



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Τομέας Ι: ΧΗΜΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

**Ανάλυση κύκλου ζωής δομικών υλικών.  
Σύγκριση γεωπολυμερικού και συμβατικού  
σκυροδέματος**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΟΔΩΡΟΣ ΘΕΟΔΩΡΙΔΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:**

**ΤΣΙΒΙΛΗΣ Σ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ**

ΑΘΗΝΑ, Σεπτέμβριος 2019

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έλαβε χώρα στο εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας του τομέα Ι της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του καθηγητή Σωτήριου Τσιβιλή.

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η ανάλυση του κύκλου ζωής των δομικών υλικών, και πιο συγκεκριμένα η μελέτη της περίπτωσης του γεωπολυμερικού σκυροδέματος και η σύγκριση του με το συμβατικό σκυρόδεμα. Οι απαιτούμενοι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό OpenLCA.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επιβλέποντα μου κύριο Σωτήριο Τσιβιλή για την ανάθεση της παρούσας εργασίας, αλλά και για το ενδιαφέρον και τη στήριξη που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Θεόδωρος Θεοδωρίδης

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2019

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη του κύκλου ζωής του γεωπολυμερικού σκυροδέματος και η σύγκριση του με τον αντίστοιχο κύκλο ζωής του συμβατικού σκυροδέματος. Το γεωπολυμερικό σκυρόδεμα είναι ένα καινοτόμο υλικό στον χώρο των δομικών υλικών, που τα τελευταία χρόνια παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον. Για τη σύνθεση του χρησιμοποιούνται αργιλοπυριτικές πρώτες ύλες (από παραπροϊόντα ή απορρίμματα) και ισχυρά αλκαλικά διαλύματα, ενώ οι ιδιότητες που παρουσιάζει σε πολλές περιπτώσεις είναι ισοδύναμες ή και ανώτερες του συμβατικού σκυροδέματος. Ωστόσο, το σημαντικότερο χαρακτηριστικό του νέου αυτού υλικού είναι ότι θεωρητικά επιφέρει μικρότερη επιβάρυνση στο περιβάλλον συγκριτικά με το συμβατικό σκυρόδεμα, γεγονός το οποίο η παρούσα εργασία στοχεύει να αποδείξει και να ποσοτικοποιήσει.

Για τη μελέτη του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των δύο σκυροδεμάτων έγινε εφαρμογή της μεθοδολογίας AKZ (Ανάλυση Κύκλου Ζωής), με χρήση του λογισμικού OpenLCA, στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι σχετικοί υπολογισμοί. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία λαμβάνει υπόψη ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος, από τη δημιουργία του, μέχρι και την τελική του διάθεση και τελικά δίνει ποσοτικά αποτελέσματα, σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν στη παρούσα εργασία πιστοποιούν ότι το γεωπολυμερικό σκυρόδεμα εμφανίζει ευνοϊκότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα απ' ό,τι το συμβατικό σκυρόδεμα. Ακόμα, προκύπτει ότι οι εντονότερες επιπτώσεις αφορούν κατηγορίες όπως η τοξικότητα για τον άνθρωπο, η οξίνιση του εδάφους, η εξάντληση των μετάλλων και η αλλαγή του κλίματος.

## **ABSTRACT**

The purpose of this thesis is to study the life cycle of geopolymer concrete and to compare it with the corresponding life cycle of conventional concrete. Geopolymer concrete is an innovative material in the field of construction materials, which in recent years has a strong interest. For its synthesis, aluminosilicate raw materials (from by-products or waste) and strong alkaline solutions are used, while the properties shown in many cases are equivalent or superior to conventional concrete. However, the most important characteristic of this new material is that it will theoretically be less damaging to the environment compared to conventional concrete, a fact which this paper aims to demonstrate and quantify.

To study the environmental footprint of the two concretes the LCA methodology was applied, using the OpenLCA software, in which the calculations were made. This methodology takes into account the entire life cycle of a product, from its creation until its final disposal and finally gives quantitative results on the environmental impacts.

The results obtained from the present thesis show that the geopolymer concrete exhibits favorable environmental footprint than conventional concrete. Furthermore, it appears that the strongest effects relate to categories such as toxicity to humans, terrestrial acidification, depletion of metals and climate change.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	3
ABSTRACT .....	4
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ .....	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <i>Εισαγωγή</i> .....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <i>Γεωπολυμερή</i> .....	11
2.1 Ορισμός .....	11
2.2 Ιστορική αναδρομή .....	11
2.3 Πρώτες ύλες των γεωπολυμερών .....	12
2.4 Διαλύματα ενεργοποίησης για τη γεωσύνθεση .....	12
2.5 Συνθήκες γεωσύνθεσης .....	13
2.6 Προϊόντα γεωπολυμερισμού .....	13
2.7 Δομή γεωπολυμερών .....	13
2.8 Αντίδραση γεωπολυμερισμού .....	14
2.9 Συνθήκες συντήρησης γεωπολυμερών .....	15
2.10 Συμπληρωματικά υλικά στην παρασκευή των γεωπολυμερών .....	16
2.11 Ιδιότητες γεωπολυμερών .....	17
2.12 Εφαρμογές γεωπολυμερών .....	18
2.13 Περιβαλλοντικά οφέλη της χρήσης γεωπολυμερών .....	19
2.14 Προβληματισμοί χρήσης γεωπολυμερών .....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <i>Ανάλυση κύκλου ζωής</i> .....	20
3.1 Ορισμός .....	20
3.2 Ιστορική αναφορά .....	20

3.3 Κύκλος ζωής .....	20
3.4 Σκοπός ΑΚΖ .....	21
3.5 Μεθοδολογία ΑΚΖ .....	22
3.6 Εφαρμογές .....	27
3.7 Λογισμικά .....	28
3.8 OpenLCA .....	29
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Συγκριτική ανάλυση κύκλου ζωής γεωπολυμερικού και συμβατικού σκυροδέματος.</b>	<b>30</b>
4.1 Προσδιορισμός του σκοπού και αντικειμένου .....	30
4.2 Απογραφή δεδομένων .....	30
4.3 Εκτίμηση επιπτώσεων .....	31
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Συμπεράσματα .....</b>	<b>43</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>44</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1: Ποσότητες των πρώτων υλών για την παραγωγική διαδικασία των σκυροδεμάτων ...	30
Πίνακας 4.2: Ονόματα των δεδομένων στο OpenLCA .....	31
Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα χαρακτηρισμού με χρήση της μεθόδου ReCiPe Midpoint (H) .....	34
Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα χαρακτηρισμού με χρήση της μεθόδου ReCiPe Endpoint (H) .....	38
Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα κανονικοποίησης για τη μέθοδο ReCiPe Midpoint (H) .....	40
Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα κανονικοποίησης για τη μέθοδο ReCiPe Endpoint (H) .....	42

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Εξέλιξη γεωπολυμερών .....	11
Σχήμα 2.2: Ιπτάμενη τέφρα .....	12
Σχήμα 2.3: Δομή γεωπολυμερούς .....	14
Σχήμα 2.4: Στάδια γεωπολυμερισμού.....	15
Σχήμα 2.5: Τοποθέτηση γεωπολυμερικού σκυροδέματος στην Αυστραλία .....	16
Σχήμα 3.1: Τα στάδια του κύκλου ζωής .....	21
Σχήμα 3.2: Η μεθοδολογία της AKZ .....	22
Σχήμα 3.3: Διάγραμμα ροής ενός προϊόντος .....	23
Σχήμα 3.4: Απεικόνιση περιβαλλοντικών επιπτώσεων .....	25
Σχήμα 3.5: Εφαρμογές AKZ για διάφορα προϊόντα .....	28
Σχήμα 3.6: Διαδικασία μοντελοποίησης στο OpenLCA .....	29
Σχήμα 4.1: Τα δεδομένα εισροών και εκροών για την παραγωγή του γεωπολυμερικού σκυροδέματος στο OpenLCA.....	32
Σχήμα 4.2: Τα δεδομένα εισροών και εκροών για την παραγωγή του συμβατικού σκυροδέματος στο OpenLCA .....	32
Σχήμα 4.3: Αποτελέσματα χαρακτηρισμού όπως εμφανίζονται στο λογισμικό OpenLCA .....	34
Σχήμα 4.4: Η τοξικότητα στον άνθρωπο-Midpoint .....	35
Σχήμα 4.5: Η οξίνιση του εδάφους-Midpoint .....	35
Σχήμα 4.6: Η εξάντληση των μετάλλων-Midpoint .....	35
Σχήμα 4.7: Η κλιματική αλλαγή-Midpoint .....	36
Σχήμα 4.8: Ο σχηματισμός σωματιδίων-Midpoint .....	36
Σχήμα 4.9: Ο ευτροφισμός στο γλυκό νερό-Midpoint .....	36
Σχήμα 4.10: Ο φωτοχημικός σχηματισμός οξειδωτικών-Midpoint .....	37
Σχήμα 4.11: Η επιρροή στην ανθρώπινη υγεία - ReCiPe Endpoint (H) .....	38
Σχήμα 4.12: Η επιρροή στο οικοσύστημα - ReCiPe Endpoint (H) .....	39
Σχήμα 4.13: Η επιρροή στη διαθεσιμότητα των πόρων - ReCiPe Endpoint (H) .....	39



Σχήμα 4.14: Αποτελέσματα κανονικοποίησης όπως εμφανίζονται στο λογισμικό OpenLCA .....	40
Σχήμα 4.15: Κανονικοποίηση για το γεωπολυμερικό σκυρόδεμα - ReCiPe Midpoint (H) .....	41
Σχήμα 4.16: Κανονικοποίηση για το συμβατικό σκυρόδεμα - ReCiPe Midpoint (H) .....	41

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες ολοένα και περισσότερη προσοχή δίνεται στο περιβάλλον και στις επιβαρύνσεις τις οποίες καθημερινά αυτό δέχεται. Τα περιβαλλοντικά προβλήματα είναι πολλά και όσο περνάει ο καιρός εντείνονται. Μελέτες έχουν δείξει ότι αν δεν αλλάξει κάτι άμεσα και ριζικά, ο πλανήτης μακροπρόθεσμα θα καταστεί μη βιώσιμος.

Ένα από τα κυριότερα δομικά υλικά είναι το συμβατικό σκυρόδεμα, το οποίο χρησιμοποιείται σε τεράστιες ποσότητες παγκοσμίως. Η βασικότερη πρώτη ύλη του συμβατικού σκυροδέματος είναι το τσιμέντο. Η παραγωγή του τσιμέντου αποτελεί μια ιδιαίτερα ενεργοβόρα διαδικασία, ενώ παράλληλα εκλύονται αέρια του θερμοκηπίου (όπως για παράδειγμα το CO<sub>2</sub>), τα οποία είναι υπεύθυνα για μια σειρά περιβαλλοντικών και μη προβλημάτων.

Ένα σχετικά νέο δομικό υλικό, με αξιοσημείωτες ιδιότητες και εφαρμογές, είναι το γεωπολυμερικό σκυρόδεμα. Για την παρασκευή του χρησιμοποιούνται αργιλοπυριτικές πρώτες ύλες (όπως για παράδειγμα η υπτάμενη τέφρα). Τόσο ο τρόπος παρασκευής του, όσο και η σύνθεση του είναι οι αιτίες για τις οποίες το συγκεκριμένο υλικό είναι κατά πολύ φιλικότερο προς το περιβάλλον. Μελέτες αναφέρουν, μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά 80% και της χρησιμοποιούμενης ενέργειας κατά 40%, συγκριτικά με το συμβατικό. Πιθανότατα, το νέο αυτό δομικό υλικό να αντικαταστήσει το συμβατικό σκυρόδεμα στο μέλλον. Προς το παρόν, έχει γίνει χρήση σε συγκεκριμένες μόνο εφαρμογές, καθώς ο τρόπος δράσης του και οι δυνατότητες του δεν έχουν αποσαφηνιστεί πλήρως.

Στόχο της παρούσας εργασίας αποτελεί η μελέτη του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του γεωπολυμερικού σκυροδέματος και η σύγκριση του με το αντίστοιχο αποτύπωμα του συμβατικού σκυροδέματος. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η μεθοδολογία της ανάλυσης κύκλου ζωής (AKZ ή LCA), η οποία λαμβάνει υπόψη όλα τα στάδια της ζωής ενός προϊόντος, δίνοντας έτσι μια ολοκληρωμένη εικόνα της επιβάρυνσης που προκαλεί το εκάστοτε προϊόν στο περιβάλλον. Με βάση τη βιβλιογραφία, αναμένονται ευνοϊκότερα αποτελέσματα στην περίπτωση του γεωπολυμερικού σκυροδέματος.

Η δομή της διπλωματικής εργασίας διαμορφώθηκε ως εξής:

- Κεφάλαιο 1 «Εισαγωγή»: Παρατίθενται εισαγωγικά στοιχεία για την εργασία
- Κεφάλαιο 2 «Γεωπολυμερή»: Γίνεται μια θεωρητική επισκόπηση στα γεωπολυμερικά υλικά, όπου, μεταξύ άλλων, παρουσιάζεται ο ορισμός, οι ιδιότητες και οι εφαρμογές τους, καθώς επίσης η δομή και τα πλεονεκτήματά τους.
- Κεφάλαιο 3 «Ανάλυση Κύκλου Ζωής»: Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση της AKZ. Περιγράφεται ο ορισμός και ο σκοπός της μεθόδου, η μεθοδολογία που χρησιμοποιεί, καθώς επίσης και κάποιες εφαρμογές της.
- Κεφάλαιο 4 «Συγκριτική ανάλυση κύκλου ζωής γεωπολυμερικού και συμβατικού σκυροδέματος»: Με χρήση του λογισμικού OpenLCA υπολογίζεται το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του συμβατικού σκυροδέματος και του γεωπολυμερικού σκυροδέματος.
- Κεφάλαιο 5 «Συμπεράσματα»: Παρατίθενται τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας.
- Βιβλιογραφία: Παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

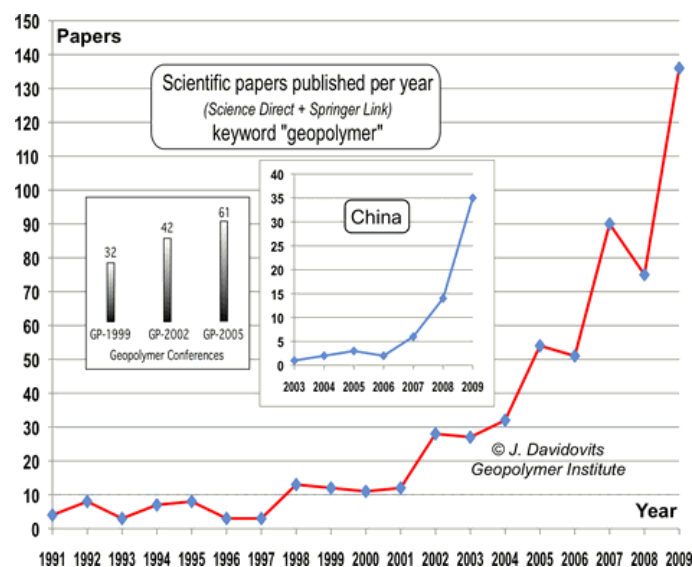
### Γεωπολυμερή

#### 2.1 Ορισμός

Γεωπολυμερή ονομάζονται τα προϊόντα της αντίδρασης αργιλοπυριτικών πρώτων υλών με ισχυρά αλκαλικά διαλύματα. Το πρώτο συνθετικό του όρου περιγράφει την ανόργανη προέλευση τους, ενώ το δεύτερο συνθετικό περιγράφει, κατά αναλογία με τα οργανικά πολυμερή, τη μετατροπή και πολυσυμπύκνωση των ανόργανων πρώτων υλών σε μια τρισδιάστατη δομή μεγάλου μήκους. Πολλές φορές στη βιβλιογραφία χαρακτηρίζονται και ως ανόργανα πολυμερή [1].

#### 2.2 Ιστορική αναδρομή

Ο βασικός μηχανισμός για την παραγωγή των γεωπολυμερών πιθανότατα είχε χρησιμοποιηθεί από τα αρχαία χρόνια, στην Μεσοποταμία, στην Αίγυπτο και στη Ρώμη. Στη σύγχρονη εποχή η ανάπτυξη τους ξεκίνησε τη δεκαετία του 1940 από τον Purdon. Ο Purdon ενεργοποίησε σκωρίες υψικαμίνων με τη χρήση αλκαλικών διαλυμάτων και ασβέστη και παρατήρησε ότι το τελικό προϊόν εμφάνιζε ικανοποιητικές ιδιότητες. Ιδιότητες οι οποίες πιθανότατα θα επέτρεπαν στο συγκεκριμένο προϊόν να χρησιμοποιηθεί ως δομικό υλικό. Τα επόμενα χρόνια, και άλλοι ερευνητές ασχολήθηκαν με την παρασκευή και τη μελέτη των γεωπολυμερών, ενώ από το 2003 έως και σήμερα η έρευνα στον τομέα των γεωπολυμερών εξελίσσεται με εκθετικό ρυθμό (Σχήμα 2.1) [2].



Σχήμα 2.1: Εξέλιξη γεωπολυμερών [3]

### 2.3 Πρώτες ύλες των γεωπολυμερών

Ως πρώτες ύλες για τη σύνθεση των γεωπολυμερών χρησιμοποιούνται διάφορα βιομηχανικά παραπροϊόντα αργιλοπυριτικής σύστασης, όπως η ιπτάμενη τέφρα (Σχήμα 2.2) και η σκωρία υψικαμίνων ή φυσικά αργιλοπυριτικά ορυκτά, όπως οι ποζολάνες και ο μετακαολίνης. Εκτός όμως της χημικής σύστασης της πρώτης ύλης, σημαντικοί παράγοντες στη γεωσύνθεση είναι επίσης η ορυκτολογική σύσταση των πρώτων υλών, το μέγεθος των σωματιδίων τους, η κοκκομετρική τους διαβάθμιση και η κρυσταλλική τους κατάσταση. Ακόμα σύμφωνα με τους Hui Xu et al., το θερμικό ιστορικό της πρώτης ύλης παίζει, επίσης, σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά της κατά το γεωπολυμερισμό, και επομένως επιδρά στις τελικές ιδιότητες των παραγόμενων προϊόντων. Τέλος, κάποιιοι ερευνητές προτείνουν την ανάμειξη διαφόρων αργιλοπυριτικών πρώτων υλών προκειμένου να παραχθούν γεωπολυμερή με βελτιωμένες ιδιότητες. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων συνδυασμών είναι ιπτάμενη τέφρα με σκωρία και σκωρία με μετακαολίνη [4-6].



Σχήμα 2.2: Ιπτάμενη τέφρα

### 2.4 Διαλύματα ενεργοποίησης για τη γεωσύνθεση

Τα διαλύματα ενεργοποίησης που χρησιμοποιούνται στη γεωσύνθεση είναι ισχυρά αλκαλικά διαλύματα και περιέχουν ενώσεις του νατρίου ή/και του καλίου, στοιχεία τα οποία είναι ικανά να διαλυτοποιήσουν μεγάλες ποσότητες πυριτίου και αργιλίου από την αργιλοπυριτική πρώτη ύλη. Ως διαλύματα ενεργοποίησης κυρίως χρησιμοποιούνται πυριτικά αλκάλια, υδροξείδια αλκαλίων, ανθρακικά αλκάλια ή μίγματα αυτών. Η χημική σύσταση και η συγκέντρωση των διαλυμάτων αυτών επηρεάζει σημαντικά τόσο τις ιδιότητες όσο και τη δομή των γεωπολυμερών [7,8].

Για παράδειγμα, αυξάνοντας τις συγκεντρώσεις των καυστικών αλκαλίων βελτιώνεται ο γεωπολυμερισμός (καλύτερη απόδοση της αντίδρασης γεωπολυμερισμού), και προκύπτουν προϊόντα με καλύτερες ιδιότητες. Από την άλλη πλευρά όμως η αύξηση της συγκέντρωσης του διαλύματος ενεργοποίησης σε NaOH μειώνει την εργασιμότητα των γεωπολυμερικών μιγμάτων, αφού αυξάνεται το ιξώδες του διαλύματος κι έτσι ελαττώνεται η ροή του κονιάματος. Για να προκύψουν μίγματα με κατάλληλη ροή, απαιτείται επιπλέον νερό ή υπερευσοποιητής, κάτι το οποίο υποβαθμίζει τις ιδιότητες των παραγόμενων προϊόντων. Επομένως, είναι προφανές ότι η συνεχής αύξηση της συγκέντρωσης του NaOH ή/και του KOH δεν οδηγεί σε αυξανόμενες αντοχές.

Αντιθέτως, όταν η συγκέντρωση υπερβεί τη βέλτιστη, τότε το σχηματιζόμενο γεωπολυμερικό πλέγμα είναι πορώδες με αποτέλεσμα να παρατηρούνται μειωμένες θλιπτικές αντοχές [9].

Το νερό είναι απαραίτητο συστατικό του διαλύματος ενεργοποίησης, καθώς είναι υπεύθυνο για τη διατήρηση της αντοχής και της σταθερότητας του όγκου του γεωπολυμερούς. Το νερό δεν συμμετέχει στη χημική αντίδραση του γεωπολυμερισμού, ωστόσο, καθορίζει την εργασιμότητα του υλικού και, συνεπώς, τη θλιπτική του αντοχή, αφού διαμορφώνει το πορώδες του. Όπως ο λόγος νερού προς τσιμέντο αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ανθεκτικότητα των κατασκευών σκυροδέματος τσιμέντου Portland, έτσι και ο λόγος νερού προς αργιλοπυριτική πρώτη ύλη επηρεάζει την ανθεκτικότητα των γεωπολυμερών. Η μείωση του λόγου οδηγεί σε ελάττωση του πορώδους και σε αύξηση της αντοχής, ενώ οι υψηλές τιμές του λόγου οδηγούν σε αύξηση του πορώδους, σε χαμηλότερη θλιπτική αντοχή και στην παρουσία κρυσταλλικών ζεολιθικών φάσεων. Επιπλέον, η χαμηλή ποσότητα νερού, κατά τη σύνθεση των γεωπολυμερών, βελτιώνει την ανθεκτικότητα των δοκιμών σε φωτιά, στο θερμοκρασιακό εύρος των 200-1000°C [1,7].

Ακόμη, ένας παράγοντας που επηρεάζει καθοριστικά τα γεωπολυμερή είναι ο λόγος  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ , καθώς είναι υπεύθυνος για τις μηχανικές τους ιδιότητες. Αν αυτός αυξηθεί πάνω από  $\sim 3:1$ , το γεωπολυμερές γίνεται πιο εύκαμπτο. Αν η τιμή του είναι κάτω από  $\sim 3:1$  το γεωπολυμερές είναι κατάλληλο ως δομικό υλικό. Οι αντοχές των δοκιμών αυξάνονται, γενικά, με την αύξηση του λόγου  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  μέχρι μιας μέγιστης τιμής, και, έπειτα, περεταίρω αύξηση του λόγου αυτού συνοδεύεται από μείωση των αντοχών [10].

## 2.5 Συνθήκες γεωσύνθεσης

Η γεωσύνθεση πραγματοποιείται σε ατμοσφαιρική πίεση. Όταν γίνει σε χαμηλές θερμοκρασίες, τότε προκύπτουν άμορφες ή υαλώδεις δομές με κακές μηχανικές ιδιότητες. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες (35°C-85°C) δημιουργούνται άμορφες ή ημικρυσταλλικές δομές με καλές φυσικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες. Ενώ σε ακόμα υψηλότερες θερμοκρασίες (150°C-200°C) δημιουργούνται τα κρυσταλλικά γεωπολυμερή [1].

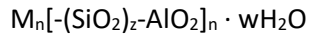
## 2.6 Προϊόντα γεωπολυμερισμού

Τα προϊόντα της γεωσύνθεσης είναι κυρίως άμορφα. Αυτό προκύπτει ανεξάρτητα από τα φυσικά χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης και από τη σύσταση και τη συγκέντρωση του διαλύματος ενεργοποίησης. Σε ελάχιστες περιπτώσεις, παρατηρείται και σχηματισμός ζεολιθικών κρυσταλλικών φάσεων, κάτι το οποίο συνεπάγεται μειωμένες θλιπτικές αντοχές [11].

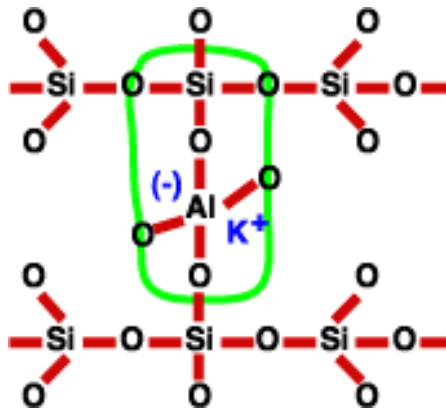
## 2.7 Δομή γεωπολυμερών

Για την περιγραφή των τρισδιάστατων γεωπολυμερικών δομών που σχηματίζονται έχει προταθεί ο όρος polysialate, δηλαδή πολύ-αργιλοπυριτικές ενώσεις (sialate είναι μία σύντηξη για το silicon-oxo-aluminate). Το προϊόν που προκύπτει από τη γεωσύνθεση έχει τη μορφή πλέγματος Si-O-Al, η

οποία αποτελείται από τετράεδρα  $\text{SiO}_4$  και  $\text{AlO}_4$ , που είναι συνδεδεμένα εναλλάξ μοιραζόμενα τα ιόντα οξυγόνου (Σχήμα 2.3). Η παρουσία  $\text{Al}^{3+}$  επιβάλλει την παρουσία των κατιόντων ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ ) στο πλέγμα, για να διατηρηθεί η ηλεκτρική ουδετερότητα του υλικού. Ο εμπειρικός τύπος των γεωπολυμερών είναι ο εξής:



όπου το M αντιπροσωπεύει τα αλκαλικά κατιόντα, το z το μοριακό λόγο Si/Al (1, 2 ή 3), και το n το βαθμό της πολυσυμπύκνωσης [1,6].

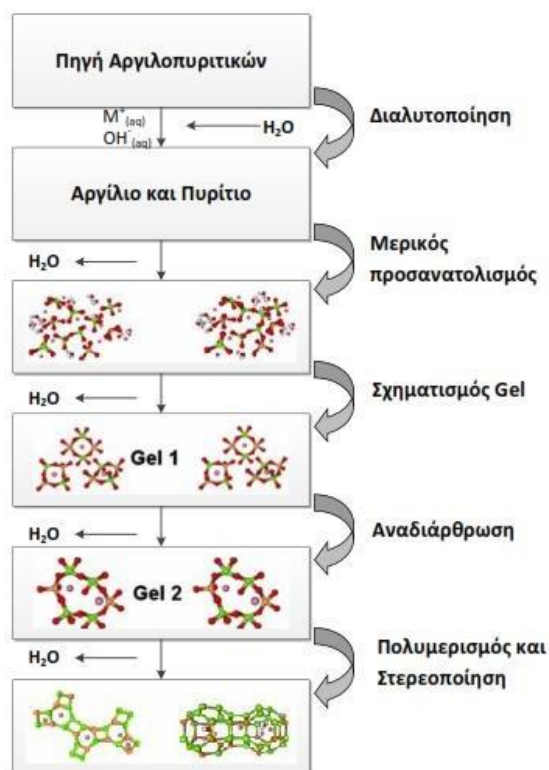


Σχήμα 2.3: Δομή γεωπολυμερούς

## 2.8 Αντίδραση γεωπολυμερισμού

Η επιστημονική ομάδα του van Deventer πρότεινε ένα μηχανισμό για την αλκαλική ενεργοποίηση των αργιλοπυριτικών πρώτων υλών. Ο μηχανισμός αυτός περιλαμβάνει τα εξής στάδια: (α) τη διαλυτοποίηση, (β) το στάδιο της ισορροπίας του συστήματος, (γ) τη γελοποίηση, (δ) την αναδιοργάνωση, και (ε) τον πολυμερισμό και την πήξη.

Αρχικά, διαλυτοποιούνται τα στερεά, λόγω δράσης των αλκαλικών διαλυμάτων με αποτέλεσμα την απελευθέρωση Si και Al και επομένως το σχηματισμό ευκίνητων πρόδρομων ενώσεων. Τα πρόδρομα γεωπολυμερή βρίσκονται με τη μορφή τζελ. Μετά το στάδιο της γελοποίησης, πραγματοποιείται μια διεργασία γνωστή ως συναίρεση - αναδόμηση. Κατά τη διεργασία αυτή το νερό που βρίσκεται στα διάκενα της δομής κατευθύνεται προς το κύριο τμήμα του γεωπολυμερούς. Αυτό συμβαίνει λόγω της συνεχιζόμενης αντίδρασης ή της δομικής αναδιοργάνωσης. Στο τελευταίο στάδιο της γεωσύνθεσης λαμβάνει χώρα ο πολυμερισμός του τζελ και η σκλήρυνση και προκύπτει το τελικό προϊόν (Σχήμα 2.4) [12].



Σχήμα 2.4: Στάδια γεωπολυμερισμού [1]

## 2.9 Συνθήκες συντήρησης γεωπολυμερών

Ένας παράγοντας σημαντικός για τις ιδιότητες των γεωπολυμερών είναι η συντήρηση, μετά την παρασκευή τους. Πιο συγκεκριμένα, η θερμική ωρίμανση παίζει θετικό ρόλο στην ανάπτυξη των αντοχών των γεωπολυμερικών κονιαμάτων και σκυροδεμάτων, και επιταχύνει την αντίδραση του γεωπολυμερισμού. Έχει βρεθεί ότι, δοκίμια που υποβλήθηκαν σε θερμική ωρίμανση (~60-90°C) έχουν υψηλότερες αρχικές αντοχές από τις αντίστοιχες δοκιμίων που συντηρήθηκαν σε χαμηλές θερμοκρασίες (~20-25°C). Ωστόσο, η θερμική επεξεργασία των γεωπολυμερικών δοκιμίων σε θερμοκρασίες άνω των ~75-85°C οδηγεί σε μείωση των θλιπτικών αντοχών, καθώς εξατμίζεται το νερό και κατά συνέπεια αυξάνεται το πορώδες. Η ιδανική θερμοκρασία ωρίμανσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος του δοκιμίου. Ένα μικρό δοκίμιο απαιτεί μικρότερη θερμοκρασία για λιγότερο χρόνο ώστε να αναπτύξει τις μέγιστες αντοχές του. Αυτό συμβαίνει επειδή το μικρό δοκίμιο έχει υψηλό λόγο επιφάνειας προς όγκο και είναι πιο ευάλωτο στη θερμική συντήρηση και στην απώλεια της υγρασίας, συγκριτικά με το μεγάλο δοκίμιο. Παρ' όλα αυτά, έχει επίσης υποστηριχθεί η άποψη ότι δεν απαιτείται θερμική ωρίμανση των γεωπολυμερών προκειμένου να επιτευχθούν υψηλές αντοχές. Σύμφωνα με την άποψη αυτή, η πήξη και η σκλήρυνση μπορούν να πραγματοποιηθούν σε θερμοκρασία δωματίου ή ακόμα και κάτω από αυτή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα αλκαλικά ενεργοποιημένα σκυροδέματα που παρασκευάζονται στην Αυστραλία, σε θερμοκρασία δωματίου και χρησιμοποιούνται ήδη για την κατασκευή υποδομών (Σχήμα 2.5).



**Σχήμα 2.5:** Τοποθέτηση γεωπολυμερικού σκυροδέματος στην Αυστραλία

Επίσης, βάση πειραμάτων, υποστηρίζεται ότι ο χρόνος παραμονής σε θερμοκρασία περιβάλλοντος πριν την τοποθέτηση των δοκιμίων στο φούρνο (χρόνος υστέρησης) επιδρά στις ιδιότητες των παραγόμενων γεωπολυμερών [1].

## **2.10 Συμπληρωματικά υλικά στην παρασκευή των γεωπολυμερών**

Κάποιες φορές, τα παραγόμενα γεωπολυμερή εμφανίζουν χαμηλές πρώιμες αντοχές και προβλήματα ανθεκτικότητας. Στην προσπάθεια να βελτιωθούν οι ιδιότητες τους, η ερευνητική κοινότητα στράφηκε στη χρησιμοποίηση συμπληρωματικών υλικών – αδρανών κατά την παρασκευή γεωπολυμερικών κονιαμάτων και σκυροδεμάτων. Αυτή η λύση, στις περισσότερες περιπτώσεις, συνεπάγεται σημαντικά οικονομικά οφέλη για τον παραγωγό, καθώς με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η δυναμικότητα των εργοστασίων παραγωγής δομικών υλικών, μειώνοντας, παράλληλα, και το κόστος, αφού τα αδρανή είναι φθηνότερα από την πάστα.

Σύμφωνα με μελέτη των Temuujin et al., ο συνδυασμός της γεωπολυμερικής πάστας με διάφορα φυσικά υλικά, όπως είναι ο χαλαζίας, ο βασάλτης, ο γρανίτης, ο αμμόλιθος και ο ασβεστόλιθος, επιφέρει μείωση στο σχηματισμό των ρωγμών, μείωση του πορώδους και βελτίωση της ανθεκτικότητας των τελικών προϊόντων. Σε άλλη μελέτη, οι ίδιοι ερευνητές, διαπίστωσαν ότι η προσθήκη  $\text{CaO}$  και  $\text{Ca(OH)}_2$  σε γεωπολυμερή ιπτάμενης τέφρας βελτιώνει τις μηχανικές τους ιδιότητες και επιτρέπει τη σύνθεση τους ακόμα και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ακόμη, οι Lee και van Deventer έδειξαν ότι και άλλες ασβεστούχες ενώσεις όπως είναι ο ασβεστίτης και ο δολομίτης όταν προστεθούν σε μικρές ποσότητες (20% κ.β.), έχουν θετική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες των γεωπολυμερών. Ωστόσο, και άλλα υλικά, μη ασβεστολιθικά (ζεόλιθος, μπεντονίτης), έχουν χρησιμοποιηθεί στη γεωσύνθεση, βελτιώνοντας υπό προϋποθέσεις το τελικό προϊόν. Ως γενικό συμπέρασμα προκύπτει ότι η επιλογή των αδρανών και η συνάφεια τους με το γεωπολυμερικό συνδετικό υλικό παίζει κρίσιμο ρόλο στις ιδιότητες του ανόργανου γεωπολυμερικού σκυροδέματος [1].



## 2.11 Ιδιότητες γεωπολυμερών

Τα γεωπολυμερή εμφανίζουν εξαιρετικές ιδιότητες, οι οποίες τα καθιστούν ανταγωνιστικά σε σχέση με τα συμβατικά δομικά υλικά.

Αρχικά, οι μηχανικές τους ιδιότητες είναι εντυπωσιακές. Έχει προκύψει ότι οι μηχανικές ιδιότητες κονιαμάτων και σκυροδεμάτων που παρασκευάστηκαν από αλκαλικά ενεργοποιημένες πρώτες ύλες είναι ίσες ή και ανώτερες από εκείνων που παρασκευάστηκαν από τσιμέντα Portland. Πιο συγκεκριμένα, μετά από θερμική επεξεργασία, έχουν παρατηρηθεί τιμές θλιπτικής αντοχής έως και 50 ή 60 MPa μόλις 20 h μετά από την παρασκευή τους, ενώ στη βιβλιογραφία συναντώνται τιμές που φτάνουν τα 120 MPa σε γεωπολυμερή σκωρίας. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι τα γεωπολυμερή αναπτύσσουν πολύ σύντομα τις αντοχές τους. Μπορεί να αναφερθεί περίπτωση όπου οι θλιπτικές αντοχές 3 ημερών γεωπολυμερούς ιπτάμενης τέφρας αντιστοιχούν με την τυπική αντοχή του τσιμέντου Portland μετά από 28 ημέρες. Σχετικά με τις τελικές τιμές θλιπτικών αντοχών, έχει αποδειχτεί ότι επηρεάζονται σημαντικά από τις συνθήκες συντήρησης μετά την αλκαλική ενεργοποίηση. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι οι μέγιστες αντοχές αναπτύσσονται μετά από 6-12 h σε θερμοκρασία 60-80°C [13-15].

Τα γεωπολυμερή εντυπωσιάζουν και με τις φυσικές τους ιδιότητες. Κατά την πήξη τους, παρουσιάζουν χαμηλή συρρίκνωση λόγω ξήρανσης και αυτό τους προσδίδει υψηλή σταθερότητα όγκου, καθώς και εξαιρετική συνάφεια με το χαλύβδινο σπλισμό. Γενικά, η συρρίκνωση στα γεωπολυμερή είναι αρνητικό χαρακτηριστικό, καθώς είναι η αιτία για την πρόκληση ρωγμών, κάτι το οποίο δεν εξυπηρετεί τα δομικά υλικά. Επίσης, τόσο η πήξη τους όσο και η σκλήρυνση τους είναι ταχείες αλλά ελεγχόμενες, επομένως μπορούν να παρασκευαστούν δοκίμια κάθε σχήματος [6,13].

Ένας ακόμα λόγος για περαιτέρω διερεύνηση των γεωπολυμερών είναι η εξαιρετική τους ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα γεωπολυμερή ανήκουν στην ευρύτερη οικογένεια των κεραμικών και συγκρινόμενα με το συμβατικό τσιμέντο Portland, εμφανίζουν καλύτερη συμπεριφορά σε φωτιά και σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ παράλληλα δεν παρουσιάζεται εκπομπή τοξικών καπνών. Ειδικότερα, ενώ τα περισσότερα οργανικά πολυμερή αναφλέγονται στους 400-600°C, και το τσιμέντο Portland υφίσταται αποσύνθεση του περιεχομένου του  $\text{Ca(OH)}_2$  στους περίπου 500°C, τα γεωπολυμερή είναι ανθεκτικά και μη εύφλεκτα έως και τους 1000°C [5,6,10,13].

Γενικά, τα γεωπολυμερή λόγω της αλκαλικότητας τους, έχουν την ικανότητα να παθητικοποιούν το χάλυβα και να προσφέρουν μια καλή αντίσταση έναντι στη διάβρωση. Ωστόσο, αυτή η ικανότητα μπορεί να χαθεί με την έκθεση στο νερό, λόγω της δράσης των χλωριόντων [13].

Τα ανόργανα γεωπολυμερικά τσιμέντα θεωρούνται ιδιαίτερα ανθεκτικά έναντι των οξέων, κάτι το οποίο πιθανότατα οφείλεται στην πολύ χαμηλή περιεκτικότητά τους σε ασβέστιο. Ακόμα, τα γεωπολυμερή είναι ικανά να δεσμεύουν και να εξουδετερώνουν ραδιενεργά στοιχεία, όπως είναι το καίσιο και το στρόντιο, καθώς και άλλα επικίνδυνα τοξικά στοιχεία, όπως τα μη μεταλλικά στοιχεία και τα βαρέα μέταλλα. Επομένως, τα γεωπολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σταθεροποίηση επικίνδυνων αποβλήτων [6,7,10,13].

Άλλη μία αξιοσημείωτη ιδιότητα των γεωπολυμερών είναι η πολύ καλή ανθεκτικότητα που εμφανίζουν σε θερμοκρασιακές μεταβολές. Έτσι, μπορεί να γίνει εφαρμογή τους σε

αυτοκινητόδρομους κρύων περιοχών, όπου λαμβάνουν χώρα κύκλοι ψύξης – απόψυξης. Συνήθως, σε τέτοιες περιπτώσεις, γίνεται ρίψη άλατος έναντι του πάγου με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται φθορά του τσιμέντου Portland [16].

Πρέπει να αναφερθεί ότι δεν έχουν όλα τα γεωπολυμερικά προϊόντα αυτές τις ιδιότητες, δηλαδή δεν υπάρχουν υλικά που να ικανοποιούν ταυτόχρονα όλες τις παραπάνω ιδιότητες. Με βάση τη σύνθεση, παράγονται γεωπολυμερή που καλύπτουν συνδυασμό αυτών των ιδιοτήτων.

## **2.12 Εφαρμογές γεωπολυμερών**

Τα γεωπολυμερή, είναι υλικά ικανά να χρησιμοποιηθούν σε πολλών ειδών εφαρμογές, εξυπηρετώντας διαφορετικό σκοπό σε κάθε περίπτωση. Χαρακτηριστικά πεδία εφαρμογής αποτελούν οι τομείς κατασκευών και παραγωγής δομικών υλικών, οι βιομηχανίες αυτοκινήτων, αεροσκαφών, τσιμέντου, πλαστικών και κεραμικών υλικών, καθώς επίσης, η μηχανική, η διαχείριση απορριμμάτων και η διακόσμηση. Μεταβάλλοντας τη σύνθεση τους, προκύπτουν τελικά προϊόντα, με κατάλληλες ιδιότητες για την εκάστοτε χρήση.

Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ένα υλικό ως δομικό στοιχείο, πρέπει να πληροί συγκεκριμένες προδιαγραφές, όπως είναι η θλιπτική αντοχή, το όριο ελαστικότητας, ο χρόνος πήξης κ.ά.. Τα γεωπολυμερή, σε πολλές περιπτώσεις καλύπτουν αυτές τις προδιαγραφές, όμως για την παρασκευή τους συνήθως απαιτείται η θερμική τους ωρίμανση. Το γεγονός αυτό, αποτρέπει την κατασκευή μεγάλων δομικών στοιχείων επί τόπου στο έργο, αφού απαιτείται η παραμονή σε φούρνο για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Επομένως, η θερμική ωρίμανση εξαιρεί τη χρήση των γεωπολυμερών από τις περισσότερες πιθανές δομικές εφαρμογές και την περιορίζει στην παρασκευή προκατασκευασμένων δομικών στοιχείων για την κατασκευή σπιτιών. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι, σε αντίθεση με τους ισχυρισμούς πολλών ερευνητών, δεν απαιτείται πάντα θερμική ωρίμανση ώστε να αναπτυχθούν υψηλές αντοχές. Στην Αυστραλία για παράδειγμα, παρασκευάζονται αλκαλικά ενεργοποιημένα σκυροδέματα σε θερμοκρασία δωματίου και χρησιμοποιούνται ήδη για την κατασκευή υποδομών [7,13].

Ακόμα, τα γεωπολυμερή χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές, σχετικές με την πολύ καλή αντοχή που παρουσιάζουν κατά την έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών αποτελούν τα εμπορικά αεροσκάφη, τα πλοία, οι θαλάσσιες πλατφόρμες κ.λπ., όπου ο κίνδυνος πυρκαγιάς και η ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες είναι σημαντικοί παράγοντες σχεδιασμού [6].

### **2.13 Περιβαλλοντικά οφέλη της χρήσης γεωπολυμερών**

Ως γνωστόν, το υλικό που χρησιμοποιείται στη συντριπτική πλειοψηφία των κατασκευών είναι το σκυρόδεμα από τσιμέντο Portland. Η παραγωγή του φτάνει περίπου τους  $1,7 \cdot 10^9$  τόνους ετησίως και αποτελεί μία ενεργοβόρα διεργασία, κατά την οποία απελευθερώνεται μεγάλη ποσότητα αερίων του θερμοκηπίου (π.χ. CO<sub>2</sub>) στην ατμόσφαιρα. Έχει δημοσιευτεί ότι περίπου το 7% των συνολικών αερίων του θερμοκηπίου της ατμόσφαιρας οφείλεται σε αυτή τη διεργασία [1,16].

Η χρήση γεωπολυμερών, έναντι των παραδοσιακών τσιμέντων, έχει σαφή περιβαλλοντικά οφέλη. Αρχικά, κατά τη γεωσύνθεση δεν απαιτείται έψηση σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πολύ χαμηλότερη εκπομπή CO<sub>2</sub> κατά την παρασκευή τους. Πιο συγκεκριμένα, η παρασκευή γεωπολυμερών μειώνει τις εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά 80% ή παραπάνω σε σχέση με το τσιμέντο Portland. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης το γεγονός ότι για τη γεωσύνθεση απαιτείται μόλις το 40% της αντίστοιχης ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή του συμβατικού τσιμέντου. Επιπλέον, η τεχνολογία των γεωπολυμερών προσφέρει τη δυνατότητα ανακύκλωσης των βιομηχανικών παραπροϊόντων. Επομένως, δίνεται προστιθέμενη αξία στα παραπροϊόντα, ενώ παράλληλα επιλύεται το πρόβλημα εναπόθεσης τους [7,8,14,16].

### **2.14 Προβληματισμοί χρήσης γεωπολυμερών**

Τα τελευταία χρόνια τα γεωπολυμερή έχουν προκαλέσει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών. Ωστόσο, η παραγωγή τους περιορίζεται ακόμα σε εργαστηριακή κλίμακα, όπου γίνεται απλά εμπειρική ανάμειξη των υλικών. Βασικό εμπόδιο για την παραγωγή τους σε ευρεία κλίμακα αποτελεί η δυσκολία κατανόησης και ελέγχου της πήξης, καθώς και η επίτευξη ικανοποιητικής επαναληψιμότητας.

Όπως είναι γνωστό, τα γεωπολυμερή παρασκευάζονται χρησιμοποιώντας αργιλοπυριτικές πρώτες ύλες (τέφρες, μεταλλουργικές σκωρίες κ.λπ.). Όμως, η σύσταση των πρώτων υλών διαφέρει βάσει της πηγής προέλευσης τους. Επομένως, για την παρασκευή ενός σωστού μίγματος, με τις επιθυμητές ιδιότητες, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η σύσταση της εκάστοτε πρώτης ύλης, γεγονός που δημιουργεί πρόβλημα, τόσο οικονομικά, όσο και χρονικά. Επιπλέον, δεν υπάρχουν επαρκή πειραματικά δεδομένα σχετικά με την ανθεκτικότητα αυτών των υλικών σε βάθος χρόνου. Έτσι, οι βιομηχανίες δεν διακινδυνεύουν την αποτυχία της κατασκευής, και επιλέγουν τη σιγουριά που τους προσφέρει το συμβατικό τσιμέντο. Τέλος, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, υπάρχουν και πρακτικές δυσκολίες, όπως η θερμική ωρίμανση που απαιτείται σε πολλές περιπτώσεις, προκειμένου να αποκτήσουν τα γεωπολυμερή τις κατάλληλες ιδιότητες [7,16].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Ανάλυση κύκλου ζωής

#### 3.1 Ορισμός

Ο Οργανισμός Περιβαλλοντικής Τοξικολογίας και Χημείας (Society of Environmental Toxicology and Chemistry – SETAC) ορίζει την ανάλυση κύκλου ζωής ως εξής:

Η ανάλυση του κύκλου ζωής - AKZ (Life Cycle Assessment, LCA) είναι μία τεχνική εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων που συνδέονται με κάποιο προϊόν, μία διεργασία ή μία δραστηριότητα, προσδιορίζοντας και ποσοτικοποιώντας την ενέργεια και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και τα απόβλητα που απελευθερώνονται στο περιβάλλον, εκτιμώντας τις επιπτώσεις από τη χρήση της ενέργειας και των υλικών καθώς και από τη χρήση των αποβλήτων, αναγνωρίζοντας και εκτιμώντας τις δυνατότητες περιβαλλοντικών βελτιώσεων [17].

#### 3.2 Ιστορική αναφορά

Κατά τη δεκαετία του 1960 η AKZ αρχίζει να απασχολεί ευρύτερα την διεθνή κοινότητα, καθώς αυτή την περίοδο παρουσιάζεται έντονο πρόβλημα σχετικά με τη μείωση των ενεργειακών αποθεμάτων, των πρώτων υλών και της διαθέσιμης ενέργειας. Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση αγαθών και ενέργειας θα οδηγούσε σε εξάντληση των φυσικών πόρων και έτσι δημιουργήθηκε η ανάγκη για λεπτομερείς μελέτες των βιομηχανικών διαδικασιών. Το 1969 η εταιρεία Coca Cola χρηματοδότησε μία μελέτη για τη σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με τις διαφορετικές συσκευασίες των προϊόντων της. Ακολούθησαν διάφορες μελέτες στις Η.Π.Α και την Ευρώπη, από μεγάλες εταιρίες, σχετικά με τη σύγκριση διαφορετικών εναλλακτικών πηγών ενέργειας, ενώ το 1972 έγινε η πρώτη μελέτη με αντικείμενο την βιομηχανία γυαλιού. Μέχρι το 1990 το ενδιαφέρον για την AKZ παρέμεινε σταθερό, αλλά χωρίς σημαντική πρόοδο. Στις αρχές του 1990, διάφορες οργανώσεις, όπως η SETAC, ασχολήθηκαν με την ανάπτυξη συγκεκριμένης μεθοδολογίας, ενώ ακολούθησε και ο σχεδιασμός σχετικού λογισμικού προκειμένου να γίνει η AKZ ένα περιβαλλοντικό εργαλείο φιλικό προς το χρήστη. Από το 1995 μέχρι και σήμερα παρατηρείται ευρύτατη εξάπλωση της AKZ σε διεθνές επίπεδο [19,20,21].

#### 3.3 Κύκλος ζωής

Η AKZ περιλαμβάνει ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος, από τη δημιουργία του, μέχρι και την τελική του διάθεση. Τα στάδια κύκλου ζωής που μελετώνται κατά τη διεξαγωγή μιας AKZ παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1 και είναι τα εξής :

- 1) Εξαγωγή και επεξεργασία των πρώτων υλών
- 2) Παραγωγή
- 3) Συσκευασία

- 4) Μεταφορά και διανομή
- 5) Χρήση, επαναχρησιμοποίηση και συντήρηση
- 6) Ανακύκλωση και ανάκτηση αποβλήτων
- 7) Τελική διάθεση [18]



**Σχήμα 3.1:** Τα στάδια του κύκλου ζωής

### 3.4 Σκοπός ΑΚΖ

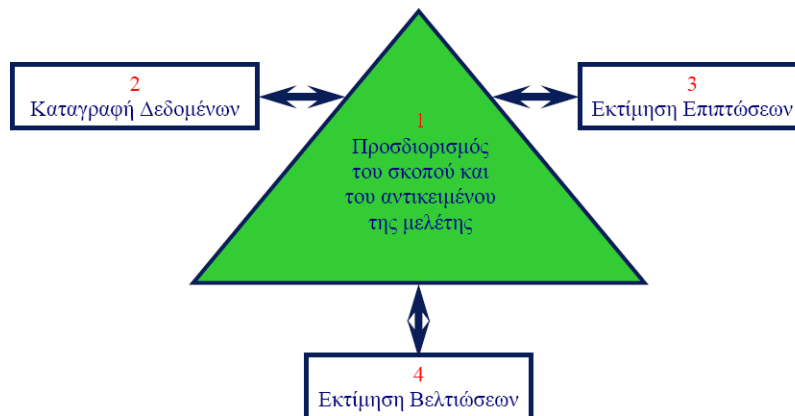
Η ΑΚΖ είναι μια μέθοδος με κύριο στόχο την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την παραγωγή προϊόντων και διαδικασιών. Απογράφει όλες τις διαδικασίες και τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται σε μία παραγωγική διαδικασία. Για κάθε μια από τις διαδικασίες υπολογίζεται η ενεργειακή κατανάλωση και η χρήση άλλων πόρων, καθώς και η περιβαλλοντική επιβάρυνση που προξενεί. Με τον τρόπο αυτό εκτιμάται το σύνολο της κατανάλωσης ενέργειας, πόρων και περιβαλλοντικής επιβάρυνσης που συνεπάγεται η παραγωγή του προϊόντος. Στη συνέχεια, η ΑΚΖ επεκτείνεται στην εκτίμηση αυτών των παραμέτρων κατά τη χρήση του προϊόντος, αλλά και κατά την αποσυναρμολόγηση ή ανακύκλωση του, όταν λήξει η ωφέλιμη ζωή του. Είναι προφανές ότι η ΑΚΖ αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο αξιολόγησης της αειφορίας μιας διαδικασίας ή επένδυσης. Μεταξύ δύο εναλλακτικών δυνατοτήτων, αυτή που συνεπάγεται μικρότερη κατανάλωση και επιβάρυνση του περιβάλλοντος σε όλο τον κύκλο ζωής, είναι η βέλτιστη από πλευράς αειφορίας.

Η ΑΚΖ εστιάζει στη συλλογή και ανάλυση των στοιχείων εισόδου και εξόδου, στη διαμόρφωση των ισοζυγίων ενέργειας και μάζας, καθώς και στην εξέταση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με αυτά. Σκοπός της μεθόδου είναι να αποτιμήσει τις επιδράσεις από τη χρήση ενέργειας και πρώτων υλών, συμπεριλαμβανομένης της απόρριψης των αποβλήτων, ενώ παράλληλα προτείνει εφαρμόσιμες και πρακτικές περιβαλλοντικές βελτιώσεις, βασισμένες στην ορθολογική χρήση πρώτων υλών και ενέργειας [20].

### 3.5 Μεθοδολογία ΑΚΖ

Η μεθοδολογία της ΑΚΖ όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2 περιλαμβάνει τέσσερα στάδια:

- 1) Προσδιορισμό του σκοπού και του αντικειμένου της μελέτης.
- 2) Καταγραφή δεδομένων.
- 3) Εκτίμηση των επιπτώσεων
- 4) Εκτίμηση βελτιώσεων.

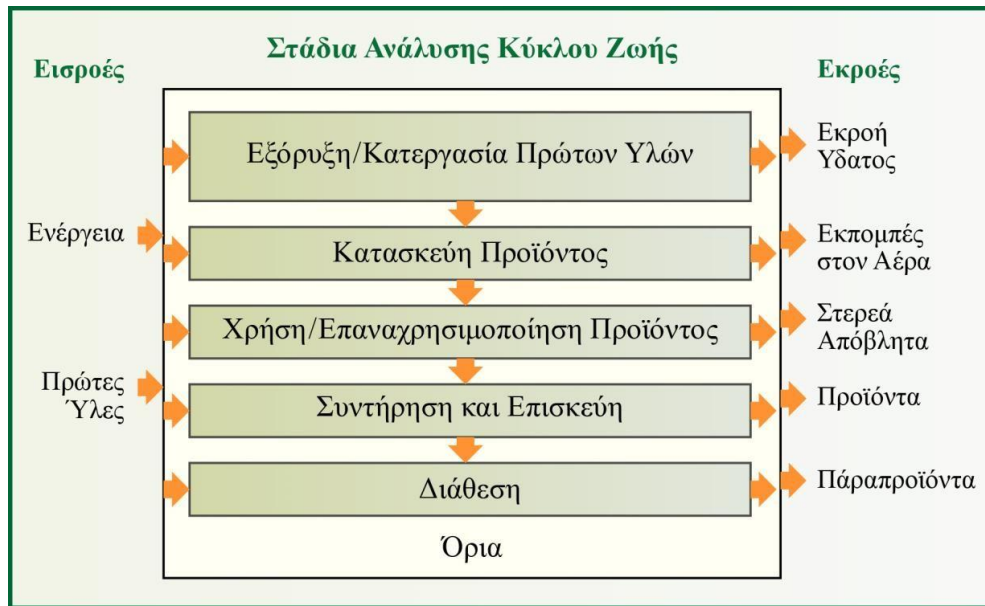


Σχήμα 3.2: Η μεθοδολογία της ΑΚΖ

**1]** Όταν διεξάγεται μία ΑΚΖ πρέπει να ορίζονται με ακρίβεια η επιδίωξη και το αντικείμενο της μελέτης. Με αυτό τον τρόπο γίνεται σαφής ο λόγος για τον οποίο πραγματοποιείται η μελέτη. Η επιδίωξη εξαρτάται από το είδος των πληροφοριών που απαιτούνται, τον σκοπό της ανάλυσης και τη σημαντικότητα των αποφάσεων που θα παρθούν βάση της μελέτης. Το αντικείμενο της μελέτης οριοθετεί το υπό εξέταση σύστημα, καθορίζει τις απαιτήσεις των δεδομένων και θέτει τις απαραίτητες υποθέσεις και περιορισμούς. Επίσης, πρέπει να ορίζονται τα γεωγραφικά και χρονικά στοιχεία, ενώ παράλληλα πρέπει να συνεκτιμάται η μεταβλητότητα των δεδομένων. Τέλος, είναι απαραίτητο η λειτουργική μονάδα να είναι μετρήσιμη και σχετική με τα στοιχεία εισόδου και εξόδου, αφού αποτελεί το μέτρο απόδοσης του συστήματος. Με σωστή επιλογή της λειτουργικής μονάδας, τα αποτελέσματα της ανάλυσης θα έχουν και πρακτική εφαρμογή [22].

**2]** Η απογραφή δεδομένων αποτελεί την ποσοτική περιγραφή όλων των ρών και ανταλλαγών μάζας και ενέργειας από και προς το σύστημα. Σε αρκετές περιπτώσεις δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για όλα τα στάδια του συστήματος, γεγονός το οποίο αποτελεί εμπόδιο στην εκτέλεση μιας λεπτομερούς ΑΚΖ. Εντούτοις, η μελέτη βασίζεται στα στάδια του κύκλου ζωής για τα οποία υπάρχουν δεδομένα, ενώ παράλληλα επισημαίνονται οι όποιες ελλείψεις ώστε να υπάρχει μια πλήρης εικόνα των παραδοχών που έγιναν. Συνήθως χρησιμοποιείται ένα διάγραμμα ροής (Σχήμα 3.3) το οποίο αναπαριστά όλες τις διασυνδέσεις εντός των ορίων του συστήματος, κατά τη διάρκεια

ζωής ενός προϊόντος. Με τον τρόπο αυτό η αναγνώριση των ορίων του συστήματος γίνεται εύκολα και παραστατικά.



**Σχήμα 3.3:** Διάγραμμα ροής ενός προϊόντος

Η ποιότητα των δεδομένων που συλλέγονται αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες για μια επιτυχημένη ΑΚΖ. Όσο υψηλότερη η ποιότητα των δεδομένων, τόσο μεγαλύτερη η αξιοπιστία και η εγκυρότητα της ανάλυσης.

Η ποιότητα των δεδομένων επηρεάζεται από τους εξής παράγοντες:

- 1) Την πηγή των δεδομένων
- 2) Τη μέθοδο συλλογής τους
- 3) Τον τρόπο παραγωγής τους
- 4) Το κόστος και το χρόνο συλλογή τους.

Οι πηγές των δεδομένων μπορεί να είναι είτε πρωτογενείς (όπως τα δεδομένα ειδικών διαδικασιών που προκύπτουν π.χ. απευθείας από μετρήσεις) είτε δευτερογενείς (όπως δεδομένα που συλλέγονται από αναφορές ή άλλες δημοσιευμένες πηγές). Αυτές οι πηγές προέρχονται από:

- βιομηχανικές και κρατικές αναφορές,
- δεδομένα εργαστηριακών δοκιμών,
- βιβλία αναφοράς,
- δημοσιεύσεις και βάσεις δεδομένων,
- λίστες θεσμοθετημένων ορίων,
- συμβούλους και εμπορικούς συνδέσμους,
- παρόμοιες μελέτες ΑΚΖ.

Η συλλογή των δεδομένων μπορεί να γίνει σε διάφορα επίπεδα:

- μέσες τιμές (μηνιαίες / ετήσιες),
- μικτά δεδομένα,
- σταθερά δεδομένα,
- κανονικοποιημένα δεδομένα.

Ακόμα, τα δεδομένα μπορούν να παραχθούν με διάφορους τρόπους:

- ακριβείς μετρήσεις,
- εκτιμήσεις / δείγματα,
- μοντέλα / υπολογισμούς.

Τέλος, η ποιότητα των δεδομένων εξαρτάται από τον χρόνο που αφιερώνεται για τη μελέτη, από την προσπάθεια που καταβάλλεται, αλλά και από το χρηματικό ποσό που διατίθεται. Τα στοιχεία αυτά βέβαια διαμορφώνονται με βάση το βάθος της ανάλυσης που θέλει να πετύχει ο μελετητής [24,25].

**3]** Το στάδιο της εκτίμησης επιπτώσεων στοχεύει στην αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεων «από το λίκνο μέχρι τον τάφο» (Σχήμα3.4). Είναι μια διαδικασία ποσοτική ή/και ποιοτική.

Οι φάσεις της εκτίμησης επιπτώσεων είναι οι εξής:

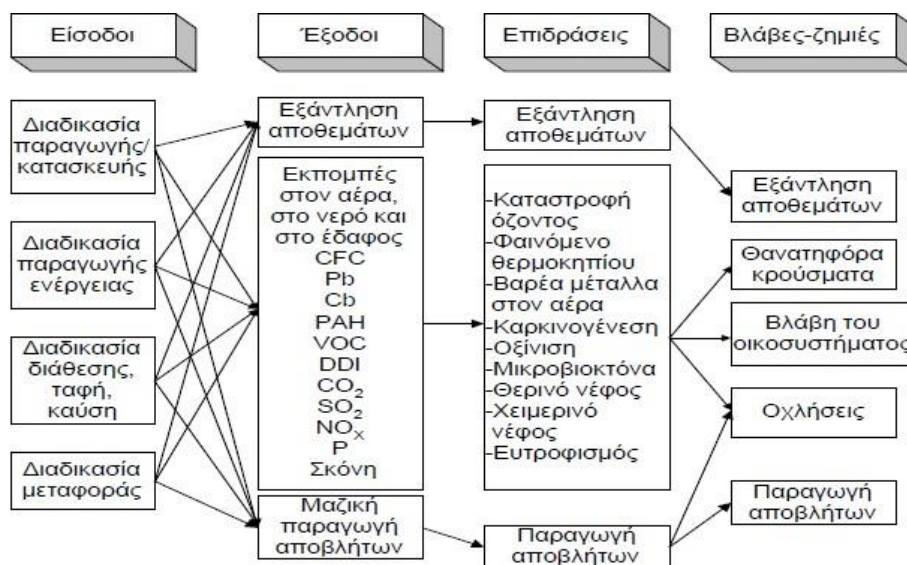
- Κατηγοριοποίηση
- Χαρακτηρισμός
- Κανονικοποίηση
- Ομαδοποίηση
- Στάθμιση

Οι τρεις τελευταίες φάσεις είναι προαιρετικές και βοηθούν την ερμηνεία της ανάλυσης στο στάδιο της εκτίμησης βελτιώσεων.

Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14042, οι μεγάλες κατηγορίες επιπτώσεων που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σε μια μελέτη ΑΚΖ είναι οι εξής:

- Επιπτώσεις στο οικοσύστημα
- Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία
- Επιπτώσεις στους φυσικούς πόρους [17,23,24]





**Σχήμα 3.4:** Απεικόνιση περιβαλλοντικών επιπτώσεων

### Κατηγοριοποίηση

Σε αυτή τη φάση διαχωρίζονται οι επιπτώσεις ανάλογα με τους βασικούς περιβαλλοντολογικούς παράγοντες. Τα βασικά περιβαλλοντικά προβλήματα είναι τα εξής:

- Η αβιοτική εξασθένιση (abiotic depletion) η οποία μετριέται σε σχέση με τα αποθέματα σε παγκόσμιο επίπεδο
- Η εξασθένιση της ενέργειας ή το ενεργειακό περιεχόμενο (non-renewable energy) που μετριέται σε MJ/kg ή σε MJ/m<sup>3</sup>
- Το φαινόμενο του θερμοκηπίου (greenhouse effect) που μετριέται σε σχέση με την επίδραση που έχει 1 kg CO<sub>2</sub>
- Το φωτοχημικό νέφος (photochemical smog) που μετριέται σε σχέση με την επίδραση που έχει 1 kg αιθυλενίου
- Η οξίνιση του εδάφους (terrestrial acidification) που μετριέται σε σχέση με την επίδραση που έχει 1 kg SO<sub>2</sub>
- Η τοξικότητα στον άνθρωπο (human toxicity) μετριέται σε σχέση με την ποσότητα του βάρους του ανθρώπινου σώματος που μπορεί να εκτεθεί στο επιτρεπόμενο τοξικά όριο ενός κιλού της ουσίας.
- Η οικοτοξικότητα του νερού (aquatic ecotoxicity) η οποία αφορά στην ποσότητα του νερού που θα μολυνθεί έως ένα κρίσιμο επίπεδο από 1 kg ουσίας
- Η εδαφική οικοτοξικότητα (terrestrial ecotoxicity) αφορά στην επιβάρυνση του εδάφους έως ένα κρίσιμο επίπεδο από 1 kg ουσίας
- Ο ευτροφισμός (eutrophication) που μετριέται σε σχέση με την επίδραση που έχει 1 kg φωσφόρου
- Η εξασθένιση της στοιβάδας του όζοντος (ozone depletion) που μετριέται σε σχέση με την επίδραση που έχει 1 kg CFC-11 [25]

### **Χαρακτηρισμός**

Είναι η διαδικασία κατά την οποία ποσοτικοποιείται η συνεισφορά όλων των δεδομένων της απογραφής στις κατηγορίες των περιβαλλοντικών προβλημάτων. Η διαδικασία περιλαμβάνει την κατάρτιση μιας λίστας που περιέχει τους ισοδύναμους συντελεστές, οι οποίοι αντιστοιχούν σε κάθε μια από τις ουσίες που υπάρχουν στο σύστημα για κάθε περιβαλλοντικό πρόβλημα. Στη συνέχεια πολλαπλασιάζονται τα δεδομένα της απογραφής για κάθε ουσία του συστήματος με τους ισοδύναμους συντελεστές κάθε περιβαλλοντικού προβλήματος και προστίθενται τα αποτελέσματα που προκύπτουν ώστε να καταγραφούν τα συνολικά αποτελέσματα για κάθε περιβαλλοντικό πρόβλημα, για όλες τις ουσίες που υπάρχουν στο σύστημα.

Ο χαρακτηρισμός δίνει τη δυνατότητα άμεσης σύγκρισης των αποτελεσμάτων της απογραφής σε κάθε κατηγορία περιβαλλοντικού προβλήματος. Δηλαδή, οι ισοδύναμοι συντελεστές ερμηνεύουν τις εισροές της απογραφής σε άμεσα συγκρίσιμους δείκτες [25].

### **Κανονικοποίηση**

Τα αποτελέσματα για κάθε περιβαλλοντικό πρόβλημα μπορούν να συσχετιστούν με μια τιμή αναφοράς. Ουσιαστικά, γίνεται σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλεί το προϊόν που μελετάται με τις εκπομπές σε παγκόσμιο επίπεδο. Η κανονικοποίηση γίνεται με τη διαίρεση των συνολικών αποτελεσμάτων για κάθε περιβαλλοντικό πρόβλημα, για όλες τις ουσίες που υπάρχουν στο σύστημα, με μια επιλεγμένη τιμή για κάθε περιβαλλοντικό πρόβλημα. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι επιλογής της τιμής, όπως για παράδειγμα οι συνολικές εκπομπές ή η χρήση των τιμών σε μια δεδομένη περιοχή [25].

### **Ομαδοποίηση**

Σε αυτό το στάδιο ομαδοποιούνται οι κατηγορίες επιπτώσεων με κατηγοριοποίηση τους σε ομάδες με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (π.χ. εκπομπές) και ταξινομούνται με ιεραρχική κλιμάκωση όπως π.χ. υψηλή, μεσαία και χαμηλή επίπτωση.

### **Στάθμιση**

Η στάθμιση των αποτελεσμάτων δίνει τη δυνατότητα σύγκρισης ανάμεσα στις διάφορες κατηγορίες επιπτώσεων. Τα αποτελέσματα πολλαπλασιάζονται με τους συντελεστές στάθμισης για να διαμορφώσουν το τελικό αποτέλεσμα.

**4]** Σύμφωνα με τον οργανισμό SETAC η εκτίμηση των βελτιώσεων ορίζεται ως εξής: “Η εκτίμηση βελτιώσεων αποτελεί μια συστηματική αξιολόγηση των αναγκών και δυνατοτήτων για την μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης που συνδέεται με τη χρήση ενέργειας, πρώτων υλών και τις περιβαλλοντικές εκπομπές καθ’ όλη την διάρκεια του κύκλου ζωής των προϊόντων, των διεργασιών

και υπηρεσιών. Η ανάλυση αυτή είναι δυνατό να περιέχει τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά μέτρα βελτίωσης, όπως αλλαγές στο προϊόν, στη διεργασία, στο σχεδιασμό, στη χρήση των πρώτων υλών, στην χρήση από τον καταναλωτή και στη διαχείριση των απορριμμάτων”.

Συνεπώς, κατά το στάδιο εκτίμησης των βελτιώσεων λαμβάνονται υπόψη τα αποτελέσματα της ανάλυσης και παίρνονται οι κατάλληλες αποφάσεις, ώστε να ωφεληθεί η παραγωγική διαδικασία ενώ ταυτόχρονα να επιβαρυνθεί το περιβάλλον όσο το δυνατόν λιγότερο [21].

### 3.6 Εφαρμογές

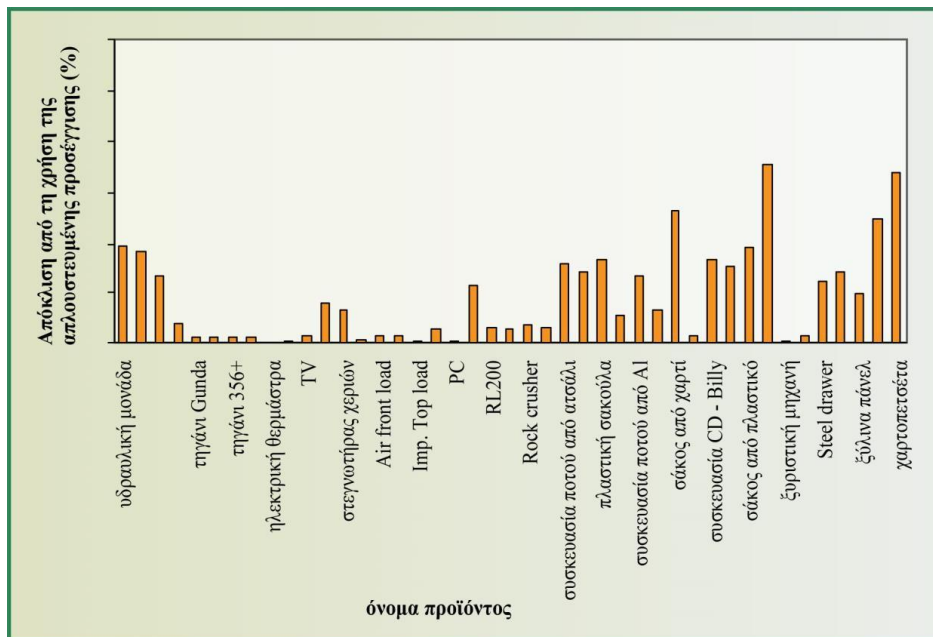
Η AKZ είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη διαχείριση του περιβάλλοντος. Εφαρμόζεται από κυβερνήσεις, ιδιωτικές εταιρείες, οργανώσεις καταναλωτών και περιβαλλοντικές οργανώσεις ως ένα εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων. Το αντικείμενο των αποφάσεων ποικίλει από πολύ ευρείες πολιτικές επιλογές μέχρι απλές επιλογές προϊόντων ή χαρακτηριστικών των προϊόντων κατά τον σχεδιασμό.

Επιγραμματικά οι εφαρμογές της AKZ αφορούν:

- Τον προσδιορισμό ευκαιριών για τη βελτίωση περιβαλλοντικών όψεων των προϊόντων
- Τη λήψη αποφάσεων από τη βιομηχανία όπως επίσης και από κυβερνητικές και μη κυβερνητικές οργανώσεις
- Την επιλογή δεικτών για την παρακολούθηση ή και αξιολόγηση της περιβαλλοντικής επίδοσης
- Την επιλογή δεικτών για διαδικασίες μέτρησης
- Το μάρκετινγκ που αφορά την οικολογική σήμανση και την εταιρική εικόνα όσον αφορά τα περιβαλλοντικά ζητήματα.

Ενδεικτικά κάποιες εφαρμογές της μεθόδου παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.5, ενώ οι εφαρμογές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία είναι:

- Τομείς βιομηχανίας
- Θέματα Ενέργειας
- Πυρηνικά
- Νερό
- Ηλεκτρονικά
- Κτήρια [17,21]



Σχήμα 3.5: Εφαρμογές AKZ για διάφορα προϊόντα

### 3.7 Λογισμικά

Τα τελευταία χρόνια η μεθοδολογία της AKZ απασχολεί τις βιομηχανίες και τους ερευνητές ολοένα και περισσότερο. Κατά συνέπεια έχουν αναπτυχθεί πολλά σχετικά λογισμικά, με βασικά στοιχεία:

- Τη ροή μάζας και ενέργειας και τις εκπομπές που αφορούν το σύνολο της διεργασίας αλλά και τις πρώτες ύλες.
- Τις μεθόδους εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και τους αντίστοιχους συντελεστές επίπτωσης.

Ενδεικτικά, μερικά ευρέως χρησιμοποιούμενα λογισμικά είναι τα εξής:

- TEAM
- GaBI Software
- Umberto
- SimaPro
- openLCA

Τα παραπάνω λογισμικά έχουν πολλές ομοιότητες στις μεθόδους εκτίμησης των επιπτώσεων. Η βασική διαφορά ανάμεσα τους εντοπίζεται στην πληθώρα των βάσεων δεδομένων που χρησιμοποιούν για τη δημιουργία του μοντέλου της διεργασίας [26].

### 3.8 OpenLCA

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε χρήση του λογισμικού openLCA στην πιο πρόσφατη έκδοση του, 1.8.0. Το συγκεκριμένο λογισμικό προσφέρει εύκολη μοντελοποίηση των συστημάτων που εξετάζονται, ενώ παράλληλα αναλύει και ελέγχει τις περιβαλλοντικές πληροφορίες για τα εκάστοτε προϊόντα και υπηρεσίες.

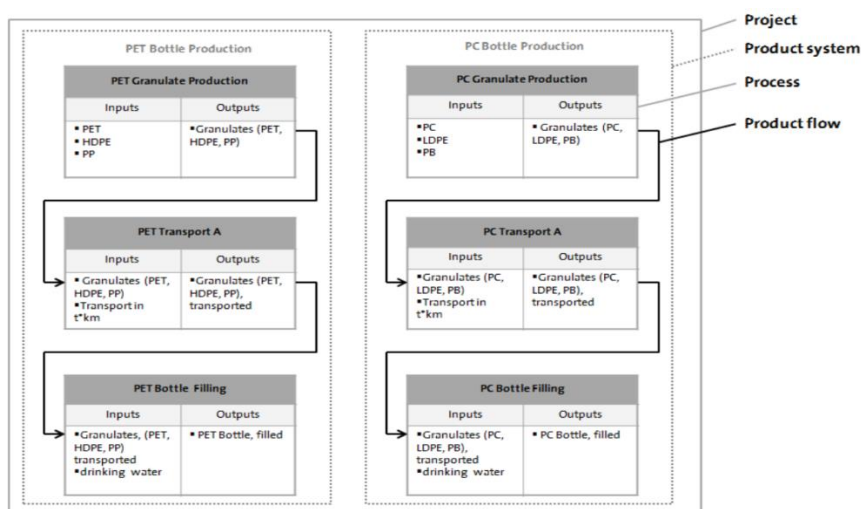
Οι βάσεις δεδομένων που είναι διαθέσιμες στο openLCA (μέσω του openLCA Nexus) είναι οι εξής:

- Eciobase 3.4
- AGRIBALYSE v.1.3
- NEEDS complete
- ELCD 3.2
- BioEnergieDat
- USDA crop data 1.1

Ενώ οι μέθοδοι εκτίμησης των επιπτώσεων που υποστηρίζονται από το openLCA είναι οι εξής:

- IMPACT World+
- OpenLCA LCIA methods v.2.0.3
- Ecoinvent 3.5 LCIA methods
- GaBi openLCA LCIA methods

Η λειτουργία του συγκεκριμένου λογισμικού είναι σχετικά απλή. Αρχικά δημιουργούνται οι ροές (Flows), οι οποίες αφορούν την εισροή και την εκροή προϊόντων, υλικών ή ενέργειας από και προς την εκάστοτε διεργασία. Στη συνέχεια δημιουργούνται οι διεργασίες (Processes), οι οποίες είναι ομάδες από σχετικές μεταξύ τους δραστηριότητες και μετατρέπουν τις εισροές σε εκροές. Σε επόμενο στάδιο δημιουργείται το σύστημα του κάθε προϊόντος (Product System), το οποίο περιλαμβάνει όλες τις διεργασίες που αφορούν το συγκεκριμένο προϊόν. Τέλος, δημιουργείται το συνολικό σύστημα (Project), το οποίο περιλαμβάνει όλα τα επιμέρους συστήματα και δίνει τη δυνατότητα σύγκρισης τους. Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω για ένα παράδειγμα που μελετά δύο διαφορετικές συσκευασίες για νερό.



Σχήμα 3.6: Διαδικασία μοντελοποίησης στο OpenLCA

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Συγκριτική ανάλυση κύκλου ζωής γεωπολυμερικού και συμβατικού σκυροδέματος

#### 4.1 Προσδιορισμός του σκοπού και αντικειμένου

Σκοπός της εργασίας είναι η αξιολόγηση του Κύκλου Ζωής του γεωπολυμερικού σκυροδέματος και η άμεση σύγκριση του με το συμβατικό σκυρόδεμα. Για το σκοπό αυτό γίνεται ανάλυση των πρώτων υλών και της ενέργειας που απαιτούνται, με απώτερο στόχο την ανάδειξη των επιβαρύνσεων που προκύπτουν. Στην παρούσα μελέτη προσεγγίζεται αποκλειστικά η παραγωγική διαδικασία των δύο σκυροδεμάτων, θεωρώντας ότι τόσο η μεταφορά των υλικών στις μονάδες σκυροδέματος, όσο και η διαχείριση των οικοδομικών απορριμμάτων στο πέρας της ζωής της κατασκευής, δεν διαφοροποιείται στους δύο τύπους σκυροδέματος.

#### 4.2 Απογραφή δεδομένων

Τα δεδομένα που απαιτούνται για το στάδιο της απογραφής δεδομένων έχουν αντληθεί από σχετικά εργαστηριακά πειράματα, που έγιναν στο εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής, και φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 4.1. Επίσης, τόσο στην περίπτωση του γεωπολυμερικού σκυροδέματος όσο και στην περίπτωση του συμβατικού σκυροδέματος το τελικό προϊόν είναι 1 m<sup>3</sup> νωπού σκυροδέματος, αντοχής 45 MPa.

**Πίνακας 4.1:** Ποσότητες των πρώτων υλών για την παραγωγική διαδικασία των δύο σκυροδεμάτων

Γεωπολυμερικό Σκυρόδεμα		Συμβατικό Σκυρόδεμα	
	Ποσότητα (kg)		Ποσότητα (kg)
Ιπτάμενη τέφρα	562,5	Τσιμέντο	330
Άμμος	721,17	Άμμος	1092,3
Γαρμπίλι	490,3	Γαρμπίλι	744,4
Νερό	95,81	Νερό	184,9
Υδρύαλος	251,87		
NaOH	48,21	Υπερρευστοποιητής	1,65
Σύνολο	2169,86	Σύνολο	2353,25

#### Παραδοχές

- Γενικώς η ΑΚΖ είναι μια τεχνική που επιδιώκει την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που αφορούν όλα τα στάδια ζωής ενός προϊόντος ή μιας διεργασίας, συμπεριλαμβανομένων του τρόπου απόκτησης των πρώτων υλών, την παραγωγή, την διανομή, την διάθεση ή την ανακύκλωση. Η συγκεκριμένη εργασία επικεντρώνεται στο στάδιο της παραγωγής των σκυροδεμάτων, θεωρώντας ότι τα υπόλοιπα στάδια δεν έχουν σημαντικές διαφορές.
- Οι ενέργειες που απαιτούνται για την παραγωγή των δύο σκυροδεμάτων θεωρούνται ίδιες, καθώς η ανάμιξη των πρώτων υλών είναι παρόμοια διαδικασία και στις δύο περιπτώσεις.

- Το γεωπολυμερικό σκυρόδεμα χρειάζεται μία επιπλέον ποσότητα ενέργειας προκειμένου να πραγματοποιηθεί ωρίμανση σε φούρνο, στους 60°C, για δύο ημέρες. Βιβλιογραφικά, αλλά και υπολογιστικά, αυτή η επιπλέον ενέργεια εκτιμάται στα 150 MJ/m<sup>3</sup>.
- Ο υδρύαλος δεν διατίθεται σε κάποια βάση δεδομένων του λογισμικού OpenLCA. Για το λόγο αυτό αναλύθηκε και υπολογίστηκε ως H<sub>2</sub>O, NaOH και SiO<sub>2</sub>.
- Τα δεδομένα καταχωρήθηκαν και επεξεργάστηκαν στο λογισμικό OpenLCA.
- Οι βάσεις δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν (συνδυασμένες σε μία ενιαία) είναι οι εξής:
  1. Exiobase 3.4
  2. AGRIBALYSE v.1.3
  3. ELCD 3.2
  4. BioEnergieDat
  5. NEEDS complete
- Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των επιπτώσεων είναι η ReCiPe Midpoint (H) και η ReCiPe Endpoint (H). Η ReCiPe είναι η πιο πρόσφατη μέθοδος για την εκτίμηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής και βασικός της στόχος είναι η παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε περιορισμένο αριθμό κατηγοριών επίπτωσης.

### 4.3 Εκτίμηση επιπτώσεων

Βάση της μεθοδολογίας της AKZ, μετά από το στάδιο της απογραφής δεδομένων ακολουθεί η εκτίμηση των επιπτώσεων. Σε αυτό το στάδιο καθίσταται δυνατόν να ποσοτικοποιηθεί το περιβαλλοντολογικό αποτύπωμα του συνόλου της διεργασίας ή και κάθε συστατικού χωριστά.

**Πίνακας 4.2:** Ονόματα των δεδομένων στο OpenLCA

	Απογραφή Δεδομένων	Ονόματα OpenLCA	Μονάδες
Γεωπολυμερικό Σκυρόδεμα	Ιπτάμενη Τέφρα	Mineral waste (ash)	Kg
	Άμμος	Sand 0/2	
	Γαρμπίλι	Gravel 2/32	
	Νερό	Process water	
	NaOH	Sodium hydroxide	
	SiO <sub>2</sub>	Very fine milled silica sand d50 = 20 micrometer	
	Ενέργεια	Electricity mix	MJ
Συμβατικό Σκυρόδεμα	Τσιμέντο	Portland cement (CEM I)	Kg
	Άμμος	Sand 0/2	
	Γαρμπίλι	Gravel 2/32	
	Νερό	Process water	
	Υπερρευστοποιητής	alkyd paint, white, without solvent, in 60% solution state   alkyd paint production, white, solvent-based, product in 60% solution state - RER	

Αρχικά πρέπει να καταχωρηθούν στο λογισμικό OpenLCA όλα τα δεδομένα που απογράφηκαν στο προηγούμενο στάδιο (Σχήματα 4.1-4.2). Για το σκοπό αυτό γίνεται αναζήτηση στις βάσεις δεδομένων του λογισμικού ώστε να βρεθούν όλα τα απαραίτητα στοιχεία. Αυτό δεν είναι πάντα εφικτό, καθώς δεν υπάρχουν όλες οι ενώσεις στις βάσεις δεδομένων. Επομένως, συχνά γίνονται κάποιες παραδοχές έτσι ώστε να ξεπεραστούν οι τυχόν δυσκολίες. Στον Πίνακα 4.2 φαίνονται τα ονόματα και οι μονάδες των στοιχείων που καταχωρήθηκαν στο λογισμικό.

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reve...	Uncertainty	Avoided wa...	Provider	Data qualit...	Description
F <sub>2</sub> electricity mix	Energy carriers and techn...	150.00000	MJ		none		P Electricit...		
F <sub>2</sub> gravel 2/32	Materials production/OL...	490.30000	kg		none		P Gravel 2/...		
F <sub>2</sub> mineral waste (ash)	Wastes/Production resid...	562.50000	kg		none	<input type="checkbox"/>			
F <sub>2</sub> process water	Materials production/Wa...	255.40000	kg		none		P Process ...		
F <sub>2</sub> sand 0/2	Materials production/OL...	721.17000	kg		none		P Sand 0/2...		
F <sub>2</sub> sodium hydroxide	Materials production/Ino...	76.30000	kg		none		P Sodium ...		
F <sub>2</sub> Very fine milled silica sand d50 =...	Materials production/OL...	70.50000	kg		none		P Very fine...		

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reve...	Uncertainty	Avoided pr...	Provider	Data qualit...	Description
F <sub>2</sub> Nopo Geopolymers	1 m <sup>3</sup> Nopo Skirodema	2169.86000	kg		none				

Σχήμα 4.1: Τα δεδομένα εισροών και εκροών για την παραγωγή του γεωπολυμερικού σκυροδέματος στο OpenLCA

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reve...	Uncertainty	Avoided wa...	Provider	Data qualit...	Description
F <sub>2</sub> alkylid paint, white, without solve...	202:Manufacture of other...	1.65000	kg		none				
F <sub>2</sub> gravel 2/32	Materials production/OL...	744.40000	kg		none		P Gravel 2/...		
F <sub>2</sub> portland cement (CEM I)	Materials production/OL...	330.00000	kg		none		P Portland ...		
F <sub>2</sub> process water	Materials production/Wa...	184.90000	kg		none		P Process ...		
F <sub>2</sub> sand 0/2	Materials production/OL...	1092.30000	kg		none		P Sand 0/2...		

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reve...	Uncertainty	Avoided pr...	Provider	Data qualit...	Description
F <sub>2</sub> Nopo Simvatiko	1 m <sup>3</sup> Nopo Skirodema	2353.25000	kg		none				

Σχήμα 4.2: Τα δεδομένα εισροών και εκροών για την παραγωγή του συμβατικού σκυροδέματος στο OpenLCA



Σε επόμενη φάση αναλύονται τα δεδομένα μέσω του λογισμικού και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε πίνακες και διαγράμματα. Η ανάλυση στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία βασίζεται στη μέθοδο ReCiPe (H). Με βάση τη μέθοδο αυτή γίνεται ένας συνδυασμός προσέγγισης της ανάλυσης στις κύριες κατηγορίες επίπτωσης (mid-point) αλλά και στις τελικές κατηγορίες επίπτωσης (end-point).

### **Κατηγοριοποίηση**

Σύμφωνα με τη μέθοδο ReCiPe (H) υπάρχουν 18 κατηγορίες επιπτώσεων οι οποίες είναι οι εξής:

- Δέσμευση καλλιεργήσιμης γης (agricultural land occupation)
- Αλλαγή του κλίματος (climate change)
- Εξάντληση των ορυκτών (fossil depletion)
- Οικοτοξικότητα του γλυκού νερού (freshwater ecotoxicity)
- Ευτροφισμός στο γλυκό νερό (freshwater eutrophication)
- Τοξικότητα στον άνθρωπο (Human toxicity)
- Ιονίζουσα ακτινοβολία (ionizing radiation)
- Θαλάσσια οικοτοξικότητα (marine ecotoxicity)
- Ευτροφισμός στη θάλασσα (marine eutrophication)
- Εξάντληση μετάλλων (metal depletion)
- Φυσικός μετασχηματισμός της γης (natural land transformation)
- Καταστροφή της στοιβάδας του όζοντος (ozone depletion)
- Σχηματισμός σωματιδίων (particulate matter formation)
- Φωτοχημικός σχηματισμός οξειδωτικών (photochemical oxidant formation)
- Οξίνιση του εδάφους (terrestrial acidification)
- Οικοτοξικότητα του εδάφους (terrestrial ecotoxicity)
- Δέσμευση αστικής γης (urban land occupation)
- Εξάντληση του νερού (water depletion)

### **Χαρακτηρισμός**

Ο χαρακτηρισμός δίνει τη δυνατότητα άμεσης σύγκρισης των αποτελεσμάτων της απογραφής σε κάθε κατηγορία περιβαλλοντικού προβλήματος (Σχήμα 4.3).

#### ➤ ReCiPe Midpoint (H)

Η μέθοδος ReCiPe Midpoint (H) κάνει ανάλυση σε 18 κατηγορίες επιπτώσεων με τις αντίστοιχες μονάδες, ανάλογα με την ουσία αναφοράς της κάθε κατηγορίας. Ο Πίνακας 4.3 παρακάτω προέκυψε με χρήση της μεθόδου ReCiPe Midpoint (H) και περιέχει τα αποτελέσματα του χαρακτηρισμού του γεωπολυμερικού και του συμβατικού σκυροδέματος.

**Πίνακας 4.3:** Αποτελέσματα χαρακτηρισμού με χρήση της μεθόδου ReCiPe Midpoint (H)

Impact category	Reference unit	Γεωπολυμερές	Συμβατικό
Agricultural land occupation	m <sup>2</sup> a	0	0
Climate change	kg CO <sub>2</sub> eq	89.320,95137	136.743,1307
Fossil depletion	kg oil eq	0	0
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	11,63862653	17,73715183
Freshwater eutrophication	kg P eq	2,029502145	3,100928913
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	7.377,339514	11.266,2474
Ionising radiation	kBq U235 eq	7.100,315735	10.842,93757
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	23,0489472	35,19714743
Marine eutrophication	kg N eq	19,35644	29,60130684
Metal depletion	kg Fe eq	5.790,467119	8.851,511069
Natural land transformation	m <sup>2</sup>	0	0
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	0,005863313	0,008973291
Particulate matter formation	kg PM10 eq	95,68205353	146,3558073
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC	163,3766831	250,7687663
Terrestrial acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	401,0733099	613,0219422
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	3,934258091	5,955907717
Urban land occupation	m <sup>2</sup> a	0	0
Water depletion	m <sup>3</sup>	-265,5308679	-405,43639

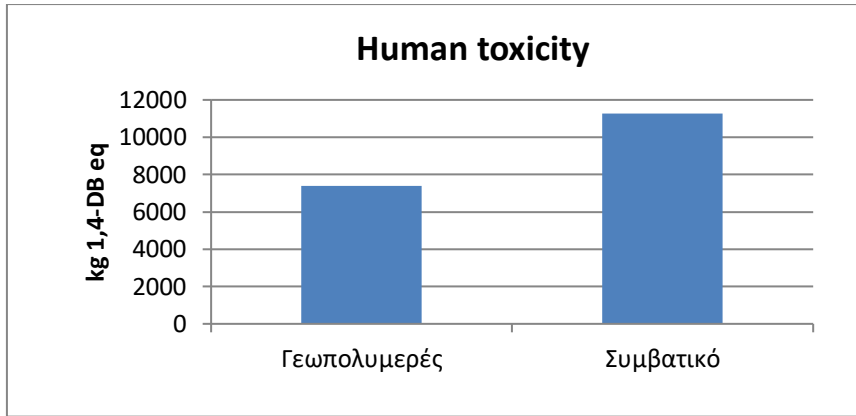
**Impact analysis**

Subgroup by processes  Cut-off 1 %

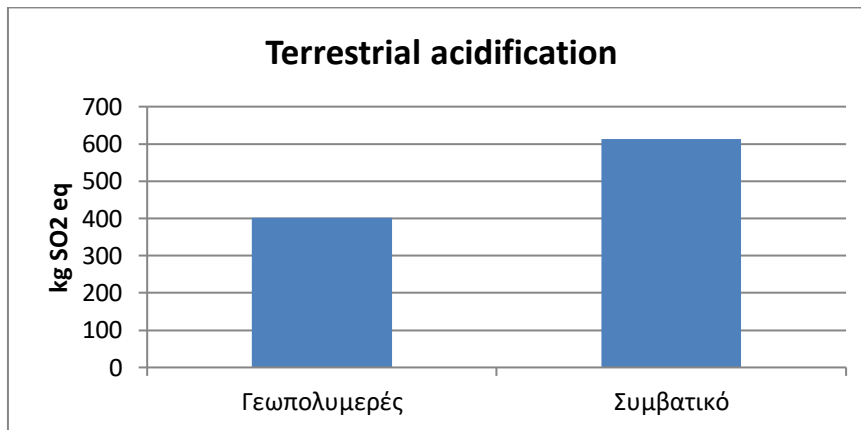
Name	Categ...	Invent...	Impa...	Impact result	Unit
> Freshwater ecotoxicity - ReCiPe Midpoint (H)				11.63863	kg 1,4-DB eq
> Terrestrial acidification - ReCiPe Midpoint (H)				401.07331	kg SO <sub>2</sub> eq
> Climate change - ReCiPe Midpoint (H)				8.93210E4	kg CO <sub>2</sub> eq
> Human toxicity - ReCiPe Midpoint (H)				7377.33951	kg 1,4-DB eq
> Ozone depletion - ReCiPe Midpoint (H)				0.00586	kg CFC-11 eq
> Metal depletion - ReCiPe Midpoint (H)				5790.46712	kg Fe eq
> Marine eutrophication - ReCiPe Midpoint (H)				19.35644	kg N eq
> Ionising radiation - ReCiPe Midpoint (H)				7100.31573	kBq U235 eq
> Photochemical oxidant formation - ReCiPe Midpoint (H)				163.37668	kg NMVOC
> Fossil depletion - ReCiPe Midpoint (H)				0.00000	kg oil eq
> Terrestrial ecotoxicity - ReCiPe Midpoint (H)				3.93426	kg 1,4-DB eq
> Urban land occupation - ReCiPe Midpoint (H)				0.00000	m <sup>2</sup> a
> Marine ecotoxicity - ReCiPe Midpoint (H)				23.04895	kg 1,4-DB eq
> Agricultural land occupation - ReCiPe Midpoint (H)				0.00000	m <sup>2</sup> a
> Particulate matter formation - ReCiPe Midpoint (H)				95.68205	kg PM10 eq
> Freshwater eutrophication - ReCiPe Midpoint (H)				2.02950	kg P eq
> Natural land transformation - ReCiPe Midpoint (H)				0.00000	m <sup>2</sup>
> Water depletion - ReCiPe Midpoint (H)				-265.53087	m <sup>3</sup>

**Σχήμα 4.3:** Αποτελέσματα χαρακτηρισμού όπως εμφανίζονται στο λογισμικό OpenLCA

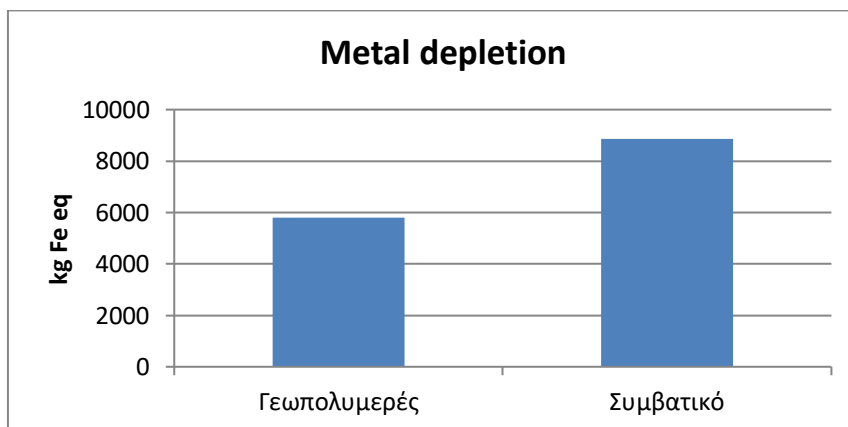
Με βάση τον Πίνακα 4.3 έγιναν τα Σχήματα (4.4-4.10), όπου γίνεται μια παραστατική σύγκριση μεταξύ των δύο σκυροδεμάτων.



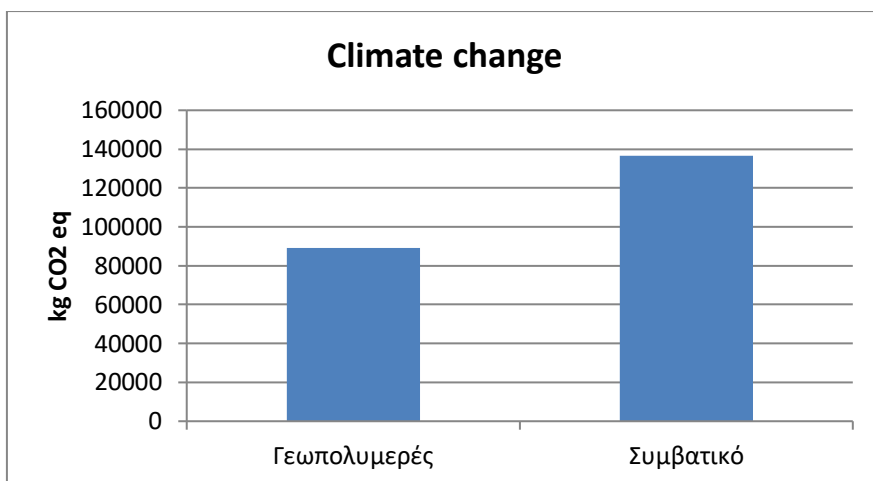
**Σχήμα 4.4:** Η τοξικότητα στον άνθρωπο-ReCiPe Midpoint (H)



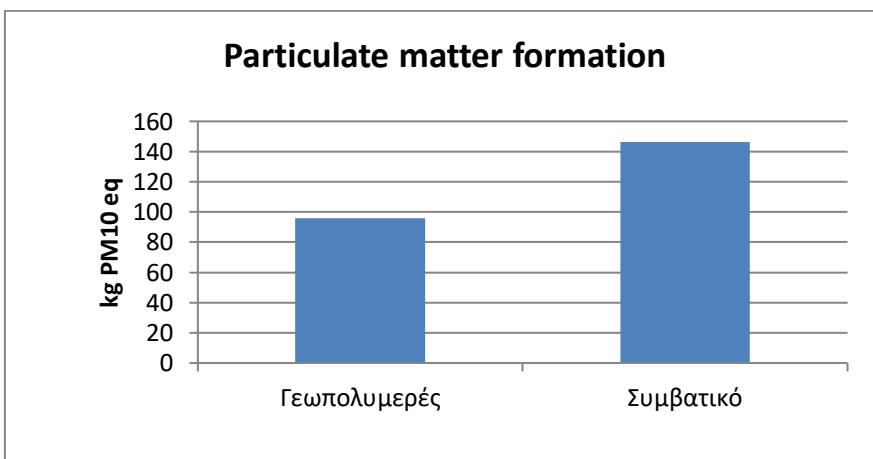
**Σχήμα 4.5:** Η οξίνιση του εδάφους-ReCiPe Midpoint (H)



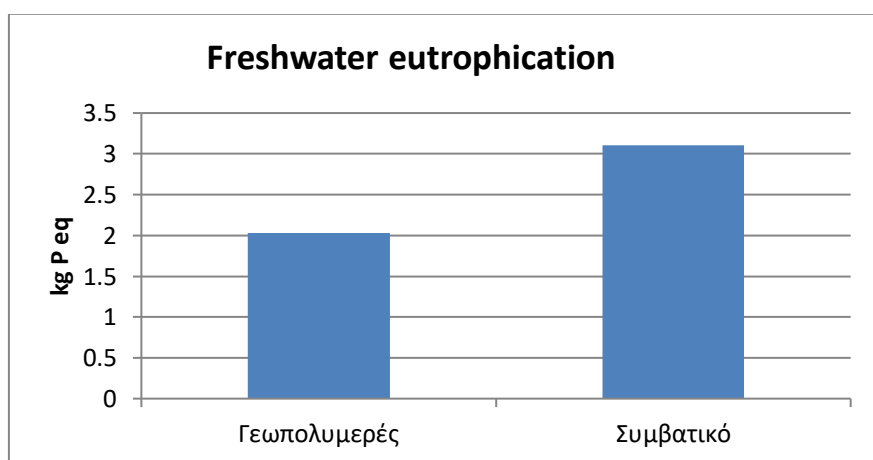
**Σχήμα 4.6:** Η εξάντληση των μετάλλων-ReCiPe Midpoint (H)



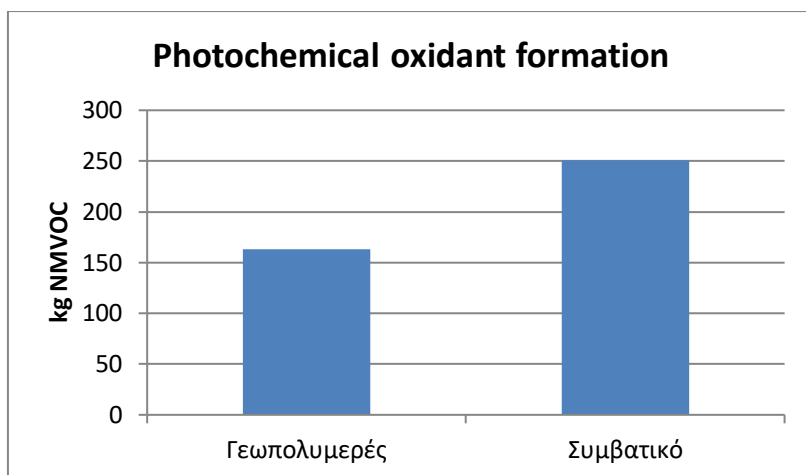
**Σχήμα 4.7:** Η κλιματική αλλαγή-ReCiPe Midpoint (H)



**Σχήμα 4.8:** Ο σχηματισμός σωματιδίων-ReCiPe Midpoint (H)



**Σχήμα 4.9:** Ο ευτροφισμός στο γλυκό νερό-ReCiPe Midpoint (H)



**Σχήμα 4.10:** Ο φωτοχημικός σχηματισμός οξειδωτικών-ReCiPe Midpoint (H)

Σύμφωνα με τους παραπάνω υπολογισμούς το συμβατικό σκυρόδεμα είναι περισσότερο επιβαρυντικό συγκριτικά με το γεωπολυμερικό σκυρόδεμα, για κάθε κατηγορία περιβαλλοντικού προβλήματος. Αυτή η επιπλέον επιβάρυνση είναι της τάξης του 50%.

➤ ReCiPe Endpoint (H)

Ο Πίνακας 4.4 παρακάτω προέκυψε με χρήση της μεθόδου ReCiPe Endpoint (H) και περιέχει τα αποτελέσματα του χαρακτηρισμού του γεωπολυμερικού και του συμβατικού σκυροδέματος. Η συγκεκριμένη μέθοδος εστιάζει σε τρεις κύριες κατηγορίες οι οποίες είναι α) η επιρροή στην ανθρώπινη υγεία (μετράται σε DALY), β) η επιρροή στο οικοσύστημα (μετράται σε species\*year) και γ) η επιρροή στη διαθεσιμότητα των πόρων (μετράται σε \$).

Η μονάδα DALY (Disability Adjusted Life Years) χαρακτηρίζει τη σοβαρότητα της νόσου και αντιπροσωπεύει την θνησιμότητα και τη νοσηρότητα.

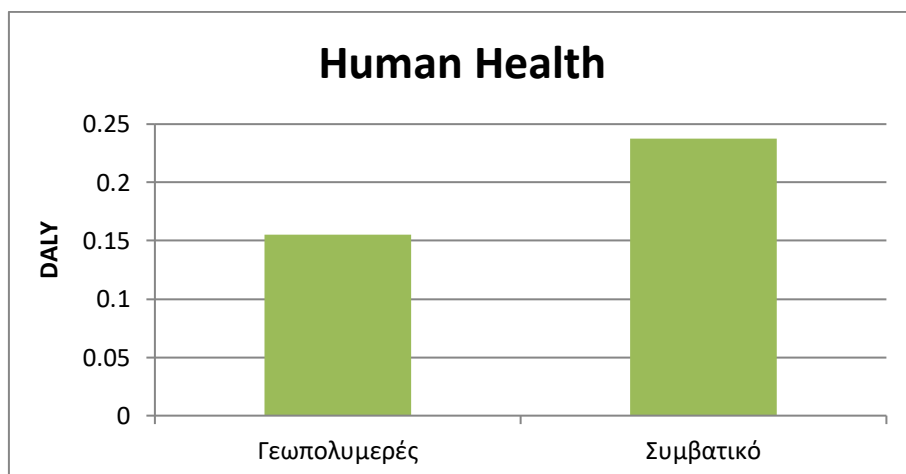
Η μονάδα Species\*Year αντιπροσωπεύει το ποσοστό των ειδών που εξαφανίστηκαν σε διάστημα ενός χρόνου.

Η μονάδα \$ αντιπροσωπεύει τα χρήματα που αντιστοιχούν στην εκάστοτε επιβάρυνση.

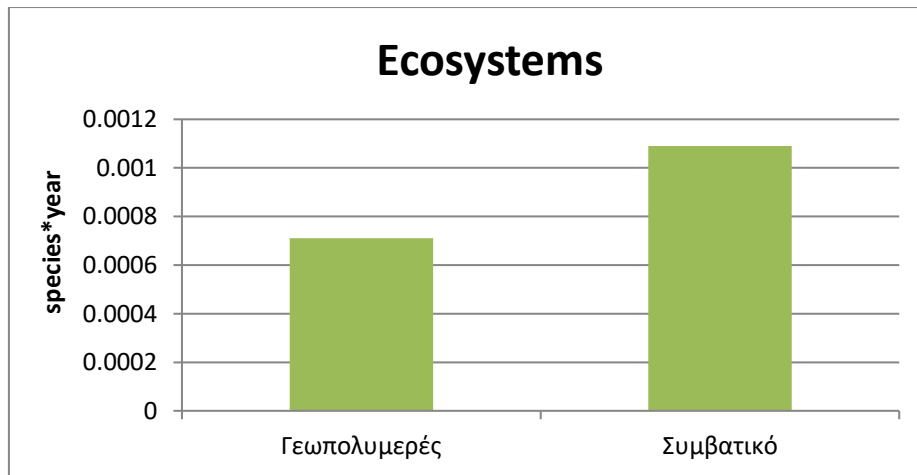
**Πίνακας 4.4:** Αποτελέσματα χαρακτηρισμού με χρήση της μεθόδου ReCiPe Endpoint (H)

Impact category	Reference unit	Γεωπολυμερές	Συμβατικό
Climate change Human Health	DALY	0,125049201	0,191440183
Human toxicity	DALY	0,005148149	0,007861935
Ionising radiation	DALY	0,000116468	0,00017786
Ozone depletion	DALY	1,03723E-05	1,58826E-05
Particulate matter formation	DALY	0,024877334	0,03805251
Photochemical oxidant formation	DALY	6,37116E-06	9,77917E-06
Agricultural land occupation	species*yr	0	0
Climate change Ecosystems	species*yr	0,00070827	0,001084304
Freshwater ecotoxicity	species*yr	1,00305E-08	1,52866E-08
Freshwater eutrophication	species*yr	9,04051E-08	1,38132E-07
Marine ecotoxicity	species*yr	4,05859E-09	6,19773E-09
Natural land transformation	species*yr	0	0
Terrestrial acidification	species*yr	2,32635E-06	3,55572E-06
Terrestrial ecotoxicity	species*yr	5,91447E-07	8,95355E-07
Urban land occupation	species*yr	0	0
Fossil depletion	\$	0	0
Metal depletion	\$	413,9857131	632,8330907

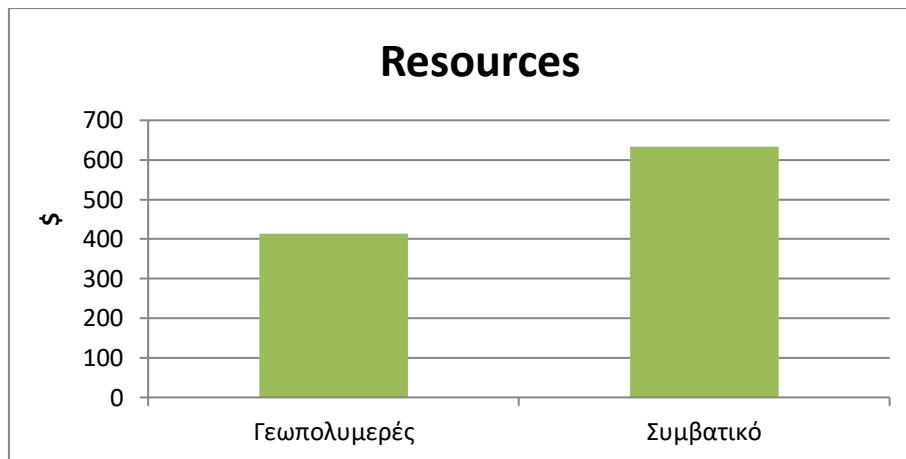
Με βάση τον Πίνακα 4.4 έγιναν τα Σχήματα (4.11-4.13), όπου η σύγκριση μεταξύ των δύο σκυροδεμάτων αφορά τις τελικές κατηγορίες επίπτωσης.



**Σχήμα 4.11:** Η επιρροή στην ανθρώπινη υγεία - ReCiPe Endpoint (H)



**Σχήμα 4.12:** Η επιρροή στο οικοσύστημα - ReCiPe Endpoint (H)



**Σχήμα 4.13:** Η επιρροή στη διαθεσιμότητα των πόρων - ReCiPe Endpoint (H)

Είναι εμφανές ότι τα αποτελέσματα της Endpoint ανάλυσης συμφωνούν με εκείνα της Midpoint ανάλυσης σε ότι αφορά τη σύγκριση των δύο σκυροδεμάτων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα του χαρακτηρισμού δίνουν μία σαφή εικόνα για κάθε κατηγορία ξεχωριστά, αλλά δεν μπορούν να συγκρίνουν τα αποτελέσματα διαφορετικών κατηγοριών. Για παράδειγμα τα αποτελέσματα της κλιματικής αλλαγής δεν μπορούν να συγκριθούν άμεσα με τα αποτελέσματα της οξίνισης του εδάφους, καθώς οι ισοδύναμοι συντελεστές υπολογίζονται με χρήση διάφορων επιστημονικών μεθόδων και έχουν άλλους συντελεστές. Για να γίνει δυνατή αυτή η σύγκριση μεταξύ των κατηγοριών επίπτωσης θα πρέπει να γίνει αναγωγή των αποτελεσμάτων με κάποιο συντελεστή ώστε να έχουν όλες οι τιμές την ίδια μονάδα μέτρησης. Αυτό θα γίνει στο στάδιο της κανονικοποίησης.

## Κανονικοποίηση

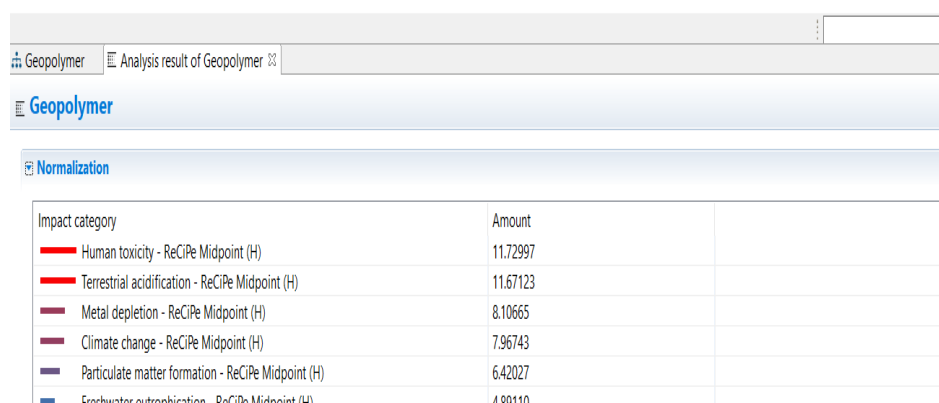
Μετά το στάδιο του χαρακτηρισμού έπεται η κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων του χαρακτηρισμού (Σχήμα 4.14). Για τη μέθοδο ReCiPe Midpoint (H) χρησιμοποιείται η επιλογή κανονικοποίησης Europe Recipe H - ReCiPe Midpoint (H), ενώ για τη μέθοδο ReCiPe Endpoint (H) χρησιμοποιείται η επιλογή Europe ReCiPe H/A - ReCiPe Endpoint (H).

### ➤ ReCiPe Midpoint (H)

Τα αποτελέσματα της κανονικοποίησης για τη μέθοδο ReCiPe Midpoint (H) παρουσιάζονται παρακάτω στον Πίνακα 4.5.

**Πίνακας 4.5:** Αποτελέσματα κανονικοποίησης για τη μέθοδο ReCiPe Midpoint (H)

Impact category	Γεωπολυμερές	Συμβατικό
Human toxicity	1.172.997	1.791.333
Terrestrial acidification	1.167.123	1.783.894
Metal depletion	810.665	1.239.212
Climate change	796.743	1.219.749
Particulate matter formation	642.027	982.047
Freshwater eutrophication	489.110	747.324
Photochemical oxidant formation	287.543	441.353
Marine ecotoxicity	265.063	404.767
Marine eutrophication	191.242	292.461
Ionising radiation	113.605	173.487
Freshwater ecotoxicity	105.795	161.231
Terrestrial ecotoxicity	47.605	72.066
Ozone depletion	26.619	40.739
Agricultural land occupation	0	0
Fossil depletion	0	0
Urban land occupation	0	0
Natural land transformation	0	0
Water depletion	0	0



Geopolymer Analysis result of Geopolymer

Geopolymer

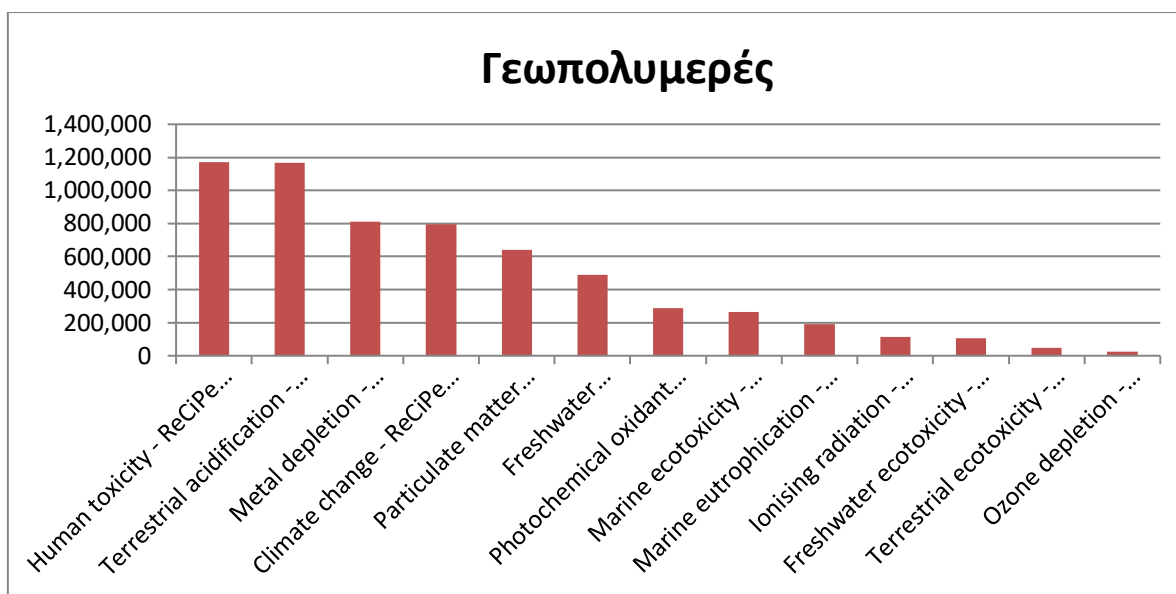
Normalization

Impact category	Amount
Human toxicity - ReCiPe Midpoint (H)	11.72997
Terrestrial acidification - ReCiPe Midpoint (H)	11.67123
Metal depletion - ReCiPe Midpoint (H)	8.10665
Climate change - ReCiPe Midpoint (H)	7.96743
Particulate matter formation - ReCiPe Midpoint (H)	6.42027
Freshwater eutrophication - ReCiPe Midpoint (H)	4.89110

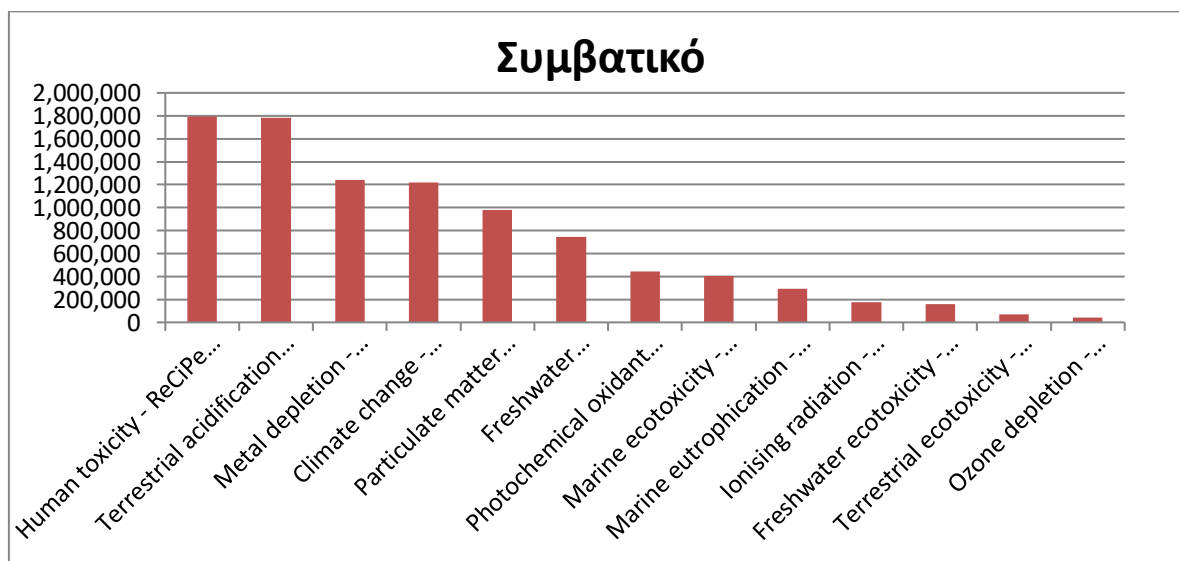
**Σχήμα 4.14:** Αποτελέσματα κανονικοποίησης όπως εμφανίζονται στο λογισμικό OpenLCA



Με χρήση των αποτελεσμάτων του Πίνακα 4.5 έγιναν τα Σχήματα 4.15 και 4.16 που παρουσιάζονται παρακάτω.



**Σχήμα 4.15:** Κανονικοποίηση για το γεωπολυμερικό σκυρόδεμα - ReCiPe Midpoint (H)



**Σχήμα 4.16:** Κανονικοποίηση για το συμβατικό σκυρόδεμα - ReCiPe Midpoint (H)

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της Midpoint ανάλυσης, τόσο κατά την παραγωγή του γεωπολυμερικού σκυροδέματος όσο και του συμβατικού σκυροδέματος οι κατηγορίες που επιβαρύνονται περισσότερο είναι η «Τοξικότητα στον άνθρωπο» και η «Οξίνιση του εδάφους». Αμέσως σημαντικότερες κατηγορίες επιβάρυνσης αποτελούν η «Εξάντληση των μετάλλων» και η «Κλιματική αλλαγή», ενώ ακολουθούν και οι υπόλοιπες κατηγορίες, με μικρότερη επιρροή στο περιβάλλον.

➤ ReCiPe Endpoint (H)

Τα αποτελέσματα της κανονικοποίησης για τη μέθοδο ReCiPe Endpoint (H) παρουσιάζονται παρακάτω στον Πίνακα 4.6.

**Πίνακας 4.6:** Αποτελέσματα κανονικοποίησης για τη μέθοδο ReCiPe Endpoint (H)

<b>Impact category</b>	<b>Γεωπολυμερές</b>	<b>Συμβατικό</b>
Metal depletion	1,28E+10	1,95E+10
Climate change Human Health	253	387
Particulate matter formation	50	77
Human toxicity	10	16
Ionising radiation	2,35E-01	3,59E-01
Ozone depletion	2,10E-02	3,21E-02
Photochemical oxidant formation	1,29E-02	1,98E-02
Climate change Ecosystems	1,28E-02	1,96E-02
Terrestrial acidification	4,21E-05	6,43E-05
Terrestrial ecotoxicity	1,07E-05	1,62E-05
Freshwater eutrophication	1,63E-06	2,50E-06
Freshwater ecotoxicity	1,81E-07	2,76E-07
Marine ecotoxicity	7,34E-08	1,12E-07
Agricultural land occupation	0	0
Natural land transformation	0	0
Fossil depletion	0	0
Urban land occupation	0	0

Σύμφωνα με την παραπάνω Endpoint ανάλυση, η σημαντικότερη περιβαλλοντική επίπτωση κατά την παραγωγική διαδικασία των σκυροδεμάτων είναι η «Εξάντληση των μετάλλων», και μάλιστα με πολύ μεγάλη διαφορά από τις επόμενες κατηγορίες επίπτωσης. Επομένως, διαπιστώνεται ότι τα αποτελέσματα της Endpoint ανάλυσης δεν ταυτίζονται με εκείνα της Midpoint ανάλυσης στο κομμάτι της κανονικοποίησης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### *Συμπεράσματα*

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι τα εξής:

- Το γεωπολυμερικό σκυρόδεμα παρουσιάζει ευνοϊκότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σύγκριση με το συμβατικό σκυρόδεμα, σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων, ανεξαρτήτως μεθόδου.
- Κατά τη διαδικασία παραγωγής των σκυροδεμάτων, οι κατηγορίες που φαίνεται ότι επιβαρύνονται σημαντικά είναι η «Τοξικότητα στον άνθρωπο», η «Οξίνιση του εδάφους», η «Εξάντληση των μετάλλων» και η «Κλιματική αλλαγή».
- Το λογισμικό και η βάση δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση του κύκλου ζωής επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα των αποτελεσμάτων.
- Η μέθοδος εκτίμησης επιπτώσεων που επιλέγεται είναι καθοριστικής σημασίας για την ανάλυση. Διαφορετική μέθοδος δίνει και διαφορετικά αποτελέσματα περιβαλλοντικής επιβάρυνσης.

Περαιτέρω έρευνα θα μπορούσε να γίνει στην εφαρμογή και άλλων μεθόδων εκτίμησης επιπτώσεων και ίσως στη χρήση διαφορετικού λογισμικού. Επιπλέον, ενδιαφέρον θα είχε η ποσοτικοποίηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος κάθε συστατικού ξεχωριστά, αντί του συνόλου της διεργασίας. Με αυτό τον τρόπο θα μπορούσε να γίνει εκτίμηση για τη βελτίωση του αποτυπώματος των σκυροδεμάτων. Ειδικά τα γεωπολυμερή, έχουν μεγάλο περιθώριο μεταβολής της σύνθεσης τους. Ιδανικά, θα μπορούσε να βρεθεί κάποια συγκεκριμένη σύνθεση γεωπολυμερικού σκυροδέματος, η οποία δεν θα υστερεί σε ιδιότητες από το συμβατικό σκυρόδεμα, ενώ παράλληλα θα ελαχιστοποιεί τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ασπρογέρακας Α., Συγκριτική Αξιολόγηση Ανθεκτικότητας Γεωπολυμερών από Ιπτάμενη Τέφρα και Τσιμεντοκονιαμάτων, Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα, (2013).
2. Νικολαΐδης Α., Παραγωγή Γεωπολυμερών από Τέλματα Εμπλουτισμού Χαλκοπυρίτη Κύπρου, Διπλωματική Εργασία, Χανιά, (2015).
3. <https://geopolymerhouses.wordpress.com/category/uncategorized>.
4. Βλάχου Α., Δυνατότητα Γεωπολυμερισμού Αποβλήτων από Εκσκαφές, Κατασκευές και Κατεδαφίσεις (ΑΕΚΚ), Μεταπτυχιακή Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σεπτέμβριος (2015).
5. Rickard W.D.A., Williams R., Temuujin J., Van Riessen A., Assessing the suitability of three Australian fly ashes as an aluminosilicate source for geopolymers in high temperature applications, *Master Sci Eng., A*, 528, 3390-3397 (2011).
6. Xu H., Li Q., Shen L., Wang W., Zhai J., Synthesis of thermostable geopolymer from circulating fluidized bed combustion (CFBC) bottom ashes, *J Hazard Mater.*, 175, 198-204 (2010).
7. Juenger M.C.G., Winnefeld F., Provis J.L., Ideker J.H., Advances in alternative cementitious binders, *Cem Concr Res.*, 41, 1232-1243 (2011).
8. Sakulich A.R., Anderson E., Schauer C., Barsoum M.W., Mechanical and microstructural characterization of an alkali-activated slag/limestone fine aggregate concrete, *Constr Build Mater.*, 23, 2951-2957 (2009).
9. Cheng T.W., Chiu J.P., Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag, *Miner Eng.*, 16, 205-210 (2003).
10. Aly Z., Vance E.R., Perera D.S., Hanna J.V., Griffith C.S., Davis J., Durce D., Aqueous leachability of metakaolin-based geopolymers with molar ratios of Si/Al = 1.5-4, *J Nucl Mater.*, 378, 172-179 (2008).
11. Bakharev T., Thermal behavior of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing, *Cem Concr Res.*, 36, 1134-1147 (2006).
12. Duxson P., Provis J.L., Lukey G.C., Mallicoat S.W., Kriven W.M., Van Deventer J.S.J., Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties, *Colloids Surf., A*, 269, 47-58 (2005).
13. Miranda J.M., Fernandez-Jimenez A., Gonzalez J.A., Palomo A., Corrosion resistance in activated fly ash mortars, *Cem Concr Res.*, 35, 1210-1217 (2005).
14. Kong D.L.Y., Sanjayan J.G., Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete, *Cem Concr Res.*, 40, 334-339 (2010).
15. Skvara F., Jilek T., Kopecky L., Geopolymer materials based on fly ash, *Ceram Silik.*, 49, 195-204 (2005).

16. Duxson P., Provis J.L., Lukey G.C., Van Deventer J.S.J., The role of inorganic polymer technology in the development of “green concrete”, *Cem Concr Res.*, 37, 1590-1597 (2007).
17. Μπακογιάννη Δ., Μελέτη Επιπτώσεων Μονάδας Παραγωγής Βιοντίζελ από Χρησιμοποιημένα Μαγειρικά Έλαια με τη Μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, (2013).
18. ISO 14040:2006 Environmental management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework. International organization for standardization 1997. Retrieved October 24, (2012).
19. Curran M.A., Broad – Based Environmental Life Cycle Assessment, *Environ Sci. Technol.*, Vol 27, No 3, 430-436 (1993).
20. Fava J.A., Denison R., Jones B., Curran M.A., Vigon B., A Technical Framework for Life Cycle Assessments, SETAC Foundation, Vermont (1991).
21. Rebitzera G., Ekvallb T., Frischknechtc R., Hunkelerd D., Norrise G., Rydbergf T., Schmidtg W.-P., Suhh S., Weidemai B.P., Penningtonf D.W., Life Cycle Assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis and applications (2004).
22. Roy P., Nei D., Orikasa T., Xu Q., Okadome H., A Review of Life Cycle Assessment (LCA) on Some Food Products, *Journal of Food Engineering*, 90, 1-10 (2009).
23. Κορωναίος Χ., Ανάλυση Κύκλου Ζωής: Η ολοκληρωμένη Περιβαλλοντική Προσέγγιση στην Ολοκληρωμένη Ανάπτυξη. 6<sup>ο</sup> Διεπιστημονικό Διαπανεπιστημιακό συνέδριο του ΕΜΠ και του ΜΕ.Κ.Δ.Ε. του ΕΜΠ, Μέτσοβο, 1-12 (2010).
24. Μουσιόπουλος Ν., Μπούρα Α., Ανάλυση Κύκλου Ζωής (1999).
25. Μάγειρα Α., Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής: Εφαρμογή στη βιομηχανία συσκευασίας και τσιμέντου, Διπλωματική Εργασία, (2004).
26. Bezzo F., Bernardi R. and Cremonese G., “Using Process Simulators for Steady-State and Dynamic plant analysis: An industrial case study.” *Chemical Engineering Research and Design* 82:499-512 (2004).