



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.):
"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑΣ ΧΡΗΣΗΣ
ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΩΣ ΕΠΙΣΚΕΥΑΣΤΙΚΩΝ
ΥΛΙΚΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΟΦΙΑΣ Κ. ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΥ

Διπλωματούχου Γεωλόγου Ε.Κ.Π.Α.

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:
Σ. ΤΣΙΒΙΛΗΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.):
"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑΣ ΧΡΗΣΗΣ
ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΩΣ ΕΠΙΣΚΕΥΑΣΤΙΚΩΝ
ΥΛΙΚΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΟΦΙΑΣ Κ. ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΥ

Διπλωματούχου Γεωλόγου Ε.Κ.Π.Α.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Σ. ΤΣΙΒΙΛΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Σ. ΤΣΙΜΑΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ε. ΜΠΑΔΟΓΙΑΝΝΗΣ, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2012

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας του τομέα Χημικών Επιστημών (I) της σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του καθηγητή Σωτήρη Τσιβιλή.

Αντικείμενο της μεταπτυχιακής εργασίας είναι η «Διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης γεωπολυμερών ως επισκευαστικών υλικών δομικών στοιχείων». Αναλυτικότερα μελετήθηκαν:

- Η συμπεριφορά των επισκευαστικών υλικών και των επισκευασμένων δοκιμίων σκυροδέματος σε μετρήσεις/δοκιμές ανθεκτικότητας
- Οι παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα των γεωπολυμερών στην επισκευή του σκυροδέματος
- Η συγκριτική συμπεριφορά (σε επισκευές σκυροδέματος) γεωπολυμερών και τσιμεντοειδών.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους με τη βοήθειά τους συνέβαλλαν στην ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Ιδιαίτερα θέλω να ευχαριστήσω:

- Τον καθηγητή της σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κ. Τσιβιλή Σωτήρη, επιβλέποντα καθηγητή, ο οποίος μου εμπιστεύτηκε την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, για την άριστη συνεργασία, την πολύτιμη και συνεχή καθοδήγησή του καθώς και το ενδιαφέρον και την βοήθειά του σε όλα τα στάδια της εργασίας αυτής.
- Τον κ. Μπαδογιάννη Ε., Λέκτορα Ε.Μ.Π. για τη συμβολή του στην εκτέλεση και αξιολόγηση της δοκιμής συνάφειας που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.
- Τον κύριο Σ. Τσίμα, Καθηγητή Ε.Μ.Π. για την τιμή που μου έκανε να συμμετέχει στην εξεταστική επιτροπή.
- Την κ. Σαράφογλου Χαρά για τη βοήθεια που μου πρόσφερε όσον αφορά στην εκτέλεση και αξιολόγηση της στερεοσκοπικής μελέτης που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της σχολής Ναυπηγών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.
- Τους υποψήφιους διδάκτορες Αλέξανδρο Τσιτούρα, Δημήτρη Κιούπη και Άρη Ασπρογέρακα, καθώς και τους διδάκτορες Κώστα Σωτηριάδη και Χρυσάνθη Παναγιωτοπούλου, για τη σημαντική βοήθεια τους και τις χρήσιμες συμβουλές τους κατά την διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα

τον Αλέξανδρο και τον Άρη για την βοήθεια που μου προσέφεραν στο πειραματικό μέρος της εργασίας, όσον αφορά στη σύνθεση των υλικών και στις αναλυτικές τεχνικές που ακολούθησαν.

- Τους φίλους μου Άκη και Σωτηρία για την συμπαράσταση και την θετική τους ενέργεια που υπήρξαν καθοριστικά για την περάτωση της παρούσας εργασίας.

Θα ήθελα, τέλος, να ευχαριστήσω ολόψυχα την οικογένειά μου, για την συνεχή ενθάρρυνση και υποστήριξή τους τόσο κατά τη διάρκεια των σπουδών μου όσο και σε κάθε βήμα της ζωής μου.

Αντωνοπούλου Σοφία
Αθήνα, 22 Ιουνίου 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η σύνθεση, ο χαρακτηρισμός και η συγκριτική συμπεριφορά επισκευαστικών υλικών δομικών στοιχείων. Ακόμα, αποτιμάται η αποτελεσματικότητα της επισκευής δοκιμίων σκυροδέματος και οι παράγοντες που την επηρεάζουν. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν συνθέσεις γεωπολυμερικών και τσιμεντοειδών επισκευαστικών υλικών και επισκευή δοκιμίων σκυροδέματος. Για τη σύνθεση των γεωπολυμερικών υλικών (πάστες και κονιάματα) χρησιμοποιήθηκαν μετακαολίνης και ιπτάμενη τέφρα ως αργιλοπυριτικές πρώτες ύλες και ασβεστολιθική άμμος ως αδρανές. Για τη σύνθεση των τσιμεντοειδών επισκευαστικών υλικών χρησιμοποιήθηκαν τσιμέντο CEM I 42.5, ιπτάμενη τέφρα και μετακαολίνης. Ακολούθως, στα επισκευασμένα δοκίμια πραγματοποιούνται κατάλληλες μετρήσεις και δοκιμές για τον έλεγχο και την αποτίμηση της αποτελεσματικότητας των εφαρμοζόμενων υλικών στην επισκευή του σκυροδέματος (οπτική επιθεώρηση, υδατοαπορροφητικότητα, ξήρανση – εμβάπτιση, δοκιμές συνάφειας). Όπως προέκυψε, τα τσιμεντοκονιάματα έδειξαν καλύτερη συμπεριφορά ως επισκευαστικά υλικά σκυροδέματος συγκρινόμενα με τα γεωπολυμερή. Συγκεκριμένα, τα αμιγή τσιμεντοκονιάματα έδειξαν την βέλτιστη συμπεριφορά, ακολουθούμενα από τα κονιάματα με ιπτάμενη Τέφρα και με μετακαολίνη. Επίσης, οι γεωπολυμερικές πάστες εμφανίζουν καλύτερη συμπεριφορά από τα γεωπολυμερικά κονιάματα και οι συνθέσεις γεωπολυμερών με Μετακαολίνη υπερτερούν έναντι αυτών με Ιπτάμενη Τέφρα. Ακόμα, για τα επισκευαστικά υλικά που δεν έδειξαν ικανοποιητική συμπεριφορά, απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης της σύνθεσης και των ιδιοτήτων τους στην αποτελεσματικότητα της επισκευής. Τέλος, προτείνεται να διερευνηθεί μελλοντικά ο σχεδιασμός μιας τροποποιημένης δοκιμής ξηρού-υγρού αποκλειστικά για την αξιολόγηση των επισκευών, μιας και φάνηκε ιδιαίτερα αποτελεσματική στην συγκεκριμένη εργασία.

ABSTRACT

The aim of this thesis is the synthesis, the characterization and the comparative behavior of repair materials. More specifically, geopolymer and cementitious repair materials were applied to concrete repair. Geopolymer materials (pastes and mortars) were prepared using metakaolin, fly ash and calcareous sand. Cementitious repair materials were prepared using CEM I 42.5, fly ash and metakaolin. Appropriate measurements (visual inspection, water absorption, wet-dry test, cohesion test) were performed for the monitoring and evaluation of the effectiveness of repair materials in concrete. Cement mortars showed better performance as concrete repair materials compared to geopolymer pastes and mortars. Specifically, the pure cement mortar showed the best behavior, followed by mortars with fly ash and metakaolin. Geopolymer pastes exhibit better behavior than geopolymer mortars. Further investigation is needed concerning the effect of the composition of repair materials on the effectiveness of the repair. Finally, it is proposed to research the design of a modified wet-dry test, exclusive for repair cases.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**Κεφάλαιο 1**

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
-----------------------	---

Κεφάλαιο 2**ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

2.1. ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΗ.....	3
2.1.1 Ιστορικά στοιχεία.....	4
2.1.2 Δομή και χημεία γεωπολυμερών.....	5
2.1.3 Σύνθεση γεωπολυμερών και μηχανισμός γεωπολυμερισμού.....	9
2.1.4 Ιδιότητες και εφαρμογές γεωπολυμερών.....	11
2.1.5 Γεωπολυμερή από μετακαολίνη.....	13
2.1.6 Γεωπολυμερή από ιπτάμενη τέφρα.....	13
2.2. ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	
2.2.1 Τσιμέντο.....	15
2.2.1.1 Σύσταση τσιμέντου.....	15
2.2.1.2 Τύποι τσιμέντου.....	18
2.2.1.3 Μηχανικές, χημικές και φυσικές ιδιότητες τσιμέντου.....	19
2.2.2 Κονιάματα.....	20
2.2.2.1 Πρώτες ύλες κονιαμάτων.....	20
2.2.2.2 Τύποι κονιαμάτων.....	21
2.2.3 Σκυρόδεμα.....	21
2.2.3.1 Εργασιμότητα σκυροδέματος.....	22
2.2.3.2 Ανθεκτικότητα σκυροδέματος.....	23
2.2.4 Ανθεκτικότητα δομικών υλικών.....	24
2.3. ΕΠΙΣΚΕΥΗ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	26
2.3.1 Επίσκευστικά υλικά	27
2.3.2 Τύποι και Σχεδιασμός της επισκευής	29
2.3.3 Ανθεκτικότητα επισκευαστικών υλικών.....	31
2.3.4 Τα γεωπολυμερή ως επισκευαστικά υλικά δομικών στοιχείων.....	33

Κεφάλαιο 3

ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΘΕΜΑΤΟΣ	34
---------------------------------	----

Κεφάλαιο 4**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

4.1 ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΡΟΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗ.....	36
4.1.1 Χαρακτηρισμός υλικών – Σύνθεση σκυροδέματος.....	36
4.1.2 Προετοιμασία δοκιμών προς επισκευή.....	36
4.2 ΕΠΙΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	37
4.2.1 Σύνθεση γεωπολυμερών.....	40
4.2.2 Σύνθεση τσιμεντοκονιαμάτων.....	42
4.2.3 Εφαρμογή επισκευαστικών υλικών – Διαδικασία επισκευής.....	43
4.2.4 Χαρακτηρισμός και ιδιότητες επισκευαστικών υλικών.....	44
4.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ - ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	46
4.3.1 Οπτική επιθεώρηση.....	46
4.3.2 Υδατοαπορροφητικότητα.....	46
4.3.3 Ξήρανση - Εμβάπτιση.....	47
4.3.4 Δοκιμή συνάφειας.....	48

Κεφάλαιο 5**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ**

5.1 Χαρακτηρισμός και ιδιότητες υλικών.....	49
5.1.1 Περίθλαση ακτίνων Χ – XRD.....	49
5.1.2 Αντοχή σε θλίψη.....	52
5.2 Οπτική επιθεώρηση.....	53
5.2.1 Μακροσκοπική επιθεώρηση.....	53
5.2.2 Επιθεώρηση με στερεοσκόπιο.....	53
5.2.3 Αποτελέσματα.....	54
5.3 Υδατοαπορροφητικότητα.....	59
5.4 Ξήρανση - Εμβάπτιση.....	67
5.5 Δοκιμή συνάφειας.....	69

Κεφάλαιο 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	72
--------------------------	-----------

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	73
--------------------------	-----------

Βιογραφικό Σημείωμα.....	76
---------------------------------	-----------

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

1. Συνθέσεις επισκευαστικών υλικών	37
2. Χημική ανάλυση των πρώτων υλών	38
3. Σύσταση γεωπολυμερικών συνθέσεων	41
4. Συνθέσεις τσιμεντοκονιαμάτων	42
5. Αντοχές σε θλίψη για τις συνθέσεις των επισκευαστικών υλικών	52
6. Χαρακτηριστικά Μακροσκοπικές επιθεωρήσεις	53
7. Χαρακτηριστικά Επιθεωρήσεις με στερεοσκόπιο	53
8. Μακροσκοπική επιθεώρηση δοκιμίων σε διάφορες χρονικές περιόδους	55
9. Στερεοσκοπική επιθεώρηση δοκιμίων σε διάφορες χρονικές περιόδους	57
10. Μετρήσεις δοκιμής υδατοαπορροφητικότητας (ενδεικτικά για το δοκίμιο CFM)	59
11. Χαρακτηριστικά μετρήσεων υδατοαπορροφητικότητας	61
12. Απορρόφηση νερού (g) συναρτήσει του χρόνου για την μέτρηση Υ1 (αρχική μάζα δοκιμίου ~ 1500 g)	61
13. Μετρήσεις υδατοαπορροφητικότητας	62
14. Μετρήσεις δοκιμής Wet – Dry	67
15. Μετρήσεις συνάφειας	69
16. Δοκιμές συνάφειας επισκευασμένων δοκιμίων	70

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

1. Απεικόνιση τρισδιάστατων δομών μακρομορίων	6
2. Αντιδράσεις σχηματισμού poly(sialate) και poly(sialate-silixo)	6
3. Ηλεκτρονιακές κατανομές των στοιχείων Si, O, Al, Na και απεικόνιση των βασικών δομικών μονάδων με βάση τις 2 θεωρίες δεσμών	8
4. Διαγραμματική ανάλυση μεταπτυχιακής εργασίας	35
5. Διάγραμμα XRD ιπτάμενης τέφρας	39
6. Διάγραμμα XRD εμπορικού μετακαολίνη	39
7. Επισκευασμένο δοκίμιο σκυροδέματος	43
8. Πειραματική διάταξη μέτρησης υδατοαπορροφητικότητας	47
9. Διάταξη δοκιμών συνάφειας	48
10. Ακτινοδιάγραμμα XRD γεωπολυμερικής πάστας (GMP) και κονιάματος (GMM) μετακαολίνη	49
11. Ακτινοδιάγραμμα XRD γεωπολυμερικής πάστας (GFP) και κονιάματος (GFM) ιπτάμενης τέφρας	50
12. Ακτινοδιάγραμμα XRD τσιμεντοκονιάματος με CEM I (CPM), με CEM I και ιπτάμενης τέφρας (CFM), με CEM I και μετακαολίνη (CMM)	51
13. Συσχέτιση ρυθμού απορρόφησης νερού ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου απορρόφησης - Υπολογισμός υδατοαπορροφητικότητας (ενδεικτικά για το δοκίμιο CFM)	60
14. Σκαρίφημα επισκευασμένου δοκιμίου - A: Πλευρά χωρίς επισκευή, B: Επισκευασμένη πλευρά	60
15. Υδατοαπορροφητικότητα δοκιμίων σε σχέση με τον χρόνο από την επισκευή τους για την πλευρά B (επισκευασμένη πλευρά)	63
16. Υδατοαπορροφητικότητα των δοκιμίων άμεσα μετά την επισκευή τους για τις πλευρές A και B	64
17. Υδατοαπορροφητικότητα των δοκιμίων 6 μήνες μετά την επισκευή τους για τις πλευρές A και B	64
18. Υδατοαπορροφητικότητα δοκιμίων 6 μήνες μετά την επισκευή τους	66
19. Μάζες επισκευασμένων δοκιμίων σκυροδέματος πριν και μετά τη δοκιμή Wet – Dry	68

Κεφάλαιο 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη της αξιοποίησης των γεωπολυμερών ως επισκευαστικών υλικών σκυροδέματος. Το πεδίο εφαρμογής της μελέτης είναι τα δομικά έργα.

Τα γεωπολυμερή είναι ανόργανα αργιλοπυριτικά πολυμερή, τα οποία αποτελούν μια νέα κατηγορία δομικών υλικών με αξιόλογες ιδιότητες. Πρόκειται για υλικά τα οποία αναπτύχθηκαν κυρίως την τελευταία δεκαετία και των οποίων η σύνθεση αποσκοπεί σε τεχνολογικά, περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη. Ήδη χρησιμοποιούνται σε αρκετές εφαρμογές, όπως στην προστασία του περιβάλλοντος, κυρίως λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων συγκριτικά με τα συμβατικά δομικά υλικά. Η υψηλή μηχανική αντοχή τους, η ανθεκτικότητά τους στη θερμική καταπόνηση και στη διάβρωση, η προσροφητική τους ικανότητα, καθώς και η χαμηλού κόστους τεχνολογία σύνθεσης και η απλότητα των χρησιμοποιούμενων πρώτων υλών, είναι μερικές από τις ιδιότητες που καθιστούν τα γεωπολυμερή ελκυστικά υλικά για δομικές χρήσεις. Όμως, πρέπει να τονιστεί ότι η χρήση των γεωπολυμερών δεν έχει ως στόχο την αντικατάσταση του τσιμέντου και των υπόλοιπων δομικών υλικών σε όλες τις εφαρμογές τους. Αυτό δεν είναι εφικτό αφού οι πρώτες ύλες που απαιτούνται για την σύνθεση γεωπολυμερών δεν επαρκούν έτσι ώστε τα παραγόμενα προϊόντα να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις δόμησης. Παρόλα αυτά, οι αξιοσημείωτες ιδιότητές τους τα καθιστούν ελκυστικά όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε κατασκευές στις οποίες οι προδιαγραφές ασφάλειας και οι συνθήκες λειτουργίας απαιτούν τη χρήση δομικών υλικών με καλή συμπεριφορά σε ακραίες συνθήκες.

Στη συγκεκριμένη εργασία επισκευάστηκαν δοκίμια σκυροδέματος με διάφορα υλικά επισκευής. Ειδικότερα, σε κατάλληλα κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος ($d = 100 \text{ mm}$, $h = 90 \text{ mm}$) ανοίγονται οπές βάθους περίπου 20 mm και διαμέτρου περίπου 10 mm . Οι οπές αυτές γεμίζονται με διάφορα επισκευαστικά υλικά και ειδικότερα με τσιμεντοειδή επισκευαστικά υλικά (που παρασκευάζονται στο εργαστήριο) και με γεωπολυμερή (που παρασκευάζονται στο εργαστήριο). Πραγματοποιούνται κατάλληλες μετρήσεις και δοκιμές και εφαρμόζονται τεχνικές για τον έλεγχο και την αποτίμηση της αποτελεσματικότητας των εφαρμοζόμενων υλικών στην επισκευή του σκυροδέματος.

Από άποψη δομής, η μεταπτυχιακή εργασία αποτελείται από 6 κεφάλαια:

- Το Κεφάλαιο 1 «Εισαγωγή», όπου δίνονται κάποια εισαγωγικά στοιχεία για την εργασία.
- Το Κεφάλαιο 2 «Θεωρητικό Μέρος», όπου γίνεται εισαγωγή στη τεχνολογία, στη δομή, στη χημεία, στη σύνθεση, στις ιδιότητες και στις εφαρμογές των γεωπολυμερών. Στη συνέχεια, δίδονται κάποιες πληροφορίες για τα συμβατικά

δομικά υλικά, δηλαδή για τα τσιμέντα, το σκυρόδεμα και τα κονιάματα, καθώς και για την ανθεκτικότητά τους. Τέλος, γίνεται εκτενής αναφορά στην επισκευή των δομικών στοιχείων.

- Το Κεφάλαιο 3 «Τοποθέτηση του Θέματος», όπου τεκμηριώνεται το αντικείμενο της εργασίας, καθώς και η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την διεκπεραίωσή της.
- Το Κεφάλαιο 4 «Πειραματικό Μέρος», στο οποίο περιλαμβάνεται ο χαρακτηρισμός των υλικών και των ιδιοτήτων τους, καθώς και οι πειραματικές διαδικασίες που ακολουθήθηκαν τόσο κατά την σύνθεση των υλικών, επισκευασθέντων και επισκευαστικών, όσο και κατά τον έλεγχο της ανθεκτικότητάς τους.
- Το Κεφάλαιο 5 «Αποτελέσματα - Συζήτηση Αποτελεσμάτων», στο οποίο αναφέρονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις διάφορες δοκιμές που έγιναν για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας των επισκευαστικών υλικών.
- Το Κεφάλαιο 6 «Συμπεράσματα», όπου παρουσιάζονται τα κύρια συμπεράσματα της παρούσας εργασίας και αναφέρονται θέματα – προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση.

Κεφάλαιο 2 - ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΗ

Η διερεύνηση της δομής και της χημείας των γεωπολυμερών αποτελεί ένα πολύπλοκο αντικείμενο, για το οποίο έχουν πραγματοποιηθεί πολλές έρευνες. Αξίζει να αναφερθεί ότι τα γεωπολυμερή βρίσκουν εφαρμογές σε διάφορους τομείς λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων τους, οι οποίες είναι εφάμιλλες αντίστοιχων ιδιοτήτων αρκετών συμβατικών υλικών. Πέρα όμως από τις ιδιότητες των γεωπολυμερικών προϊόντων, η ίδια η διαδικασία της γεωσύνθεσης παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα τα οποία παρακινούν τους επιστήμονες αλλά και την βιομηχανία να στρέψουν την προσοχή τους στην νέα αυτή τεχνολογία.

Τα γεωπολυμερή είναι ανόργανα πολυμερή υλικά που προκύπτουν από την γεωσύνθεση. Ο γεωπολυμερισμός περιλαμβάνει μια χημική αντίδραση μεταξύ διαφόρων αργιλοπυριτικών υλικών με αλκαλικά πυριτικά μέταλλα κάτω από ισχυρές αλκαλικές συνθήκες και τον σχηματισμό πολυμερικών δεσμών $-Si-O-Al-O-$. Ο χρόνος αντίδρασης είναι σύντομος έχοντας ως αποτέλεσμα τη μετατροπή σε άμορφες ή ημικρυσταλλικές τρισδιάστατες αργιλοπυριτικές δομές που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία συμπύκνωσης. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της γεωσύνθεσης είναι η απλότητα των πρώτων υλών που απαιτούνται. Ο Joseph Davidovits ήταν ο πρώτος που ανέπτυξε αυτά τα υλικά και καθιέρωσε τον όρο «γεωπολυμερές». Η δημιουργία των γεωπολυμερών υλικών ήταν αποτέλεσμα έρευνας για την ανάπτυξη πυριάντοχων, μη αναφλέξιμων και ανθεκτικών σε υψηλές θερμοκρασίες υλικών για χρήση τους στην παραγωγή δομικών στοιχείων κτιρίων και σιράγγων.

Συμπερασματικά, τα γεωπολυμερή αποτελούν μια νέα κατηγορία υλικών, τα οποία υπό κατάλληλες συνθήκες μπορούν να δώσουν προϊόντα με πολύ βελτιωμένες ιδιότητες. Παρόλα αυτά, απαιτείται περαιτέρω έρευνα προκειμένου να διερευνηθεί πλήρως ο συσχετισμός των συνθηκών σύνθεσης τους με την μικροδομή και τις ιδιότητες τους. Πρόκειται για υλικά που μπορούν να παρασκευαστούν επιλέγοντας τις πρώτες ύλες και τις συνθήκες σύνθεσης με τέτοιο τρόπο ώστε τα τελικά προϊόντα να εξυπηρετούν τις ανάγκες μιας συγκεκριμένης εφαρμογής. Η δυνατότητα τους να χρησιμοποιηθούν στην βιομηχανία εξαρτάται από την ικανότητά τους να διαθέτουν ιδιότητες οι οποίες να ικανοποιούν τις προδιαγραφές που τίθενται ανεξάρτητα με το αν διαθέτουν μεμονωμένα ιδιαίτερα βελτιωμένα κάποια ιδιότητα [5, 7, 33].

2.1.1 Ιστορικά στοιχεία

Ο Joseph Davidovits ήταν ο πρώτος που ανέπτυξε αυτά τα υλικά και καθιέρωσε τον όρο «γεωπολυμερές» το 1978. Το πρώτο συνθετικό του όρου περιγράφει την απουσία ενώσεων του άνθρακα και επομένως τον καθαρό ανόργανο χαρακτήρα τους, και το δεύτερο, αναλογικά με τα οργανικά πολυμερή, την μετατροπή και τη πολυσυμπύκνωση των ανόργανων πρώτων υλών σε μία τρισδιάστατη, μεγάλου μήκους δομή. Η δομική μονάδα του πολυμερούς θεωρείται πως αποτελείται από τετράεδρα πυριτίου και αργιλίου τα οποία ενώνονται με «γέφυρες οξυγόνου» (- O - Si - O - Al -).

Γύρω στα 1950, αναπτύχθηκαν από τους Victor Glukhovsky και Pavel Krivenko παρόμοια υλικά με σκοπό την έρευνα των αίτιων της μεγαλύτερης αντοχής των αρχαίων κτιρίων συγκριτικά με τα κτίρια της πρόσφατης εποχής και χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή κτιρίου μεγάλου ύψους στη Ρωσία. Αυτά τα αλκαλικά άργιλο-πυριτικά υλικά τα οποία χαρακτηρίζονται από πολύ καλή ανθεκτικότητα, αρχικά ονομάστηκαν «soil silicates».

Σύμφωνα με τον Davidovits, τα γεωπολυμερή ανακαλύφθηκαν κατά την διάρκεια ερευνών για την παραγωγή ενός μη εύφλεκτου ανόργανου πολυμερούς, μετά από πλήθος καταστροφικών πυρκαγιών στη Γαλλία στο διάστημα 1970-1973.

Το πρώτο γεωπολυμερές παρασκευάστηκε μέσω ανάμιξης καολινίτη με λειοτριβημένο χαλαζία σε ψυχρό ή θερμό διάλυμα NaOH. Το μείγμα που προέκυψε στερεοποιήθηκε σε θερμοκρασία 150 ° C σχηματίζοντας έναν μονόλιθο ανόργανου πολυμερούς.

Από το 1979 έως το 1995, δημοσιεύτηκαν από τον Davidovits και την ομάδα του πολλές ανακοινώσεις και πατέντες όσον αφορά σε θέματα γεωπολυμερισμού. Οι πατέντες αυτές περιλαμβάνουν τη σύνθεση άργιλο-πυριτικών πολυμερικών ενώσεων σε μορφή στερεού διαλύματος σε θερμοκρασίες έως 120 °C, μεθόδους σύνθεσης γεωπολυμερικού συνδετικού υλικού και μεθόδους σύνθεσης άργιλο-πυριτικού γεωπολυμερούς σε ένυδρη μορφή.

Από το 1996 και μετά, σε συνέχεια των ερευνών σε θέματα γεωπολυμερισμού, η ομάδα του Αυστραλού καθηγητή Van Deventer απέδειξε πειραματικά ότι διάφορα φυσικά αλλά και βιομηχανικά άργιλο-πυριτικά υλικά μπορούν να μετατραπούν σε ανόργανα άργιλο-πυριτικά gel ή γεωπολυμερή. Στη συνέχεια οι έρευνες εντατικοποιήθηκαν σε θέματα χρησιμοποίησης βιομηχανικών αποβλήτων με στόχο την παραγωγή προϊόντων προστιθέμενης αξίας, τα οποία θα μπορούσαν να βρουν πλήθος εφαρμογών στον κατασκευαστικό και σε άλλους τομείς. Οι δημοσιεύσεις που προέκυψαν από τις παραπάνω έρευνες καλύπτουν ερευνητικά αντικείμενα που αφορούν στον γεωπολυμερισμό φυσικών ορυκτών και ιπτάμενης τέφρας καθώς και στη σταθεροποίηση τοξικών μετάλλων σε γεωπολυμερή ιπτάμενης τέφρας [5, 6, 7, 14, 18, 43].

2.1.2 Δομή και χημεία γεωπολυμερών

Προκειμένου να περιγραφούν καλύτερα οι τρισδιάστατες γεωπολυμερικές δομές, προτάθηκε ο όρος polysialate, όπου sialate είναι μία σύντηξη του όρου silicon-oxy-aluminate (-Si-O-Al-O-). Τα γεωπολυμερή, αποτελούμενα από τρισδιάστατα συνεχή πλέγματα (Σχήμα 1) [32] είναι δυνατόν να ερμηνευτούν με βάση την μέθοδο του Bragg. Σύμφωνα με την θεωρία του ιοντικού δεσμού, το δίκτυο sialate των γεωπολυμερών αποτελείται από τετράεδρα SiO₄ και AlO₄ τα οποία είναι εναλλάξ συνδεδεμένα, μοιραζόμενα τα ιόντα οξυγόνου (Σχήμα 2) [32]. Λόγω της παρουσίας αργιλίου στο δίκτυο επιβάλλεται η παρουσία κατιόντων στις κοιλότητες για να διατηρηθεί η ηλεκτρική ουδετερότητα του υλικού. Συνήθως, αποτελούνται από άμορφη ή ημι-κρυσταλλική δομή. Για τα polysialates έχει διατυπωθεί η ακόλουθη εμπειρική διατύπωση:



όπου M: ένα κατιόν (Na⁺, K⁺, Ca²⁺), η: ο βαθμός πολυσυμπύκνωσης, z: ο λόγος Si/Al στη βασική μονάδα του polysialate.

Τα polysialates, ανάλογα με τον μοριακό λόγο Si/Al της βασικής αργιλοπυριτικής μονάδας του πολυμερούς, κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

1. Poly (sialate), PS.

Γεωπολυμερή με λόγο Si/Al=1, τα οποία βασίζονται στο μονομερές sialate [-Si-O-Al-O-]. Αποτελούνται από πολυμερή αλυσίδας ή δακτυλίου.

2. Poly (sialate - siloxo), PPS.

Γεωπολυμερή με λόγο Si/Al=2, στα οποία βασική δομική μονάδα είναι το sialate siloxo [-Si-O-Al-O-Si-O-]. Αναφέρεται ότι εκτός της απλής αλυσίδας υπάρχουν και 3 κυκλικά ισόμορφα.

3. Poly (sialate - disiloxo), PSDS.

Γεωπολυμερή με λόγο Si/Al=3, βασική μονάδα των οποίων είναι το sialate disiloxo [-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-]. Υπάρχουν τρία ισόμορφα, 2 γραμμικά, 2 διακλαδωμένα και 2 κυκλικά.

4. Poly (sialate - multisiloxo).

Πυριτικός σύνδεσμος που περιγράφει την γέφυρα -Si-O-Al- μεταξύ δύο αλυσίδων polysialate. Έχουν λόγο Si/Al>>3 και η δομή του πολυμερούς προκύπτει από τη σταυροσύνδεση των polysilico-aluminate αλυσίδων ή φύλλων ή δικτύων με μία sialate διασύνδεση [-Si-O-Al-O] και μπορεί να είναι είτε δισδιάστατη είτε τρισδιάστατη.

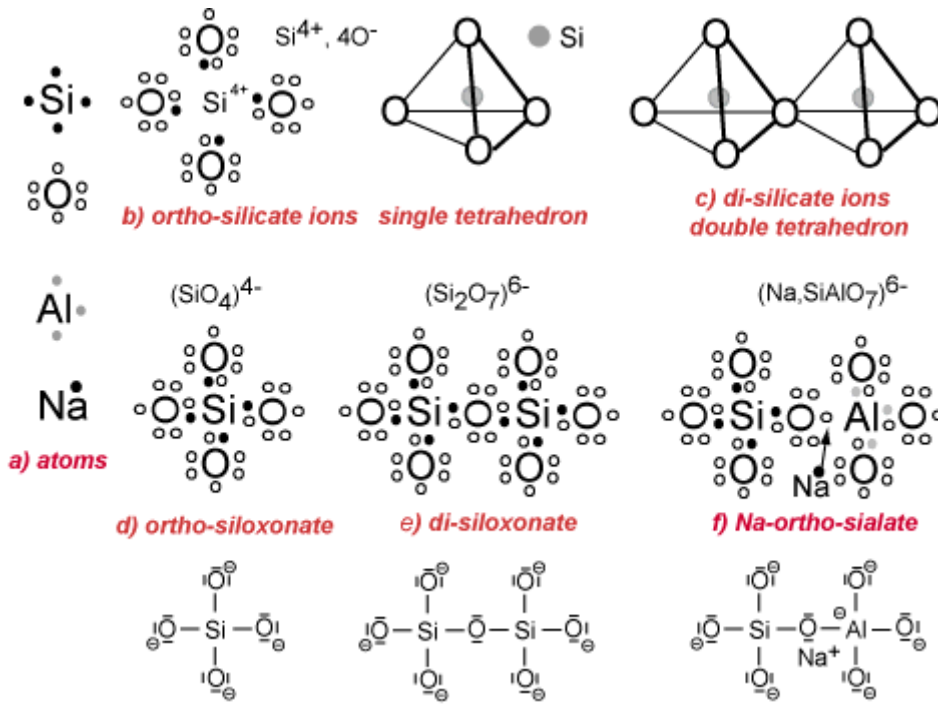
Τέλος , πρέπει να αναφερθεί ότι οι αντοχές σε θλίψη των γεωπολυμερών αυξάνονται έντονα με αύξηση της ομοιογένειας της δομής και οι φυσικοχημικές ιδιότητες των γεωπολυμερών καθορίζονται από το βαθμό κρυσταλλικής οργάνωσης του συνδετικού υλικού [5, 6, 7, 10, 25, 31, 33, 43].

Θεωρείται ότι οι δεσμοί μεταξύ αργιλίου και πυριτίου είναι στην πραγματικότητα ομοιοπολικοί, παρότι η ερμηνεία των δεσμών και της κρυσταλλικής δομής των αργιλοπυριτικών ορυκτών γίνεται με βάση τη θεωρία του ιοντικού δεσμού.

Αναφέρονται έξι μοριακές κατανομές, οι οποίες απεικονίζουν την δομή των αργιλοπυριτικών ορυκτών με βάση το ιοντικό και ομοιοπολικό μοντέλο (Σχήμα 3) [32]:

- Η κατανομή των ηλεκτρονίων στην εξωτερική στοιβάδα των ατόμων Si, O, Al και Na. Η εξωτερική στοιβάδα των στοιχείων μπορεί να συμπληρωθεί είτε αποβάλλοντας ηλεκτρόνια είτε προσλαμβάνοντας ηλεκτρόνια. Έτσι:
 - ✓ Το Si έχει 4 ηλεκτρόνια. Είναι δότης ή δέκτης ηλεκτρονίων (τετρασθενές).
 - ✓ Το O έχει 6 ηλεκτρόνια. Είναι δέκτης ηλεκτρονίων (δισθενές).
 - ✓ Το Al έχει 3 ηλεκτρόνια. Έχει επταμοτερίζοντα χαρακτήρα αφού είναι δότης ηλεκτρονίων σε όξινο περιβάλλον (τρισθενές) και δέκτης ηλεκτρονίων σε αλκαλικό περιβάλλον (τετρασθενές).
 - ✓ Το Na έχει 1 ηλεκτρόνιο. Είναι δότης ηλεκτρονίων (μονοσθενές).
- Το απλό τετράεδρο το οποίο αποτελείται από τα ιόντα (Si^{4+} , O^{4-}) του ortho-silicate. Το Si αποβάλλει 4 ηλεκτρόνια τα οποία προσλαμβάνονται από τέσσερα οξυγόνα, οπότε μετατρέπεται στο μικρό κατιόν Si^+ . Προκειμένου να επιτευχθεί ιοντική σταθερότητα, κάθε οξυγόνο χρειάζεται και ένα όγδοο ηλεκτρόνιο το οποίο παρέχεται από κάποιο μέταλλο, ή κάποιο άλλο πυρίτιο (ιοντική θεωρία).
- Το διπλό τετράεδρο, το οποίο προκύπτει από την σύνδεση δύο απλών τετράεδρων μοιραζόμενα ένα κοινό οξυγόνο (ιοντική θεωρία).
- Το μόριο SiO_4 (ortho-siloxonate), το οποίο προκύπτει από την δημιουργία κοινών ζευγών ηλεκτρονίων μεταξύ ενός ατόμου Si και των τεσσάρων O, τα οποία το περιβάλλουν με αποτέλεσμα την δημιουργία Si-O ομοιοπολικών δεσμών (θεωρία ομοιοπολικού δεσμού).
- Την πολυσυμπύκνωση του μορίου SiO_4 σε di-siloxonate και σε μεγαλύτερα πολυμερικά siloxonate που πραγματοποιείται με την περαιτέρω δημιουργία κοινού ζεύγους ηλεκτρονίων μεταξύ του Si και του O (θεωρία ομοιοπολικού δεσμού).
- Τον σχηματισμό του μορίου ortho-sialate μέσω της δημιουργίας ομοιοπολικού δεσμού Si-O-Al σε αλκαλικό περιβάλλον (θεωρία ομοιοπολικού δεσμού).

Αναφέρεται η δημιουργία ενός ισχυρότερου δεσμού στην περίπτωση του di-siloxonate σε σχέση με το διπλό τετράεδρο. Επιπλέον, θεωρείται ότι τα ιόντα εισέρχονται ευκολότερα σε διαλύματα από ότι τα μόρια. Θεωρητικά θα έπρεπε λοιπόν η διαλυτοποίηση των ιόντων να κυριαρχεί στην κινητική του γεωπολυμερισμού, αλλά στην πράξη οι χημικοί μηχανισμοί είναι πιο πολύπλοκοι [5, 6, 7, 24, 33, 43].



ΣΧΗΜΑ 3: Ηλεκτρονιακές κατανομές των στοιχείων Si, O, Al, Na και απεικόνιση των βασικών δομικών μονάδων με βάση τις 2 θεωρίες δεσμών

2.1.3 Σύνθεση γεωπολυμερών και μηχανισμός γεωπολυμερισμού

Για να πραγματοποιηθεί σύνθεση γεωπολυμερούς, γίνεται ανάμειξη των πρώτων υλών με πληρωτικά υλικά και διαλύματα ενεργοποίησης. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρώτες ύλες φυσικά (αργιλο-πυριτικά) ορυκτά ή βιομηχανικά απόβλητα. Τα πληρωτικά υλικά χρησιμοποιούνται για τη προσθήκη ιόντων Al^{3+} στο γεωπολυμερικό μίγμα. Το διάλυμα ενεργοποίησης περιλαμβάνει διάλυμα υδροξειδίου ενός αλκαλίου (νατρίου ή καλίου) που βοηθά στη διαλυτοποίηση των πρώτων υλών και διάλυμα πυριτικού νατρίου ή καλίου, το οποίο δρα ως συνδετικό υλικό, αλκαλικός ενεργοποιητής, πλαστικοποιητής ή μέσο διάχυσης.

Ο γεωπολυμερισμός πραγματοποιείται στα εξής στάδια (κάποιες φορές συμβαίνουν ταυτόχρονα):

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

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

Η συγκέντρωση του διαλυτοποιημένου πυριτίου επηρεάζει την κατανομή του πορώδους στα γεωπολυμερή, δηλαδή χαμηλές συγκεντρώσεις οδηγούν συνήθως στο σχηματισμό πυκνού gel και αντίστροφα.

Δεν πρέπει να υπάρχει περίσσεια αλκαλίων επειδή μπορεί να σχηματίσουν ανθρακικά αλκάλια από το ατμοσφαιρικό CO_2 και συνεπώς να διασπαστεί η διαδικασία πολυμερισμού.

Ο χρόνος στερεοποίησης ενός γεωπολυμερικού μίγματος καθορίζεται κυρίως από το διαθέσιμο αργίλιο. Υψηλή περιεκτικότητα σε αργίλιο, οδηγεί στο σχηματισμό προϊόντων με χαμηλή αντοχή. Ουσιαστικά, τα διαθέσιμα διαλυτοποιημένα ιόντα Si και Al καθορίζουν τις ιδιότητες των γεωπολυμερών οι οποίες επηρεάζονται σε σημαντικό βαθμό από κάθε μεταβολή των συγκεντρώσεων των ιόντων.

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

Τα τελικά γεωπολυμερικά προϊόντα περιέχουν νερό συνδεδεμένο με τρεις διαφορετικούς τρόπους, το οποίο και διαφεύγει κατά τη διάρκεια της θέρμανσης:

- Φυσικά συνδεδεμένο νερό (ελεύθερο νερό-περίπου το 70% του συνόλου)
- Χημικά συνδεδεμένο νερό
- Ομάδες υδροξυλίων OH

Η απώλεια του ελεύθερου νερού μέσω θέρμανσης, συμβαίνει πριν τους 100° C και προκαλεί πολύ μικρή συρρίκνωση, αφήνει όμως χώρο καθορίζοντας έτσι το μικροπορώδες των γεωπολυμερών. Το υπόλοιπο νερό συνεισφέρει κατά 90% στη συρρίκνωση των γεωπολυμερών.

Ο ρόλος του νερού είναι ουσιαστικός σε όλα τα στάδια της διεργασίας του γεωπολυμερισμού. Η παρουσία του νερού στην αρχική σύνθεση του γεωπολυμερούς συστήματος συνδέεται άμεσα με τη δημιουργία του κατάλληλου υδατικού περιβάλλοντος για τη διαδικασία της διάλυσης Si και Al από την επιφάνεια των κόκκων του στερεού, καθώς επίσης και για την έναρξη του πολυμερισμού.

Επιπλέον, η περιεκτικότητα του νερού στη σύνθεση των γεωπολυμερών επηρεάζει το βαθμό πολυμερισμού του συστήματος (αύξηση της μηχανικής αντοχής), εφ' όσον το νερό συμμετέχει στη χημική δράση της πολυσυμπύκνωσης και αποτελεί κρίσιμο παράγοντα της σκλήρυνσης των γεωπολυμερών υλικών. Δηλαδή, η μείωση της περιεκτικότητας του νερού στη σύνθεση των γεωπολυμερών επιδρά θετικά στο σχηματισμό στερεών και συμπαγών υλικών με υψηλή μηχανική αντοχή.

Η προσθήκη επιπλέον νερού στο μείγμα αυξάνει την εργασιμότητα του υλικού αλλά μπορεί να προκαλέσει την εκχύλιση των περισσότερων διαλυτών συστατικών και την μεταφορά τους μακριά από την αντίδραση. Η μείωση της ποσότητας του νερού επιφέρει βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων. Βέλτιστη ποσότητα νερού είναι αυτή η οποία εξασφαλίζει οριακά καλή ανάμειξη και ομοιογένεια του μείγματος [5, 6, 7, 10, 24, 25, 30, 31, 33, 42].

2.1.4 Ιδιότητες και εφαρμογές γεωπολυμερών

Τα υλικά από γεωπολυμερή έχουν μεγάλο εύρος βιομηχανικών χρήσεων λόγω των φυσικών, χημικών και μηχανικών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν. Τα γεωπολυμερή αποτελούν μια νέα κατηγορία υλικών, που εκτός από πολύ καλές μηχανικές αντοχές εμφανίζουν βελτιωμένες και πολλές άλλες ιδιότητες σε σχέση με τα συμβατικά δομικά υλικά. Μερικές από αυτές τις ιδιότητες των γεωπολυμερών που έχουν μελετηθεί από πολλούς ερευνητές είναι:

- υψηλή μηχανική αντοχή λόγω του αργιλοπυριτικού άμορφου δίκτυου
- ανθεκτικότητα στη θέρμανση και στη φωτιά (θερμική καταπόνηση) και σταθερότητα σε θερμοκρασίες πάνω από 1200-1400 °C, λόγω του νανοπορώδους που επιτρέπει το φυσικά και χημικά συνδεδεμένο νερό να μετακινείται και να εξατμίζεται χωρίς να καταστρέφει το υλικό.
- χαμηλή θερμική διαστολή σε θερμοκρασίες μέχρι 800 °C
- μικρό πορώδες
- υψηλές αρχικές αντοχές
- σύντομος χρόνος στερεοποίησης και αμελητέα συρρίκνωση
- ανθεκτικότητα στα οξέα και στη διάβρωση (γενικά σε διαβρωτικά περιβάλλοντα)
- καλή ανθεκτικότητα σε κύκλους ψύξης – θέρμανσης
- μεγάλη σκληρότητα κατά Mohs
- προσροφητική ικανότητα
- χαμηλή υδροπερατότητα, η οποία ευνοεί μεταξύ άλλων την αδρανοποίηση εντός της γεωπολυμερικής μήτρας βαρέων και τοξικών μετάλλων
- σημαντική αντοχή στη θραύση
- καλή συνάφεια με άλλα υλικά, και συγκεκριμένα τα γεωπολυμερή με λόγο Si / Al =2 με τα φυσικά πετρώματα και τα γεωπολυμερή με λόγο Si / Al >20 με μέταλλα.
- μικροπορώδης δομή η οποία διαπιστώνεται από την μικρή φαινόμενη πυκνότητα
- ευκολία μορφοποίησης του γεωπολυμερικού μίγματος
- χαμηλού κόστους τεχνολογία σύνθεσης και απλός εξοπλισμός.

Ως προϊόντα με ιδιότητες παραπλήσιες με αυτές του τσιμέντου, τα γεωπολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές στην βιομηχανία με πιο σημαντικές τις ακόλουθες:

- Στην αποθήκευση και σταθεροποίηση τοξικών ή ραδιενεργών αποβλήτων και στην επιφανειακή κάλυψη σωρών αποβλήτων και χωματερών

- Στην αεροπορική βιομηχανία και αυτοκινητοβιομηχανία και στις εγκαταστάσεις εργοστασίων πυρηνικής ενέργειας χρησιμοποιούνται ως επενδύσεις πυροπροστασίας
- Στον τομέα των κατασκευών, για τη θερμική μόνωση κτιρίων, για δομικές επιφάνειες, όπως πατώματα και αποθηκευτικές περιοχές, και γενικά για δομικά υλικά
- Χαμηλής διαπερατότητας καλύμματα σε δεξαμενές καθαρού νερού ώστε να αποφεύγονται διαρροές
- Κατακόρυφοι φραγμοί και κατασκευές συλλογής νερού.
- Κατασκευή φραγμάτων.
- Υπόβαθρα για την εκχύλιση μεταλλευμάτων και τη συλλογή των εκχυλισμάτων προς περαιτέρω επεξεργασία.
- Για τη μόνωση μεταλλικών κλιβάνων, τη χύτευση μετάλλων (μήτρες) και τη βιομηχανία πλαστικών
- Για την τέχνη και τη διακόσμηση

Γενικά, οι κύριες εφαρμογές των γεωπολυμερών μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες:

1. δομικά υλικά
2. συστήματα σταθεροποίησης βαρέων μετάλλων

Ο τύπος εφαρμογής των γεωπολυμερικών υλικών καθορίζεται από την αναλογία Si:Al. Μικρή αναλογία της τάξης Si:Al=1,2 ή 3 προσδιορίζει έναν τρισδιάστατο δίκτυο που είναι αρκετό άκαμπτο, ενώ η αναλογία Si:Al>15 προσδίδει έναν πολυμερικό χαρακτήρα στο υλικό. Πρέπει να σημειωθεί πάντως ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των ιδιοτήτων των γεωπολυμερών, του τύπου των πρώτων υλών και της διαδικασίας, καθώς και των συνθηκών, σύνθεσης τους. Άρα, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι τα γεωπολυμερή είναι υλικά τα οποία μπορούν να παρασκευαστούν κατά παραγγελία. Δηλαδή, επιλέγοντας τις πρώτες ύλες και τις συνθήκες σύνθεσης είναι δυνατόν να εμφανίζεται στα τελικά προϊόντα βελτιωμένη η ιδιότητα εκείνη που ενδιαφέρει στην εκάστοτε εφαρμογή [6, 26, 39, 42, 43].

2.1.5 Γεωπολυμερή από μετακαολίνη

Ο μετακαολίνης (ΜΚ) είναι ένα ποζολανικό υλικό, το οποίο παράγεται κατόπιν θερμικής αποσύνθεσης του καολινίτη μεταξύ των 500 °C και των 950 °C, όπου και καταστρέφεται η κρυσταλλική δομή του καολινίτη και απομακρύνονται τα OH, τα οποία συνδέονται ισχυρά στο κρυσταλλικό πλέγμα. Το πρωτογενές υλικό για την παραγωγή μετακαολίνης είναι ο καολίνης. Ο μετακαολίνης αντιδρώντας με $\text{Ca}(\text{OH})_2$, παράγει gel ένυδρων ασβεσταργιλικών ενώσεων σε θερμοκρασίες δωματίου. Τα γεωπολυμερή μετακαολίνης απαιτούν για τη σύνθεσή τους σημαντικές ποσότητες νερού και τα τελικά προϊόντα αποκτούν αυξημένο πορώδες. Βέβαια, ο μετακαολίνης είναι υπεύθυνος για την ανάπτυξη των τελικών αντοχών των προϊόντων. Ο γεωπολυμερισμός συστημάτων μετακαολίνης εκτός από τον σχηματισμό του άμορφου αργιλοπυριτικού gel αναφέρουν και τον εντοπισμό ιχνών ζεολιθικών φάσεων. Ωστόσο, η χρήση μετακαολινίτη σε γεωπολυμερή αποδεικνύεται ευεργετική σε εφαρμογές όπως τα συγκολλητικά υλικά, τα στρώματα επικάλυψης και τα υδροκεραμικά. Τα πολύ καλά αποτελέσματα που είχε η σύνθεση γεωπολυμερών μετακαολίνης οδήγησε πολλούς ερευνητές να ασχοληθούν με τον γεωπολυμερισμό του μετακαολίνης, καθώς και την μελέτη της μικροδομής και των ιδιοτήτων των τελικών προϊόντων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι φυσικά αργιλοπυριτικά ορυκτά μπορούν να αποτελέσουν την πρώτη ύλη για την σύνθεση γεωπολυμερών αλλά δεν είναι δυνατή η ποσοτική πρόβλεψη της καταλληλότητας τους [19, 28, 31, 32, 34, 41].

2.1.6 Γεωπολυμερή από ιπτάμενη τέφρα

Η ιπτάμενη τέφρα είναι το πιο σημαντικό υποπροϊόν των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Παγκοσμίως παράγονται εκατομμύρια τόνοι ιπτάμενης τέφρας και έτσι επιβάλλεται η χρήση τους σε βιομηχανική κλίμακα. Μόνο το 20-30% της παραγόμενης ιπτάμενης τέφρας χρησιμοποιείται, κυρίως στην παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος, ενώ η υπόλοιπη ιπτάμενη τέφρα θεωρείται απόβλητο και συνεπώς περιβαλλοντικό πρόβλημα λόγω της πιθανής εκχύλισης μετάλλων και οργανικών ενώσεων και μεταφοράς τους στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες ή σε επιφανειακές πηγές νερού. Επιπλέον, η ιπτάμενη τέφρα θα μπορούσε να έχει επιπτώσεις και στην ανθρώπινη υγεία μέσω της άμεσης εισπνοής ή κατάποσης της αερομεταφερόμενης ιπτάμενης τέφρας. Η τεχνολογία των γεωπολυμερών έχει δώσει μερικώς μια λύση στο πρόβλημα διαχείρισης της ιπτάμενης τέφρας, αφού μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αργιλοπυριτική πρώτη ύλη για την σύνθεση γεωπολυμερών. Τα γεωπολυμερή από ιπτάμενη τέφρα μπορούν να αντικαταστήσουν τα

γεωπολυμερή από φυσικές πρώτες ύλες. Αντοχές της τάξης των 15-20 MPa και άλλες μηχανικές ιδιότητες σε συνδυασμό με διεργασίες που γίνονται σε θερμοκρασία δωματίου, τα καθιστούν αρκετά ελκυστικά για μεγάλο εύρος εφαρμογών. Επίσης, η χρήση της ιπτάμενης τέφρας και η χαμηλή θερμοκρασία της διεργασίας (<150°C) κάνουν αυτά τα γεωπολυμερή αρκετά ελκυστικά από την πλευρά οικονομικού κόστους. Η ιπτάμενη τέφρα προσδίδει στο τελικό προϊόν τις πρώιμες αντοχές του. Ένα δείγμα ιπτάμενης τέφρας περιέχει μόρια ποικίλλων μεγεθών, μορφολογίας και σύνθεσης, ενώ και οι αναλογίες διαφέρουν σημαντικά και θα εξαρτώνται από τις συνθήκες σχηματισμού της τέφρας. Η ικανότητα παραγωγής γεωπολυμερούς με σταθερές φυσικές ιδιότητες μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο στην χρησιμότητα του γεωπολυμερισμού σαν τρόπο ανάκτησης και αξιοποίησης της ιπτάμενης τέφρας. Ο μηχανισμός αντίδρασης παρέχει ένα μέσο με το οποίο μερικές από τις συνέπειες της ανομοιογενούς φύσης της ιπτάμενης τέφρας στον γεωπολυμερισμό μπορούν να προβλεφθούν, τουλάχιστον ποιοτικά αν όχι ακόμα ποσοτικά. Δεν υπάρχει κάποιος σαφής συσχετισμός ανάμεσα στην σύνθεση της ιπτάμενης τέφρας και στην ικανότητα άμεσης αντίδρασης. Έτσι η ανάλυση της συμπεριφοράς των μορίων της ιπτάμενης τέφρας μπορεί να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τη διαδικασία του γεωπολυμερισμού και της φύσης των γεωπολυμερικών προϊόντων. Η μελέτη της αλκαλικής ενεργοποίησης διαφορετικών Ιπτάμενων Τεφρών υποδεικνύουν το σχηματισμό ενός άμορφου αργιλοπυριτικού υλικού, παρόμοιο με αυτό που λαμβάνεται από την αλκαλική ενεργοποίηση του μετακαολίνης. Η Ιπτάμενη Τέφρα, σε αντίθεση με τον μετακαολίνη, περιέχει ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό άμορφης φάσης αλλά και μεγάλες ποσότητες κρυσταλλικών φάσεων. Αντίθετα με την ομοιογένεια στην μικροδομή των γεωπολυμερών καολίνη, η μικροδομή του προϊόντος αντίδρασης της ιπτάμενης τέφρας περιέχει μεγάλες ποσότητες υλικού που δεν αντέδρασε και το οποίο βρίσκεται συνδεδεμένο με το γεωπολυμερικό gel. Τα γεωπολυμερή ιπτάμενης τέφρας φαίνεται από τις μέχρι τώρα μελέτες ότι διαθέτουν την ικανότητα προσρόφησης ιόντων, καθώς και την ιδιότητα αδρανοποίησης βαρέων και τοξικών μετάλλων εντός της γεωπολυμερικής μήτρας. Οι αντοχές των γεωπολυμερών Ιπτάμενης Τέφρας φαίνεται πως επηρεάζονται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την αναλογία μεταξύ αλκαλικού ιόντος και ιόντων αργιλίου. Όταν η αναλογία αυτή είναι μικρή, οι μηχανικές ιδιότητες των γεωπολυμερών Ιπτάμενης Τέφρας είναι επίσης πολύ μικρές. Η αύξηση της αναλογίας αυτής μέχρι κάποια τιμή αυξάνει έντονα τις αντοχές σε θλίψη ενώ περαιτέρω αύξηση έχει ως αποτέλεσμα την έντονη υποβάθμιση τους [23, 24, 26, 30, 37, 43].

2.2 ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

2.2.1 Τσιμέντο

Το Ευρωπαϊκό πρότυπο δίνει τον παρακάτω ορισμό για το τσιμέντο: Τσιμέντο είναι μία υδραυλική κονία, δηλαδή ένα λεπτοαλεσμένο ανόργανο υλικό, το οποίο όταν αναμειχθεί με νερό σχηματίζει μία πάστα που λόγω των αντιδράσεων ενυδάτωσης πήζει και σκληρύνεται έχοντας έκτοτε την ικανότητα να διατηρεί τις αντοχές της και τη σταθερότητα της ακόμα και κάτω από το νερό. Το τσιμέντο που καλύπτεται από το πρότυπο EN 197-1 και ονομάζεται CEM, μπορεί, όταν αναμειχθεί με κατάλληλη αναλογία νερού και αδρανών, να δώσει σκυρόδεμα ή κονίαμα που διατηρεί την εργασιμότητα του για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια αποκτά συγκεκριμένα επίπεδα αντοχών σε συνάρτηση με το χρόνο, ενώ παράλληλα έχει αενάως σταθερότητα όγκου.

Στο σχετικό πρότυπο EN 197-1, που αναφέρεται στην ενοποίηση των επιμέρους τύπων τσιμέντου που παράγονται στις διάφορες χώρες της Ευρώπης προβλέπονται οι εξής πέντε τύποι κοινών τσιμέντων με πολλές υποδιαίρεσεις: CEM I - τσιμέντα Portland, CEM II - σύνθετα τσιμέντα Portland, CEM III - σκωριοτσιμέντα, CEM IV - ποζολανικά τσιμέντα και CEM V - σύνθετα τσιμέντα. Στο πρότυπο αυτό κάθε χώρα έχει συμπεριλάβει εκτός του κλίνκερ, τα δικά της κύρια συστατικά τα οποία είναι παραπροϊόντα βασικών βιομηχανικών δραστηριοτήτων της ή αποτελούν μέρος του ορυκτού της πλούτου και τα οποία συμβάλλουν κατά περίπτωση στη βελτίωση ορισμένων από τις ιδιότητες του τσιμέντου [42, 46, 47].

2.2.1.1 Σύσταση τσιμέντου

Το τσιμέντο συνίσταται από τα κύρια συστατικά του, τα δευτερεύοντα συστατικά του, το θειικό ασβέστιο και τα πρόσθετα. Ως κύρια συστατικά, εκτός του κλίνκερ του τσιμέντου, χρησιμοποιούνται η κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνων (S), διάφορα ποζολανικά υλικά φυσικά (P) ή φυσικά ψημένα (Q), διάφορες τέφρες πυριτικές (V) ή ασβεστούχες (W), burnt shale (T), ασβεστόλιθος (L ή LL) και silica fume (D).

- Κλίνκερ τσιμέντου Πόρτλαντ

Το κλίνκερ του τσιμέντου Πόρτλαντ είναι ένα υδραυλικό υλικό που συνίσταται τουλάχιστο κατά τα 2/3 κ.β. από C_2S και C_3S ενώ το υπόλοιπο κατά κύριο λόγο συνίσταται από τις αργιλικές και σιδηραργιλικές φάσεις του κλίνκερ. Η αναλογία CaO/SiO_2 δεν πρέπει να ξεπερνάει το 5%.

- Σκωρία υψικαμίνων

Η χημική σύσταση των σκωριών εξαρτάται από τις προσμίξεις στα σιδηρομεταλλεύματα, το βαθμό καθαρότητας του ασβεστόλιθου ή του δολομίτη που θα χρησιμοποιηθεί για τα συλλιπάσματα και τέλος, από την περιεκτικότητα σε ανόργανα συστατικά του κωκ που θα χρησιμοποιηθεί ως μέσο αναγωγής. Η χημική τους σύσταση και το ποσοστό της υαλώδους φάσης είναι τα δύο κύρια χαρακτηριστικά, που προσδιορίζουν τις υδραυλικές ιδιότητες των σκωριών. Η σκωρία θα πρέπει να αλέθεται χωριστά από τα υπόλοιπα υλικά των σύνθετων τσιμέντων. Για να έχει υδραυλικές ιδιότητες η σκωρία, πρέπει να ψυχθεί απότομα. Όταν η τιμή του λόγου $(CaO+MgO)/(SiO_2+Al_2O_3)$ της σκωρίας αυξηθεί σε τιμές μεγαλύτερες του 1,15, η περιεχόμενη υαλώδης φάση μειώνεται λόγω του ότι μειώνονται τα SiO_2 και Al_2O_3 , που είναι οι βασικοί δομικοί παράγοντες των πυριτικών πλεγμάτων. Στα σύνθετα τσιμέντα επιδιώκεται το ποσοστό της υαλώδους φάσης στη σκωρία να είναι τουλάχιστον 70%. Σκωρία με υψηλό περιεχόμενο υαλώδους φάσης δείχνει περισσότερο ομοιογενής σε αντίθεση με σκωρία με υψηλό ποσοστό κρυσταλλικής φάσης.

- Ιπτάμενες τέφρες

Η χημική σύσταση των ιπταμένων τεφρών (IT) εξαρτάται από τη σύσταση σε ανόργανα συστατικά του ανθρακοφόρου κοιτάσματος. Οι τέφρες διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Η τέφρα, που λαμβάνεται από ανθρακίτες και γενικότερα από γαιάνθρακες με μεγάλο ποσοστό άνθρακα και αυξημένη θερμογόνο δύναμη, είναι γνωστή ως κανονική IT, ενώ η τέφρα που λαμβάνεται από την καύση κατώτερης γεωλογικής περιόδου ανθράκων, όπως είναι οι λιγνίτες, ονομάζεται "τέφρα υψηλού περιεχόμενου σε ασβέστιο, ΤΥΑ". Στις πρώτες, όπου το συνολικό οξειδίο του ασβεστίου είναι μικρότερο του 10%, επικρατούν ενώσεις αργιλοπυριτικής σύστασης, ενώ στις δεύτερες, με το CaO μεταξύ 10 και 35%, επικρατούν ενώσεις ασβεσταργιλικής και ασβεστοπυριτικής σύστασης.

Κατά κανόνα τα μικρότερου μεγέθους σωματίδια των IT έχουν μεγαλύτερη ποσοστιαία αναλογία CaO , αλκαλίων και SO_3 . Ο άκαυστος άνθρακας, που επηρεάζει την δράση των IT παρουσία του κλίνκερ, συνήθως κυμαίνεται από 2-4%, αλλά ενίοτε φθάνει και το 10%. Η πλειονότητα των σωματιδίων της IT είναι υαλώδη συμπαγή ή κοίλα και σφαιρικού σχήματος. Η συνάλεση της με το τσιμέντο βελτιώνει τις αντοχές. Τα CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , K_2O , SO_3 και P_2O_5 των τεφρών διαλύονται μερικώς στο καθαρό νερό. Το ποσοστό της υαλώδους φάσης των τεφρών εξαρτάται εκτός από τη χημική τους σύσταση και από τη θερμοκρασία καύσης των γαιανθράκων. Όταν ψύχεται απότομα από υψηλές θερμοκρασίες, η IT υαλοποιείται. Για τα σύνθετα τσιμέντα επιδιώκεται τέφρα με υψηλό ποσοστό υαλώδους φάσης. Τα μικρού μεγέθους σωματίδια της τέφρας είναι πλουσιότερα σε υαλώδη φάση, ενώ τα

μεγαλύτερα σωματίδια περιέχουν περισσότερο κρυσταλλικές φάσεις που οφείλονται στην αργή ψύξη.

- Ποζολανικά υλικά

Ποζολανικά υλικά είναι φυσικά ή βιομηχανικά υλικά, πυριτικής, αργιλοπυριτικής ή συνδυασμού των προηγούμενων σύστασης. Τα υλικά αυτά δεν σκληρύνονται μόνα τους όταν αναμιγνύονται με το νερό, αλλά όταν είναι λεπτοαλεσμένα τότε παρουσία νερού αντιδρούν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος με το $\text{Ca}(\text{OH})_2$ που προκύπτει από την ενυδάτωση των συστατικών του κλίνκερ και σχηματίζουν ασβεστοπυριτικές και ασβεσταργιλικές ενώσεις, που αναπτύσσουν αντοχές. Οι ενώσεις αυτές είναι όμοιες με εκείνες που σχηματίζονται κατά τη σκλήρυνση των υδραυλικών υλικών. Οι ποζολάνες συνίστανται κυρίως από δραστικό SiO_2 που πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 25% κ.β. και από Al_2O_3 .

- Burnt shale

Ο ψημένος σχιστόλιθος παράγεται με πύρωση του oil shale σε θερμοκρασία 800°C σε ειδικές καμίνους. Μπορεί να θεωρηθεί παρόμοιο στη φύση του με την σκωρία υφικαμίνων. Εμφανίζει ήπιες υδραυλικές ιδιότητες, αφού παράγονται φάσεις όπως CA και C_2S που μοιάζουν με αυτές του κλίνκερ. Περιέχονται επίσης και ποσοστά CaO και CaSO_4 και μεγαλύτερες αναλογίες από οξειδία ειδικότερα SiO_2 που εμφανίζουν ποζολανική συμπεριφορά. Πρόβλημα παρουσιάζεται εξαιτίας του ποσοστού του SO_3 , το οποίο όταν ξεπεράσει κάποια επιτρεπτά όρια, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για αντίστοιχη μείωση των συστατικών του τσιμέντου (κυρίως της γύψου) που περιέχουν θειικό ασβέστιο.

- Silica fume

Η πυριτική παιπάλη παράγεται ως υποπροϊόν κατά την αναγωγή υψηλής καθαρότητας χαλαζία με άνθρακα σε καμίνους ηλεκτρικού τόξου για την παραγωγή κραμάτων πυριτίου και σιδηροπυριτίου. Το υλικό αυτό αποτελείται από σφαιρικά σωματίδια με υψηλό ποσοστό άμορφου πυριτίου.

- Μετακαολίνη

Ο μετακαολίνη είναι ένα προϊόν, άμορφο κατά το μεγαλύτερο μέρος του, που παράγεται με θερμική επεξεργασία του καολίνη. Σύμφωνα με μελέτες, μεγάλα πλεονεκτήματα μπορούν να προκύψουν από τη χρήση μετακαολίνη υψηλής δραστικότητας στο σκυρόδεμα. Τα πλεονεκτήματα αυτά είναι στους τομείς του πορώδους, της διαπερατότητας, της διάχυσης των χλωριόντων και της αντοχής του σκυροδέματος.

Για τα δευτερεύοντα συστατικά επιτρέπεται ενσωμάτωση τους έως 5% κατά βάρος στο τσιμέντο, ενώ πολλές χώρες έχουν περιορίσει αυτό το ποσοστό σε 3%. Ως δευτερεύον

συστατικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ένα από τα παραπάνω κύρια συστατικά. Σε αυτήν την κατηγορία των υλικών συμπεριλαμβάνονται και υλικά που είναι γνωστά ως γεμιστικά. Τα fillers είναι ειδικά επιλεγμένα φυσικά ή τεχνητά ανόργανα ορυκτά υλικά τα οποία μετά από κατάλληλη προετοιμασία που στοχεύει κύρια στη διαμόρφωση της κοκκομετρικής τους κατανομής, βελτιώνουν φυσικές ιδιότητες του τσιμέντου. Είναι αδρανή ή έχουν ασθενής υδραυλικές ή λανθάνουσες υδραυλικές ή ποζολανικές ιδιότητες.

Το θειικό ασβέστιο προστίθεται στα άλλα συστατικά του τσιμέντου κατά την τελική άλεση του κλίνκερ με σκοπό να ρυθμίσει την πήξη του τσιμέντου. Το ακριβές ποσοστό προσθήκης κυμαίνεται μεταξύ 4 και 5% του βάρους του κλίνκερ. Το θειικό ασβέστιο μπορεί να προστεθεί σαν γύψος καθώς επίσης και ως ημιυδρική γύψος ή ως ανυδρίτης.

Ως πρόσθετα θεωρούνται υλικά τα οποία προστίθενται κατά την παραγωγή τσιμέντου με σκοπό την βελτίωση είτε της παραγωγικής διαδικασίας είτε των ιδιοτήτων του τσιμέντου. Η ποσότητα των προσθέτων δεν πρέπει να υπερβαίνει σε ξηρή βάση το 1% κατά βάρος του τσιμέντου για ανόργανα πρόσθετα ή το 0,5% για οργανικά πρόσθετα [42, 46, 47].

2.2.1.2 Τύποι τσιμέντου

Το τσιμέντο ανάλογα με τις ιδιότητες και τις χρήσεις του διακρίνεται σε διάφορες κατηγορίες σύμφωνα με το πρότυπο EN 197-1, οι κυριότερες εκ των οποίων είναι:

- Τσιμέντο Portland (Τύπου I)

Τα σκυροδέματα και τα κονιάματα που παρασκευάζονται με βάση το τσιμέντο Portland χαρακτηρίζονται από ανθεκτικότητα και ευελιξία. Ωστόσο, συγκεκριμένες ιδιότητες μπορούν να αποκτηθούν μεταβάλλοντας είτε τα ποσοστά ανάμιξης είτε το μέγεθος των υλικών που χρησιμοποιούνται.

- Σύνθετα τσιμέντα Portland (Τύπου II)

- Σκωριοτσιμέντα (Τύπου III)

- Ποζολανικά τσιμέντα (Τύπου IV)

- Σύνθετα τσιμέντα (Τύπου V)

Επιπλέον, διακρίνονται άλλες δύο κατηγορίες τσιμέντου, οι οποίες είναι:

- Τσιμέντο Portland χαμηλής παραγόμενης θερμότητας

Για την ανάπτυξη της αντοχής του σκυροδέματος απαιτείται μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σχέση με το OPC, αλλά η τιμή της τελικής αντοχής δεν επηρεάζεται.

- Τσιμέντο Portland ανθεκτικό σε θειικά άλατα

Το τσιμέντο της κατηγορίας αυτής είναι τύπου Ι με υψηλή περιεκτικότητα σε οξειδία σιδήρου τα οποία προστίθενται ώστε να μεταβάλλουν τη σύστασή του και να αυξηθεί η ανθεκτικότητά του σε θειικά άλατα που μπορεί να περιέχονται σε εδάφη και υπόγεια νερά.

Τέλος, αναφέρονται και τα τσιμέντα ειδικού τύπου, όπως:

- Τσιμέντο τοιχοποιίας

Τα τσιμέντα τοιχοποιίας χρησιμοποιούνται σε κονιάματα για την επίστρωση τούβλων, ογκόλιθων και για εργασίες σοβατισμάτων και επιστρώσεων. Γενικά αποτελούν μίγματα τσιμέντου Portland τύπου Ι με προσθήκη ορυκτών και χημικών. Τα τσιμέντα τοιχοποιίας χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με άμμο και νερό παράγοντας ένα εύπλαστο και συνεκτικό κονίαμα με ανθεκτικότητα σε κύκλους ψύξης-θέρμανσης.

- Λευκό τσιμέντο

Το λευκό τσιμέντο είναι τσιμέντο Portland τύπου Ι που παρασκευάζεται από ειδικά επιλεγμένες πρώτες ύλες χωρίς προσμίξεις.

- Τσιμέντο Portland ταχείας πήξης

Το τσιμέντο Portland ταχείας πήξης παρουσιάζει πολλές παρόμοιες ιδιότητες με το OPC. Όπως γίνεται αντιληπτό και από την ονομασία του, η αντοχή του αποκτάται σε συντομότερο χρονικό διάστημα (3 ημέρες) σε σχέση με το OPC (7 ημέρες) [42, 46, 47].

2.2.1.3 Μηχανικές, χημικές και φυσικές ιδιότητες τσιμέντου

Οι κανονικές αντοχές του τσιμέντου είναι οι θλιπτικές που προσδιορίζονται σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-1 στις 28 ημέρες και περιλαμβάνουν τρεις κατηγορίες αντοχών 32,5, 42,5 και 52,5 N/mm². Οι πρώιμες αντοχές μετρώνται στις 2 ημέρες εκτός από την κατηγορία των 32,5 N/mm² όπου και μετρώνται στις 7 ημέρες. Για κάθε κατηγορία προβλέπονται δύο τάξεις πρώιμων αντοχών, η πρώτη αναφέρεται στις κανονικές πρώιμες αντοχές, και συμβολίζεται με N και η άλλη που συμβολίζεται με το γράμμα R, αναφέρεται στα τσιμέντα ταχείας ανάπτυξης αντοχών.

Όσον αφορά στις φυσικές ιδιότητες προβλέπεται ο έλεγχος της αρχής του χρόνου πήξης και της σταθερότητας του όγκου ενώ σχετικά με τις χημικές απαιτήσεις ελέγχονται μόνο η απώλεια πύρωσης, το αδιάλυτο υπόλειμμα, τα SO₃, τα χλωριόντα και η ποζολανικότητα [42, 46, 47].

2.2.2 Κονιάματα

Τα κονιάματα είναι μίγματα μίας ή περισσότερων συνδετικών υλών (κονιών), νερού, λεπτόκοκκων αδρανών (<4 mm) και ενδεχομένως ειδικών πρόσθετων, τα οποία έχουν αξιόλογη ρευστότητα και πλαστικότητα όταν είναι νωπά, αποκτούν δε μετά την πήξη και σκλήρυνση της συνδετικής ύλης, μηχανική αντοχή και άλλες φυσικές και χημικές ιδιότητες. Οι ιδιότητες του νωπού και του σκληρυμένου κονιάματος εξαρτώνται από το είδος και τις αναλογίες των πρώτων υλών, από τον τρόπο αναμίξεως και μορφοποίησεως και από τις συνθήκες που επικρατούν και εφαρμόζονται κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης [46, 47].

2.2.2.1 Πρώτες ύλες κονιαμάτων

Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή κονιαμάτων είναι άσβεστος, τσιμέντο, νερό και άμμος.

- Η άσβεστος διακρίνεται σε υδραυλική άσβεστο και δολομιτική άσβεστο ανάλογα με το ποσοστό $MgCO_3$ που περιέχει. Τα κονιάματα μπορούν επίσης να περιέχουν και κάποιες αερικές κονίες, οι συνηθέστερες από τις οποίες είναι ο άργιλος, ο πηλός, οι δομικοί γύψοι, οι ποζολάνες και οι ιπτάμενες τέφρες.
- Το νερό που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να είναι απαλλαγμένο από επιβλαβείς προσμίξεις όπως οργανικά και ανόργανα οξέα, λίπη και λάδια, αιωρούμενες ουσίες και υπερβολικά ποσά διαλυμένων αλάτων κυρίως θειικών και χλωριούχων.
- Η άμμος, η οποία είναι το συνηθέστερο αδρανές υλικό που χρησιμοποιείται στα κονιάματα, δεν πρέπει να περιέχει προσμίξεις που να είναι ικανές να προκαλέσουν μείωση της αντοχής και της σταθερότητας των κονιαμάτων και που να μπορούν να προκαλέσουν επιβλαβείς χημικές αντιδράσεις με τη συνδετική ύλη. Στη χρήση της δίνεται έμφαση: α) στην κοκκομετρική διαβάθμιση, β) στην παρουσία αλάτων και άλλων χωματοειδών προσμίξεων και γ) στην υγρασία.
- Το τσιμέντο και συγκεκριμένα οι τύποι CEM I και CEM II κατά EN 197-1 μπορούν να χρησιμοποιηθούν με την προϋπόθεση ότι δεν έχουν υποστεί αλλοιώσεις καθώς και τσιμέντα τοιχοποιίας της προδιαγραφής EN 413 [46, 47].

2.2.2.2 Τύποι κονιαμάτων

Τα κονιάματα μπορούν να διακριθούν σε διάφορους τύπους:

- Ανάλογα με τον τρόπο πήξης και σκλήρυνσης που εξαρτάται από το είδος της κονιάς, σε υδραυλικά και αερικά.
- Ανάλογα με το είδος της κονιάς ή των αδρανών σε τσιμεντοκονιάματα, ασβεστοκονιάματα, τσιμεντοασβεστοκονιάματα, ποζολανικά κονιάματα, μαρμαροκονιάματα, γυψοκονιάματα.
- Ανάλογα με τη χρήση τους σε κονιάματα δόμησης ή κονιάματα τοιχοποιίας, κονιάματα επιχρισμάτων, ισοπεδωτικά ή κονιάματα εξίσωσης δαπέδων, κονιάματα αποκατάστασης, συγκολλητικά και ειδικά κονιάματα όπως θερμομονωτικά, ηχομονωτικά, πυράντοχα κλπ.

Η σύνθεση των μικτών κονιαμάτων εκφράζεται με τρεις αριθμούς που αναφέρονται με τη σειρά, σε μέρη όγκου τσιμέντου προς ασβέστη προς άμμο. Όταν γίνεται αναφορά σε απλά κονιάματα αναφέρεται και ο όγκος της κονιάς σε σχέση με τον όγκο της άμμου [46, 47].

2.2.3 Σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα είναι ένα τεχνητό δομικό υλικό, το οποίο παρασκευάζεται με την ανάμιξη τσιμέντου, αδρανών και νερού και το οποίο στερεοποιείται με τη χημική ένωση του νερού με το τσιμέντο (ενυδάτωση), εγκλωβίζοντας μέσα στη μάζα του τα αδρανή υλικά (δεν συμμετέχουν στις αντιδράσεις). Ο όρος αδρανή περιλαμβάνει την άμμο, το γαρμπίλι και τα σκύρα (χαλίκια). Εκτός από τα υλικά αυτά, προβλέπεται η προσθήκη και άλλων συστατικών (βελτιωτικά πρόσθετα – admixtures και πρόσθετα συστατικά – additions), τα οποία τροποποιούν συγκεκριμένες ιδιότητες του σκυροδέματος.

Τα σκυροδέματα ταξινομούνται σε κατηγορίες με βάση διάφορα κριτήρια, όπως η αντοχή σε θλίψη.

Πέραν των τριών συστατικών του σκυροδέματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ένα τέταρτο συστατικό ως πρόσθετο. Τα συστατικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι τα εξής με αυξανόμενο βαθμό δραστηριότητας:

- *Φυσική Ποζολάνη*
- *Ιπτάμενες Τέφρες*
- *Σκωρία υψικαμίνων*
- *Μετακαολίνης*

- *Πυριτική παιπάλη*

Τα κύρια πλεονεκτήματα του σκυροδέματος περιλαμβάνουν ευκολία χύτευσης, αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και χαμηλό κόστος. Τα μειονεκτήματά του, όπως ευθραυστότητα, χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό, μικρή πλαστικότητα, συρρίκνωση και μικρός λόγος αντοχής / βάρους, είναι ουσιαστικής σημασίας τόσο για τη βελτιστοποίηση της σύστασης όσο και για τη χρήση του σε ειδικές εφαρμογές [42, 46, 47].

2.2.3.1 Εργασιμότητα σκυροδέματος

Η επεξεργασία του σκυροδέματος επηρεάζεται από τους εξής παράγοντες:

- Περιεκτικότητα σε νερό του μίγματος

Αυξάνοντας το ποσοστό του νερού θα αυξηθεί και η ρευστότητα. Ωστόσο, εκτός από την μείωση της αντοχής, η αύξηση του νερού μπορεί να οδηγήσει σε διευθέτηση των χονδρόκοκκων αδρανών υλικών (διαρροή). Σε γενικές γραμμές, απαιτείται ορισμένη ποσότητα νερού για να πετύχουμε πλαστικότητα και συνεπώς εργασιμότητα.

- Περιεκτικότητα και λεπτότητα αδρανών

Κατά την εξέταση της επίδρασης των αδρανών υλικών στην εργασιμότητα, δύο παράγοντες είναι σημαντικοί: η ποσότητα των αδρανών υλικών και οι σχετικές αναλογίες των λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων αδρανών υλικών. Για έναν σταθερό λόγο W/C μια αύξηση της αναλογίας αδρανών/ τσιμέντου θα μειώσει την εργασιμότητά του. Το σχήμα, το μέγεθος και η υφή των σωματιδίων μπορεί επίσης να επηρεάσει την εργασιμότητα, καθώς και το πορώδες του μίγματος (υψηλό πορώδες οδηγεί σε μειωμένη εργασιμότητα).

- Χρόνος και θερμοκρασία

Υπάρχουν σημαντικά στοιχεία που αποδεικνύουν ότι όσο η θερμοκρασία περιβάλλοντος αυξάνεται, μειώνεται η εργασιμότητα, λόγω της αύξησης του ποσοστού εξάτμισης και ενυδάτωσης.

- Απώλεια της εργασιμότητας

Κατά την περίοδο της ρευστότητας, θα υπάρχει μια σταθερή μείωση της εργασιμότητας με το χρόνο, η οποία εν μέρει προκαλείται από την ενυδάτωση των C₃S και C₃A και εν μέρει από την έλλειψη νερού από το τσιμέντο μέσω εξάτμισης ή απορρόφησης. Ο ρυθμός απώλειας της εργασιμότητας είναι μικρότερος για χαμηλό σε περιεκτικότητα τσιμέντου μείγμα και όταν χρησιμοποιούνται υψηλοί λόγοι W/C. Αν το μείγμα τσιμέντου είναι ακατάλληλα σχεδιασμένο, πρέπει να αναμειχθεί με

επιπλέον νερό πριν την τοποθέτηση προκειμένου να αποκατασταθεί η εργασιμότητά του. Έτσι, αυξάνεται ο λόγος W/C, ιδιαίτερα επιζήμιο για τις ιδιότητες του σκυροδέματος εκτός και αν προστεθεί επιπλέον τσιμέντο [22, 42, 46, 47].

2.2.3.2 Ανθεκτικότητα σκυροδέματος

Η φθορά είναι το αποτέλεσμα των φυσικών και χημικών δράσεων, που συμβαίνουν μεταξύ των συστατικών του σκυροδέματος και των συστατικών (διαβρωτικά μέσα), που συνιστούν το περιβάλλον που εκτίθεται. Εκδηλώνεται με ρωγμές και διογκώσεις στην επιφάνεια του σκυροδέματος, αλλά και με μείωση της μηχανικής αντοχής του και απώλεια μάζας, εκφράζοντας την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος.

Οι παράγοντες που επιδρούν αρνητικά στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος είναι οι εξής:

- Η διαπερατότητα του υλικού (δείσδυση του νερού και άλλων βλαπτικών χημικών).
- Τα υψηλά ποσοστά στο υλικό υδροξειδίου του ασβεστίου, το οποίο αφενός μεν είναι υδατοδιαλυτό, αφετέρου είναι χημικά πολύ δραστικό.
- Η θερμότητα, που απελευθερώνεται κατά την ενυδάτωση, μπορεί να επιφέρει ρωγματώσεις στο υλικό.

Η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος εξαρτάται κυρίως από τους παρακάτω παράγοντες:

- Κατάλληλη επιλογή αδρανών - τύπου τσιμέντου - πρόσθετων υλικών
- Κατάλληλη περιεκτικότητα σε τσιμέντο
- Κατάλληλοι λόγοι νερό/τσιμέντο ώστε να εξασφαλίζεται μικρό πορώδες, μεγάλες αντοχές και υψηλή ανθεκτικότητα
- Επικάλυψη οπλισμού ώστε να προστατεύεται από τη διάβρωση
- Συμπύκνωση μέσω μείωσης του περιεχόμενου αέρα στο σκυρόδεμα
- Ενυδάτωση του τσιμέντου ώστε να αποτραπεί η δημιουργία ρωγματώσεων στην επιφάνεια του σκυροδέματος

Η παράμετρος που έχει τη μεγαλύτερη επιρροή στην ανθεκτικότητα είναι ο λόγος W/C. Καθώς ο λόγος W/C μειώνεται, το πορώδες της πάστας μειώνεται και το σκυρόδεμα γίνεται όλο και πιο αδιαπέρατο. Η διαπερατότητα του σκυροδέματος παίζει σημαντικό ρόλο στην ανθεκτικότητα, επειδή ελέγχει το ρυθμό της εισόδου υγρασίας και την κίνηση του νερού κατά τη διάρκεια της θέρμανσης ή ψύξης. Ο λόγος W/C έχει διπλό ρόλο, αφού μία χαμηλότερη αναλογία W/C αυξάνει επίσης την αντοχή του σκυροδέματος και βελτιώνει την αντοχή του στις ρωγμές [8, 22, 42, 46, 47].

2.2.4 Ανθεκτικότητα δομικών υλικών

Η ανθεκτικότητα (durability) εκφράζει τη δυνατότητα των δομικών υλικών, να διατηρούν την αντοχή και τη λειτουργικότητά τους στην κατασκευή κατά τη μέγιστη δυνατή διάρκεια. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται στην ικανότητα του υλικού να μη φθείρεται από το περιβάλλον στο οποίο εκτίθεται.

Η αντοχή στο χρόνο και στο περιβάλλον, καθώς και οι προκύπτουσες φθορές μιας κατασκευής εξαρτώνται άμεσα από τις ιδιότητες των δομικών υλικών, από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και από τις μηχανικές, τις φυσικές και τις χημικές επιδράσεις.

- ΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑ

Ως εργασιμότητα (workability) χαρακτηρίζεται γενικά η ευκολία με την οποία είναι δυνατόν να μεταφερθεί, διαστρωθεί και συμπυκνωθεί ένα δομικό υλικό. Η εργασιμότητα είναι μια σύνθετη ιδιότητα και συνδέεται με άλλες ρεολογικές ιδιότητες, όπως οι παρακάτω:

- ✓ Η ρευστότητα, που σημαίνει η ευκολία ροής ενός υλικού. Η ρευστότητα εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα του νερού ανάμιξης.
- ✓ Η πλαστικότητα, δηλαδή η ικανότητα του υλικού να παραμορφώνεται χωρίς διακοπή της συνέχειάς του.
- ✓ Η συνοχή, που εκφράζει το αποτέλεσμα των δυνάμεων που έλκουν τα μόρια μεταξύ τους και επομένως συντελεί στην πλαστικότητα.

- ΑΝΤΟΧΕΣ

Μετρούνται κυρίως οι αντοχές σε θλίψη ή σε μερικές περιπτώσεις και οι αντοχές σε εφελκυσμό. Οι δύο βασικοί παράγοντες που επιδρούν στην ανάπτυξη των αντοχών των δομικών υλικών είναι η χημική και ορυκτολογική τους σύσταση και η λεπτότητά τους.

- ΠΟΡΩΔΕΣ

Τα δομικά υλικά δεν είναι απόλυτα συμπαγή, αλλά περιέχουν πλήθος από εσωτερικές κοιλότητες, που αποτελούν το πορώδες τους. Οι κοιλότητες αυτές μπορεί να περιέχουν αέρα ή να είναι γεμάτες με νερό. Επιπλέον, το πορώδες επηρεάζει τη χρόνια συστολή, τον ερπυσμό, την υδατοαπορροφητικότητα, την υδατοστεγανότητα, κ.ά.

- ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ

Η διαπερατότητα των δομικών υλικών επηρεάζεται από την σύσταση του τσιμέντου, από τον λόγο w/c, από το βαθμό συμπύκνωσης, από την συντήρηση και από την ύπαρξη ρωγμών. Συνήθως, η ανθεκτικότητα σε φυσικές και χημικές επιδράσεις

μειώνεται όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε τριχοειδείς πόρους. Η συντήρηση συνίσταται στη διατήρηση ευνοϊκών συνθηκών υγρασίας και θερμοκρασίας, ώστε να προχωρήσουν οι αντιδράσεις ενυδάτωσης. Η ύπαρξη ρωγμών διευκολύνει τη διείσδυση βλαβερών ουσιών στο εσωτερικό της κατασκευής. Οι ρωγμές μπορούν να δημιουργηθούν από διάφορες αιτίες, όπως φυσικές, χημικές, θερμικές και κατασκευαστικές

- ΔΙΑΧΥΣΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ

Τα δομικά υλικά αποτελούν ένα φυσικό εμπόδιο στην επαφή του οπλισμού με διάφορα διαβρωτικά αέρια (οξυγόνο, διοξείδιο του θείου κ.λ.π) και άλλες ουσίες που βοηθούν τη διάβρωση (χλωριόντα κ.λ.π.)

Τα δομικά υλικά πρέπει να σχεδιαστούν κι να παραχθούν σωστά για το περιβάλλον στο οποίο θα εκτεθούν για μια χωρίς συντήρηση απόδοση για δεκαετίες. Τα δομικά υλικά όμως είναι δυνητικά ευάλωτα σε διάφορα περιβάλλοντα εκτός και αν παρθούν συγκεκριμένες προφυλάξεις. Παρά το γεγονός ότι ένας συγκεκριμένος περιβαλλοντικός παράγοντας μπορεί να δημιουργήσει κίνδυνο, στη συνέχεια και άλλοι παράγοντες μπορούν να συμβάλουν και να επιδεινώσουν την κατάσταση. Μια σημαντική δυσκολία στη μελέτη της αντοχής είναι η πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους τις μελλοντικές δεκαετίες με βάση τις βραχυπρόθεσμες δοκιμές που διενεργούνται [8, 20, 22, 36, 37, 47].

2.3 ΕΠΙΣΚΕΥΗ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η συντήρηση, η επισκευή και η ενίσχυση των κατασκευών από σκυρόδεμα αποτελούν σημαντικό τομέα της βιομηχανίας δομικών υλικών. Αυτό αντανακλάται στα αναρίθμητα πιστοποιημένα υλικά επισκευής που διατίθενται στην αγορά και τη σημαντική αύξηση του αριθμού των εταιρειών που προσφέρουν εξειδικευμένες υπηρεσίες συντήρησης και επισκευής.

Ένας από τους τομείς που γνώρισαν ανάπτυξη την δεκαετία του '80 και του '90 ήταν η αποκατάσταση των αλλοιωμένων κατασκευών από σπλισμένο σκυρόδεμα. Η ανάγκη για επισκευή αυτών των κατασκευών αυξάνεται από την αλλοίωση που προκαλείται.

Υπάρχει ανάγκη να καθοριστεί μια σειρά προϋποθέσεων για τα υλικά επισκευής, βασιζόμενη στις ιδιότητές τους. Προδιαγραφές αυτού του τύπου δεν είναι ακόμα διαθέσιμες. Δυστυχώς, δεν υπάρχει καμία συμφωνία μεταξύ των ερευνητών σχετικά με τις ιδιότητες που πρέπει να ληφθούν υπόψη στην αξιολόγηση. Για παράδειγμα, κάποιες έρευνες επικεντρώθηκαν στις ιδιότητες που επηρεάζουν τη σταθερότητα των υλικών επισκευής, και συγκεκριμένα στη συρρίκνωση, στο λόγο ελαστικότητας και στη θερμική ροή. Άλλες έρευνες, ωστόσο, έδωσαν μεγάλη προσοχή στην αντοχή αυτών των υλικών.

Αρχικά η επισκευή δομικών υλικών γινόταν με άμμο και τσιμεντοκονίαμα. Η τεχνολογία έχει εξελιχθεί σημαντικά από την εν λόγω προσέγγιση, για παράδειγμα, τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει μεγάλες μειώσεις στη συρρίκνωση ξήρανσης. Η χρήση πολυμερών καθώς και διαφόρων προσμίξεων ορυκτών για τη μείωση της διαπερατότητας σε επιθετικά ιόντα έχει μελετηθεί αρκετά. Επίσης, αρκετές μελέτες έχουν διεξαχθεί για να διερευνηθεί η μακροπρόθεσμη ανθεκτικότητα του επισκευαστικού σκυροδέματος σε εχθρικό περιβάλλον.

Αλλοιώσεις που οφείλονται στη διάβρωση της ενίσχυσης είναι εμφανείς στις ήπιες κλιματολογικές συνθήκες του κόσμου, ενώ στις θερμές και ξηρές περιοχές το πρόβλημα αυτό προκαλείται λόγω του συνδυασμού περιβαλλοντικών συνθηκών και ακατάλληλων μεθόδων κατασκευής. Επισκευή και αποκατάσταση των αλλοιωμένων κατασκευών σκυροδέματος είναι απαραίτητες, όχι μόνο για την εκμετάλλευσή τους για τον προβλεπόμενο χρόνο ζωής τους, αλλά και για τη διασφάλιση της ασφάλειας και της επισκευασιμότητάς τους. Μια καλή επισκευή βελτιώνει τη λειτουργία και την απόδοση, αποκαθιστά και αυξάνει τη δύναμη και την ακαμψία, βελτιώνει την εμφάνιση της επιφάνειας, παρέχει στεγανότητα, αποτρέπει την είσοδο των επιθετικών συστατικών στο σύστημα, και βελτιώνει την αντοχή του [2, 9, 13, 15, 22, 27].

2.3.1 Επισκευαστικά υλικά

Τα επισκευαστικά υλικά είναι κονιάματα ή ρητίνες που χρησιμοποιούνται για την επισκευή δομικών στοιχείων από νέο σκυρόδεμα (εξομάλυνση επιφάνειας, σφράγιση οπών κ.λπ.) ή παλιό σκυρόδεμα το οποίο έχει υποστεί βλάβες από διάφορες αιτίες (κακή αρχική κατασκευή, σεισμός κ.λπ.). Επίσης, στην κατηγορία των επισκευαστικών υλικών σκυροδέματος ανήκουν και τα υδραυλικά κονιάματα (ταχείας και υπερταχείας πήξης). Ανάλογα με τα βασικά συστατικά της σύνθεσής τους διακρίνονται σε:

- Τσιμεντοειδή επισκευαστικά υλικά
- Πολυμερή επισκευαστικά υλικά
- Εποξειδικά επισκευαστικά υλικά

Η επιλογή του κατάλληλου υλικού για κάθε εφαρμογή θα πρέπει να γίνει με προσοχή και να εξετάζονται όχι μόνο οι φυσικές και οι χημικές ιδιότητες, αλλά και οι απαιτήσεις και οι παράμετροι της όλης κατασκευής.

Ενδεικτικά, αναφέρονται μερικές από τις εφαρμογές τους:

- Αποκατάσταση στοιχείων που έχουν υποστεί ρωγμές και φθορές
- Επισκευή κατεστραμμένων ή διαβρωμένων στοιχείων
- Προστασία σκυροδέματος σε διαβρωτικό περιβάλλον (π.χ.βιομηχανικό)
- Γρήγορες υδραυλικές επισκευές (π.χ. σφράγιση οπών ή ρωγμών ακόμη και όταν υπάρχει διαρροή νερού)
- Αγκυρώσεις (κοχλίες, πυλώνες, κλπ.)
- Συγκόλληση παλιού με νέο σκυρόδεμα
- Επισκευή αρμών, οπών και εξομάλυνση επιφανειών

Τα επισκευαστικά υλικά κατά κανόνα παρουσιάζουν:

- Υψηλές μηχανικές αντοχές
- Υψηλή συνάφεια με τον χάλυβα
- Δεν συρρικνώνονται
- Αντέχουν σε συνηθισμένες χημικές προσβολές (π.χ. όξινο περιβάλλον)

Πολλές κατηγορίες υλικών χρησιμοποιούνται στην επισκευή και συντήρηση δομικών στοιχείων. Αυτά ποικίλουν από χαμηλού ιξώδους πολυμερή για σφράγιση πολύ λεπτών ρωγμών, ταχείας πήξης τσιμέντα για επισκευές παρουσία νερού και ειδικά τσιμέντα για επικαλύψεις. Η τελική επιλογή του υλικού επισκευής θα εξαρτηθεί από πολλούς παράγοντες, όπως τις ιδιότητες της επισκευής, τη μηχανική απόκριση, την αντοχή μακράς διάρκειας, το κόστος.

Τα βασικά επισκευαστικά υλικά που χρησιμοποιούνται διακρίνονται σε:

- Απλά
 1. Τσιμέντο
 2. Κονίες, γύψος και οργανικά συνδετικά υλικά
 3. Αδρανή υλικά
 4. Χάλυβες – σιδηροπλισμοί
 5. Ίνες υάλου υψηλής αντοχής
 6. Εποξειδικές ρητίνες (πολύ υψηλά μηχανικά χαρακτηριστικά, υψηλός συντελεστής θερμικής διαστολής, δημιουργία υδρόφοβων στρωμάτων)
- Σύνθετα
 1. Σκυρόδεμα
 2. Τσιμεντοκονιάματα (μεγάλες μηχανικές αντοχές που αναπτύσσονται γρήγορα, βελτιώνουν την πρόσφυση με το παλαιό σκυρόδεμα και δεν εμφανίζονται ρηγματώσεις, λόγω ελαφριάς διόγκωσής, αντισταθμίζοντας τις συστολές πήξης)
 3. Σύνθετο υλικό ινών υάλου υψηλής αντοχής εμποτισμένων με εποξειδικές ρητίνες
 4. Κονιάματα δομήσεως
 5. Εποξειδικό κονίαμα και εποξειδικό σκυρόδεμα
 6. Ασφαλούχα προϊόντα

Οι περιορισμοί για τη βέλτιστη επιλογή υλικών επισκευής είναι οι εξής:

- οι βασικές ιδιότητες των γενικών υλικών επισκευής
- οι μακροπρόθεσμες αλληλεπιδράσεις μεταξύ επισκευαστικών υλικών και υποστρώματος
- η σχέση μεταξύ των ιδιοτήτων των υλικών και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους
- οι σχέσεις μεταξύ της αντοχής στην κάμψη (παραμόρφωση) και του βαθμού της διάβρωσης του οπλισμού, πριν και μετά την επισκευή

Η παράμετρος αντοχής που ελέγχει τη μηχανική συμπεριφορά των επισκευασμένων στοιχείων δεν είναι η θλιπτική αντοχή του επισκευαστικού υλικού αλλά η αντοχή της διεπιφάνειας υλικού-υποστρώματος. Η μηχανική αντοχή διεπιφάνειας δεν είναι ανάλογη της θλιπτικής ή εφελκυστικής αντοχής του επισκευαστικού υλικού. Καλές αντοχές μπορούν να επιτευχθούν και με υλικά χαμηλότερων αντοχών [3, 4, 9, 11, 12, 15, 19, 21, 22, 44, 45].

2.3.2 Τύποι και σχεδιασμός της επισκευής

Μόλις ρηγματωθεί ένα δομικό υλικό ή παρατηρηθούν σημάδια φθοράς, καθίσταται ευάλωτο σε βλάβες, που μπορούν να το καταστήσουν ακατάλληλο για περαιτέρω χρήση. Η πρώιμη συντήρηση είναι επιθυμητή για να εξασφαλίσει την ακεραιότητα του δομικού υλικού, καθώς και η αντοχή του. Ιδιαίτερη προσοχή στην σφράγιση ρωγμών και στην αποκατάσταση των στεγανών αρμών είναι δυνατόν να εξαλείψει την ανάγκη για πιο κοστοβόρες επισκευές στο μέλλον. Σε περιπτώσεις που έχουν λάβει χώρα εκτεταμένες φθορές ή τα προληπτικά μέτρα δεν έχουν αποδώσει, θα πρέπει να διενεργηθεί έρευνα για τον καθορισμό της αιτίας και των βημάτων που χρειάζονται για την εξισορρόπηση της κατάστασης κατά την διάρκεια της επισκευής.

Η επισκευή των δομικών στοιχείων είναι πολύ πιο πολύπλοκη από ότι ο σχεδιασμός και η κατασκευή νέων. Οι μηχανισμοί αλλοίωσης πρέπει να είναι γνωστοί πριν από την επιλογή οποιουδήποτε σχεδιασμού ή μεθόδου επισκευής. Δεν είναι βέβαιο ότι η επισκευή βελτιώνει την αντοχή. Σε πολλές περιπτώσεις βέβαια έχει παρατηρηθεί ταχύτερη επιδείνωση μετά την επισκευή. Η φιλοσοφία του σχεδιασμού μίας διαδικασίας επιδιόρθωσης είναι να κατανοήσουμε την συμπεριφορά και τις ιδιότητες των διαφορετικών υλικών και πώς διαφορετικοί παράμετροι επηρεάζουν την διάρκεια ζωής ενός δομικού υλικού.

Ποικίλες τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επισκευή και αποκατάσταση ενός δομικού στοιχείου. Η ανθεκτικότητα των υλικών εξαρτάται από α. τη χρήση μιας διαδικασίας αποκατάστασης που λαμβάνει υπόψη την αιτία της ζημίας, β. τη σωστή επιλογή των υλικών και γ. τη σωστή προετοιμασία του κατεστραμμένου στοιχείου πριν την αποκατάσταση. Τα ακόλουθα γενικά σημεία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη:

- Όλο το προσβεβλημένο σκυροδέμα πρέπει να απομακρυνθεί, για να επιτευχθεί καλή συνάφεια μεταξύ του προϋπάρχοντος σκυροδέματος και του επισκευαστικού υλικού.
- Όπου είναι δυνατόν, η κοιλότητα πρέπει να είναι προετοιμασμένη για να εξασφαλιστεί η καλή πρόσφυση μεταξύ του σκυροδέματος και του υλικού επιδιόρθωσης και για να εξασφαλιστεί η ορθή συνένωση.
- Πρέπει να ληφθούν μέτρα για την αφαίρεση επιθετικών στοιχείων και την αποτροπή της επανεισόδου τους και να επιλεγεί ένα επισκευαστικό υλικό που να είναι συμβατό με τη δομή και το είδος των ζημιών.

Ο σχεδιασμός μιας κατάλληλης επισκευής ή συστήματος προστασίας είναι μια σύνθετη διαδικασία που περιλαμβάνει:

- Εκτίμηση της κατάστασης της δομής
- Επισήμανση των αιτίων της αλλοίωσης
- Απόφαση των στόχων της προστασίας και επισκευής
- Επιλογή των κατάλληλων αρχών για την προστασία και επισκευή
- Ορισμός των ιδιοτήτων των προϊόντων
- Καθορισμός των αναγκών συντήρησης μετά την προστασία και την επισκευή

Οι γενικές αρχές για την χρήση και την επί τόπου εφαρμογή των επισκευαστικών υλικών είναι:

- Η ανάγκη για την επιθεώρηση, τον έλεγχο και την αξιολόγηση πριν, κατά και μετά την επισκευή
- Προστασία από και επισκευή των ελαττωμάτων που προκαλούνται από την επίδραση ορισμένων περιβαλλόντων και χημικών ουσιών
- Προστασία και επισκευή προκειμένου να μειωθεί η πρόοδος όσον αφορά την αλκαλική-πυριτική αντίδραση
- Πλήρωση των κενών μεταξύ των στοιχείων για την εξασφάλιση της δομής
- Στεγάνωση ως αναπόσπαστο μέρος της προστασίας και της επισκευής

Οι μέθοδοι προστασίας και επισκευής, συμπεριλαμβάνουν:

- αποκατάσταση ρωγμών
- αποκατάσταση παθητικότητας για ενίσχυση
- μείωση του ρυθμού διάβρωσης του οπλισμού με τον περιορισμό της περιεκτικότητας σε υγρασία
- μείωση του ρυθμού διάβρωσης του οπλισμού με ηλεκτροχημικές μεθόδους
- έλεγχο της διάβρωσης του οπλισμού με επιστρώσεις

Από απόψεως σχεδιασμού του υλικού, ορίζονται οι ακόλουθες απαιτήσεις:

(α) να είναι ικανό να βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες της κατασκευής και (β) να εξασφαλίζει (μέσω και της φυσικο-χημικής του συμβατότητας με τα υφιστάμενα υλικά) ικανοποιητική εν χρόνω συμπεριφορά του συστήματος [9, 15, 21, 44, 45].

2.3.3 Ανθεκτικότητα επισκευαστικών υλικών

Η ανθεκτικότητα του υλικού επισκευής μπορεί να εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Οι συχνότερα εξεταζόμενοι είναι η αντοχή και η διαπερατότητα. Στην πραγματικότητα, η αστοχία ενός υλικού επισκευής είναι πιο πιθανό να προκύψει λόγω της ασυμβατότητας μεταξύ του επισκευαστικού υλικού και του υποστρώματος ή λόγω υψηλών επιπέδων συρρίκνωσης, οδηγώντας σε ρωγμάτωση και αποκόλληση.

Η αποτελεσματική επισκευή απαιτεί μια σειρά από υλικά με διαφορετικές φυσικές ιδιότητες και τεχνικές εφαρμογής. Συμβατότητα με το υπόστρωμα (μέτρο ελαστικότητας, συντελεστής θερμικής διαστολής, θλίψη, κάμψη, εφελκυσμός) και ευκολία στη χρήση σε ένα ευρύ φάσμα καταστάσεων επισκευής είναι ζωτικής σημασίας. Χαμηλή διαπερατότητα της επισκευής είναι αναγκαία εξ ορισμού, μιας και οι περιοχές που έχουν επισκευαστεί είναι πιο ευάλωτες σε επιθέσεις. Η μακροχρόνια διατήρηση είναι επίσης επιτακτική ανάγκη, για να παραμείνει η επισκευή υγιής. Αν η επισκευή συρρικνωθεί υπερβολικά και δημιουργηθούν ρωγμές τότε οποιαδήποτε προστατευτική ιδιότητα θα αποτύχει. Πρέπει να αναφερθεί ότι η συρρίκνωση των υλικών επισκευής είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τη συρρίκνωση του υποστρώματος. Η συρρίκνωση λόγω ξήρανσης κυρίως επηρεάζεται από τη σύνθεση των υλικών και του περιβάλλοντος. Γενικά, η συρρίκνωση ξήρανσης των επισκευαστικών υλικών μπορεί να μειώσει την μακροπρόθεσμη αποτελεσματικότητα είτε από δυνάμεις εφελκυσμού στην επισκευή, είτε λόγω ρωγμών στη διεπαφή.

Συνεπώς, οι προδιαγραφές για επισκευαστικά υλικά περιλαμβάνουν τη σχέση της αντοχής θλίψης και του μέτρου ελαστικότητας του υποστρώματος και του επισκευαστικού υλικού, καθώς και απαιτήσεις σε συρρίκνωση και διαπερατότητα.

Η εμφάνιση ρωγμών στην διεπιφάνεια επισκευής/ υπόστρωματος ελέγχεται κατά κύριο λόγο από τα χαρακτηριστικά συρρίκνωσης και ερπυσμού των υλικών επισκευής. Το μέτρο ελαστικότητας είναι επίσης μια σημαντική ιδιότητα και, κατά συνέπεια, υψηλό μέτρο ελαστικότητας του υλικού επισκευής θα αυξήσει τη δυνατότητα ρωγμάτωσης και αστοχίας. Ομοίως, υλικά επισκευής με υψηλή συρρίκνωση είναι πιο αξιόπιστα στη διεπαφή με το υπόστρωμα αλλά αυτό μπορεί να μειωθεί αν τα χαρακτηριστικά ερπυσμού είναι επίσης υψηλά.

Υπάρχει μεγάλη διακύμανση σε ορισμένες ιδιότητες σχετικές με την αντοχή των διαφόρων υλικών επισκευής, λόγω των τεράστιων διαφορών στη σύνθεσή τους. Αυτό εγείρει το σημαντικό ζήτημα της συμβατότητας μεταξύ των υλικών επισκευής και του υπάρχοντος υποστρώματος της επισκευασμένης κατασκευής.

Ενανθράκωση σε ορισμένα επισκευαστικά υλικά, ήταν εντυπωσιακά πολύ γρήγορη σε σύγκριση με άλλα. Αυτό δείχνει ότι σε κάποια επισκευαστικά υλικά οι πιθανότητες

διάβρωσης σχετικά με την ενανθράκωση του στοιχείου είναι πολύ υψηλές, υποδεικνύοντας την ανάγκη να διαπιστωθεί η καταλληλότητα των υλικών επισκευής για τις αναμενόμενες συνθήκες έκθεσης.

Συμβατότητα είναι ο συνδυασμός των ιδιοτήτων του υλικού επισκευής και του υποστρώματος (π.χ. σκυρόδεμα), εξασφαλίζοντας ότι το σύστημα αντέχει τις καταπονήσεις που εφαρμόζονται και διατηρεί τη δομική ακεραιότητα και τις ιδιότητες σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον έκθεσης σε μια καθορισμένη διάρκεια ζωής επισκευής. Σταθερότητα, χημικές, ηλεκτροχημικές και ιδιότητες μεταφοράς των συγκεκριμένων υλικών επισκευής και της μητρικού υλικού είναι οι κύριες πτυχές της συμβατότητας.

Η σταθερότητα είναι πιθανώς ο πιο σημαντικός παράγοντας που ελέγχει τις μεταβολές του όγκου κατά τη συρρίκνωση, τη θερμική διαστολή, και τις επιπτώσεις του ερπυσμού και των ορίων ελαστικότητας. Οι χημικές και ηλεκτροχημικές ιδιότητες περιλαμβάνουν προσβολή λόγω της αλκαλικής αντίδρασης του πυριτίου, περιεκτικότητας σε θειικά άλατα, pH, ηλεκτρικής αντίστασης και ενανθράκωσης προκαλώντας διάβρωση.

Ασυμφωνία στο μέτρο ελαστικότητας αποτελεί μεγάλο κίνδυνο σε επισκευές όταν το φορτίο που εφαρμόζεται είναι παράλληλο με τη γραμμή σύνδεσης σε ένα σύστημα. Το υλικό με το χαμηλότερο συντελεστή παραμορφώνεται περισσότερο και ως εκ τούτου, μεταφέρει το φορτίο, μέσω της σύνδεσης στο υλικό με το μεγαλύτερο συντελεστή. Αν το μεταφερόμενο φορτίο υπερβαίνει το φερόμενο φορτίο του υλικού ή του δεσμού στη διεπιφάνεια προκαλείται ρωγμή. Για το σχεδιασμό μιας αποτελεσματικής επισκευής, έχει προταθεί το υλικό επισκευής να έχει μεγαλύτερο συντελεστή (> 30%) από το επιφανειακό σκυρόδεμα.

Γενικά, η ρηγμάτωση πρέπει να περιορίζεται σε τέτοιο βαθμό ώστε:

- Να μην παρεμποδίζει την ομαλή λειτουργία ή την ανθεκτικότητα σε διάρκεια μίας κατασκευής.
- Ή να οδηγεί σε μη αισθητικό αποτέλεσμα σε σχέση με την εμφάνισή της.

Η εμφάνιση ρωγμών είναι συνήθης στις κατασκευές από σκυρόδεμα που υπόκεινται σε κάμψη, διάτμηση, στρέψη, ή εφελκυσμό που προέρχεται

- Είτε από άμεση φόρτιση
- Είτε από παρεμπόδιση των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων, όπως συρρίκνωση

Ρωγμές μπορεί να δημιουργηθούν και από άλλες αιτίες, όπως

- Πλαστική συστολή ξήρανσης
- Διάβρωση του οπλισμού
- Χημικές αντιδράσεις που προκαλούν διόγκωση [1, 9, 11, 15, 16, 21, 22, 27, 35, 38, 40].

2.3.4 Τα γεωπολυμερή ως επισκευαστικά υλικά δομικών στοιχείων

Τα γεωπολυμερικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ξεπεραστούν προβλήματα που σχετίζονται με τα τσιμεντοειδή υλικά επισκευής (μεγαλύτερος χρόνος ζωής επισκευής). Δεν έχει διερευνηθεί ακόμα πλήρως η συμπεριφορά των γεωπολυμερών ως επισκευαστικών υλικών δομικών στοιχείων, όμως έχουν γίνει προσπάθειες από κάποιους ερευνητές για την χρησιμοποίησή τους στην επισκευή και συντήρηση στοιχείων από σκυρόδεμα.

Τα γεωπολυμερή χρησιμοποιούνται συνήθως ως προσμίξεις και χρησιμεύουν ως μειωμένης απορρόφησης πλαστικοποιητές που παράγουν κονιάματα με καλή εργασιμότητα και χαμηλότερη συρρίκνωση σε χαμηλότερες αναλογίες νερού-τσιμέντου. Πρόσθετα πολυμερών στα υλικά επισκευής δείχνουν μικρή μείωση της διαπερατότητας του νερού, αλλά ταυτόχρονα αυξάνουν τις μακροπρόθεσμες παραμορφώσεις από συρρίκνωση και ερπυσμό.

Η συρρίκνωση των γεωπολυμερικών επισκευαστικών υλικών είναι πολύ πιο ευαίσθητη σε σχέση με το σκυρόδεμα. Κατά συνέπεια, τέτοιες επισκευές θα είναι πολύ πιο επιρρεπείς σε ρωγματώσεις συρρίκνωσης σε ξηρό περιβάλλον, σε σύγκριση με το απλό σκυρόδεμα.

Η παρουσία γεωπολυμερούς στο υλικό επισκευής μειώνει επίσης την υδατοπερατότητά του. Το μέτρο ελαστικότητας των γεωπολυμερικών επισκευαστικών κονιαμάτων είναι μικρότερο από εκείνο των τσιμεντοειδών επισκευαστικών κονιαμάτων. Η ηλεκτρική αντίσταση είναι επίσης μεγαλύτερη και παρατηρείται ενισχυμένη ενανθράκωση σε ορισμένα από αυτά.

Πρέπει να υπογραμμιστεί ότι η χρήση των γεωπολυμερών ως επισκευαστικά υλικά δομικών στοιχείων δεν έχει ως στόχο την αντικατάσταση των τσιμεντοειδών και των υπόλοιπων επισκευαστικών υλικών σε όλες τις εφαρμογές τους. Παρόλα αυτά, οι αξιοσημείωτες ιδιότητές τους τα καθιστούν ελκυστικά όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε επισκευές στις οποίες οι προδιαγραφές ασφάλειας και οι συνθήκες λειτουργίας απαιτούν τη χρήση υλικών με καλή συμπεριφορά σε ακραίες συνθήκες ή η επίδοση των συμβατικών επισκευαστικών υλικών κρίνεται ανεπαρκής. Εντούτοις, η χρήση τους περιορίζεται, κυρίως λόγω της έλλειψης πειραματικών δεδομένων σχετικά με την σύνθεση και την σταθερότητα των ιδιοτήτων τους, αλλά και εξαιτίας πρακτικών προβλημάτων που προκύπτουν κατά την εφαρμογή τους. Η σύγχρονη έρευνα στην τεχνολογία των γεωπολυμερών έχει ως σκοπό, λοιπόν, τόσο την κάλυψη αυτής της έλλειψης όσο και την επίλυση των προβλημάτων, γεγονός το οποίο θα καταστήσει δυνατή την διεύρυνση της χρήσης αυτών των βελτιωμένων προϊόντων στις επισκευές, με όλες τις ωφέλειες που συνεπάγεται κάτι τέτοιο [3, 9, 15, 17, 22, 29, 43].

Κεφάλαιο 3 – ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΘΕΜΑΤΟΣ

Η συντήρηση και η επισκευή των δομικών υλικών απασχολούν παγκοσμίως τον τομέα της βιομηχανίας κατασκευών. Αρκετά υλικά έχουν προταθεί ως επισκευαστικά δομικών στοιχείων και η έρευνα συνεχίζεται για την ανεύρεση νέων, πιο αποδοτικών προϊόντων.

Τα γεωπολυμερή αποτελούν μια καινούργια τεχνολογία στον τομέα των επισκευαστικών υλικών και προκύπτουν μετά από αλκαλική ενεργοποίηση αργιλοπυριτικών πρώτων υλών. Γενικά, εμφανίζουν άμορφη, τρισδιάστατη, μεγάλου μήκους δομή και συνήθως παρουσιάζουν βελτιωμένες ιδιότητες σε σχέση με τα συμβατικά υλικά. Η διαδικασία παραγωγής τους εμφανίζει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής δομικών υλικών, όπως η απλότητα και διαθεσιμότητα των πρώτων υλών, η αξιοποίηση βιομηχανικών παραπροϊόντων, η εξοικονόμηση ενέργειας και άλλα, που τα καθιστούν ανταγωνιστικά προς τα υπόλοιπα επισκευαστικά υλικά.

Το τσιμέντο αποτελεί το κυριότερο δομικό και επισκευαστικό υλικό παγκοσμίως. Το τσιμέντο αποτελεί ένα τυποποιημένο προϊόν και η χρήση του απαιτεί τη συμμόρφωση σε κάποιες πολύ αυστηρές προδιαγραφές. Η έρευνα στην τεχνολογία του τσιμέντου έχει δώσει αποτελέσματα σχετικά με τη σύνθεση και τις ιδιότητές του.

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη της αξιοποίησης των γεωπολυμερών ως επισκευαστικών υλικών σκυροδέματος και η σύγκριση της συμπεριφορά τους με τσιμεντοκονιάματα.

Στην συγκεκριμένη εργασία παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο τσιμεντοειδή και γεωπολυμερή επισκευαστικά υλικά, τα οποία αφού εφαρμόστηκαν για την επισκευή δοκιμίων σκυροδέματος, χρησιμοποιήθηκαν για μετρήσεις / δοκιμές ανθεκτικότητας με στόχο τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας της επισκευής, καθώς και των επιμέρους επισκευαστικών υλικών. Πραγματοποιήθηκε λοιπόν χαρακτηρισμός των υλικών και των ιδιοτήτων τους με περίθλαση ακτίνων Χ και μέτρηση της αντοχής τους σε θλίψη, ενώ παράλληλα εξετάστηκε η υδατοαπορροφητικότητα των επισκευασμένων δοκιμίων και διενεργήθηκαν οπτικές επιθεωρήσεις και κύκλοι δοκιμών ξήρανσης – εμβάπτισης, καθώς και δοκιμές συνάφειας.

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την διεκπεραίωση της μεταπτυχιακής εργασίας.



ΣΧΗΜΑ 4: Διαγραμματική ανάλυση μεταπτυχιακής εργασίας

Από τα αποτελέσματα αναμένεται να προκύψει η δυνατότητα της χρησιμοποίησης των γεωπολυμερών ως επισκευαστικών υλικών δομικών στοιχείων καθώς και οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά τους. Ακόμα, αναμένεται να καθοριστεί η αποτελεσματικότητα των επισκευών και η συγκριτική συμπεριφορά των χρησιμοποιούμενων υλικών επισκευής.

Κεφάλαιο 4 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

4.1 ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΡΟΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗ

4.1.1 Χαρακτηρισμός υλικών – Σύνθεση σκυροδέματος

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η δυνατότητα της χρήσης γεωπολυμερών ως επισκευαστικών υλικών δομικών στοιχείων. Ως υλικά προς επισκευή επιλέχθηκαν δοκίμια σκυροδέματος. Χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου CEM II/B-M (P-L) 32.5 N. Τα δοκίμια σκυροδέματος έγιναν με περιεκτικότητα σε τσιμέντο 350 kg/m^3 και λόγο νερού προς τσιμέντο $W/C=0.60$ ($W_{\text{efficient}}/C=0.52$). Χρησιμοποιήθηκαν 800 kg/m^3 χονδρόκοκκα αδρανή (μέγιστου κόκκου 16 mm) και 1010 kg/m^3 ασβεστολιθική άμμος. Τέλος χρησιμοποιήθηκε υπερρευστοποιητής τύπου CHEM SPL 24 της Domylo Ltd σε αναλογία 2.5 kg/m^3 . Η κάθιση του νωπού σκυροδέματος ήταν 110 mm , ο περιεχόμενος αέρας $1.90\% \text{ w/w}$ και το μοναδιαίο βάρος 2335 kg/m^3 . Παρασκευάστηκαν κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 200 mm . Τα δοκίμια διατηρήθηκαν στη μήτρα για 24 h . Στη συνέχεια συντηρήθηκαν σε νερό για 6 ημέρες σε θερμοκρασία εργαστηρίου και κατόπιν παρέμειναν στο εργαστηριακό περιβάλλον για 21 ημέρες ($25 \pm 2^\circ\text{C}$). Η αντοχή θλίψης 28 ημερών μετρήθηκε 32.6 MPa . Τα δοκίμια κόπηκαν σε τροχό και προέκυψαν επιμέρους 7 δοκίμια ύψους 90 mm .

4.1.2 Προετοιμασία δοκιμών προς επισκευή

Τα 7 δοκίμια σκυροδέματος, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως δομικά στοιχεία προς επισκευή στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, υπέστησαν ειδική προετοιμασία πριν την πλήρωσή τους με τα επισκευαστικά υλικά και την μελέτη της συμπεριφοράς τους σε εργαστηριακές δοκιμές.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε διάνοιξη 8 οπών σε κάθε δοκίμιο, διαμέτρου 10 mm και βάθους 30 mm , με τρυπάνι. Στη συνέχεια, τα δοκίμια κόπηκαν σε τροχό κατά 15 mm περίπου με στόχο την εξομάλυνση της επιφάνειάς τους. Τέλος, ακολούθησε διατήρησή τους σε συνθήκες εργαστηρίου μέχρι την επισκευή τους και τη χρήση τους για τις μετρήσεις ανθεκτικότητας.

4.2 ΕΠΙΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Για την παρασκευή των επισκευαστικών υλικών που θα εφαρμοστούν στα δοκίμια σκυροδέματος (δομικά στοιχεία), πραγματοποιήθηκαν 7 συνθέσεις με τσιμεντοειδή και με γεωπολυμερή. Σκοπός είναι η διερεύνηση της συνάφειας του σκυροδέματος με τα γεωπολυμερή από ιπτάμενη τέφρα ή μετακαολίνη και σύγκριση της αντίστοιχης συνάφειας με τα τσιμεντοκονιάματα. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι 7 συνθέσεις επισκευαστικών υλικών καθώς και η κωδικοποίησή τους.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Συνθέσεις επισκευαστικών υλικών

α/α	Κωδικός	Περιγραφή
1	GMP	Γεωπολυμερική πάστα μετακαολίνη
2	GMM	Γεωπολυμερικό κονίαμα μετακαολίνη
3	GFP	Γεωπολυμερική πάστα ιπτάμενης τέφρας
4	GFM	Γεωπολυμερικό κονίαμα ιπτάμενης τέφρας
5	CPM	Τυπικό τσιμεντοκονίαμα
6	CFM	Τσιμεντοκονίαμα με ιπτάμενη τέφρα
7	CMM	Τσιμεντοκονίαμα με μετακαολίνη

Πριν την παρασκευή των επισκευαστικών υλικών, πραγματοποιήθηκε ο πλήρης χαρακτηρισμός των πρώτων υλών, ο οποίος περιέλαβε τον προσδιορισμό της χημικής σύστασης μέσω XRF καθώς και την ταυτοποίηση των ορυκτολογικών φάσεων με περίθλαση ακτίνων X – XRD.

Στον Πίνακα 2 δίνονται οι χημικές αναλύσεις των πρώτων υλών, ενώ στα Σχήματα 5 και 6 οι ορυκτολογικές φάσεις τους.

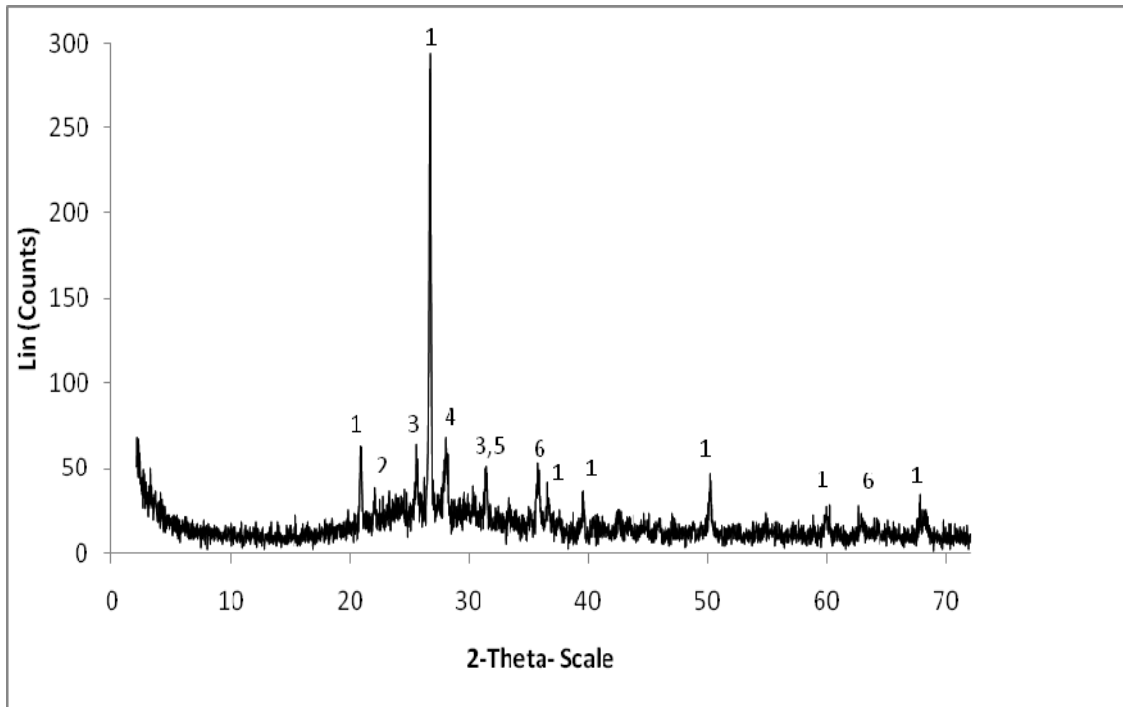
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: Χημική ανάλυση των πρώτων υλών

Οξείδιο	Ιπτάμενη Τέφρα	Μετακαολίνης	CEM I 42.5
SiO ₂	54.68	54.56	20.34
Al ₂ O ₃	16.42	43.56	4.68
Fe ₂ O ₃	7.89	1.47	3.91
CaO	8.28	0.03	63.62
MgO	5.17	0.04	3.44
K ₂ O	2.22	0.31	0.55
Απώλεια Πύρωσης	1.99	0.7	1.97

Η ιπτάμενη τέφρα που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα υλικό το οποίο όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2 περιέχει μεγάλες ποσότητες πυριτίου και αργιλίου, άρα μπορεί να αποτελέσει καλή πρώτη ύλη για τη σύνθεση γεωπολυμερών. Το ίδιο ισχύει και για τον μετακαολίνη.

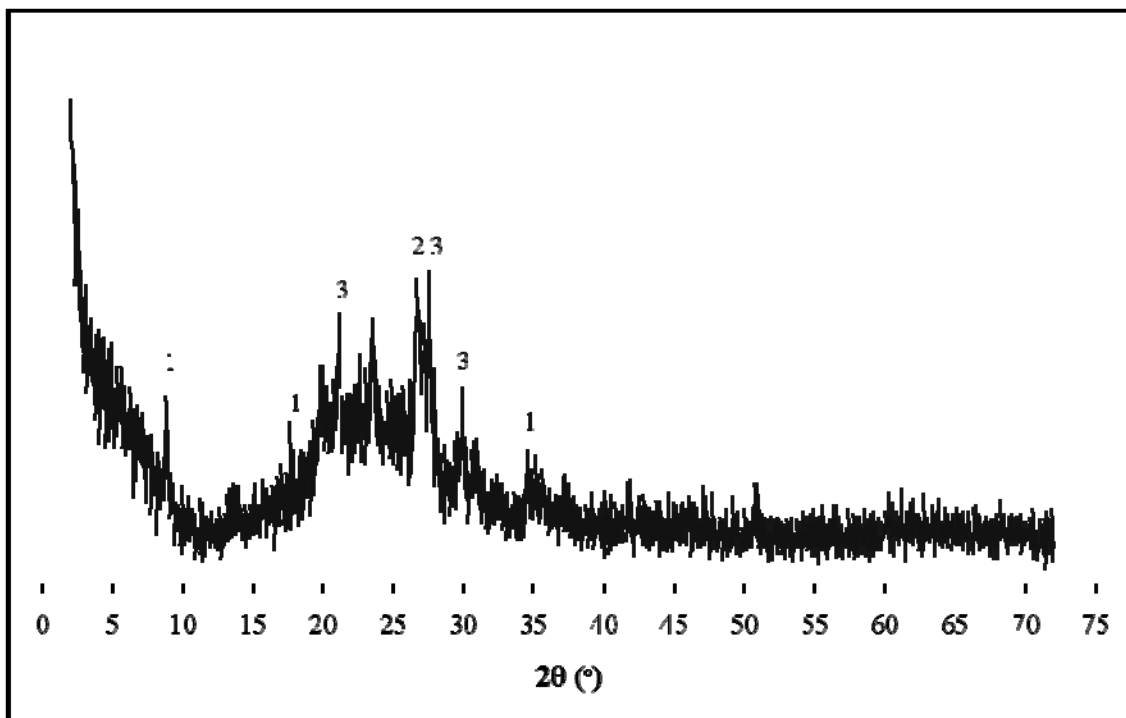
Στο Σχήμα 5 φαίνονται οι κύριες ορυκτολογικές φάσεις που περιέχονται στην ιπτάμενη τέφρα, οι οποίες είναι ο χαλαζίας, ο χριστοβαλίτης, ο ανυδρίτης, οι άστριοι, ο γκελενίτης και ο μαγγελμίτης. Η καμπύλη που εμφανίζεται μεταξύ 20 και 35° υποδεικνύει ότι η ιπτάμενη τέφρα περιέχει και ένα ποσοστό άμορφης φάσης.

Στο Σχήμα 6 φαίνονται οι κύριες ορυκτολογικές φάσεις που περιέχονται στον μετακαολίνη, οι οποίες είναι ο ιλλίτης, ο χαλαζίας και οι άστριοι.



Σχήμα 5: Διάγραμμα XRD ιπτάμενης τέφρας

1. Χαλαζίας, 2. Χριστοβαλίτης, 3. Ανυδρίτης, 4. Άστριοι, 5. Γκελενίτης, 6. Μαγγελμίτης



ΣΧΗΜΑ 6: Διάγραμμα XRD εμπορικού μετακαολίνης

1: ιλλίτης, 2: χαλαζίας, 3: άστριοι

4.2.1 Σύνθεση γεωπολυμερών

Η σύνθεση των γεωπολυμερών περιλαμβάνει δύο στάδια:

- Την ανάμειξη της αργιλοπυριτικής πρώτης ύλης με το διάλυμα ενεργοποίησης
- Την ωρίμανση των δοκιμών σε συνθήκες περιβάλλοντος. Δηλαδή, δεν χρησιμοποιήθηκαν οι συνήθεις συνθήκες ωρίμανσης μέσα στις μήτρες σε θερμοκρασία 70° C για 48 h μετά από παραμονή σε συνθήκες ηρεμίας για 2 h. Πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχουν διφορούμενες μελέτες για το αν μπορούν να προκύψουν γεωπολυμερή με ικανοποιητικές αντοχές και ιδιότητες χωρίς θέρμανση. Στην περίπτωση μας, οι αντοχές που προέκυψαν είναι ικανοποιητικές, μικρότερες βέβαια από τις αντίστοιχες αναφοράς. Η επιλογή της συγκεκριμένης διαδικασίας ωρίμανσης, και όχι της θερμικής ωρίμανσης, οφείλεται στην χρήση για την οποία προορίζονται τα γεωπολυμερή. Η ωρίμανσή τους πρέπει να γίνει εντός των δομικών στοιχείων τα οποία επισκεύασαν, συνεπώς η θέρμανση του συστήματος πλέον (δομικό στοιχείο – γεωπολυμερές) δεν είναι εφικτή.

Για την σύνθεση γεωπολυμερών εκτός από την αργιλοπυριτική πρώτη ύλη (μετακαολίνη, ιπτάμενη τέφρα) απαιτείται και η παρουσία ενός ισχυρά αλκαλικού διαλύματος. Το διάλυμα αυτό παρασκευάστηκε σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε σύνθεσης, δηλαδή οι ποσότητες σε καυστικά αλκάλια, διαλυτό πυρίτιο/αργίλιο και νερό προκύψαν από τους μοριακούς λόγους που απαιτεί κάθε σύνθεση. Τα αντιδραστήρια που χρησιμοποιήθηκαν για τα διαλύματα ενεργοποίησης είναι:

- Πηγή αλκαλικού ιόντος: NaOH ή KOH
- Πηγή διαλυτού Si: υδατικό κολλοειδές διάλυμα πυριτίας 50% κ. β.

Για την παρασκευή των διαλυμάτων ενεργοποίησης, πραγματοποιείται διαλυτοποίηση της επιθυμητής ποσότητας καυστικού αλκαλίου σε απιονισμένο νερό, αντίδραση εξαιρετικά εξώθερμη, γι' αυτό και προτού γίνει η προσθήκη οποιουδήποτε άλλου αντιδραστηρίου πρέπει η θερμοκρασία του διαλύματος να επανέλθει στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στη συνέχεια, και ενώ το αλκαλικό διάλυμα βρίσκεται υπό συνεχή ανάδευση, προστίθεται σταδιακά η πηγή διαλυτού Si.

Η ανάδευση του διαλύματος συνεχίζεται μέχρι πλήρους διαλυτοποίησης, ενώ το διάλυμα αφήνεται σε αεροστεγή συσκευασία, για τουλάχιστον 24 h πριν τη χρήση έτσι ώστε να επέλθει ισορροπία.

Η ανάμειξη των πρώτων υλών έγινε σε ειδικό αναδευτήρα. Κατά την ανάμειξη τοποθετήθηκε πρώτα το διάλυμα ενεργοποίησης και στη συνέχεια, σταδιακά και ενώ το μίγμα αναδευόταν προστέθηκε πρώτα η αργιλοπυριτική πρώτη ύλη και έπειτα η άμμος (μόνο στις συνθέσεις 2, 4 - κονιόματα). Η ασβεστολιθική άμμος είχε προηγουμένως κοσκινιστεί στα 2,36 mm. Η

μηχανική ανάδευση συνεχίστηκε μέχρι την πλήρη ομογενοποίηση του μίγματος. Κατόπιν, ένα μέρος του μίγματος χυτεύθηκε σε ανοξείδωτες μήτρες 5x5x5 cm οι οποίες δονήθηκαν για να απομακρυνθεί ο εγκλωβισμένος αέρας. Οι μήτρες αφού καλύφθηκαν, αφέθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για να ολοκληρωθεί η διεργασία του γεωπολυμερισμού και διατηρήθηκαν μέχρι τη χρήση τους για τον χαρακτηρισμό των υλικών με XRD και την μέτρηση των αντοχών τους.

Το υπόλοιπο μίγμα χρησιμοποιήθηκε για την επισκευή των δοκιμίων σκυροδέματος, όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 4.2.3.

Παρασκευάστηκαν 4 διαφορετικές συνθέσεις γεωπολυμερων. Στην κάθε σύνθεση παρασκευάζονται 3 κυβικά δοκίμια. Τα γεωπολυμερή αυτά κωδικοποιούνται ως εξής, όπως έχει ήδη αναφερθεί στον Πίνακα 1:

1. GMP → Γεωπολυμερική πάστα μετακαολίνη
2. GMM → Γεωπολυμερικό κονίαμα μετακαολίνη
3. GFP → Γεωπολυμερική πάστα ιπτάμενης τέφρας
4. GFM → Γεωπολυμερικό κονίαμα ιπτάμενης τέφρας

Οι ποσότητες που απαιτούνται για τις συνθέσεις των γεωπολυμερών, καθώς και οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3: Σύσταση γεωπολυμερικών συνθέσεων

		GMP	GMM	GFP	GFM
Σύνθεση	<i>IT (g)</i>	-	-	700	550
	<i>Μετακαολίνης (g)</i>	400	320	-	-
	<i>Άμμος (g)</i>	-	320	-	550
	<i>KOH (g)</i>	194.96	155.97	-	-
	<i>NaOH (g)</i>	-	-	90.15	70.83
	<i>sol 50% πυριτίας (mL)</i>	146.44	117.16	96.58	75.89
	<i>H₂O (mL)</i>	235.76	242.72	310	320
	Παράμετροι	<i>Συνδεδετικό υλικό/άμμος</i>	-	1	-
<i>M_{στερεών}/m_{υγρών}</i>		2.05	2.7	2.4	2.4
<i>R/Al</i>		1	1	1	1
<i>[Si]/R²O</i>		1	1	1	1

Ο λόγος $m_{\text{solids}}/m_{\text{liquids}}$ διαφοροποιείται ανάλογα με τη μάζα της άμμου που πρέπει να προστεθεί, καθώς η άμμος απορροφά ένα μέρος του νερού.

Γενικά, η προσθήκη νερού στις συνθέσεις μειώνει τις αντοχές και αυξάνει την εργασιμότητα. Εν κατακλείδι, για την σύνθεση των γεωπολυμερών απαιτείται η ελάχιστη ποσότητα νερού για την ανάμιξη των πρώτων υλών και τον γεωπολυμερισμό, αλλά απόκλιση από την ποσότητα αυτή οδηγεί σε προϊόντα με αυξημένο πορώδες και μειωμένες αντοχές.

4.2.2 Σύνθεση τσιμεντοκονιαμάτων

Παρασκευάστηκαν 3 διαφορετικές συνθέσεις τσιμεντοκονιαμάτων. Στην κάθε σύνθεση παρασκευάζονται 3 κυβικά δοκίμια διαστάσεων 5x5x5 cm. Τα τσιμεντοκονιάματα αυτά κωδικοποιούνται ως εξής, όπως έχει ήδη αναφερθεί στον Πίνακα 1:

5. CPM → Τυπικό τσιμεντοκονίαμα
6. CFM → Τσιμεντοκονίαμα με ιπτάμενη τέφρα
7. CMM → Τσιμεντοκονίαμα με μετακαολίνη

Ο τρόπος υπολογισμού των ποσοτήτων της κάθε σύνθεσης έγινε με βάση τις πυκνότητες των επιμέρους υλικών. Το είδος του τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκε είναι CEM I 42.5 (Πίνακας 2) και υπερρρευστοποιητής τύπου CHEM SPL 24 της Domylo Ltd. Ο λόγος άμμου / τσιμεντοειδές είναι 2,5. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται οι συστάσεις κάθε σύνθεσης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4: Συνθέσεις τσιμεντοκονιαμάτων

	Τσιμέντο (g)	IT (g)	Μετακαολίνης (g)	Άμμος (g)	Νερό (mL)	Υπερρρευστοποιητής (mL)
CPM	330	-	-	825	188	6
CFM	231	99	-	825	198	4
CMM	297	-	33	825	210	5

Η ανάμιξη των πρώτων υλών έγινε σε ειδικό αναδευτήρα σύμφωνα με το EN 196-1. Τοποθετήθηκε πρώτα το νερό στον αναμεικτήρα και μετά, σταδιακά και ενώ το μίγμα βρισκόταν υπό σταθερή ανάμιξη, προστέθηκε πρώτα το τσιμέντο και έπειτα η άμμος.

Η μηχανική ανάδευση συνεχίστηκε μέχρι την πλήρη ομογενοποίηση του μίγματος με ρυθμό:

- χαμηλή ταχύτητα για 1 min
- υψηλή ταχύτητα για 30 sec
- παύση για 90 sec
- χαμηλή ταχύτητα για 1 min

Κατόπιν, ένα μέρος του μίγματος χυτεύθηκε σε ανοξειδωτες μήτρες 5x5x5 cm οι οποίες δονήθηκαν για να απομακρυνθεί ο εγκλωβισμένος αέρας και το μίγμα να συμπυκνωθεί. Οι μήτρες αφού καλύφθηκαν, αφήθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και διατηρήθηκαν μέχρι τη χρήση τους για τον χαρακτηρισμό των υλικών με XRD και την μέτρηση των αντοχών τους. Το υπόλοιπο μίγμα χρησιμοποιήθηκε για την επισκευή των δοκιμών σκυροδέματος, όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 4.2.3.

4.2.3 Εφαρμογή επισκευαστικών υλικών – Διαδικασία επισκευής

Μετά τη σύνθεσή τους τα υλικά επισκευής – γεωπολυμερή και τσιμεντοειδή – εφαρμόστηκαν επιτόπου στα 7 δοκίμια σκυροδέματος, τα οποία είχαν υποστεί ειδική προετοιμασία πριν την επισκευή τους. Συγκεκριμένα, οι οπές κάθε δοκιμίου σκυροδέματος πληρώθηκαν με διαφορετική σύνθεση επισκευαστικού υλικού. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με τη χρήση μικροσπάτουλας για την πλήρωση του υλικού και ενώ τα μίγματα ήταν ακόμα ρευστά με στόχο να καλυφθεί πλήρως η κάθε οπή. Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα επισκευασμένο δοκίμιο σκυροδέματος.



ΣΧΗΜΑ 7: Επισκευασμένο δοκίμιο σκυροδέματος

4.2.4 Χαρακτηρισμός και ιδιότητες επισκευαστικών υλικών

Για το χαρακτηρισμό και τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των επισκευαστικών υλικών χρησιμοποιήθηκαν η περίθλαση ακτίνων Χ (XRD) και η αντοχή σε θλίψη. Παρακάτω θα γίνει περιγραφή των μεθόδων ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκαν για τον χαρακτηρισμό και τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των τσιμεντοειδών και των γεωπολυμερών στην παρούσα εργασία.

ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ – XRD

Τα διαγράμματα περίθλασης ακτίνων Χ σκόνης λειοτριβημένου δείγματος λήφθηκαν χρησιμοποιώντας περιθλασίμετρο τύπου Siemens D-5000 της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ. Οι συνθήκες λειτουργίας είναι ακτινοβολία CuKα ($\lambda=1,5405 \text{ \AA}$), ένταση 30 mA, τάση 40 kV, μονοχρωμάτορας γραφίτη.

Η Περίθλαση ακτίνων Χ (X Ray Diffraction) βασίζεται στο φαινόμενο της περίθλασης μονοχρωματικής ακτινοβολίας ακτίνων Χ γνωστού μήκους κύματος λ , επάνω στα επίπεδα του κρυσταλλικού πλέγματος του εξεταζόμενου υλικού. Με βάση την τεχνική XRD ένα δείγμα του υλικού σε μορφή σκόνης τοποθετείται σε μια βάση και εκτίθεται σε ακτίνες Χ ενός σταθερού μήκους κύματος. Η ακτινοβολία περιθλάται και στην συνέχεια συλλέγεται. Από την γωνία περίθλασης θ μπορεί να προσδιοριστεί η απόσταση των πλεγματικών επιπέδων d με βάση τον νόμο του Braag ($n \cdot \lambda = 2d \sin \theta$, όπου n = ένας αριθμός (τάξη περίθλασης), λ = το μήκος κύματος της ακτίνας Χ, d = η απόσταση, θ = η γωνία περίθλασης) και στην συνέχεια να προσδιοριστεί η ταυτότητα του εξεταζόμενου υλικού καθώς η κάθε ένωση έχει τις δικές της χαρακτηριστικές αποστάσεις πλεγματικών επιπέδων.

Επειδή η ένταση της περιθλώμενης ακτινοβολίας σε κάθε γωνία θ είναι συνάρτηση της ποσότητας της κρυσταλλικής ένωσης μπορεί να πραγματοποιηθεί και ποσοτική ανάλυση μιας ένωσης αν μετρηθεί η ένταση της ακτινοβολίας σε μια επιλεγμένη διεύθυνση.

Σαν πηγή ακτινοβολίας ακτίνων Χ χρησιμοποιείται καθοδική λυχνία με κατάλληλα επιλεγμένο υλικό ανόδου. Ηλεκτρόνια τα οποία εκπέμπονται από την θερμαινόμενη κάθοδο επιταχύνονται προς την επιφάνεια της ανόδου. Τα άτομα του υλικού της ανόδου διεγείρονται από ένα μικρό ποσοστό της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων και εκπέμπουν ένα χαρακτηριστικό για κάθε υλικό φάσμα ακτίνων Χ.

Για να είναι η εκπεμπόμενη ακτινοβολία μονοχρωματική χρησιμοποιείται ειδικό φίλτρο το οποίο επιτρέπει την διέλευση καθορισμένου μήκους κύματος ακτινοβολίας.

Σε κάθε ταυτοποίηση φάσεων, λαμβάνεται υπ' όψη η χημική σύσταση του δείγματος και η λυχνία που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των ακτινών X που προσπίπτουν στο δείγμα. Βάσει των στοιχείων αυτών επιλέγονται οι κατάλληλοι βιβλιογραφικοί πίνακες – ακτινοδιαγράμματα. Η σύγκριση των γνωστών ακτινοδιαγραμμάτων με τα ληφθέντα οδηγούν στην ταυτοποίηση των περιεχομένων στο δείγμα φάσεων.

ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ

Οι αντοχές σε μονοαξονική ανεμπόδιση θλίψη μετρήθηκαν στο εργαστήριο της TITAN AE σε κατάλληλη πρέσα σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 196-1 και η ταχύτητα επιβολής δύναμης ήταν μέσα στα επιτρεπτά από το πρότυπο όρια.

4.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ - ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Για τον έλεγχο της ανθεκτικότητας των επισκευών εφαρμόστηκαν οι παρακάτω περιγραφόμενες μέθοδοι ενόργανης ανάλυσης.

4.3.1 Οπτική επιθεώρηση

ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ

Τα επισκευασμένα δοκίμια σκυροδέματος υποβλήθηκαν σε προσεκτική μακροσκοπική παρατήρηση ανά τακτά χρονικά διαστήματα με στόχο την αναγνώριση τυχόν αλλαγών στην επιφάνεια τους, αλλά και στη συνάφειά τους με τα υλικά επισκευής. Για το λόγο αυτό θεωρήθηκε αναγκαία η χρήση φωτογραφικής μηχανής.

ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ ΜΕ ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΟ

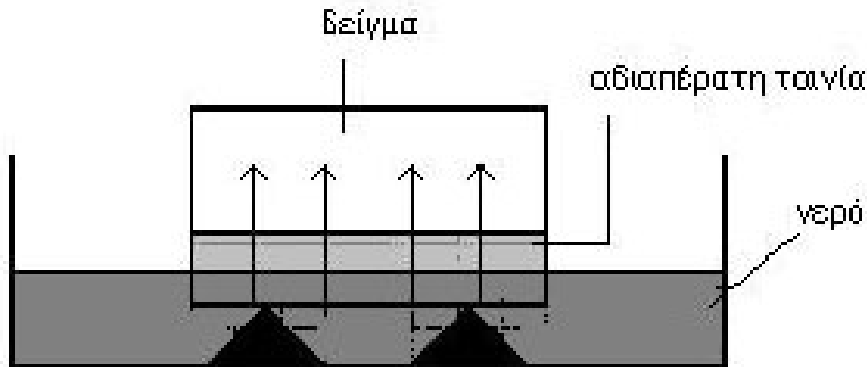
Πραγματοποιήθηκε στερεοσκοπική παρατήρηση της επιφάνειας των επισκευασμένων δοκιμίων σκυροδέματος ώστε να μελετηθεί η συνάφεια του υλικού προς επισκευή με το επισκευαστικό υλικό. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του στερεοσκοπίου MZ 6 του οίκου LEICA. Οι εικόνες που λήφθηκαν από το στερεοσκόπιο αναλύθηκαν χρησιμοποιώντας το λογισμικό ανάλυσης εικόνας Leica Application Suite του οίκου Leica. Γενικά, το στερεοσκόπιο βρίσκει εφαρμογές εκεί που χρειάζεται να παρατηρηθεί σε μεγέθυνση η εξωτερική μορφολογία ενός αντικείμενου. Με αυτό το όργανο επιτυγχάνεται στερεοσκοπική εικόνα του δείγματος από διαφορετική γωνία και με διαφορετική μεγέθυνση. Οι επιφάνειες συνήθως δε χρειάζονται καμία προετοιμασία.

4.3.2 Υδατοαπορροφητικότητα

Στη δοκιμή της υδατοαπορροφητικότητας υποβλήθηκαν τα 7 δοκίμια σκυροδέματος, πριν και μετά την επισκευή τους και από τις 2 πλευρές τους.

Αρχικά, τα δοκίμια ζυγίζονται και καταγράφεται το βάρος τους σε g. Έπειτα τοποθετούνται σε πυριατήριο στη θερμοκρασία των 80°C με σκοπό την ξήρανση τους. Τα δοκίμια μένουν στο πυριατήριο για 72 h οπότε και παρουσιάζουν σταθερό βάρος. Έπειτα, αφού αφήνονται να αποκτήσουν θερμοκρασία περιβάλλοντος, ζυγίζονται ξανά. Τέλος, τα δοκίμια, στα οποία έχει εφαρμοστεί πλευρική μόνωση, τοποθετούνται σταδιακά σε κατάλληλα δοχεία με νερό, σε ειδικά στηρίγματα έτσι ώστε να είναι βυθισμένα στο νερό σε βάθος περίπου 5mm. Οι χρόνοι μέτρησης κυμάνθηκαν από 10 έως 60 min (10, 20, 30, 45 και 60 min). Στο τέλος κάθε

προκαθορισμένου χρόνου παραμονής τους στο νερό, τα δοκίμια ζυγίζονταν και καταγράφονταν η διαφορά μάζας τους. Πριν τη μέτρηση της μάζας το επιφανειακό νερό του κάθε δοκιμίου απομακρύνεται με μια πετσέτα. Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται ένα σκαρίφημα της διάταξης μέτρησης.



ΣΧΗΜΑ 8: Πειραματική διάταξη μέτρησης υδατοαπορροφητικότητας

4.3.3 Ξήρανση – Εμβάπτιση

Για τη δοκιμή Wet-Dry (ξήρανσης-εμβάπτισης), χρησιμοποιήθηκαν τα 7 επισκευασμένα δοκίμια σκυροδέματος. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν συνολικά σε 50 κύκλους υγρού - ξηρού.

Οι συνθήκες κάθε κύκλου δοκιμής ξήρανσης - εμβάπτισης ήταν οι εξής:

- ✓ 4 h στους 80°C σε πυριαντήριο
- ✓ 4 h σε νερό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- ✓ Στο τέλος των ημερήσιων κύκλων τα δοκίμια παρέμεναν σε υγρό περιβάλλον, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Αναλυτικά η πειραματική διαδικασία είναι η ακόλουθη:

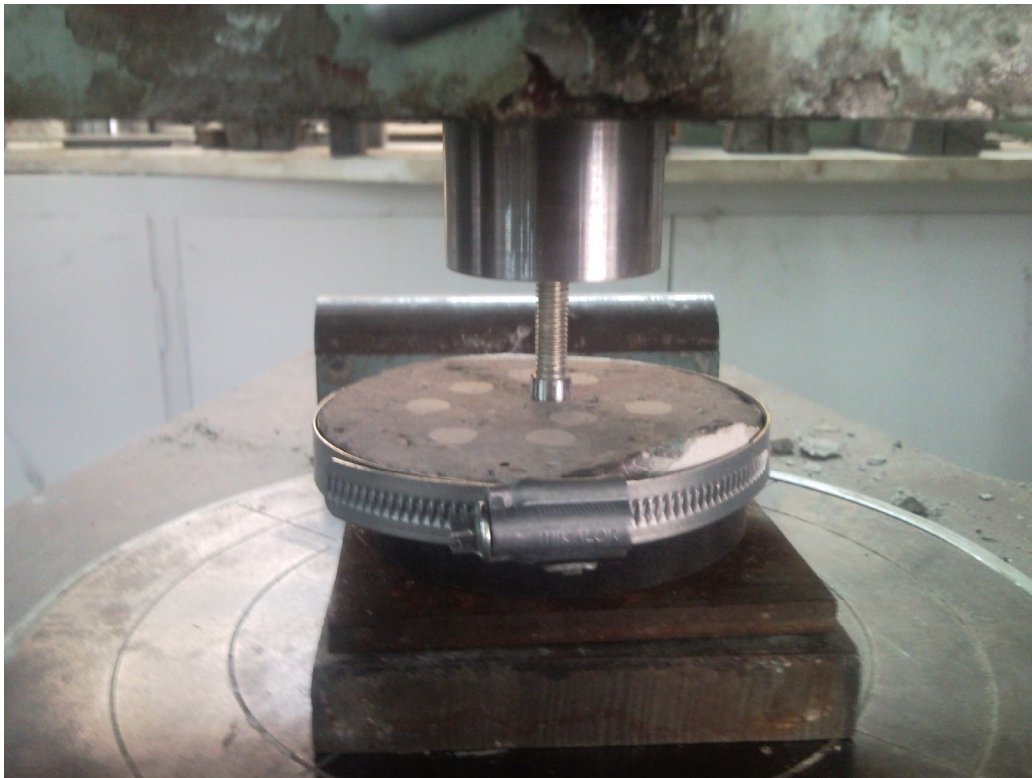
- ✓ Μέτρηση των αρχικών μαζών των δοκιμίων
- ✓ Τοποθέτηση σε νερό για 3 d έτσι ώστε τα δοκίμια να είναι κορεσμένα σε νερό
- ✓ Νέα ζύγιση των κορεσμένων σε νερό δοκιμίων
- ✓ Αρχή κύκλων ξήρανσης - εμβάπτισης

Κάθε 10 κύκλους δοκιμών, τα δοκίμια ζυγίζονταν ώστε να διερευνηθεί η συμπεριφορά τους, δηλαδή η πιθανή απώλεια μάζας τους, και γινόταν οπτική επιθεώρηση για τυχόν ρωγμές, μέχρι τους 50 κύκλους οπότε και τερματίστηκε η δοκιμή. Οι μετρήσεις της μάζας των

δοκιμίων έγιναν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μετά την παραμονή των δοκιμίων σε υγρό περιβάλλον για 24 h.

4.3.4 Δοκιμή συνάφειας

Τα 7 επισκευασμένα δοκίμια σκυροδέματος υπεβλήθησαν σε δοκιμές συνάφειας με στόχο την πιστοποίηση της αποτελεσματικότητας και της ανθεκτικότητας της επισκευής. Χρησιμοποιήθηκε η πρέσα με την οποία πραγματοποιούνται επίσης οι μετρήσεις των αντοχών σε θλίψη. Στην πρέσα προσαρμόστηκε ειδικό εξάρτημα, ώστε να ασκείται πίεση στην επισκευασμένη οπή (Σχήμα 9). Μετρείται η δύναμη που χρειάζεται να επιβληθεί σε κάθε δοκίμιο ώστε να αστοχήσει είτε το δοκίμιο (λόγω συνάφειας επισκευαστικού υλικού – υποβάθρου σκυροδέματος) είτε το ένεμα.



ΣΧΗΜΑ 9: Διάταξη δοκιμών συνάφειας

Κεφάλαιο 5 - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

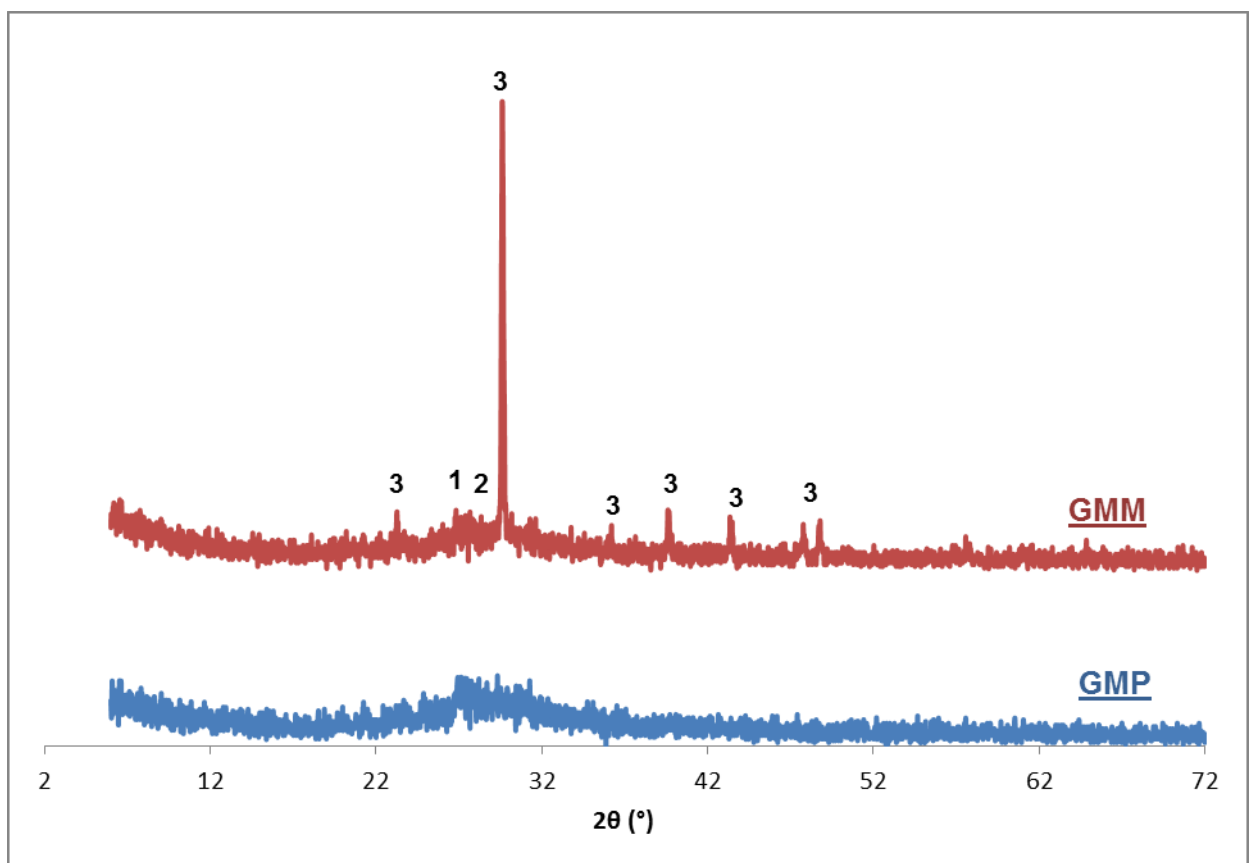
5.1 Χαρακτηρισμός και ιδιότητες υλικών

5.1.1 Περίθλαση ακτίνων X – XRD

Η παρουσίαση των κρυσταλλικών ενώσεων που υπάρχουν σε μία ουσία είναι δυνατόν να επιτευχθεί μέσω της τεχνικής περίθλασης ακτίνων X (XRD).

Για να προσδιοριστεί αν τελικά πραγματοποιήθηκε γεωπολυμερισμός και για να καθοριστεί το είδος των ενώσεων που υπάρχουν σε κάθε σύνθεση χρησιμοποιήθηκε το περιθλασίμετρο ακτίνων X Siemens D-5000.

Στο Σχήμα 10 παρουσιάζονται τα διαγράμματα XRD των γεωπολυμερικών συνθέσεων GMP και GMM με μετακαολίνη.

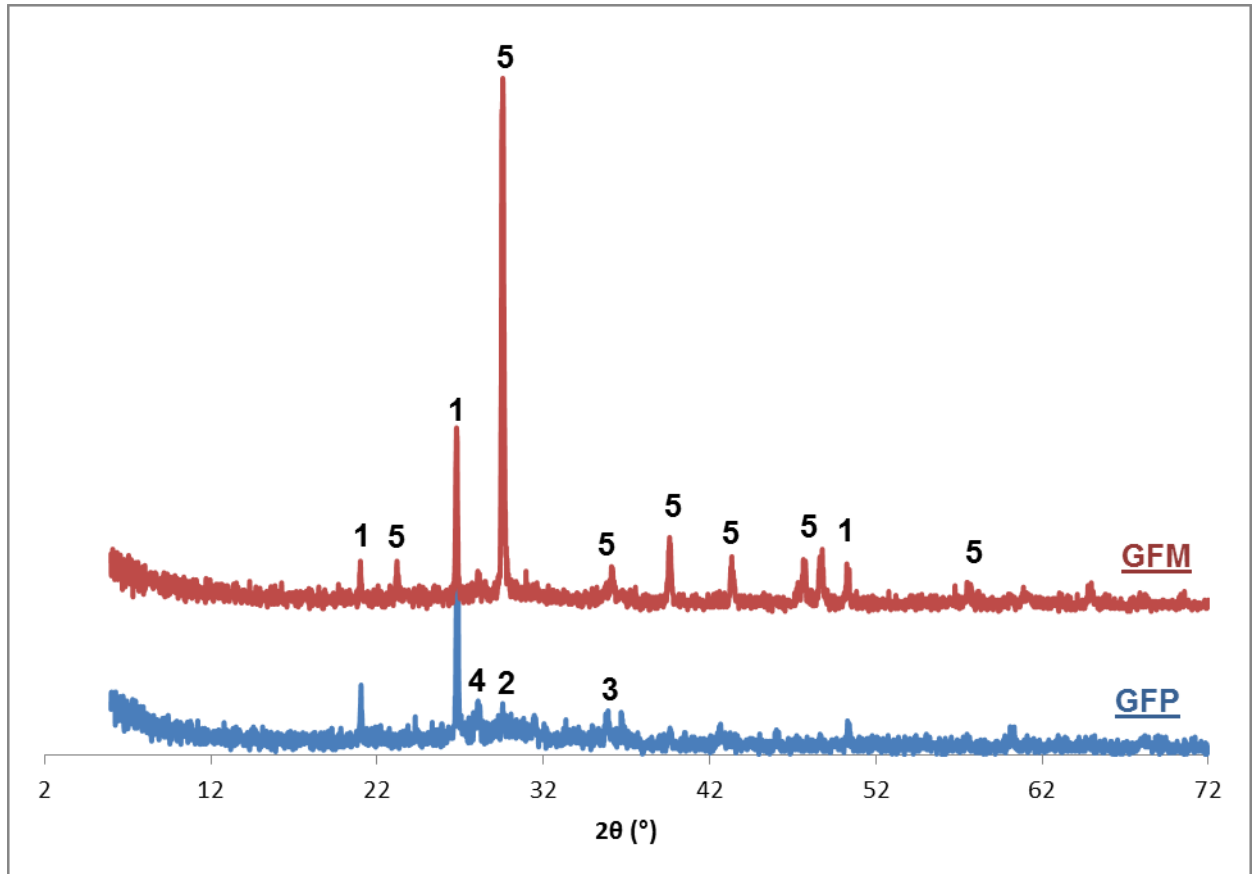


ΣΧΗΜΑ 10: Ακτινοδιάγραμμα XRD γεωπολυμερικής πάστας (GMP) και κονιάματος (GMM) μετακαολίνη
(1. Χαλαζίας, 2. Σανίδινο, 3. Καλσίτης)

Για το δείγμα GMP λαμβάνεται εικόνα άμορφου υλικού (γεωπολυμερισμός) και δεν ανιχνεύεται σχεδόν καμία κορυφή κρυσταλλικής φάσης από το όργανο, εκτός μικρών ποσοτήτων χαλαζία και αστρίου (σανίδινο).

Για το δείγμα GMM, παρατηρείται η εμφάνιση της κρυσταλλικής φάσης του καλσίτη λόγω της προσθήκης άμμου στη σύνθεση (κονίαμα).

Στο Σχήμα 11 παρουσιάζονται τα διαγράμματα XRD των γεωπολυμερικών συνθέσεων GFP και GFM με ιπτάμενη τέφρα.

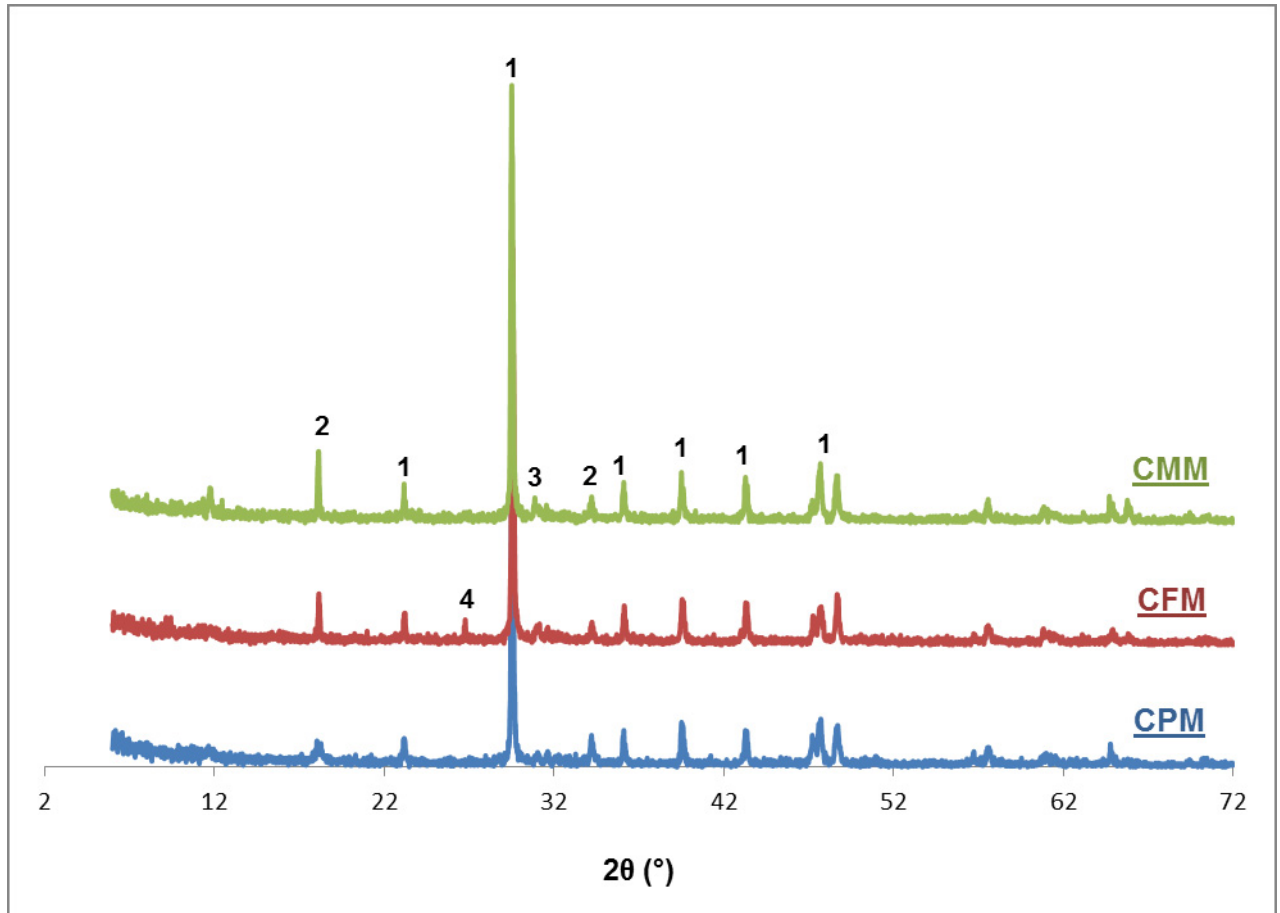


ΣΧΗΜΑ 11: Ακτινοδιάγραμμα XRD γεωπολυμερικής πάστας (GFP) και κονιάματος (GFM) ιπτάμενης τέφρας (1. Χαλαζίας, 2. Γκελενίτης, 3. Μαγγελμίτης, 4. Αλβίτης, 5. Καλσίτης)

Στο δείγμα GFP περιέχεται χαλαζίας, γκελενίτης, αλβίτης και μαγγελμίτης (κρυσταλλικές φάσεις της ιπτάμενης τέφρας που δεν καταναλώθηκαν κατά την αντίδραση γεωπολυμερισμού), ενώ στο δείγμα GFM παρατηρείται μόνο χαλαζίας και ασβεστίτης γιατί αναφερόμαστε σε κονίαμα.

Οι άλλες φάσεις του δείγματος GFP δεν είναι εμφανείς στο δείγμα GFM γιατί επικρατούν οι φάσεις του κονιάματος. Επιπλέον, παρατηρείται η απουσία νέων κρυσταλλικών φάσεων.

Στο Σχήμα 12 παρουσιάζονται τα διαγράμματα XRD των τσιμεντοκονιαμάτων CPM, CFM και CMM.



ΣΧΗΜΑ 12: Ακτινοδιάγραμμα XRD τσιμεντοκονιάματος με CEM I (CPM), με CEM I και ιπτάμενης τέφρας (CFM), με CEM I και μετακαολίνη (CMM)

(1. Καλσίτης, 2. Πορτλαντίτης, 3. Δολομίτης, 4. Χαλαζίας)

Στο δείγμα CPM ανιχνεύεται ασβεστίτης και πορτλαντίτης, στο CFM ανιχνεύονται επιπλέον δολομίτης και χαλαζίας και στο CMM ασβεστίτης, δολομίτης και πορτλαντίτης.

5.1.2 Αντοχή σε θλίψη

Οι αντοχές σε θλίψη μετρήθηκαν στα δοκίμια γεωπολυμερών και στα δοκίμια τσιμεντοκονιαμάτων μετά από 28 ημέρες και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5: Αντοχές σε θλίψη για τις συνθέσεις των επισκευαστικών υλικών

Δείγματα	Αντοχή σε θλίψη 28 ημερών (MPa)
<i>GMP</i>	42.6
<i>GMM</i>	34.3
<i>GFP</i>	28.5
<i>GFM</i>	13.4
<i>CPM</i>	59.0
<i>CFM</i>	51.8
<i>CMM</i>	54.6

Παρατηρείται ότι το δείγμα GMP παρουσιάζει την μεγαλύτερη αντοχή από τις γεωπολυμερικές συνθέσεις, ενώ από τα τσιμεντοκονιάματα το δείγμα CPM.

Γενικά, τα τσιμεντοκονιάματα υπερέχουν σε αντοχές ως προς τα γεωπολυμερή.

Όσο αφορά τα γεωπολυμερή, πρέπει να αναφερθεί η διαφορά στις αντοχές μεταξύ των παστών (GMP, GFP) και των κονιαμάτων (GMM, GFM). Οι πάστες έχουν μεγαλύτερες μηχανικές αντοχές από τα κονιάματα, λόγω της άμμου η οποία είναι αδρανής και δεν συμμετέχει στην αντίδραση του γεωπολυμερισμού. Μάλιστα, όσο ο λόγος binder/sand αυξάνει, τόσο μειώνονται οι μηχανικές αντοχές του γεωπολυμερικού κονιαματος, λόγω της μείωσης του ποσοστού της Ι.Τ. ή του μετακαολίνης που αποτελεί και το συνδετικό υλικό στη σύνθεση.

Ακόμα, θα πρέπει να τονιστεί ότι η ωρίμανση των δοκιμίων σε συνθήκες περιβάλλοντος και όχι η συνήθης ωρίμανση σε θερμοκρασία 70° C για 48, είχε μικρή αρνητική επίδραση στις αντοχές, όπως επίσης και το πρόσθετο νερό που χρησιμοποιήθηκε για τη βελτίωση της εργασιμότητας ορισμένων επισκευαστικών μιγμάτων.

5.2 Οπτική επιθεώρηση

5.2.1 Μακροσκοπική επιθεώρηση

Μακροσκοπική παρατήρηση πραγματοποιείται στα επισκευασμένα δοκίμια σκυροδέματος ανά διαστήματα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων / δοκιμών ανθεκτικότητας. Στον Πίνακα 6 παρουσιάζεται ένα χρονολόγιο των μακροσκοπικών παρατηρήσεων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6: Χαρακτηριστικά μακροσκοπικών επιθεωρήσεων

Παρατήρηση	Ημερομηνία	Πορεία πειραματικής διαδικασίας – Σημαντικές ενέργειες
M1	04-11-2011	Έναρξη κύκλων ξηρού – υγρού (6 ^{ος} κύκλος) 1 ^{ος} κύκλος μετρήσεων υδατοαπορροφητικότητας
M2	05-12-2011	22 ^{ος} κύκλος ξηρού – υγρού (μέσα δοκιμής)
M3	15-02-2012	Τέλος δοκιμής ξηρού – υγρού (50 ^{ος} κύκλος) Τέλος μετρήσεων υδατοαπορροφητικότητας

5.2.2 Επιθεώρηση με στερεοσκόπιο

Παρατήρηση με στερεοσκόπιο διενεργείται στα επισκευασμένα δοκίμια σκυροδέματος σε διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια των μετρήσεων / δοκιμών ανθεκτικότητας. Στον Πίνακα 7 παρουσιάζεται ένα χρονολόγιο των επιθεωρήσεων με στερεοσκόπιο.

ΠΙΝΑΚΑΣ 7: Χαρακτηριστικά επιθεωρήσεων με στερεοσκόπιο

Παρατήρηση	Ημερομηνία	Πορεία πειραματικής διαδικασίας
Σ1	29-11-2011	20 ^{ος} κύκλος ξηρού – υγρού
Σ2	07-12-2011	24 ^{ος} κύκλος ξηρού – υγρού
Σ3	23-01-2012	45 ^{ος} κύκλος ξηρού – υγρού

5.2.3 Αποτελέσματα

Η μελέτη της επιφάνειας των δοκιμίων με μακροσκοπική επιθεώρηση καθώς και με επιθεώρηση με στερεοσκόπιο επιβεβαίωσε τυχόν αλλαγές στο σύστημα, ενώ παράλληλα έδωσε μια αντικειμενική εικόνα της συνάφειας ανάμεσα στα επισκευαστικά υλικά και τα επισκευασμένα δοκίμια σκυροδέματος.





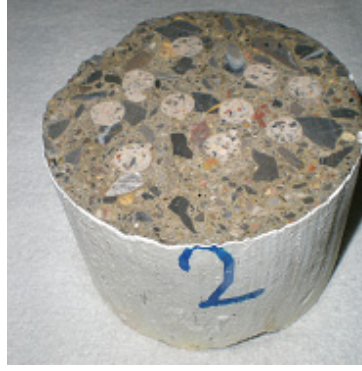
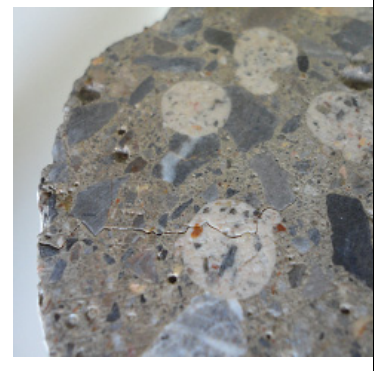


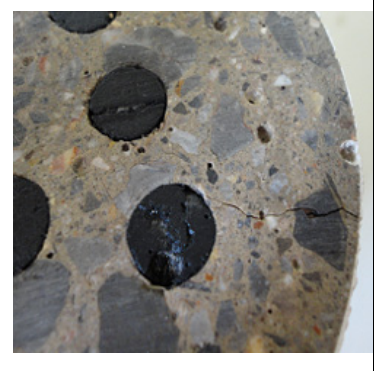
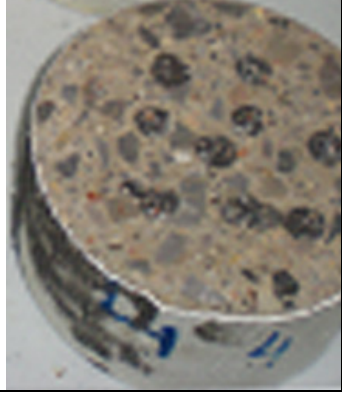


Στους Πίνακες 8 και 9 παρατίθενται οι εικόνες των μακροσκοπικών και στερεοσκοπικών επιθεωρήσεων αντίστοιχα κατά α/α παρατήρησης και κατά α/α δοκιμίου, η προσεκτική παρατήρηση των οποίων οδηγεί στις ακόλουθες παραδοχές:

Κατά τις επιθεωρήσεις M1 και M2, καθώς και Σ1 και Σ2 δεν παρατηρείται κάποια αλλαγή της επιφάνειας των επισκευασμένων δοκιμίων, ενώ κατά τις M3 και Σ3 επιθεωρήσεις παρατηρούνται ρωγμές διαφόρων μεγεθών στα δοκίμια με τις γεωπολυμερικές επισκευαστικές συνθέσεις σε αντίθεση με αυτά με τα τσιμεντοκονιάματα, τα οποία παραμένουν ανέπαφα.

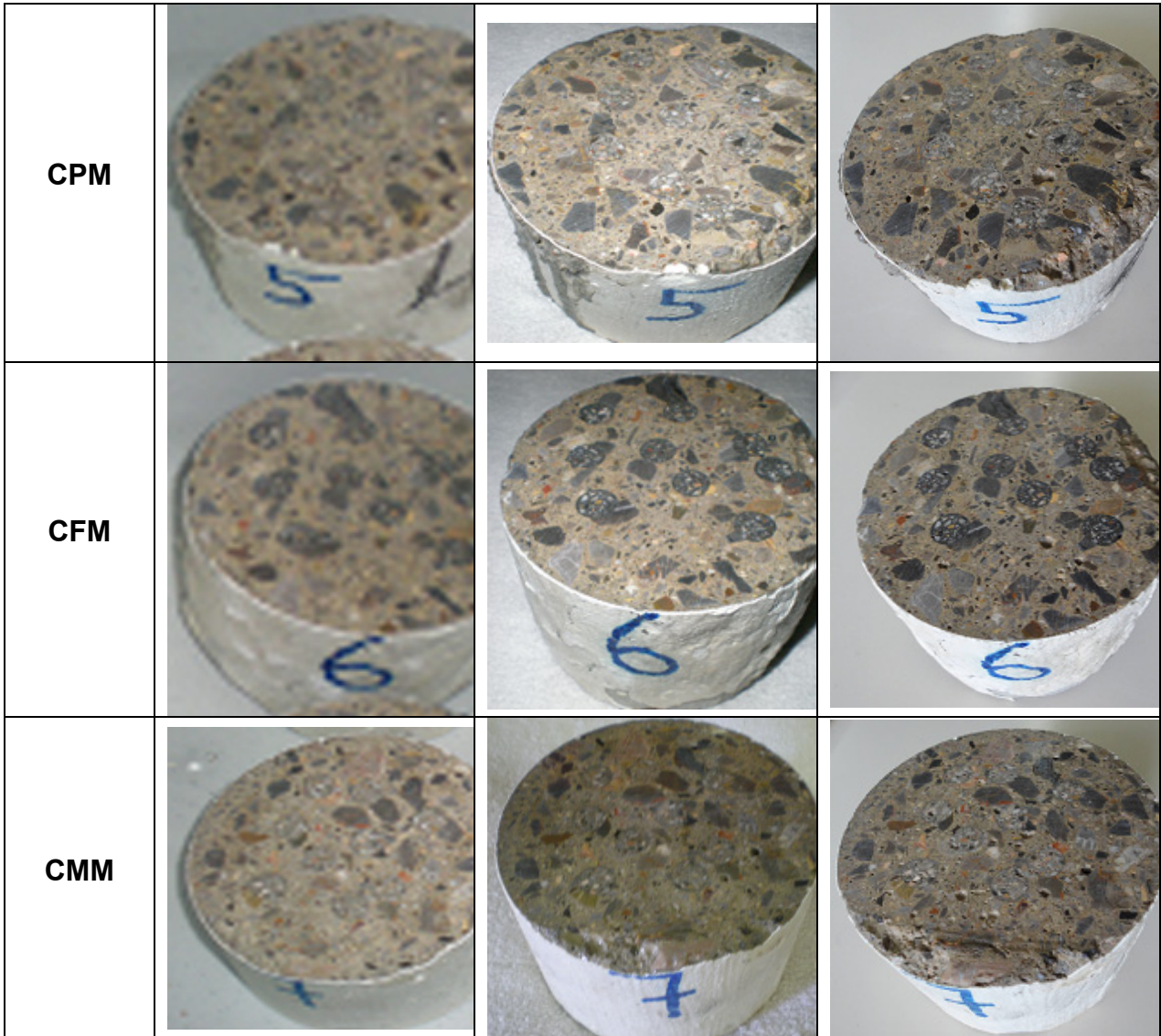
Δηλαδή μέχρι τα μέσα περίπου των κύκλων ξήρανσης – εμβάπτισης (~25^{ος} κύκλος), μακροσκοπικά δεν εμφανίζονται ρωγμές σε κανένα από τα δοκίμια. Από τον 35^ο κύκλο και μέχρι το τέλος των κύκλων ξηρού – υγρού τα επισκευασμένα με γεωπολυμερή δοκίμια παρουσιάζουν ρωγμές (στο σύνολο και στο επισκευαστικό υλικό) και παρατηρείται υποβάθμιση της συνάφειας μεταξύ του σκυροδέματος (υπόβαθρο) και του υλικού επισκευής. Είναι εμφανές ότι τα δοκίμια με γεωπολυμερή Ιπτάμενης Τέφρας έχουν ρηγματωθεί σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με αυτά με Μετακαολίνη. Επίσης, τα δοκίμια με πάστα επισκευαστικού υλικού παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με αυτά με κονίαμα. Τα επισκευασμένα με τσιμεντοκονιάματα δοκίμια σκυροδέματος εμφανίζουν σταθερή συμπεριφορά.

Συμπερασματικά, πρέπει να αναφερθεί ότι η δοκιμή wet – dry καταπόνησε τα δοκίμια λόγω των εναλλαγών στις συνθήκες παραμονής τους. Βέβαια, η εμφάνιση ρωγμών στα 4 από τα 7 δοκίμια ενδέχεται να οφείλεται στην ωρίμανσή τους. Δηλαδή, αμέσως μετά την επισκευή των δοκιμίων σκυροδέματος με τα επισκευαστικά υλικά, παρατηρείται διόγκωση και βελτίωση των ιδιοτήτων των επισκευασμένων δοκιμίων. Αμέσως μετά την ωρίμανσή τους, τα δοκίμια εμφανίζουν ρωγμές μη ορατές μακροσκοπικά, οι οποίες επιδεινώνονται με τους κύκλους ξηρού – υγρού και εμφανίζονται σε δεδομένη χρονική στιγμή μειώνοντας την αποτελεσματικότητα της επισκευής και τις αντοχές.

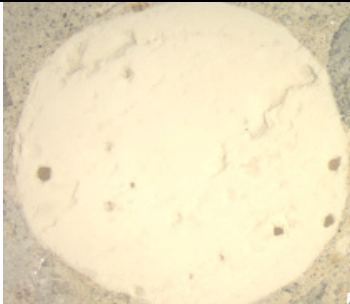

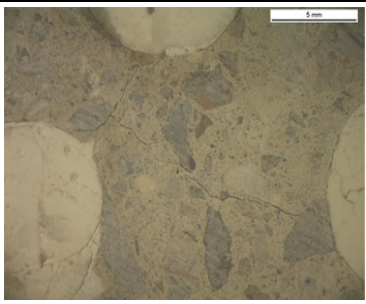
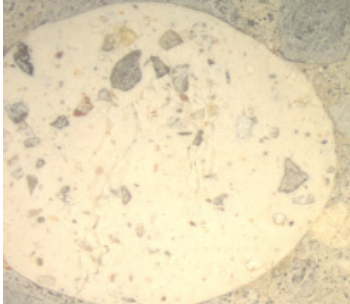

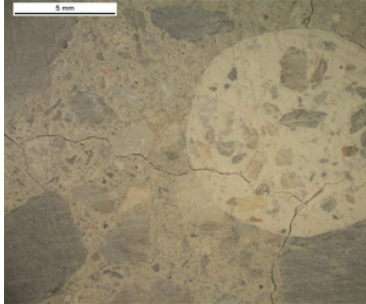
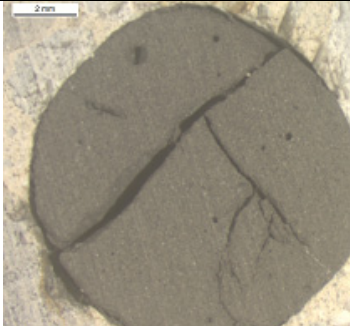

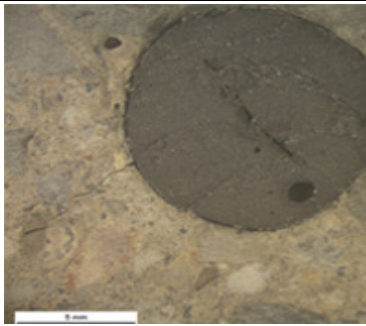
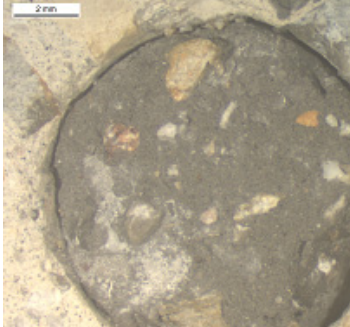

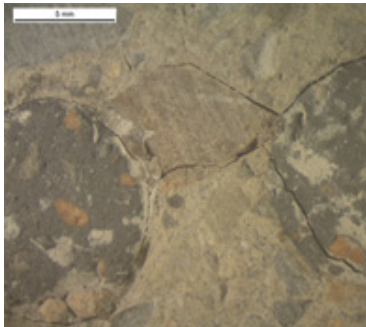
ΠΙΝΑΚΑΣ 8: Μακροσκοπική επιθεώρηση δοκιμίων σε διάφορες χρονικές περιόδους (σύμφωνα με Πίνακα 6)

Δοκίμιο	M1	M2	M3
GMP			
GMM			
GFP			
GFM			

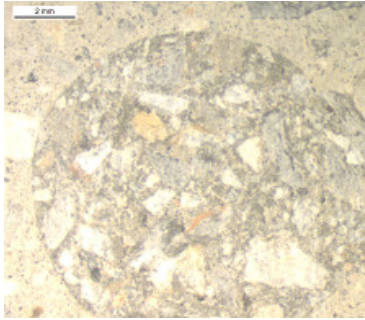
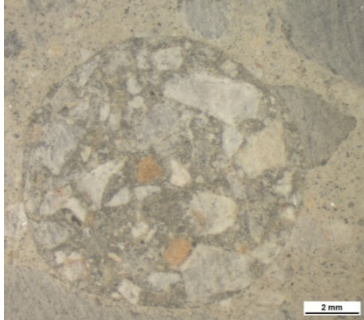
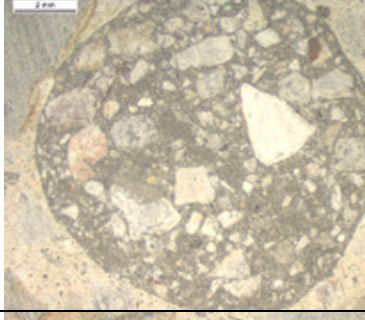
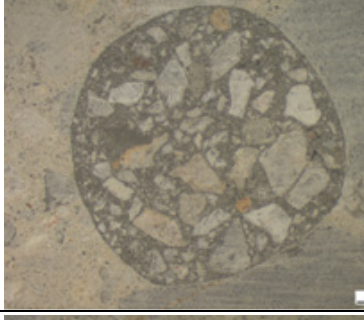


ΠΙΝΑΚΑΣ 8 (Συνέχεια)



ΠΙΝΑΚΑΣ 9: Στερεοσκοπική επιθεώρηση δοκιμίων σε διάφορες χρονικές περιόδους (σύμφωνα με Πίνακα 7)

Δοκίμιο	Σ1	Σ2	Σ3
GMP			
GMM			
GFP			
GFM			

ΠΙΝΑΚΑΣ 9 (Συνέχεια)

<p>CPM</p>			<p>-</p>
<p>CFM</p>			<p>-</p>
<p>CMM</p>			<p>-</p>

5.3 Υδατοαπορροφητικότητα

Η δοκιμή της υδατοαπορροφητικότητας μετράει το ρυθμό απορρόφησης νερού, που αποδίδεται στους τριχοειδείς πόρους, σε ένα δοκίμιο σκυροδέματος, το οποίο έχει τοποθετηθεί σε νερό. Αναφέρεται ότι η σύνθεση του σκυροδέματος και ο τύπος του τσιμέντου είναι παράμετροι που επιδρούν στον ρυθμό απορρόφησης. Για τη δοκιμή αυτή ισχύει η σχέση:

$$i = S \cdot t^{0.5} \text{ όπου:}$$

i : η συνολική αύξηση μάζας δοκιμίου ανά μονάδα επιφάνειας προσρόφησης (g/mm^2)

t : χρόνος (min)

S : υδατοαπορροφητικότητα (sorptivity) ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$)

Η παραπάνω σχέση δείχνει ότι η απορρόφηση του νερού ανά μονάδα επιφάνειας απορρόφησης είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου απορρόφησης. Άρα, το S προσδιορίζεται από την κλίση της συνάρτησης $i = f(t^{0.5})$ με τη χρήση ανάλυσης παλινδρόμησης.

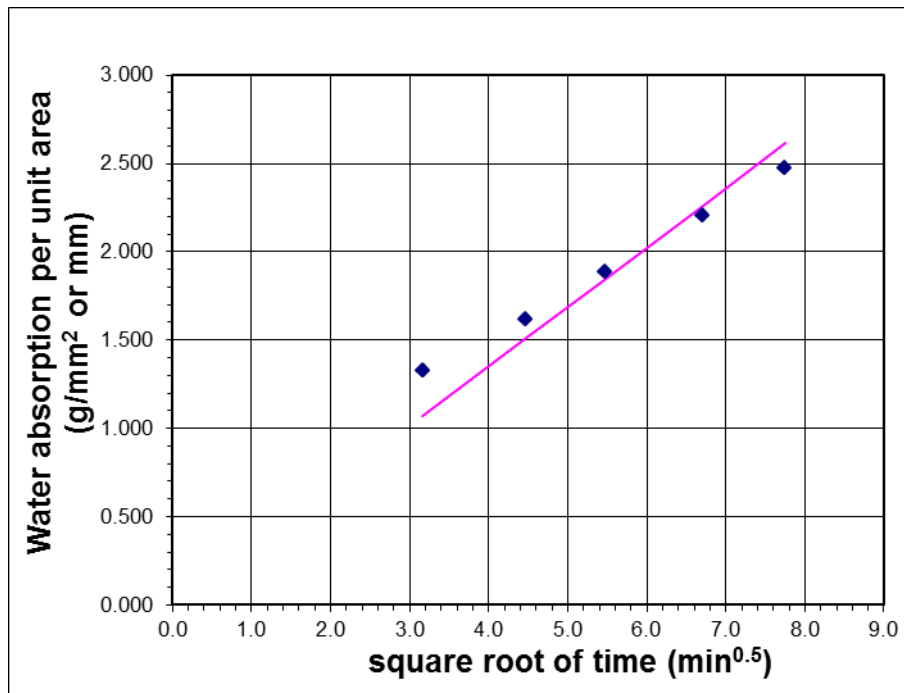
Κατά τη δοκιμή της υδατοαπορροφητικότητας γινόταν μέτρηση της % διαφοράς μάζας (dW) των δοκιμίων συναρτήσει του χρόνου.

Ενδεικτικά παρατίθεται στον Πίνακα 10 και στο Σχήμα 13 η διαδικασία υπολογισμού της υδατοαπορροφητικότητας ενός τυχαίου δοκιμίου μέσω ειδικά διαμορφωμένου αρχείου του Excel.

ΠΙΝΑΚΑΣ 10: Μετρήσεις δοκιμής υδατοαπορροφητικότητας (ενδεικτικά για το δοκίμιο CFM)

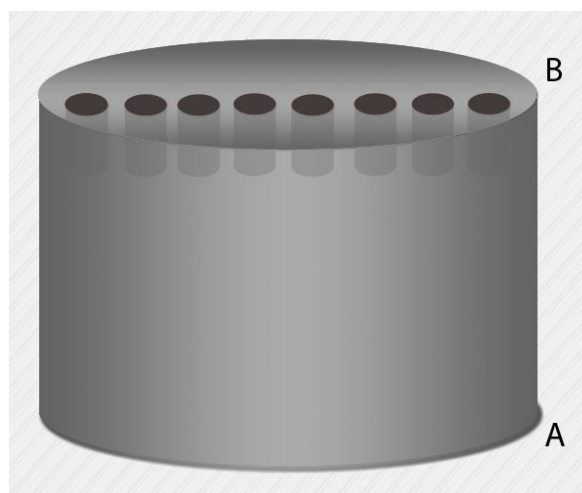
W_0 (g)	1232.9				
t (min)	10	20	30	45	60
W (g)	1237.2	1238.9	1240.4	1242.4	1244.0
dW (g)	4.3	6.0	7.5	9.5	11.1
i (mm)	0.5478	0.7643	0.9554	1.2102	1.4140
S ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$)	0.1732	0.1709	0.1744	0.1804	0.1825
Regression analysis					
	R square :	0.9994			
	S ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$)*	0.1785			
	S ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$) _{avg} **	0.1763			

* Ανάλυση Παλινδρόμησης, ** Μέση τιμή



ΣΧΗΜΑ 13: Συσχέτιση ρυθμού απορρόφησης νερού ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου απορρόφησης
Υπολογισμός υδατοαπορροφητικότητας (ενδεικτικά για το δοκίμιο CFM)

Μετρήσεις υδατοαπορροφητικότητας πραγματοποιούνται στα επισκευασμένα δοκίμια σκυροδέματος ανά τακτά χρονικά διαστήματα, από τη χρονική στιγμή της επισκευής τους με τα παρασκευασθέντα επισκευαστικά υλικά μέχρι και το τέλος της πειραματικής διαδικασίας. Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται ένα σκαρίφημα των επισκευασμένων δοκιμίων με σημείωση της κάθε πλευράς τους και στον Πίνακα 11 ένα χρονολόγιο των μετρήσεων υδατοαπορροφητικότητας και για λόγους κωδικοποίησης.



ΣΧΗΜΑ 14: Σκαρίφημα επισκευασμένου δοκιμίου
Α: Πλευρά χωρίς επισκευή, Β: Επισκευασμένη πλευρά

ΠΙΝΑΚΑΣ 11: Χαρακτηριστικά μετρήσεων υδατοαπορροφητικότητας

α/α Μέτρησης	Χρόνος (μήνες από την επισκευή)	Μετρηθείσα πλευρά δοκιμίου
Υ1	0	A
Υ2	0	B
Υ3	3*	B
Υ4	6*	A
Υ5	6*	B

* Κύκλοι Wet - Dry

Στον Πίνακα 12 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα, που προέκυψαν από τη μέτρηση Υ1 της υδατοαπορροφητικότητας των 7 δοκιμίων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 12: Απορρόφηση νερού (g) συναρτήσει του χρόνου για την μέτρηση Υ1 (αρχική μάζα δοκιμίου ~ 1500 g)

Δείγματα	Χρόνος (min)				
	10	20	30	45	60
GMP	5.4	7.6	9.0	10.9	12.6
GMM	5.1	7.3	8.9	10.9	12.4
GFP	5.6	7.8	9.1	10.9	12.2
GFM	5.3	7.1	8.4	10.2	11.3
CPM	5.6	7.6	9.2	11.0	12.6
CFM	7.7	10.7	12.8	15.3	17.5
CMM	4.8	6.8	8.2	10.2	11.9

Παρατηρούμε ότι για όλα τα δοκίμια, τόσο των επισκευασμένων με γεωπολυμερή όσο και αυτών με τσιμεντοκονιαμάτα, η μάζα αυξάνεται με το χρόνο κατά τη διάρκεια της κάθε μέτρησης. Αυτό δείχνει ότι η προσρόφηση του νερού έχει έναν αυξανόμενο ρυθμό από τα πρώτα ως και τα τελευταία λεπτά της δοκιμής της υδατοαπορροφητικότητας. Παρόλα αυτά, αν τα δοκίμια υποβληθούν σε ξήρανση το νερό αυτό που προσροφάται θα απομακρυνθεί, κάτι που αποδεικνύει ότι η προσρόφηση του οφείλεται στο πορώδες των υλικών. Μεγαλύτερη αύξηση μάζας σημαίνει μεγαλύτερη προσροφητική ικανότητα και άρα μεγαλύτερο πορώδες του υλικού, γεγονός που παρατηρείται στα επισκευασμένα με γεωπολυμερή δοκίμια.

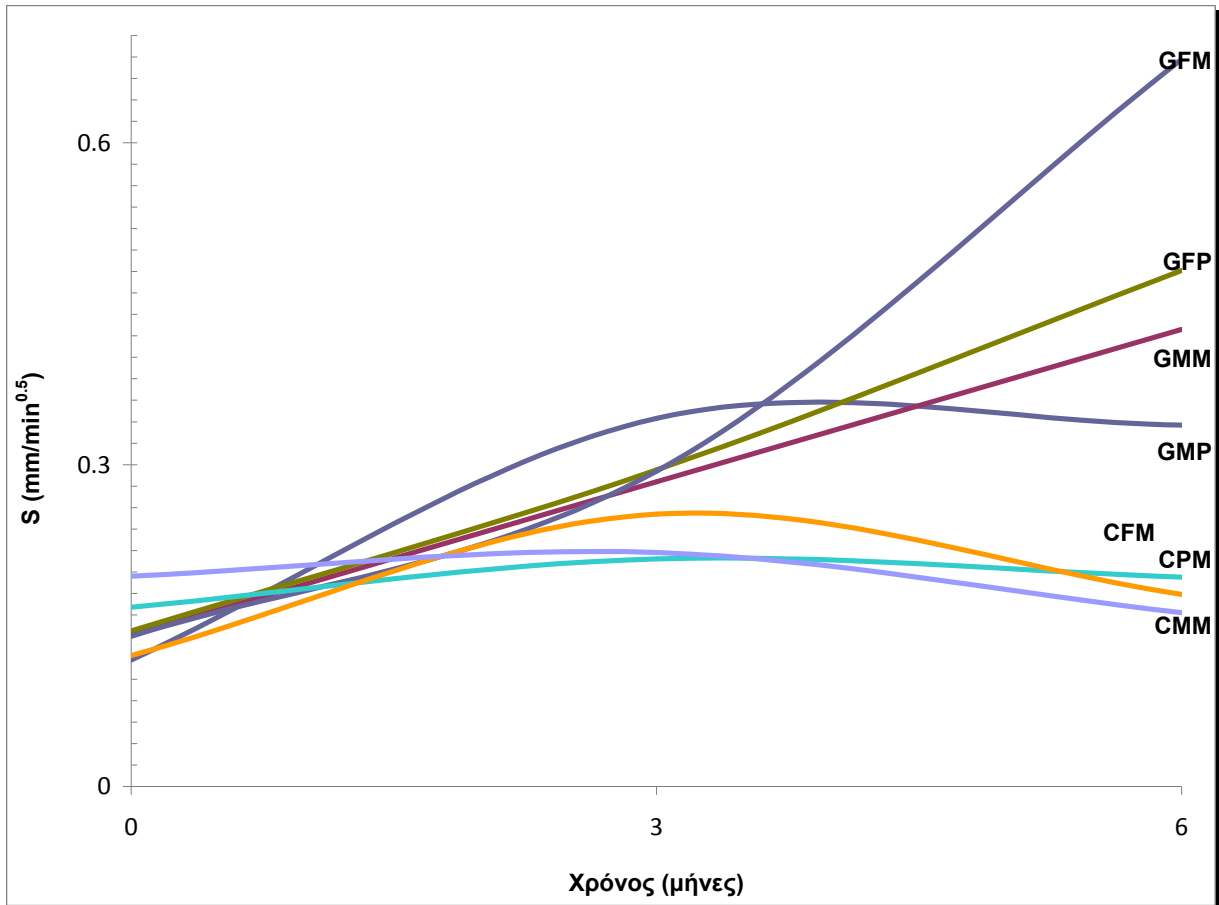
Αναλύοντας τα αποτελέσματα καταλήγουμε στον Πίνακα 13, στον οποίο συνοψίζονται οι τιμές της υδατοαπορροφητικότητας S ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$) για το κάθε δοκίμιο για την κάθε ξεχωριστή μέτρηση που διενεργήθηκε.

ΠΙΝΑΚΑΣ 13: Μετρήσεις υδατοαπορροφητικότητας

Χρόνος (μήνες)	0		3	6	
Δείγμα	A*	B*	B	A	B
GMP	0.209	0.118	0.343	0.095	0.337
GMM	0.206	0.141	0.284	0.146	0.426
GFP	0.209	0.145	0.295	0.172	0.481
GFM	0.193	0.14	0.294	0.216	0.678
CPM	0.211	0.167	0.212	0.156	0.195
CFM	0.294	0.122	0.254	0.292	0.179
CMM	0.194	0.196	0.218	0.141	0.162

* A: Πλευρά χωρίς επισκευή, B: Επισκευασμένη πλευρά

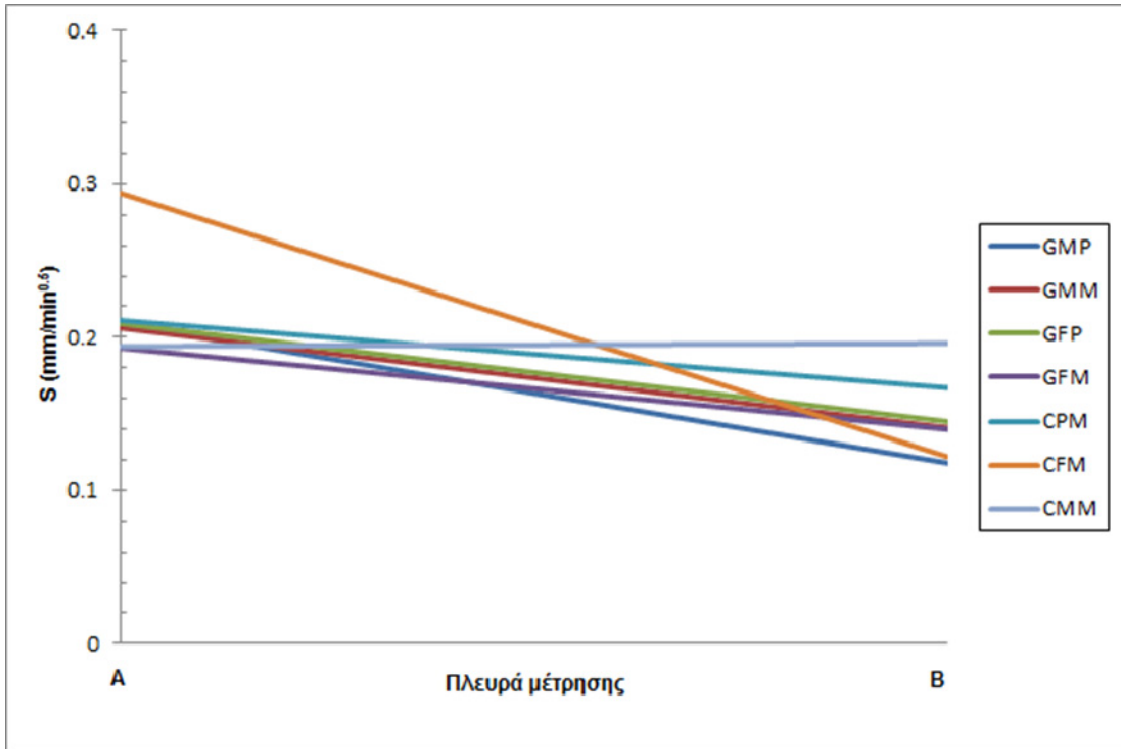
Στο Σχήμα 15 απεικονίζεται ένα διάγραμμα που παρουσιάζει την υδατοαπορροφητικότητα για όλα τα δοκίμια σε σχέση με τον χρόνο από την επισκευή τους για την πλευρά B (επισκευασμένη πλευρά).



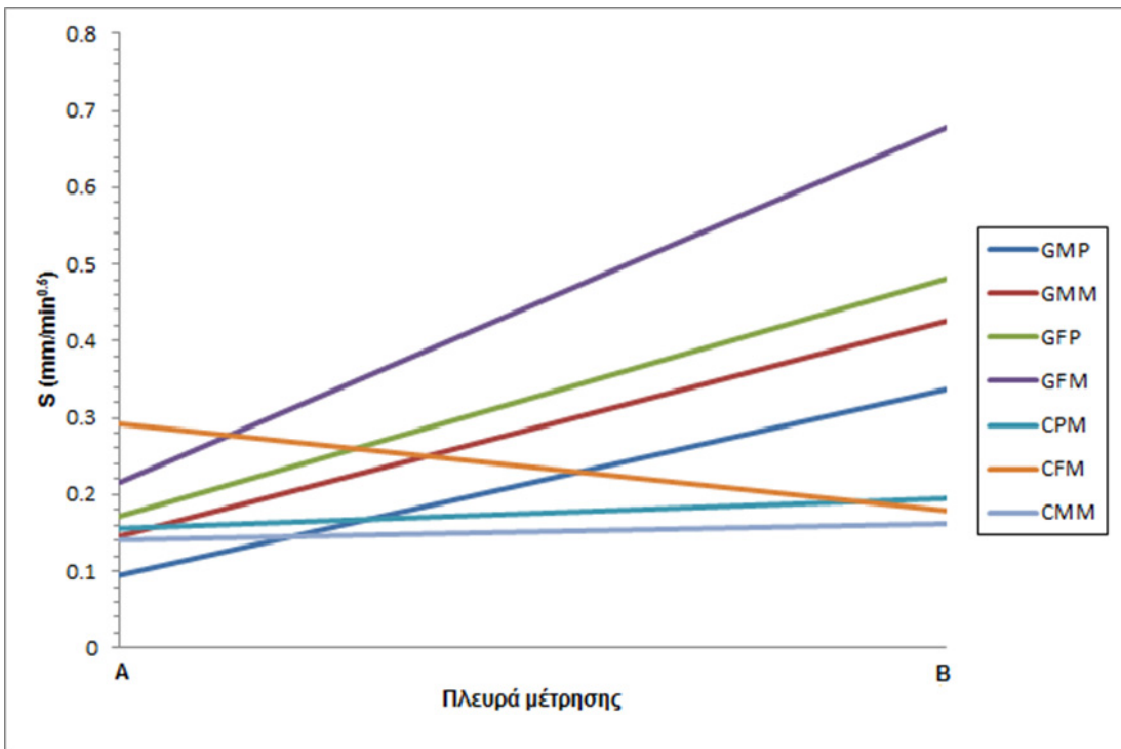
ΣΧΗΜΑ 15: Υδατοαπορροφητικότητα δοκιμίων σε σχέση με τον χρόνο από την επισκευή τους για την πλευρά Β (επισκευασμένη πλευρά)

Παρατηρούμε ότι για τα επισκευασμένα με γεωπολυμερικά επισκευαστικά υλικά δοκίμια η τιμή της υδατοαπορροφητικότητας αυξάνεται με το χρόνο σε αντίθεση με τα επισκευασμένα με τσιμεντοειδή επισκευαστικά υλικά δοκίμια όπου η τιμή της υδατοαπορροφητικότητας παραμένει σταθερή ή και μειώνεται με το χρόνο. Το γεγονός αυτό συνδυάζεται με την εμφάνιση ρωγμών στα δοκίμια αυτά, γεγονός που μειώνει την αποτελεσματικότητα της επισκευής.

Τα Σχήματα 16 και 17 παρουσιάζουν αντίστοιχα διαγράμματα της υδατοαπορροφητικότητας για όλα τα δοκίμια σε σχέση με την πλευρά (Α ή Β) για την οποία πραγματοποιήθηκε η κάθε μέτρηση, άμεσα και μετά από 6 μήνες μετά την επισκευή.



ΣΧΗΜΑ 16: Υδατοαπορροφητικότητα των δοκιμών άμεσα μετά την επισκευή τους για τις πλευρές A και B



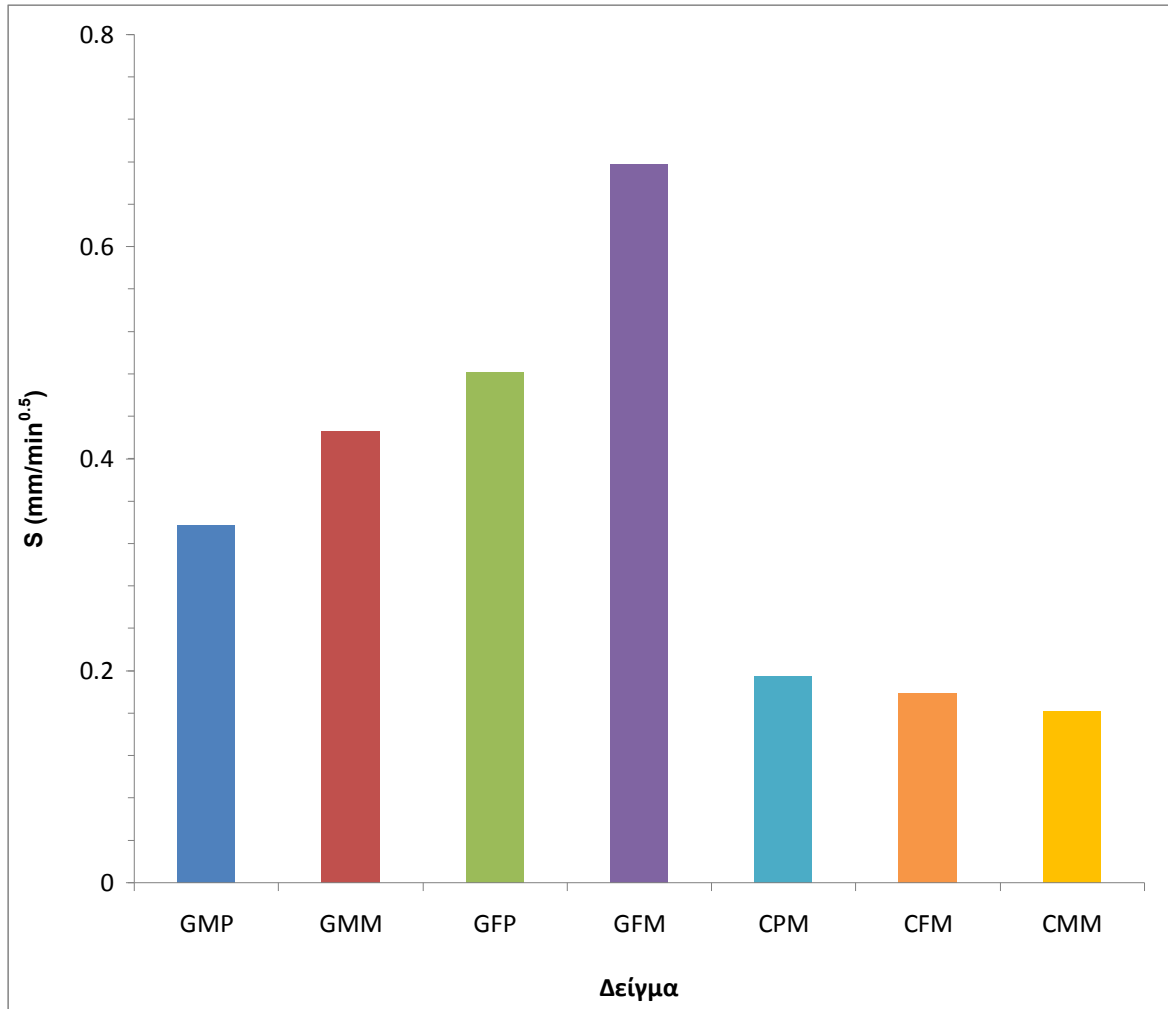
ΣΧΗΜΑ 17: Υδατοαπορροφητικότητα των δοκιμών 6 μήνες μετά την επισκευή τους για τις πλευρές A και B

Παρατηρούμε ότι αμέσως μετά την επισκευή, η υδατοαπορροφητικότητα ανάμεσα στην πλευρά Α και Β παρουσιάζει μείωση για όλα τα δοκίμια, γεγονός που οφείλεται στη διόγκωση των επισκευαστικών υλικών αμέσως μετά την επισκευή των δοκιμίων σκυροδέματος και άρα στη βελτίωση των ιδιοτήτων των επισκευασμένων δοκιμίων από την πλευρά Β.

Έξι μήνες μετά την επισκευή, η υδατοαπορροφητικότητα ανάμεσα στην πλευρά Α και Β παρουσιάζει αύξηση για όλα τα δοκίμια, η οποία οφείλεται κυρίως στην ωρίμανση των υλικών, καθώς και στην καταπόνηση από την δοκιμή Ξήρανσης – Εμβάπτισης.

Τα δοκίμια (σύστημα επισκευαστικού υλικού – υποβάθρου σκυροδέματος) υφίσταται μεταβολές όγκου χωρίς επιβολή φορτίου, αλλά μόνο λόγω μεταβολής της περιεχόμενης υγρασίας. Παρατηρείται λοιπόν συστολή ξήρανσης λόγω της απώλειας υγρασίας από τη μάζα του επισκευασμένου δοκιμίου. Ο μηχανισμός που μπορεί να ερμηνεύσει το φαινόμενο της συστολής ξήρανσης αναλύεται στη συνέχεια. Στο σκυρόδεμα ή στον τσιμεντοπολτό, όταν τα τριχοειδή είναι τελείως γεμάτα ή άδεια δεν υπάρχουν τριχοειδείς ανυψώσεις και τάσεις. Αντιθέτως, όταν είναι εν μέρει γεμάτα αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις μέσα στο νερό των τριχοειδών και θλιπτικές στη στερεά μάζα. Όταν δημιουργείται μεταβολή στο περιεχόμενο νερό τότε οι μεγαλύτεροι τριχοειδείς πόροι στεγνώνουν οπότε παύουν να υφίστανται τριχοειδείς δυνάμεις στις περιοχές αυτές, αλλά ταυτόχρονα πόροι μικρότερης διαμέτρου παύουν να είναι πλήρεις και επομένως δημιουργούνται μηνίσκοι και τριχοειδείς τάσεις, οι οποίες είναι μεγαλύτερης έντασης, οπότε η στερεά μάζα υφίσταται μεγαλύτερη παραμόρφωση λόγω των υψηλότερων τάσεων.

Στο Σχήμα 18, συγκρίνονται σχηματικά οι τιμές υδατοαπορροφητικότητας των επισκευασμένων δοκιμίων στο τέλος των μετρήσεων ανθεκτικότητας (Υ5). Παρατηρούνται οι αυξημένες τιμές υδατοαπορροφητικότητας για τα επισκευασμένα με γεωπολυμερη δοκίμια σε σχέση με αυτά με τσιμεντοκονιάματα. Συγκεκριμένα, το GFM παρουσίασε τη χειρότερη συμπεριφορά όσο αφορά τη δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας, ενώ το CMM την καλύτερη.



ΣΧΗΜΑ 18: Υδατοαπορροφητικότητα δοκιμίων 6 μήνες μετά την επισκευή τους

5.4 Ξήρανση – Εμβάπτιση

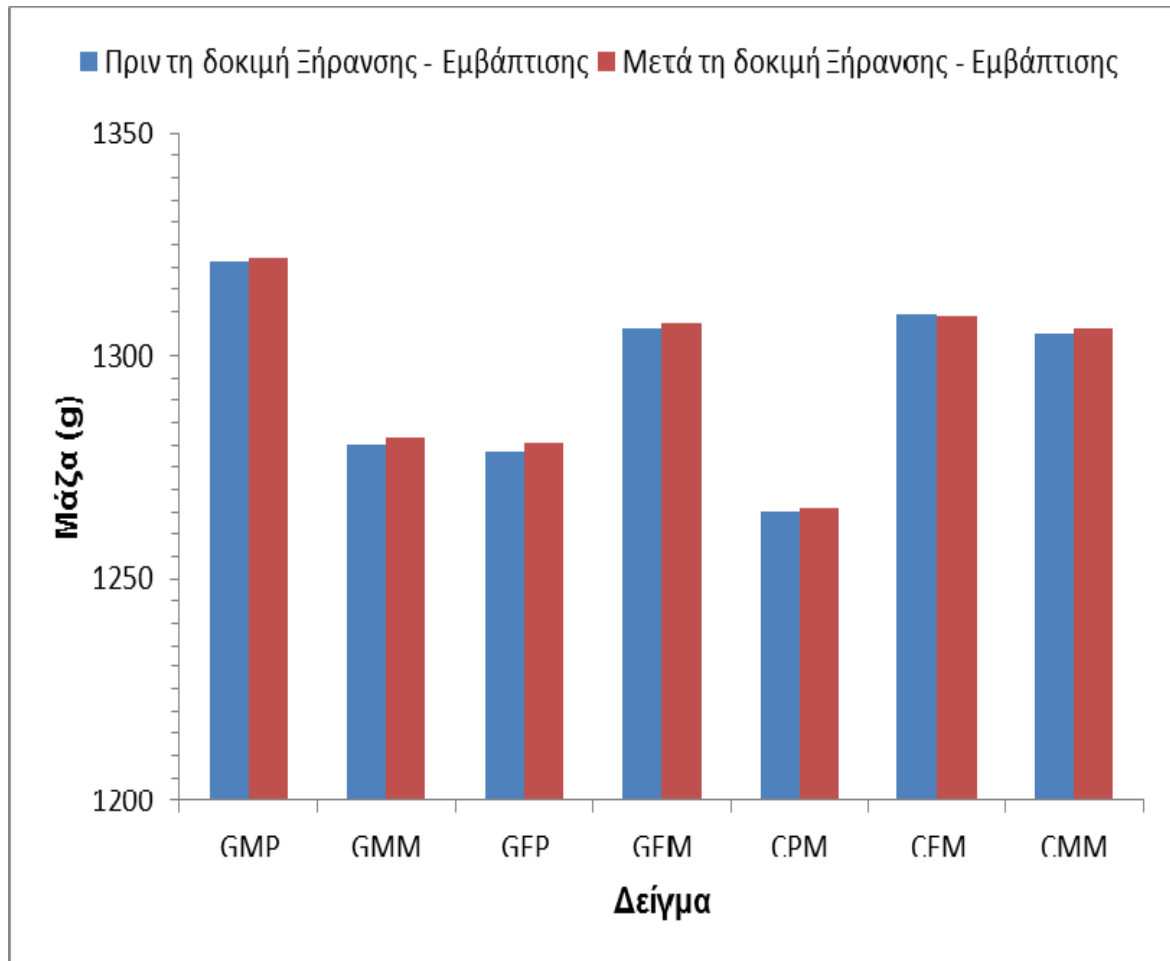
Στον Πίνακα 14 αναπαρίσταται ο μέσος όρος των μαζών όλων των επισκευασμένων δοκιμίων πριν, κατά τη διάρκεια και μετά τη δοκιμή Wet-Dry. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι οι μάζες παραμένουν πρακτικά σταθερές για όλα τα δοκίμια. Κάτι τέτοιο δείχνει ότι τόσο τα επισκευασμένα με γεωπολυμερή δοκίμια σκυροδέματος όσο και τα επισκευασμένα με τσιμεντοκονιάματα παρουσιάζουν ικανοποιητική ανθεκτικότητα όσον αφορά τη δοκιμή Ξήρανσης - Εμβάπτισης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 14: Μετρήσεις δοκιμής Wet - Dry

Δείγματα	Μάζες αναφοράς (g)	Μάζες μετά από 11 κύκλους (g)	Μάζες μετά από 22 κύκλους (g)	Μάζες μετά από 30 κύκλους (g)	Μάζες μετά από 40 κύκλους (g)	Μάζες μετά από 50 κύκλους (g)
GMP	1321.4	1323.1	1323.5	1323.7	1324	1322
GMM	1279.9	1281.7	1281.9	1282.9	1283	1281.5
GFP	1278.4	1280.1	1280.7	1282.1	1283	1280.3
GFM	1306.3	1306.7	1307.3	1309.8	1311	1307.3
CPM	1265.1	1265.9	1266.2	1267.1	1268	1265.9
CFM	1309.3	1311	1310.8	1311.8	1312	1309.1
CMM	1305.1	1306	1306.2	1306.5	1307	1306.1
GFP2	1295	1295.6	1295.8	1297.3	1298	1294.3

Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται και από το Σχήμα 19, όπου συγκρίνονται και σχηματικά οι μάζες των επισκευασμένων δοκιμίων πριν και μετά την δοκιμή.

Βέβαια, πρέπει να τονιστεί ότι η δοκιμή ξήρανσης – εμβάπτισης καταπόνησε τα επισκευασμένα δοκίμια, και κυρίως αυτά με τα γεωπολυμερή επισκευαστικά υλικά, λόγω των επαναλαμβανόμενων εναλλαγών της συνθήκης υγρασίας, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ρωγμών και κατ' επέκταση την υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους. Οι διαφορετικοί συντελεστές θερμικής διαστολής των επισκευαστικών υλικών και του σκυροδέματος συντέλεσαν σε αυτό το αποτέλεσμα.



ΣΧΗΜΑ 19: Μάζες επισκευασμένων δοκιμίων σκυροδέματος πριν και μετά τη δοκιμή Wet - Dry

Συμπερασματικά, η δοκιμή Ξήρανσης – Εμβάπτισης παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα όσο αφορά τον έλεγχο της ανθεκτικότητας της επισκευής και της συνάφειας μεταξύ επισκευαστικού υλικού και δοκιμίου σκυροδέματος.

5.5 Δοκιμή συνάφειας

Δοκιμές συνάφειας πραγματοποιούνται στα επισκευασμένα δοκίμια σκυροδέματος μετά το πέρας των υπόλοιπων μετρήσεων / δοκιμών ανθεκτικότητας. Στον Πίνακα 15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν.

ΠΙΝΑΚΑΣ 15: Μετρήσεις συνάφειας

Δοκίμιο	Αντοχή σε θλίψη	F (KN)	t (mm)	Ρωγμή διάρρηξης	$\sigma_{\text{συν}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{διαρ}}$ (MPa)
GMP	42.6	3.5	14.2	Ναι	7.8	1.6
GMM	34.3	3.5	17.4	Ναι	6.4	1.3
GFP	28.5	2.8	14.8	Όχι	6.0	-
GFM	15.4	2.8	16	Όχι	5.6	-
CPM	59.0	1.5	16.4	Ναι	2.9	0.6
CFM	51.8	1.8	15.5	Ναι	3.7	0.7
CMM	54.1	4.2	15.9	Ναι	8.4	1.7





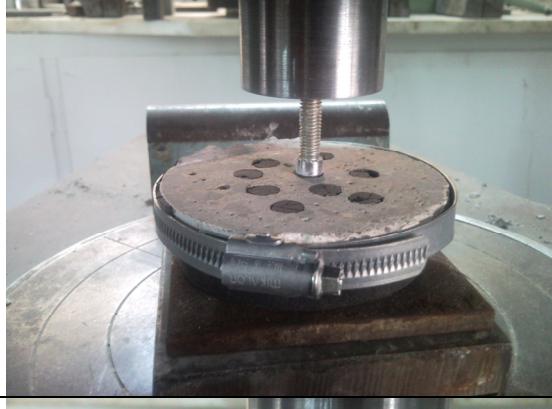



Η αντοχή σε συνάφεια δίνεται από τη σχέση $\sigma_{\text{συν}} = F/2\pi rt$, όπου F: η δύναμη που ασκείται, r: η ακτίνα της επισκευασμένης οπής και t: το ύψος της επισκευασμένης οπής. Η αντοχή σε διάρρηξη δίνεται από τη σχέση $\sigma_{\text{διαρ}} = 2F/\pi dt$, όπου F και t όπως παραπάνω και d: η διάμετρος του δοκιμίου (d=100 mm).

Όταν το δοκίμιο αστοχεί σε διάρρηξη, αυτή θεωρείται ως η ελάχιστη αντοχή του ενέματος, ενώ όταν το δοκίμιο δεν αστοχεί σε διάρρηξη, ελάχιστη αντοχή θεωρείται η αντοχή συνάφειας.



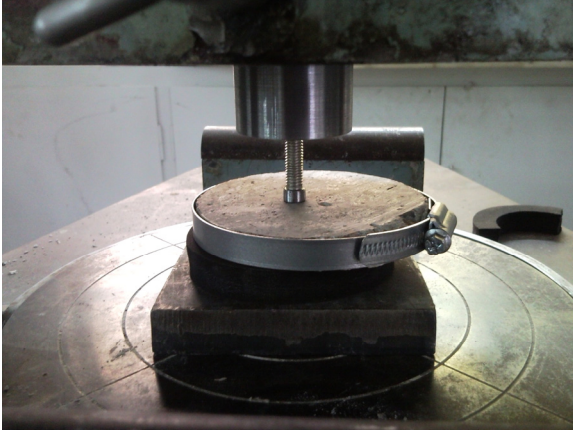
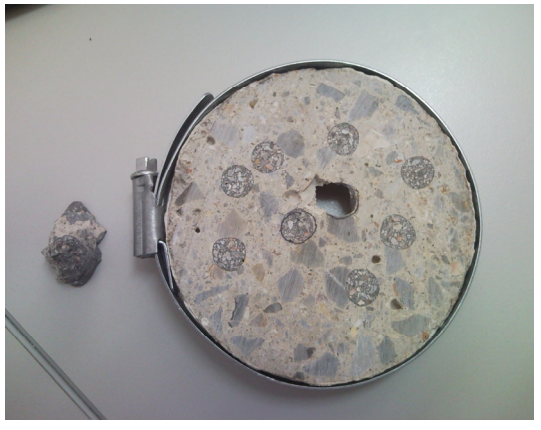


Τα δοκίμια με τσιμεντοειδή και με γεωπολυμερικά από μετακαολίνη επισκευαστικά υλικά αστόχησαν σε διάρρηξη, άρα αυτά τα υλικά επισκευής έχουν καλύτερη συνάφεια με το υπόβαθρο σκυροδέματος, σε αντίθεση με τα δοκίμια με γεωπολυμερικά επισκευαστικά υλικά με ιπτάμενη τέφρα, στα οποία αστόχησε το ένεμα.

Στον πίνακα 16 παρατίθενται οι εικόνες από τις δοκιμές συνάφειας.

ΠΙΝΑΚΑΣ 16: Δοκιμές συνάφειας επισκευασμένων δοκιμίων

GMP		
GMM		
GFP		
GFM		

ΠΙΝΑΚΑΣ 16 (Συνέχεια)

<p>CPM</p>		
<p>CFM</p>		
<p>CMM</p>		

Κεφάλαιο 6 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την παρούσα εργασία προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- ✓ Η αποτελεσματικότητα των επισκευαστικών υλικών πιστοποιήθηκε ικανοποιητικά με μακροσκοπική επιθεώρηση, επιθεώρηση με στερεοσκόπιο, μετρήσεις υδατοαπορροφητικότητας, δοκιμή ξήρανσης – εμβάπτισης και δοκιμές συνάφειας.
- ✓ Τα τσιμεντοκονιάματα έδειξαν καλύτερη συμπεριφορά ως επισκευαστικά υλικά σκυροδέματος συγκρινόμενα με τα γεωπολυμερή.
- ✓ Τα αμιγή τσιμεντοκονιάματα έδειξαν τη βέλτιστη συμπεριφορά, ακολουθούμενα από τα κονιάματα με ιπτάμενη τέφρα και με μετακαολίνη.
- ✓ Οι γεωπολυμερικές πάστες εμφάνισαν καλύτερη συμπεριφορά από τα γεωπολυμερικά κονιάματα και οι συνθέσεις γεωπολυμερών με μετακαολίνη υπερτερούν έναντι αυτών με ιπτάμενη τέφρα.
- ✓ Για τα επισκευαστικά υλικά που δεν έδειξαν ικανοποιητική συμπεριφορά, απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης της σύνθεσης και των ιδιοτήτων τους στην αποτελεσματικότητα της επισκευής.
- ✓ Προτείνεται να διερευνηθεί μελλοντικά ο σχεδιασμός μιας τροποποιημένης δοκιμής ξηρού-υγρού αποκλειστικά για την αξιολόγηση των επισκευών, μιας και φάνηκε ιδιαίτερα αποτελεσματική στην συγκεκριμένη εργασία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Abu-Tair Al., Rigden S.R., Burley E., Testing the bond between repair materials and concrete substrate, *ACI Mater J* 93 (6), 448-553, 1997
2. Allen R.T.L., Edwards S.C., Shaw J.D.N., *The Repair of Concrete Structures*, London: Blackie Academic and Professional, 1994
3. Al-Zahrani M.M., Maslehuddin M., Al-Dulaijan S.U., Ibrahim M., Mechanical properties and durability characteristics of polymer- and cement-based repair materials, *Cement & Concrete Composites* 25, 527-537, 2003
4. Cabrera J.G., Al-Hasan A.S., Performance properties of concrete repair materials, *Construction and Building Materials*, Vol. II (5-6), 283-290, 1997
5. Davidovits J., Geopolymer Chemistry and Properties, *Proceedings, Geopolymer* 88, 25-48, 1988
6. Davidovits J., Geopolymer, green chemistry and sustainable development, Institut Géopolymère, Saint Quentin, France, 2005
7. Davidovits J., Structural Characterization of Geopolymeric Materials with X-Ray Diffractometry and MAS-NMR Spectrometry, *Proceedings, Geopolymer* 88, 149-166, 1988
8. Decter M., Durable concrete repair - Importance of compatibility and low shrinkage, *Construction and Building Materials II* (5-6), 267-273, 1997
9. Dhir R., McCarthy M., Concrete Durability and Repair Technology, *Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK, ThomasTelford*, 1999
10. Duxson P., Provis J.L., Lukey G.C., Mallicoat S.W., W.M. Kriven, Van Deventer J.S.J., Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2005
11. Emberson, N.K., Mays G.C., Polymer mortars for the repair of structural concrete: the significance of property mismatch, *Proc. ICPIIC '87: 5th Int. Cong. on Polymers in Concrete*, Brighton, 235-242, 1987
12. Emberson N.K., Mays GC., Significance of property mismatch in the repair of structural concrete, Part 1: properties of repair systems, 1990
13. Emmons P.H., Vaysburd A.M., McDonald J.E., A rational approach to durable concrete repairs, *Concrete Int.* 15 (9), 40-45, 1993
14. Glukhovskiy V., *Soil Silicates*, Gosstroyizdat Ukrainy Publishing, Kiev, 1959

15. Grantham M., Rendell F., Jauberthie R., Lanos C., Concrete Solutions, 1st International Conference on Concrete Repair, St – Malo, France, Conference Proceedings and Papers 1, Technologie Ltd, London, UK, 2003
16. Hassan K., Brooks J., Al-Alawi L., Compatibility of repair mortars with concrete in a hot-dry environment, Cement & Concrete Composites 23, 93-101, 2001
17. Komnitsas K., Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities, International Conference on Green Buildings and Sustainable Cities, Procedia Engineering 21, 1023 – 1032, 2011
18. Komnitsas K., Zaharaki D., Geopolymerization of mining and metallurgical wastes, Bulletin Resurse Minerale 3 (II), 59-64, 2007
19. Lambe R.W., Humphrey M.J., Watkins T.F., Development of Materials for Repair and Protection of Reinforced Concrete, 3rd International Symposium on Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, 471-485, UK, 1999
20. Liang M., Wang K., Liang C., Service life prediction of reinforced concrete Research 29 (9), 1999
21. Mangat P., Limbachiya M., Repair material properties which influence long-term performance of concrete structures, Construction and Building Materials 9 (2), 81-90, 1995
22. Midness S., Young J.F., Darwin D., Concrete 2nd edition, Prentice Hall, Pearson Education Inc., 2003
23. Palomo A., Grutzeck M., Blanco M., Alkali activated fly ashes: A cement for the future, Cement and concrete Research 29, 323-329, 1999
24. Panagiotopoulou Ch., Asprogerakas A., Kakali G., Tsvilis S., Synthesis and thermal properties of fly-ash based geopolymer pastes and mortars, Ceramic Engineering and Science Proceedings 32, 17-28, 2011.
25. Panagiotopoulou Ch., Kontori E., Perraki Th., Kakali G., Dissolution of aluminosilicate minerals and by-products in alkaline media, Journal of Materials Science 42 (9), 2967-2973, 2007
26. Pnias D., Giannopoulou I., Perraki T., Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers, Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects 301 (1-3), 246-254, 2007
27. Plum D.R., Repair materials and repaired structures in varying environment, 3rd Int. Seminar on the Life of Structures - The Role of Physical Testing, Brighton, 1989
28. Siddique R., Klaus J., Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review, Applied Clay Science 43, 2009
29. Silva F., Thamaturgo C., Microstructure of Polysialate Cement mortars, Geopolymer 99, 97-106, 1999

30. Temuujin J., Van Riessen A., MacKenzie K.J.D., Preparation and characterisation of fly ash based geopolymer mortars, *Construction and Building Materials* 24, 1906–1910, 2011
31. Tsitouras A., Perraki T., Perraki M., Tsvilis S., Kakali G., The effect of synthesis parameters on the structure and properties of metakaolin based geopolymers, *Materials Science Forum*, 636-637, 149-154, 2010.
32. www.geopolymer.org
33. Xu H., Van Devener J.S.J, The geopolymerisation of alumino-silicate materials, *Int. J. Miner, Process.*, 59, 247-266, 2000
34. Zuhua Z., Xiao Y., Huajun Z., Yue C., Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer, *Applied Clay Science* 43, 218–223, 2009
35. Zaharaki D., Komnitsas K., Durability of slag-based inorganic polymers, 1st International Conference on Indicators for Land Rehabilitation and Sustainable Development, Beijing, China, 2008
36. Ασπρογέρακας Α., Διάχυση χλωριόντων σε σκυροδέματα από ασβεστολιθικά τσιμέντα Portland, Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2002
37. Ασπρογέρακας Α., Παναγιωτοπούλου Χ., Κακάλη Γ., Τσιβιλής Σ., Σύγκριση της συμπεριφοράς σε υψηλές θερμοκρασίες γεωπολυμερών ιπτάμενης τέφρας με κονιάματα τσιμέντου, 8ο Πανελλήνιο Συνέδριο Χημικής Μηχανικής, Θεσσαλονίκη, 1-12, 2011
38. Γιαννόπουλος Π., Ευρωκώδικας 2: Σχεδιασμός φορέων από σκυρόδεμα, Ε.Μ.Π., 2004
39. Γιαννόπουλου Ι., Πάνιας Δ., Γεωπολυμερή δομικά υλικά από στερεά αργιλοπυριτικά παραπροϊόντα, 1^ο Πανελ. Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, ΤΕΕ, Αθήνα, 2008
40. Κόλιας Σ., Προχωρημένη τεχνολογία σκυροδέματος, ΔΠΜΣ Δομοστατικός σχεδιασμός και ανάλυση κατασκευών, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2010
41. Μπαδογιάννης Ε., Αξιοποίηση Καολινών στη τεχνολογία Σκυροδέματος, Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2002
42. Μπατής Γ., Φθορά και διάβρωση σκυροδέματος, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2004
43. Παναγιωτοπούλου Χ., Σύνθεση και ιδιότητες γεωπολυμερών από βιομηχανικά πετρώματα και παραπροϊόντα, Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2009
44. Σπυράκος Κ., Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα, 2004
45. Τουμπακάρη Ε., Ενίσχυση τρίστρωτης τοιχοποιίας με ενέματα, Ημερίδα ΤΕΕ, Αθήνα, 2007
46. Τσίμας Σ., Δομικά Υλικά (Τσιμέντο - Ασβέστης - Σκυρόδεμα - Κονιάματα), Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2001
47. Τσίμας Σ., Τσιβιλής Σ., Επιστήμη και Τεχνολογία Τσιμέντου, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Ε.Μ.Π., Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2010

ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

ΠΡΟΣΩΠΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

Όνοματεπώνυμο
Διεύθυνση
Τηλέφωνο
Ηλεκτρονικό ταχυδρομείο
Υπηκοότητα
Ημερομηνία γέννησης

ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΥ ΣΟΦΙΑ
ΦΡΥΝΗΣ 5, ΑΘΗΝΑ, 11634
210 70.15.855, 6977.267137
sofiantonop@gmail.com
ΕΛΛΗΝΙΚΗ
08 ΜΑΡΤΙΟΥ 1986

ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ

2010 έως 2012

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Διεπιστημονικό/Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών» - Συντονίζουσα Σχολή: Χημικών Μηχανικών

2004 έως 2010

Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών – Τμήμα Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος

- **Κατεύθυνση σπουδών:** Τεχνικής Γεωλογίας – Γεωφυσικής

ΣΕΜΙΝΑΡΙΑ ΚΑΤΑΡΤΙΣΗΣ

19-12-2011 έως 21-12-2011

Marathon Data Systems

Σεμινάριο με θέμα «Εισαγωγή στο Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (GIS)» - ArcGIS Extensions (3D Analyst – Spatial Analyst) version 10.x

04-07-2011 έως 15-07-2011

Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος»

Θερινό σχολείο 2011 με θεματικές ενότητες:

- Περιβάλλον – Ενέργεια – Ασφάλεια
- Προηγμένα Υλικά, Μίκρο - Νανοτεχνολογία και Διατάξεις

19-05-2011 έως 20-05-2011

Εταιρεία Παγίων Ε.Υ.Δ.Α.Π. – Διεύθυνση Εκπαίδευσης

Σεμινάριο με τίτλο «Διαχείριση Φραγμάτων», το οποίο πραγματοποιήθηκε στις εγκαταστάσεις του φράγματος Μόρνου.

06-12-2010 έως 10-12-2010

Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού & Προστασίας «Ο.Α.Σ.Π.»

Κύκλος σεμιναρίων με τίτλο «Training Course on Seismic Risk Assessment in Specific Areas with Monumental Structures»

04-10-2010 έως 30-11-2010

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Πρόγραμμα Εξ Αποστάσεως Εκπαίδευσης με τίτλο «Εφαρμογές Περιγραφικής Στατιστικής σε περιβάλλον SPSS»

11-2007 έως 4-2008

Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών – Κέντρο Επαγγελματικής Κατάρτισης

Επιμόρφωση με αντικείμενο «Πρόληψη – Διαχείριση φυσικών και τεχνολογικών καταστροφών»

05-10-2007

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ACTA)

Πιστοποίηση χρήσης Ηλεκτρονικού Υπολογιστή

**ΑΤΟΜΙΚΕΣ ΔΕΞΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ
ΙΚΑΝΟΤΗΤΕΣ**

ΞΕΝΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ

ΑΓΓΛΙΚΑ

CERTIFICATE OF PROFICIENCY IN ENGLISH (18-3-2006)

ΓΑΛΛΙΚΑ

DIPLOME D' ETUDES EN LANGUE FRANCAISE (DELFF) 2ND DEGRE (26-01-2002)

ΙΤΑΛΙΚΑ

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ

ΠΕΡΙΟΔΙΚΟ: *Advances in Cement Research*, Volume 22, Issue 3, July 2010, pages 171 –183 , ISSN: 0951-7197, E-ISSN: 1751-7605

Τίτλος: The opaline silica-rich sedimentary rocks of Milos Island, Greece and their behavior as pozzolanas in the manufacture of cement

Συγγραφείς: Michael Stamatakis (NKUA), Dimitris Fragoulis (TITAN SA), George Stamatakis (NKUA), Sofia Antonopoulou (NKUA)

ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΗ ΠΕΙΡΑ

03-2012 έως σήμερα

Blue Solar Energy – Κατασκευή μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

09-2010 έως 07-2011

Διδασκαλία Αγγλικής Γλώσσας - Ιδιαίτερα μαθήματα

Επίπεδα A1 – B2

05-2008 έως 09-2010

TITAN – Εργαστήριο Διεύθυνσης Έρευνας και Ποιότητας (ΔΕΠ)

Πρακτική άσκηση – Συνεργασία

01-03-2007 έως 30-04-2007

Ινστιτούτο Γεωλογικών & Μεταλλευτικών Ερευνών – Διεύθυνση Τεχνικής Γεωλογίας

Πρακτική άσκηση