



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Γεωπολυμερή - Νέα δομικά Υλικά. Προοπτικές  
ενσωμάτωσης τους στην κατασκευαστική βιομηχανία.**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΤΟΣΚΑΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:**

**ΤΣΙΒΙΛΗΣ Σ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ**

**ΑΘΗΝΑ, Σεπτέμβριος 2019**

## Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια η αυξανόμενη ανάγκη για χρήση υλικών φιλικών προς το περιβάλλον έστρεψε το ενδιαφέρον του κατασκευαστικού τομέα σε νέες κατευθύνσεις. Η έννοια του πράσινου κτιρίου αναφέρεται σε κτίρια με χαμηλό οικολογικό αποτύπωμα στη λειτουργία αλλά και στην κατασκευή του, δηλαδή χρησιμοποιώντας ελάχιστους εξαντλήσιμους φυσικούς πόρους. Τα γεωπολυμερή, σχετικά νέα δομικά υλικά, φαίνονται να παρουσιάζουν οικονομικά και περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα, και θα μπορούσαν υπό προϋποθέσεις να χρησιμοποιηθούν σε δομικά έργα.

Στην παρούσα Διπλωματική εργασία γίνεται βιβλιογραφική έρευνα στη διαδικασία παραγωγής των γεωπολυμερών, το μηχανισμό της αντίδρασης, τις μηχανικές και χημικές ιδιότητες των γεωπολυμερών για τη χρήση τους στον κατασκευαστικό κλάδο. Επίσης, αναλύονται κάποιες μελέτες περίπτωσης που έγινε η χρήση του γεωπολυμερικού σκυροδέματος ως αντικαταστάτης του συμβατικού σκυροδέματος από τσιμέντο Portland. Σύμφωνα με τα συμπεράσματα της μελέτης οι εξαιρετικές μηχανικές τους ιδιότητες, η αντοχή σε χημικά οξέα, καθώς και η πυραντοχή τους τα κατατάσσουν ως έναν από τους σημαντικότερους ανταγωνιστές των κοινών συμβατικών δομικών υλικών. Επίσης, παρουσιάζουν πολύ σημαντικό περιβαλλοντικό και οικονομικό προβάδισμα.

## **Abstract**

Over the last few years the need for environmentally friendly materials has turned the interest of the construction sector in new directions. “Green buildings” refers to buildings with low ecological footprint using minimal depleted natural resources. Geopolymer materials meet all the requirements for use in construction sector. In this thesis, a literature review is carried out regarding the production process, the reaction mechanism, and the mechanical and chemical properties of geopolymers used in the construction industry. Moreover, two case studies are presented with regards to the use of geopolymer concrete as a substitute of Portland cement-based concrete. According to the conclusions of the study their excellent mechanical properties, resistance to chemical acids and their fire-resistance properties rank them as one of the major competitors of the common conventional building materials. They also have very important environmental and financial advantage.

## Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη .....	1
Abstract .....	2
Πίνακας Περιεχομένων .....	3
Κατάλογος Πινάκων .....	5
Κατάλογος Σχημάτων .....	6
Κατάλογος Εικόνων .....	7
1. Εισαγωγή .....	9
2. Γεωπολυμερή .....	11
2.1 Ιστορική αναδρομή .....	11
2.2 Χημεία / Σύνθεση γεωπολυμερών .....	14
2.3 Μηχανισμός γεωπολυμερισμού .....	17
2.4 Στάδια γεωπολυμερισμού .....	18
2.5 Πρώτες ύλες για την παραγωγή γεωπολυμερών .....	22
3. Γεωπολυμερή στην Κατασκευαστική Βιομηχανία .....	27
3.1 Εισαγωγή .....	27
3.2 Διάφορα είδη τσιμέντου .....	30
3.2.1 Κύρια συστατικά τσιμέντου .....	31
3.2.2 Δευτερεύοντα συστατικά .....	32
3.2.3 Θεϊκό ασβέστιο .....	32
3.2.4 Πρόσθετα .....	32
3.3 Ιδιότητες Γεωπολυμερικών σκυροδεμάτων στην Κατασκευαστική Βιομηχανία .....	34
3.3.1 Συμπεριφορά κατά τη συμπίεση .....	35
3.3.2 Έμμεση δύναμη εφελκυσμού .....	36
3.3.3 Ειδικό βάρος .....	36
3.3.4 Θλιπτική δύναμη .....	37
3.3.5 Συρρίκνωση και συστολή κατά την ξήρανση .....	38
3.3.6 Αντοχή σε θειικά άλατα .....	40
3.3.7 Αντοχή στο Θεϊκό οξύ .....	41
3.3.8 Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες .....	42
3.4 Επίλογος .....	42
4. Μελέτες περίπτωσης .....	44
4.1 Brisbane West Wellcamp Airport .....	44
4.1.1 Εισαγωγή .....	44
4.1.2 Μείγμα γεωπολυμερούς για την κατασκευή δαπέδου .....	46

4.1.3	<i>Ιδιότητες γεωπολυμερούς δαπέδου.....</i>	47
4.1.4	<i>Παρασκευή και προμήθεια γεωπολυμερικού σκυροδέματος.....</i>	48
4.1.5	<i>Περαιτέρω χρήση του γεωπολυμερικού σκυροδέματος .....</i>	49
4.1.6	<i>Συμπεράσματα .....</i>	50
4.2	Global Change Institute.....	51
5.	Συμπεράσματα .....	54
	Βιβλιογραφία .....	55

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1. Ιστορικές ανακαλύψεις στα αλκαλικά ενεργοποιημένα συνδετικά υλικά [6].....	12
Πίνακας 2.2. Ονομασίες για το χαρακτηρισμό των γεωπολυμερών [6].....	13
Πίνακας 2.3. Κατηγορίες γεωπολυμερών βάσει λόγου πυριτίου/αργιλίου (Si/Al) [9].....	15
Πίνακας 3.1. Τύποι τσιμέντου σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1 [26] .....	33
Πίνακας 3.2. Τύποι τσιμέντου σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1 [26] .....	34
Πίνακας 3.3. Έμμεση δύναμη εφελκυσμού γεωπολυμερικού σκυροδέματος [28] .....	36
Πίνακας 3.4. Θλιπτική δύναμη και ειδικό βάρος γεωπολυμερικού σκυροδέματος [35].....	37
Πίνακας 3.5. Αναλογίες γεωπολυμερών δειγμάτων [30] .....	37

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1. Δομή των τριών τύπων γεωπολυμερών [8] .....	15
Σχήμα 2.2. Τετραεδρική δομή του sialate [8].....	16
Σχήμα 2.3. Στάδια γεωπολυμερισμού [17].....	22
Σχήμα 2.4. Δομή γεωπολυμερών από μετακαολίνη [18].....	23
Σχήμα 3.1. Πλεονεκτήματα χρήσης γεωπολυμερών στην κατασκευή «πράσινων» κτιρίων[20].	27
Σχήμα 3.2. Βασικοί τομείς παγκόσμια παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα [22].....	28
Σχήμα 3.3. Με πράσινο χρώμα παρουσιάζεται η παγκόσμια παραγωγή τσιμέντου έως το 2016 και με πορτοκαλί η ενέργεια προερχόμενη από ορυκτά καύσιμα [23].....	29
Σχήμα 3.4. Καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης του γεωπολυμερικού σκυροδέματος [27].....	35
Σχήμα 3.5. Διαφορά στη θλιπτική δύναμη του θερμικά επεξεργασμένου σκυροδέματος με την πάροδο του χρόνου [28].....	38
Σχήμα 3.6. Συρρίκνωση και συστολή κατά την ξήρανση.....	39
Σχήμα 3.7. Επιμήκυνση των δειγμάτων που χυτεύθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος καθώς και των δειγμάτων που χυτεύθηκαν σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες, κατά την ξήρανση. ....	40
Σχήμα 3.8. Γραφική αναπαράσταση της αντοχής του γεωπολυμερικού σκυροδέματος στα οξέα [31].....	41
Σχήμα 4.1. Αποτελέσματα της αντοχής σε εφελκυσμό του γεωπολυμερικού σκυροδέματος [38] .....	47
Σχήμα 4.2. Καταγραφή της θερμοκρασίας και της επιμήκυνσης της γέφυρας [38].....	50

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1. Παρατήρηση μορφολογίας μετακαολίνη με τη μέθοδο SEM [19] .....	24
Εικόνα 2.2. Ιπτάμενη τέφρα [11].....	25
Εικόνα 2.3. Σκωρία υψικαμίνου [11].....	26
Εικόνα 3.1. Φωτογραφική απεικόνιση του τσιμέντου [25] .....	30
Εικόνα 4.1. Ο καθηγητής J. Davidovits κατά την επίσκεψη του στο αεροδρόμιο του Brisbane [20].....	44
Εικόνα 4.2. Κάτοψη του αεροδρομίου BWWA [38].....	45
Εικόνα 4.3. Αεροφωτογραφία του αεροδρομίου BWWA [39] .....	46
Εικόνα 4.4. Φωτογραφική απεικόνιση της διάταξης παρασκευής σκυροδέματος [39].....	48
Εικόνα 4.5. Μεταφορά του σκυροδέματος στη μηχανή οδοστρωσίας [38] .....	48
Εικόνα 4.6. Διάφορα τμήματα του αεροδρομίου που χρησιμοποιήθηκε γεωπολυμερές σκυρόδεμα [39].....	49
Εικόνα 4.7. Φωτογραφία του GCI [40] .....	52
Εικόνα 4.8. Τοποθέτηση δοκών δαπέδου στο κτίριο GIC [42].....	53





## 1. Εισαγωγή

Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η μελέτη των γεωπολυμερών και της δυνατότητας ενσωμάτωσής τους στην Κατασκευαστική Βιομηχανία. Με την αυξανόμενη ανάπτυξη «πράσινων» δομικών κατασκευών η αναζήτηση νέων δομικών υλικών που θα ανταπεξέρχονται στις υψηλές απαιτήσεις της κατασκευαστικής βιομηχανίας και θα συμμορφώνονται με τα περιβαλλοντικά πρότυπα, ήταν αναγκαία. Παρότι τα γεωπολυμερή υλικά υπάρχουν εδώ και πολλά χρόνια ο όρος γεωπολυμερές εισήχθη το 1979 από τον καθηγητή J. Davidovits. Τα γεωπολυμερή υλικά παρουσιάζουν εξαιρετικές μηχανικές και χημικές ιδιότητες που μπορούν να εκμεταλλευτούν από τον κατασκευαστικό τομέα. Επίσης εκτός από τις ιδιότητες αυτές έχουν ένα πολύ σημαντικό περιβαλλοντικό και οικονομικό προβάδισμα σε σχέση με τα κοινά δομικά υλικά.

Ξεκινώντας στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μία ιστορική αναδρομή της ύπαρξης του όρου γεωπολυμερές, της ανακάλυψής του και της καταγραφής της χρήσης του σε διάφορες χρονικές περιόδους. Συνεχίζοντας στο ίδιο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η βασική δομή των γεωπολυμερών, οι διάφορες κατηγορίες τους, τα χημικά στοιχεία που συμμετέχουν στη σύνθεση τους καθώς και τα στάδια του γεωπολυμερισμού. Μιλώντας για τα στάδια του γεωπολυμερισμού γίνεται αναφορά στις αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά το μηχανισμό της σύνθεσης γεωπολυμερών καθώς και τις διάφορες πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται.

Συνεχίζοντας, στο Κεφάλαιο 3, περιγράφεται η άμεση ανάγκη της αντικατάστασης των συμβατικών δομικών υλικών καταγράφοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που έχει η παραγωγή τους τις τελευταίες 10ετίες. Περιγράφονται διάφοροι όροι που είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι με την κατασκευαστική βιομηχανία και την παραγωγή τσιμέντου όπως επίσης γίνεται και μία συνοπτική περιγραφή του βασικού ανταγωνιστή των γεωπολυμερών το κοινό τσιμέντο. Στη συνέχεια μελετώνται οι ιδιότητες του γεωπολυμερικού σκυροδέματος και παρουσιάζονται πληροφορίες σε σύγκριση με το σκυρόδεμα από κοινό τσιμέντο Portland. Παρουσιάζονται επίσης τα πλεονεκτήματα του γεωπολυμερικού σκυροδέματος που καταγράφηκαν μετά από πολλές εργαστηριακές δοκιμές.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται η παρουσίαση και η ανάλυση δύο μελετών περίπτωσης της χρήσης γεωπολυμερικού σκυροδέματος ως βασικού υλικού για την κατασκευή ενός αεροδρομίου και ενός Πανεπιστημίου στην Αυστραλία. Μελετάται ο τρόπος κατασκευής, τα υλικά που

χρησιμοποιήθηκαν καθώς και οι δοκιμές που έγιναν ώστε τα καινοτόμα αυτά έργα να πληρούν τις απαραίτητες προϋποθέσεις κατασκευής έργου.

Τέλος, στον επίλογο της Διπλωματικής Εργασίας παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της βιβλιογραφικής έρευνας.

## 2. Γεωπολυμερή

### 2.1 Ιστορική αναδρομή

Ο όρος «γεωπολυμερές» αναφέρεται για πρώτη φορά το 1979 από τον Γάλλο καθηγητή και επιστήμονα J. Davidovits, με σκοπό να περιγράψει μία κατηγορία αργιλοπυριτικών υλικών, τα οποία σχηματίζονται μέσω της αντίδρασης αργιλοπυριτικών πρώτων υλών, οι οποίες μπορεί να είναι είτε γεωλογικής προέλευσης είτε παραπροϊόντα όπως η ιπτάμενη τέφρα, με ένα αλκαλικό διάλυμα [1]. Σύμφωνα με τον ίδιο, το πρώτο συνθετικό του όρου, «γεω-» αναφέρεται στο ελληνικό «Γη», αφού τα γεωπολυμερή αποτελούνται κυρίως από αργίλιο και οξείδιο του πυριτίου, τα οποία είναι τα πιο ευρέως απαντώμενα υλικά στο φλοιό της γης. Το δεύτερο συνθετικό «-πολυμερή» σχετίζεται με τη σύνθεση των πολυμερών, η οποία είναι ένα τρισδιάστατο δίκτυο από μονομερή, αποτελούμενα από αργιλικά και πυριτικά τετράεδρα [2]. Περισσότερα, όμως, για τη σύνθεση των γεωπολυμερών αναφέρονται στην επόμενη ενότητα.

Το έναυσμα για την έρευνα δόθηκε μετά από μία περίοδο τριών περίπου ετών (1970-1972), όπου καταστροφικές πυρκαγιές έπλητταν τη Γαλλία. Επηρεασμένος από την έκταση των καταστροφών, ο Davidovits αφοσιώθηκε στην έρευνα σε μη-εύφλεκτα και άκαυστα πλαστικά υλικά [3].

Η πρώτη, όμως, χρήση αλκαλίων ως πρώτη ύλη για την παραγωγή κονιαμάτων χρονολογείται το 1930 από το Γερμανό Kuhl. Στη συνέχεια, το 1937 ο Chassevent μελέτησε την αντιδραστικότητα των σκωριών με τη χρήση διαλυμάτων υδροξειδίου του καλίου και του νατρίου. Μετέπειτα, ο Purdon το 1940 εργάστηκε στην παρασκευή γεωπολυμερών από σκωρία και υδροξείδιο του νατρίου [4]. Παρόμοια υλικά είχαν μελετηθεί στη Σοβιετική Ένωση το 1957 από τους Victor Glukhovsky και Pavel Krivenko. Σκοπός της έρευνάς τους ήταν να διαπιστώσουν το λόγο για τον οποίο τα αρχαία κτίρια είχαν μεγαλύτερες αντοχές από τα νεόδμητα [5]. Η έρευνα του Glukhovsky επικεντρώθηκε στα συνδεδεμένα υλικά που χρησιμοποιούσαν στις κατασκευές στην αρχαία Ρώμη και Αίγυπτο. Το τελικό του συμπέρασμα ήταν ότι αποτελούνταν από αργιλοπυριτικά ένυδρα άλατα ασβεστίου, παρόμοια με εκείνα του τσιμέντου Portland, καθώς και από κρυσταλλικές φάσεις ενός χρωματισμένου λευκού ορυκτού ζεόλιθου, γεγονός που δικαιολογεί την αντοχή του ως συνδεδετικό υλικό [6]. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι ιστορικές ανακαλύψεις στον τομέα των γεωπολυμερών. Βάσει της έρευνάς του, δημιούργησε ένα νέο τύπο συνδεδετικών

υλικών τα οποία ονόμασε «soil – cements». Τα «soil - cements» παράγονταν από αλουμινοπυριτικά υλικά με πρόσμιξη βιομηχανικών αποβλήτων πλούσιων σε αλκάλια [6].

**Πίνακας 2.1. Ιστορικές ανακαλύψεις στα αλκαλικά ενεργοποιημένα συνδετικά υλικά [6]**

Όνομα	Έτος	Αντικείμενο
Feret	1939	Slags used for cement
Purdon	1940	Alkali-slag combinations
Glukhovsky	1959	Theoretical basis and development of alkaline cements
Glukhovsky	1965	First called “alkaline cements”
Davidovits	1979	“Geopolymer” term
Malinowski	1979	Ancient aqueducts characterized
Forss	1983	F-cement (slag-alkali-superplasticizer)
Langton and Roy	1984	Ancient building materials characterized
Davidovits and Sawyer	1985	Patent of “Pyrament” cement
Krivenko	1986	DSc thesis, $R_2O-RO-SiO_2-H_2O$
Malolepsy and Petri	1986	Activation of synthetic melilite slags
Malek. et al.	1986	Slag cement-low level radioactive wastes forms
Davidovits	1987	Ancient and modern concretes compared
Deja and Malolepsy	1989	Resistance to chlorides shown
Kaushal et al.	1989	Adiabatic cured nuclear wastes forms from alkaline mixtures
Roy and Langton	1989	Ancient concretes analogs
Majundar et al.	1989	C12A7 – slag activation

Οι έρευνες πάνω στον κλάδο της αλκαλικής ενεργοποίησης αυξήθηκαν κατά πολύ μετά τα αποτελέσματα των ερευνών του Davidovits. Πιο συγκεκριμένα, κατοχύρωσε την ευρεσιτεχνία της παραγωγής γεωπολυμερών με τη χρήση αλκαλικού διαλύματος και μίγμα καολινίτη, ασβεστόλιθου και δολομίτη. Το μίγμα που προέκυψε σταθεροποιήθηκε στη θερμοκρασία των 150° C δημιουργώντας ένα μονόλιθο ανόργανου πολυμερούς [7]. Βάσει των ερευνών του, τα νέας

μορφής συνδετικά υλικά ήταν αποτέλεσμα μιας παραλλαγής στην διαδικασία δημιουργίας των προγενέστερων υλικών που χρησιμοποιούσαν στην αρχαία Ρώμη και Αίγυπτο. Επίσης, κατά τη μελέτη του αναφέρει πως οι πυραμίδες δεν κατασκευάστηκαν από φυσική πέτρα, αλλά από μίας μορφής συνδετικό υλικό το οποίο ήταν αποτέλεσμα ανθρώπινης παραγωγής. Συγκεκριμένα δήλωσε πως ήταν ένα μίγμα ασβεστολιθικής άμμου, υδροξειδίου του ασβεστίου, ανθρακικού νατρίου και νερού [6]. Ωστόσο η χημεία των υλικών αυτών απέχει από τα υλικά που σήμερα ονομάζονται γεωπολυμερή.

Για την αναφορά των υλικών αυτών ακόμα και σήμερα χρησιμοποιείται μία ευρεία ονοματολογία, με τις πιο κοινές από αυτές ονομασίες να είναι:

- αργίλο-πυριτική ύαλος χαμηλής θερμοκρασίας,
- τσιμέντο ενεργοποιημένο με αλκάλια,
- αλκαλικοί – ενεργοποιητές και
- ανόργανα πολυμερή.

Παρά την πληθώρα των ονομάτων, το επικρατέστερο και πιο διαδεδομένο είναι το «γεωπολυμερή». Στον Πίνακα 2.2 παρατίθενται διάφορες άλλες ονομασίες από το 1970 μέχρι και σήμερα για τον χαρακτηρισμό των προαναφερθέντων υλικών.

**Πίνακας 2.2. Ονομασίες για το χαρακτηρισμό των γεωπολυμερών [6]**

Ονομασία	Πηγή
norganic polymer	Van Wazer, 1970
Low-temperature aluminosilicate glass	Rahier, 1996
Alkali-activated cement	Roy, 1999 & Palomo, 2003
Alkali-activated binders	Torgal, Gomes & Jalali, 2008
Geocement	Krivenko, 1994
Alkali-bonded ceramic	Mallicoat, 2005
Inorganic polymer concrete	Sofi, 2006
Hydroceramic	Bao, 2005
Mineral Polymers	Davidovits, 1980

Inorganic polymer glasses	Rahier, 2003
Alkali ash material	Rostami, 2003
Soil cements	Glukhovsky, 1965
Alkali Activated Binder	Provis & Deventer, 2009

Όπως αναφέρθηκε, η έρευνα του καθηγητή Davidovits επικεντρώθηκε περισσότερο στη μελέτη των υλικών και των διαδικασιών που χρησιμοποιήθηκαν σε αρχαίους πολιτισμούς για την κατανόηση της τεχνολογίας της εποχής εκείνης. Η έρευνα πάνω στα γεωπολυμερή τα επόμενα αρκετά χρόνια δεν είχε παρουσιάσει αντικείμενο ενασχόλησης για ακαδημαϊκούς σκοπούς, πέρα από τις έρευνες που είχαν πραγματοποιηθεί για λογαριασμό ορισμένων εταιρειών. Το ενδιαφέρον των ερευνητών για τον τομέα των γεωπολυμερών παρουσίασε εκθετική ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Περαιτέρω συζήτηση για τα πεδία εφαρμογής των γεωπολυμερών πραγματοποιείται σε επόμενη ενότητα.

## 2.2 Χημεία / Σύνθεση γεωπολυμερών

Γενικότερα, με τον όρο πολυμερή αναφερόμαστε σε χημικές ενώσεις που αποτελούνται από μεγάλα μόρια (μακρομόρια) τα οποία είναι αποτέλεσμα της σύνδεσης πολλών μικρών δομικών μονάδων με ομοιοπολικούς δεσμούς. Ως αποτέλεσμα της χημικής αντίδρασης των μονομερών προκύπτουν τα πολυμερή και η διαδικασία αυτή ονομάζεται πολυμερισμός. Τα πολυμερή διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Τα Οργανικά πολυμερή
- Τα Ανόργανα πολυμερή

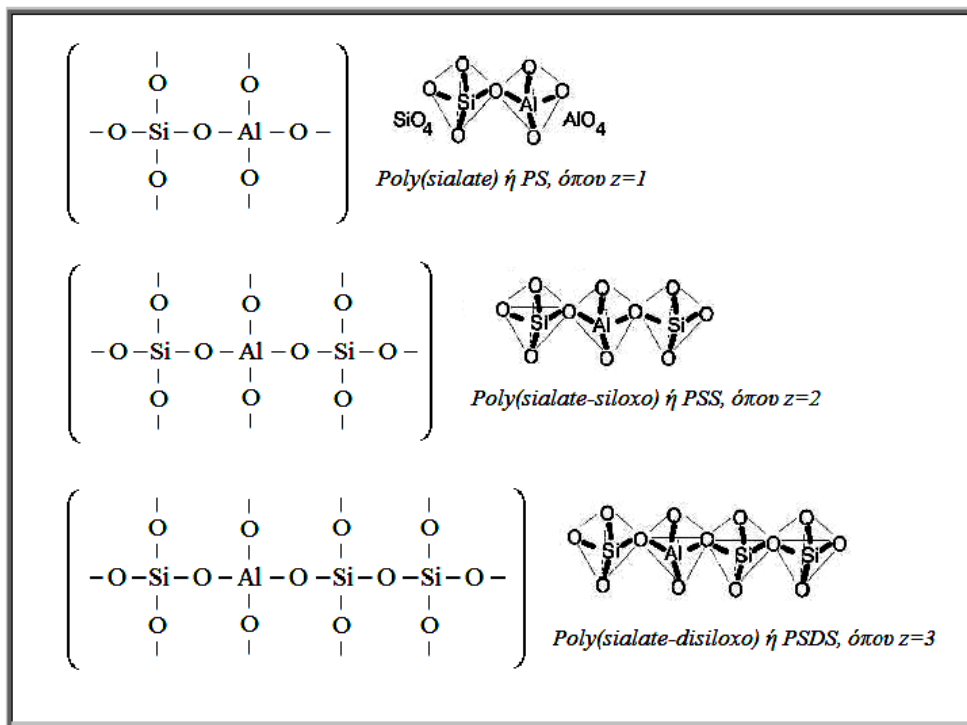
Τα γεωπολυμερή που θα αποτελέσουν αντικείμενο μελέτης, ανήκουν στη δεύτερη κατηγορία των πολυμερών, στα ανόργανα πολυμερή. Η σύνθετη λέξη «γεωπολυμερές» αποτελείται από το συνθετικό «γεω-» που μας υποδηλώνει την ανόργανη φύση του και το «-πολυμερές», παραπέμποντάς μας στη γνωστή δομή των οργανικών πολυμερών [8]. Τα πολυμερή αυτά σε αντίθεση με τα οργανικά δεν έχουν ως βασικό στοιχείο τον άνθρακα (C). Τα γεωπολυμερή αποτελούνται συνήθως από στοιχεία όπως είναι το πυρίτιο (Si), το γερμάνιο (Ge), ο κασσίτερος (Sn), ο φώσφορος (P) και το θείο (S). Τα γεωπολυμερή ταξινομούνται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες

βάσει του λόγου πυριτίου/αργιλίου (Si/Al) στη βασική αργιλοπυριτική μονάδα της δομής τους [9]. Οι κατηγορίες αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3.

**Πίνακας 2.3. Κατηγορίες γεωπολυμερών βάσει λόγου πυριτίου/αργιλίου (Si/Al) [9]**

Όνομασία	Σύντμηση	Μονομερές	Λόγος (Si/Al)
poly(sialate)	PS	(-Si-O-Al-O-)	1:1
poly(sialate-siloxo)	PSS	(-Si-O-Al-O-Si-O-)	2:1
poly(sialate-disiloxo)	PSDS	(-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-)	3:1

Η δομή του κάθε τύπου γεωπολυμερούς, όπως έχει παρουσιαστεί από τον Davidovits, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1 [8].

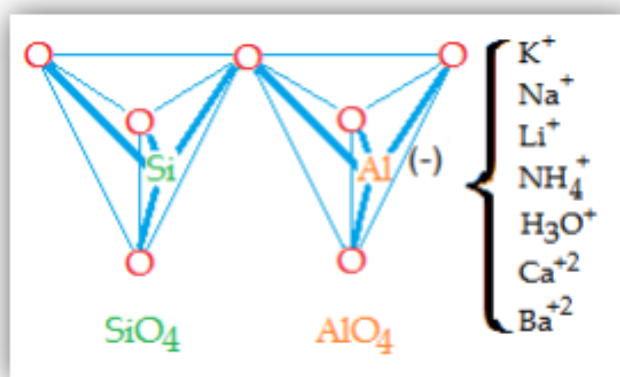


**Σχήμα 2.1. Δομή των τριών τύπων γεωπολυμερών [8]**



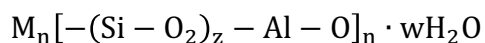
Η βασική δομή των γεωπολυμερών αποτελείται από τετράεδρα πυριτίου (SiO<sub>4</sub>) και αργιλίου (AlO<sub>4</sub>), τα οποία παραμένουν ενωμένα μεταξύ τους μοιραζόμενα τα κοινά άτομα οξυγόνου.[5] Με τον τρόπο αυτό παρατηρείται η ύπαρξη αρνητικού φορτίου στην πλευρά του τετραεδρικού αργιλίου, το οποίο εξισορροπείται με την παρουσία θετικών ιόντων όπως Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Li<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Ba<sup>2+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>. Η συνεισφορά τους, πέραν της ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της ηλεκτρικής ουδετερότητας, θεωρείται πως αποτελεί σημαντικό παράγοντα στη διατήρηση της ακεραιότητας του τελικού προϊόντος. Επίσης, βάσει των Saidi *et al.* το ιόν Na<sup>+</sup> επηρεάζει την ευθραυστότητα των γεωπολυμερών.[5]

Η δομική μονάδα που περιγράφηκε και παραπάνω, δηλαδή το πλέγμα Si-O-Al, ονομάζεται sialate από την σύντμηση του όρου silicon-oxy-aluminate και παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2. Τετραεδρική δομή του sialate [8]

Γενικότερα, η αντίδραση γεωπολυμερισμού πραγματοποιείται παρουσία μιας αργιλοπυριτικής σκόνης με ένα αλκαλικό διάλυμα πυριτικού άλατος, συνήθως σε συνθήκες περιβάλλοντος. Η διαδικασία αυτή αποτυπώνεται από τον παρακάτω τύπο [5]:



Όπου:

- M είναι κάποιο αλκαλικό στοιχείο συνήθως κάποιο κατιόν, όπως κάλιο (K<sup>+</sup>), νάτριο (Na<sup>+</sup>) ή ασβέστιο (Ca<sup>2+</sup>),

- το  $z$  παίρνει ακέραιες τιμές από 1 έως 3,
- το  $n$  είναι ο βαθμός πολυμερισμού, και
- το  $w$  αποτελεί το ποσό των προσκολλημένων μορίων νερού.

Το ποσοστό του νερού επηρεάζει τη διαδικασία δημιουργίας του γεωπολυμερούς σε όλα τα στάδιά της. Το κατάλληλο υδατικό περιβάλλον επιτρέπει τη διάλυση του πυριτίου (Si) και του αργιλίου (Al), καθώς και το βαθμό πολυμερισμού από τη στιγμή που συμμετέχει στη χημική αντίδραση της πολυσυμπύκνωσης. Τέλος, όπως η παρουσία των θετικών ιόντων, έτσι και του νερού συμβάλλουν στη σκλήρυνση του τελικού προϊόντος [10]. Παρατηρείται ότι η αυξημένη ποσότητα νερού επιφέρει αποτελέσματα που σε κάποιες περιπτώσεις είναι επιθυμητά και σε άλλες όχι.

Τα αποτελέσματα αυτά καταγράφονται παρακάτω:

- **Θετικά αποτελέσματα:** Η αυξημένη ποσότητα μορίων νερού προκαλεί μείωση του ιξώδους της υγρής φάσης με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη διάχυση των διαλυτοποιημένων πρώτων υλών που έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την ευκολότερη μορφοποίηση του.
- **Αρνητικά αποτελέσματα:** Δεν επιτρέπει τη διαδικασία της πολυσυμπύκνωσης στα ολιγομερή προς την ανάπτυξη των πολυμερικών μονάδων. [10, 11]

### 2.3 Μηχανισμός γεωπολυμερισμού

Για τη δημιουργία των γεωπολυμερών είναι απαραίτητο να αναμιχθούν οι πρώτες ύλες με τα διαλύματα ενεργοποίησης, καθώς και με τα πληρωτικά υλικά. Οι πρώτες ύλες είναι είτε φυσικά αργυλοπυριτικά ορυκτά, είτε βιομηχανικά απόβλητα, ενώ τα πληρωτικά υλικά είναι καολινίτης ή μετακαολινίτης τα οποία χρησιμοποιούνται για τη διάθεση των  $Al^{3+}$  στο μείγμα. Θα μιλήσουμε εκτενέστερα αργότερα για τις πρώτες ύλες. [12]

Οι έρευνες πάνω στον τομέα της αλκαλικής ενεργοποίησης αυξήθηκαν μετά τα ερευνητικά αποτελέσματα του Γάλλου Davidovits, που δημιούργησε συνδεδετικά υλικά με αλκαλική ενεργοποίηση μετακαολίνη. Σύμφωνα με τον ίδιο, το νέο συνδεδετικό υλικό δημιουργήθηκε με την τροποποίηση της διαδικασίας που ακολουθούσαν οι Ρωμαίοι και οι Αιγύπτιοι.

Οι πιο κοινοί ενεργοποιητές είναι το NaOH και το KOH. Η αλκαλική ενεργοποίηση είναι υψίστης σημασίας για την κατασκευή ενός υλικού με τις επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες. Οι ενεργοποιητές προκαλούν την καθίζηση και την κρυστάλλωση των πυριτικών και αλουμινικών συστατικών στο διάλυμα. Το OH δρα ως καταλύτης και το μεταλλικό κατιόν χρησιμοποιείται για να σχηματίσει ένα δομικό στοιχείο και να εξισορροπήσει το ηλεκτρικό φορτίο. Παρακάτω παρατίθενται ορισμένοι ενεργοποιητικοί παράγοντες κατηγοριοποιημένοι σε έξι ομάδες, όπου M είναι το αλκαλικό ιόν [6]:

- Υδροξείδια των μετάλλων, MOH
- Ασθενή όξινα άλατα,  $M_2CO_2$ ,  $M_2SO_3$ ,  $M_3PO_4$ , MF
- Πυριτικά αλκάλια,  $M_2O_nSiO_3$
- Αργιλικά αλκάλια,  $M_2O_nMAl_2O_3$
- Αργιλοπυριτικά αλκάλια  $M_2OAl_2O_3(2-6)SiO_2$
- Ισχυρά όξινα άλατα  $M_2SO_4$

Ενώ οι πιο συνήθεις είναι το NaOH,  $Na_2SO_4$ , υδρύαλος (waterglass),  $Na_2CO_3$ ,  $K_2CO_3$ ,  $K_2SO_4$ , KOH, οι ενεργοποιητές που είναι ευρέως χρησιμοποιούμενοι είναι το NaOH και το KOH.[13]

Το διάλυμα ενεργοποίησης περιλαμβάνει [14]:

- διάλυμα υδροξειδίου ενός αλκαλίου (συνήθως νατρίου ή/και καλίου) το οποίο βοηθά στη διαλυτοποίηση των πρώτων υλών.
- διάλυμα πυριτικού νατρίου ή καλίου, το οποίο δρα ως συνδετικό υλικό, αλκαλικός ενεργοποιητής, πλαστικοποιητής (plasticizer) ή μέσο διάχυσης (dispersant).

## 2.4 Στάδια γεωπολυμερισμού

Παρότι έχουν γίνει εκτεταμένες έρευνες, η ακριβής χημεία και ο μηχανισμός σύνθεσης των γεωπολυμερών από διαφορετικά αργιλοπυριτικά υλικά δεν έχει κατανοηθεί πλήρως μέχρι σήμερα.

Βασιζόμενοι σε ένα προγενέστερο μοντέλο του Davidovits και των Xu & Van Deventer, η αντίδραση του γεωπολυμερισμού μπορεί να διαχωριστεί σε τρία βασικά στάδια. Τη

διάλυση/υδρόλυση, την επαναδόμηση και τέλος την πολυσυμπύκνωση/ζελατινοποίηση. Η κινητική του κάθε βήματος εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως είναι το είδος του αργιλοπυριτικού στερεού, η αναλογία στερεού διαλύματος, η συγκέντρωση πυριτίου και αργιλίου, το ποσοστό του νερού καθώς και οι συνθήκες κάτω από τις οποίες θα γίνουν οι αντιδράσεις [8, 5, 9].

Ο μηχανισμός που προτείνεται από τους περισσότερους ερευνητές περιλαμβάνει στάδια τα οποία συντελούνται παράλληλα και επομένως είναι αρκετά δύσκολος ο πλήρης διαχωρισμός τους [15]. Τα στάδια αυτά είναι τα εξής:

- 1) Διάλυση πυριτίου (Si) και αργιλίου (Al) από το στερεό αργιλοπυριτικό υλικό μέσα στο ισχυρά αλκαλικό υδατικό περιβάλλον (διάλυμα ενεργοποίησης).

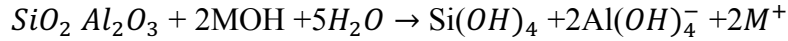
Ο γεωπολυμερισμός ξεκινάει με την υδρόλυση του  $H^+$  και μονοσθενή κατιόντων Νατρίου ( $Na^+$ ) και Καλίου ( $K^+$ ) από τη μορφοποιημένη μάζα στην αργιλοπυριτική στερεή επιφάνεια. Στη συνέχεια γίνονται συνεχείς διαλύσεις πρόδρομων αργιλοπυριτικών αλάτων. Η διάλυση προχωρά με το σπάσιμο των δεσμών μεταξύ Si-O-Si είτε Si-O-Al στα αργιλοπυριτικά σωματίδια (sol) για το σχηματισμό πρόδρομων ενώσεων  $Si(OH)_4$  και  $Al(OH)_4^-$ .

Το στάδιο της διάλυσης είναι πιθανόν να συμβεί ταυτόχρονα με τη ζελατινοποίηση των αργιλοπυριτικών, που συμβαίνει συνήθως στη στερεά επιφάνεια, αφού η πυκνότητα του gel είναι υψηλότερη στο σημείο αυτό. Κατά τη διαδικασία της διαλυτοποίησης δεν παρατηρείται ανάπτυξη μηχανικών αντοχών.

- 2) Το στάδιο της επαναδόμησης. Οι πρόδρομες αργιλοπυριτικές ενώσεις που υπάρχουν στο διάλυμα κινούνται και μπορούν να προσανατολιστούν μερικώς έτσι ώστε να βρεθούν σε μία πιο σταθερή θερμοδυναμικά κατάσταση, πριν ακολουθήσει η διαδικασία της πήξης κατά την πολυσυμπύκνωση.
- 3) Το στάδιο της ζελατινοποίησης. Υπερκορεσμός επιτυγχάνεται όταν οι συγκεντρώσεις των διαλυμένων ειδών είναι υψηλότερες από τις συγκεντρώσεις των κορεσμένων. Στο σημείο του υπερκορεσμού πολυμερίζονται απευθείας το  $Al^{3+}$  και το  $Si^{4+}$ . Το στάδιο του πολυμερισμού σηματοδοτείται επίσης με την απόθεση μοριακού νερού από το γεωπολυμερές gel και συνεπώς παρατηρείται και συρρίκνωση του υλικού.

Ο μηχανισμός αντίδρασης γεωπολυμερισμού περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις [16]:

Διαλυτοποίηση

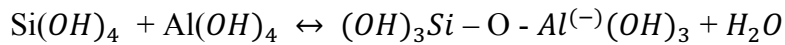


Όπου M, Na ή K.

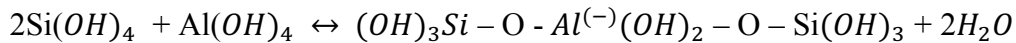
Σχηματισμός πρόδρομων ολιγομερών χημικών ειδών



Δομή orthosialate

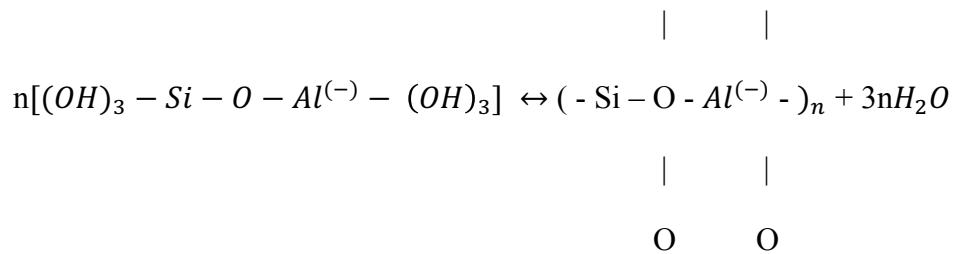
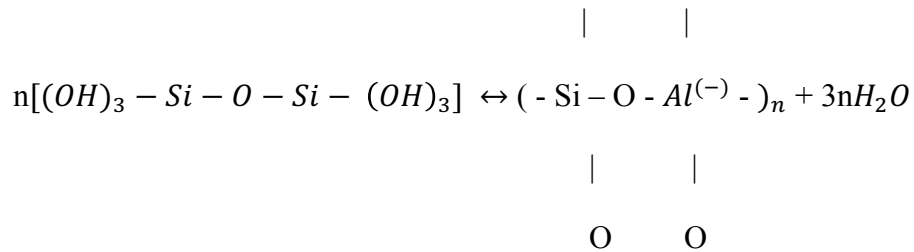


Δομή ortho(sialate-siloxo)

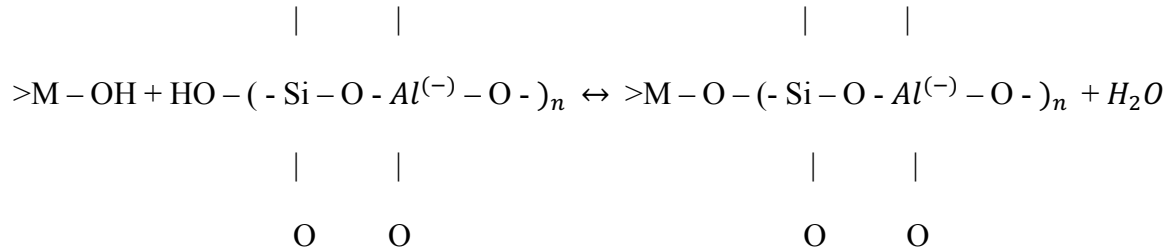


Πολυσυμπύκνωση πρόδρομων ολιγομερών χημικών ειδών και σχηματισμός πολυμερών

δομών



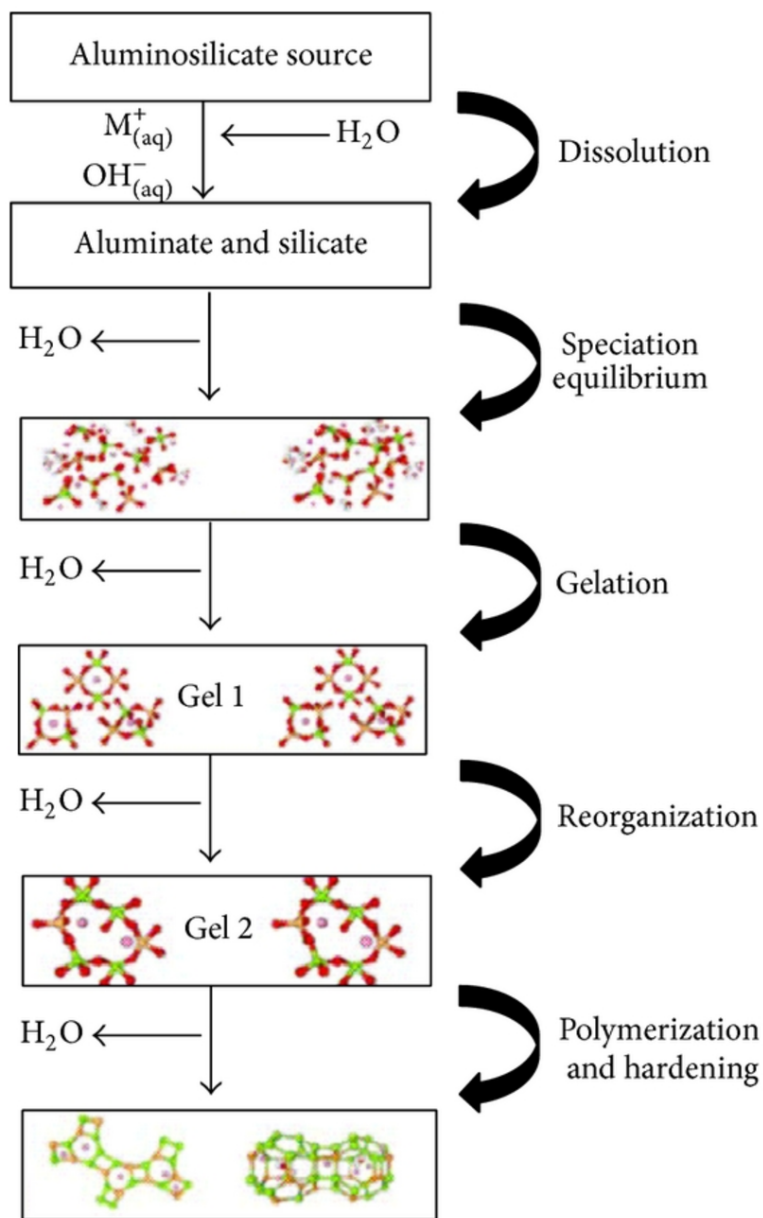
Δέσμευση αδιάλυτων κόκκων του στερεού – Σκλήρυνση του συστήματος



Όπου M, Si, Al.

Για να επιτευχθούν στο τελικό πολυμερές οι επιθυμητές ιδιότητες, θα πρέπει ο λόγος SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O να κυμαίνεται μεταξύ 0,5 και 1,0 (0,5 < SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O < 1,0). Το τελικό αποτέλεσμα του γεωπολυμερισμού είναι ένα άμορφο έως κρυσταλλικό πλέγμα.

Ο μηχανισμός γεωπολυμερισμού που προτείνεται από την επιστημονική ομάδα του Van Deventer αποτυπώνεται στο Σχήμα 2.3, διαχωρίζοντας τα στάδια σε α) διαλυτοποίηση, β) ισορροπία συστήματος, γ) γελοποίηση, δ) αναδιοργάνωση και ε) πολυμερισμό και πήξη [17]:

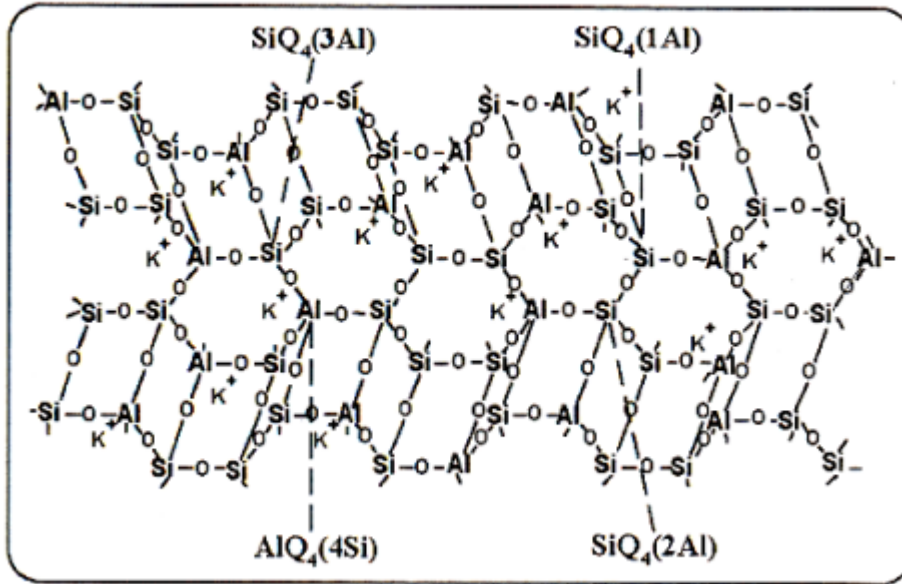


Σχήμα 2.3. Στάδια γεωπολυμερισμού [17]

## 2.5 Πρώτες ύλες για την παραγωγή γεωπολυμερών

Τις προηγούμενες δεκαετίες είχε μελετηθεί η χρήση διαφόρων αργιλοπυριτικών ορυκτών ως πρώτες ύλες για τη σύνθεση γεωπολυμερών και κυρίως καολίνη και μετακαολίνη.[11]

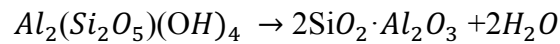
Ο μετακαολίνης παρέχει μία πηγή αλουμινίου με αρκετά καλά καθορισμένη στοιχειομετρία πολύ κοντά στο  $2\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3$  [18].



Σχήμα 2.4. Δομή γεωπολυμερών από μετακαολίνη [18]

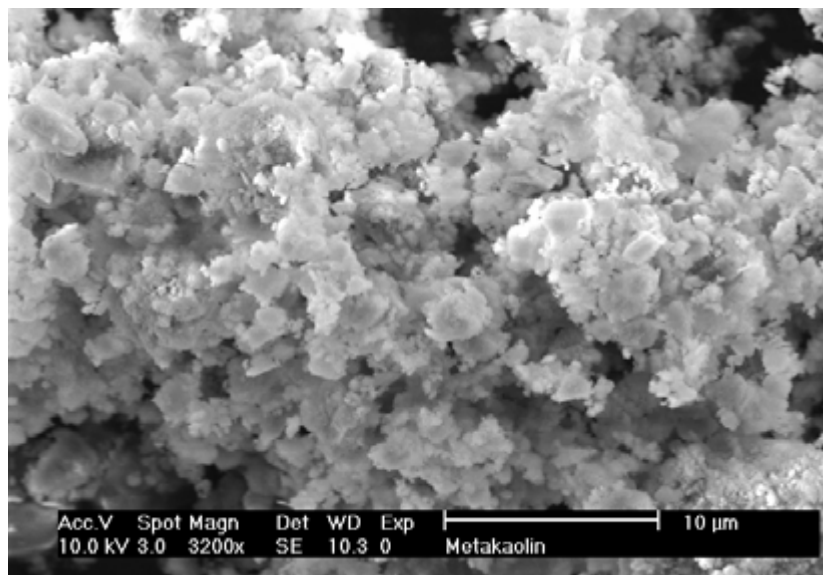
Ο μετακαολίνης είναι η από-υδροξυλιωμένη μορφή του ορυκτού καολίνης, το οποίο επιτυγχάνεται με θερμική κατεργασία σε θερμοκρασία άνω των 450° C. Ο βιομηχανικός μετακαολίνης υποβάλλεται σε θερμοκρασίες 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 950, 1000°C.[18]

Η θερμική αυτή επεξεργασία οδηγεί στην καταστροφή της κρυσταλλικής δομής του καολινίτη και στο σχηματισμό του άμορφου μετακαολίνης, σύμφωνα με την ακόλουθη αντίδραση διάσπασης [19]:



Η δραστηριότητα του μετακαολίνης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως ενδεικτικά η ορυκτολογική του σύσταση, η κρυσταλλικότητα του καολινίτη, καθώς και η κοκκομετρία του.





**Εικόνα 2.1. Παρατήρηση μορφολογίας μετακαολίνη με τη μέθοδο SEM [19]**

Για να γίνει η διαδικασία του γεωπολυμερισμού πιο φιλική στο περιβάλλον και να προστατευθούν οι πρώτες ύλες που διατίθενται στη φύση, χρησιμοποιήθηκαν υλικά όπως τα βιομηχανικά απόβλητα καθώς και άλλα παραπροϊόντα όπως η ιπτάμενη τέφρα, η σκωρία υψικαμίνων, η ερυθρά ιλύς και ο υδρύαλος (waterglass). Σε σύγκριση με το μετακαολίνη, η ιπτάμενη τέφρα έχει πολύ χαμηλότερο κόστος καθώς δεν χρειάζεται η θερμική επεξεργασία του καολίνη, μία διαδικασία με υψηλό ενεργειακό και χρηματικό κόστος. Παρά τα σημαντικά οφέλη που προαναφέρθηκαν σε σχέση με το μετακαολίνη, η ιπτάμενη τέφρα είναι λιγότερο δραστική [20].

Η ιπτάμενη τέφρα είναι από τις πιο σημαντικές πηγές για τη δημιουργία γεωπολυμερών. Είναι πολύ εύκολα διαθέσιμη καθώς παράγεται σε πολύ μεγάλες ποσότητες, αλλά η χρήση της προς το παρόν είναι περιορισμένη. Η ιπτάμενη τέφρα αποτελεί το κύριο στερεό κατάλοιπο από την καύση λιγνίτη σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, μαζί με την τέφρα πυθμένα. Μπορεί να είναι πυριτικής προέλευσης ή και ασβεστολιθικής.

Η πυριτική προέρχεται από την καύση ανθρακικών ή γαιανθράκων πλούσιων σε οργανικό μέρος και έχει ποζολανικές ιδιότητες, ενώ η ασβεστούχα προέρχεται από την καύση κατώτερης γεωλογικής περιόδου ανθράκων και λιγνιτών και έχει ποζολανικές καθώς και υδραυλικές ιδιότητες που αποδίδονται στο ελεύθερο CaO που περιέχει [19].

Η περιεκτικότητα σε διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ) κυμαίνεται μεταξύ 40% και 60% ενώ σε διοξείδιο του αργιλίου ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) μεταξύ 20% και 30% [16]. Το ενδιαφέρον για τη χρήση της ιπτάμενης τέφρας στη σύνθεση γεωπολυμερών προέκυψε από την υψηλή περιεκτικότητα σε  $\text{SiO}_2$  και  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , τη χαμηλή ζήτηση σε νερό, την υψηλή διαθεσιμότητα καθώς και την αποτελεσματικότητα που παρουσιάζει σαν πρώτη ύλη.



**Εικόνα 2.2. Ιπτάμενη τέφρα [11]**

Η σκωρία υψικαμίνου είναι ένα υγρό παραπροϊόν της παραγωγής σιδήρου. Μετά από ταχεία ψύξη και άλεση μπορεί να παραχθεί ένα υαλώδες κοκκώδες υλικό με υψηλότερη αντιδραστικότητα, το οποίο ονομάζεται κοκκώδης σκωρία υψικαμίνου. Η σκωρία υψικαμίνου περιέχει  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  και  $\text{MgO}$  [11].

Η σκωρία υψικαμίνων δημιουργείται όταν το μέταλλευμα σιδήρου λιώνει σε φούρνο με αέρα υπό πίεση. Όταν η διαδικασία της τήξης ολοκληρωθεί, το ασβέστιο έχει συνδυαστεί χημικά με τα αργιλικά και τα πυριτικά άλατα του μεταλλεύματος και της τέφρας, ώστε να διαμορφωθεί το μη μεταλλικό προϊόν που ονομάζεται σκωρία υψικαμίνων. Στη σκωρία διακρίνονται υψηλά ποσοστά άνθρακα (~44%). Παρότι οι σκωρίες από συγκεκριμένους υψικαμίνους έχουν σταθερές φυσικές και χημικές ιδιότητες, οι συστάσεις από τις σκωρίες ποικίλουν μεταξύ κλιβάνων και μεταλλευμάτων.



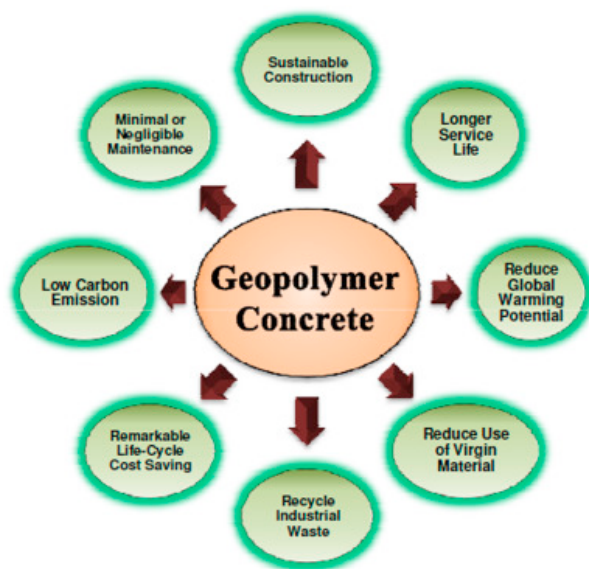
**Εικόνα 2.3. Σκωρία υψικαμίνου [11]**

Άλλες πρώτες ύλες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία του γεωπολυμερισμού είναι η ερυθρά ίλυ, που αποτελεί παραπροϊόν της επεξεργασίας του βωξίτη κατά την παραγωγή αλουμίνας, καθώς και τα απορρίματα περλίτη, που είναι πλούσια αργιλοπυριτική πηγή. Τα προϊόντα από περλίτη έχουν αυξημένες θερμομονωτικές ιδιότητες.

### 3. Γεωπολυμερή στην Κατασκευαστική Βιομηχανία

#### 3.1 Εισαγωγή

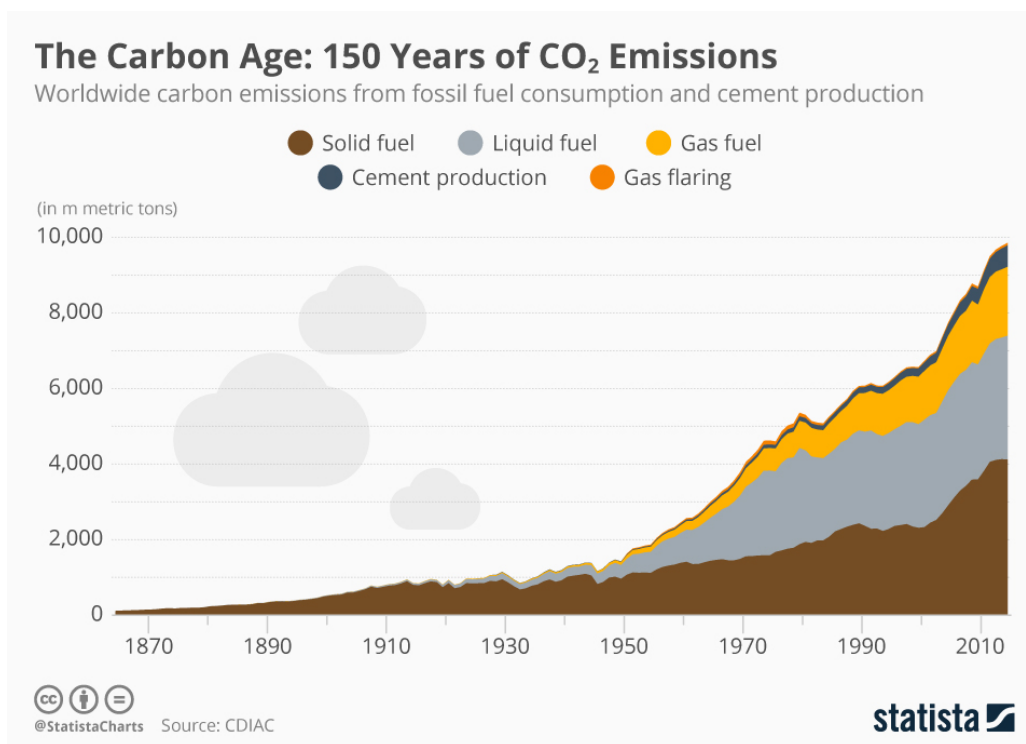
Με την αναζήτηση νέων συνδετικών υλικών στην παραγωγή σκυροδέματος ακολούθησε εκτεταμένη έρευνα στον τομέα των γεωπολυμερών. Η βασική διαφορά ανάμεσα στο γεωπολυμερές σκυρόδεμα και το τσιμέντο Portland είναι το τσιμέντο ή το συνδετικό υλικό. Η τεχνολογία γεωπολυμερών είναι πολλά υποσχόμενη για εφαρμογή στην βιομηχανία σκυροδέματος, ως εναλλακτική λύση στο τσιμέντο Portland ως συνδετικό υλικό. Με την ολοένα αυξανόμενη περιβαλλοντική ανησυχία, το ενδιαφέρον για ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και η ενίσχυση των «πράσινων» κτιρίων έχει αυξηθεί σημαντικά. Τα «πράσινα» υλικά μπορεί να είναι προϊόντα προερχόμενα από απόβλητα, ανακυκλώσιμα, βιομηχανικά παραπροϊόντα με σκοπό να αποφευχθεί η εξόρυξη ή κατανάλωση φυσικών πόρων.



Σχήμα 3.1. Πλεονεκτήματα χρήσης γεωπολυμερών στην κατασκευή «πράσινων» κτιρίων[20]

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα του γεωπολυμερικού σκυροδέματος. Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μία παγκόσμια τάση που στρέφεται στην κατασκευή «πράσινων» κτιρίων. Ένα «πράσινο» κτίριο έχει κάποια μοναδικά χαρακτηριστικά, όπως

μειωμένη κατανάλωση ενέργειας, υλικών, μείωση της μόλυνσης του περιβάλλοντος καθώς και προστασία του. Τα γεωπολυμερή αναδύονται ταχύτατα ως μία νέα κατηγορία «πράσινων» οικοδομικών υλικών στον κατασκευαστικό τομέα. Κατά τη διαδικασία του γεωπολυμερισμού τα άτομα πυριτίου (Si) και αργιλίου (Al) αντιδρούν για να δημιουργηθούν μόρια των οποίων η χημική δομή παρουσιάζει ιδανικές ιδιότητες, εκμεταλλεύσιμες για την παραγωγή νέων δομικών υλικών [21]. Τα κτίρια ευθύνονται για το 40% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας και για το 70% της κατανάλωσης σε ρεύμα. Περίπου το 40% του CO<sub>2</sub>, το 50% του SO<sub>2</sub> και το 20% του NO<sub>x</sub> που εκλύεται στην ατμόσφαιρα στην Αμερική προέρχεται από την κατανάλωση ενέργειας προς όφελος της κατασκευαστικής βιομηχανίας [22].

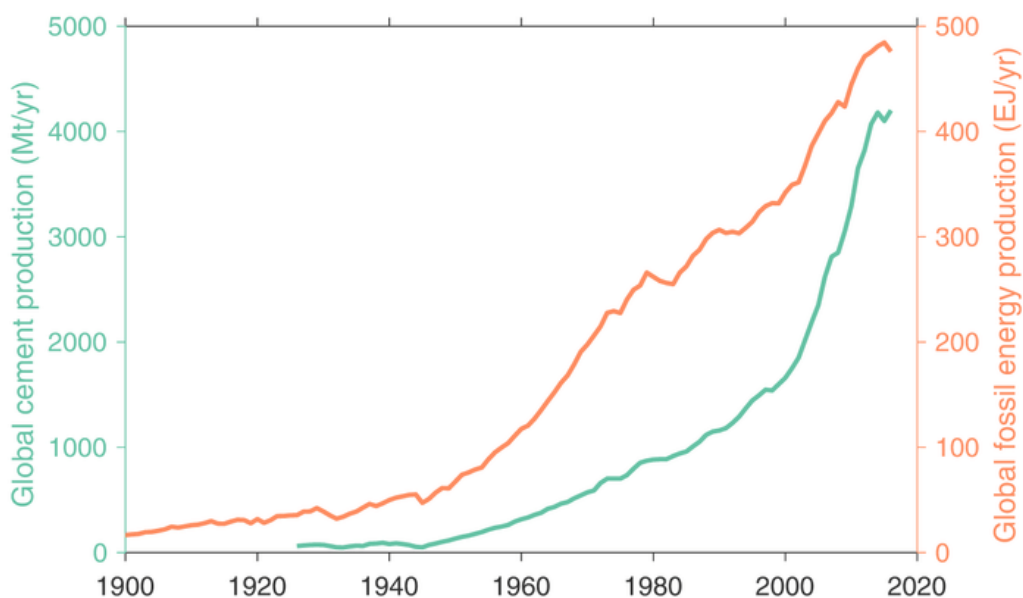


**Σχήμα 3.2. Βασικοί τομείς παγκόσμια παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα [22]**

*Σχόλιο. Με γκρι χρώμα παρουσιάζεται ως πρωταρχική πηγή η τσιμεντοβιομηχανία.*

Για την κατασκευή κτιρίων απαιτούνται μεγάλα ποσά ενέργειας, τα οποία επηρεάζουν άμεσα την κλιματική αλλαγή και ενισχύουν διάφορα άλλα προβλήματα που σχετίζονται με την κατανάλωση ενέργειας. Κατά τη διαδικασία παραγωγής τσιμέντου εκλύεται το 5-8% του

διοξειδίου του άνθρακα που απελευθερώνεται από ανθρωπογενείς διαδικασίες. Το 95% αυτού προέρχεται από την παρασκευή του τσιμέντου, το μισό του οποίου προέρχεται από την διαδικασία αφαίρεσης άνθρακα του ασβεστόλιθου. Η ταχύτατη αστική επέκταση των αναπτυσσόμενων χωρών αναμένεται ότι θα αυξήσει τη ζήτηση σε παραγωγή τσιμέντου. Πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι το 2020, παγκόσμια, το 10-15% της συνολικής έκλυσης διοξειδίου του άνθρακα θα προέρχεται από τον τομέα της τσιμεντοβιομηχανίας. Ορισμένοι οικονομολόγοι χρησιμοποιούν την παραγωγή τσιμέντου ως μονάδα μέτρησης της οικονομίας μιας χώρας. Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η παγκόσμια παραγωγή τσιμέντου καθώς και η ενέργεια προερχόμενη από ορυκτά έως το 2016.



**Σχήμα 3.3. Με πράσινο χρώμα παρουσιάζεται η παγκόσμια παραγωγή τσιμέντου έως το 2016 και με πορτοκαλί η ενέργεια προερχόμενη από ορυκτά καύσιμα [23]**

Επομένως, η μείωση του διοξειδίου του άνθρακα κατά τη διαδικασία παραγωγής τσιμέντου κρίνεται απολύτως αναγκαία, έτσι ώστε να αναπτυχθούν προϊόντα τσιμέντου φιλικότερα στο περιβάλλον και με μειωμένο οικονομικό κόστος. Η τσιμεντοβιομηχανία έχει ήδη σημειώσει μεγάλη πρόοδο όσον αφορά την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης αλλά και την προώθηση εναλλακτικών υλικών από τσιμέντο [24].

### 3.2 Διάφορα είδη τσιμέντου

Για να προχωρήσουμε και να μιλήσουμε εκτενέστερα για την επιλογή των γεωπολυμερών και τα πλεονεκτήματά τους στην κατασκευαστική βιομηχανία, θα ήταν ορθότερο να αναφερθούμε εν συντομία στο βασικό ανταγωνιστή του, το τσιμέντο, στις υποκατηγορίες του, καθώς και σε κάποιους όρους που είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι με αυτό.

Αρχικά με τον όρο τσιμέντο (cement) αναφερόμαστε σε μία υδραυλική συνδετική ύλη, δηλαδή ένα λεπτότατα αλεσμένο ανόργανο υλικό το οποίο, όταν αναμειχθεί με νερό, σχηματίζει ένα πολτό που πήζει και σκληραίνει δια μέσου αντιδράσεων και μηχανισμών ενυδάτωσης και το οποίο, μετά τη σκλήρυνση, διατηρεί την αντοχή και τη σταθερότητά του ακόμη και μέσα στο νερό. Η ανάμειξη τσιμέντου με άμμο και νερό δημιουργεί την κονία του τσιμέντου (cement mortar). Η ανάμιξη του τσιμέντου με άμμο, χαλίκια (σκούρα) και νερό δημιουργεί το σκυρόδεμα ή μπετόν (cement concrete, beton). Ο συνδυασμός του χάλυβα με το σκυρόδεμα ονομάζεται οπλισμένο σκυρόδεμα ή οπλισμένο μπετόν (reinforced concrete) [25].



**Εικόνα 3.1. Φωτογραφική απεικόνιση του τσιμέντου [25]**

Με τον όρο τσιμέντο Portland αναφερόμαστε στο προϊόν που προκύπτει μετά από έψηση σε θερμοκρασία κλινκεροποίησης ( $1380-1420^{\circ}\text{C}$ ) ενός πλήρως ομογενοποιημένου μείγματος, το οποίο αποτελείται από περίπου 75% ασβεστολιθικά υλικά και 25% αργιλοπυριτικά υλικά και

συνάλεση του προκύπτοντος προϊόντος που καλείται κλίνκερ με την κατάλληλη ποσότητα γύψου [26]. Στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζεται η φωτογραφική απεικόνιση του τσιμέντου.

Οι τύποι τσιμέντου ανάλογα με τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή του κατατάσσονται στις παρακάτω κατηγορίες βάσει του ευρωπαϊκού προτύπου EN 197-1 από 1/5/202. Ο ελληνικός κανονισμός τσιμέντου προβλέπει τους παρακάτω τύπους:

- Τα τσιμέντα τύπου Portland χαρακτηρίζονται από την συνάλεση κλίνκερ και γύψου και στα οποία επιτρέπεται η προσθήκη έως 3% υλικών όπως ασβεστολίθων, βασάλτου, μπετονιτών, ιπτάμενης τέφρας κ.α. Έχουν υψηλό ποσοστό C<sub>3</sub>S που βοηθάει στη γρήγορη ανάπτυξη του. Προορίζεται σε κατασκευές ως υλικό γενικής χρήσης και χρησιμοποιείται κυρίως σε κτίρια, γέφυρες, πατώματα κ.ά.
- Τσιμέντα Portland με ποζολάνη χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από συνάλεση κλίνκερ Portland, φυσικής ή τεχνητής ποζολάνης και της απαραίτητης γύψου. Το ποσοστό της ποζολάνης ορίζεται από το αδιάλυτο υπόλειμμα του τσιμέντου που πρέπει να είναι κατά μέγιστο 20%. Τα τσιμέντα αυτά δεν είναι απαραίτητο να ικανοποιούν τη δοκιμή ποζολανικότητας.
- Ποζολανικά τσιμέντα Portland χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από συνάλεση κλίνκερ Portland, φυσικής ή τεχνητής ποζολάνης και της απαραίτητης γύψου. Το ποσοστό της ποζολάνης ορίζεται από το αδιάλυτο υπόλειμμα του τσιμέντου που πρέπει να είναι από 20 έως 40%. Τα τσιμέντα αυτά συνιστώνται ιδιαίτερα για ογκώδη έργα όπου απαιτείται χαμηλός βαθμός θερμότητας ενυδάτωσης ή βελτιωμένη αντοχή έναντι διαβρωτικών μέσων. Τα τσιμέντα αυτά πρέπει να ικανοποιούν τη δοκιμή ποζολανικότητας.
- Τσιμέντα ανθεκτικά στα θειικά άλατα και στο θαλασσινό νερό χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από συνάλεση κλίνκερ και γύψου. Για τα τσιμέντα αυτά το αργλικό τρισασβέστιο (C<sub>3</sub>A), πρέπει να είναι μικρότερο του 3.5%, η δε περιεκτικότητα σε SO<sub>3</sub> να μην υπερβαίνει το 2.5% [25, 26].

### **3.2.1 Κύρια συστατικά τσιμέντου**

Τα κύρια συστατικά του τσιμέντου είναι ανόργανα υλικά τα οποία προστίθενται κατά τη διαδικασία παραγωγής του. Ξεκινώντας από το κλίνκερ που είναι το υλικό με το μεγαλύτερο



ποσοστό και κατέχει έναν από τους πιο σημαντικούς ρόλους, το τσιμέντο αποτελείται επίσης από σκωρία υψικαμίνων, διάφορα ποζολανικά υλικά, φυσικές ποζολάνες, φυσικές ψημένες ποζολάνες, ιπτάμενες τέφρες, ψημένο σχιστόλιθο, ασβεστόλιθο και πυριτική παιπάλη [26].

### **3.2.2 Δευτερεύοντα συστατικά**

Τα δευτερεύοντα συστατικά προστίθενται επίσης κατά τη διαδικασία παραγωγής του τσιμέντου και επιτρέπεται να προστεθούν σε μικρό ποσοστό, περίπου 5%κ.β., ενώ πολλές χώρες δεν ξεπερνούν το 3% κ.β. [26].

### **3.2.3 Θεϊκό ασβέστιο**

Το θεϊκό ασβέστιο προστίθεται στα άλλα συστατικά του τσιμέντου κατά τη διάρκεια της παραγωγής του για τον έλεγχο της πήξης. Το θεϊκό ασβέστιο μπορεί να γίνει γύψος, διυδρίτης ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), ημιυδρίτης ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) ή ανυδρίτης (άνυδρο θεϊκό ασβέστιο,  $\text{CaSO}_4$ ) ή οποιοδήποτε μίγμα αυτών. Ο γύψος και ο ανυδρίτης υπάρχουν στη φύση. Το θεϊκό ασβέστιο διατίθεται επίσης ως παραπροϊόν ορισμένων βιομηχανικών διεργασιών [25].

### **3.2.4 Πρόσθετα**

Τα πρόσθετα είναι υλικά τα οποία δεν ανήκουν ούτε στα κύρια ούτε στα δευτερεύοντα συστατικά του τσιμέντου. Προστίθενται για τη βελτίωση είτε της παραγωγικής διαδικασίας του τσιμέντου είτε των ιδιοτήτων του. Η συνολική ποσότητα των προσθέτων δεν πρέπει να υπερβαίνει, σε ξηρή βάση, το 1% της μάζας του τσιμέντου (εξαιρουμένων των χρωστικών). Η ποσότητα των οργανικών προσθέτων, επίσης σε ξηρή βάση, δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0.5% της μάζας του τσιμέντου. Τα συγκεκριμένα πρόσθετα δεν πρέπει να συμβάλλουν στη διάβρωση του οπλισμού ή να βλάπτουν τις ιδιότητες του τσιμέντου και του σκυροδέματος ή του κονιάματος που παράγονται από το τσιμέντο [25, 26].

Τα κοινά τσιμέντα που προδιαγράφονται στο ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1 υποδιαιρούνται στους παρακάτω πέντε κύριους τύπους:

- CEM I, Τσιμέντα Πόρτλαντ
- CEM II, Σύνθετα τσιμέντα Πόρτλαντ

- CEM III, Σκωριοτσιμέντα
- CEM IV, Ποζολανικά τσιμέντα
- CEM V, Σύνθετα τσιμέντα

Στον **Πίνακας 3.1** και στον

ΣΚΩΡΙΟΤΣΙΜΕΝΤΑ												
CEM III	III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-		
	III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-		
ΠΟΖΟΛΑΝΙΚΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ												
CEM IV	IV/A	65-89	-	11-35				-	-	-	0-5	
	IV/B	45-64	-	36-55				-	-	-		
ΣΥΝΘΕΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ												
CEM V	V/A	40-64	18-30	-	18-30				-	-	-	0-5
	V/B	20-39	31-50	-	31-50				-	-	-	

παρατίθενται οι τύποι τσιμέντου βάσει του ευρωπαϊκού προτύπου EN 197-1.

**Πίνακας 3.1. Τύποι τσιμέντου σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1 [26]**

Τύπος	Ονομασία	Κύρια συστατικά*									Λευτ συστ
		K	S	D	P	Q	V	W	T	L	
<b>ΤΣΙΜΕΝΤΑ PORTLAND**</b>											
CEM I	I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
<b>ΣΥΝΘΕΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ PORTLAND</b>											
CEM II	II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	
	II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	0-5
	II/A-P	80-90	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
	II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	
CEM II	II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
	II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	
	II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
	II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	
	II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
	II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	
	II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
	II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	
	II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
	II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	
	II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
	II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	
	II/A-M	80-94	6-20								
II/B-M	65-79	21-35									

**Πίνακας 3.2. Τύποι τσιμέντου σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197-1 [26]**

ΣΚΩΡΙΟΤΣΙΜΕΝΤΑ											
CEM III	III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	
	III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	
ΠΟΖΟΛΑΝΙΚΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ											
CEM IV	IV/A	65-89	-	11-35			-	-	-	-	0-5
	IV/B	45-64	-	36-55			-	-	-	-	
ΣΥΝΘΕΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ											
CEM V	V/A	40-64	18-30	-	18-30			-	-	-	0-5
	V/B	20-39	31-50	-	31-50			-	-	-	

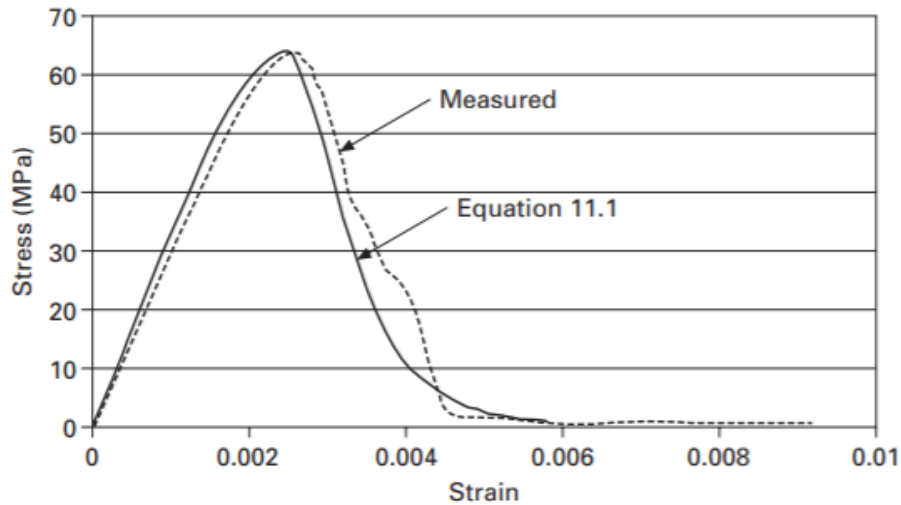
### 3.3 Ιδιότητες Γεωπολυμερικών σκυροδεμάτων στην Κατασκευαστική Βιομηχανία

Η εφαρμογή των γεωπολυμερών στην κατασκευαστική βιομηχανία συνίσταται κυρίως στην παραγωγή σκυροδέματος από αυτά, η οποία περιλαμβάνει αντί για το κλασικό τσιμέντο ένα υλικό προερχόμενο από αργιλοπυριτική βάση. Σκοπός είναι η τεχνολογία του γεωπολυμερισμού να αποτελέσει μία βιώσιμη και οικονομική λύση για την αντικατάσταση του τσιμέντου ως δομικό υλικό. Στην παρούσα ενότητα θα αναφερθούμε στις μηχανικές ιδιότητες του γεωπολυμερικού σκυροδέματος ως βασικό υλικό στην κατασκευαστική βιομηχανία. Η παρακάτω μελέτη έγινε χρησιμοποιώντας ως βασικό υλικό γεωπολυμερές σκυρόδεμα προερχόμενο από ιπτάμενη τέφρα και συγκρίνοντάς το με το απλό σκυρόδεμα προερχόμενο από τσιμέντο Portland.

Κατά την παρασκευή του γεωπολυμερικού σκυροδέματος τα οξείδια του πυριτίου και του αργιλίου αντιδρούν με το αλκαλικό διάλυμα για να δημιουργήσουν τη γεωπολυμερή πάστα για να κρατήσει ενωμένα μεταξύ τους τα χονδρόκοκκα αδρανή, τα λεπτόκοκκα αδρανή, καθώς και όλα τα υπόλοιπα συστατικά ώστε να παρασκευαστεί τελικά το γεωπολυμερές σκυρόδεμα. Όπως και στην περίπτωση του σκυροδέματος από τσιμέντο Portland έτσι και στο γεωπολυμερές τα αδρανή καταλαμβάνουν το 75 με 80% της τελικής μάζας του σκυροδέματος. Επίσης το γεωπολυμερές σκυρόδεμα μπορεί να παρασκευαστεί σε ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις, χωρίς περαιτέρω διαμόρφωση.

### 3.3.1 Συμπεριφορά κατά τη συμπίεση

Η συμπεριφορά καθώς και η αστοχία του υλικού (γεωπολυμερές σκυρόδεμα) παρουσιάζουν σημαντικές ομοιότητες σε σχέση με το σκυρόδεμα προερχόμενο από τσιμέντο Portland. Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται μία κλασική καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης του γεωπολυμερικού σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η μέγιστη επιμήκυνση είναι μεταξύ του 0.0024 και 0.0026.



Σχήμα 3.4. Καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης του γεωπολυμερικού σκυροδέματος [27]

Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται και μία δεύτερη καμπύλη που είναι το αποτέλεσμα της παρακάτω εξίσωσης για την μη πειραματική εύρεση της τάσης - παραμόρφωσης του γεωπολυμερικού σκυροδέματος [27]:

$$\sigma_c = f_{cm} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cm}} = \frac{n}{n - 1 + (\varepsilon_c/\varepsilon_{cm})^{nk}}$$

Όπου:

- $f_{cm}$  η μέγιστη φόρτιση,
- $\varepsilon_{cm}$  η επιμήκυνση στη μέγιστη φόρτιση,
- $n = 0.8 + (f_{cm}/17)$ , και
- $k = 0.67 + (f_{cm}/62)$  όταν  $\varepsilon_c/\varepsilon_{cm} > 1$  ή ίσο με 1.0 όταν  $\varepsilon_c/\varepsilon_{cm} \leq 1$ .

Από τις δύο καμπύλες στο Σχήμα 3.4 παρατηρούμε ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της πειραματικής μεθόδου και της εξίσωσης [28].

### 3.3.2 Έμμεση δύναμη εφελκυσμού

Για τη μέτρηση της δύναμης εφελκυσμού χρησιμοποιήθηκε ένα δείγμα σε μορφή κυλίνδρου διαστάσεων 150x300 mm κατασκευασμένο από γεωπολυμερές σκυρόδεμα προερχόμενο από ιπτάμενη τέφρα. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι η δύναμη εφελκυσμού αποτελεί ένα τμήμα της θλιπτικής δύναμης όπως ακριβώς και στο σκυρόδεμα προερχόμενο από τσιμέντο Portland και παρατίθενται στον Πίνακα 3.3 [28].

**Πίνακας 3.3. Έμμεση δύναμη εφελκυσμού γεωπολυμερικού σκυροδέματος [28]**

Mean compressive strength (Mpa)	Mean indirect tensile strength (Mpa)	Characteristic principal tensile strength $f_{ct}(25,4)$ (Mpa)	Splitting strength $f_{ct}(25,5)$ (Mpa)
89	7.43	3.77	5.98
68	5.52	3.3	5
55	5.45	3	4.34
44	4.43	2.65	3.74

### 3.3.3 Ειδικό βάρος

Το ειδικό βάρος του σκυροδέματος αρχικά εξαρτάται από την ειδική μάζα των αδρανών υλικών που θα χρησιμοποιηθούν στο μίγμα. Δοκιμές έδειξαν πως το ειδικό βάρος γεωπολυμερικού σκυροδέματος προερχόμενο από ιπτάμενη τέφρα είναι παρόμοιο με αυτό του σκυροδέματος από τσιμέντο Portland. Σε δοκιμή που χρησιμοποιήθηκε αδρανές υλικό προερχόμενο από γρανίτη το ειδικό βάρος κυμαινόταν ανάμεσα σε 2330 και 2430 kg/m<sup>3</sup>.

### 3.3.4 Θλιπτική δύναμη

Για τη μελέτη της θλιπτικής δύναμης χρησιμοποιήθηκαν δείγματα σε μορφή κυλίνδρου διαστάσεων 100x200 mm. Για τέσσερα χρόνια παράγονταν τέτοια δείγματα στα οποία ελεγχόταν η αντοχή στη θλίψη επτά ημέρες μετά τη χύτευσή τους. Εκτός από την θλιπτική αντοχή γινόταν έλεγχος του ειδικού βάρους τους. Τα αποτελέσματα των πολυάριθμων δειγμάτων παρατίθενται στον Πίνακα 3.4 [29].

**Πίνακας 3.4. Θλιπτική δύναμη και ειδικό βάρος γεωπολυμερικού σκυροδέματος [35]**

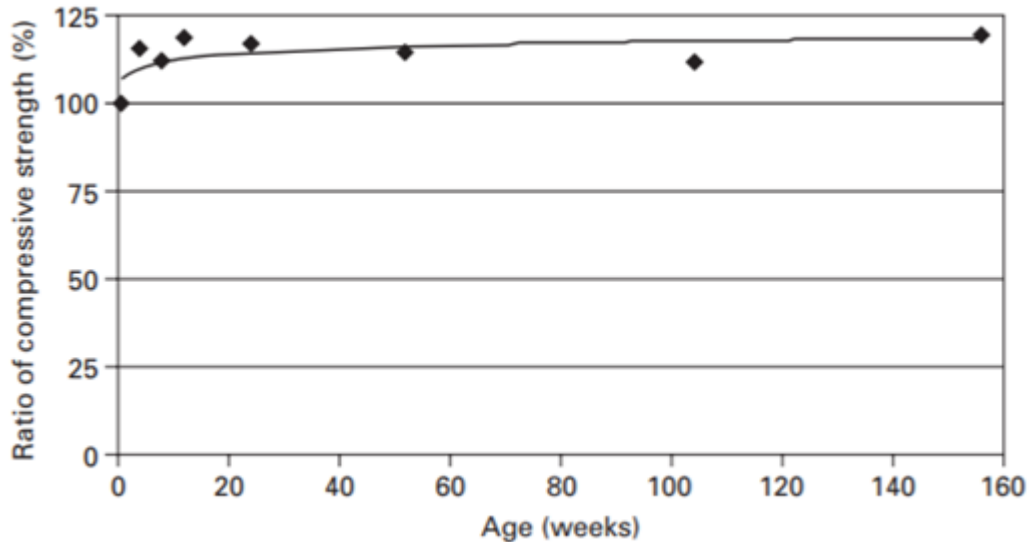
Mixture	Curing type	7th Day compressive strength (heat-curing at 60°C for 24 hours), MPa		Unit-weight, kg/m <sup>3</sup>	
		Mean	Standard deviation	Mean	Standard deviation
Mixture 1	Dry curing (oven)	58	6	2379	17
	Steam curing	56	3	2388	15
Mixture 2	Dry curing (oven)	45	7	2302	52
	Steam curing	36	8	2302	49

Τα δύο διαφορετικά μίγματα γεωπολυμερικού σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκαν στα εργαστήρια καταγράφονται στον Πίνακα 3.5 [30].

**Πίνακας 3.5. Αναλογίες γεωπολυμερών δειγμάτων [30]**

Materials		Mass (kg/m <sup>3</sup> )	
		Mixture 1	Mixture 2
Coarse aggregates:	20 mm	277	277
	14 mm	370	370
	7 mm	647	647
Fine sand		554	554
Fly ash (low-calcium ASTM Class F)		408	408
Sodium silicate solution (A53)		103	103
Sodium hydroxide solution		41 (8 Molar)	41 (14 Molar)
Super plasticiser		6	6
Extra water		None	22.5

Για να παρατηρηθεί η επίδραση του χρόνου στη θλιπτική αντοχή κατασκευάστηκαν δείγματα κυλινδρικών διαστάσεων 100x200 mm από το μίγμα 1 που παρουσιάζεται στον Πίνακας 3.5 (Mixture 1). Τα δείγματα θερμάνθηκαν στο φούρνο στους 60° C για 24 ώρες και κατόπιν έγιναν δοκιμές στη θλίψη σε διαφορετικά χρονικά διάστημα μέχρι τα τρία χρόνια. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.5 δείχνουν ότι η θλιπτική δύναμη αυξάνεται με το χρόνο σε ποσοστό 10 έως 20% σε σχέση με την έβδομη μέρα δοκιμών [30]. Τα παραπάνω δεδομένα αποδεικνύουν τη σταθερή ποιότητα, τη δυνατότητα επαναδημιουργίας καθώς και τη μακροπρόθεσμη σταθερότητα του γεωπολυμερικού σκυροδέματος.



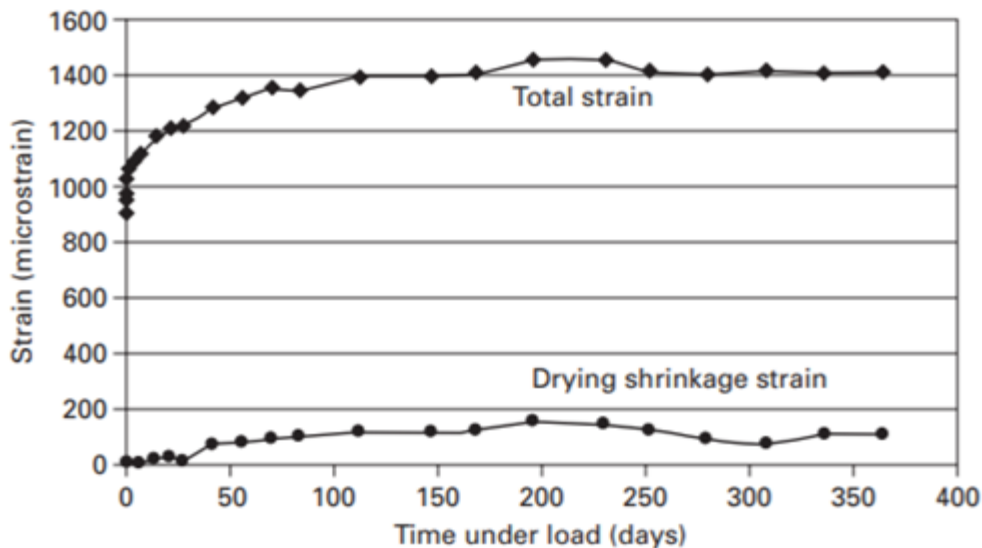
**Σχήμα 3.5. Διαφορά στη θλιπτική δύναμη του θερμικά επεξεργασμένου σκυροδέματος με την πάροδο του χρόνου [28]**

### **3.3.5 Συρρίκνωση και συστολή κατά την ξήρανση**

Η συρρίκνωση και η συστολή κατά την ξήρανση μελετήθηκαν σε διάστημα ενός χρόνου. Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούνταν από τα μίγματα 1 και 2 που προαναφέραμε (βλ. Πίνακας 3.5) και διαστάσεων 150 x 300 mm κυλινδρικού σχήματος τα οποία είχαν υποστεί θερμική επεξεργασία στους 60° C για 24 ώρες. Οι δοκιμές ερπυσμού ξεκίνησαν την έβδομη μέρα

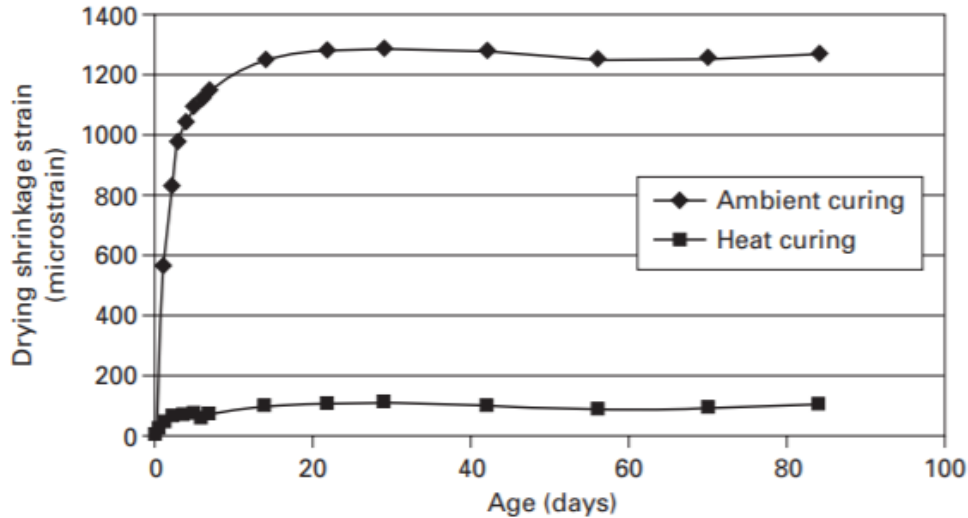


από τη χύτευση των δειγμάτων και η συνεχής τάση ήταν στο 40% της αντοχής στη θλίψη. Τα αποτελέσματα προερχόμενα από το μίγμα 1 παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.6.



**Σχήμα 3.6. Συρρίκνωση και συστολή κατά την ξήρανση**

Κατά τη διαδικασία γεωπολυμερισμού απελευθερώνονται ποσότητες νερού. Στα δείγματα που χυτεύθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος, το νερό αυτό μπορεί να εξατμιστεί δημιουργώντας νανο-πορώδες και να προκαλέσει σημαντικές αλλαγές στην επιμήκυνση του σκυροδέματος, ιδιαίτερα κατά τις πρώτες δύο εβδομάδες όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.7.



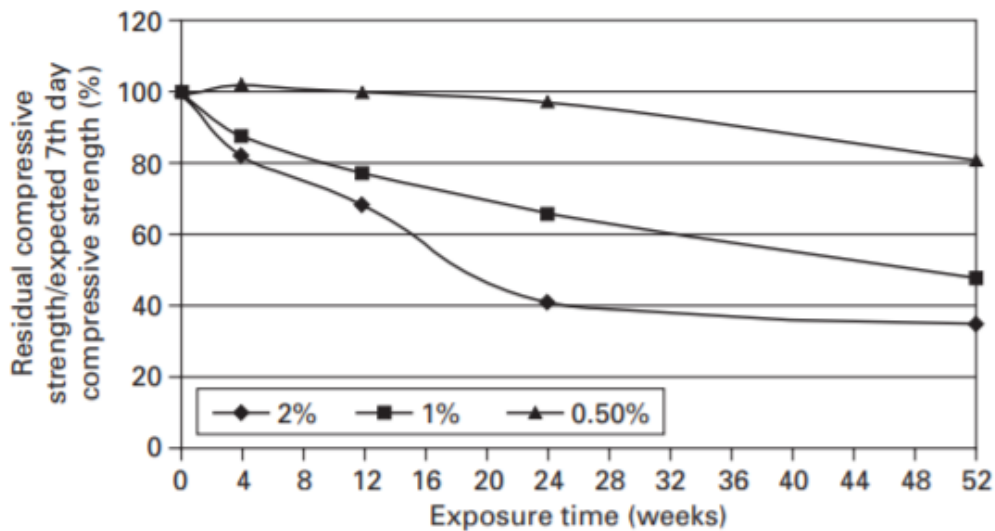
**Σχήμα 3.7.** Επιμήκυνση των δειγμάτων που χυτεύθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος καθώς και των δειγμάτων που χυτεύθηκαν σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες, κατά την ξήρανση.

### 3.3.6 Αντοχή σε θειϊκά άλατα

Ανάλογα πειράματα έγιναν για να μελετηθεί η αντίσταση σε θειϊκά άλατα του γεωπολυμερικού σκυροδέματος προερχόμενο από ιπτάμενη τέφρα. Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε σαν πρώτη ύλη το Μείγμα 1 (βλ. Πίνακας 3.5) και χυτεύθηκε στους 60° C για 24 ώρες. Έπειτα βυθίστηκε σε διάλυμα θειϊκού νατρίου περιεκτικότητας 5% για διάφορες χρονικές περιόδους με μέγιστη τον ένα χρόνο. Η αντίσταση στα θειϊκά άλατα υπολογίστηκε βάσει της αλλαγής της μάζας, του μήκους καθώς και της αντοχής στη θλίψη μετά την έκθεση. Τα δείγματα ήταν κυλινδρικών διαστάσεων 100x200 mm για την παρατήρηση στην αλλαγή της μάζας και της θλιπτικής αντοχής και πρίσματα διαστάσεων 75x75x285 mm για την παρατήρηση της αλλαγής του μήκους. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα δείγματα παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή στη διεπαφή τους με θειϊκά διαλύματα. Το οπτικό αποτέλεσμα των δειγμάτων που ήταν βυθισμένα στο διάλυμα θειϊκού νατρίου για ένα χρόνο δεν παρουσίαζε καμία αλλοίωση σε σχέση με την αρχική τους κατάσταση. Δεν υπήρχε κανένα δείγμα επιφανειακής διάβρωσης, ραγίσματος ή σπασίματος. Τα δείγματα που βυθίστηκαν σε νερό βρύσης δεν παρουσίασαν επίσης καμία οπτική αλλαγή. Τα αποτελέσματα των δοκιμών επίσης έδειξαν ότι δεν υπήρξε κάποια σημαντική αλλαγή στη μάζα και στη θλιπτική αντοχή των δειγμάτων μετά από διάφορες περιόδους έκθεσης με μέγιστη τον ένα χρόνο. Η διαφορά στο μήκος ήταν πάρα πολύ μικρή της τάξης του 0.015%.

### 3.3.7 Αντοχή στο Θειϊκό οξύ

Ανάλογα πειράματα έγιναν επίσης για να μελετηθεί η αντίσταση του γεωπολυμερικού σκυροδέματος στο θειϊκό οξύ. Οι πειραματικές μετρήσεις έγιναν με συγκεντρώσεις θειϊκού οξέος 2%, 1% και 0.5%. Η αντοχή στο θειϊκό οξύ μελετήθηκε βάσει της απώλειας μάζας καθώς και της θλιπτικής αντοχής μετά την έκθεση των δειγμάτων στο οξύ σε διάφορες χρονικές περιόδους με μέγιστη τον ένα χρόνο. Τα δείγματα ήταν κυλινδρικού σχήματος διαστάσεως 100x200 mm προερχόμενα από το Μίγμα 1 (βλ. Πίνακας 3.5) και θερμάνθηκαν στους 60°C για 24 ώρες μετά τη χύτευση. Τα οπτικά αποτελέσματα του γεωπολυμερούς δείγματος μετά τη βύθισή του σε διαλύματα οξέων διαφορετικής συγκέντρωσης για διάφορες χρονικές περιόδους περιλάμβαναν ρωγμές στην επιφάνειες του δείγματος. Η μέγιστη απώλεια μάζας του δείγματος ήταν 3% μετά από ένα χρόνο έκθεσης στο οξύ και είναι πολύ μικρή εάν συγκριθεί με αυτή του τσιμέντου Portland [31]. Όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 3.8, η αντοχή στη θλιπτική δύναμη μειώθηκε με την έκθεση του γεωπολυμερικού σκυροδέματος στο θειϊκό οξύ. Το μέγεθος της μείωσης της θλιπτικής αντοχής εξαρτάται από την περιεκτικότητα του οξέος. Μετά την εξέταση της θλιπτικής αντοχής του δείγματος που βυθίστηκε σε οξύ περιεκτικότητας 2% για ένα χρόνο, οι ρωγμές που δημιουργήθηκαν ήταν στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος και συγκεκριμένα σε βάθος 20mm από τον εξωτερικό φλοιό του δείγματος (συνολικής διαμέτρου 100mm).



Σχήμα 3.8. Γραφική αναπαράσταση της αντοχής του γεωπολυμερικού σκυροδέματος στα οξέα [31]

### **3.3.8 Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες**

Το κοινό τσιμέντο Portland παρέχει ικανοποιητική πυραντοχή για τις περισσότερες εφαρμογές. Ωστόσο, η αντοχή του σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες μειώνεται λόγω φυσικών και χημικών αλλαγών στη σύστασή του. Το σκυρόδεμα από τσιμέντο Portland σε υψηλές θερμοκρασίες αρχίζει να «σπάει» και σταδιακά να αφαιρούνται οι εξωτερικές στρώσεις του, έχοντας ως τελικό αποτέλεσμα την έκθεση των κύριων εσωτερικών ενισχύσεων του σκυροδέματος στη φωτιά. Σε αντίθεση με αυτό, το γεωπολυμερές σκυρόδεμα λόγω της κεραμικής του φύσης παρουσιάζει εξαιρετική πυραντοχή [32]. Το γεωπολυμερές σκυρόδεμα αυξάνει την αντοχή του μετά από έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες σε αντίθεση με το σκυρόδεμα από τσιμέντο Portland που χάνει το μεγαλύτερο μέρος του σε θερμοκρασία 800°C [33, 34]. Κατά τη μελέτη των επιδόσεων των δύο δειγμάτων (γεωπολυμερικού σκυροδέματος καθώς και Portland) θερμάνθηκαν στους 650°C ξεκινώντας από θερμοκρασία περιβάλλοντος σε χρονικό διάστημα 60 δευτερολέπτων και η θερμοκρασία αυτή διατηρήθηκε για 10 λεπτά χωρίς περαιτέρω προσαύξηση. Παρατηρήθηκε ότι το γεωπολυμερές προερχόμενο από ιπτάμενη τέφρα δεν είχε καμία φθορά μετά την έκθεση του στη φωτιά, σε αντίθεση με το σκυρόδεμα από τσιμέντο Portland. Περαιτέρω έρευνες διεξήχθησαν για τη μελέτη της απώλειας μάζας και τις αλλαγές στην αντοχή καθώς και στη μικροδομή του γεωπολυμερούς σε αυξανόμενες θερμοκρασίες [35]. Οι αρχικές θλιπτικές αντοχές του γεωπολυμερούς καθώς και του τσιμέντου Portland ήταν 25 και 26 MPa αντίστοιχα. Η απώλεια μάζας του σκυροδέματος από τσιμέντο Portland σε σχέση με το γεωπολυμερές ήταν πολύ πιο σημαντική. Ιδιαίτερα στους 800°C η απώλεια μάζας του Portland ήταν δύο φορές μεγαλύτερη σε σχέση με του γεωπολυμερούς. Εν τέλει μετά από έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες το γεωπολυμερές σκυρόδεμα διατήρησε το 80% της αρχικής θλιπτικής αντοχής του, ενώ το σκυρόδεμα από Portland το 50% [36].

### **3.4 Επίλογος**

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν πληροφορίες σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες του γεωπολυμερικού σκυροδέματος συγκριτικά με τον βασικό του ανταγωνιστή, το σκυρόδεμα προερχόμενο από τσιμέντο Portland. Το γεωπολυμερές σκυρόδεμα παρουσιάζει εξαιρετικές ιδιότητες που μπορούν να απορροφηθούν από διάφορες εφαρμογές όπως ο κατασκευαστικός

τομέας. Η ανάγκη για αντικατάσταση του παραδοσιακού τσιμέντου από ένα υλικό το οποίο, όπως είδαμε και παραπάνω, μπορεί να ανταποκριθεί εξαιρετικά στις κατασκευές αλλά και να μειώσει τις τεράστιες ποσότητες ρύπων είναι άμεση. Ακόμα και σήμερα η χρήση των γεωπολυμερών στον κατασκευαστικό τομέα είναι πολύ περιορισμένη. Στο επόμενο Κεφάλαιο θα μελετηθούν διάφορες περιπτώσεις αντικατάστασης του τσιμέντου από γεωπολυμερή.

## 4. Μελέτες περίπτωσης

### 4.1 Brisbane West Wellcamp Airport

#### 4.1.1 Εισαγωγή

Το αεροδρόμιο του Brisbane West Wellcamp (BWWA) είναι το πρώτο «πράσινο» δημόσιο αεροδρόμιο. Το αεροδρόμιο του Brisbane έγινε πλήρως λειτουργικό με τις πτήσεις να ξεκινούν το Νοέμβριο του 2014. Το έργο αυτό αποτέλεσε ορόσημο στον τομέα της μηχανικής κατακτώντας τον τίτλο του μεγαλύτερου έργου παγκοσμίως κατασκευασμένο από γεωπολυμερές σκυρόδεμα [37].

Για την κατασκευή του αεροδρομίου η εταιρία Wagners από την Αυστραλία που ανέλαβε το έργο, κατασκεύασε γεωπολυμερές σκυρόδεμα γνωστό ως οικολογικό σκυρόδεμα EFC (Eco Friendly Concrete) για την κατασκευή δαπέδων πάχους 435 mm. Το σκυρόδεμα προοριζόταν για συγκεκριμένα σημεία του αεροδρομίου όπως είναι ο κόμβος όπου στρίβουν τα αεροσκάφη, το Βόρειο τμήμα του αεροδιαδρόμου, το Δυτικό τμήμα του διαδρόμου τροχοδρόμησης καθώς και τα υπόστεγα που κατασκευάστηκαν στο Ανατολικό τμήμα του αεροδιαδρόμου.

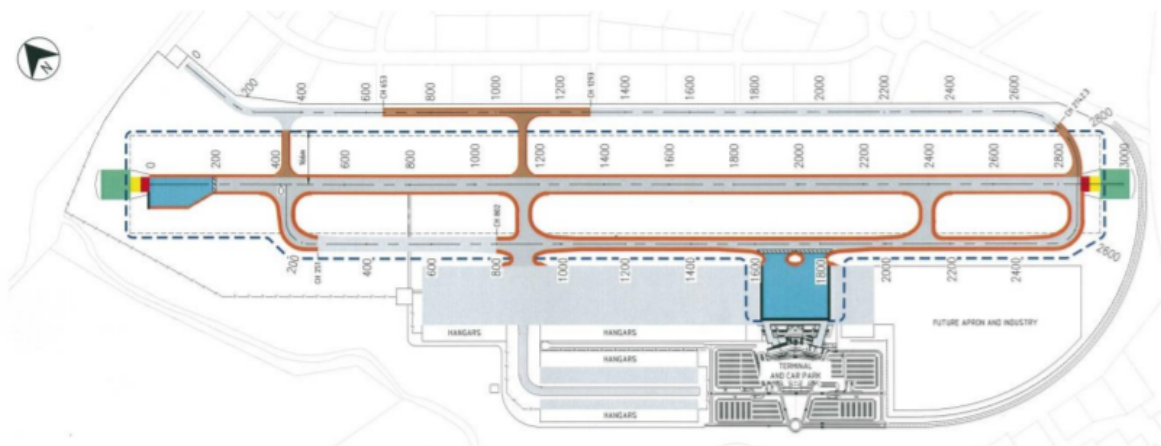


**Εικόνα 4.1. Ο καθηγητής J. Davidovits κατά την επίσκεψη του στο αεροδρόμιο του Brisbane [20]**

Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζεται ο καθηγητής J. Davidovits κατά την επίσκεψη του στο αεροδρόμιο του Brisbane.

Κατά την περίοδο προετοιμασίας του έργου έγιναν διάφορες δοκιμές των προϊόντων, καθώς και της κατασκευής, για να επιβεβαιωθεί ότι το γεωπολυμερές σκυρόδεμα πληροί τις προϋποθέσεις του συμβολαίου κατασκευής και ότι τοποθετήθηκε με την προβλεπόμενη μέθοδο χρησιμοποιώντας τη μηχανή οδοστρωσίας. Κατά την περίοδο κατασκευής του αεροδρομίου ανέκυψαν ζητήματα τα οποία αποτέλεσαν πρόκληση για τους μηχανικούς και ξεπεράστηκαν μέσω κάποιων καινοτόμων λύσεων.

Στην **Εικόνα 4.2** παρουσιάζεται ένα συνολικό σχέδιο και μία αεροφωτογραφία των ολοκληρωμένων διαδρόμων του αεροδρομίου. Ο κόμβος όπου στρίβουν τα αεροπλάνα είναι στο Βόρειο τμήμα προς το τέλος του αεροδιαδρόμου.



**Εικόνα 4.2. Κάτοψη του αεροδρομίου BWWA [38]**

Παρότι δεν είναι ευκρινές στην προαναφερθείσα εικόνα, το δάπεδο των ιδιωτικών υποστέγων βρίσκεται εκτός των ορίων του αεροδρομίου στην ανατολική πλευρά του αεροδιαδρόμου όπως φαίνεται στην αεροφωτογραφία της **Εικόνα 4.3**.



**Εικόνα 4.3. Αεροφωτογραφία του αεροδρομίου BWWA [39]**

#### ***4.1.2 Μείγμα γεωπολυμερούς για την κατασκευή δαπέδου***

Το γεωπολυμερές σκυρόδεμα μπορεί να παραχθεί ακολουθώντας έναν παρόμοιο τρόπο με αυτόν που παρασκευάζεται το συμβατικό τσιμέντο. Σε διάστημα έξι μηνών η κατασκευαστική εταιρία κατάφερε να καταλήξει σε ένα μείγμα γεωπολυμερικού σκυροδέματος που ακολουθούσε τις απαιτήσεις του έργου, μέσω εργαστηριακών δοκιμών. Το δάπεδο των ιδιωτικών υποστέγων κατασκευάστηκε την περίοδο μεταξύ Μαΐου και Ιουλίου του 2014 και χρησιμοποιήθηκε σε δοκιμαστική περιοχή ώστε να επιβεβαιωθούν τα χαρακτηριστικά του γεωπολυμερούς καθώς και ο τρόπος τοποθέτησής του. Κατά τη δοκιμαστική περίοδο στο προαναφερθέν τμήμα χρησιμοποιήθηκαν 10 ξεχωριστά τμήματα δαπέδου, διαστάσεων 5(πλάτος)x50(μήκος) m [38, 39]. Μετά το πέρας της δοκιμαστικής περιόδου το μείγμα του γεωπολυμερικού σκυροδέματος εγκρίθηκε. Τα χαρακτηριστικά που έπρεπε να πληροί το σκυρόδεμα ήταν τα εξής [39]:

- 4.8 MPa αντίσταση στην κάμψη μετά την ολοκλήρωση της 28<sup>ης</sup> μέρας.
- 450 micro-strain μέγιστης συστολής κατά την ξήρανση στις 28 μέρες.

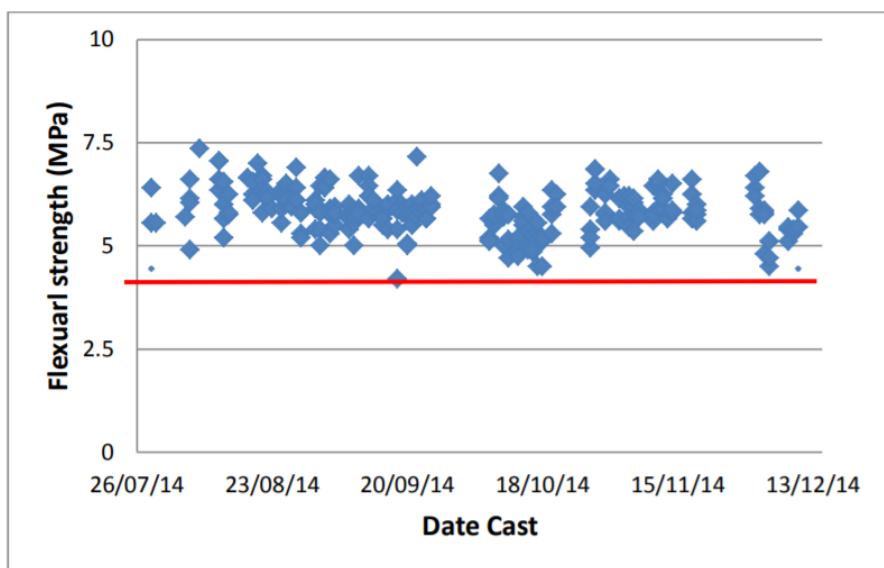


Η κατασκευή του κόμβου στροφής των αεροσκαφών έγινε κατά την περίοδο Αυγούστου-Σεπτεμβρίου του 2014 και το δάπεδο των υποστέγων μεταξύ Οκτωβρίου και Νοεμβρίου του 2014. Το αεροδρόμιο δόθηκε προς χρήση στις 17 Νοεμβρίου του 2014 [38].

#### 4.1.3 Ιδιότητες γεωπολυμερούς δαπέδου

Δοκιμές για την αντοχή στον εφελκυσμό έγιναν βάσει των Αυστραλιανών προτύπων AS 1012.11. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από 502 δείγματα αναφορικά με τον κόμβο στροφής των αεροσκαφών, καθώς και των δαπέδων των υποστέγων, έδειξαν 5.8 MPa κατά μέσο όρο και με τυπική απόκλιση της τάξης των 0.5 MPa. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1 και είναι σύμφωνα με τις απαιτήσεις του έργου. Από τα αποτελέσματα μόνο μία τιμή παρουσίασε απόκλιση από το 4.45 MPa που ήταν και το όριο [38].

Επίσης, το γεωπολυμερές σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται από χαμηλή συρρίκνωση κατά την ξήρανση όπως αναφέραμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στο συγκεκριμένο έργο η συρρίκνωση του σκυροδέματος ήταν στο ένα τρίτο του ορίου την 21<sup>η</sup> μέρα [37].



Σχήμα 4.1. Αποτελέσματα της αντοχής σε εφελκυσμό του γεωπολυμερικού σκυροδέματος [38]

#### 4.1.4 Παρασκευή και προμήθεια γεωπολυμερικού σκυροδέματος

Η παρασκευή του σκυροδέματος γινόταν στον ίδιο χώρο με το έργο, από μία κινητή μονάδα αποτελούμενη από δύο ίδια σιλό, όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 4.4**. Ο τυπικός εξοπλισμός παραγωγής σκυροδέματος υπέστη μία μικρή μορφοποίηση προκειμένου να προστεθούν οι χημικοί ενεργοποιητές στο μείγμα.



**Εικόνα 4.4. Φωτογραφική απεικόνιση της διάταξης παρασκευής σκυροδέματος [39]**

Ο ρυθμός ροής του εξοπλισμού αυτού έπρεπε να είναι  $120\text{m}^3/\text{hr}$  προκειμένου να παρέχει συνεχή τροφοδοσία στην μηχανή οδοστρωσίας, όπως απεικονίζεται στην **Εικόνα 4.5**.



**Εικόνα 4.5. Μεταφορά του σκυροδέματος στη μηχανή οδοστρωσίας [38]**

#### 4.1.5 Περαιτέρω χρήση του γεωπολυμερικού σκυροδέματος

Η χρήση του γεωπολυμερικού σκυροδέματος για το δάπεδο του αεροδρομίου (BWWA) θεωρείται η μεγαλύτερη εφαρμογή του σε παγκόσμιο επίπεδο, με 25,000 m<sup>3</sup> να καλύφθηκαν με γεωπολυμερές σκυρόδεμα σε διάστημα 3.5 μηνών.

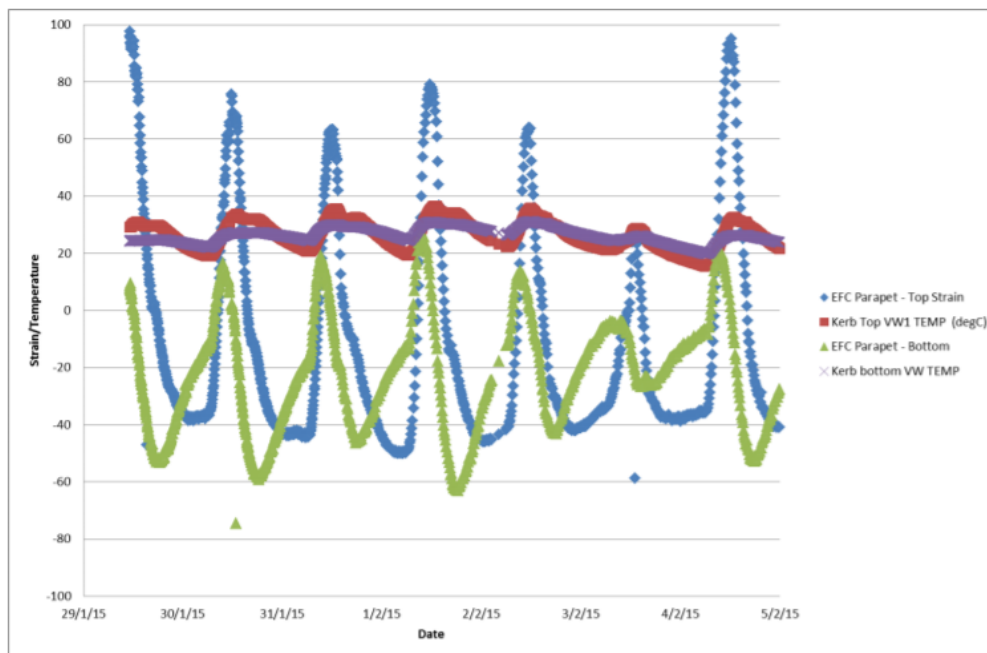
Εκτός από τη χρήση του γεωπολυμερούς για την κάλυψη των αναγκών των δαπέδων, χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον 15,000 m<sup>3</sup> σε επιπρόσθετες εργασίες που αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω:

- Χρήση γεωπολυμερικού σκυροδέματος στην γέφυρα που βρίσκεται στην είσοδο του αεροδρομίου, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2
- Διαχωριστικά δρόμου (μπαριέρες)
- Κατασκευή υπόγειων αγωγών (οχετών)
- Δεξαμενές αποχέτευσης
- Οδόστρωμα για διάφορα έργα οδοποιίας



**Εικόνα 4.6. Διάφορα τμήματα του αεροδρομίου που χρησιμοποιήθηκε γεωπολυμερές σκυρόδεμα [39]**

Στην **Εικόνα 4.6** παρουσιάζεται η γέφυρα εισόδου του αεροδρομίου. Η συμπεριφορά της γέφυρας στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2. Καταγραφή της θερμοκρασίας και της επιμήκυνσης της γέφυρας [38]

#### 4.1.6 Συμπεράσματα

Ενώ, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2, το αλκαλικά ενεργοποιημένο σκυρόδεμα είχε ανακαλυφθεί το 1930, θεωρείται ακόμα μία καινοτόμα τεχνολογία. Η επιτυχής κατασκευή του αεροδρομίου Brisbane West Wellcamp, καθώς και η ταχύτητα ολοκλήρωσής του, είναι ένα εξαιρετικό παράδειγμα για το ότι το γεωπολυμερές σκυρόδεμα μπορεί να αποτελέσει μία βιώσιμη λύση για την αντικατάσταση του σκυροδέματος από τσιμέντο Portland. Μπορεί, επομένως, να αποτελέσει έναυσμα για την έναρξη της εμπορικής του χρήσης, ως αντάξιο υποκατάστατο του σκυροδέματος από τσιμέντο Portland, τηρώντας τα ίδια χαρακτηριστικά ποιότητας με αυτό και, σε πολλές περιπτώσεις, ανώτερα. Βέβαια, υπάρχουν διάφορες προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν, όπως είναι οι παρακάτω:

- Μη ύπαρξη διεθνών προτύπων για την κατασκευή ή το σχεδιασμό
- Υψηλότερο κόστος λόγω της μικρής κλίμακας που χρησιμοποιείται
- Διαθεσιμότητα από τους προμηθευτές.
- Λόγω του ότι είναι νέα τεχνολογία υπάρχει έλλειψη παλαιότερων κτιρίων ώστε να επιβεβαιωθεί η αντοχή τους στο χρόνο.

Βέβαια με κάποιες τροποποιήσεις στην διαδικασία της κατασκευής του αεροδρομίου κατάφεραν να ξεπεραστούν τα παραπάνω εμπόδια. Η επιτυχία της χρήσης γεωπολυμερικού σκυροδέματος σε μεγάλη κλίμακα πρέπει να αποτελέσει έναυσμα μιάς πραγματικά καινοτόμου και «πράσινης» τεχνολογίας.

## **4.2 Global Change Institute**

Το GCI (βλ. Εικόνα 4.7) είναι Πανεπιστήμιο στο Queensland της Αυστραλίας που ερευνά παγκόσμια θέματα που αφορούν το οικοσύστημα, την αύξηση του πληθυσμού και την κλιματική αλλαγή. Ο σχεδιασμός του κτιρίου που θα στεγαζόταν το Πανεπιστήμιο έγινε από τους αρχιτέκτονες Hassel και Arup το 2009. Το κτίριο έπρεπε να αποτελεί υπόδειγμα έργου όσον αφορά την πράσινη τεχνολογία. Η χρήση του γεωπολυμερικού σκυροδέματος ήταν μία από τις πιθανές λύσεις έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί ως αντικαταστάτης του κλασικού σκυροδέματος από τσιμέντο Portland, το οποίο όπως αναφέραμε και στα προηγούμενα Κεφάλαια έχει πολύ μεγάλο περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Για την κατασκευή του κτιρίου του GCI η εταιρία Wagners έδειξε μεγάλο ενδιαφέρον μιας και θα αποτελούσε ένα σημαντικό έργο στον τομέα των πράσινων κτιρίων [40].



**Εικόνα 4.7. Φωτογραφία του GCI [40]**

Όλες οι εργαστηριακές δοκιμές έγιναν από την ανάδοχο εταιρία (Wagners). Τα αποτελέσματα των δοκιμών αξιολογήθηκαν ανεξάρτητα, από τον Δρ James Aldred, ο οποίος επιβεβαίωσε ότι πληρούν τις απαραίτητες προϋποθέσεις του έργου. Ο Δρ Aldred δημοσίευσε ένα άρθρο όπου παρουσίαζε τις δοκιμές που έγιναν στο γεωπολυμερές σκυρόδεμα. Οι δοκιμές ήταν οι εξής [41]:

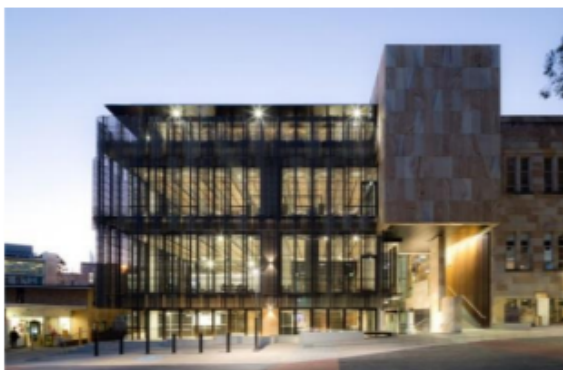
- Μέτρηση της πυκνότητας κατά την θλίψη.
- Μέτρηση αντοχής σε κάμψη.
- Μέτρηση εφελκυστικής αντοχής.
- Μέτρο ελαστικότητας
- Καμπύλη τάσης.
- Λόγος Poisson.
- Μέτρηση συτολής κατά την ξήρανση.
- Καταγραφή παραμόρφωσης.
- Περιεκτικότητα σε χλωριούχα

- Περιεκτικότητα σε θειικά
- Αλκαλική αντίδραση
- Δοκιμές πυραντοχής

Τα αποτελέσματα των δοκιμών αποκάλυψαν ένα μεγάλο φάσμα πλεονεκτημάτων του γεωπολυμερούς που καταγράφονται παρακάτω [40]:

- Το ήμισυ της συνηθισμένης συρρίκνωσης κατά την ξήρανση στις 56 ημέρες (της τάξης των 320 micro strain).
- 30% υψηλότερη δύναμη εφελκυσμού σε σχέση με το συνηθισμένο σκυρόδεμα.
- Εξαιρετικά χαμηλή θερμότητα αντίδρασης.

Για την κατασκευή του χρησιμοποιήθηκαν 330 m<sup>3</sup> γεωπολυμερικού σκυροδέματος ώστε να κατασκευασθούν 33 δοκοί δαπέδου που θα τοποθετούνταν σε 3 ορόφους του Πανεπιστημίου. Κάθε τμήμα είχε διαστάσεις 10.5 x 2.4 m όπως παριστάνεται στην Εικόνα 4.8 [42].



**Εικόνα 4.8. Τοποθέτηση δοκών δαπέδου στο κτίριο GIC [42]**

Το γεωπολυμερές σκυρόδεμα πέρα από μία αναδυόμενη τεχνολογία αποτελεί πια μία πρώτη ύλη που μπορεί να προμηθευτεί και να χρησιμοποιηθεί σε διάφορα δομικά έργα.

## 5. Συμπεράσματα

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα και τις αναλύσεις των μελετών περίπτωσης, καταλήγουμε ότι τα γεωπολυμερή πληρούν όλες τις απαραίτητες προϋποθέσεις για την ενσωμάτωση τους ως δομικό υλικό στην κατασκευαστική βιομηχανία. Οι εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες που παρουσιάζουν, η χημική αντοχή και η αντοχή σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες τα καθιστούν ως έναν από τους μεγαλύτερους ανταγωνιστές των κοινών δομικών υλικών. Συνοπτικά παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα που καταγράφηκαν στα παραπάνω κεφάλαια.

- Υψηλή αντοχή εφελκυσμού.
- Μειωμένη συρρίκνωση κατά την ξήρανση.
- Μειωμένες εκπομπές CO<sub>2</sub>.
- Αντοχή σε χημικές επιθέσεις.
- Μεγάλη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες.

Η τεχνολογία των γεωπολυμερών ως πρώτη ύλη για την παραγωγή δομικών υλικών είναι πλέον μία ρεαλιστική λύση που τα τελευταία χρόνια εισάγεται διεθνώς στον κατασκευαστικό κλάδο. Η επιτυχής ολοκλήρωση των έργων είναι ένα ζωντανό παράδειγμα για την προώθηση και τη χρήση της τεχνολογίας.

Η μεγαλύτερη πρόκληση για την προώθηση των γεωπολυμερών είναι η έλλειψη διεθνών προτύπων κατασκευής. Το βασικό στοιχείο για την προώθηση της χρήσης του υλικού αυτού είναι η ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού αντικτύπου κατά την παρασκευή του και η χρήση παραπροϊόντων ως πρώτη ύλη.



## Βιβλιογραφία

1. Provis, J., & van Deventer, J. (2009). Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications. In J. Provis & J. van Deventer, *Introduction to geopolymers* (1st ed., pp. 1-14). Cambridge: Woodhead Publishing.
2. De Weerd, K. (2011). *Geopolymers – State of the art. COIN Project report no 37*. Blindern: SINTEF Building and Infrastructure.
3. Davidovits, J. (2017). Geopolymers: Ceramic-like inorganic polymers. *Journal of Ceramic Science and Technology*, 8(3), 335-350.
4. Βλάχου, Α. (2015). *Δυνατότητα γεωπολυμερισμού αποβλήτων από εκσκαφές, κατασκευές και κατεδαφίσεις* (Μεταπτυχιακή Διατριβή). Πολυτεχνείο Κρήτης.
5. Τσιτούρας, Α. (2013). Αξιοποίηση ελληνικών καολινών στην τεχνολογία των γεωπολυμερών. (Διδακτορική Διατριβή). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
6. Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. and Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: A review Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Construction and Building Materials*, 22(7), pp.1305-1314.
7. Davidovits, J. (1991). Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 37(8), 1633-1656.
8. Lukey, G. C. (2006). *A Conceptual Model of Geopolymerisation* (PhD thesis). The University of Melbourne.
9. Τσαούση, Γ. Μ. (2018). *Ανάπτυξη αφρωδών θερμομονωτικών ανόργανων πολυμερών υλικών από βιομηχανικά ορυκτά* (Διδακτορική Διατριβή). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
10. Mucsi, G., & Ambrus, M. (2017). Raw Materials for Geopolymerisation. *The Publications Of The Multiscience - XXXI. Microcad International Scientific Conference*.
11. Khale, D., & Chaudhary, R. (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *Journal Of Materials Science*, 42(3), 729-746.

12. Ζαχαράκη, Δ. (2019). *Συμβολή στη διερεύνηση των μηχανισμών γεωπολυμερισμού μεταλλουργικών αποβλήτων με έμφαση στις σκωρίες ηλεκτροκαμίνων* (Διδακτορική Διατριβή). Πολυτεχνείο Κρήτης.
13. Petermann, J. C., Saeed, A., & Hammons, M. I. (2010). *Alkali-activated geopolymers: A literature review*. APPLIED RESEARCH ASSOCIATES INC PANAMA CITY FL.
14. Phair, J. W. (2001). *Compositional effects and microstructure of fly ash-based geopolymers* (PhD thesis). The University of Melbourne.
15. Panyas, D., Giannopoulou, I., & Perraki, T. (2007). Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers. *Colloids And Surfaces A: Physicochemical And Engineering Aspects*, 301(1-3), 246-254.
16. Ασπρογέρακας, Α. Π. (2013). *Συγκριτική αξιολόγηση ανθεκτικότητας γεωπολυμερών από ιπτάμενη τέφρα και τσιμεντοκονιαμάτων* (Διδακτορική Διατριβή). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
17. Duxson, P., Provis, J., Lukey, G., Mallicoat, S., Kriven, W., & van Deventer, J. (2005). Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. *Colloids And Surfaces A: Physicochemical And Engineering Aspects*, 269(1-3), 47-58.
18. Duxson, P. (2006). *The structure and thermal evolution of metakaolin geopolymers* (PhD thesis). The University of Melbourne.
19. Isufaj, L. (2018). *Αξιοποίηση αργιλοπυριτικών υλικών κατεδάφισης στην τεχνολογία δομικών υλικών* (Διπλωματική Εργασία). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
20. <https://www.geopolymer.org/>
21. Kumar, S., Kumar, R., Bandopadhyay, A., & Mehrotra, S. (2007). Novel geopolymeric building materials through synergistic utilisation of industrial waste. In *International conference alkali activated materials: research, production and utilization* (pp. 429-446). Prague.
22. Komnitsas, K. (2011). Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities. *Procedia Engineering*, 21, 1023-1032.

23. Andrew, R. M. (2018). Global CO<sub>2</sub> emissions from cement production. *Earth System Science Data*, 10(1), 195.
24. Habert, G., & Ouellet-Plamondon, C. (2016). Recent update on the environmental impact of geopolymers. *RILEM technical Letters*, 1, 17-23.
25. ΕΛΟΤ EN 197-1 (2000). *Τσιμέντο: Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για τα κοινά τσιμέντα*. Αθήνα.
26. Τσίμας, Σ., & Τσιβιλής, Σ. (2004). *Επιστήμη και Τεχνολογία Τσιμέντου*. Αθήνα: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
27. Collins, M. P., Mitchell, D. & MacGregor, J. G. (1993). Structural design considerations for high strength concrete. *ACI Concrete International*, 15(5), 27–34.
28. Hardjito, D. & Rangan, B. V. (2005). *Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-based Geopolymer Concrete*. Perth: Curtin University of Technology.
29. Davidovits, J. (2008). *Geopolymer Chemistry and Applications* (2nd ed.). Saint-Quentin: Institut Géopolymère.
30. Wallah, S. E., & Rangan, B. V. (2006). *Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Long-Term Properties*. Perth: Curtin University of Technology.
31. Gourley, J. T. & Johnson, G. B. (2005). *Developments in Geopolymer Precast Concrete*. In International Workshop on Geopolymers and Geopolymer Concrete. Perth.
32. Kong, D. L., & Sanjayan, J. G. (2010). Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. *Cement and concrete research*, 40(2), 334-339.
33. Crozier, D. A., & Sanjayan, J. G. (1999). Chemical and physical degradation of concrete at elevated temperatures. *Concrete in Australia*, 18-20.
34. Guerrieri, M., & Sanjayan, J. G. (2010). Behavior of combined fly ash/slag- based geopolymers when exposed to high temperatures. *Fire and Materials: An International Journal*, 34(4), 163-175.
35. Rivera, O. G., Long, W. R., Weiss Jr, C. A., Moser, R. D., Williams, B. A., Torres-Cancel, K., & Allison, P. G. (2016). Effect of elevated temperature on alkali-activated

- geopolymeric binders compared to portland cement-based binders. *Cement and Concrete Research*, 90, 43-51.
36. Cao, Y. F. (2017). *Fire-Resistant Geopolymer Concrete and its Application in Concrete Filled Steel Tubes* (PhD Dissertation) .Western Sydney University.
  37. Aldred, J., & Day, J. (2012). Is geopolymer concrete a suitable alternative to traditional concrete. In *37th Conference on our world in concrete & structures* (pp. 29-31). Singapore.
  38. Aldred, J., Day, J., & Glasby, T. (2015). Geopolymer concrete-no longer labcrete!. In *40th Conference on Our World in Concrete & Structures*. Singapore.
  39. Glasby, T., Day, J., Genrich, R., & Aldred, J. (2015). EFC geopolymer concrete aircraft pavements at Brisbane West Wellcamp Airport. In *Concrete 2015 Conference*. Melbourne.
  40. Bligh, R., & Glasby, T. (2013). Development of geopolymer precast floor panels for the Global Change Institute at University of Queensland. In *Concrete 2013 Conference*. North Sydney: Concrete Institute of Australia.
  41. Aldred, J. (2013). Engineering Properties of a Proprietary Premixed Geopolymer Concrete. In *Concrete 2013 Conference*. North Sydney: Concrete Institute of Australia.
  42. Glasby, T., Day, J., Genrich, R., & Kemp, M. (2015). Commercial scale geopolymer concrete construction. In *The Saudi International Building and Constructions Technology Conference 2015*. Riyadh.
  43. Huseien, G. F., Mirza, J., Ismail, M., Ghoshal, S. K., & Hussein, A. A. (2017). Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 54-74.

