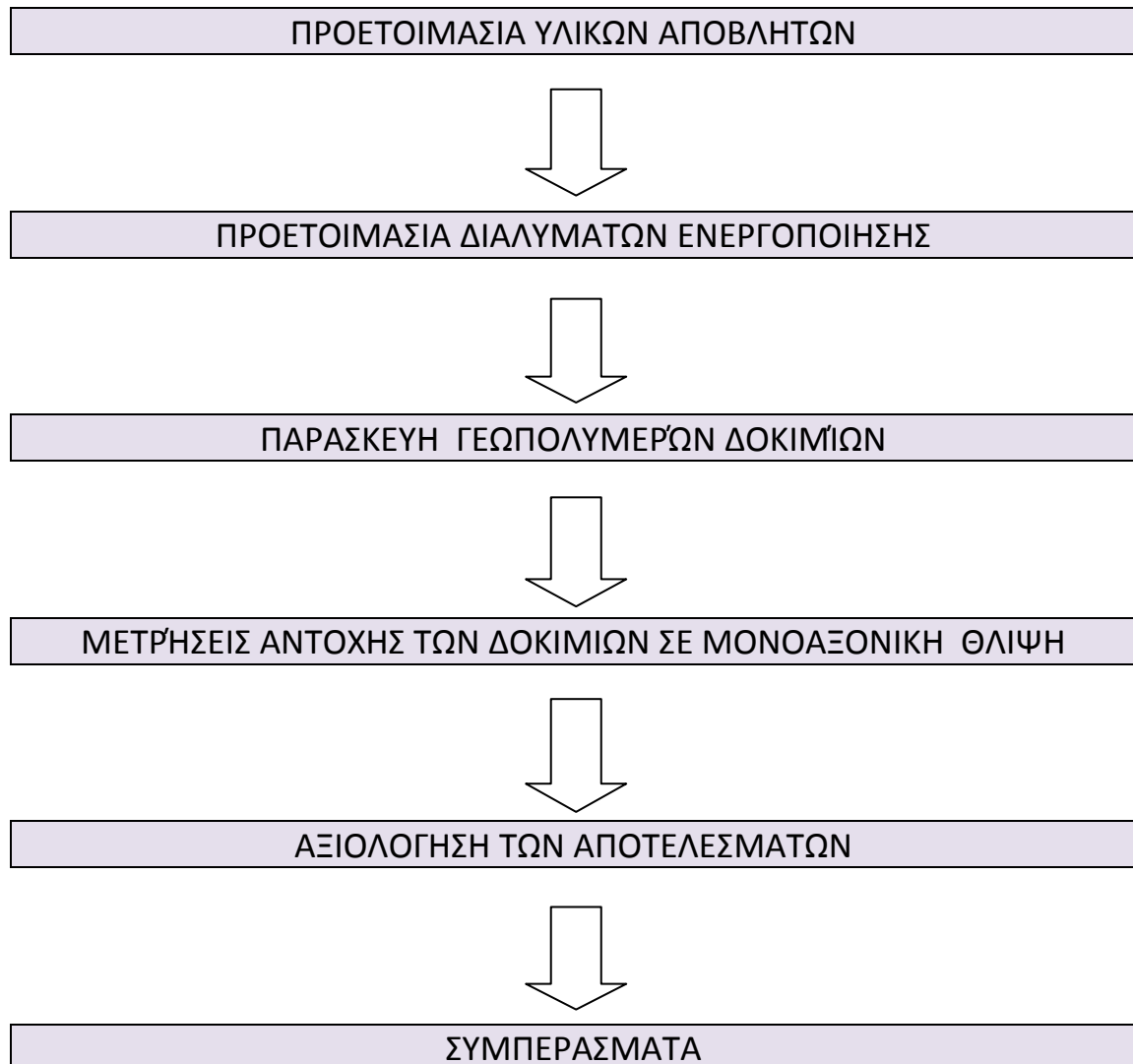
Η πειραματική εργασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό να παραχθούν γεωπολυμερή υλικά, από βιομηχανικά απόβλητα και από απόβλητα κατασκευών & κατεδαφίσεων και να διαπιστωθεί:

- Αν είναι εφικτό να ανακυκλωθούν, απόβλητα κατασκευών - κατεδαφίσεων και βιομηχανικά απόβλητα, και να μετατραπούν σε νέα δομικά προϊόντα (γεωπολυμερή υλικά) κατασκευών ή άλλων χρήσεων,
- Αν τα νέα δομικά προϊόντα έχουν αντοχή υποδεέστερη, εφάμιλλη ή και καλύτερη των συμβατικών δομικών υλικών,
- Αν τα νέα δομικά προϊόντα μπορεί να είναι εμπορικώς αξιοποιήσιμα.

Η παραγωγή γεωπολυμερών υλικών-προϊόντων, με τη χρήση αποβλήτων, συνιστά υψηλού επιπέδου ανακύκλωση για τα απόβλητα της βιομηχανίας και τα απόβλητα κατασκευών & κατεδαφίσεων.

Σχηματικά η παρούσα διπλωματική εργασία αποτυπώνεται στο σχήμα 4.1 που ακολουθεί:

Ανακύκλωση και Εμπορική Αξιοποίηση Αποβλήτων Κατασκευών και Κατεδαφίσεων



Σχήμα 4.1: Σχηματική παρουσίαση της διπλωματικής εργασίας.

Κεφάλαιο 5: Πειραματικό Μέρος

5.1. Σχεδιασμός πειραμάτων

5.1.1. Γενικά

Για την παρασκευή των γεωπολυμερών τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κυρίως βιομηχανικά απόβλητα και απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω απόβλητα με τους αντίστοιχους κωδικούς του Ευρωπαϊκού Καταλόγου Αποβλήτων (ΕΚΑ) (Πίνακα 5.1):

Πίνακας 5.1 Απόβλητα που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνθεση των γεωπολυμερών

α/α	Απόβλητα υλικά	Κωδ. ΕΚΑ
1	Σκυρόδεμα από κατεδαφίσεις κτιρίων	17 01 01
2	Τούβλα από κατεδαφίσεις κτιρίων	17 01 02
3	Πλακάκια από κατεδαφίσεις κτιρίων	17 01 03
4	Ιπτάμενη τέφρα λιγνιτικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής Πτολεμαΐδας	10 01 02
5	Σκωρία ηλεκτροκαμίνων ΛΑΡΚΟ	10 08 09

[http://www.minenv.gr/anakyklosi/law/00/EU.katalogos\(EKA\).pdf](http://www.minenv.gr/anakyklosi/law/00/EU.katalogos(EKA).pdf)

Στον πίνακα 5.2 παρουσιάζονται τα πρόσθετα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνθεση των γεωπολυμερών.

Πίνακας 5.2 Πρόσθετα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνθεση των γεωπολυμερών

α/α	Πρόσθετα Υλικά	Ρόλος
1	NaOH	διάλυμα ενεργοποίησης
2	KOH	διάλυμα ενεργοποίησης
3	NaSiO ₃	αλκαλικός ενεργοποιητής
4	H ₂ O	Διάλυμα
5	Χαλαζιακή Άμμος	Συνδετικό υλικό

Με τα πρόσθετα υλικά πυριτικό νάτριο (Na₂SiO₃) και καυστικό νάτριο (NaOH) ή καυστικό κάλιο (KOH) παρασκευάζεται το διάλυμα ενεργοποίησης.

5.1.2 Χαρακτηρισμός των υλικών.

5.1.2.1 Διάλυμα ενεργοποίησης

Το διάλυμα ενεργοποίησης παρασκευάζεται μετά από διαλυτοποίηση pellets (NaOH) ή (KOH) υψηλής καθαρότητας (ACS-ISO for analysis) σε απιονισμένο νερό και ανάμιξη με διάλυμα πυριτικού νατρίου (Merck, $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2 = 0,3$).

Η σύσταση του διαλύματος πυριτικού νατρίου δίνεται στον Πίνακα 5.3

Πίνακας 5.3: Σύσταση διαλύματος Na_2SiO_3

SiO_2	25,5–28,5 %
Na_2O	7,5 – 8,5 %
Fe	$\leq 0,005$ %
Pb	$\leq 0,005$ %
ε.β (g/mL)	1,3 – 1,4

5.1.2.2 Απόβλητα υλικά

Η χημικές συστάσεις των πρώτων υλών (απόβλητα-υλικά) φαίνονται στους παρακάτω Πίνακες 5.4, 5.5 και 5.6.

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με περιθλασίμετρο τύπου Bruker D8 Advance με χρήση λυχνίας Cu. Το φάσμα σάρωσης κυμαίνεται από 3° έως $70^\circ 2\theta$, με βήμα 0.03° και χρόνο μέτρησης 4 δευτερόλεπτα/βήμα. Η ποιοτική ανάλυση πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού Diffraction Plus (Bruker) και τη βάση δεδομένων PDF.

Οι χημικές συστάσεις των προσθετικών υλικών προσδιορίστηκαν χρησιμο-ποιώντας φασματομέτρο ακτίνων-X διασκορπιζόμενης ενέργειας (XRF-EDS) Bruker-AXS τύπου S2 Range στο εργαστήριο Ανόργανης Γεωχημείας, Οργανικής Γεωχημείας & Οργανικής Πετρογραφίας.

Πίνακας 5.4: Χημική σύσταση πρώτων υλών

%	Σκυρόδεμα (S)	Τούβλα (T)	Πλακάκια (P)
Na ₂ O	0,57	1,03	-
MgO	4,21	4,75	4,46
K ₂ O	1,26	2,80	1,37
CaO	65,42	8,79	8,78
MnO	0,01	0,05	0,06
Fe ₂ O ₃	0,75	6,00	5,39
Al ₂ O ₃	1,49	14,95	9,80
SiO ₂	5,81	57,79	70,54
P ₂ O ₅	0,73	0,23	-
SO ₃	0,82	-	-
TiO ₂	0,03	0,85	0,77
LOI	21,59	1,89	0,23
Σύνολο	102,68	99,12	101,41

Πίνακας 5.5: Τυπική χημική σύσταση σκωρίας σιδηρονικελίου
ΛΑΡΚΟ

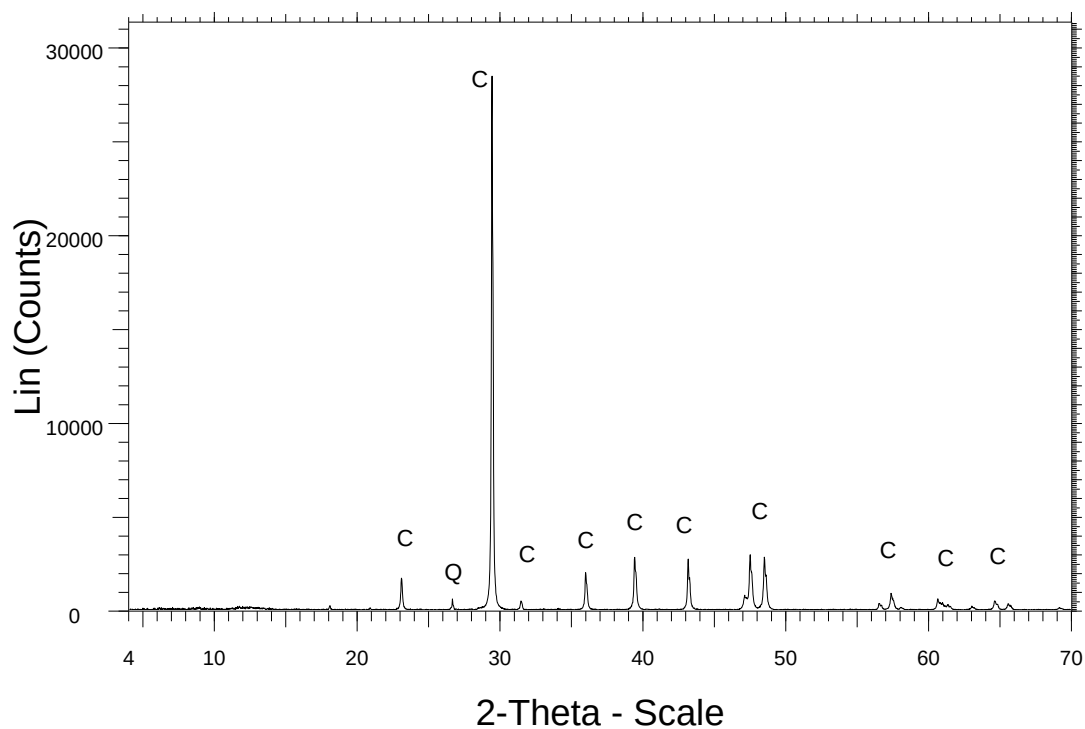
Συστατικά	%
Fe ₂ O ₃ (tot)	43,83
SiO ₂	32,74
Al ₂ O ₃	8,32
CaO	3,73
Cr ₂ O ₃	3,07
MgO	2,76
MnO	0,41
S	0,18
C	0,11
Ni	0,10
Co	0,02
Σύνολο	95,27

Πίνακας 5.6: Τυπική χημική σύσταση Ιπτάμενης Τέφρας Λιγνιτικού Σταθμού Ηλεκτροπαραγωγής Πτολεμαΐδας

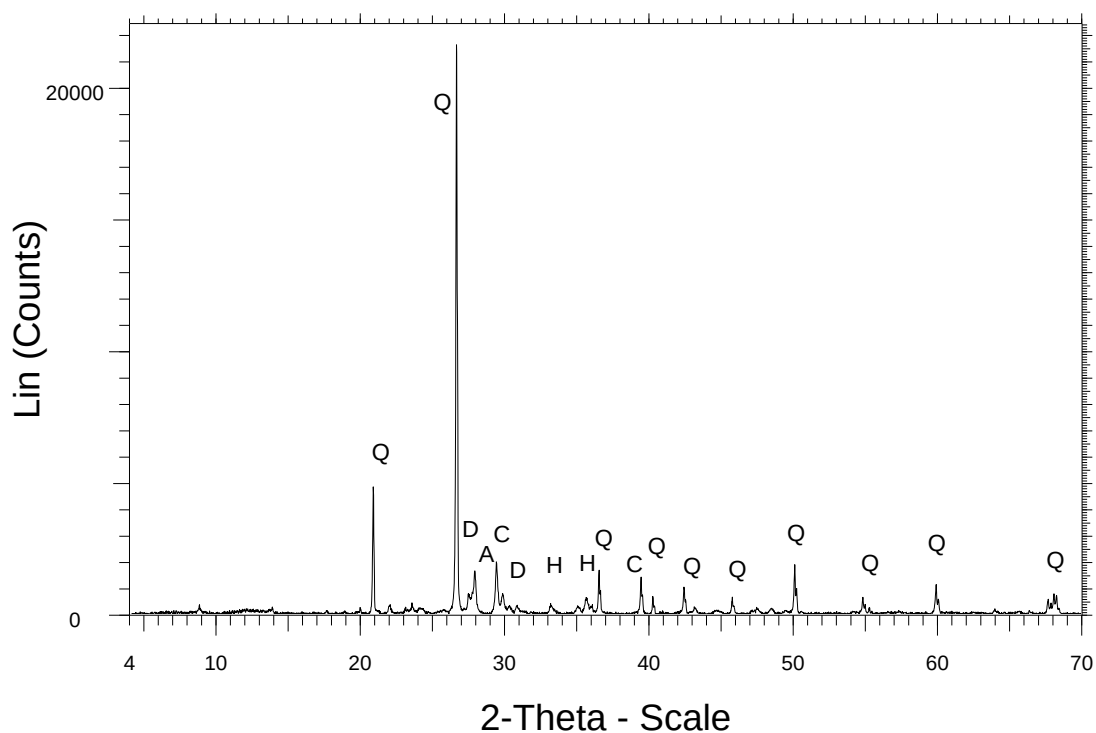
Συστατικά	%
Fe ₂ O ₃ (tot)	5,60
SiO ₂	33,40
Al ₂ O ₃	13,10
CaO	31,85
MgO	3,67
MnO	0,18
Na ₂ O	0,46
K ₂ O	0,76
P ₂ O ₅	-
TiO ₂	0,71
SO ₃	6,58
CO ₂	-
LOI	2,70
Σύνολο	99,01

5.1.2.3 Ορυκτολογική σύσταση

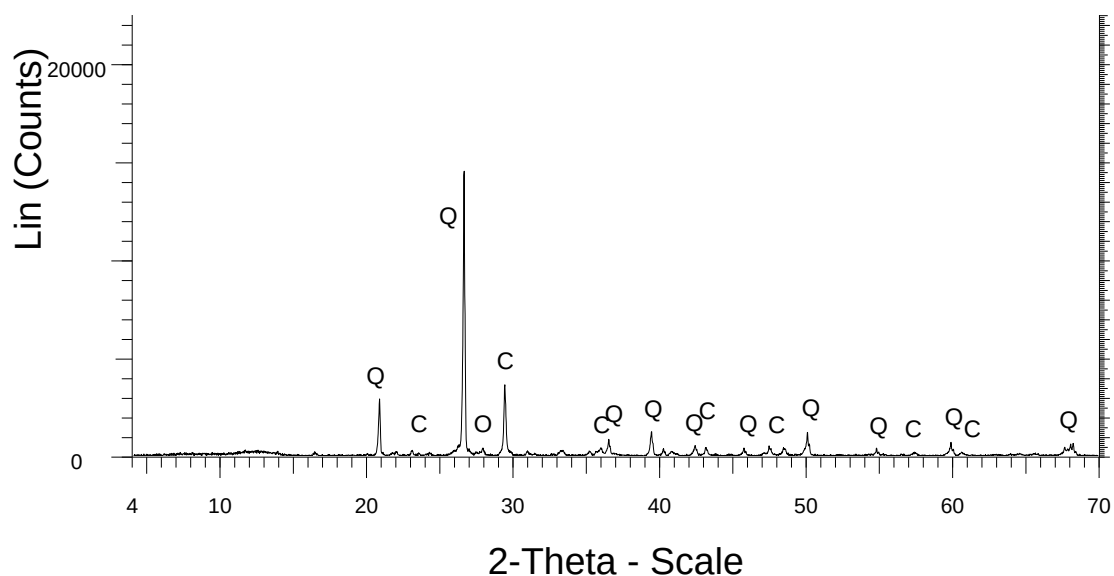
Στα Σχήματα 5.1-5.3 απεικονίζονται τα διαγράμματα XRD αντιπροσωπευτικών δειγμάτων από σκυρόδεμα, τούβλα και πλακάκια, αντίστοιχα. Από τα σχήματα αυτά προκύπτει ότι το σκυρόδεμα αποτελείται κυρίως από ασβεστίτη και μικρές ποσότητες χαλαζία. Στα τούβλα εντοπίζεται χαλαζίας, ασβεστίτης, αιματίτης, διοψίδιος και αλβίτης, ενώ τα πλακάκια περιέχουν χαλαζία, ασβεστίτη, γύψο και ορθόκλαστο.



Σχήμα 5.1: XRD αντιπροσωπευτικού δείγματος σκυροδέματος από κατεδάφιση (Q: χαλαζίας SiO_2 , C: ασβεστίτης CaCO_3)



Σχήμα 5.2: XRD αντιπροσωπευτικού δείγματος τούβλων από κατεδάφιση (Q: χαλαζίας SiO_2 , C: ασβεστίτης CaCO_3 , H: αιματίτης Fe_2O_3 , D: διοψίδιος $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$, A: αλβίτης $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)



Σχήμα 5.3: XRD αντιπροσωπευτικού δείγματος πλακιδίων κατεδάφισης (Q: χαλαζίας SiO_2 , C: ασβεστίτης CaCO_3 , O: ορθόκλαστο AlSi_3O_8)

5.1.2.4 Κοκκομετρία

Η κοκκομετρία των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζεται στον πίνακα 5.7.

Πίνακας 5.7 : Κοκκομετρία υλικών

Σκυρόδεμα	S	< 410 μm	d_{50} : 48 μm
Τούβλα	T	< 351 μm	d_{50} : 35 μm
Πλακάκια	P	< 477 μm	d_{50} : 76 μm

Η προαναφερόμενη κοκκομετρία των αποβλήτων-υλικών επιτεύχθηκε μετά την λειοτρίβησή τους σε μύλο τύπου UA Pulverizer της εταιρείας Bico.

5.2. Πειραματική διαδικασία

Η διαδικασία παρασκευής γεωπολυμερών για κάθε σειρά ήταν ίδια. Η διαδικασία έχει ως εξής:

1. Τα “απόβλητα” λειοτριβήθηκαν το καθένα χωριστά έτσι ώστε να αποκτήσουν την κατάλληλη κοκκομετρία.
2. Η λειοτρίβηση των υλικών ήταν αναγκαία και έγινε για να αυξηθεί η ειδική επιφάνεια και επομένως η ταχύτητα αντίδρασης γεωπολυμερισμού.
3. Παρασκευάστηκαν υδατικά διαλύματα καυστικού καλίου (ΚΟΗ) και καυστικού νατρίου (ΝαΟΗ) σε διάφορες συγκεντρώσεις. Το διάλυμα ενεργοποίησης συνεισφέρει στη διαλυτοποίηση των πρώτων υλών. Μετά την παρασκευή τους τα διαλύματα αυτά τοποθετήθηκαν για 24 ώρες σε μαγνητικούς αναδευτήρες έτσι ώστε να ομογενοποιηθούν πλήρως.
4. Παρασκευάστηκαν 6 υδατικά διαλύματα με H_2O και ΚΟΗ, με συγκεντρώσεις 4M, 6M, 8M, 10M, 12M, 14M σε ΚΟΗ αντίστοιχα, και 6 υδατικά διαλύματα με H_2O και ΝαΟΗ με συγκεντρώσεις 4M, 6M, 8M, 10M, 12M, 14M σε ΝαΟΗ.
5. Παρασκευάστηκαν γεωπολυμερικά μίγματα σε διάφορους συνδυασμούς “αποβλήτων-υλικών” με “πρόσθετα υλικά” που ήταν αναγκαία για τον γεωπολυμερισμό. Με τους συνδυασμούς που έγιναν σχηματίστηκαν δεκατρείς (13) σειρές γεωπολυμερικών μιγμάτων. Η κάθε σειρά είχε συγκεκριμένο “απόβλητο-υλικό” ή συνδυασμό “αποβλήτων-υλικών” και συγκεκριμένα “πρόσθετα υλικά”.
6. Για τις πρώτες έξι (6) σειρές παρασκευάστηκαν έξι (6) μίγματα διαφορετικής ποιοτικής και ποσοτικής σύστασης για την κάθε μια.
7. Για τις επόμενες επτά (7) σειρές παρασκευάστηκαν από δύο μίγματα διαφορετικής ποιοτικής και ποσοτικής σύστασης.
8. Η κάθε σειρά κωδικοποιήθηκε με τα αρχικά των συστατικών που συμμετείχαν στο μίγμα.
9. Κάθε ένα διάλυμα ενεργοποίησης διαφορετικής συγκέντρωσης σε ΚΟΗ ή ΝαΟΗ αναδεύτηκε με την απαιτούμενη ποσότητα διαλύματος “αλκαλικού ενεργοποιητή” Na_2SiO_3 και λειοτριβημένων υλικών (απόβλητα-υλικά & πρόσθετα-υλικά) σε μίξερ, έτσι ώστε να επέλθει ομοιογένεια και να σχηματιστεί πολφός. Ως διάλυμα αλκαλικού ενεργοποιητή χρησιμοποιήθηκε πυριτικό νάτριο Na_2SiO_3 το οποίο δρα ως συνδετικό υλικό.

10. Παρασκευάστηκε ένας πολφός για κάθε μία τιμή συγκέντρωσης ΚΟΗ ή NaOH στο υδατικό διάλυμα. Ο πολφός διοχετεύτηκε σε κυβικές μήτρες διαστάσεων 50mm x 50mm x 50mm.
11. Για κάθε διαφορετική τιμή συγκέντρωσης (ΚΟΗ) ή (NaOH) παρασκευάστηκε ικανή ποσότητα γεωπολυμερικού πολφού για την παρασκευή δύο (2) γεωπολυμερικών δοκιμίων για λόγους επαναληψιμότητας.
12. Οι μήτρες πριν σφραγιστούν με καπάκι δονήθηκαν για να απομακρυνθούν οι φυσαλίδες αέρα που ενδέχεται να είχαν εγκλωβιστεί κατά τη διαδικασία της ανάμιξης και τα δοκίμια να αποκτήσουν κυβικό σχήμα.
13. Τα δοκίμια παρέμειναν να ωριμάσουν σε θερμοκρασία δωματίου (περίπου 25 °C) για χρονική περίοδο δύο (2) ημερών σε κατάλληλο περιτύλιγμα. Στόχος ήταν να αποφευχθεί η ταχεία εξάτμιση του περιεχόμενου νερού, το οποίο συμβάλλει στην ολοκλήρωση των γεωπολυμερικών αντιδράσεων ώστε να βελτιωθεί η τελική μηχανική αντοχή.
14. Μετά τον απαιτούμενο χρόνο ωρίμανσης, τα δοκίμια του γεωπολυμερικού μίγματος θερμάνθηκαν σε θερμοκρασία 60 °C σε εργαστηριακό φούρνο (ELVEM ή MMM GmbH) για 48 ώρες.
15. Στη συνέχεια, τα δοκίμια απομακρύνθηκαν από τις μήτρες, έχοντας ήδη αποκτήσει ικανοποιητική σκληρότητα, και παρέμειναν και πάλι σε θερμοκρασία δωματίου για 7 ημέρες, ώστε να αποκτήσουν ικανοποιητική δομική συνοχή.
16. Μετρήθηκαν οι διαστάσεις των δοκιμίων κυρίως της επιφάνειας των ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σε kN / m^2 και να εξαχθούν τα αποτελέσματα σε $\text{MPa} = \text{kN}/\text{m}^2$.
17. Στη συνέχεια τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.
18. Κατόπιν συγκρίθηκαν οι αντοχές αυτές με τις αντοχές των πρότυπων δομικών υλικών και εξήχθηκαν συμπεράσματα για την καταλληλότητά τους ως προς την χρήση τους σαν νέα δομικά υλικά κατασκευών

Με την παραπάνω διαδικασία προετοιμάστηκαν οι παρακάτω σειρές γεωπολυμερών:

Σειρά 1η: Κωδικός Σειράς ΣΚ

Τα γεωπολυμερή αποτελούνται από **Σκυρόδεμα** (απόβλητο) με διάλυμα ενεργοποίησης ΚΟΗ διαφορετικών συγκεντρώσεων και με αλκαλικό ενεργοποιητή Na_2SiO_3 . Παρασκευάστηκαν διπλά δοκίμια για λόγους επαναληψιμότητας.

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν είναι: **ΣΚ4Μ₁, ΣΚ4Μ₂, ΣΚ6Μ₁, ΣΚ6Μ₂, ΣΚ8Μ₁, ΣΚ8Μ₂, ΣΚ10Μ₁, ΣΚ10Μ₂, ΣΚ12Μ₁, ΣΚ12Μ₂, ΣΚ14Μ₁, ΣΚ14Μ₂**.

Η ποσοτική σύσταση των δοκιμίων φαίνεται στον πίνακα 5.8.

Πίνακας 5.8: Ποσοτική σύσταση δοκιμών Σκυροδέματος ΣΚ

Κωδ. Μίγματος Υλικά	Δοκίμια ΣΚ4Μ ₁ &ΣΚ4Μ ₂		Δοκίμια ΣΚ6Μ ₁ &ΣΚ6Μ ₂		Δοκίμια ΣΚ8Μ ₁ &ΣΚ8Μ ₂		Δοκίμια ΣΚ10Μ ₁ &ΣΚ10Μ ₂		Δοκίμια ΣΚ12Μ ₁ &ΣΚ12Μ ₂		Δοκίμια ΣΚ14Μ ₁ &ΣΚ14Μ ₂	
	Σύσταση %	Βάρος (g)	Σύσταση %	Βάρος (g)	Σύσταση %	Βάρος (g)	Σύσταση %	Βάρος (g)	Σύσταση %	Βάρος (g)	Σύσταση %	Βάρος (g)
[ΚΟΗ]	4Μ	4Μ	6Μ	6Μ	8Μ	8Μ	10Μ	10Μ	12Μ	12Μ	14Μ	14Μ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	80,7	460	78,7	425	77,97	424	77,15	422	77,73	452	76,75	444
H ₂ O	7,72	44	8,15	44	8,09	44	8,04	44	7,57	44	7,61	44
ΚΟΗ	1,75	10	2,78	15	3,64	19,8	4,57	25	5,07	29,5	5,96	34,5
Na ₂ SiO ₃	9,82	56	10,37	56	10,3	56	10,24	56	9,63	56	9,68	56
ΣΥΝΟΛΟΝ	100	570	100	540	100	543,8	100	547	100	581,5	100	578

Οι διαφορές που παρατηρούνται στο συνολικό βάρος κάθε ζεύγους δοκιμών οφείλονται στις διαφορετικές συγκεντρώσεις (Μ) του αλκαλικού διαλύματος και στο διαφορετικό ποσοστό συμμετοχής της πρώτης ύλης.



Εικόνα 5.1. Δοκίμια Σκυροδέματος 8M ΚΟΗ: Τα δοκίμια είχαν κανονικό κυβικό σχήμα, ήταν συμπαγή, οι επιφάνειες τους ήταν ομαλές, δεν παρατηρήθηκαν ρωγμές, το χρώμα τους ήταν γκρί ανοικτό και κατά την εξαγωγή τους από τις μήτρες δεν αλλοιώθηκαν οι ακμές τους.



Εικόνα 5.2. Δοκίμια Σκυροδέματος 14M ΚΟΗ: Τα δοκίμια είχαν κανονικό κυβικό σχήμα, ήταν συμπαγή, οι επιφάνειες τους ήταν ομαλές, δεν παρατηρήθηκαν ρωγμές, κατά την εξαγωγή τους από τις μήτρες δεν αλλοιώθηκαν οι ακμές τους και το χρώμα τους ήταν σκούρο.

Σειρά 2η: Κωδικός Σειράς ΣΝ

Τα γεωπολυμερή αποτελούνται από **Σκυρόδεμα** (απόβλητο – υλικό) με διάλυμα ενεργοποίησης NaOH διαφορετικών συγκεντρώσεων και με αλκαλικό ενεργοποιητή Na_2SiO_3 . Παρασκευάστηκαν διπλά δοκίμια για λόγους επαναληψιμότητας.

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν είναι: **ΣΝ4Μ₁, ΣΝ4Μ₂, ΣΝ6Μ₁, ΣΝ6Μ₂, ΣΝ8Μ₁, ΣΝ8Μ₂, ΣΝ10Μ₁, ΣΝ10Μ₂, ΣΝ12Μ₁, ΣΝ12Μ₂, ΣΝ14Μ₁, ΣΝ14Μ₂**

Η ποσοτική σύσταση των δοκιμίων φαίνεται στον πίνακα 5.9.

Πίνακας 5.9: Ποσοτική σύσταση δοκιμίων Σκυροδέματος ΣΝ

Κωδ. Μίγματος Υλικά	Δοκίμια ΣΝ4Μ ₁ &ΣΝ4Μ ₂		Δοκίμια ΣΝ6Μ ₁ &ΣΝ6Μ ₂		Δοκίμια ΣΝ8Μ ₁ &ΣΝ8Μ ₂		Δοκίμια ΣΝ10Μ ₁ &ΣΝ10Μ ₂		Δοκίμια ΣΝ12Μ ₁ &ΣΝ12Μ ₂		Δοκίμια ΣΝ14Μ ₁ &ΣΝ14Μ ₂	
	Σύσταση %	Βάρος (g)	Σύσταση %	Βάρος (g)	Σύσταση %	Βάρος (g)	Σύσταση %	Βάρος (g)	Σύστασ η %	Βάρος (g)	Σύσταση %	Βάρος (g)
NaOH	4M	4M	6M	6M	8M	8M	10M	10M	12M	12M	14M	14M
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	78,2	386	77,2	375	75,5	353	76,7	359	75,6	378	71,2	309
H ₂ O	8,9	44	9,06	44	9,42	44	9,23	44	8,8	44	10,17	44
NaOH	1,4	7	2,16	10,5	2,99	14	3,6	17,5	4,4	22	5,65	24,5
Na ₂ SiO ₃	11,3	56	11,5	56	11,9	56	11,7	56	11,2	56	12,9	56
ΣΥΝΟΛΟΝ	100	493	100	485,5	100	467	100	476,5	100	500	100	433,5

Οι διαφορές που παρατηρούνται στο συνολικό βάρος κάθε ζεύγους δοκιμίων οφείλονται στις διαφορετικές συγκεντρώσεις (M) του αλκαλικού διαλύματος και στο διαφορετικό ποσοστό συμμετοχής της πρώτης ύλης.



Εικόνα 5.3. Δοκίμια Σκυροδέματος NaOH: Τα δοκίμια είχαν κανονικό κυβικό σχήμα, ήταν συμπαγή, οι επιφάνειες των ήταν ομαλές, δεν παρατηρήθηκαν ρωγμές, κατά την εξαγωγή τους από τις μήτρες δεν αλλοιώθηκαν οι ακμές τους και το χρώμα τους ήταν γκρί ανοιχτό.

Σειρά 3η: Κωδικός Σειράς TK

Τα γεωπολυμερή αποτελούνται από **Τούβλα** (απόβλητο) με υδατικά διαλύματα ενεργοποίησης KOH (διαφορετικών συγκεντρώσεων) και με αλκαλικό ενεργοποιητή Na_2SiO_3 . Παρασκευάστηκαν διπλά δοκίμια για λόγους επαναληψιμότητας.

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν είναι: **TK4M₁, TK4M₂, TK6M₁, TK6M₂, TK8M₁, TK8M₂, TK10M₁, TK10M₂, TK12M₁, TK12M₂, TK14M₁, TK14M₂.**

Η ποσοτική σύσταση των δοκιμών φαίνεται στον πίνακα 5.10.

Πίνακας 5.10: Ποσοτική σύσταση δοκιμίων Τούβλων ΤΚ

Κωδ. Μίγματος Υλικά	Δοκίμια TK4M ₁ &TK4M ₂		Δοκίμια TK6M ₁ &TK6M ₂		Δοκίμια TK8M ₁ &TK8M ₂		Δοκίμια TK10M ₁ &TK10M ₂		Δοκίμια TK12M ₁ &TK12M ₂		Δοκίμια TK14M ₁ &TK14M ₂	
	σύσταση %	Βάρος (g)	σύσταση %	Βάρος (g)	σύσταση %	Βάρος (g)	σύσταση %	Βάρος (g)	σύσταση %	Βάρος (g)	σύσταση %	Βάρος (g)
[ΚΟΗ]	4M	4M	6M	6M	8M	8M	10M	10M	12M	12M	14M	14M
ΤΟΥΒΛΑ	70,6	398	68,1	369	67,9	381	70,9	457	69,1	438	68,9	449
H ₂ O	11,7	66	12,1	66	11,7	66	10,2	66	10,4	66	10,1	66
ΚΟΗ	2,6	15	4,1	22,5	5,3	30	5,8	37,5	7,1	45	7,98	52
Na ₂ SiO ₃	14,9	84	15,5	84	14,9	84	13,03	84	13,2	84	12,9	84
ΣΥΝΟΛΟΝ	100	563	100	541,5	100	561	100	644,5	100	633	100	651

Οι διαφορές που παρατηρούνται στο συνολικό βάρος κάθε ζεύγους δοκιμίων οφείλονται στις διαφορετικές συγκεντρώσεις (M) του αλκαλικού διαλύματος και στο διαφορετικό ποσοστό συμμετοχής της πρώτης ύλης.

Σειρά 4η: Κωδικός Σειράς TN

Τα γεωπολυμερή αποτελούνται από **Τούβλα** (απόβλητο) με διάλυμα ενεργοποίησης NaOH διαφορετικών συγκεντρώσεων και με αλκαλικό ενεργοποιητή Na_2SiO_3 . Παρασκευάστηκαν διπλά δοκίμια για λόγους επαναληψιμότητας.

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν είναι: **TN4M₁, TN4M₂, TN6M₁, TN6M₂, TN8M₁, TN8M₂, TN10M₁, TN10M₂, TN12M₁, TN12M₂, TN14M₁, TN14M₂**.

Η ποσοτική σύσταση των δοκιμίων φαίνεται στον πίνακα 5.11.

Πίνακας 5.11: Ποσοτική σύσταση δοκιμίων Τούβλων TN

Κωδ. Μίγματος Υλικά	Δοκίμια TN4M ₁ &TN4M ₂		Δοκίμια TN6M ₁ &TN6M ₂		Δοκίμια TN8M ₁ &TN8M ₂		Δοκίμια TN10M ₁ &TN10M ₂		Δοκίμια TN12M ₁ &TN12M ₂		Δοκίμια TN14M ₁ &TN14M ₂	
	σύσταση %	Βάρος (g)	σύσταση %	Βάρος (g)	σύσταση %	Βάρος (g)	σύσταση %	Βάρος (g)	σύστασ η%	Βάρος (g)	σύσταση %	Βάρος (g)
[NaOH]	4M	4M	6M	6M	8M	8M	10M	10M	12M	12M	14M	14M
ΤΟΥΒΛΑ	70,84	390	70,7	402	68,68	375	68,67	387	69,04	406	66,7	376
H ₂ O	11,9	66	11,6	66	12,08	66	11,7	66	11,22	66	11,7	66
NaOH	1,9	10,5	2,8	16	3,84	21	4,7	26,5	5,44	32	6,57	37
Na ₂ SiO ₃	15,2	84	14,7	84	15,38	84	14,9	84	14,28	84	14,9	84
ΣΥΝΟΛΟΝ	100	550,5	100	568	100	546	100	563,5	100	588	100	563

Οι διαφορές που παρατηρούνται στο συνολικό βάρος κάθε ζεύγους δοκιμίων οφείλονται στις διαφορετικές συγκεντρώσεις (M) του αλκαλικού διαλύματος και στο διαφορετικό ποσοστό συμμετοχής της πρώτης ύλης.

Σειρά 5η: Κωδικός Σειράς ΠΚ

Τα γεωπολυμερή αποτελούνται από **Πλακάκια** (απόβλητο) με διάλυμα ενεργοποίησης ΚΟΗ διαφορετικών συγκεντρώσεων και με αλκαλικό ενεργοποιητή Na_2SiO_3 . Παρασκευάστηκαν διπλά δοκίμια για λόγους επαναληψιμότητας.

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν είναι: **ΠΚ4Μ₁, ΠΚ4Μ₂, ΠΚ6Μ₁, ΠΚ6Μ₂, ΠΚ8Μ₁, ΠΚ8Μ₂, ΠΚ10Μ₁, ΠΚ10Μ₂, ΠΚ12Μ₁, ΠΚ12Μ₂, ΠΚ14Μ₁, ΠΚ14Μ₂**.

Η ποσοτική σύσταση των δοκιμίων φαίνεται στον πίνακα 5.12.

Πίνακας 5.12: Ποσοτική σύσταση δοκιμών Πλακιδίων ΠΚ

Κωδ. Μίγματος Υλικά	Δοκίμια ΠΚ4Μ ₁ &ΠΚ4Μ ₂		Δοκίμια ΠΚ6Μ ₁ &ΠΚ6Μ ₂		Δοκίμια ΠΚ8Μ ₁ &ΤΚ8Μ ₂		Δοκίμια ΠΚ10Μ ₁ &ΠΚ10Μ ₂		Δοκίμια ΠΚ12Μ ₁ &ΠΚ12Μ ₂		Δοκίμια ΠΚ14Μ ₁ &ΠΚ14Μ ₂	
	σύσταση %	Βάρος (g)	σύσταση %	Βάρος (g)	σύσταση %	Βάρος (g)	σύσταση %	Βάρος (g)	σύσταση %	Βάρος (g)	σύσταση %	Βάρος (g)
[ΚΟΗ]	4Μ	4Μ	6Μ	6Μ	8Μ	8Μ	10Μ	10Μ	12Μ	12Μ	14Μ	14Μ
ΠΛΑΚΑΚΙΑ	73,6	460	79,2	660	78,5	660	76,4	610	77,1	660	76,5	660
H ₂ O	10,56	66	7,92	66	7,8	66	8,27	66	7,7	66	7,65	66
ΚΟΗ	2,4	15	2,7	22,5	3,57	30	4,7	37,5	5,26	45	6,03	52
Na ₂ SiO ₃	13,44	84	10	84	10	84	10,5	84	9,8	84	9,7	84
ΣΥΝΟΛΟΝ	100	625	100	832,5	100	840	100	797,5	100	855	100	862

Οι διαφορές που παρατηρούνται στο συνολικό βάρος κάθε ζεύγους δοκιμών οφείλονται στις διαφορετικές συγκεντρώσεις (Μ) του αλκαλικού διαλύματος και στο διαφορετικό ποσοστό συμμετοχής της πρώτης ύλης.



Εικόνα 5.4. Δοκιμίων Πλακιδίων ΚΟΗ: Τα δοκίμια ήταν συμπαγή, είχαν κανονικό κυβικό σχήμα, οι επιφάνειες τους δεν ήταν ομαλές, δεν παρατηρήθηκαν ρωγμές, και το χρώμα τους ήταν καφέ σκούρο.

Σειρά 6η : Κωδικός Σειράς ΠΝ

Τα γεωπολυμερή αποτελούνται από **Πλακάκια** (απόβλητο) με διάλυμα ενεργοποίησης NaOH διαφορετικών συγκεντρώσεων και με αλκαλικό ενεργοποιητή Na_2SiO_3 . Παρασκευάστηκαν μονά δοκίμια.

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν είναι: **ΠΝ4Μ, ΠΝ6Μ, ΠΝ8Μ, ΠΝ10Μ, ΠΝ12Μ, ΠΝ14Μ.**

Η ποσοτική σύσταση των δοκιμίων φαίνεται στον πίνακα 5.13.

Πίνακας 5.13: Ποσοτική σύσταση δοκιμών Πλακιδίων ΠΝ

Κωδ. Μίγματος	Δοκίμιο ΠΝ4Μ		Δοκίμιο ΠΝ6Μ		Δοκίμιο ΠΝ8Μ		Δοκίμιο ΠΝ10Μ		Δοκίμιο ΠΝ12Μ		Δοκίμιο ΠΝ14Μ	
	σύσταση %	Βάρος (g)	σύσταση %	Βάρος (g)	σύσταση %	Βάρος (g)	σύσταση %	Βάρος (g)	σύσταση %	Βάρος (g)	σύσταση %	Βάρος (g)
Υλικά												
[NaOH]	4Μ	4Μ	6Μ	6Μ	8Μ	8Μ	10Μ	10Μ	12Μ	12Μ	14Μ	14Μ
ΠΛΑΚΑΚΙΑ	84,27	430	46	235	75,46	263	74,36	256	71,2	225	73	253
H₂O	6,4	33	10,3	33	9,46	33	9,58	33	10,4	33	9,52	33
NaOH	1	5,25	2,5	8	3	10,5	3,84	13,25	5	16	5,3	18,5
Na₂SiO₃	8,23	42	13,2	42	12,05	42	12,2	42	13,29	42	12,12	42
ΣΥΝΟΛΟΝ	100	510,2	100	318	100	348,5	100	344,2	100	316	100	346,5

Οι διαφορές που παρατηρούνται στο συνολικό βάρος κάθε δοκιμίου οφείλονται στις διαφορετικές συγκεντρώσεις (Μ) του αλκαλικού διαλύματος και στο διαφορετικό ποσοστό συμμετοχής της πρώτης ύλης.



Εικόνα 5.5. Δοκιμίων Πλακιδίων NaOH: Τα δοκίμια ήταν συμπαγή, είχαν κανονικό κυβικό σχήμα, οι επιφάνειες τους ήταν ομαλές, δεν είχαν ρωγμές, και το χρώμα τους ήταν καφέ σκούρο.

Μετά τον προσδιορισμό της αντοχής σε θλίψη συναρτήσει της συγκέντρωσης καυστικού διαλύματος, παρατηρήθηκε ότι ενδιαφέρον παρουσιάζουν τιμές αντοχής που είναι σχετικά υψηλές ώστε το γεωπολυμερές δοκίμιο να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δομικό υλικό.

Στη συνέχεια της πειραματικής διαδικασίας έγινε παραγωγή γεωπολυμερών αναμιγνύοντας τις πρώτες ύλες ΑΚΚ και χρησιμοποιώντας διάλυμα NaOH σε συγκεντρώσεις που στις προηγούμενες σειρές έδωσαν καλύτερα αποτελέσματα.

Έτσι παρασκευάστηκαν οι παρακάτω σειρές μιγμάτων και δοκιμίων αντίστοιχα:

Σειρά 7η :Κωδικός ΣΤΝ

Το γεωπολυμερές μίγμα παρασκευάστηκε χρησιμοποιώντας **Σκυρόδεμα-Τούβλα** (απόβλητα), διάλυμα ενεργοποίησης NaOH συγκέντρωσης 8M και αλκαλικό ενεργοποιητή Na_2SiO_3 .

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν είναι: **ΣΤΝ8Μ**. Η ποσοτική σύσταση του δοκιμίου φαίνεται στον πίνακα 5.14.

Πίνακας 5.14: Ποσοτική σύσταση δοκιμίου Σκυροδέματος Τούβλων ΣΤΝ8Μ

Κωδ. Μίγματος Υλικά	Δοκίμιο ΣΤΝ8Μ	
	Σύσταση %	Βάρος (g)
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	35,83	182
ΤΟΥΒΛΑ	35,83	182
H ₂ O	11,02	56
NaOH (8M)	3,54	18
Na ₂ SiO ₃	13,78	70
ΣΥΝΟΛΟΝ	100	508

Σειρά 8η: Κωδικός ΣΠΝ

Το γεωπολυμερές μίγμα παρασκευάστηκε χρησιμοποιώντας **Σκυρόδεμα-Πλακάκια** (απόβλητα), διάλυμα ενεργοποίησης NaOH συγκέντρωσης 8M και αλκαλικό ενεργοποιητή Na₂SiO₃

Το δοκίμιο που παρασκευάστηκε είναι: **ΣΠΝ8Μ**. Η ποσοτική σύσταση του δοκιμίου φαίνεται στον πίνακα 5.15.

Πίνακας 5.15: Ποσοτική σύσταση δοκιμίου Σκυροδέματος-Πλακιδίων ΣΠΝ8Μ

Κωδ. Μίγματος Υλικά	Δοκίμιο ΣΠΝ8Μ	
	Σύσταση %	Βάρος (g)
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	35,83	182
ΠΛΑΚΑΚΙΑ	35,83	182
H ₂ O	11,02	56
NaOH (8M)	3,54	18
Na ₂ SiO ₃	13,78	70
ΣΥΝΟΛΟΝ	100	508

Σειρά 9η: Κωδικός ΤΠΝ

Το γεωπολυμερές μίγμα παρασκευάστηκε χρησιμοποιώντας **Τούβλα-Πλακάκια** (απόβλητα), διάλυμα ενεργοποίησης NaOH συγκέντρωσης 8M και αλκαλικό ενεργοποιητή Na₂SiO₃.

Το δοκίμιο που παρασκευάστηκε είναι: **ΤΠΝ8Μ**. Η ποσοτική σύσταση του δοκιμίου φαίνεται στον πίνακα 5.16.

Πίνακας 5.16: Ποσοτική σύσταση δοκιμίου Τούβλων-Πλακιδίων ΤΠΝ8Μ

Κωδ. Μίγματος Υλικά	Δοκίμιο ΤΠΝ8Μ	
	Σύσταση %	Βάρος (g)
ΤΟΥΒΛΑ	35,83	182
ΠΛΑΚΑΚΙΑ	35,83	182
H ₂ O	11,02	56
NaOH (8M)	3,54	18
Na ₂ SiO ₃	13,78	70
ΣΥΝΟΛΟΝ	100	508

Σειρά 10η : Κωδικός ΣΤΠΝ

Το γεωπολυμερές μίγμα παρασκευάστηκε χρησιμοποιώντας **Σκυρόδεμα-Τούβλα-Πλακάκια** (απόβλητα), διάλυμα ενεργοποίησης NaOH συγκέντρωσης 8M και αλκαλικό ενεργοποιητή Na₂SiO₃.

Τα δοκίμιο που παρασκευάστηκε είναι: **ΣΤΠΝ8Μ**. Η ποσοτική σύσταση του δοκιμίου φαίνεται στον πίνακα 5.17.

Πίνακας 5.17: Ποσοτική σύσταση δοκιμίου Σκυροδέματος-Τούβλων-Πλακιδίων ΣΤΠΝ8Μ

Κωδ. Μίγματος Υλικά	Δοκίμιο ΣΤΠΝ8Μ	
	Σύσταση %	Βάρος (g)
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	23,92	122
ΤΟΥΒΛΑ	23,92	122
ΠΛΑΚΑΚΙΑ	23,92	122
H ₂ O	10,98	56
NaOH (8M)	3,53	18
Na ₂ SiO ₃	13,73	70
ΣΥΝΟΛΟΝ	100	510

Σειρά 11η: Κωδικός ΣΙΝ

Τα γεωπολυμερή μίγματα παρασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας **Σκυρόδεμα-Ιπτάμενη Τέφρα** (απόβλητα), διάλυμα ενεργοποίησης NaOH συγκέντρωσης 8M και αλκαλικό ενεργοποιητή Na₂SiO₃.

Παρασκευάστηκαν διπλά δοκίμια για λόγους επαναληψιμότητας.

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν είναι: **ΣΙΝ8M₁**, **ΣΙΝ8M₂**. Η ποσοτική σύσταση των δοκιμίων φαίνεται στον πίνακα 5.18.

Πίνακας 5.18: Ποσοτική σύσταση δοκιμίων Σκυροδέματος-Ιπτάμενης Τέφρας ΣΙΝ8M

Κωδ. Μίγματος Υλικά	Δοκίμιο ΣΙΝ8M ₁		Δοκίμιο ΣΙΝ8M ₂	
	Σύσταση %	Βάρος (g)	Σύσταση %	Βάρος (g)
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	67,57	300	62,22	280
ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ	6,76	30	12,44	56
H ₂ O	9,91	44	9,78	44
NaOH (8M)	3,15	14	3,11	14
Na ₂ SiO ₃	12,61	56	12,44	56
ΣΥΝΟΛΟΝ	100	444	100	450

Σειρά 12η: Κωδικός ΣΣΝ

Τα γεωπολυμερή μίγματα παρασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας **Σκυρόδεμα-Σκωρία** (απόβλητα), διάλυμα ενεργοποίησης NaOH συγκέντρωσης 8M και αλκαλικό ενεργοποιητή Na₂SiO₃. Παρασκευάστηκαν διπλά δοκίμια για λόγους επαναληψιμότητας.

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν είναι: **ΣΣΝ8M₁**, **ΣΣΝ8M₂**.

Η ποσοτική σύσταση των δοκιμίων φαίνεται στον πίνακα 5.19.

Πίνακας 5.19: Ποσοτική σύσταση δοκιμίων Σκυροδέματος-Σκωρίας ΣΣΝ8Μ

Κωδ. Μίγματος Υλικά	Δοκίμιο ΣΣΝ8Μ ₁		Δοκίμιο ΣΣΝ8Μ ₂	
	Σύσταση %	Βάρος (g)	Σύσταση %	Βάρος (g)
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	68,67	320	63,03	295
ΣΚΩΡΙΑ	6,87	32	12,61	59
H ₂ O	9,44	44	9,40	44
NaOH (8M)	3	14	2,99	14
Na ₂ SiO ₃	12,02	56	11,97	56
ΣΥΝΟΛΟΝ	100	466	100	468

Σειρά 13η: Κωδικός ΣΑΝ

Τα γεωπολυμερή μίγματα παρασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας **Σκυρόδεμα-Χαλαζιακή-Άμμο** (απόβλητα), διάλυμα ενεργοποίησης NaOH συγκέντρωσης 8M και αλκαλικό ενεργοποιητή Na₂SiO₃.

Παρασκευάστηκαν διπλά δοκίμια για λόγους επαναληψιμότητας.

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν είναι: **ΣΑΝ8Μ₁**, **ΣΑΝ8Μ₂**.

Η ποσοτική σύσταση των δοκιμίων φαίνεται στον πίνακα 5.20.

Πίνακας 5.20: Ποσοτική σύσταση δοκιμίων Σκυροδέματος- Άμμου ΣΑΝ8Μ

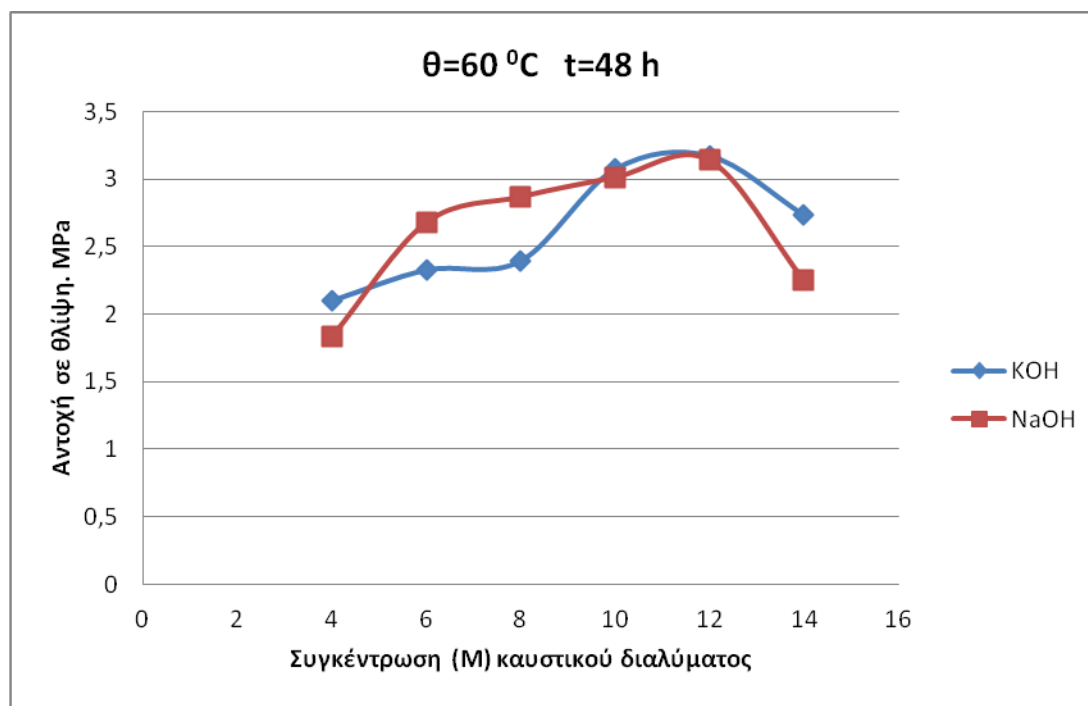
Κωδ. Μίγματος Υλικά	Δοκίμιο ΣΑΝ8Μ ₁		Δοκίμιο ΣΑΝ8Μ ₂	
	Σύσταση %	Βάρος (g)	Σύσταση %	Βάρος (g)
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	68,67	320	63,03	295
ΑΜΜΟΣ	6,87	32	12,61	59
H ₂ O	9,44	44	9,4	44
NaOH (8M)	3	14	2,99	14
Na ₂ SiO ₃	12,02	56	11,97	56
ΣΥΝΟΛΟΝ	100	466	100	468

Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα και συζήτηση

6.1. Γεωπολυμερή από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα

Τα δοκίμια από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα υποβλήθηκαν σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης. Έγιναν οι μετρήσεις και για κάθε ζεύγος δοκιμίων της κάθε σειράς και δημιουργήθηκε αντίστοιχο διάγραμμα αντοχής σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση του καυστικού διαλύματος.

Παρουσιάζονται παρακάτω τα διαγράμματα ξεχωριστά για κάθε πειραματική σειρά.



Διάγραμμα 6.1. Αντοχή σε θλίψη γεωπολυμερούς σκυροδέματος σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση του καυστικού διαλύματος

Η αύξηση της συγκέντρωσης του αλκαλικού διαλύματος NaOH και KOH μέχρι 12M επιδρά θετικά στην τελική αντοχή σε θλίψη των δοκιμίων (η μέγιστη τιμή αντοχής σε θλίψη είναι παραπλήσια, 3,17 και 3,14 MPa αντίστοιχα). Συγκέντρωση καυστικού διαλύματος 10M δίνει παραπλήσιες τιμές. Όταν η συγκέντρωση αυξηθεί σε 14M η αντοχή σε θλίψη μειώνεται.

Σύμφωνα με τη χημική σύσταση του ανακυκλωμένου σκυροδέματος, Πίνακας 5.4, και το ορυκτολογικό διάγραμμα XRD, Διάγραμμα 5.1, προκύπτει ότι:

- Το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα αποτελείται από χαλαζία (SiO_2), και ασβεστίτη (CaCO_3) και στη χημική του σύσταση μεταξύ των άλλων περιέχονται Na_2O (0.57%), K_2O (1.26%), CaO (65.42%), Al_2O_3 (1.49%) και SiO_2 (5.81%), κλπ.
- Το σκυρόδεμα δεν είναι πλούσιο σε αργιλοπυριτικές ενώσεις (λόγος $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=3,9$) με αποτέλεσμα, να μην σχηματίζεται επαρκής ποσότητα γεωπολυμερικού gel το οποίο συμβάλλει στην απόκτηση αντοχής.
- Το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε CaO (65,4%) η οποία προκαλεί μείωση της τελικής αντοχής σε θλίψη. Αυτό συμβαίνει γιατί το ασβέστιο δεν συμμετέχει στις γεωπολυμερικές αντιδράσεις αλλά αντίθετα σχηματίζει ευδιάλυτες ενώσεις (Saeed et al., 2012).
- Στα δοκίμια που προέκυψαν με χρήση καυστικού διαλύματος NaOH η αντοχή αυξάνεται μέχρι τη μέγιστη τιμή πιο απότομα σε σχέση με αυτά που έχουν (KOH). Αυτό πιθανόν συμβαίνει γιατί σε αυτά η περιεκτικότητα σε Na_2SiO_3 στο αρχικό μίγμα είναι μεγαλύτερη κατά 1% περίπου. Η αύξηση της περιεκτικότητας του πυριτικού νατρίου εκτιμάται ότι συμβάλλει στο σχηματισμό μεγαλύτερης ποσότητας γεωπολυμερικού gel.
- Η χρήση καυστικού διαλύματος σε μεγαλύτερη τιμή συγκέντρωσης από τη βέλτιστη τιμή (12M) προκαλεί μειωμένες τιμές αντοχής γιατί εκτιμάται ότι η περίσσεια του διαλύματος δεν καταναλώνεται για την δημιουργία γεωπολυμερικών δεσμών αλλά μάλλον ευδιάλυτων αλάτων. Για την ακριβέστερη διευκρίνιση των μηχανισμών απαιτείται η χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (SEM) και σημειακές αναλύσεις για τον προσδιορισμό διαφόρων φάσεων.

Οι ελάχιστες τιμές σε μονοαξονική θλίψη των πρότυπων δοκιμίων σκυροδέματος (σύμφωνα με τις τιμές του ΚΕΔΕ / ΓΓΔΕ) φαίνονται στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Ελάχιστες τιμές αντοχής πρότυπων δοκιμών Σκυροδέματος

Κατηγορία σκυροδέματος	Χαρακτηριστική αντοχή f_{ck} κύβου (MPa)
C8/10	10
C12/15	15
C16/20	20
C20/25	25
C25/30	30
C30/37	37

Πηγή ΚΕΔΕ / ΓΓΔΕ

http://www.ggde.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=23&Itemid=140

Από την συγκριτική αξιολόγηση των παραπάνω προκύπτουν τα εξής :

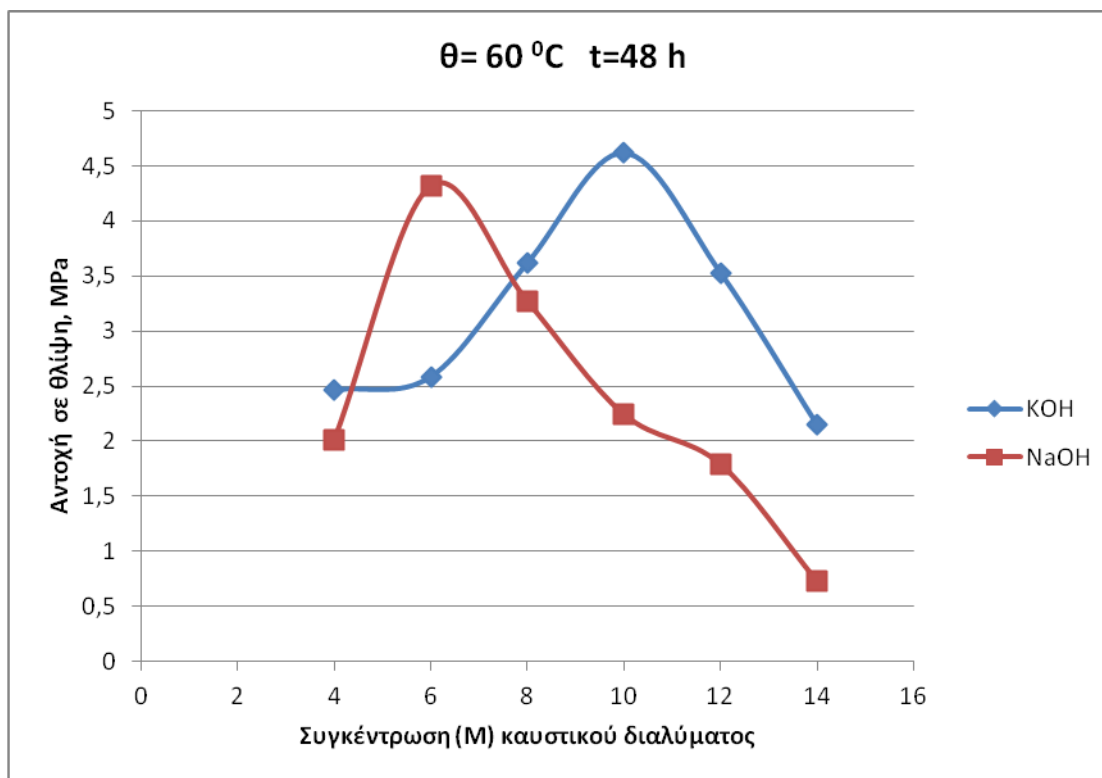
1. Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο υπολείπονται σε αντοχή από τις ελάχιστες τιμές των πρότυπων δοκιμών σκυροδέματος και συνεπώς δεν μπορούν να αξιοποιηθούν σε έργα που χρησιμοποιείται σκυρόδεμα
2. Τα δοκίμια έχουν, παρά την χαμηλή αντοχή τους, πολύ καλή συνοχή και θα πρέπει να εξεταστούν και άλλες φυσικές παράμετροι προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για άλλες εναλλακτικές χρήσεις.

Στα δοκίμια που παρασκευάστηκαν θα πρέπει επίσης να εξεταστούν (σε επόμενη διπλωματική εργασία) η υδατοπερατότητά τους και η αντοχή τους στη διάβρωση σε διάφορα μέσα και συνθήκες.

6.2. Γεωπολυμερή από ανακυκλωμένα Τούβλα

Τα δοκίμια από ανακυκλωμένα τούβλα υποβλήθηκαν σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης. Έγιναν οι μετρήσεις και για κάθε ζεύγος δοκιμίων της κάθε σειράς και δημιουργήθηκε αντίστοιχο διάγραμμα αντοχής σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση του καυστικού διαλύματος.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα ξεχωριστά για κάθε πειραματική σειρά.



Διάγραμμα 6.2. Αντοχή σε θλίψη γεωπολυμερών τούβλων σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση του καυστικού διαλύματος.

Η αύξηση της συγκέντρωσης του αλκαλικού διαλύματος NaOH από 4M σε 6M επιδρά θετικά στην τελική αντοχή σε θλίψη των δοκιμίων. Παρατηρείται απότομη αύξηση της αντοχής και στην συγκέντρωση 6M εμφανίζεται η μέγιστη τιμή (4,32 MPa). Περαιτέρω αύξηση της συγκέντρωσης του αλκαλικού διαλύματος επιδρά έντονα αρνητικά στην τελική αντοχή σε θλίψη των δοκιμίων.

Η αύξηση της συγκέντρωσης του διαλύματος KOH από 6M σε 10M επιδρά θετικά στην τελική αντοχή σε θλίψη των δοκιμίων. Η αύξηση της αντοχής είναι απότομη και στην συγκέντρωση 10M εμφανίζεται η μέγιστη τιμή (4,62 MPa). Η περαιτέρω αύξηση της συγκέντρωσης του

διαλύματος ΚΟΗ επιδρά αρνητικά στην τελική αντοχή σε θλίψη των δοκιμίων.

Συγκριτικά παρατηρούμε ότι για συγκέντρωση 6M NaOH εμφανίζεται η μέγιστη τιμή αντοχής σε θλίψη (4,32 MPa) ενώ για συγκέντρωση 6M ΚΟΗ η αντοχή σε θλίψη είναι 2.58 MPa και η μέγιστη τιμή εμφανίζεται για συγκέντρωση 10M (4,62 MPa).

Σύμφωνα με τη χημική σύσταση των ανακυκλωμένων τούβλων, Πίνακας 5.4, και το ορυκτολογικό διάγραμμα XRD, Διάγραμμα 5.2, προκύπτει ότι:

- Τα ανακυκλωμένα τούβλα αποτελούνται από χαλαζία SiO_2 , ασβεστίτη CaCO_3 , αιματίτη Fe_2O_3 , διοψίδιο $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$, αλβίτη $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ και στη χημική τους σύσταση μεταξύ των άλλων περιέχονται Na_2O (1.03%), K_2O (2.80%), CaO (8.79%), Al_2O_3 (14.95%) και SiO_2 (57.79%) κλπ.
- τα ανακυκλωμένα τούβλα είναι υλικά πλούσια σε αργιλοπυριτικές ενώσεις, η περιεκτικότητά τους τόσο σε Al_2O_3 όσο και σε SiO_2 είναι περίπου δεκαπλάσια σε σχέση με το σκυρόδεμα με αποτέλεσμα να σχηματίζονται περισσότεροι γεωπολυμερικοί δεσμοί κατά την αλκαλική ενεργοποίηση.
- Η χρήση καυστικών διαλυμάτων (ΚΟΗ ή NaOH) σε μεγαλύτερες τιμές συγκέντρωσης από τη βέλτιστες τιμές προκαλεί τη μη συμμετοχή ενός ποσοστού των στις γεωπολυμερικές αντιδράσεις, το οποίο συμμετέχει στην παραγωγή ευδιάλυτων ενώσεων και τελικά, στην παραγωγή δοκιμίων με μικρότερες αντοχές σε θλίψη. (Patcharapol, et al., 2013)
- Στα γεωπολυμερή δοκίμια τούβλων η περιεκτικότητα σε Na_2SiO_3 ήταν αυξημένη συγκριτικά με τα γεωπολυμερή δοκίμια σκυροδέματος. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε Na_2SiO_3 στο αρχικό μίγμα συμβάλλει στην παρουσία διαλυτών πυριτικών ενώσεων, οι οποίες είναι απαραίτητες για την έναρξη του σχηματισμού ολιγομερών πυριτίου, τα οποία, ακολούθως πολυσυμπυκνώνονται και σχηματίζουν γεωπολυμερικούς δεσμούς. Επομένως, αύξηση της ποσότητας του διαλυτού πυριτίου στο διάλυμα ενεργοποίησης, συνεπάγεται και αύξηση της ταχύτητας της αντίδρασης γεωπολυμερισμού.

Οι ελάχιστες τιμές σε μονοαξονική θλίψη των πρότυπων δοκιμίων Τούβλων (σύμφωνα με τις τιμές του εργοστασίου παραγωγής ΧΑΛΚΙΣ ΑΒΕΕ) φαίνονται στον Πίνακα 6.2:

Πίνακας 6.2: Ελάχιστες Αντοχές πρότυπων δοκιμίων Τούβλων

ΕΙΔΟΣ ΟΠΤΟΠΛΙΝΘΟΥ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ (mm) (ΜΗΚΟΣxΠΛΑΤΟΣxΥΨΟΣ)	ΑΝΤΟΧΗ ΘΛΙΨΗΣ (MPa) (πλευρά έδρασης)
6X9X19	188x60x85	>3
6X12X19	188x60x111	>2.5
8X18X19	189x80x180	>2.5
9X18X19	189x90x180	>2.5
9X9X19	188x88x86	>2.5
9X12X19	189x88x112	>3
15X18X32	327x180x147	>3
18X18X32	327x181x177	>3.5
15X25X32	325x247x148	>3.5
15X28X32	328x280x148	>3.5
15X30X24	235x295x146	>3.5

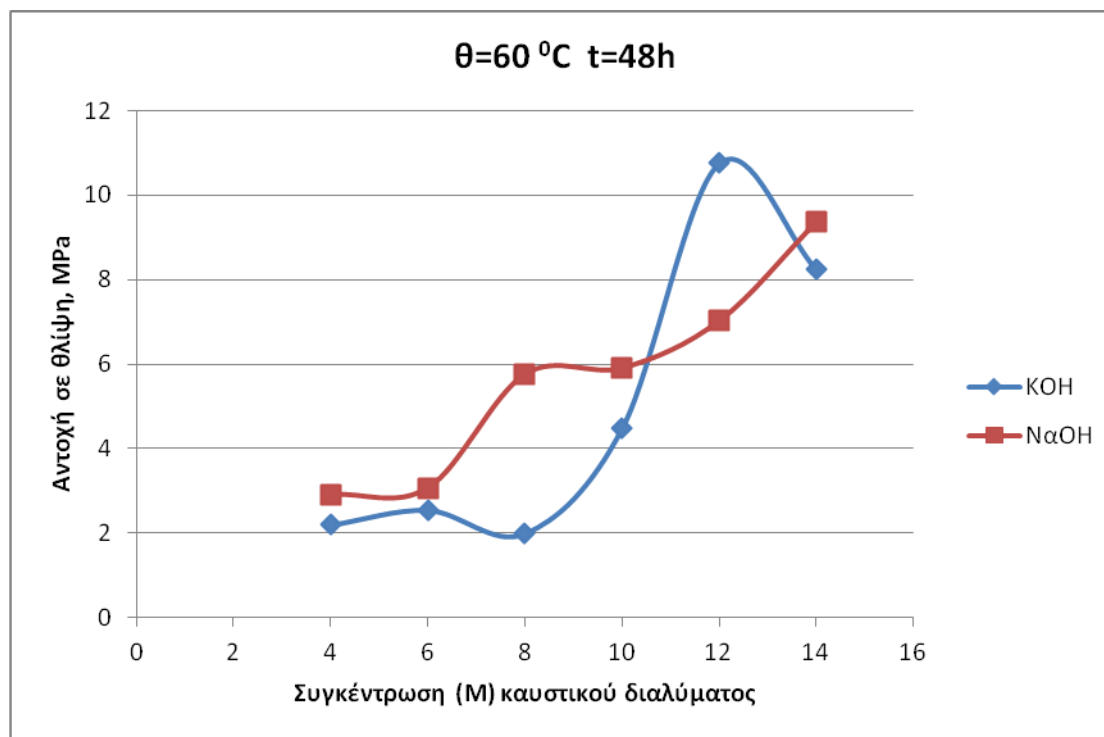
Πηγή: ΧΑΛΚΙΣ ΑΒΕΕ <http://www.xalkis-sa.com/index.php?pN=bricks>

Από την συγκριτική αξιολόγηση των παραπάνω προκύπτει ότι τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν δεν υπολείπονται ιδιαίτερα σε αντοχή από τις ελάχιστες τιμές των πρότυπων δοκιμίων τούβλων και μπορούν να αξιοποιηθούν ως αντίστοιχα δομικά υλικά.

6.3. Γεωπολυμερή από ανακυκλωμένα Πλακίδια.

Τα δοκίμια από ανακυκλωμένα πλακίδια υποβλήθηκαν σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης. Έγιναν οι μετρήσεις και για κάθε ζεύγος δοκιμίων της κάθε σειράς και δημιουργήθηκε αντίστοιχο διάγραμμα αντοχής σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση του καυστικού διαλύματος.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα ξεχωριστά για κάθε πειραματική σειρά.



Διάγραμμα 6.3. Αντοχή σε θλίψη γεωπολυμερών πλακιδίων σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση του καυστικού διαλύματος.

Η αύξηση της συγκέντρωσης του διαλύματος KOH από 8M σε 12M επιδρά θετικά στην τελική αντοχή σε θλίψη των δοκιμίων. Η αύξηση της αντοχής είναι απότομη και στην συγκέντρωση 12M εμφανίζεται η μέγιστη τιμή (10,75 MPa). Περαιτέρω αύξηση της συγκέντρωσης του αλκαλικού διαλύματος επιδρά αρνητικά στην τελική αντοχή σε θλίψη των δοκιμίων, όπως παρατηρήθηκε και στις προηγούμενες περιπτώσεις.

Η αύξηση της συγκέντρωσης του διαλύματος NaOH από 4M σε 14M επιδρά θετικά στην τελική αντοχή σε θλίψη των δοκιμίων. Η αύξηση της αντοχής είναι ομαλή και στην συγκέντρωση 14M εμφανίζεται η μέγιστη τιμή (9,37 MPa). Η βέλτιστη τιμή συγκέντρωσης NaOH είναι 14M

δίνοντας δοκίμια με αυξημένη αντοχή σε θλίψη γιατί υπάρχει επαρκές διάλυμα για τις γεωπολυμερικές αντιδράσεις. Επίσης οι συγκεντρώσεις 8M, 10M και 12M NaOH δίνουν δοκίμια με ικανοποιητικές τιμές αντοχής σε θλίψη.

Σύμφωνα με τη χημική σύσταση των ανακυκλωμένων πλακιδίων, Πίνακας 5.4, και το ορυκτολογικό διάγραμμα XRD, Διάγραμμα 5.3, προκύπτει ότι:

- Τα ανακυκλωμένα πλακίδια αποτελούνται από χαλαζία SiO_2 , ασβεστίτη CaCO_3 , γύψο $\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$, ορθόκλαστο AlSi_3O_8 και στη χημική τους σύσταση μεταξύ των άλλων περιέχονται, K_2O (1,37%), CaO (8,78%), Al_2O_3 (9,8%) SiO_2 (70,54%) κλπ.
- Τα δοκίμια ανακυκλωμένων πλακιδίων είναι πλούσια σε αργιλοπυριτικές ενώσεις και ο λόγος $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ είναι 7,19. Αυτός είναι ο κυριότερος λόγος για την αύξηση της τελικής αντοχής των δοκιμίων, παρά το γεγονός ότι η περιεκτικότητα σε Na_2SiO_3 ήταν συγκριτικά μικρότερη σε σχέση με αυτή της σειράς των τούβλων. Ο υψηλός λόγος $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ συμβάλλει στο σχηματισμό ικανοποιητικής ποσότητας gel το οποίο με την πάροδο του χρόνου και τη θέρμανση σκληραίνει και προσδίδει στα δοκίμια ικανοποιητική αντοχή.

Οι ελάχιστες τιμές σε μονοαξονική θλίψη των πρότυπων δοκιμίων Πλακιδίων φαίνονται στον Πίνακα 6.3.4 :

Πίνακας 6.3: Ελάχιστες Αντοχές πρότυπων δοκιμίων Πλακιδίων

ΔΟΚΙΜΙΑ	ΑΝΤΟΧΗ MPa
Κεραμικά Πλακίδια	≥ 17
Πλάκες Πεζοδρομίου	$> 48,3$

Από την συγκριτική αξιολόγηση των παραπάνω προκύπτει ότι τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν υπολείπονται σε αντοχή από τις ελάχιστες τιμές των πρότυπων δοκιμίων πλακιδίων αλλά μπορούν να αξιοποιηθούν ως δομικά υλικά σε εφαρμογές που απαιτείται μικρότερη φόρτιση.

6.4. Συγκριτική αξιολόγηση γεωπολυμερών από ανακυκλωμένα υλικά

Οι βέλτιστες τιμές αντοχής σε θλίψη των δοκιμίων από ανακυκλωμένα υλικά, και οι συστάσεις των αρχικών μιγμάτων φαίνονται στον Πίνακα 6.4.

Από τον Πίνακα 6.4 προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα :

A. Δοκίμια ανακυκλωμένου σκυροδέματος.

1. Σε όλα τα δοκίμια ανακυκλωμένου σκυροδέματος η ποσότητα σε H_2O και Na_2SiO_3 είναι σταθερή αλλά διαφοροποιείται ποσοστιαία λόγω των διαφορετικών ποσοστών συμμετοχής του ανακυκλωμένου σκυροδέματος και του καυστικού διαλύματος. (Patcharapol et al., 2013)
2. Το εύρος τιμών αντοχής σε θλίψη των δοκιμίων κυμαίνεται από **3,07 έως 3,14 MPa**.
3. Οι τιμές αντοχής σε θλίψη δεν είναι ικανοποιητικές.

B. Δοκίμια ανακυκλωμένων τούβλων.

4. Σε όλα τα δοκίμια ανακυκλωμένων τούβλων η ποσότητα σε H_2O και Na_2SiO_3 είναι σταθερή αλλά διαφοροποιείται ποσοστιαία λόγω των διαφορετικών ποσοστών συμμετοχής των ανακυκλωμένων τούβλων και του καυστικού διαλύματος.
5. Το εύρος τιμών αντοχής σε θλίψη των δοκιμίων κυμαίνεται από **3,27 έως 4,62 MPa**.
6. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις αργιλοπυριτικών ενώσεων στον αρχικό πολφό συγκριτικά με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις στο σκυρόδεμα είναι η κύρια εξήγηση της εμφάνισης υψηλότερων τιμών αντοχής στα δοκίμια ανακυκλωμένων τούβλων συγκριτικά με τις τιμές αντοχής των δοκιμίων ανακυκλωμένου σκυροδέματος. Στα δοκίμια με $NaOH$ η αντοχή αυξάνεται πιο απότομα σε σχέση με αυτά που έχουν KOH .
7. Οι τιμές αντοχής σε θλίψη είναι ικανοποιητικές, και τα γεωπολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δομικά υλικά.

Πίνακας 6.4.: Βέλτιστες τιμές αντοχής σε θλίψη των δοκιμίων

Δοκίμιο	Ανακυκλωμένο υλικό		Αλκαλικό διάλυμα		H ₂ O		Na ₂ SiO ₃		Αντοχή σε θλίψη	Si/Al
	%	g	%	g	%	g	%	g	MPa	
ΣΚ10Μ	77,15	211	4,57	12,5	8,04	22	10,24	28	3,07	5,519
ΣΚ12Μ	77,73	226	5,07	14,75	7,57	22	9,63	28	3,17	5,408
ΣΝ10Μ	76,7	179,5	3,6	8,75	9,23	22	11,7	28	3,02	5,97
ΣΝ12Μ	75,6	189	4,4	11	8,8	22	11,2	28	3,14	5,93
ΤΚ8Μ	67,9	190,5	5,3	15	11,7	33	14,9	42	3,62	4
ΤΚ10Μ	70,9	228,5	5,8	18,75	10,2	33	13,03	42	4,62	3,79
ΤΝ6Μ	70,7	201	2,8	8	11,6	33	14,7	42	4,32	3,85
ΤΝ8Μ	68,68	187,5	3,84	10,5	12,08	33	15,38	42	3,27	3,88
ΠΚ12Μ	77,1	330	5,26	22,5	7,7	33	9,8	42	10,75	6,75
ΠΚ14Μ	76,5	330	6,03	26	7,65	33	9,7	42	8,24	6,75
ΠΝ10Μ	74,36	256	3,84	13,25	9,58	33	12,2	42	5,91	6,89
ΠΝ12Μ	71,2	225	5	16	10,4	33	13,29	42	7,03	6,925
ΠΝ14Μ	73	253	5	16	9,52	33	12,12	42	9,37	6,96

Γ. Δοκίμια ανακυκλωμένων πλακιδίων

8. Σε όλα τα δοκίμια ανακυκλωμένων πλακιδίων η ποσότητα σε H_2O , και Na_2SiO_3 είναι σταθερή αλλά διαφοροποιείται ποσοστιαία λόγω των διαφορετικών ποσοστών συμμετοχής της ανακυκλωμένης πρώτης ύλης και του καυστικού διαλύματος.
9. Το εύρος τιμών αντοχής σε θλίψη κυμαίνεται από **5,91** έως **10,75 MPa**.

Δ. Γενικά

10. Οι ιδιότητες που αποκτούν τα γεωπολυμερή (χρόνος πήξης, τιμές αντοχής σε θλίψη, ρεολογικές ιδιότητες κλπ) εξαρτώνται κυρίως από την τιμή του λόγου Si/Al στο αρχικό μίγμα και τη συγκέντρωση του καυστικού διαλύματος. Οι παράμετροι αυτές καθορίζουν την ποσότητα του gel που θα σχηματισθεί, το οποίο όταν σκληρύνει με τη θέρμανση και κατά την περίοδο γήρανσης οδηγεί στην απόκτηση τελικής αντοχής.
11. Η επίδραση του Na_2SiO_3 εξηγείται ως εξής: Η προσθήκη διαλυτού πυριτίου σε ένα γεωπολυμερικό μίγμα αυξάνει το λόγο πυριτίου/αργιλίου, βελτιώνει τη δομή του αργιλοπυριτικού πλέγματος και μειώνει την πιθανότητα εμφάνισης ζεόλιθων. Αυτό οδηγεί σε πυκνότερο και πιο συμπαγές γεωπολυμερικό πλέγμα με μειωμένο πορώδες.
12. Το πυριτικό νάτριο στην υδατική φάση του γεωπολυμερικού συστήματος περιέχει διαλυτές πυριτικές ενώσεις, οι οποίες είναι απαραίτητες για την έναρξη του σχηματισμού των ολιγομερών πυριτίου, τα οποία, ακολούθως, πολυσυμπυκνώνονται και σχηματίζουν το αργιλοπυριτικό πλέγμα. Επομένως, η αύξηση της ποσότητας του αυξάνει την απόδοση της αντίδρασης γεωπολυμερισμού.
13. Η υπερβολική ποσότητα πυριτικών ενώσεων στο γεωπολυμερικό μίγμα εμποδίζει την εξάτμιση του νερού, και ως εκ τούτου, δυσκολεύει το σχηματισμό του αργιλοπυριτικού πλέγματος. Το διάλυμα πυριτικού νατρίου (Na_2SiO_3) είναι από μόνο του ένα διάλυμα με πολύ υψηλό ιξώδες, και συνεπώς, αυξημένες

ποσότητες του προκαλούν δυσκολίες τόσο στις αντιδράσεις γεωπολυμερισμού όσο και κατά τη χύτευση του πολφού.

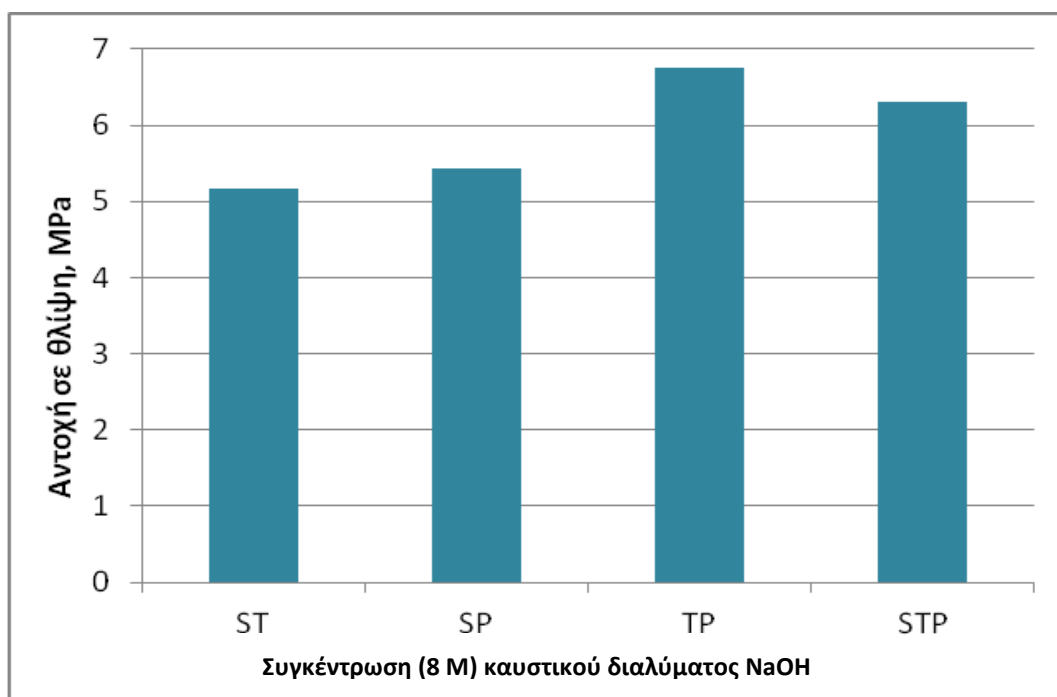
14. Από τη συγκριτική αξιολόγηση προκύπτει ότι από τα γεωπολυμερή που παρασκευάστηκαν κατάλληλα για χρήση ως δομικά υλικά είναι τα γεωπολυμερή από ανακυκλωμένα τούβλα και πλακίδια.

6.5. Γεωπολυμερή από αναμεμιγμένα ΑΚΚ.

Τα δοκίμια από ανακυκλωμένα και αναμεμιγμένα ΑΚΚ (Σκυροδέματος-Τούβλων (ST), Σκυροδέματος-Πλακιδίων (SP), Τούβλων-Πλακιδίων (TP) και Σκυροδέματος-Τούβλων-Πλακιδίων (STP) υποβλήθηκαν σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης. Έγιναν οι μετρήσεις και για κάθε δοκίμιο της κάθε σειράς δημιουργήθηκε αντίστοιχο διάγραμμα αντοχής σε θλίψη για σταθερή συγκέντρωση καυστικού διαλύματος (8M NaOH).

Τα ποσοστά συμμετοχής των αναμεμιγμένων ΑΚΚ σε κάθε δοκίμιο σύμφωνα με τους Πίνακες 5.14 έως 5.17 είναι: ST (35,83% S, 35,83% T), SP (35,83% S, 35,83% P), TP (35,83% T, 35,83% P), STP (23,92% S, 23,92% T, 23,92% P).

Η ποσοτική σύσταση των δοκιμίων αναφέρεται στους πίνακες 5.14 έως 5.17.



Διάγραμμα 6.5. Αντοχή σε θλίψη γεωπολυμερών δοκιμών ΑΚΚ σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση του καυστικού διαλύματος
Στον πίνακα 6.5.1. φαίνονται οι αντοχές των δοκιμών και οι λόγοι $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ και Si/Al .

Πίνακας 6.5.1: Αντοχές Δοκιμών ST, SP TP και STP και λόγοι $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -
 Si/Al

Κωδικός	MPa (av)	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	Si/Al
ΣΤΝ (ST)	5,2	2,75	3,96
ΣΠΝ (SP)	5,4	3,96	6,81
ΤΠΝ (TP)	6,8	3,96	4,95
ΣΤΠΝ (STP)	6,3	3,57	5,04

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι:

1. Τη μέγιστη αντοχή την εμφανίζει το γεωπολυμερικό δοκίμιο (τούβλου-πλακιδίου), με 6,8 MPa.
2. Αυτό ήταν αναμενόμενο επειδή και τα μεμονωμένα υλικά όταν γεωπολυμερίστηκαν απέκτησαν υψηλότερες τιμές αντοχής από το σκυρόδεμα. Αυτό συμβαίνει επειδή στα δοκίμια αυτά ο λόγος

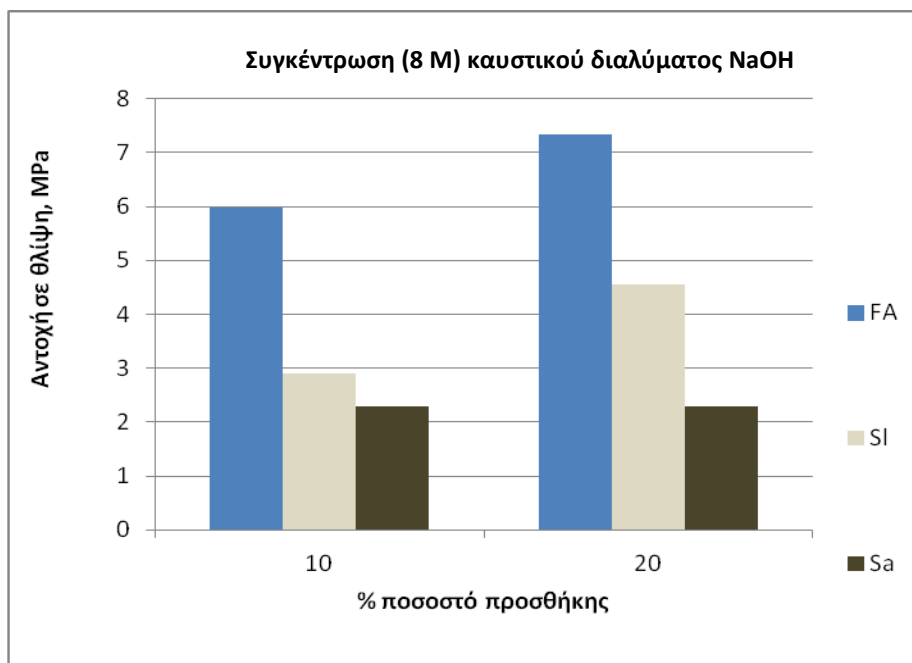
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ήταν υψηλότερος σε σχέση με το σκυρόδεμα, ενώ και η περιεκτικότητα σε CaO ήταν μειωμένη.

3. Τα δοκίμια σκυροδέματος-τούβλων και σκυροδέματος-πλακιδίων παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές αντοχής σε θλίψη (πίνακας 6.5.1) σε σχέση με εκείνες που είχαν τα δοκίμια σκυροδέματος (3,14 MPa). Αυτό γίνεται γιατί το γεωπολυμερικό μίγμα πλέον είναι πλουσιότερο σε ενώσεις πυριτίου και αργιλίου και συνεπώς έχει υψηλότερο λόγο $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$.
4. Το γεωπολυμερές δοκίμιο σκυροδέματος-τούβλου-πλακιδίου είναι πιο πλούσιο σε οξείδιο του ασβεστίου από το δοκίμιο τούβλου-πλακιδίου λόγω της παρουσίας σκυροδέματος σε ποσοστό 23,92% και συνεπώς παρουσιάζει λίγο χαμηλότερη αντοχή σε θλίψη (6,3 MPa).

6.6. Γεωπολυμερή από σκυρόδεμα, ιπτάμενη τέφρα, σκωρία, και χαλαζιακή άμμο.

Τα δοκίμια από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα σε συνδυασμό με ιπτάμενη τέφρα, σκωρία και χαλαζιακή άμμο υποβλήθηκαν σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης. Έγιναν οι μετρήσεις και για κάθε ζεύγος δοκιμίων της κάθε σειράς έγινε αντίστοιχο διάγραμμα αντοχής και ποσοστού προσθήκης υλικών με σταθερή συγκέντρωση καυστικού διαλύματος (8M NaOH).

Τα ποσοστά προσθήκης ιπτάμενης τέφρας, σκωρίας και χαλαζιακής άμμου στα αρχικά μίγματα ήταν 10% ή 20%.



Διάγραμμα 6.6. Αντοχή σε θλίψη δοκιμών σκυροδέματος-ιπτάμενης τέφρας(FA), σκυροδέματος-σκωρίας(SI) και σκυροδέματος-χαλαζιακής άμμου(SA) σε συνάρτηση με το ποσοστό προσθήκης υλικών

Στον πίνακα 6.6.1. φαίνονται οι αντοχές των δοκιμών και οι λόγοι $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, Si/Al .

Πίνακας 6.6.1 Αντοχές δοκιμών FA,SI και SA

Κωδικός	% προσθήκη	MPa	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	Si/Al
ΣΙΝ (FA)	10% Ιπτάμενη Τέφρα	6,0	2,8	4,48
ΣΙΝ (FA)	20% Ιπτάμενη τέφρα	7,3	2,73	3,84
ΣΣΝ (SI)	10% Σκωρία	2,9	2,85	5,29
ΣΣΝ (SI)	20% Σκωρία	4,6	2,77	4,89
ΣΑΝ (SA)	10% Χαλαζιακή Άμμος	2,3	10,61	12,33
ΣΑΝ (SA)	20% Χαλαζιακή Άμμος	2,3	17,32	19,69

Η ποσοτική σύσταση των δοκιμών αναφέρεται στους πίνακες 5.18 έως 5.20.

1. Η χρήση της ιπτάμενης τέφρας, ως συνδετικό υλικό στα γεωπολυμερή, αυξάνει σημαντικά την αντοχή σε θλίψη των δοκιμίων ανακυκλωμένου σκυροδέματος και ιπτάμενης τέφρας (7,3 MPa με λόγο $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 2,73 και $\text{Si}/\text{Al}=3,84$) συγκριτικά με τις τιμές που έδωσαν τα γεωπολυμερή ανακυκλωμένου σκυροδέματος (3,17 MPa με λόγο $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 3,89 και $\text{Si}/\text{Al}=5,98$)
Αν και στα γεωπολυμερή ανακυκλωμένου σκυροδέματος και ιπτάμενης τέφρας ο λόγος $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (2,73) είναι μικρότερος από τον λόγο $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ των γεωπολυμερών ανακυκλωμένου σκυροδέματος (3,89) οι τιμές αντοχής σε θλίψη των δοκιμίων είναι αρκετά μεγαλύτερες και αυτό οφείλεται στην αυξημένη παρουσία CaO στα δοκίμια ανακυκλωμένου σκυροδέματος (Πίνακες 5.4 και 5.6).
 2. Η ιπτάμενη τέφρα είναι πλούσια σε SiO_2 , Al_2O_3 , και CaO , (Πίνακας 5.6) Τα οξείδια SiO_2 και Al_2O_3 συμμετέχουν σε κάποιο βαθμό στις γεωπολυμερικές αντιδράσεις ενώ το CaO έχει αρνητική επίδραση, όπως προαναφέρθηκε στην αντοχή σε θλίψη. Εκτιμάται ότι αν είχε χρησιμοποιηθεί τέφρα χαμηλής περιεκτικότητας σε CaO , όπως της Μεγαλόπολης, τα δοκίμια θα αποκτούσαν υψηλότερη αντοχή (Saeed et al., 2012).
 3. Η χρήση σκωρίας στο γεωπολυμερικό μίγμα, ανακυκλωμένου σκυροδέματος και σκωρίας, δεν επηρεάζει τόσο πολύ την τελική αντοχή του γεωπολυμερούς. (4,6 MPa με λόγο $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 2,7 και $\text{Si}/\text{Al}=5$) συγκριτικά με τις τιμές που έδωσαν τα γεωπολυμερή ανακυκλωμένου σκυροδέματος (3,17 MPa με λόγο $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 3,89 και $\text{Si}/\text{Al}=5,98$).
- Η σκωρία είναι πλούσια σε Fe_2O_3 και SiO_2 , ενώ περιέχει πολύ λιγότερο Al_2O_3 . (Πίνακας 5.5)
 - Με την προσθήκη σκωρίας στο γεωπολυμερικό μίγμα αυξάνει η περιεκτικότητα σε πυρίτιο και σε αργίλιο άλλα όχι τόσο όσο με την προσθήκη ιπτάμενης τέφρας.
 - Η επίδρασή της σκωρίας σε σχέση με εκείνη της ιπτάμενης τέφρας, φαίνεται ότι επηρεάζει θετικά στη συνοχή του γεωπολυμερούς αλλά όχι σε τέτοιο βαθμό όπως η ιπτάμενη τέφρα. Αυτό πιθανώς οφείλεται στο γεγονός ότι η ιπτάμενη τέφρα έχει μεγαλύτερη αντιδραστικότητα σε σχέση με τη σκωρία η οποία παράγεται σε υψηλές θερμοκρασίες.

4. Το κύριο συστατικό της χαλαζιακής άμμου είναι το SiO_2 (98%) και η χρήση της αυξάνει την περιεκτικότητα σε SiO_2 στο γεωπολυμερικό μίγμα.

- Η αντοχή σε θλίψη των δοκιμών ανακυκλωμένου σκυροδέματος και χαλαζιακής άμμου (2,3 MPa) είναι σημαντικά μειωμένη της αντοχής των δοκιμών ανακυκλωμένου σκυροδέματος (3,17 MPa). Εκτιμάται ότι οφείλεται στο γεγονός ότι το διατιθέμενο αλκαλικό διάλυμα δεν επαρκεί για τη διαλυτοποίηση της χαλαζιακής άμμου και την προσθήκη ιόντων Si στον πολφό.

Οι διαφορές στις αντοχές των ομοειδών δοκιμών που παρατηρούνται οφείλονται στο ποσοστό των πρόσθετων υλικών Ιπτάμενης Τέφρας, Σκωρίας και Χαλαζιακής Άμμου στη σύνθεση του γεωπολυμερούς. Από την συγκριτική αξιολόγηση των βέλτιστων τιμών αντοχής σε θλίψη όλων των γεωπολυμερών δοκιμών που παρασκευάστηκαν, τα γεωπολυμερή μίγματα που μπορούν να αξιοποιηθούν και να παρασκευαστούν δομικά υλικά φαίνονται στον Πίνακα 6.6.4.

Πίνακας 6.6.2 Συγκριτική αξιολόγηση βέλτιστων τιμών αντοχής σε θλίψη

Δοκίμιο	Αντοχή σε θλίψη (MPa)	Δοκίμιο	Αντοχή σε θλίψη (MPa)
ΠΚ12Μ	10,75	ΣΠΝ (SP)	5,4
ΠΝ14Μ	9,37	ΣΤΝ (ST)	5,2
ΠΚ14Μ	8,24	ΤΚ10Μ	4,62
ΣΙΝ (FA 20%)	7,3	ΣΣΝ (SI 20%)	4,6
ΠΝ12Μ	7,03	ΤΝ6Μ	4,32
ΤΠΝ (TP)	6,8	ΤΚ8Μ	3,62
ΣΤΠΝ (STP)	6,3	ΤΝ8Μ	3,27
ΣΙΝ (FA10%)	6,0	ΣΣΝ (SI10%)	2,9
ΠΝ10Μ	5,91	ΣΑΝ(SA10%&20%)	2,3

Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα.

Από την πειραματική διαδικασία που αναπτύχθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια προέκυψαν τα εξής:

1. Τα πλακάκια είναι τα υλικά των ΑΚΚ που παρουσιάζουν την καλύτερη τάση προς γεωπολυμερισμό. Ακολουθούν τα τούβλα ενώ το σκυρόδεμα δεν επιδεικνύει καλή συμπεριφορά
2. Οι παράμετροι που επηρεάζουν την αντοχή σε θλίψη των γεωπολυμερών δοκιμίων είναι:
 - Ο λόγος Si/Al στο αρχικό μίγμα
 - Η συγκέντρωση του καυστικού διαλύματος NaOH ή KOH.
 - Η παρουσία CaO στην ορυκτολογική σύσταση των υλικών.
3. Τα γεωπολυμερή δοκίμια που παρασκευάστηκαν από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα δεν αποκτούν επαρκή αντοχή λόγω της αυξημένης περιεκτικότητας CaO.
4. Τα ανακυκλωμένα τούβλα είναι υλικά πλούσια σε αργιλοπυριτικές ενώσεις, (με λόγο $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=3,87$ και $\text{Si}/\text{Al}=4$) γεωπολυμερίζονται καλύτερα και δίνουν δοκίμια με αποδεκτή αντοχή. Τα υλικά αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δομικές εφαρμογές.
5. Τα δοκίμια ανακυκλωμένων πλακιδίων είναι πλούσια σε αργιλοπυριτικές ενώσεις και ο λόγος $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ είναι 7,19 και $\text{Si}/\text{Al}=6,92$ ενώ η περιεκτικότητα σε CaO στην ορυκτολογική σύσταση του υλικού είναι χαμηλή.
6. Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν από ανακυκλωμένα πλακίδια δεν υπολείπονται σε αντοχή από τις ελάχιστες τιμές των πρότυπων δοκιμίων πλακιδίων και μπορούν να αξιοποιηθούν ως δομικά υλικά.
7. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις αργιλοπυριτικών ενώσεων στα ανακυκλωμένα πλακίδια συγκριτικά με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις στο σκυρόδεμα και στα τούβλα είναι η κύρια εξήγηση της εμφάνισης υψηλότερων τιμών αντοχής στα δοκίμια ανακυκλωμένων πλακιδίων συγκριτικά με τις τιμές αντοχής των

δοκιμίων ανακυκλωμένου σκυροδέματος και ανακυκλωμένων τούβλων.

8. Τα γεωπολυμερή από ανάμικτα ανακυκλωμένα υλικά (σκυρόδεμα, τούβλα και πλακίδια) έχουν βελτιωμένες τιμές αντοχής σε θλίψη συγκριτικά με τις τιμές αντοχής σε θλίψη των γεωπολυμερών τούβλων και των γεωπολυμερών σκυροδέματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα γεωπολυμερικά μίγματα έχουν υψηλότερο λόγο Si/Al.
9. Από τα δοκίμια προσμίξεων τη μέγιστη αντοχή την εμφανίζει το γεωπολυμερικό δοκίμιο τούβλου-πλακιδίου, επειδή είναι πλουσιότερο σε αργλικές και πυριτικές ενώσεις.
10. Η χρήση της ιπτάμενης τέφρας ως συνδετικού υλικού στα δοκίμια που παρασκευάστηκαν από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα αυξάνει σημαντικά την αντοχή σε θλίψη των δοκιμίων επειδή η ιπτάμενη τέφρα αν και είναι πλούσια σε SiO_2 , Al_2O_3 , CaO το μίγμα έχει μικρότερη περιεκτικότητα σε CaO συγκριτικά με το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα.
11. Η χρήση σκωρίας στο γεωπολυμερικό μίγμα των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα δεν επηρεάζει τόσο πολύ την τελική αντοχή του γεωπολυμερούς επειδή η σκωρία είναι πλούσια σε Fe_2O_3 και SiO_2 , και πολύ λιγότερο σε Al_2O_3 .
12. Η χρήση χαλαζιακής άμμου αυξάνει την περιεκτικότητα σε SiO_2 στο γεωπολυμερικό μίγμα των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα, αλλά το χρησιμοποιούμενο αλκαλικό διάλυμα δεν επαρκεί για τη διαλυτοποίηση της χαλαζιακής άμμου και την προσθήκη ιόντων Si στον πολφό που αποτελεί κριτήριο για την λειτουργία και τελική αντοχή του γεωπολυμερούς,
13. Όλα τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο ακόμη και αυτά που είχαν χαμηλή αντοχή σε θλίψη είχαν πολύ καλή συνοχή και θα πρέπει να εξεταστούν και άλλες φυσικές παράμετροι

προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για τις ενδεδειγμένες χρήσεις τους.

14. Κατά προτεραιότητα θα πρέπει να εξεταστούν (σε επόμενη διπλωματική εργασία) η υδατοπερατότητά τους και η αντοχή τους σε διάβρωση σε διάφορα περιβάλλοντα.
15. Προκειμένου να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για την εμπορική αξιοποίηση των γεωπολυμερών από ανακυκλωμένα απόβλητα κατασκευών, κατεδαφίσεων και βιομηχανικών αποβλήτων θα πρέπει μετά την εξέταση όλων των φυσικών παραμέτρων να εκπονηθεί μελέτη σκοπιμότητας.
16. Σε κάθε περίπτωση η ανακύκλωση αποβλήτων κατασκευών, κατεδαφίσεων και βιομηχανικών αποβλήτων με την παραγωγή γεωπολυμερών δομικών υλικών συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό τόσο στην ανακύκλωση μεγάλων όγκων αποβλήτων όσο και στην προστασία των φυσικών πόρων και αξίζει να διερευνηθεί σε βάθος.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ. Ι

Εργασίες Ανάκτησης R / Εργασίες Διάθεσης D, Ν. 4042 / 2012

στις οποίες πρέπει να υποβληθούν τα ΑΚΚ

R3	Ανακύκλωση/ανάκτηση οργανικών ουσιών που δεν χρησιμοποιούνται ως διαλύτες (συμπεριλαμβανομένης της κομποστοποίησης και άλλων διαδικασιών βιολογικού μετασχηματισμού)
R4	Ανακύκλωση/ανάκτηση μετάλλων και μεταλλικών ενώσεων
R5	Ανακύκλωση/ανάκτηση άλλων ανόργανων υλικών
R12	Ανταλλαγή αποβλήτων για να υποβληθούν σε κάποια από τις εργασίες R1 ως R11
D13	Ανάδευση ή ανάμιξη πριν από την υποβολή σε κάποια από τις εργασίες D 1 ως D 12

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ & ΚΑΤΕΔΑΦΙΣΕΩΝ ΠΟΥ ΥΠΟΚΕΙΝΤΑΙ ΣΕ ΤΕΛΟΣ ΤΑΦΗΣ

Κατάταξη ΑΚΚ, σύμφωνα με τον ΕΚΑ,

ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΚΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΠΟΒΛΗΤΟΥ
17	ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΑΠΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΚΑΤΕΔΑΦΙΣΕΙΣ (ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΕΤΑΙ Η ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΡΟΜΩΝ)
17 01	Σκυρόδεμα, τούβλα, πλακίδια και κεραμικά
17 01 01	Σκυρόδεμα
17 01 02	Τούβλα
17 01 03	Πλακίδια και κεραμικά
17 01 06 *	Μίγματα ή επιμέρους συστατικά από σκυρόδεμα, τούβλα, πλακάκια και κεραμικά που περιέχουν επικίνδυνες ουσίες
17 01 07	Μίγμα σκυροδέματος, τούβλων, πλακιδίων και κεραμικών εκτός εκείνων που περιλαμβάνονται στο σημείο 17 01 06
17 02	Ξύλο, γυαλί και πλαστικό
17 02 01	Ξύλο
17 02 02	Γυαλί
17 02 03	Πλαστικό
17 02 04 *	Γυαλί, πλαστικό και ξύλο που περιέχουν επικίνδυνες ουσίες ή έχουν μολυνθεί από αυτές
17 03	Μίγματα ασφάλτου και ορυκτής πίσσας, λιθανθρακόπισσα και προϊόντα πίσσας
17 03 02	Μίγματα ορυκτής ασφάλτου εκτός εκείνων που περιλαμβάνονται που περιλαμβάνονται στο σημείο 17 03 01
17 05	Χώματα (περιλαμβανομένων χωμάτων εκσκαφής από ρυπασμένες τοποθεσίες), πέτρες και μπάζα εκσκαφών
17 05 04 ¹	Χώματα και πέτρες άλλα από τα αναφερόμενα στο σημείο 17 05 03
17 05 06	Μπάζα εκσκαφών άλλα από τα αναφερόμενα στο σημείο 17 05 05
17 09	Άλλα απόβλητα δομικών κατασκευών και κατεδαφίσεων
17 09 04	Μείγματα αποβλήτων δομικών κατασκευών και κατεδαφίσεων εκτός εκείνων που περιλαμβάνονται στα σημεία 17 09 01, 17 09 02 και 17 09 03.

Πηγή : ΥΠΕΚΑ [http://www.minenv.gr/anakyklosi/law/00/EU.katalogos\(EKA\).pdf](http://www.minenv.gr/anakyklosi/law/00/EU.katalogos(EKA).pdf)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

1. Αντωνοπούλου Σ. (2012) Μεταπτυχιακή Εργασία «Διερεύνηση της Δυνατότητας Χρήσης Γεωπολυμερών ως Επισκευαστικών Υλικών Δομικών Στοιχείων» Ε.Μ.Π. Ιούλιος 2012 .
2. Γιαννοπούλου Ι. Πάνιας Δ. (2008) «Γεωπολυμερή Δομικά Υλικά από Στερεά Αργιλοπυριτικά Παραπροϊόντα» 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών ΤΕΕ Αθήνα 21-23 Μαΐου 2008.
3. Ζαχαράκη Δ. (2009) Διδακτορική Διατριβή “ Συμβολή στη διερεύνηση των μηχανισμών γεωπολυμερισμού μεταλλουργικών αποβλήτων με έμφαση στις σκωρίες ηλεκτροκαμίνων Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων Πολυτεχνείο Κρήτης.
4. Ζαχαράκη Δ. (2004). Σύνθεση και ιδιότητες γεωπολυμερών από σκωρίες ηλεκτρικής καμίνου παραγωγής σιδηρονικελίου, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
5. Ζαχαράκη Δ. (2005). Βελτιστοποίηση σύνθεσης γεωπολυμερών από σκωρίες ηλεκτρικής καμίνου παραγωγής σιδηρονικελίου, Μεταπτυχιακή εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης
6. Κακάλη Γ., Παναγιωτοπούλου Χ., (2009) «Σύνθεση και Ιδιότητες Γεωπολυμερών από βιομηχανικά πετρώματα και παραπροϊόντα», Τμήμα Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα.
7. Κομνίτσας Κ. (2007). Τεχνολογίες προστασίας και αποκατάστασης περιβάλλοντος, Διδακτικές Σημειώσεις, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
8. Κωστάκης Γ. (1999). Κεφάλαια ακτινοσκοπίας των κρυστάλλων, Διδακτικές Σημειώσεις, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
9. Τεκίδης Σ. (2011) Διπλωματική Εργασία «Αριστοποίηση Σύνθεσης Γεωπολυμερών από Μετακαολίνη» Ε.Μ.Π. 2011.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ



1. Cree, D., Green, M., Noumowe, A. (2013). Residual strength of concrete containing recycled materials after exposure to fire: A review. *Construction and Building Materials* 45, 208-223.
2. Coelho, A., de Brito, J. (2013). Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal-Part 1: Energy consumption and CO₂ emissions. *Waste Management* 33, 1258-1267.
3. Coelho, A., de Brito, J. (2012). Influence of construction and demolition waste management on the environmental impact of buildings. *Waste Management* 32, 532-541.
4. Davidovits J. (1987). Ancient and modern concretes: What is the real difference?, *Concrete International* 9, 23-35.
5. Davidovits J. (1988a). Geopolymer Chemistry and Properties, In proceedings of the 1st International Conference on Geopolymer '88, 1-3 June, Compiègne, France, v.1:25-48.
6. Davidovits J. (1988b). Geopolymers of the First Generation: SILIFACE Process, In proceedings of the 1st International Conference on Geopolymer '88, 1-3 June, Compiègne, France, v.1: 49-67.
7. Davidovits J. (1988c). Geopolymeric Reactions in Archaeological Cements and in Modern Blended Cements, In proceedings of the 1st International Conference on Geopolymer '88, 1-3 June, Compiègne, France, v.1: 93-106.
8. Davidovits J. (1988d). Soft Mineralurgy and Geopolymers, In proceedings of the 1st International Conference on Geopolymer '88, 1-3 June, Compiègne, France, v.1:19-23.
9. Davidovits J. (1989). Geopolymers and geopolymeric materials, *J. Therm. Anal.* 35(2), 429-441.
10. Davidovits J. (1991). Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials, *J. Therm. Anal.* 37, 1633-1656.
11. Davidovits J. (1994a). Method for obtaining a geopolymeric binder allowing to stabilize, solidify and consolidate toxic or waste materials, US Patent 5, 349, 118.
12. Davidovits J. (1994b). Process for obtaining a geopolymeric aluminosilicate and products thus obtained, US Patent 5, 342, 595.

13. Davidovits J. (1994c). Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials, J. Mater. Ed. 16, 91-139.
14. Davidovits J. (1994d). Geopolymers: man-made rock geosynthesis and the resulting development of very early high strength cement, J. Mater. Educ. 16, 91-137.
15. Davidovits J. (1994e). Properties of geopolymer cements. In Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Kiev, Ukraine 131-149.
16. Davidovits J. (1999a). Geopolymeric reactions in the economic future of cements and concretes: world-wide mitigation of carbon dioxide emission, In Proceedings of the 2nd International Conference on Geopolymer '99, Saint Quentin, France, 30 June-2 July, 111- 121.
17. Davidovits J. (1999b). Chemistry of geopolymeric systems, Terminology, In Proceedings of the 2nd International Conference on Geopolymer '99, Saint Quentin, France, 30 June-2 July, 9-39.
18. Davidovits J. (1999c). Fire proof geopolymeric cements, In Proceedings of the 2nd International Conference on Geopolymer '99, Saint Quentin, France, 30 June-2 July, 165-169.
19. Davidovits J. (2005). Geopolymer chemistry and sustainable Development. The Poly(sialate) terminology : a very useful and simple model for the promotion and understanding of green-chemistry, In Proceedings of the World Congress Geopolymer, Saint Quentin, France, 28 June-1 July, 9-15.
20. Davidovits J. and M. Davidovics (1988). Geopolymer room temperature ceramic matrix for composites, Ceram. Eng. Sci. Proc. 9, 835-842.
21. Davidovits J. and G. Demortier (1999). Construction of the Egyptian great pyramids (2500 B.C.) with agglomerated stone. Part I: Update of the latest research, In Proceedings of the 2nd International Conference on Geopolymer '99, Saint Quentin, France, 30 June-2 July, 327-368.
22. Duxson P. and J.L. Provis (2008). Designing Precursors for Geopolymer Cements, J. Am. Ceram. Soc. 91(12), 3864-3869.
23. Harianto, R. Alfrendo, S., Leong, E.C., Wang, J.Y. (2013). Unsaturated properties of recycled concrete aggregate and reclaimed asphalt pavement. Engineering Geology 161, 44–54.
24. Ikeda K. (1998). Consolidation of mineral powders by the geopolymer binder technique for materials use, Journal of the Mining and Materials Processing Institute of Japan 114, 497-500.

25. Komnitsas K. and D. Zaharaki (2007). Geopolymerisation: a review and prospects for the minerals industry, *Miner. Eng.* 20, 1261-1277.
26. Komnitsas K., D. Zaharaki and V. Perdikatsis (2007). Geopolymerisation of low calcium ferronickel slags, *J. Mater. Sci.* 42, 3073-3082.
27. Komnitsas K., D. Zaharaki and V. Perdikatsis (2009). Effect of synthesis parameters on the compressive strength of low-calcium ferronickel slag inorganic polymers, *Journal of Hazardous Materials* 161(2-3), 760-768.
28. Muluken, Y., Hewage K., Shahria Alam, M., Eskicioglu, C., Sadiq, R. (2013). An overview of construction and demolition waste management in Canada: a lifecycle analysis approach to sustainability. *Clean Technology and Environmental Policy* 15, 81-91.
29. Pantias D., Giannopoulou I.P., Perraki Th., Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly-ash based geopolymers, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2007
30. Panagiotopoulou Ch., Asprogerakas A., Kakali G., Tsivilis S., Synthesis and thermal properties of fly-ash based geopolymer pastes and mortars, *Ceramic Engineering and Science Proceedings* 32, 17-28, 2011.
31. Panagiotopoulou Ch., Kontori E., Perraki Th., Kakali G., Dissolution of aluminosilicate minerals and by-products in alkaline media, *Journal of Materials Science* 42 (9), 2967- 2973, 2007
32. Patcharapol, P., Chaiyapong, T., Chatchai, T., Suttikait, L., Surasit, L., Vanchai, S., Prinya, C. (2013). Lightweight geopolymer concrete containing aggregate from recycle lightweight block. *Materials and Design* 52, 580-586.
33. Reig, L., Tashima, M.M., Borrachero, M.V., Monzó, J., Cheeseman, C.R., Payá, J. (2013). Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste. *Construction and Building Materials* 43, 98-106.
34. Saeed, A., Xin, R., Vahab, T., Lianyang, Z. (2013). Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash. *Construction and Building Materials* 35, 718-729.
35. Vanchai, S., Ampol, W., Prinya, C. (2013). Properties of previous geopolymer concrete using recycled aggregates. *Construction and Building Materials* 42, 33-39.

36. Zaharaki D. and K. Komnitsas (2009). Effect of additives on the compressive strength of slag-based inorganic polymers, Global NEST Journal; accepted, (presented in 2nd International Conference on Engineering for Waste Valorisation, Patras, Greece, 3-5 June)
37. Zaharaki D., Komnitsas K., (2008) Durability of slag-based inorganic polymers, 1st International Conference on Indicators for Land Rehabilitation and Sustainable Development, Beijing, China.
38. Zaharaki D., K. Komnitsas and V. Perdikatsis (2006). Factors affecting synthesis of ferronickel slag based geopolymers, In Proceedings of the 2nd International Conference on Advances in Mineral Resources Management and Environmental Geotechnology, 25-27 September, Chania, Crete, Greece, 63-68.