

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Διπλωματική Εργασία

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΦΙΛΙΚΩΝ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΓΙΑ
ΧΡΗΣΗ ΣΕ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ :
ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΠΟΥ ΒΑΣΙΖΟΝΤΑΙ ΣΤΑ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΗ**

ΦΙΛΙΠΠΙΔΟΥ ΠΑΣΧΑΛΙΝΑ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού 2022

© 2022 Φιλίππιδου Πασχαλίνα

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής: Παπακωνσταντίνου Χρήστος

(Επιβλέπων) Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής: Κούτας Λάμπρος

(Επιβλέπων) Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής: Γουργιώτης Παναγιώτης

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα από όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές και επιβλέποντες της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Παπακωνσταντίνου Χρήστου, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και κ. Κούτα Λάμπρο, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την ορθή καθοδήγηση μου κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης, θα ήταν παράλειψη να μην ευχαριστήσω τον Δρ. Παπαθεοχάρη Χάρη καθώς και τον συμφοιτητή μου για την άψογη συνεργασία που είχαμε για το πέρας αυτού του πειραματικού προγράμματος. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Παναγιώτα και Γιάννη και την αδερφή μου Αγνή αλλά και τους φίλους μου, οι οποίοι έπαιξαν ζωτικής σημασίας ρόλο κυρίως στην ψυχολογική μου υποστήριξη για την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής και γενικότερα για όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΦΙΛΙΚΩΝ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΓΙΑ
ΧΡΗΣΗ ΣΕ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ :
ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΠΟΥ ΒΑΣΙΖΟΝΤΑΙ ΣΤΑ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΗ**

Φιλίππιδου Πασχαλίνα

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2022

Επιβλέποντες Καθηγητές: Παπακωνσταντίνου Χρήστος, Αναπληρωτής Καθηγητής Π.Θ.
Κούτας Λάμπρος, Επίκουρος Καθηγητής Π.Θ.

Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε σύνθεση μιας σειράς κονιαμάτων που περιέχουν γεωπολυμερή βασισμένα στη μετακαολίνη και εξετάστηκαν οι μηχανικές τους ιδιότητες. Αρχικά, έγινε η ανάμειξη 25 διαφορετικών συνθέσεων κονιαμάτων με χρήση διαφορετικών τύπων μετακαολίνης, αλκαλικών ενεργοποιητών και ινών πολυπροπυλενίου. Για κάθε σύνθεση κατασκευάστηκαν δοκίμια διαστάσεων 40 x 40 x 160 mm , ενώ εξετάστηκαν φυσικές ιδιότητες όπως η ρευστότητα και η εργασιμότητα των κονιαμάτων. Όλα τα κονιάματα δοκιμάστηκαν αρχικά σε κάμψη τριών σημείων και έπειτα τα δύο κομμάτια που προέκυψαν δοκιμάστηκαν σε θλίψη με απώτερο σκοπό να ελέγξουμε τις εφελκυστικές και θλιπτικές τους αντοχές αντίστοιχα. Από τα πρώτα αποτελέσματα διακρίθηκαν τρία δοκίμια κονιαμάτων τα οποία εξετάστηκαν ξανά, τοποθετώντας τα εκ νέου σε μεταλλικές μήτρες και από το κάθε είδος παρασκευάστηκαν τρία κονιάματα ώστε να υπάρχει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα. Παραμέτρους προς διερεύνηση αποτέλεσαν η

προσθήκη ινών πολυπροπυλενίου, νερού και υδροξείδιο του καλίου ΚΟΗ. Η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων οδήγησε στο συμπέρασμα ότι τα γεωπολυμερή κονιάματα είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα και πολλοί παράγοντες επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά τους. Η χρήση των ινών οδηγεί στην επίτευξη μεγαλύτερων εφελκυστικών αντοχών καθώς και καλύτερης ρεολογίας των κονιαμάτων. Συμπεραίνεται, ότι τα γεωπολυμερή κονιάματα είναι ύψιστης σημασίας και πρέπει να ενταχθούν στην σύγχρονη ζωή.

Λέξεις κλειδιά : γεωπολυμερή κονιάματα , μετακαολίνη, κάμψη τριών σημείων, εφελκυστικές αντοχές, θλιπτικές αντοχές, εργασιμότητα

Abstract

This thesis deals with the development of geopolymer mortars that are based on metakaolin, and the study of their physical and mechanical behavior. Specifically, 25 different mortar compositions were mixed using different types of metakaolin, alkaline activators and polypropylene fibers. Essays of dimensions 40 x 40 x 160 mm were made for each composition, while physical properties such as fluidity and workability of mortars were examined. All mortars were first tested in a three-point bending and then the failed specimens were tested in compression, the goal was to achieve the maximum flexural strength (indirect tension) while having the best possible workability for use as mortar in TRM strengthening applications. The best three performing mixtures were selected for further experiments in the second phase of the program. During the 2nd stage three specimens for each of the three mortars were fabricated and tested. Parameters that were investigated were the addition of polypropylene fibers, free water, and potassium hydroxide. The analysis of the experimental data led to the conclusion that geopolymer mortars are quite complex in their mixing and curing and several factors affect their performance. The use of fibers was found to significantly affect the flexural strength and physical properties of the mortar. It is concluded that geopolymer mortars are of the utmost importance and must be integrated into modern life.

Keywords: geopolymer mortars, metakaolin, three-point bending, tensile strengths, compressive strengths, workability

Πίνακας περιεχομένων

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
1.1	ΑΝΑΓΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ.....	13
1.2	ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	13
1.3	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	15
2.	ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	16
2.2	ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ (ΙΟΠ).....	16
2.3	ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ (ΙΑΜ).....	17
2.4	ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ.....	19
2.5	ΤΣΙΜΕΝΤΟΕΙΔΗΣ ΜΗΤΡΕΣ.....	21
2.6	ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΗ.....	24
2.6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	24
2.6.2	ΙΣΤΟΡΙΑ.....	24
2.6.3	ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	25
2.6.4	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΩΝ.....	26
2.6.5	ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΩΝ.....	27
2.6.6	ΜΕΤΑΚΑΟΛΙΝΗ.....	28
2.6.7	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ PORTLAND ΜΕ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΗ.....	29
2.6.8	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΩΝ.....	30
3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ.....	34
3.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	34
3.4	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ.....	37
3.4.1	ΜΕΤΑΚΑΟΛΙΝΗ.....	37
3.4.2	ΜΗΤΡΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ.....	38
4.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ.....	43
4.1	Γενικά – Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων.....	43
4.1.1	ΔΟΚΙΜΙΟ GA-7.....	50
4.1.2	ΔΟΚΙΜΙΟ GA-11.....	53
4.1.3	ΔΟΚΙΜΙΟ GA-6-Κ1.....	55
4.2	ΔΟΚΙΜΙΟ GA-6.....	59
4.2.1	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΥΔΡΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΚΑΛΙΟΥ.....	66
4.3	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ.....	67
4.3.1	ΕΠΙΡΡΟΗ ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΝΩΝ.....	68
4.3.2	ΕΠΙΡΡΟΗ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑΣ ΑΔΡΑΝΩΝ.....	70

4.3.3	ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΤΗΣ ΜΕΤΑΚΑΟΛΙΝΗΣ	72
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	74
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	76

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Χρονοδιάγραμμα αλκαλικών τσιμέντων	20
Πίνακας 2. Τεχνικές πληροφορίες τσιμεντοκονιάματος τύπου Α	21
Πίνακας 3. Τεχνικές πληροφορίες τσιμεντοκονιάματος τύπου Β	22
Πίνακας 4. Εφελκυστική και θλιπτική αντοχή των 2 τσιμεντοκονιαμάτων	22
Πίνακας 5. Επί τις εκατό ποσοστό συρρίκνωσης γεωπολυμερούς σε σύγκριση με το τσιμέντο Portland (Davidovits, 1988).....	29
Πίνακας 6. Αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής της έρευνας των Çelikten & Burak (2021)	31
Πίνακας 7. Ονομασία κονιαμάτων	35
Πίνακας 8. Χημική ανάλυση μετακαολίνης Μ	37
Πίνακας 9. Χημική σύνθεση μετακαολίνης Α.....	38
Πίνακας 10. Αναλογίες υλικών με βάση αναφοράς την μετακαολίνη Α	43
Πίνακας 11. Αναλογίες υλικών με βάση αναφοράς την μετακαολίνη Μ	44
Πίνακας 12. Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης και σύνθλιψης για τα δοκίμια κονιάματος Α.....	44
Πίνακας 13. Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης και σύνθλιψης για τα δοκίμια κονιάματος Μ	45
Πίνακας 14. Χαρακτηριστικά των τριών δοκιμίων GA-7.....	51
Πίνακας 15. Πειραματικά αποτελέσματα αντοχών σε κάμψη και θλίψη GA-7.....	51
Πίνακας 16. Χαρακτηριστικά των τριών δοκιμίων GA-11.....	53
Πίνακας 17. Πειραματικά αποτελέσματα αντοχών σε κάμψη και θλίψη GA-11	54
Πίνακας 18. Χαρακτηριστικά των τριών δοκιμίων GA-6-K1	56
Πίνακας 19. Πειραματικά αποτελέσματα αντοχών σε κάμψη και θλίψη GA-6-K1	56
Πίνακας 20. Αναλογίες υλικών με βάση αναφοράς την Μετακαολίνη για κονιάματα GA-6.....	64
Πίνακας 21. Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης και θλίψης GA-6 κονιαμάτων	64

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1. Τύποι ινών α) γυαλιού, β) άνθρακα, γ) αραμιδίου.....	16
Σχήμα 2. Ινόπλεγμα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM). (D’Ambrisi et al., 2013)	18
Σχήμα 3. Τύποι ινοπλέγματος με κλώνους διατεταγμένους κάθετα μεταξύ τους α) PBO β)Χάλυβας γ)Ύαλος δ)Άνθρακας	18
Σχήμα 5. Επίδραση του τύπου κονιάματος στην αύξηση της καμπτικής ακαμψίας. (Kouta & Parakonstantinou 2021).....	23
Σχήμα 6. Πλεονεκτήματα του γεωπολυμερούς σκυροδέματος.....	26
Σχήμα 7. Αντοχή σε θλίψη γεωπολυμερών με βάση μετακαολίνη με διάφορες αναλογίες S/L (Lin et al.,2012).....	33
Σχήμα 8. Ανάμειξη μείγματος γεωπολυμερούς	36
Σχήμα 9. Μετακαολίνη A.....	37
Σχήμα 10. Μετακαολίνη M.....	38
Σχήμα 11. α) Αδρανή < 5mm β) Αδρανή 0,5 mm -1 mm.....	39
Σχήμα 12. Εφαρμογή κονιάματος σε επιφάνεια	
Σχήμα 13. Εφαρμογή κονιάματος σε μήτρα.....	39
Σχήμα 14. Δοκιμή σε κάμψη τριών σημείων.....	40
Σχήμα 15. Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης	41
Σχήμα 16. Δοκιμή σε κάμψη τριών σημείων.....	41
Σχήμα 17. Συγκεντρωτικό διάγραμμα εφελκυστικών αντοχών δοκιμών κονιαμάτων με χρήση μετακαολίνης A.....	46
Σχήμα 18. Συγκεντρωτικό διάγραμμα θλιπτικών αντοχών δοκιμών κονιαμάτων με χρήση μετακαολίνης A.....	46
Σχήμα 19. Συγκεντρωτικό διάγραμμα εφελκυστικών αντοχών δοκιμών κονιαμάτων με χρήση μετακαολίνης M.....	47
Σχήμα 20. Συγκεντρωτικό διάγραμμα θλιπτικές αντοχών δοκιμών κονιαμάτων με χρήση μετακαολίνης M.....	47
Σχήμα 21. Δοκίμιο μετά από κάμψη GA-7-K _{FL}	48
Σχήμα 22. Δοκίμιο μετά από κάμψη GA-9	48
Σχήμα 23. Δοκίμιο μετά από κάμψη GA-12	49
Σχήμα 24. Σκυρόδεμα μετά από δοκιμή σε θλίψη	49
Σχήμα 25. Σκληρυμένα δοκίμια GA-7	52
Σχήμα 26. Τα δοκίμια του μίγματος GA-7 μετά από την δοκιμή τους σε κάμψη	53

Σχήμα 27. Σκληρυμένα δοκίμια GA-11.....	54
Σχήμα 28. Τα δοκίμια του μίγματος GA-11 μετά από την δοκιμή τους σε κάμψη.....	55
Σχήμα 29. Σκληρυμένα δοκίμια GA-6-K1.....	57
Σχήμα 30. Τα δοκίμια του μίγματος GA-6-K1 μετά από την δοκιμή τους σε κάμψη	57
Σχήμα 31. Εφελκυστικές αντοχές των τριών καλύτερων κονιαμάτων.....	58
Σχήμα 32. Θλιπτικές αντοχές των τριών καλύτερων κονιαμάτων.....	58
Σχήμα 33. Κονίαμα GA-6 έπειτα από δοκιμή σε κάμψη	59
Σχήμα 34. Σκληρυμένο δοκίμιο GA-6.2-6F	60
Σχήμα 35. GA-6.2-6F μετά από την δοκιμή του σε κάμψη	61
Σχήμα 36. Το σκληρυμένο δοκίμιο GA-6- Καq	62
Σχήμα 37. GA-6- Καq μετά από την δοκιμή του σε κάμψη	62
Σχήμα 38. Το σκληρυμένο δοκίμιο GA-6-K2.....	63
Σχήμα 39. Κονίαμα GA-6-K2 μετά την δοκιμή σε κάμψη.....	63
Σχήμα 40. Σύγκριση εφελκυστικών αντοχών δοκιμίων GA-6.....	64
Σχήμα 41. Σύγκριση θλιπτικών αντοχών δοκιμίων GA-6	65
Σχήμα 42. Επιρροή ινών στην εφελκυστική αντοχή των κονιαμάτων	66
Σχήμα 43. Επιρροή Υδροξειδίου του Καλίου στα δοκίμια με μετακαολίνη Α.....	67
Σχήμα 44. Επιρροή ινών στα δοκίμια GA-4 και GA-12.....	68
Σχήμα 45. Επιρροή ινών στα δοκίμια GA-1 και GA-11.....	68
Σχήμα 46. Επιρροή ινών στο δοκίμιο GM-6	69
Σχήμα 47. Επιρροή κοκκομετρίας των αδρανών στα δοκίμια με μετακαολίνη Α.....	70
Σχήμα 48. Επιρροή κοκκομετρίας των αδρανών στα δοκίμια με μετακαολίνη Μ.....	71
Σχήμα 49. Παράμετρος τύπος μετακαολίνης	72
Σχήμα 50. Επίδραση τύπου μετακαολίνης στην εφελκυστική αντοχή των κονιαμάτων.....	73

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΝΑΓΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Με την πάροδο του χρόνου φλέγον ζήτημα αποτελεί η ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών. Κυρίως στην Ελλάδα και όχι μόνο, η πλειοψηφία των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος έχουν ανεγερθεί πριν την θέσπιση των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών, με συνέπεια οι κατασκευές αυτές να είναι ευαίσθητες στο φαινόμενο του σεισμού. Υποχρέωση όλων των μηχανικών είναι η εξασφάλιση της ασφάλειας των πολιτών. Το φαινόμενο του σεισμού δεν είναι ο μοναδικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπ' όψη για τον σχεδιασμό της κατασκευής, μια αντίξοχη κλιματική συνθήκη όπως η πυρκαγιά, η φθορά των δομικών υλικών καθώς και τα δυσμενή φορτία συμβάλλουν με την σειρά τους στην ευπάθεια των υφιστάμενων κατασκευών. Εν κατακλείδι, η συντήρηση και ενίσχυση των υφιστάμενων κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, αποτελεί ζωτικής σημασίας θέμα που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι μηχανικοί.

1.2 ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Σύνθετα υλικά ονομάζουμε εκείνα τα οποία αποτελούνται κυρίως από δύο συστατικά μέρη. Το πρώτο συστατικό μέρος χαρακτηρίζεται ως οπλισμός και παρέχει μηχανικές ιδιότητες και το δεύτερο συστατικό μέρος χαρακτηρίζεται ως μήτρα και είναι υπεύθυνη για την εξασφάλιση της μέγιστης δυνατής εκμετάλλευσης των ιδιοτήτων της ενίσχυσης.

Οι σύγχρονες τεχνικές ενίσχυσης, χρησιμοποιούν προηγμένα υλικά τα οποία αποτελούνται από ίνες υψηλής αντοχής σε συνδυασμό με οργανική ή ανόργανη μήτρα. Τέτοια σύνθετα υλικά, εξωτερικά προσαρτημένα σε στοιχεία (δοκούς, υποστυλώματα, τοιχοποιίες κ.λπ.), που αποτελούνται από συνεχείς ίνες (συνήθως άνθρακα ή γυαλί) σε συνδυασμό με εποξειδική ρητίνη και διατίθενται με τη μορφή άκαμπτων λωρίδων ή εύκαμπτων υφασμάτων από ίνες σε μία ή περισσότερες διευθύνσεις ονομάζονται Ινοπλισμένα Πολυμερή ΙΟΠ ή στην αγγλική ορολογία Fiber Reinforced Polymer - FRP.

Τα σύνθετα αυτά υλικά εμφανίζουν κάποια αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά όπως η υψηλή εφελκυστική αντοχή, η θεμιτή ανθεκτικότητα σε διάρκεια και τέλος το χαμηλό βάρος. Παρόλα αυτά, εμφανίζουν και κάποια μειονεκτήματα τα οποία προέρχονται κυρίως από την μήτρα. Αυτά είναι το υψηλό κόστος, η δυσλειτουργία τους σε υψηλές θερμοκρασίες, η αδυναμία εφαρμογής τους σε υγρές επιφάνειες αλλά και η αδυναμία συνύπαρξης με υλικά του υποστρώματος όπως το σκυρόδεμα ή η τοιχοποιία.

Κύριος ρόλος της μήτρας είναι να συγκρατεί τις ίνες μεταξύ τους και να τις προστατεύει από περιβαλλοντικές φθορές. Για να μπορούν να επιτευχθούν τα παραπάνω θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ολκιμότητα, ανθεκτικότητα και ευκαμψία.

Καθώς, η χρήση των ρητινών επιφέρει πολλούς κινδύνους στο εργατικό προσωπικό μέσω των αναθυμιάσεων ξεκίνησε η αναζήτηση ενός νέου σύνθετου υλικού ικανό εξίσου για την ενίσχυση στοιχείων. Το νέο υλικό ενίσχυσης που βρέθηκε χαρακτηρίστηκε ως Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM) ή στην αγγλική ορολογία Textile Reinforced Mortar (TRM) και συνδυάζει πλέγματα ινών με υψηλή αντοχή (ινοπλέγματα) με κονιάματα ανόργανης σύστασης (τσιμεντοκονιάματα). Για την καλύτερη συνεργασία των ινών με το κονίαμα, τα πλέγματα κατασκευάζονται από δέσμες ινών ανά αποστάσεις σε δύο ή περισσότερες διευθύνσεις. Τα IAM υπερτερούν τα ΙΟΠ καθώς και αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες, έχουν χαμηλό κόστος και μπορεί να γίνει εφαρμογή τους σε υγρές επιφάνειες.

Δυστυχώς, υπάρχει ένα βασικό μειονέκτημα με την χρήση των IAM, κατά την δημιουργία των τσιμεντοκονιαμάτων εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα και κατ' επέκταση αύξηση των εκπομπών ρυπογόνων αερίων. Λύση στο παρόν πρόβλημα αποτελεί η χρήση γεωπολυμερούς μήτρας. Τα τελευταία χρόνια ερευνήθηκαν υλικά φιλικά προς το περιβάλλον τα λεγόμενα γεωπολυμερή, με σκοπό την χρήση τους σε συνδυασμό με το σκυρόδεμα ώστε να αποφευχθούν οι τόσο μεγάλες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Τα γεωπολυμερή είναι αποτέλεσμα της χημικής αντίδρασης αργιλοπυριτικών πρώτων υλών οι οποίες είναι ανόργανης ή οργανικής προέλευσης, για παράδειγμα γεωπολυμερή είναι η ιπτάμενη τέφρα, η σκωρία καμίνου και η μετακαολίνη. Τα γεωπολυμερή χαρακτηρίζονται από εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες όπως η υψηλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, το χαμηλό κόστος τους, η ανθεκτικότητα σε διαβρωτικό περιβάλλον και η χαμηλή εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα. Αυτή η πειραματική μελέτη επικεντρώθηκε στη σκοπιμότητα της χρήσης ενός γεωπολυμερούς ως κύριο συνδετικό υλικό για την ανάπτυξη ενός κονιάματος που θα είναι κατάλληλο για TRM ενίσχυση των εφαρμογών.

1.3 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εύρεση κονιαμάτων φιλικών προς το περιβάλλον, ώστε να εμφανίζουν υψηλές εφελκυστικές και θλιπτικές αντοχές με αποτέλεσμα να είναι εφικτή η ενίσχυση των κατασκευών. Πιο αναλυτικά, το πειραματικό κομμάτι περιλαμβάνει την παρασκευή είκοσι πέντε κονιαμάτων, διαστάσεων 40 mm x 40 mm x 160 mm, με κονία μετακαολίνης. Ακόμα έχει γίνει πρόσμιξη επιπλέον υλικών όπως ινών ενίσχυσης και υδροξειδίου του καλίου. Όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής του κονιάματος και στη συνέχεια, τα δύο κομμάτια που προέκυψαν έγινε δοκιμή σε θλίψη για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής. Η προσθήκη ινών, η κοκκομετρία, ο τύπος της μετακαολίνης και η επίδραση του υδροξειδίου του καλίου αποτελούν παραμέτρους προς διερεύνηση. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να βρεθούν κονιάματα υπό την εξέταση των παραπάνω παραγόντων ώστε να κριθούν αξιόπιστα με απότερω σκοπό την μελλοντική χρήση τους στις ενισχύσεις κατασκευών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2. ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.2 ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ (ΙΟΠ)

Οι παλαιωμένες κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα δεν μπορούν να ανταπεξέλθουν στις σύγχρονες απαιτήσεις. Η αναγκαιότητα μεταφοράς υψηλότερων φορτίων και η υποχρέωση να πληρούν αυστηρότερους κώδικες σχεδίασης, οδηγούν στην ανάγκη για την δομική αναβάθμισή τους. Αυτή η ανάγκη καλύφθηκε αρχικά με την εισαγωγή σύνθετων πολυμερών τα οποία αποτελούνται από ίνες και από ρητίνη και ονομάζονται ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ) σε αγγλική ορολογία Fiber Reinforced Polymers (FRP).

Οι ίνες είναι υψηλής αντοχής και έχουν βασικές ιδιότητες όπως υψηλή εφελκυστική αντοχή, μεγάλο μέτρο ελαστικότητας με αποτέλεσμα να μετατρέπουν το σύνθετο υλικό σε πιο δύσκαμπτο καθώς λειτουργούν ως οπλισμός. Συνήθως, αυτά τα πλέγματα είναι προκατασκευασμένα από ίνες άνθρακα ή υάλου και κάποιες φορές από ίνες αραμιδίου (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Τύποι ινών α) γυαλιού, β) άνθρακα, γ) αραμιδίου

Η ρητίνη έχει την λειτουργία του συγκολλητικού υλικού. Χαρακτηρίζεται επίσης, από υψηλή αντοχή και χαμηλή χημική διάβρωση. Αναγκαία θεωρείται η συνάφεια μεταξύ της ρητίνης και των ινών με κύριο σκοπό την δημιουργία ισχυρών χημικών και μηχανικών δεσμών. Η μήτρα ρητίνης συμβάλει θετικά στην συνοχή του σύνθετου υλικού καθώς και μέλημα της είναι η μεταφορά φορτίων και η κατανομή των τάσεων στις ίνες ώστε να λειτουργούν ως ομογενές υλικό.

Τα ΙΟΠ μπορούν να βρεθούν σε διαφορετικές μορφές, όπως για παράδειγμα ράβδοι, καλώδια και πάνελ καθώς και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως οπλισμός σε κάμψη, διάτμηση, προένταση ή και για τοπική ενίσχυση δομικών στοιχείων.

Επιπρόσθετα, τα ΙΟΠ παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα όπως υψηλή αντοχή, χαμηλό βάρος, αντοχή στη διάβρωση και ταχύτητα εφαρμογής.

Ωστόσο, η χρήση τους σχετίζεται και με αρκετά μειονεκτήματα όπως:

- υψηλό κόστος,
- έλλειψη πυραντοχής,
- αδυναμία εφαρμογής σε υγρές επιφάνειες
- έλλειψη διαπερατότητας ατμών

Τα δυο τελευταία οφείλονται κυρίως στην ρητίνη, δηλαδή την μήτρα.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν αυτά τα ζητήματα, οι ερευνητές πρότειναν την αντικατάσταση των οργανικών ρητινών που χρησιμοποιούνται στα FRP με ανόργανα κονιάματα.

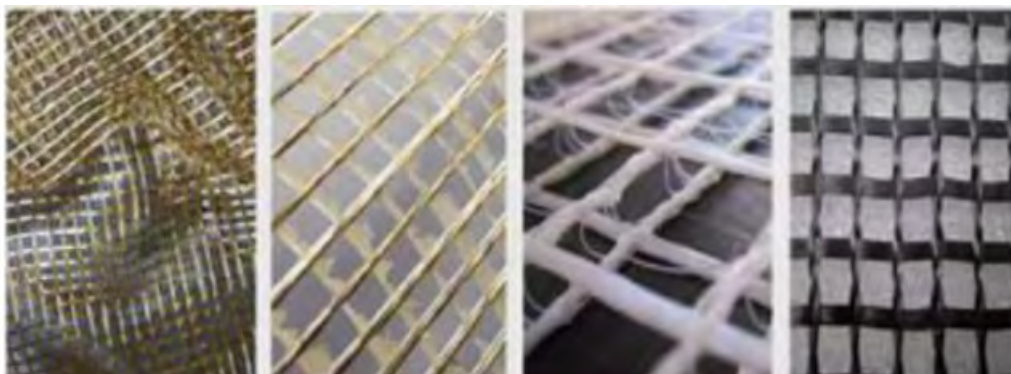
2.3 ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ (IAM)

Λόγω των αρκετών μειονεκτημάτων των ΙΟΠ βρέθηκε ένα νέο σύνθετο υλικό το οποίο ονομάστηκε ινόπλεγμα ανόργανης μήτρας (IAM) και σε αγγλική ορολογία Textile Reinforced Mortar (TRM) και είναι ένα σύνθετο υλικό το οποίο αποτελείται από πλέγματα ινών υψηλής αντοχής σε συνδυασμό με ανόργανες μήτρες, όπως κονιάματα με βάση το τσιμέντο. Έχουν γίνει δοκιμές όπου χρησιμοποιήθηκαν δομικά στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα ενισχυμένα με TRM και οι μελέτες έδειξαν ότι μπορούν να αντικαταστήσουν με επιτυχία τα FRP. Επιπρόσθετα, ο ρόλος του κονιάματος είναι διπλός, λειτουργεί αφενός μεν ως μήτρα των IAM, εξασφαλίζοντας τη συνεργασία ινών - μήτρας όχι μόνο μέσω δεσμού αλλά και, κυρίως, μέσω μηχανικής εμπλοκής, αφετέρου δε ως συγκολλητικό μέσο μεταξύ του IAM και του υποστρώματος Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Ινοπλέγμα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM). (D'Ambrisi et al., 2013)

Τα ινοπλέγματα αποτελούνται από πολλές δέσμες ινών οι οποίες αποτελούν έναν κλώνο ινών και στην συνέχεια αυτοί οι κλώνοι διατάσσονται σε δύο ή περισσότερες διευθύνσεις. Οι κλώνοι θα πρέπει να έχουν αποστάσεις μεταξύ τους ώστε να σχηματιστούν οι βρογχίδες με σκοπό το κονίαμα να εισέρθει ανάμεσα από τα διάκενα και να διασφαλιστεί η συνάφεια μεταξύ της μήτρας και του πλέγματος. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται διαφορετικοί τύποι ινοπλέγματος με κλώνους διατεταγμένους κάθετα μεταξύ τους.



Σχήμα 3. Τύποι ινοπλέγματος με κλώνους διατεταγμένους κάθετα μεταξύ τους
α) PBO β)Χάλυβας γ)Ύαλος δ)Άνθρακας

Η ανόργανη μήτρα έχει ρόλο να αναλάβει και να μεταβιβάσει τις εφελκυστικές τάσεις στις ίνες αλλά και να διεισδύει στα ινοπλέγματα ώστε να προκύψει η μέγιστη συνάφεια μεταξύ μήτρας και ινοπλέγματος. Οι ανόργανες μήτρες που χρησιμοποιούνται στο TRM είναι τσιμεντοειδείς. Αν και το τσιμέντο λειτουργεί αρκετά καλά ως συνδετικό, η παραγωγή του συνδέεται με μεγάλο αποτύπωμα άνθρακα, και επομένως δεν μπορεί να θεωρηθεί φιλικό προς

το περιβάλλον. Ως εκ τούτου, οι ερευνητές εξέτασαν άλλα παρόμοια υλικά με μικρότερο αποτύπωμα άνθρακα που εμφανίζουν άνθρακα το οποίο είναι 23-55% χαμηλότερο από αυτό του τσιμέντου, Hamilton (2018) τα λεγόμενα γεωπολυμερή, όπου θα αναλυθούν στην επόμενη ενότητα.

Τα ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας (IAM) εμφανίζουν πολλά πλεονεκτήματα που σχετίζονται κυρίως με την σύσταση του μητρικού υλικού και αυτά είναι τα εξής :

- Χαμηλό κόστος
- Λόγω των ινών παρουσιάζουν υψηλή αντοχή
- Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες
- Αντίσταση σε διαβρωτικό περιβάλλον
- Δυνατότητα εφαρμογής σε υγρές επιφάνειες
- Εύκολη εφαρμογή

2.4 ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ

Το σκυρόδεμα είναι ένα σύνθετο υλικό που αποτελείται από χονδρόκοκκα αδρανή, άμμο, τσιμέντο και νερό. Αν και το σκυρόδεμα παρουσιάζει σημαντική θλιπτική αντοχή, έχει μικρή αντοχή σε εφελκυσμό. Οι ενισχυμένες ράβδοι χάλυβα χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση της αντοχής σε εφελκυσμό του σκυροδέματος. Είναι απαραίτητο να ενσωματωθούν νέα υλικά για τη βελτίωση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος. Παρόλο που, το αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος προστατεύει τον χάλυβα από τη διάβρωση και τον καθιστά πολύ ανθεκτικό, δεν είναι πάντα δυνατό να παρέχεται αποτελεσματική προστασία με αποτέλεσμα να επικεντρωθούμε στην μελέτη κονιαμάτων.

Βασική παράμετρο για τον χαρακτηρισμό υλικών με βάση το τσιμέντο αποτελούν οι ιδιότητες του στρώματος κονιάματος, ειδικά για πορώδες σκυρόδεμα που κατασκευάζεται από συσσωματωμένα αδρανή. Το στρώμα κονιάματος συνδέει τα αδρανή σε μια σταθερή συνολική δομή, σχηματίζοντας σταδιακά τη δομή του σκελετού του πορώδους σκυροδέματος. Όταν το πορώδες σκυρόδεμα είναι υπό φορτίο, η στρώση κονιάματος παίζει το ρόλο της μεταφοράς του φορτίου. Επιπλέον, έχει αναφερθεί ότι το πάχος της στρώσης της τσιμεντοκονίας έχει γραμμική σχέση με τη μηχανική αντοχή του πορώδους σκυροδέματος και η αντοχή σε θλίψη του πορώδους σκυροδέματος αυξάνεται με το πάχος της στρώσης κονιάματος. Ωστόσο, το πολύ παχύ στρώμα κονιάματος θα μειώσει το πορώδες του πορώδους σκυροδέματος,

μειώνοντας έτσι τη διαπερατότητα του νερού. Επιπλέον, η αντοχή του πορώδους σκυροδέματος επηρεάζεται από την ικανότητα πρόσφυσης του στρώματος κονιάματος. Οι Ni et al.(2021) ήταν αυτοί που χρησιμοποίησαν ιπτάμενη τέφρα ώστε να βελτιωθεί η ικανότητα πρόσφυσης του κονιάματος για την αύξηση της αντοχής σε θλίψη του πορώδους σκυροδέματος. Η ιδιότητα του στρώματος κονιάματος των τσιμεντοκονιών μελετήθηκε από πολλούς ερευνητές, όπως οι Jimma et al.(2014) οι οποίοι διαπίστωσαν ότι με την αύξηση της αναλογίας του υδροτσιμέντου, το πάχος του στρώματος κονιάματος αυξήθηκε πρώτα και μετά μειώθηκε, ενώ μειώθηκε με σταθερό ρυθμό η ικανότητα πρόσφυσης. Mao, et al. (2022)

Μέσα από μία ανασκόπηση των A. Palomo et al. για την αλκαλική ενεργοποίηση περιέχεται στον Πίνακα 1 που συνοψίζει τις έρευνες που σχετίζονται με τα αλκαλικά τσιμέντα από το 1930 έως το 2014.

Πίνακας 1. Χρονοδιάγραμμα αλκαλικών τσιμέντων

Year	Name	Country	Study/impact
1930	Kühl	Germany	Slag setting in the presence of dry potash (24)
1937	Chassevent	unknown	Slag reactivity measurement using a dry potash and soda solution (25)
1940	Purdon	Belgium	Clinker-free cements consisting of slag and caustic soda or slag and caustic alkalis synthesised with a base and an alkaline salt (8)
1957	Glukhovskiy	USSR	Binder synthesis using hydrous and anhydrous aluminosilicates (vitreous rocks, clays, steel mill slag) and alkalis; proposal for a Me_2O - MeO - Me_2O_3 - SiO_2 - H_2O cementitious system; coining of the term "soil cement" (9)
1981	Davidovits	France	Alkalis mixed with a blend of burnt kaolinite, limestone and dolomite, and trademarks such as Geopolymer, Pyrament, Geopolycem, Geopolymite (27)
1986	Krivenko	USSR	Principles governing system Me_2O - MeO - Me_2O_3 - SiO_2 - Al_2O_3 properties; proposal for the generic name "alkaline cements" and the specific name "geocement" (17)
1999	Palomo	Spain	Production of hardened cementitious materials from alkali-activated type F fly ashes (28)
2006	Shi & Krivenko & Roy	Ukraine - USA	First book on alkali-activated cements (11)
2014	Provis J., & van Deventer J.S.J	UK & Australia	Alkali activated Materials State of the art Report. RILEM TC 224-AAM (13)

2.5 ΤΣΙΜΕΝΤΟΕΙΔΕΙΣ ΜΗΤΡΕΣ

Τα τσιμεντοειδή κονιάματα είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα και μάλιστα κάποια από αυτά έχουν αναπτυχθεί για χρήση σε ενισχύσεις κατασκευών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο τύποι εμπορικών διαθέσιμων τσιμεντοειδών κονιαμάτων. Το πρώτο το οποίο θα αναφερθεί ως *Τύπος Α* διαθέτει εξαιρετικά χαρακτηριστικά εργασιμότητας και λείο φινίρισμα επιφάνειας, έχει πολύ καλή πρόσφυση σε παραδοσιακά υποστρώματα όπως για παράδειγμα το τούβλο, η πέτρα και πορώδεις επιφάνειες όπως το σκυρόδεμα. Επίσης, έχει χαμηλό μέτρο ελαστικότητας πράγμα που το κάνει κατάλληλο για μη δομητικές τοπικές επισκευές στοιχείων σκυροδέματος χαμηλής έως μεσαίας κατηγορίας αντοχής.

Τα κύρια συστατικά του είναι το τσιμέντο Portland , επιλεγμένα αδρανή και πρόσθετα.

Ειδικότερα, κάποιες από τις τεχνικές πληροφορίες παρατίθενται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Τεχνικές πληροφορίες τσιμεντοκονιάματος τύπου Α

Technical information		Τσιμεντοκονίαμα τύπου Α			
Compressive strenght	class of M20				(EN 998-2)
	class of CS IV				(EN 998-1)
	class of R2				(EN 1504-3)
	1 day	7 days	28 days		
	≥6 MPa	≥18 MPa	≥22 MPa	(EN 12190)	
Measure of elasticity in compression	~10 GPa				
Tensile strength to bending	≥6 MPa				(EN 196-1)
Tensile strength	≥0,8 MPa				(EN 1542)
	≥0,8 Mpa (FP:A)				(EN 1015-12)
Shear adhesion	0,15 N/mm ²				(EN 998-2)
Swelling	≥0,8 MPa				(EN 12617-4)
Water absorption	Wc 2				
	≤0,2 [kg/(m ² ·min ^½)]				(EN 1015-18)

Ένας δεύτερος τύπος Β είναι μία τσιμεντοκονία ταχείας ξήρανσης και υψηλών αντοχών το οποίο έχει και υψηλή θερμική αγωγιμότητα. Παρουσιάζονται στον Πίνακα 3 κάποιες τυπικές εφελκυστικές και θλιπτικές αντοχές του τσιμεντοκονιάματος Β

Πίνακας 3. Τεχνικές πληροφορίες τσιμεντοκονιάματος τύπου Β

TIME (days)	MECHANICAL RESISTANCE (N/mm ²)	
	COMPRESSIVE STRENGTH	FLEXURAL STRENGTH
1	> 8	> 3
4	> 15	> 4
7	> 22	> 5
28	> 30	> 6

Παρατηρείται ότι το τσιμεντοκονίαμα Β έχει καλύτερη θλιπτική αντοχή από το τσιμεντοκονίαμα Α.

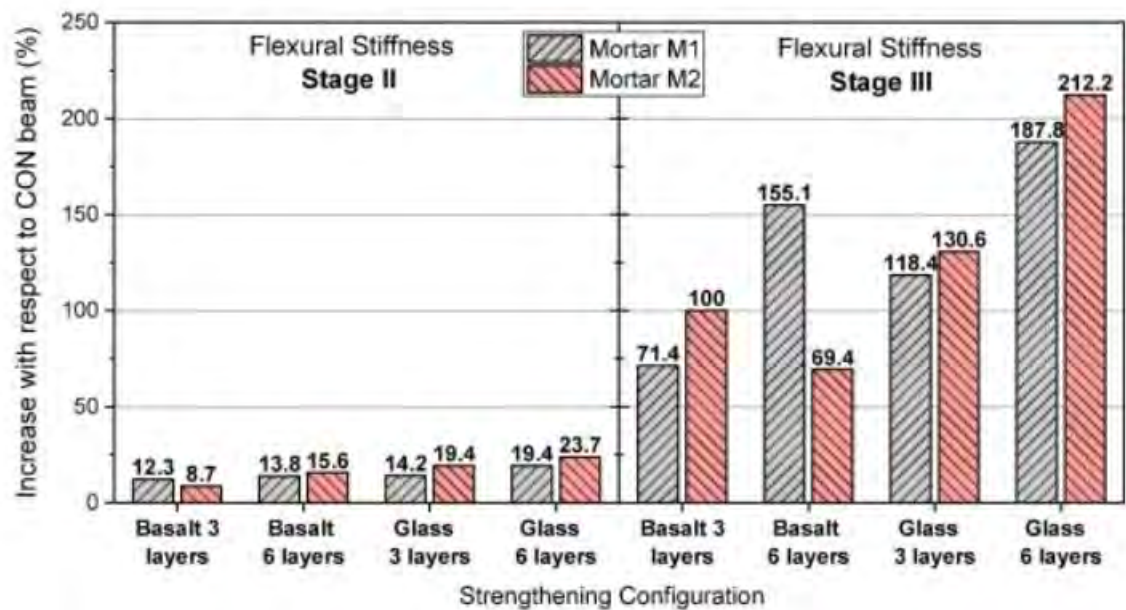
Από μία έρευνα που διεξάχθηκε από τους Kouta & Papakonstantinou (2021) χρησιμοποιήθηκαν ως μήτρα των σύνθετων υλικών TRM δύο διαφορετικοί τύποι κονιαμάτων, καθώς και συνδετικό μεταξύ του TRM και του υποστρώματος σκυροδέματος των δοκών οπλισμένου σκυροδέματος.

Ο πρώτος τύπος κονιάματος, αναφέρεται ως «M1», ήταν έτοιμο τσιμεντοκονίαμα με συνθετικά πολυμερή και κατασκευαζόταν με ανάμειξη δύο συστατικών, το στερεό συστατικό και το υγρό συστατικό που περιείχε συνθετικά πολυμερή (23%) σε διασπορά νερού (γνωστό και ως «λάτεξ»). Το μέγιστο μέγεθος αδρανών ήταν 0,4 mm. Οι ίνες πολυπροπυλενίου ήταν προ-διασπαρμένες στο ξηρό μίγμα και είχαν μήκος περίπου 15 mm.

Ο δεύτερος τύπος κονιάματος, που αναφέρεται ως "M2", ήταν ένα έτοιμο μίγμα ενός τσιμεντοκονιάματος με ποζολανικά πρόσθετα, το οποίο αναμιγνύεται με νερό κατά βάρος (μείγμα σχεδόν ξηρό). Το μέγιστο μέγεθος αδρανών ήταν 1,4 mm. Οι ίνες πολυπροπυλενίου ήταν μικροΐνες προ-διασπαρμένες στο ξηρό μίγμα. Σημειώνεται ότι και τα δύο κονιάματα είχαν παρόμοια εργασιμότητα και πλαστική συνοχή Πίνακας 4.

Πίνακας 4. Εφελκυστική και θλιπτική αντοχή των 2 τσιμεντοκονιαμάτων

Mechanical property	Mortar M1	Mortar M2
Compressive strength on the day of testing (MPa)	25.37	20.09
Flexural strength on the day of testing (MPa)	7.22	5.25



Σχήμα 4. Επίδραση του τύπου κονιάματος στην αύξηση της καμπτικής ακαμψίας. (Kouta & Papakonstantinou 2021)

Από το Σχήμα 5, καθίσταται προφανές ότι σε τρεις από τις τέσσερις περιπτώσεις, τα δείγματα με κονίαμα M1 (με συνθετικά πολυμερή ως πρόσθετα) παρουσίασαν σημαντικά υψηλότερη ικανότητα κάμψης σε σύγκριση τα δείγματα με κονίαμα M2 (χωρίς συνθετικά πολυμερή).

Παρατηρήθηκε ότι ενώ τα δείγματα με το ασθενέστερο κονίαμα M2 παρουσίασαν αποκόλληση του σύνθετου TRM στη διεπιφάνεια κονιάματος/σκυροδέματος που προκλήθηκε από μια ενδιάμεση καμπτική ρωγμή, τα δείγματα με το ενισχυμένο κονίαμα M1 παρουσίασαν διαστρωματική διάτμηση του TRM. Με άλλα λόγια, ο δεσμός μεταξύ του κονιάματος και του υποστρώματος σκυροδέματος ήταν πολύ ισχυρότερος στα δείγματα με κονίαμα M1 σε σύγκριση με τα δείγματα με κονίαμα M2 και το επίπεδο αστοχίας μετατοπίστηκε εντός του πάχους του σύνθετου υλικού.

Συνολικά, από αυτή την έρευνα συμπεραίνεται ότι η χρήση κονιαμάτων με βάση το τσιμέντο με συνθετικά πολυμερή ως πρόσθετα βελτιώνει σημαντικά την αποτελεσματικότητα των συστημάτων ενίσχυσης TRM.

Επίσης, πρέπει να αναφερθεί ότι με την σύγκριση των τσιμεντοκονιαμάτων τύπου A και B με τα τσιμεντοκονιάματα του πειράματος (Kouta & Papakonstantinou 2021) παρατηρήθηκε ότι οι

αντοχές αποκλίνουν λίγο, καθώς στην πράξη υπάρχουν πολλοί παράμετροι που επηρεάζουν το αποτέλεσμα.

2.6 ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΗ

2.6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα οδηγεί στην υπερθέρμανση του πλανήτη και κατά συνέπεια δημιουργεί σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα. Τα υλικά με βάση το τσιμέντο είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα οικοδομικά υλικά. Η βιομηχανία τσιμέντου είναι μια από τους παραγωγούς εκπομπών άνθρακα και αναφέρεται ότι ευθύνεται για το 8% των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (Proaño, et al. 2020). Ως εκ τούτου, η βιώσιμη ανάπτυξη χαμηλών εκπομπών άνθρακα στη βιομηχανία τσιμέντου είναι ένας σημαντικός τρόπος για τη μείωση των εκπομπών άνθρακα. Το πυρίτιο, η ιπτάμενη τέφρα και άλλα ποζολανικά υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως ως εναλλακτικά τσιμεντοειδή υλικά για την παρασκευή υλικών με βάση το τσιμέντο.

2.6.2 ΙΣΤΟΡΙΑ

Η ανάπτυξη των γεωπολυμερών ξεκίνησε στην Ουκρανία στα τέλη της δεκαετίας του 1950, όταν ο Ουκρανός επιστήμονας Glukhovsky ανακάλυψε για πρώτη φορά τη δυνατότητα παραγωγής συνθετικών συνδετικών [synthesized binders] με χρήση αργιλοπυριτικών (άργιλος, πέτρα, σκωρία) και διαλύματα αλκαλιμετάλλων. Αναφέρθηκε στο συνδετικό ως «τσιμέντο εδάφους» [soil cement] και στο αντίστοιχο σκυρόδεμα ως «πυριτικό έδαφος» [soil silicates]. Το υλικό χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή δύο κατοικιών εννέα ορόφων στη Μαριούπολη της Ουκρανίας τη δεκαετία του 1960. Περισσότερα από 50 χρόνια μετά, τα κτίρια παραμένουν αλώβητα Hua, X., et al. (2008). Με αυτήν την τεχνική συνεχίστηκαν να χτίζονται περισσότερα κτίρια. Ωστόσο, το πρώτο κτήριο κατοικιών χωρίς τσιμέντο Portland, , χτίστηκε το 1989 στο Liptsk της Ρωσίας, με 20 ορόφους.

Το 1970-1973 μια τριετία καταστροφικών πυρκαγιών στη Γαλλία αποτέλεσε το έναυσμα του καθηγητή *J. Davidovits* για την ανάγκη εύρεσης υλικών ανθεκτικών σε υψηλές θερμοκρασίες υπό την μορφή μη εύφλεκτων και μη καύσιμων πλαστικών υλικών. Ο

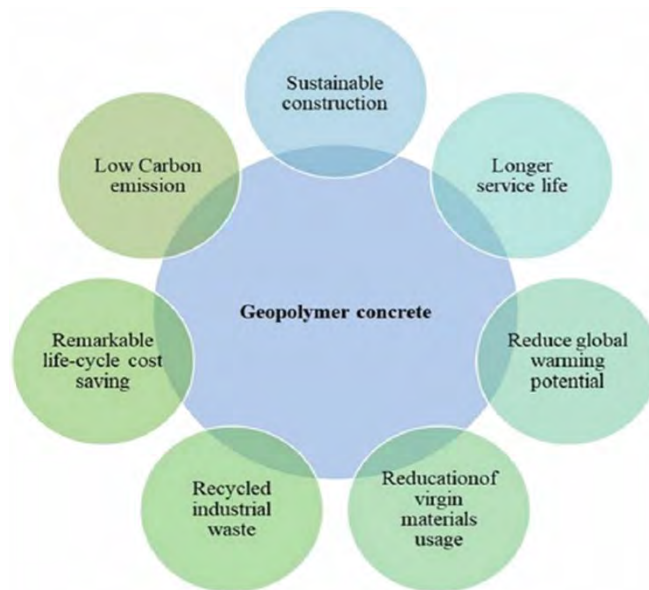
καθηγητής *Davidovits* συνδύασε τις γνώσεις του από την επιστήμη των οργανικών υλικών και της ζεολιθικής σύνθεσης και κατάφερε να δημιουργήσει άμορφα ημικρυσταλλικά υλικά με τρισδιάστατες αργιλοπυριτικές δομές που ονομάστηκαν **γεωπολυμερή** ή **ανόργανα πολυμερή**. Με τον όρο γεωπολυμερή να αποτελεί επικρατέστερο χαρακτηρισμό ενός συνθετικού αργιλοπυριτικού υλικού.

Το 1979 σύμφωνα πάλι με τον *Davidovits* τα βασικά δομικά μονομερή των γεωπολυμερών είναι τετράεδρα πυριτίου και αργιλίου ενωμένα με άτομα οξυγόνου που μοιράζονται από κοινού. (Τεκίδης 2011)

2.6.3 ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Ο *Davidovits* παρέδωσε την σκυτάλη σε πολλούς ακόμη ερευνητές οι οποίοι ασχολήθηκαν περαιτέρω με το γεωπολυμερές σκυρόδεμα. Κύριοι ερευνητές όπως οι (*Dawczyński et al. 2017*) αναφέρουν ότι το γεωπολυμερές σκυρόδεμα είναι μια εξαιρετική εναλλακτική λύση στο σκυρόδεμα από τσιμέντο Portland, ακόμη και σε εφαρμογές όπου χρησιμοποιείται οπλισμός χάλυβα. Το γεωπολυμερές σκυρόδεμα αναφέρεται ότι πληροί τις απαιτήσεις του σκυροδέματος σε σκληρά περιβάλλοντα όπως τα θειούχα εδάφη. Ως εκ τούτου, το γεωπολυμερές σκυρόδεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βιώσιμη εναλλακτική λύση για την παραγωγή ανθεκτικών κατασκευών, καθώς και για διάφορες εφαρμογές αποκατάστασης. Επιπρόσθετα, είναι πολύ ανθεκτικό στο χλώριο και ως εκ τούτου προκαλεί λιγότερες ζημιές όταν χρησιμοποιείται αλάτι για την τήξη του πάγου το χειμώνα. Το γεωπολυμερές σκυρόδεμα χρησιμοποιείται επίσης, σε κατασκευές από σκυρόδεμα όπως προβλήτες, παράκτιες γέφυρες και υποθαλάσσια στηρίγματα από σκυρόδεμα που εκτίθενται συνεχώς σε αλμυρό νερό λόγω της υψηλής αντοχής του στη διάβρωση του χλωρίου.

Εν συνεχεία, παρουσιάζεται το Σχήμα 6 στο οποίο φανερώνονται τα πλεονεκτήματα του γεωπολυμερούς σκυροδέματος Hassan, A., et al. (2019).



Σχήμα 5. Πλεονεκτήματα του γεωπολυμερούς σκυροδέματος.

2.6.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

Με τον γεωπολυμερισμό ενεργού πρόδρομου αργιλοπυριτικού και ενεργοποιητή αλκαλίων σχηματίζεται ένα υλικό το οποίο έχει τα εξής πλεονεκτήματα (Amran et al., 2020; Wan et al., 2017):

- Εξαιρετικής μηχανική ιδιότητα
- Υψηλή αντοχή
- Αντίσταση σε οξύ και θερμότητας
- Χαμηλό κόστος
- Χαμηλή εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα

Συνολικά, η παγκόσμια βιομηχανία τσιμέντου παράγει 5%-7% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα CO₂ ετησίως (Benhelal et al., 2013) και καταναλώνει περίπου 1800 MJ ενέργειας ανά τόνο κλίνκερ στη διαδικασία παραγωγής τσιμέντου (Rashad and Zeedan, 2011). Το αποτύπωμα άνθρακα των γεωπολυμερών είναι 60%-80% χαμηλότερο από αυτό των γεωπολυμερών (Benhelal et al., 2013). Αυτές οι εξαιρετικές ιδιότητες επιτρέπουν στα γεωπολυμερή να χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορους τομείς, όπως δομικά στοιχεία (Singh

et al., 2020), επιστρώσεις (Lv et al., 2019), πυρίμαχα υλικά (Gao et al., 2020), επισκευές έκτακτης ανάγκης (Bhutta et al., 2019)

Από την άλλη όψη του νομίσματος όμως, αν και τα γεωπολυμερή θεωρούνται πιο φιλικά προς το περιβάλλον από το παραδοσιακό τσιμέντο Πόρτλαντ, υπάρχουν ορισμένα μειονεκτήματα στη χρήση τους στον κατασκευαστικό τομέα. Λόγω της υψηλής αλκαλικότητας των υλικών που χρησιμοποιούνται, είναι δύσκολος ο χειρισμός τους, γεγονός που μπορεί να εγκυμονεί κινδύνους για την ασφάλεια και την υγεία. Αυτά τα υλικά απαιτούν επίσης προσεκτικό έλεγχο ωρίμανσης και δεν είναι εγγυημένα ότι θα εφαρμοστούν στο εργοτάξιο. Επιπλέον, για να εξασφαλιστούν υψηλότερα επίπεδα βιωσιμότητας, είναι απαραίτητο να βελτιωθεί η παραγωγή αλυσίδων γεωπολυμερών. Η χρήση συμβατικών ενεργοποιητών, όπως εμπορικά υδροξείδια και πυριτικό νάτριο και κάλιο, αυξάνει την ενσωματωμένη ενέργεια, τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και το κόστος των γεωπολυμερών λόγω της διαδικασίας κατασκευής τους.

2.6.5 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

Τα γεωπολυμερή μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες σε συνάρτηση με τη χημική σύσταση της πρώτης ύλης (Τσιτούρας, 2013).

Η πρώτη κατηγορία αφορά τα γεωπολυμερή που παρασκευάζονται από υλικά που είναι πλούσια σε ασβέστιο Ca, όπως είναι οι σκωρίες υψικαμίνων.

Η δεύτερη κατηγορία σχετίζεται με τις πρώτες ύλες χαμηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο Ca και πλούσιες σε διοξείδιο του πυριτίου SiO₂ και Al₂O₃, όπως είναι **η μετακαολίνη**, τα οποία όταν ενεργοποιηθούν με ένα αλκαλικό διάλυμα ενεργοποίησης σχηματίζεται ένα άμορφο υλικό που αναπτύσσει υψηλές μηχανικές αντοχές σε πρώιμες ηλικίες με μία ελαφρά θερμική ωρίμανση.

Στην παρούσα μελέτη θα ασχοληθούμε με την δεύτερη κατηγορία.

2.6.6 ΜΕΤΑΚΑΟΛΙΝΗ

Μία από τις πιο κοινές πρώτες ύλες που περιέχουν αργιλοπυριτικό άλας στο γεωπολυμερές σκυροδέμα είναι η μετακαολίνη. Η μετακαολίνη παράγεται από φυσικό άργιλο (καολίνη) με πύρωση σε μέτριες θερμοκρασίες. Δύο τύποι ενεργοποιητών αλκαλίων χρησιμοποιούνται σε μείγματα γεωπολυμερών, τα οποία είναι ένας συνδυασμός είτε υδροξειδίου του νατρίου (NaOH) με πυριτικό νάτριο ή υδροξειδίου του καλίου (KOH) με πυριτικό κάλιο (K_2SiO_3). Οι Mehsas, Siline και Zeghichi (2021) είπαν ότι μια μελέτη είχε στόχο να εξετάσει την επίδραση των παραμέτρων φρύξης σε δύο Αλγερινούς αργίλους καολίνης (KT1 και KT2) που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία της μετακαολίνης, όπου η πρώτη ύλη υποβλήθηκε σε διάφορους θερμικούς κύκλους, αλλάζοντας τη θερμοκρασία (από 500 ° έως 1000°C) και χρόνος αποθήκευσης (2, 3 και 5 ώρες). Τα αποτελέσματα των διαφόρων δοκιμών συμφωνούν απόλυτα, δείχνοντας ότι η όπτηση ενισχύει την ποζολανική αντιδραστικότητα και ότι ο θερμικός κύκλος στους 800°C - 5 ώρες τους επιτρέπει να χρησιμοποιηθούν σε φιλικά προς το περιβάλλον τσιμέντα (Almutairi, et al. 2021).

Επιπρόσθετα η μετακαολίνη μπορεί να χαρακτηριστεί ως ποζολανικό υλικό δεδομένου ότι:

- αποτελεί δραστικό αργιλοπυριτικό υλικό καθώς η θερμική επεξεργασία έχει ως αποτέλεσμα τη διάσπαση του κρυσταλλικού πλέγματος της καολίνης,
- οδηγεί στην ενεργοποίηση του αργιλίου Al και του πυριτίου Si και αντιδρά με το υδροξείδιο του ασβεστίου $Ca(OH)_2$.

Με την παρουσία του νερού η μετακαολίνη αντιδρά με το υδροξείδιο του ασβεστίου $Ca(OH)_2$ και παράγονται ενώσεις ασβεστίου, αργιλίου και πυριτίου

Συνοπτικά, η παρουσία της μετακαολίνης:

- βελτιώνει το πορώδες του σκυροδέματος και την αντίστοιχη κατανομή πόρων
- μειώνει τη διαπερατότητα του σκυροδέματος σε νερό
- και βελτιώνει σημαντικά την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, με ταυτόχρονη βελτίωση της μηχανικής αντοχής του

(Davidovits et al., 1990, Comrie and Davidovits, 1998).

Επιπλέον, σύμφωνα με τους (Morsy et al. 2018) η μετακαολίνη βελτιώνει σημαντικά την αντοχή σε κάμψη και θλίψη του σκυροδέματος

2.6.7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ PORTLAND ΜΕ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΗ

Τα γεωπολυμερή σε σύγκριση με το τσιμέντο Portland διαφέρουν εντελώς καθώς ακολουθούν εντελώς διαφορετική διαδικασία αντίδρασης ώστε να επιτευχθεί η δομική ακεραιότητα μέσω πήξης και σκλήρυνσης καθώς και η διατήρηση αυτής. Ο σχηματισμός της μήτρας και η ανάπτυξη των μηχανικών αντοχών του ποζολανικού τσιμέντου εξαρτώνται από την παρουσία του υδρίδιου του καισίου CSH σε αντίθεση με τα γεωπολυμερή που ουσιαστικά προκύπτουν κατόπιν πολυσυμπύκνωσης των αργιλικών και πυριτικών ειδών έπειτα από έκθεση της πρώτης ύλης σε υψηλά αλκαλικό περιβάλλον.

Ο Πίνακας 4 δείχνει το επί τις εκατό ποσοστό της συρρίκνωσης του γεωπολυμερούς σε σύγκριση με το τσιμέντο Portland για 7 και 28 ημέρες αντίστοιχα (Davidovits, 1988).

Πίνακας 5. Επί τις εκατό ποσοστό συρρίκνωσης γεωπολυμερούς σε σύγκριση με το τσιμέντο Portland (Davidovits, 1988).

Μήτρα	7 ημέρες	28 ημέρες
Τσιμέντο Portland τύπου I	1.0	3.3
Τσιμέντο Portland τύπου III	1.5	4.6
Τσιμέντο γεωπολυμερούς	2.0	0.5

I Τσιμέντο Portland γενικής χρήσης, χωρίς ιδιαίτερες ιδιότητες (π.χ. αντοχή σε θερμοκρασία, προσβολή με θειικά από έδαφος ή νερό κ.λ.π.).

II Τσιμέντο Portland υψηλών αντοχών, που αποκτώνται σε λιγότερο από 1 εβδομάδα.

Στατιστικά σχεδιασμένα πειράματα δείχνουν ότι η αύξηση της αναλογίας νερού-στερεού (w/s) έχει σημαντική επίδραση στην αύξηση της εργασιμότητας και του χρόνου πήξης, ενώ μειώνει τη θλιπτική αντοχή του γεωπολυμερή κονιάματος (GPM). Σε σύγκριση με το τσιμέντο Portland (PCM), το GPM με σταθερή περιεκτικότητα σε νερό έδειξε σημαντική βελτίωση στην αναλογία w/s και στην εργασιμότητα, η οποία μπορεί να σχετίζεται με αλλαγές στην αναλογία πολτού/άμμου ή/και αναλογίας νερού/αλκαλίου. Η σύγκριση των GPM και PCM δείχνει ότι το GPM απαιτεί χαμηλότερη περιεκτικότητα νερού και μπορεί να προσφέρει μικρότερους χρόνους πήξης και ταχύτερη ανάπτυξη αντοχής. Μετά από δεκαετίες ερευνών, είναι καλά τεκμηριωμένο ότι η αναλογία νερού-τσιμέντου, είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση του συμβατικού σκυροδέματος με βάση το τσιμέντο Portland (Chartier, S. Et al. 2008).

2.6.8 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

I. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Για τη σύνθεση των γεωπολυμερών η απαραίτητη θερμοκρασία που απαιτείται κυμαίνεται από 25 έως και 80°C. Έχει παρατηρηθεί ότι τις τελικές ιδιότητες των γεωπολυμερών και ως εκ τούτου την αντοχή τους σε θλίψη επηρεάζουν η θερμοκρασία στην οποία θερμαίνονται, αλλά και τον χρόνο παραμονής τους στη συγκεκριμένη θερμοκρασία. Κατσαρού (2006)

Παράδειγμα αποτελεί η μελέτη (Çelikten & Işıkdağ, 2021) η οποία παρουσιάζει την ανάπτυξη αντοχής και τον χαρακτηρισμό των γεωπολυμερών κονιαμάτων που περιέχουν περλίτη (GCP) και ενεργοποιήθηκε με διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου (NaOH). Ο περλίτης είναι ένα άμορφο ηφαιστιακό γυαλί με υψηλή περιεκτικότητα σε νερό το οποίο βρίσκεται στην φύση και έχει την ασυνήθιστη ιδιότητα να διογκώνεται όταν βρεθεί σε αρκετά υψηλή θερμοκρασία. Για την πραγματοποίηση της μελέτης δημιουργήθηκαν κονιάματα τα οποία παρήχθησαν τυποποιημένη άμμο CEN, περλίτη (GCP), NaOH και νερό. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε θερμική σκλήρυνση μετά από 24 ώρες από την σύνθεσή τους και παρέμειναν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι την ημέρα της δοκιμής.

Τα πειραματικά αποτελέσματα αποκάλυψαν ότι οι μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων βελτιώθηκαν καθώς αυξάνονται η περίοδος σκλήρυνσης και η θερμική σκλήρυνση. Παρακάτω παρουσιάζεται το Πίνακας 5 όπου αναγράφονται τα αποτελέσματα της έρευνας των Çelikten & Işıkdağ (2021)

Πίνακας 6. Αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής της έρευνας των Celikten & Burak (2021)

Series code	Mixture code	Unit weight (kg/m ³)	Compressive strength (MPa)		
			7 days	14 days	28 days
1	GCP4/80/24	1724	9,33	9,42	9,87
	GCP8/80/24	1739	12,19	14,39	15
	GCP12/80/24	1805	16,02	16,47	17,39
	GCP16/80/24	1819	12,07	12,76	12,8
2	GCP4/80/48	1718	12,48	13,59	15,12
	GCP8/80/48	1731	15,32	18,13	19,17
	GCP12/80/48	1800	21,17	23,85	25,39
	GCP16/80/48	1814	25,93	28,71	30,87
3	GCP4/120/24	1721	10,28	11,24	14,57
	GCP8/120/24	1732	14,96	17,48	18,14
	GCP12/120/24	1803	17,63	19,76	22,37
	GCP16/120/24	1815	17,29	19,81	20,43
4	GCP4/120/48	1714	13,68	15,47	16,08
	GCP8/120/48	1726	18,1	20,39	21,84
	GCP12/120/48	1793	24,34	26,91	29,12

Συμπερασματικά , η θλιπτική αντοχή των δοκιμίων που εκτίθενται σε θερμική σκλήρυνση σε υψηλότερες θερμοκρασίες διαπιστώθηκε ότι είναι υψηλότερη σε σύγκριση με τη θλιπτική αντοχή των δοκιμίων που εκτίθενται σε θερμική σκλήρυνση σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα μείγματα κονιαμάτων έχουν καλύτερη ενεργοποίηση του GCP σε υψηλότερες θερμοκρασίες θερμικής σκλήρυνσης και μεγαλύτερες περιόδους σκλήρυνσης.

II. ΜΟΡΙΑΚΟΤΗΤΑ

Εξίσου σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των γεωπολυμερών διαδραματίζει η μοριακότητα δηλαδή η ποσότητα των mol του αλκαλικού διαλύματος αναφέρεται ότι η θλιπτική αντοχή των αυτοσυσσωρευόμενων γεωπολυμερών σκυροδέματος που παράγονται με ιπτάμενη τέφρα και σκωρία υψικαμίνου αυξάνεται με την αύξηση των μορίων NaOH.

Όσο αφορά την μετακαολίνη έρευνα έδειξε ότι η αύξηση της συγκέντρωσης NaOH διευκόλυne τη διαδικασία διάλυσης του αργιλοπυριτικού και την πρόοδο του γεωπολυμερισμού ωστόσο, δεν αύξησε περαιτέρω τη θλιπτική αντοχή παρά την υψηλότερη συγκέντρωση NaOH πάνω από 10 M. Η περίσσεια ιόντων Na⁺ σε υψηλή συγκέντρωση NaOH μπορεί να αποδυναμώσει τη δομή του γεωπολυμερούς (O'Connor, 2003).

Επίσης, σύμφωνα με τον (Saloma et al. 2016) παρατηρείται ότι η μοριακότητα του NaOH επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό στον χρόνο πήξης του κονιάματος γεωπολυμερούς. Όσο μεγαλύτερη είναι η μοριακότητα του NaOH, τόσο πιο γρήγορος χρόνος πήξης απαιτείται και αυτό ισχύει και αντίστροφα, δηλαδή όσο μικρότερη η μοριακότητα του NaOH, τόσο μεγαλύτερος ο χρόνος πήξης που απαιτείται. Επιπρόσθετα, από την έρευνα των (Saloma et al) προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

- Όσο μεγαλύτερη είναι η μοριακότητα του NaOH, τόσο πιο γρήγορος χρόνος πήξης απαιτείται.
- Όσο μεγαλύτερη είναι η μοριακότητα του NaOH, τόσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα του κονιάματος γεωπολυμερούς.
- Το αποτέλεσμα της θλιπτικής αντοχής έδειξε ότι η μέγιστη τιμή επιτυγχάνεται σε κονίαμα γεωπολυμερούς 14 M στην ποσότητα 10,06 MPa και η ελάχιστη τιμή προκύπτει σε κονίαμα γεωπολυμερούς 8 M που ισούται με 3,95 MPa. Σε μίγμα κονιάματος 16 M, μειώνει τη θλιπτική αντοχή ίση με 9,16 MPa. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι το βέλτιστο μείγμα για να ληφθεί η μέγιστη αντοχή χρησιμοποιείται NaOH 14 M.

III. ΥΔΡΥΑΛΟΣ

Τα τσιμέντα που ενεργοποιούνται με υδρύαλο δίνουν συχνά πολύ μεγαλύτερη αντοχή από τα τσιμέντα που ενεργοποιούνται με υδροξείδιο αλκαλίου. Ωστόσο, για να επιτευχθεί υψηλή αντοχή από την ενεργοποίηση της μετακαολίνης, απαιτείται υψηλή θερμοκρασία σκλήρυνσης και υψηλή συγκέντρωση αλκαλίων. (Krivenko, 1992). Επίσης, αναφέρθηκε ότι η χρήση αλκαλικού ενεργοποιητή με υδρύαλο προκάλεσε αύξηση της θλιπτικής αντοχής από 30 σε 60 MPa και της εφελκυστικής από 5 σε 7 MPa (Pinto 2004).

IV. ΑΝΑΛΟΓΙΑ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

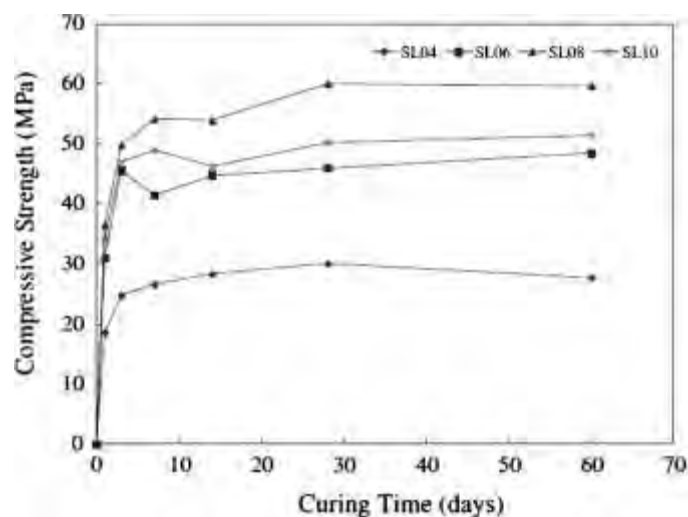
Όσο αφορά την αναλογία του $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, η οποία αποτελεί παράγοντα για την απόδοση υψηλότερης θλιπτικής αντοχής, ο Pinto ήταν αυτός που ασχολήθηκε με την αναλογία αυτή σε μείγματα με βάση γεωπολυμερή κονιάματα και διαπίστωσε ότι κάποια μείγματα με υδροξείδιο του Καλίου και αναλογία $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 5,1$ απέδωσαν καλύτερα και είχαν υψηλότερες

θλιπτικές αντοχές. Άλλοι ερευνητές όπως οι (De Silva et al. 2007) μελέτησαν από πρώιμο στάδιο την κινητική αντίδραση του γεωπολυμερούς συστήματος μετακαολίνη/πυριτικού νατρίου/ NaOH, στόχος τους ήταν να μελετήσουν τον χρόνο πήξης και τις αντοχές των μειγμάτων που περιέχουν ποικίλες αναλογίες SiO₂/Al₂O₃ με σκληρύνσεις στους 40°C για έως και 72 ώρες. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν ήταν τα ακόλουθα :

- Όσο μεγαλύτερη αναλογία SiO₂/Al₂O₃ τόσο μεγαλύτερος χρόνος πήξης
- Η υψηλότερη αντοχή παρατηρήθηκε για αναλογία ίση με SiO₂/Al₂O₃=3,4-3,8

V. ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΣΤΕΡΕΟΥ / ΥΓΡΟΥ (S/L)

Έχει αποδειχθεί ότι όσο αυξάνεται η αναλογία νερού/στερεού η αντοχή μειώνεται. Οι (Yao et al., 2009) ανέφεραν ότι οι υψηλές αναλογίες στερεού/υγρού (S/L) είχαν ως αποτέλεσμα χαμηλό ιξώδες και οι χαμηλότερες αναλογίες S/L αύξησαν την περίοδο γεωπολυμερισμού. Μια άλλη έρευνα των (Lin et al.,2012) σχετιζόταν με την ενεργοποίηση της μετακαολίνης με αλκαλικό ενεργοποιητή που στην συγκεκριμένη περίπτωση ήταν NaOH και πυριτικό νάτριο. Μελετήθηκαν οι θλιπτικές αντοχές για αναλογίες S/L που κυμαίνονται από 0,4-1,0 και για αναλογίες SiO₂/Na₂O από 0,8-2,0 για τις ηλικίες των 1,7,28 και 60 ημερών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μετά από μια ημέρα σκλήρυνσης και με αναλογία S/L=0,4 προέκυψε η χαμηλότερη αντοχή. Η αντοχή αυξήθηκε μετά από 60 μέρες και έφτασε την τιμή των 27,7 MPa. Όμως με την αναλογία S/L=0,8 παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη αντοχή η οποία αυξανόταν συνεχώς κατά την διάρκεια 60 ημερών σκλήρυνσης (Σχήμα 7)



Σχήμα 6. Αντοχή σε θλίψη γεωπολυμερών με βάση μετακαολίνη με διάφορες αναλογίες S/L (Lin et al.,2012)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα πειραματικό τμήμα της παρούσας διπλωματικής μελέτης πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας του τμήματος των Πολιτικών Μηχανικών. Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων κατασκευάστηκαν είκοσι πέντε μείγματα κονιαμάτων που περιέχουν γεωπολυμερή. Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί τύποι μετακαολίνης. Κύριος στόχος της έρευνας ήταν να βρεθεί το κονίαμα με την καλύτερη δυνατή εργασιμότητα και μέγιστη εφελκυστική αντοχή για ενισχύσεις κατασκευών με ΙΑΜ.

3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ

Το συγκεκριμένο πειραματικό πρόγραμμα αποτελείται από είκοσι πέντε κονιάματα στα οποία δόθηκε η απαραίτητη ονοματολογία η οποία ακολουθούσε τη μορφή A_Σ_N. Το A αντιστοιχούσε στον τύπο του αλκαλικού διαλύματος, το Σ στο αργιλοπυριτικό υλικό όπου το πρώτο είδος μετακαολίνης χαρακτηρίστηκε με Α ενώ το δεύτερο είδος με Μ και το Ν στον αριθμό κατάταξης με βάση την ημερομηνία κατασκευής τους. Υπάρχουν όμως και κάποια κονιάματα στα οποία προστέθηκε και υδροξείδιο του καλίου (ΚΟΗ) οπότε στην ονοματολογία τους προστέθηκε και το γράμμα Κ. Για παράδειγμα το GA-6.2.6F αποτελείται από υδρύαλο, και μετακαολίνη Α, αποτέλεσε το έκτο πείραμα στην σειρά και χρησιμοποιήθηκαν ίνες 6mm. Όλα τα μείγματα που εξετάστηκαν στη μελέτη αυτή παρουσιάζονται στον Πίνακα 6

Πίνακας 7. Ονομασία κονιαμάτων

Ονομασία δοκιμίου	χρήση ινών	μετακαολίνη I	μετακαολίνη II	ΚΟΗ
GA-1	-	NAI	-	-
GA-2	-	NAI	-	-
GA-3	-	NAI	-	-
GA-4	-	NAI	-	-
GA-5	-	NAI	-	-
GA-6.1	-	NAI	-	-
GA-6.2	-	NAI	-	-
GA-6.2-6F	NAI	NAI	-	-
GA-6-12F	NAI	NAI	-	-
GA-6-K1	NAI	NAI	-	NAI
GA-6-K2	NAI	NAI	-	NAI
GA-6-K3	NAI	NAI	-	NAI
GA-7	NAI	NAI	-	-
GA-7-Kfl	NAI	NAI	-	NAI
GA-8	NAI	NAI	-	-
GA-9	NAI	NAI	-	-
GA-10	NAI	NAI	-	-
GA-11	NAI	NAI	-	-
GA-12	NAI	NAI	-	-
GM-1	-	-	NAI	-
GM-2	-	-	NAI	-
GM-3	-	-	NAI	-
GM-4	-	-	NAI	-
GM-5	-	-	NAI	-
GM-6	NAI	-	NAI	-

3.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος όπου συλλέχθηκαν τα υλικά, υπήρχε ο ηλεκτρικός αναμεικτήρας ο οποίος ήταν το κύριο εργαλείο για να επιτευχθεί η ανάμειξη και η δημιουργία ενός ομοιογενούς μίγματος.

Αρχικά, προστέθηκαν στον αναμεικτήρα τα στερεά συστατικά δηλαδή κυρίως τα αδρανή και η μετακαολίνη και αναμείχθηκαν σε αργή ταχύτητα ανάμειξης για περίπου 1 λεπτό.

Δεύτερο βήμα ήταν να προστίθεται σταδιακά στον αναμεικτήρα ο υδρύαλος και μετ' έπειτα το νερό. Σημειώνεται πως αν γινόταν χρήση των ινών, πρώτα γινόταν ανάμειξη του υδρύαλου με αυτές και μετά προσθέταμε αυτό το μίγμα στο ήδη υπάρχον μέσα στον αναμεικτήρα.

Τρίτο βήμα αποτέλεσε η παύση του αναμεικτήρα για να γίνει μια καλύτερη ανάδευση του μίγματος που ίσως είχε κολλήσει στα τοιχώματα του.

Στο τέταρτο βήμα έπρεπε να επιταχυνθεί η ταχύτητα ανάδευσης ώστε το μίγμα να πάρει την τελική του μορφολογία.

Πέμπτο βήμα αποτέλεσε η τοποθέτηση του κονιάματος γεωπολυμερούς σε ατσάλινες φόρμες.

Ο συνολικός χρόνος που διαρκούσε η ανάμειξη κυμαινόταν από 5 έως 15 λεπτά.



Σχήμα 7. Ανάμειξη μίγματος γεωπολυμερούς

3.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

3.4.1 ΜΕΤΑΚΑΟΛΙΝΗ

Για την παρασκευή των κονιαμάτων κύριο συστατικό αποτέλεσε η μετακαολίνη. Το πρώτο είδος μιας τεχνητής ποζολάνης (μετακαολίνη) είναι ένα άμορφο, μη κρυσταλλικό υλικό, τα σωματίδια του οποίου έχουν ελασματοειδές σχήμα. Στην παρούσα διπλωματική διατριβή το χαρακτηρίζουμε με το γράμμα Α. Η χημική του ανάλυση περιλαμβάνει τα ακόλουθα συστατικά Πίνακας 7 :

Πίνακας 8. Χημική ανάλυση μετακαολίνης Μ

SiO ₂ : 55 %	Fe ₂ O ₃ : 1,4 %
Al ₂ O ₃ : 40 %	TiO ₂ : 1,5 %
K ₂ O+Na ₂ O : 0,8 %	CaO+MgO : 0,3 %

Στο Σχήμα 9 παρουσιάζεται η μορφή της Α μετακαολίνης.



Σχήμα 8. Μετακαολίνη Α

Το δεύτερο είδος μετακαολίνης παράγεται με πύρωση καολίνης, έχει κοκκινωπό χρώμα και περιέχει μικρή ποσότητα χαλαζία. Είναι και αυτό ένα άμορφο πυριτικό αργίλιο που αντιδρά με υδροξείδιο του ασβεστίου. Επιπρόσθετα, είναι ένα ποζολανικό ορυκτό πρόσθετο που μπορεί να βελτιώσει πολλές επιδόσεις υδραυλικών τσιμεντοκονιαμάτων, σκυροδέματος

και ανάλογων προϊόντων. Το χαρακτηρίζουμε με το γράμμα M. Η χημική του σύνθεση είναι Πίνακας 8:

Πίνακας 9. Χημική σύνθεση μετακαολίνης A

SiO ₂	67-69 %	Al ₂ O ₃	25-27 %
Fe ₂ O ₃	< 2,5 %	K ₂ O	< 0,2 %

Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται η μορφή της M μετακαολίνης.



Σχήμα 9. Μετακαολίνη M

3.4.2 ΜΗΤΡΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

Στο συγκεκριμένο πειραματικό πρόγραμμα δοκιμάστηκαν σε κάμψη και έπειτα σε θλίψη είκοσι πέντε κονιάματα. Η σωστή αναλογία συστατικών προέκυψε μετά από δοκιμές στο εργαστήριο. Η ζύγιση των συστατικών γινόταν με ζυγαριά ακριβείας. Τα τρία κύρια υλικά εκτός της μετακαολίνης ήταν τα ακόλουθα καθώς παρουσιάζονται και στο Σχήμα 11

1. Αδρανή < 5mm (παιπάλη)
2. Αδρανή 0,5 mm -1 mm

3. Αλκαλικό διάλυμα φιλικό προς το περιβάλλον (υδρύαλος)



Σχήμα 10. α) Αδρανή < 5mm β) Αδρανή 0,5 mm -1 mm

Η εργασιμότητα του κονιάματος ήταν ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας και για να ελεγχθεί, κάθε κονίαμα αμέσως μετά την ανάμειξη εφαρμοζόταν σε μία επιφάνεια σκυροδέματος χρησιμοποιώντας ένα τεμάχιο ινοπλέγματος (βλ. Σχήμα 12). Ο σκοπός ήταν να γίνει ένας πρώτος έλεγχος που αφορά την ευκολία εφαρμογής του, τον χρόνο που θα χρειαστεί για να πήξει και τέλος την περίπτωση εμφάνισης κάποιας ρηγματώσης. Έπειτα, το υπόλοιπο μείγμα τοποθετήθηκε σε μεταλλικές μήτρες όπως φαίνεται στο Σχήμα 13 για τη δημιουργία μικρών πρισματικών δοκιμίων διαστάσεων 4x4x16 εκατοστών ώστε να γίνει εφικτός ο προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών τους.



Σχήμα 11. Εφαρμογή κονιάματος σε επιφάνεια σκυροδέματος με ινόπλεγμα



Σχήμα 12. Εφαρμογή κονιάματος σε μήτρα

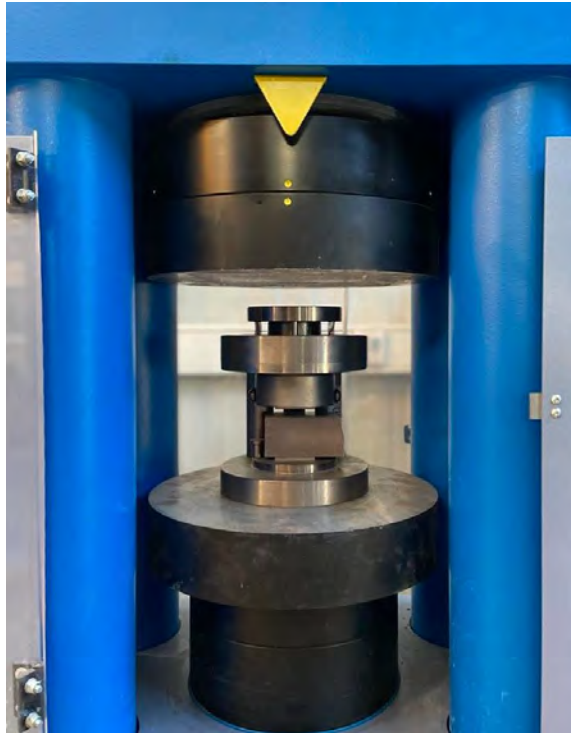
Χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικές μήτρες διότι έχουν μεγαλύτερη ολκιμότητα και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, βελτιώνουν την ακαμψία και την αύξηση του μέτρου

ελαστικότητας και βελτιώνουν την θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα του συνθέτου για ειδικές εφαρμογές.

Στα πρισματικά δοκίμια που προέκυψαν από τις μεταλλικές μήτρες για την εύρεση της εφελκυστικής αντοχής έγινε δοκιμή σε κάμψη τριών σημείων Σχήμα 14 όπου προέκυψε ότι η αστοχία ήταν ψαθυρή και εν συνεχεία, για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής έγινε δοκιμή σε θλίψη των δύο κομματιών που προέκυψαν Σχήμα 15. Ο μέσος όρος των αντοχών των δύο κομματιών έδωσε το τελικό αποτέλεσμα της θλιπτικής αντοχής του κάθε κονιάματος. Το πρότυπο δοκιμών ήταν το EN 1015-11-2019 (European Standard, 2019).



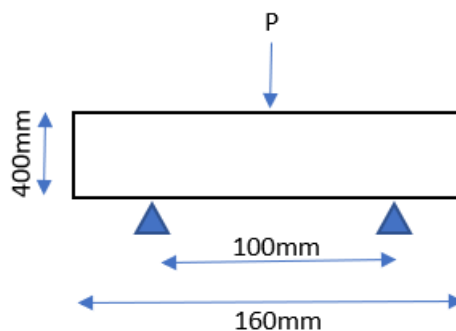
Σχήμα 13. Δοκιμή σε κάμψη τριών σημείων



Σχήμα 14. Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Πραγματοποιήθηκαν αρκετές δοκιμές με διαφορετικές αναλογίες κάθε φορά οι οποίες είτε λόγω εργασιμότητας , είτε ρηγματώσεων, είτε λόγω χρόνου πήξεως απορρίφθηκαν.

Δοκιμή σε κάμψη τριών σημείων



Σχήμα 15. Δοκιμή σε κάμψη τριών σημείων

Οι εφελκυστικές αντοχές υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας την εξίσωση 2 η οποία προέκυψε από την Εξίσωση (1)

$$\sigma = (M \cdot y) / I \quad (1)$$

όπου:

$I = (b \cdot d^3) / 12$ για ορθογωνική δοκό πλάτους b και ύψους d .

$$y = d/2$$

Για την δοκιμή σε κάμψη η ταχύτητα φόρτισης έφτανε τα 0,05 kN/sec, ενώ ανερχόταν στα 0,1 kN/sec για την σύνθλιψη των δοκιμίων κονιαμάτων.

$$\sigma = 1,5 F \cdot L / (b \cdot d^2) \quad (2)$$

Όπου :

F : Το μέγιστο φορτίο που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, σε Newton

L : Η απόσταση μεταξύ των κυλίνδρων στήριξης $L=100\text{mm}$

b : Το πλάτος του δοκίμιο, σε χιλιοστά

d : Το ύψος του δοκίμιο, σε χιλιοστά

Όσο αφορά την δοκιμή στην θλίψη χρησιμοποιήθηκε η εξής εξίσωση 3:

$$\sigma = F / A \quad (1)$$

όπου

$$A = b \cdot d$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

4.1 Γενικά – Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία. Σκοπός της πειραματικής εργασίας ήταν να διαπιστωθεί η αναλογία αδρανών, μετακαολίνης και υδρύαλου με σκοπό το κονίαμα να παρουσιάσει ταυτόχρονα:

- Τη βέλτιστη ρευστότητα του μείγματος για εφαρμογές ενίσχυσης κατασκευών σε συνεργασία με ινοπλέγματα.
- Τη μέγιστη εφελκυστική αντοχή

Πρώτα από όλα, είναι σημαντικό να αναφερθούν οι αναλογίες των υλικών και μετέπειτα τα αποτελέσματα των δοκιμών. Παρουσιάζονται λοιπόν οι αναλογίες όλων των συστατικών του γεωπολυμερούς δοκιμίου με βάση αναφοράς τις μετακαολίνες Α και Μ στους Πίνακες 9 και 10

Πίνακας 10. Αναλογίες υλικών με βάση αναφοράς την μετακαολίνη Α

Mix ID	1 in g	waterglass [G]	Potassium hydroxide - KOH [K]	KOH concentration	waterglass + KOH flakes (SiO ₂ :K ₂ O=1)	Metakaolin [A]	Water [W]	Medium sand 0.5-1 mm [F]	Fine sand 0-0.5 mm [P]	Fibers [gr]	Length of fiber(mm)
GA-1	75	2				1		2	4		
GA-2	75	2				1		3	3		
GA-3	75	2				1		4	2		
GA-4	75	2				1		1	5		
GA-5	100	2				1		0,75	3,6		
GA-6.1	100	2				1	0,001		3,5		
GA-6.2	100	2				1	0,1	1	4		
GA-6.2-6F	100	2				1		1	4	2,3	6 mm
GA-6-12F	80	2				1	0,19	1	4	2,3	12 mm
GA-6-K1	100	1,5	0,5	8% wt		1		1,5	5	2,3	6 mm
GA-6-K2	100	1,5	0,5	22.5% wt		1		1	4,5	2,3	6 mm
GA-6-K3	100	1,5	0,5	15% wt		1		1	4,5	2,3	6 mm
GA-7	70	2				1,5	0,3	1,5	4	2,3	6 mm
GA-7-kfl	70				2,21	1		1,5	4	2,3	6 mm
GA-8	65	2,5				1		2	4,25	2,3	6 mm
GA-9	65	3				1	0,25	3	6	2,3	6 mm
GA-10	80	1				1	1	2	4,5	2,3	6 mm
GA-11	75	2				1	0,15	2	4	2,3	6 mm
GA-12	75	2				1	0,33	1	5	2,3	6 mm
GA-13	100	2				1		0,5	3,5	2,3	6 mm

Πίνακας 11. Αναλογίες υλικών με βάση αναφοράς την μετακαολίνη M

Mix ID	1 in g	waterglass [G]	Metakaolin [M]	Medium sand 0.5-1 mm [F]	Fine sand 0-0.5 mm [P]	Fibers [gr]	Length of fiber(mm)
GM-1	90	2	1	1	4		
GM-2	90	2	1	4	1		
GM-3	90	2	1	2	3,5		
GM-4	90	2	1	3,5	2		
GM-5	90	2	1	3	3		
GM-6	125	2	1	1	3	2,3	6 mm

Παρουσιάζονται στους Πίνακες 11 και 12 εκτενέστερα τα αποτελέσματα των δοκιμών μετά την δοκιμή τους σε κάμψη και θλίψη χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 12. Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης και σύνθλιψης για τα δοκίμια κονιάματος A

Κονιάματα που περιέχουν μετακαολίνη A							
ΔΟΚΙΜΙΟ	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά			Δοκιμή σε Κάμψη		Δοκιμή σε θλίψη	
	Μήκος (mm)	Ύψος (mm)	Πλάτος(mm)	φορτίο αστοχίας (kN)	εφελκυστική αντοχή (MPa)	φορτίο αστοχίας (kN)	θλιπτική αντοχή(MPa)
GA-1	159,5	39,65	41,02	2,29	5,32	48,7	30,71
GA-2	160	39,86	39,79	2,38	5,65	59	40,18
GA-3	160	39,93	41,91	2,39	5,37	66	41,32
GA-4	159	39,74	39,34	2,66	6,43	67	42,15
GA-5	159	39,4	39,47	1,43	3,5	73,5	46,64
GA-6.1	158	39,64	40,36	1,70	4,02	56	35,32
GA-6.2	160	39,72	40,56	0,72	1,69	72	45,32
GA-6.2-6F	160	39,62	40,95	2,93	6,83	72,3	42,35
GA-6-12F	158,5	39,45	40,14	2,62	6,29	60,335	37,56
GA-6-K1	160	39,76	40,19	3,51	8,3	60,1	37,79
GA-6-K2	160	39,77	39,9	3,16	7,51	53	33,32
GA-6-K3	159	39,75	40,32	2,83	6,66	46	28,93
GA-7	160	39,77	40,4	3,74	8,79	72,5	45,57
GA-7-Kfl	160	39,81	40,3	3,05	7,17	54,5	34,23
GA-8	159	39,72	39,92	2,73	6,49	50,5	31,78
GA-9	159	39,56	39,78	1,58	3,81	31,5	19,91
GA-10	157,5	39,41	38,75	1,02	2,54	24,9	15,8
GA-11	159	39,7	39,75	3,32	7,94	62,5	39,36
GA-12	159	39,58	39,85	2,60	6,26	52,5	33,16
Μέσος όρος					5,82		56,99

Πίνακας 13. Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης και σύνθλιψης για τα δοκίμια κονιάματος Μ

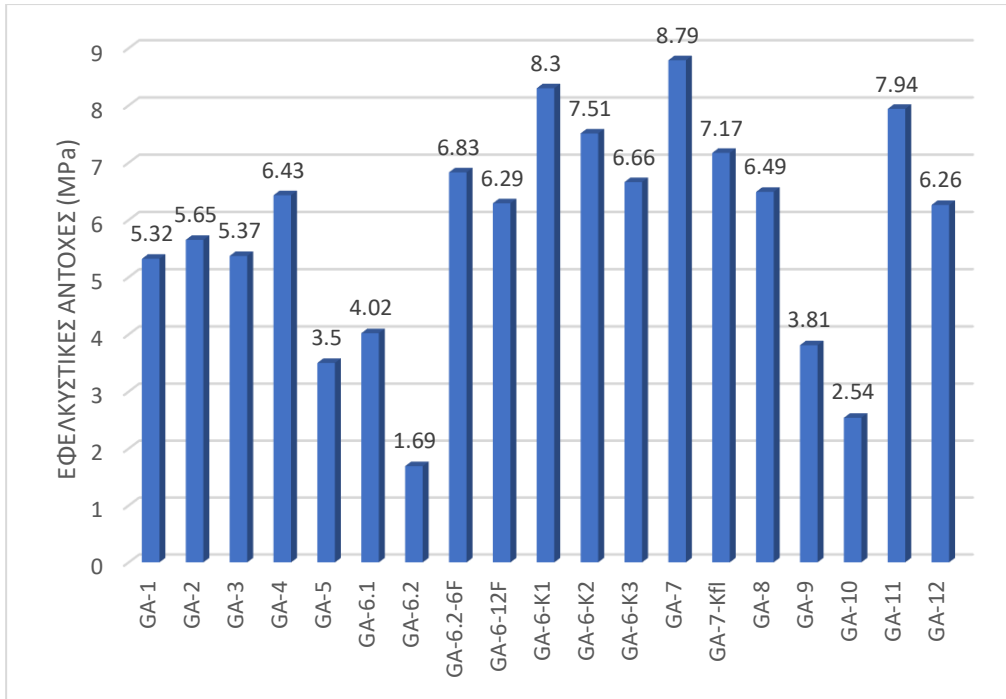
Κονιάματα που περιέχουν μετακαολίνη Μ							
ΔΟΚΙΜΙΟ	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά			Δοκιμή σε Κάμψη		Δοκιμή σε θλίψη	
	Μήκος (mm)	Ύψος (mm)	Πλάτος(mm)	φορτίο αστοχίας (kN)	εφελκυστική αντοχή (MPa)	φορτίο αστοχίας (kN)	θλιπτική αντοχή(MPa)
GM-1	159	39,63	40,89	0,6	1,4	26,7	16,32
GM-2	-	-	-	-	-	-	-
GM-3	159	39,73	39,68	0,331	0,79	35,9	22,62
GM-4	159	39,75	39,52	0,714	1,72	29,5	18,66
GM-5	160	40,28	39,96	0,42	0,97	34,7	21,71
GM-6	159	39,26	39,88	1,29	3,15	32	20,06
Μέσος όρος					1,606		19,874

Παρατηρείται ότι δεν έχουν ληφθεί οι τιμές των αντοχών του δοκιμίου GM-2 λόγω της καταστροφής του την ώρα του ξεκαλουπώματος του.

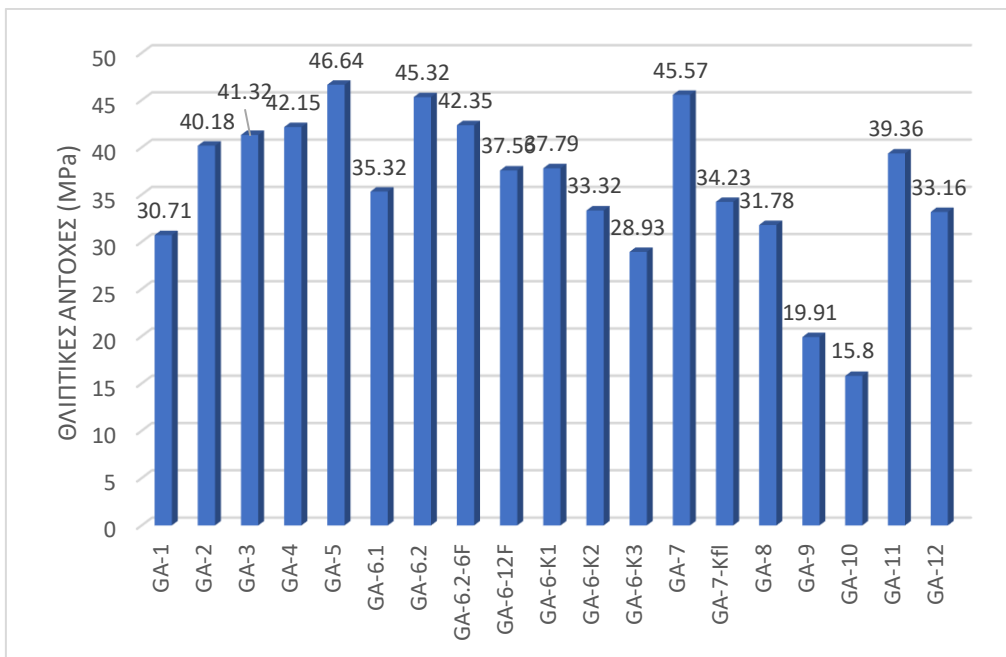
Η ημερομηνία δοκιμής των κονιαμάτων ήταν για κάποια τριάντα οκτώ μέρες και για άλλα από σαράντα ένα μέχρι σαράντα έξι μέρες.

Γίνεται αντιληπτό από τα αποτελέσματα αντοχών των κονιαμάτων που περιέχουν μετακαολίνη Μ ό,τι δεν θα χρησιμοποιηθούν για εκτενέστερη έρευνα καθώς οι αντοχές τους έχουν πολύ μικρές τιμές, πράγμα που δηλώνει ότι θα είναι αδύνατη η ενίσχυση των κατασκευών.

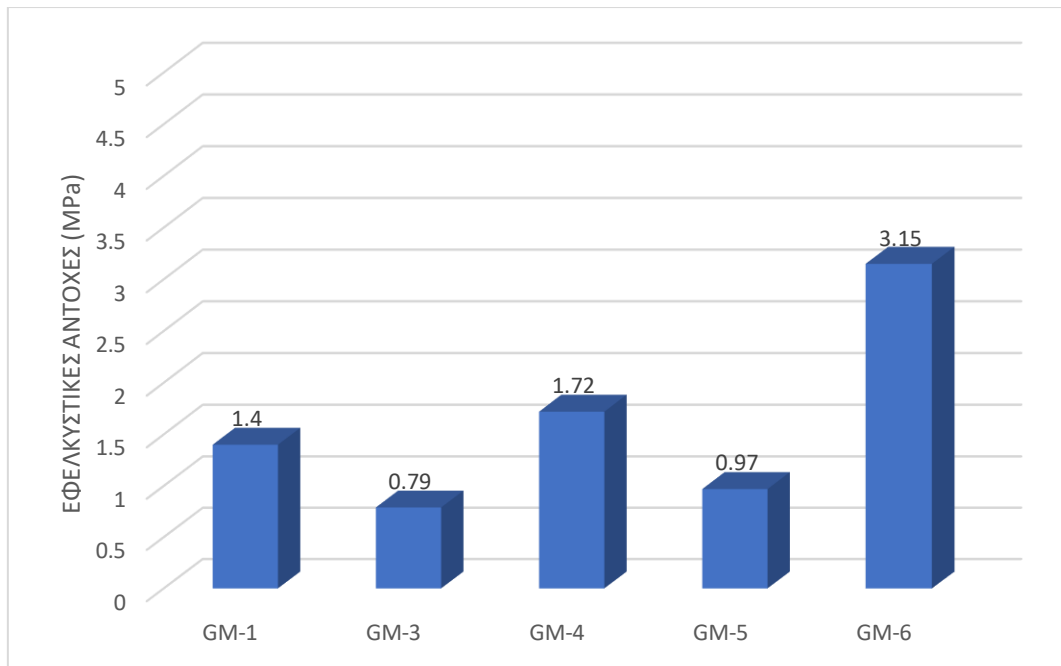
Στα Σχήματα 17,18,19,20 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από τις είκοσι πέντε δοκιμές των κονιαμάτων όπου χωρίζονται μετέπειτα σε διαγράμματα με διαφορετικές παραμέτρους κάθε φορά.



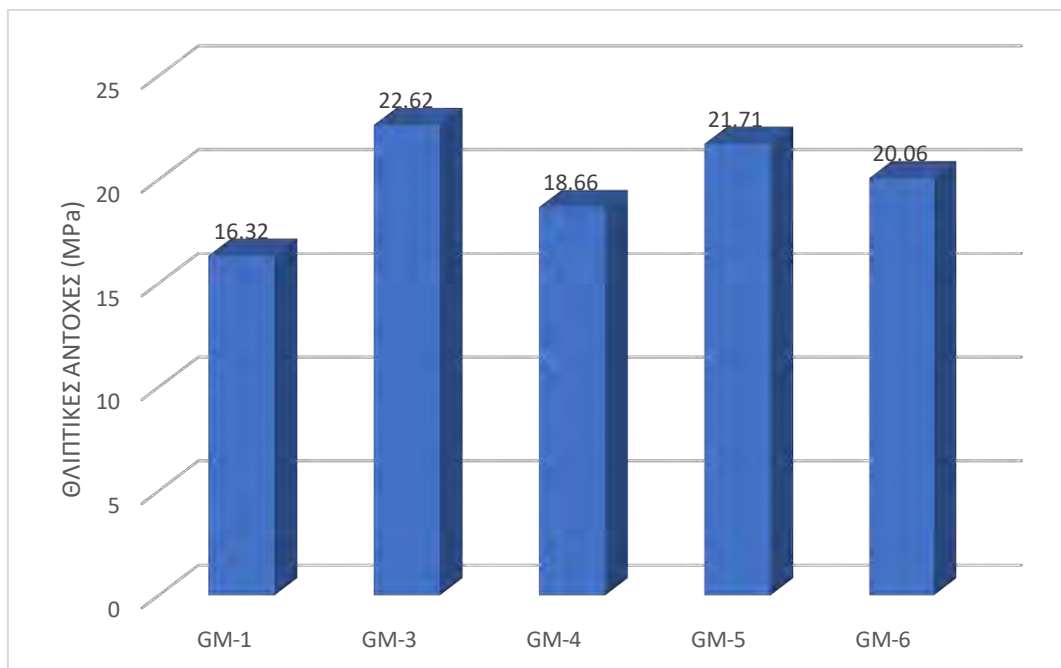
Σχήμα 16. Συγκεντρωτικό διάγραμμα εφελκυστικών αντοχών δοκιμών κονιαμάτων με χρήση μετακαολίνης Α



Σχήμα 17. Συγκεντρωτικό διάγραμμα θλιπτικών αντοχών δοκιμών κονιαμάτων με χρήση μετακαολίνης Α



Σχήμα 18. Συγκεντρωτικό διάγραμμα εφελκυστικών αντοχών δοκιμών κονιαμάτων με χρήση μετακαολίνης M



Σχήμα 19. Συγκεντρωτικό διάγραμμα θλιπτικές αντοχών δοκιμών κονιαμάτων με χρήση μετακαολίνης M

Παρουσιάζονται κάποια από τα δοκίμια μετά τη θραύση τους σε κάμψη στα Σχήματα 21,22,23. Παρατηρείται ότι η θραύση προέρχεται από ένα ρήγμα στο μέσον του δοκιμίου.



Σχήμα 20. Δοκίμιο μετά από κάμψη GA-7-KFl

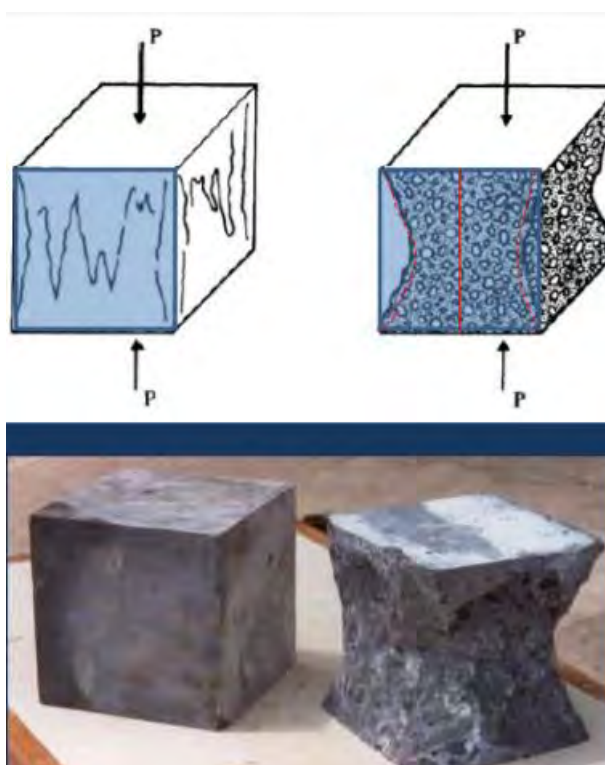


Σχήμα 21. Δοκίμιο μετά από κάμψη GA-9



Σχήμα 22. Δοκίμιο μετά από κάμψη GA-12

Όσο αφορά την δοκιμή σε θλίψη όλα τα δοκίμια είχαν τυπική αστοχία ψαθυρού υλικού, όπως στο σκυρόδεμα (Σχήμα 24)



Σχήμα 23. Σκυρόδεμα μετά από δοκιμή σε θλίψη

Στην συνέχεια, θα παρουσιαστεί εκτενέστερα το δοκίμιο GA-6 το οποίο παρασκευάστηκε πολλαπλές φορές με κάποιες αλλαγές στην σύσταση των υλικών του κάθε φορά και υπό την επιρροή κάποιων παραγόντων όπως χρήση ινών, προσθήκη νερού και προσθήκη υδροξειδίου του Καλίου. Πρώτα από όλα όμως από τα Σχήματα 17 και 18 γίνεται αντιληπτό ότι, τις καλύτερες αντοχές σημειώνουν τα δοκίμια με χρήση της μετακαολίνης A και ειδικότερα τα ακόλουθα :

- GA-7
- GA-11
- GA-6-K1

Μετά την υλοποίηση όλων των δοκιμών κονιαμάτων θεωρήθηκε αναγκαία η επανάληψη τριών κονιαμάτων με τις μέγιστες αντοχές. Η επανάληψη αυτή πραγματοποιήθηκε για την εξάλειψη αστοχίας των δοκιμών διάφορων παραγόντων που θα αναφερθούν παρακάτω με απώτερο σκοπό την εύρεση μιας πιο έγκυρης εφελκυστικής και θλιπτικής αντοχής.

4.1.1 ΔΟΚΙΜΙΟ GA-7

Σε αυτό το δοκίμιο η αναλογία μετακαολίνης και υδρύαλου ήταν 1,5:2 αντίστοιχα, επίσης χρησιμοποιήθηκαν είκοσι ένα γραμμάρια νερού και 2,3gr ίνες 6mm. Αρχικά, προστέθηκαν και ανακατεύτηκαν τα στερεά υλικά του μείγματος δηλαδή τα αδρανή μαζί με την μετακαολίνη στην συνέχεια, είχαν προστεθεί οι ίνες πολυπροπυλενίου 6mm μέσα στον υδρύαλο για την καλύτερη ανάμειξη και απορρόφηση των ινών στο υπόλοιπο μείγμα. Εδώ είναι χρήσιμο να αναφερθεί ό,τι η προσθήκη των ινών πολυπροπυλενίου δεν προϋποθέτει καμία απολύτως τροποποίηση στον παραδοσιακό τρόπο παρασκευής των κονιαμάτων. Χρησιμοποιήθηκαν ίνες 6mm. Κύριος στόχος, με την προσθήκη ινών ήταν η αντιμετώπιση των ρωγμών από συστολή ξήρανσης και θερμοκρασιακές μεταβολές. Παρά την εύκολη διάλυση τους δημιουργούν ένα πυκνό δίκτυο που ρευστοποιεί πιο γρήγορα το κονίαμα. Με το πέρας της ανάμειξης προστέθηκε το μείγμα σε μια μεταλλική μήτρα και μετά από δύο μέρες είχε πήξει ήδη. Οροθετήθηκε ένα μέτρο σύγκρισης της εργασιμότητας με κλίμακα από το ένα ως το 5. Το παρών κονίαμα ήταν άριστο φέροντας τιμή εργασιμότητας ίση με 5. Μετά από σαράντα εννιά μέρες έγινε η δοκιμή σε εφελκυσμό και θλίψη αλλά πρώτα μετρήθηκαν κάποια από τα χαρακτηριστικά των τριών δοκιμών που παρουσιάζονται στον Πίνακα 13.

Πίνακας 14. Χαρακτηριστικά των τριών δοκιμών GA-7

Age in days	Specimen mass at day of testing [g]	Length L [mm]	Width b [mm]	Height d [mm]	Volume V [mm ³]	Bulk density (at day of testing) ρ [kg/m ³]
49	501,5	159	40,04	39,4	250834,58	1999,33
49	493,6	160	40,1	39,48	253303,68	1948,65
49	503,6	160	40,73	39,48	257218,1	1957,87

Παρουσιάζεται ο Πίνακας 14 με τις τιμές των αντοχών σε κάμψη και θλίψη όπου παρατηρείται μία μέση εφελκυστική αντοχή να ανέρχεται στα 7,34 MPa και μία μέση θλιπτική αντοχή να φτάνει στα 45,98 MPa

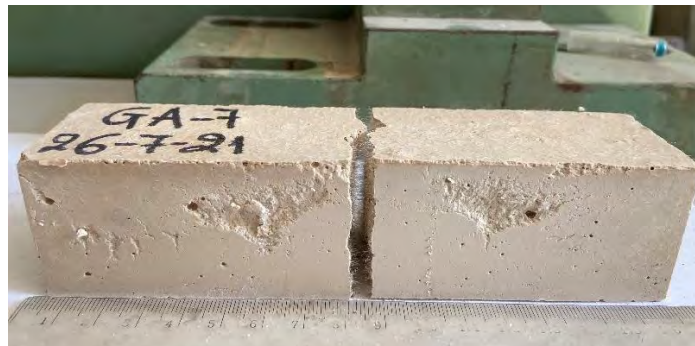
Πίνακας 15. Πειραματικά αποτελέσματα αντοχών σε κάμψη και θλίψη GA-7

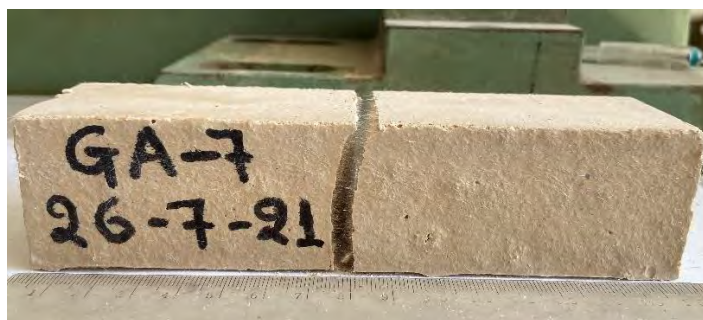
ΔΟΚΙΜΙΟ	Δοκιμή σε Κάμψη		Δοκιμή σε θλίψη	
	φορτίο αστοχίας (kN)	εφελκυστική αντοχή (MPa)	φορτίο αστοχίας (kN)	θλιπτική αντοχή (MPa)
GA-7 I	3,01	7,26	76,7	47,05
GA-7 II	3,07	7,37	74,5	46,45
GA-7 III	3,126	7,39	72,4	44,44
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ		7,34		45,98

Διαπιστώνεται ό,τι οι αντοχές και των τριών δοκιμών κονιαμάτων GA-7 συγκλίνουν φανερά. Τα δοκίμια κονιαμάτων GA-7 πριν και μετά από την δοκιμή τους σε κάμψη τριών σημείων παρουσιάζονται στα Σχήματα 25 και 26.



Σχήμα 24. Σκληρυμένα δοκίμια GA-7





Σχήμα 25. Τα δοκίμια του μίγματος GA-7 μετά από την δοκιμή τους σε κάμψη

4.1.2 ΔΟΚΙΜΙΟ GA-11

Επόμενα τρία δοκίμια αποτέλεσε το GA-11 με παρεμφερή αναλογία μετακαολίνης και υδρύαλου 1:2. Έγινε αντιληπτό, ό,τι η αναλογία της μετακαολίνης ήταν αποδοτικότερη να κυμαίνεται από 1-1,5 και του υδρύαλου από 1,5-2. Στο παρών δοκίμιο χρησιμοποιήθηκαν 11 γραμμάρια νερού λιγότερα από το προηγούμενο και η ίδια ποσότητα ιών (2,3gr). Η τιμή της εργασιμότητας είναι ίση με 3,5/5 διότι, το άπλωμα στην επιφάνεια του σκυροδέματος ήταν δυσκολότερο και υπήρχε μια μικρή αστάθεια του ινοπλέγματος τα πρώτα λεπτά μέχρι την πήξη του κονιάματος. Παρόμοια, μετά από σαράντα εννιά μέρες έγινε η δοκιμή σε εφελκυσμό και θλίψη αλλά πρώτα μετρήθηκαν κάποια από τα χαρακτηριστικά των τριών δοκιμίων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 15

Πίνακας 16. Χαρακτηριστικά των τριών δοκιμίων GA-11

Age in days	Specimen mass at day of testing [g]	Length L [mm]	Width b [mm]	Height d [mm]	Volume V [mm ³]	Bulk density (at day of testing) ρ [kg/m ³]
49	530	160	41,21	39,47	260381,26	2035,48
49	528,3	158	41,61	39,49	260805,65	2025,65
49	520	160	40,41	39,67	255455,86	2035,58

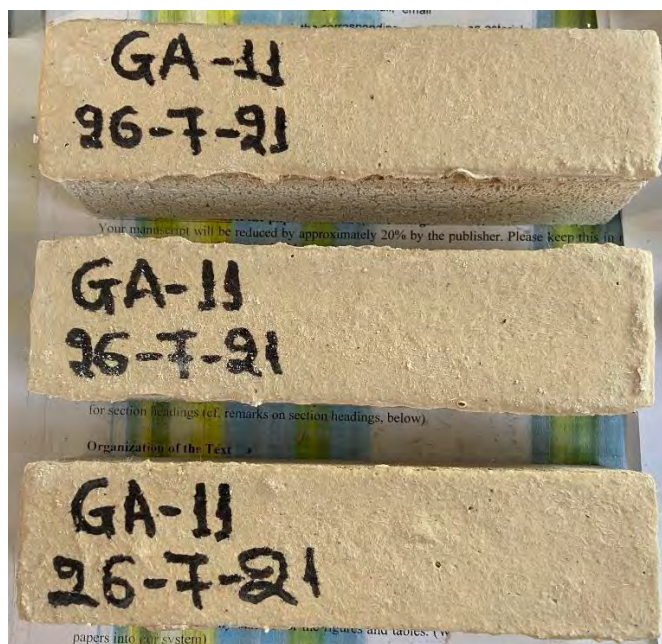
Παρουσιάζεται ο πίνακας 16 με τις τιμές των αντοχών σε κάμψη και θλίψη όπου παρατηρείται μία μέση εφελκυστική αντοχή να ανέρχεται στα 6,87 MPa και μία μέση θλιπτική αντοχή να φτάνει στα 26,42 MPa

Πίνακας 17. Πειραματικά αποτελέσματα αντοχών σε κάμψη και θλίψη GA-11

ΔΟΚΙΜΙΟ	Δοκιμή σε Κάμψη		Δοκιμή σε Θλίψη	
	φορτίο αστοχίας (kN)	εφελκυστική αντοχή (MPa)	φορτίο αστοχίας (kN)	θλιπτική αντοχή(MPa)
GA-11 I	2,68	6,27	46	27,91
GA-11 II	3,13	7,24	41,5	24,93
GA-11 III	3,01	7,11	40,9	26,42
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ		6,87		26,42

Πάλι οι τιμές των τριών κονιαμάτων συγκλίνουν με μια σχετικά μεγαλύτερη απόκλιση από το πρώτο δοκίμιο, η μικρή διαφορά μεταξύ τους αποδίδεται στο γεγονός του ξεκαλουπώματος με μεγαλύτερη ευλάβεια ή στην καλύτερη ανάδευση του μίγματος πριν την προσθήκη του στην μεταλλική μήτρα.

Τα δοκίμια κονιαμάτων GA-11 πριν και μετά από την δοκιμή τους σε κάμψη τριών σημείων παρουσιάζονται στα Σχήματα 27 και 28



Σχήμα 26. Σκληρυμένα δοκίμια GA-11



Σχήμα 27. Τα δοκίμια του μίγματος GA-11 μετά από την δοκιμή τους σε κάμψη

4.1.3 ΔΟΚΙΜΙΟ GA-6-K1

Στη συνέχεια τα τρία επόμενα δοκίμια που εξετάστηκαν ήταν παρόμοια με το δοκίμιο GA-6-K1. Το ενδιαφέρον σ' αυτό το δοκίμιο είναι ό,τι έχει προστεθεί συγκέντρωση υδροξειδίου του καλίου KOH 8% wt και καθόλου νερό, η αναλογία μετακαολίνης και υδρύαλου είναι 1:1,5 και η αναλογία των αδρανών είναι μεγαλύτερη. Χρησιμοποιήθηκε επίσης, η ίδια ποσότητα ινών ίση με 2,3gr. Η υφή του μίγματος είναι παχύρρευστη με αποτέλεσμα η εργασιμότητα του στην επιφάνεια σκυροδέματος να είναι αρκετά καλή με εύκολο άπλωμα και συγκράτηση του ινοπλέγματος χαρακτηρίζοντας το με 4/5. Η πήξη του συγκεκριμένου μίγματος παρατηρήθηκε στις τρεις μέρες σε αντίθεση με τα προηγούμενα δοκίμια κονιαμάτων και με το πέρας του ξεκαλουπώματος δεν εμφανίστηκαν ρωγμές στην επιφάνεια του δοκιμίου, όμως υπήρξε ελαφρώς συστολή ξήρανσης. Αυτό προέκυψε ίσως λόγω απώλειας νερού. Σε σαράντα εννιά

μέρες έγινε η δοκιμή σε εφελκυσμό και θλίψη αλλά πρώτα μετρήθηκαν κάποια από τα χαρακτηριστικά των τριών δοκιμίων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 17

Πίνακας 18. Χαρακτηριστικά των τριών δοκιμίων GA-6-K1

Age in days	Specimen mass at day of testing [g]	Length L [mm]	Width b [mm]	Height d [mm]	Volume V [mm ³]	Bulk density (at day of testing) ρ [kg/m ³]
49	504,4	159	40,58	39,51	254991,73	1978,1
49	515,4	160	40,18	39,52	254259,04	2027,07
49	518,3	159	41,62	39,55	261725,29	1980,32

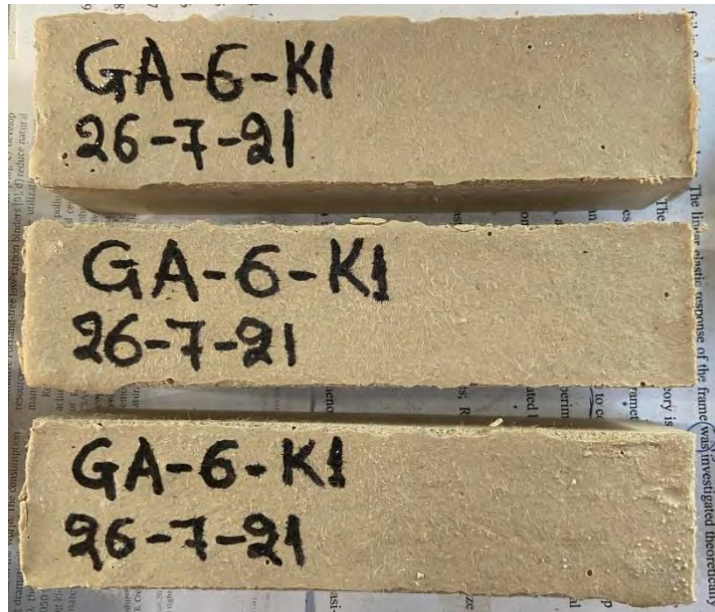
Στον Πίνακα 18 με τις τιμές των αντοχών σε κάμψη και θλίψη όπου παρατηρείται μία μέση εφελκυστική αντοχή να ανέρχεται στα 6,85 MPa και μία μέση θλιπτική αντοχή να φτάνει στα 30,04 MPa

Πίνακας 19. Πειραματικά αποτελέσματα αντοχών σε κάμψη και θλίψη GA-6-K1

ΔΟΚΙΜΙΟ	Δοκιμή σε Κάμψη		Δοκιμή σε θλίψη	
	φορτίο αστοχίας (kN)	εφελκυστική αντοχή (MPa)	φορτίο αστοχίας (kN)	θλιπτική αντοχή (MPa)
GA-6-K1 I	3,03	7,17	49,9	29,91
GA-6-K1 II	3,04	7,27	49	30,49
GA-6-K1 III	2,65	6,1	49,5	29,73
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ		6,85		30,04

Στην παρούσα φάση οι αντοχές των δοκιμίων συγκλίνουν με μια μικρή απόκλιση στο τελευταίο δοκίμιο ίσως λόγω του ανεπαρκούς λαδώματος της μεταλλικής μήτρας στην περιοχή του τελευταίου δοκιμίου. Στα παρών δοκίμια κονιαμάτων διαπιστώνεται επίσης, ότι οι θλιπτικές τους αντοχές είναι μικρότερες σε σχέση με το προηγούμενο δοκίμιο GA-7.

Τα δοκίμια κονιαμάτων GA-6-K1 πριν και μετά από την δοκιμή τους σε κάμψη τριών σημείων παρουσιάζονται στα Σχήματα 29 και 30.

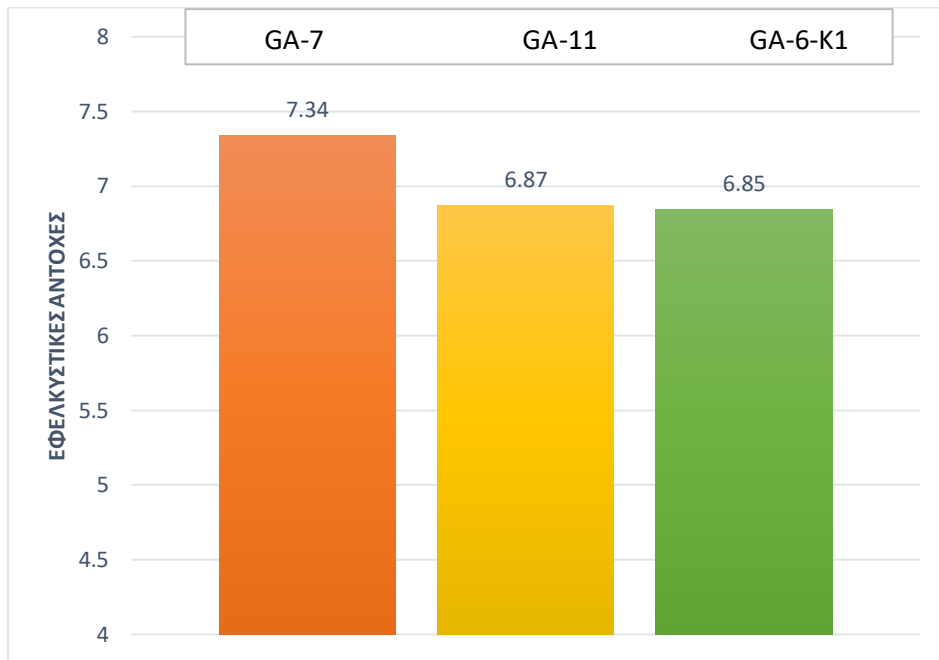


Σχήμα 28. Σκληρυμένα δοκίμια GA-6-K1

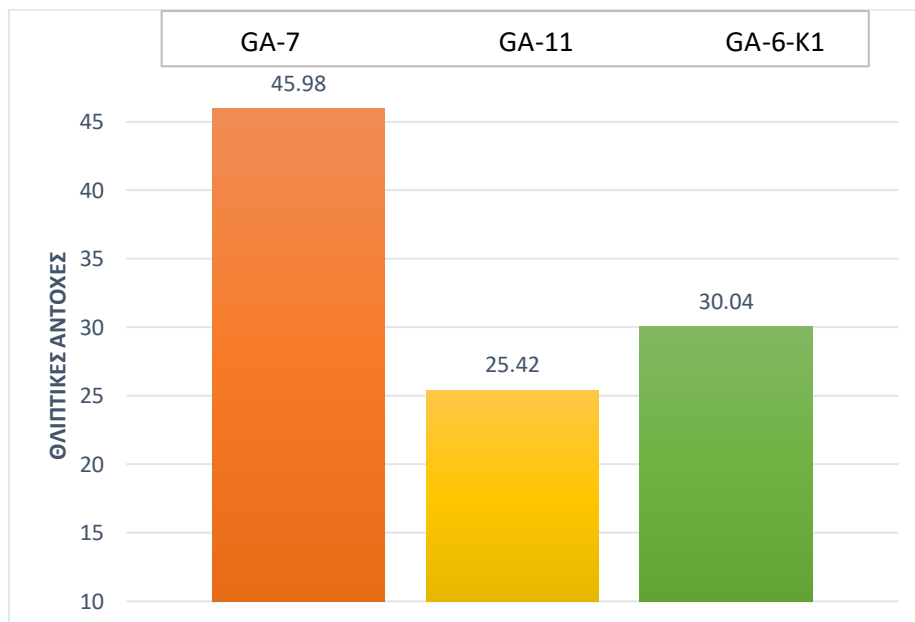


Σχήμα 29. Τα δοκίμια του μίγματος GA-6-K1 μετά από την δοκιμή τους σε κάμψη

Στη συνέχεια προβάλλονται δύο συγκριτικά διαγράμματα με τις εφελκυστικές και θλιπτικές αντοχές από τον μέσο όρο των τριών καλύτερων κονιαμάτων, Σχήματα 31,32.



Σχήμα 30. Εφελκυστικές αντοχές των τριών καλύτερων κονιαμάτων



Σχήμα 31. Θλιπτικές αντοχές των τριών καλύτερων κονιαμάτων

4.2 ΔΟΚΙΜΙΟ GA-6

Στην διάρκεια του πειράματος δημιουργήθηκε ένα δοκίμιο με ίδια αναλογία υδρούαλου προς μετακαολίνη το οποίο εξετάστηκε σε συνθήκες με διάφορους παράγοντες όπως το μήκος και το ποσοστό των ιών, η προσθήκη καθαρού νερού και η προσθήκη υδροξειδίου του Καλίου.

Αρχικά, το πρώτο δοκίμιο είχε μηδαμινή προσθήκη καθαρού νερού και έλλειψη αδρανών 0,5-1 mm με αποτέλεσμα να έχει πολύ καλή εφαρμογή στην επιφάνεια σκυροδέματος με αποτέλεσμα ο βαθμός εργασιμότητας να χαρακτηριστεί με 4/5. Δυστυχώς, υπήρξαν κάποιες «φυσαλίδες» οι οποίες προέκυψαν λόγω της κακής δόνησης του κονιάματος κατά την εφαρμογή του στην μεταλλική μήτρα, όπου και παρατηρείται στο Σχήμα 33, όπου θεωρήθηκε τελικά αναγκαία η προσθήκη αδρανών 0,5-1 mm.



Σχήμα 32. Κονίαμα GA-6 έπειτα από δοκιμή σε κάμψη



Σχήμα 29. Κονίαμα GA-6 έπειτα από δοκιμή σε κάμψη

Έπειτα, δεύτερο βήμα ήταν να προστεθεί ποσότητα αδρανών 0,5-1 mm με περισσότερη ποσότητα νερού. Σε αυτή την περίπτωση η εφαρμογή στην επιφάνεια σκυροδέματος ήταν καλύτερη και δεν υπήρχαν ρωγμές στην επιφάνεια χαρακτηρίζοντας βαθμό εργασιμότητας 4,5/5. Παρόλα αυτά οι αντοχές αντιφάσκουν με τα παραπάνω καθώς το πρώτο δοκίμιο GA-6.1 έχει εφελκυστική αντοχή **4,02 MPa** και θλιπτική αντοχή **35,32 MPa** ενώ το δεύτερο δοκίμιο GA-6.2 έχει εφελκυστική αντοχή **1,69 MPa** και θλιπτική αντοχή **45,32 MPa**.

Ελέγχεται επομένως, το ενδεχόμενο της απουσίας νερού με την παράλληλη προσθήκη ινών 6mm. Έχοντας πάλι τον ίδιο λόγο υδρύαλου, μετακαολίνης και αδρανών αλλά προσθέτοντας αυτή την φορά και ίνες 6mm είχαμε εξαιρετικά καλό και εύκολο άπλωμα στην επιφάνεια σκυροδέματος και χωρίς ρωγμές χαρακτηρίζοντας την εργασιμότητα του εξίσου με 4,5/5. Το αποτέλεσμα ήταν πολύ καλό όπως φαίνεται στα Σχήματα 34 και 35, φτάνοντας εφελκυστική αντοχή **6,83 MPa** και θλιπτική **42,35 MPa**. Συμπεραίνουμε, λοιπόν ό,τι οι ίνες βοήθησαν στην ανάπτυξη μεγαλύτερων αντοχών.



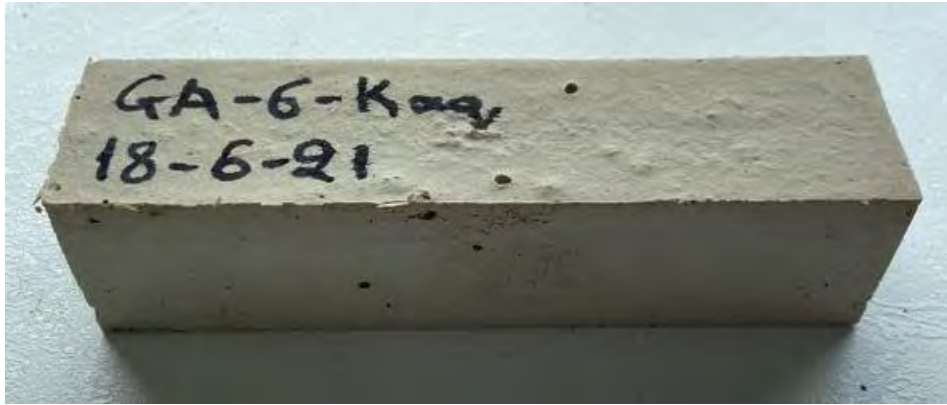
Σχήμα 33. Σκληρυμένο δοκίμιο GA-6.2-6F



Σχήμα 34. GA-6.2-6F μετά από την δοκιμή του σε κάμψη

Επόμενη δοκιμή αποτέλεσε το προηγούμενο δοκίμιο αλλά αυτή την φορά με ίνες μεγαλύτερου μήκους 12mm και την προσθήκη νερού γνωρίζοντας πως οι ίνες έχουν μεγάλη απορροφητικότητα και θα ήταν πολύ πυκνό το μείγμα μας με συνέπεια να μην γίνει σωστά η επικάλυψη της επιφάνειας σκυροδέματος **GA-6.2.12**. Η υφή λοιπόν, στο παρών κονίαμα ήταν αρκετά ιξώδη αλλά δεν υπήρχαν ρωγμές στην επιφάνεια με αποτέλεσμα να χαρακτηριστεί η εργασιμότητα με 4/5. Οι τιμές των αντοχών εφελκυσμού και θλίψης είναι **6,29 MPa** και **37,56 MPa** αντίστοιχα.

Επακόλουθη δοκιμή αποτέλεσε η προσθήκη αλκαλικού διαλύματος υδροξειδίου του Καλίου KOH για την εξέταση της συμπεριφοράς του διαλύματος με την μεγαλύτερη συγκέντρωση αλκαλικού διαλύματος. Αρχικά, προστέθηκε στο προηγούμενο μείγμα GA-6 μία μικρή συγκέντρωση KOH της τάξεως των 8% wt (**GA-6-K1**), αξίζει να σημειωθεί ότι η αναλογία των αδρανών 0,5-1mm και της πούδρας 0,5mm αυξήθηκε στα 1,5 και 5 αντίστοιχα. Τονίζεται ότι οι νιφάδες KOH προστέθηκαν στον υδρύαλο για να αυξηθεί η περιεκτικότητα του καλίου στο διάλυμα και συγκεκριμένα τα οξείδια του καλίου. Το αποτέλεσμα του μείγματος ήταν αρκετά καλό βαθμολογώντας την εργασιμότητα του με 3,5/5. Δεν παρατηρήθηκαν ρωγμές λόγω συστολής ξήρανσης στο δοκίμιο αλλά παρατηρήθηκε σχετική συστολή του άνω τμήματος που ερχόταν σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα (Σχήμα 36). Μετά την κάμψη παρατίθεται το Σχήμα 37. Οι τιμές των αντοχών εφελκυσμού είναι **8,3 MPa** και θλίψης **37,79 MPa**

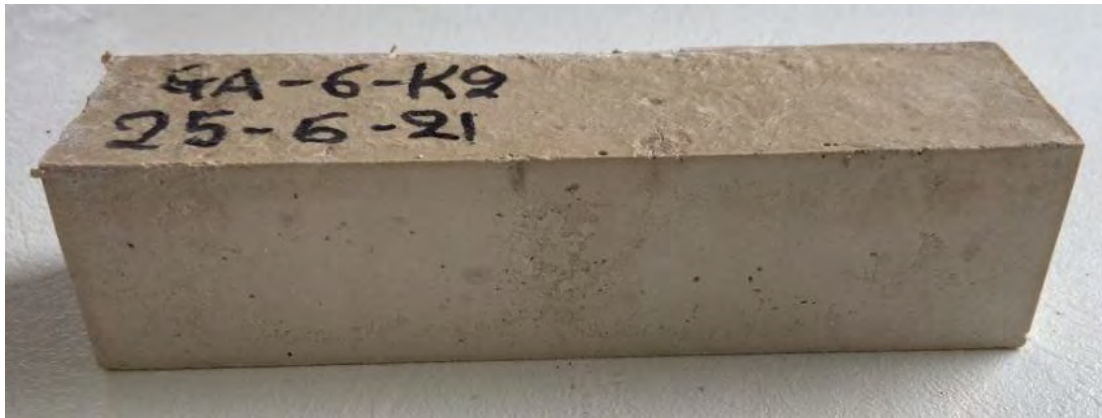


Σχήμα 35. Το σκληρυμένο δοκίμιο GA-6- Καα



Σχήμα 36. GA-6- Καα μετά από την δοκιμή του σε κάμψη

Επιπρόσθετα, δοκιμάστηκε αρκετά μεγάλη συγκέντρωση ΚΟΗ η οποία ήταν 22,5% wt και μειώθηκε η αναλογία των αδρανών στο 1 και της πούδρας 4,5 (GA-6-K2). Το άπλωμα στην επιφάνεια του σκυροδέματος δεν ήταν πολύ καλό καθώς το μείγμα ήταν λίγο υδαρή αλλά δεν έσταζε. Παρατηρήθηκε επίσης, ό,τι υπήρξε πάλι συρρίκνωση στο κονίαμα. Η εφελκυστική αντοχή έφτασε τα **7,51 MPa** και η θλιπτική τα **33,32 MPa**. Συμπεραίνουμε, ότι η επικράτηση μεγάλης συγκέντρωσης ΚΟΗ μειώνει τις αντοχές του κονιάματος με αποτέλεσμα να δημιουργήσουμε άλλο ένα δοκίμιο κονιάματος με μικρότερη συγκέντρωση από το προηγούμενο (Σχήμα 38). Το δοκίμιο μετά την κάμψη παρουσιάζεται στο Σχήμα 39.



Σχήμα 37. Το σκληρυμένο δοκίμιο GA-6-K2



Σχήμα 38. Κονίαμα GA-6-K2 μετά την δοκιμή σε κάμψη

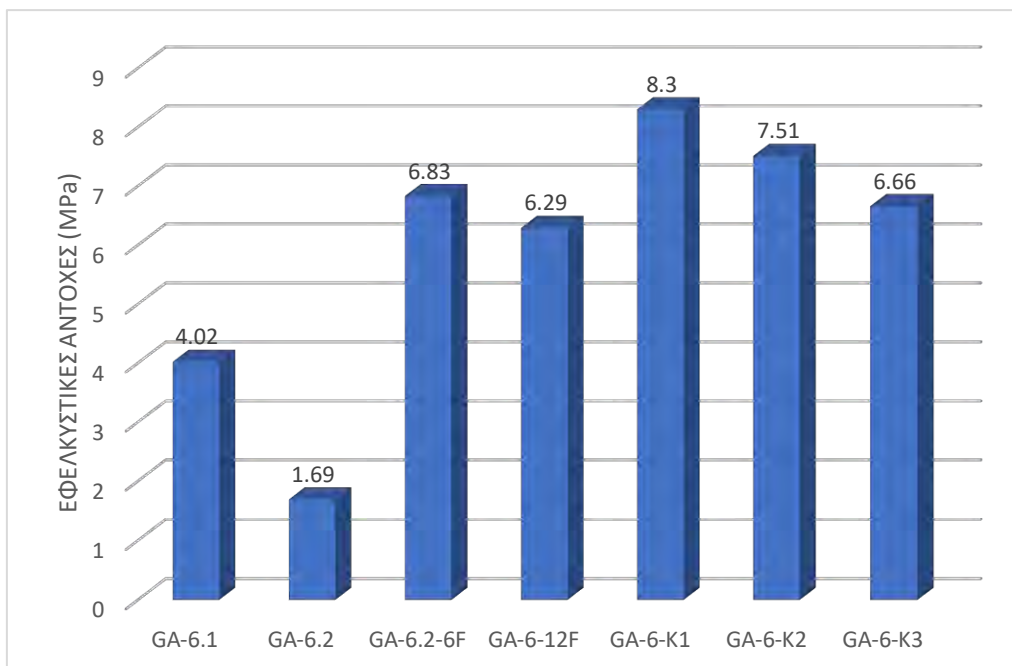
Το κονίαμα με την μικρότερη συγκέντρωση ονομάστηκε **GA-6-K3** η οποία ήταν 15% wt και η αναλογία αδρανών ήταν 1 και της πούδρας 4,5. Απόρροια της συγκεκριμένης δοκιμής ήταν να έχει εξαιρετική εργασιμότητα στην επιφάνεια του σκυροδέματος και κανένα ίχνος συρρίκνωσης, βαθμολογώντας την εργασιμότητα του με 5/5. Η εφελκυστική αντοχή του κυμάνθηκε στα **6,66 MPa** και θλιπτική αντοχή **28,93 MPa**. Παρουσιάζεται ένας συνοπτικός Πίνακας 19 με τις αναλογίες των υλικών με βάση αναφοράς την μετακαολίνη, ο Πίνακας 20 με τα αποτελέσματα δοκιμών σε κάμψη και θλίψη όλων των δοκιμίων και τα Σχήματα 40,41 για την σύγκριση των εφελκυστικών και θλιπτικών αντοχών.

Πίνακας 20. Αναλογίες υλικών με βάση αναφοράς την Μετακαολίνη για κονιάματα GA-6

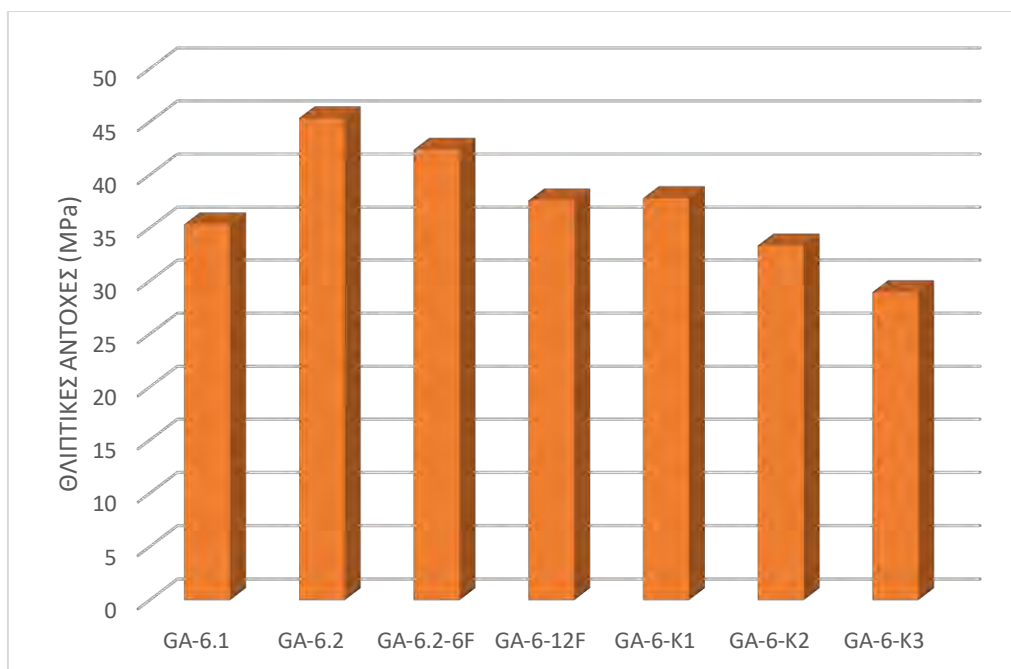
Mix ID	1 in g	waterglass [G]	KOH concentration	Metakaolin [A]	Water (W)	Medium sand 0.5-1 mm [F]	Fine sand 0-0.5 mm [P]	Fibers [gr]	Length of fiber(mm)
GA-6.1	100	2		1	0,001		3,5		
GA-6.2	100	2		1	0,1	1	4		
GA-6.2-6F	100	2		1		1	4	2,3	6 mm
GA-6-12F	80	2		1	0,19	1	4	2,3	12 mm
GA-6-K1	100	1,5	8% wt	1		1,5	5	2,3	6 mm
GA-6-K2	100	1,5	22.5% wt	1		1	4,5	2,3	6 mm
GA-6-K3	100	1,5	15% wt	1		1	4,5	2,3	6 mm

Πίνακας 21. Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης και θλίψης GA-6 κονιαμάτων

Mix ID	Max load F - bending [kN]	Flexural strength [MPa]	Max load F - compression [kN]	Avg. compressive strength [MPa]
GA-6.1	1,70	4,02	56	35,32
GA-6.2	0,72	1,69	72	45,32
GA-6.2-6F	2,93	6,83	72,3	42,35
GA-6-12F	2,62	6,29	60,34	37,56
GA-6-K1	3,51	8,3	60,1	37,79
GA-6-K2	3,16	7,51	53	33,32
GA-6-K3	2,83	6,66	46	28,93



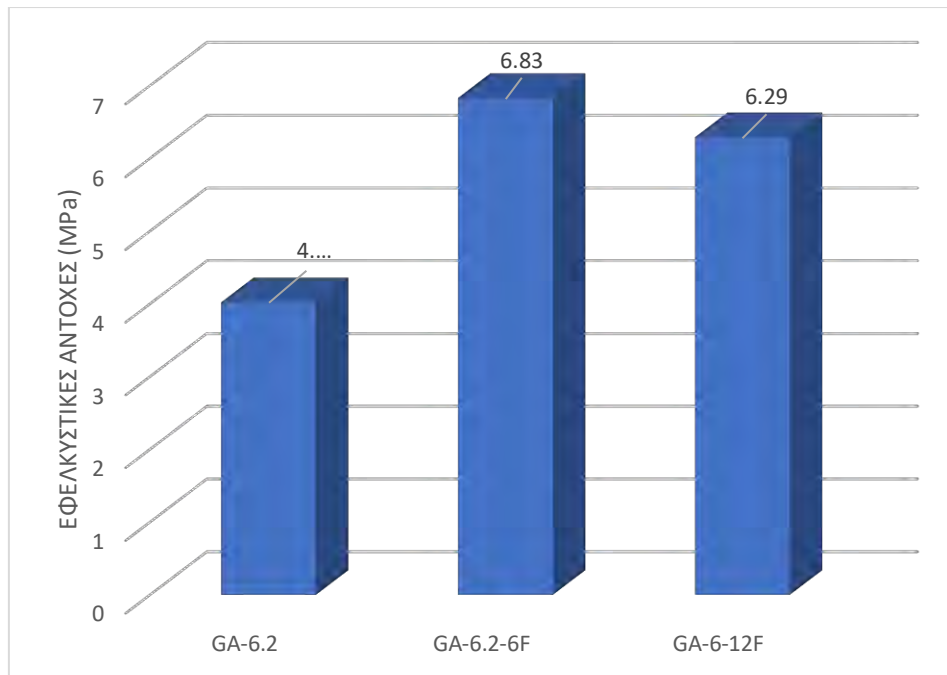
Σχήμα 39. Σύγκριση εφελκυστικών αντοχών δοκιμών GA-6



Σχήμα 40. Σύγκριση θλιπτικών αντοχών δοκιμίων GA-6

Παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη επιπρόσθετου αλκαλικού διαλύματος βοήθησε στην εργασιμότητα του μίγματος και είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση των αντοχών εφελκυσμού και θλίψης. Επίσης θετική επίδραση είχε και η χρήση των ινών.

Πιο συγκεκριμένα, όσο αφορά την επιρροή των ινών παρουσιάζεται το Σχήμα 42.

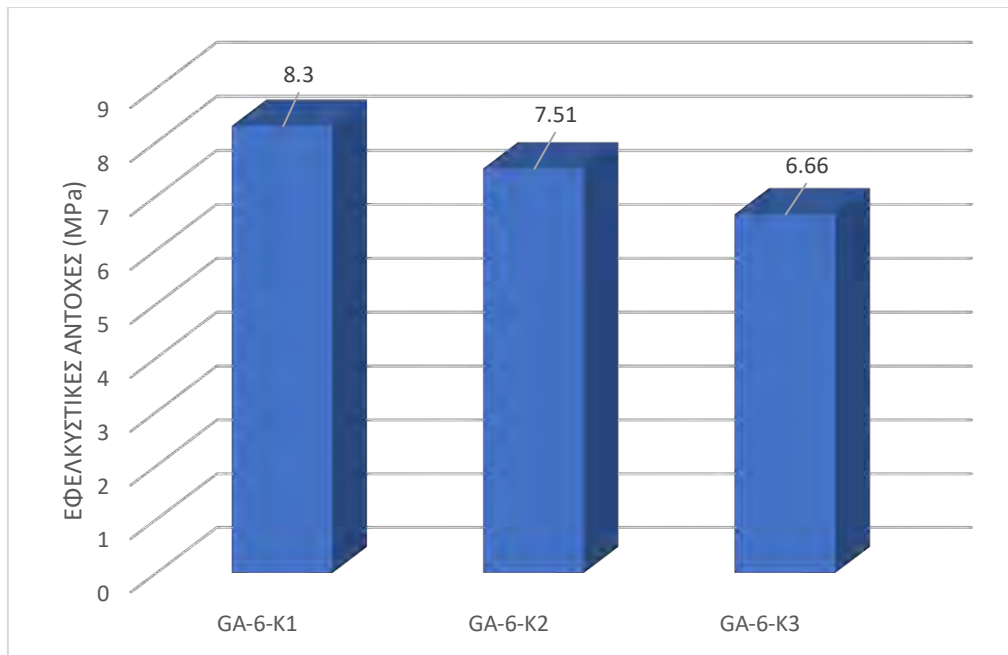


Σχήμα 41. Επιρροή ινών στην εφελκυστική αντοχή των κονιαμάτων

Διαπιστώνεται ό,τι η προσθήκη ινών βελτιώνει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες καθώς διατηρώντας τις ίδιες αναλογίες υδρύαλου μετακαολίνης και αδρανών έχουμε μεγάλη αύξηση της εφελκυστικής αντοχής όταν προσθέτουμε ίνες. Εντούτοις, σημειώθηκε ό,τι η ίνα 12 mm αποδείχθηκε υπέρ αρκετή για τα συγκεκριμένα δοκίμια κονιαμάτων καθώς παρατηρήθηκαν να δημιουργούν συσσωματώματα επειδή εμπόδιζε το μεγάλο μήκος τους. Πρέπει να υπογραμμιστεί ότι η εφελκυστική αντοχή του GA-6.2 αναμενόταν να κυμανθεί γύρω στα 4MPa, όμως δεν έγινε καλή ανάμειξη των υλικών πριν την προσθήκη του στην μήτρα.

4.2.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΥΔΡΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΚΑΛΙΟΥ

Επόμενος παράγοντας που εξετάζεται είναι η προσθήκη υδροξειδίου του Καλίου. Οι εφελκυστικές αντοχές των κονιαμάτων που περιέχουν ποσότητα διαλύματος KOH παρουσιάζονται στο Σχήμα 43.



Σχήμα 42. Επιρροή Υδροξειδίου του Καλίου στα δοκίμια με μετακαολίνη Α

Παρατηρείται ότι το δοκίμιο με την μικρότερη συγκέντρωση ίση με 8% wt υδροξειδίου του καλίου παρουσίασε τη μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή. Γενικότερα όμως, συμπεραίνουμε ότι η χρήση υδροξειδίου του Καλίου στις συγκεντρώσεις που εξετάστηκαν δεν ωφελεί ιδιαίτερα τα γεωπολυμερή δοκίμια κονιαμάτων καθώς δεν παρουσιάζεται μεγάλη διαφορά μεταξύ των τιμών των εφελκυστικών αντοχών.

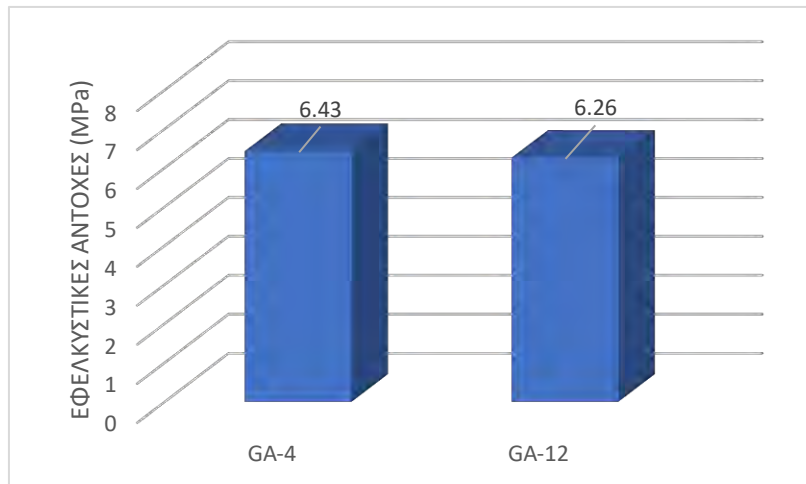
4.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ

Διάφορες μεταβλητές χρησιμοποιήθηκαν στην πιλοτική αυτή διερεύνηση όπως:

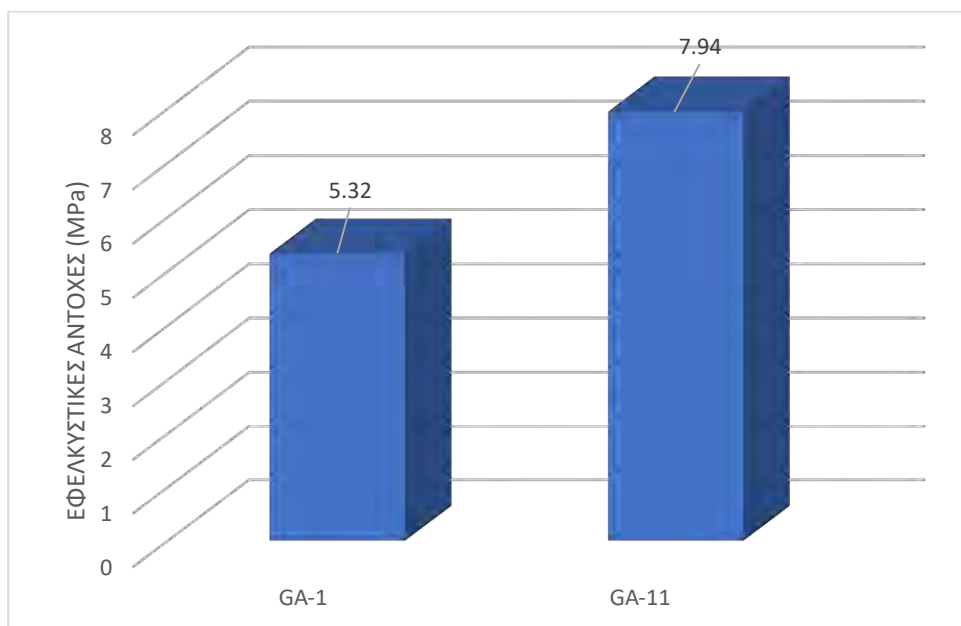
- a) Το μήκος και το ποσοστό των ινών
- b) Η κοκκομετρία των αδρανών
- c) Ο τύπος της μετακαολίνης

4.3.1 ΕΠΙΡΡΟΗ ΙΝΩΝ

Αρχικά, όπως αναφέρθηκε η προσθήκη των ινών αποτέλεσε μια από τις παραμέτρους που εξετάστηκαν για τη δημιουργία των κονιαμάτων. Προσθήκη ινών έγινε σε κονιάματα που παρήχθησαν με βάση τη μετακαολίνη Α παρατίθενται τα Σχήματα 44 και 45.



Σχήμα 43. Επιρροή ινών στα δοκίμια GA-4 και GA-12

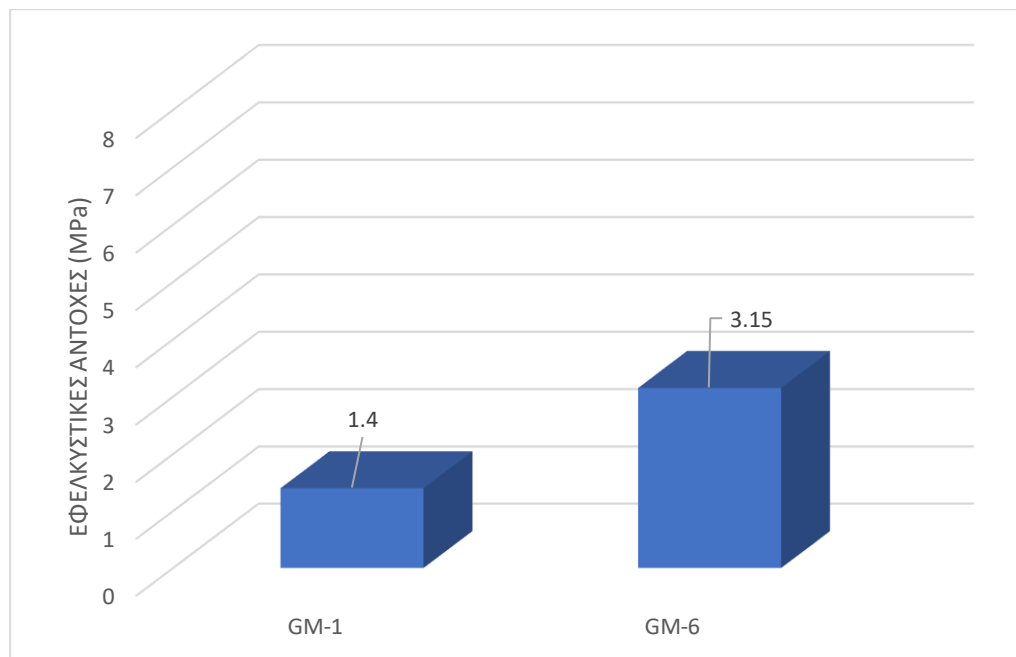


Σχήμα 44. Επιρροή ινών στα δοκίμια GA-1 και GA-11

Το δοκίμια GA-4, GA-12 και GA-1, GA-11 έχουν τις ίδιες αναλογίες υδρύαλου μετακαολίνης και αδρανών με μόνη διαφορά ότι τα δοκίμια GA-12 και GA-11 έχουν προσθήκη ινών με αποτέλεσμα να γίνεται φανερό ότι οι ίνες επηρεάζουν θετικά τις εφελκυστικές αντοχές των

κονιαμάτων. Το ποσοστό αύξησης της εφελκυστικής αντοχής του δοκιμίου GA-11 σε σχέση με το δοκίμιο GA-12 είναι 26,8%. Το γεγονός ότι στο δοκίμιο GA-12 προστέθηκε διπλάσια ποσότητα νερού από ότι στο δοκίμιο GA-11 αποκαλύπτει ότι για να γίνει αποδοτικότερη η χρήση ινών δεν πρέπει να προστεθεί πολύ ποσότητα νερού.

Παρόμοια, με βάση την μετακαολίνη M παρουσιάζεται το Σχήμα 46 όπου πάλι η προσθήκη ινών στο δοκίμιο GM-6 φαίνεται να οδηγεί σε σημαντική αύξηση της εφελκυστικής αντοχής.

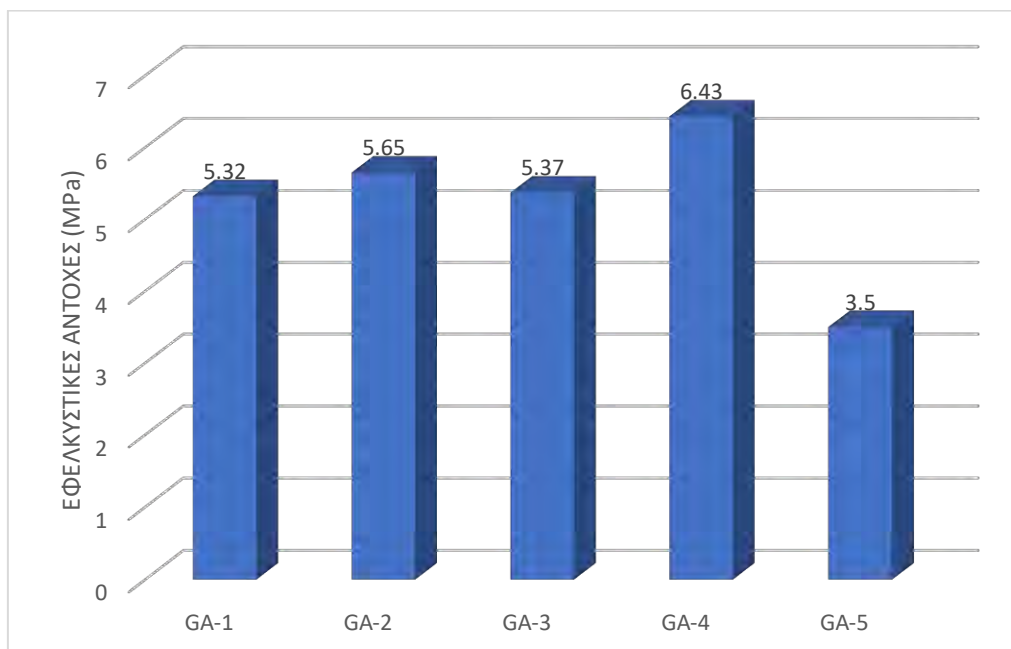


Σχήμα 45. Επιρροή ινών στο δοκίμιο GM-6

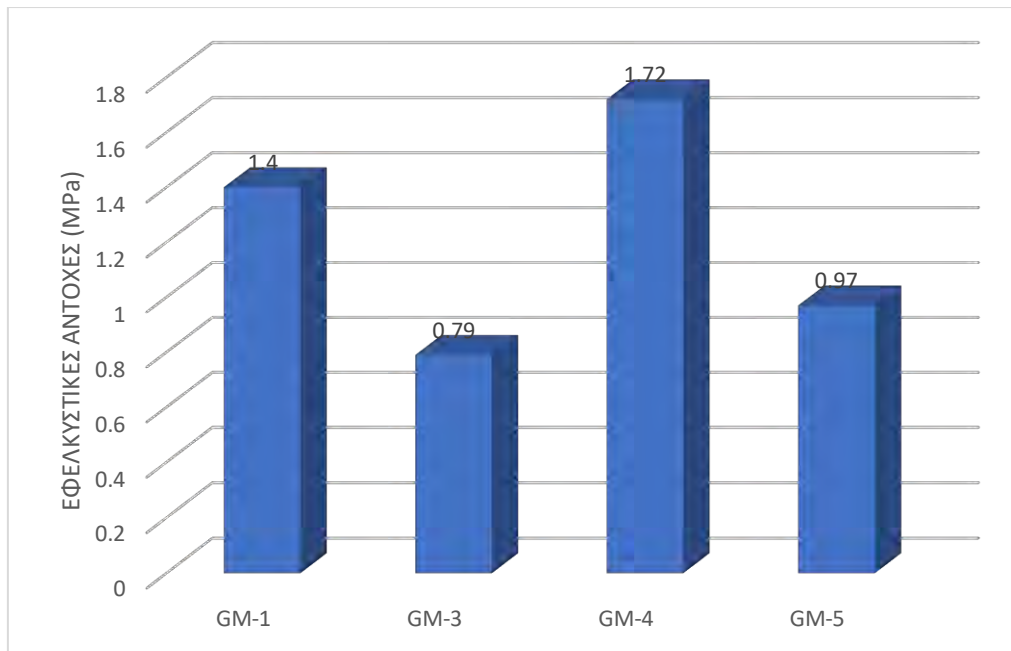
Γίνεται αντιληπτό για μια ακόμη φορά ό,τι η χρήση ινών είναι απαραίτητη καθώς μας δίνει μεγαλύτερες εφελκυστικές αντοχές με ποσοστό αύξησης περίπου με 125% και βοηθάει το κονίαμα να έχει καλύτερη εργασιμότητα για την μετ' έπειτα εφαρμογή του για την ενίσχυση κτηρίων. Επίσης, παρατηρείται ότι χωρίς ίνες οι εφελκυστικές αντοχές των κονιαμάτων κυμαίνονται στα 5,5 MPa για τα δοκίμια με μετακαολίνη A και στα 1,5 MPa για τα δοκίμια με μετακαολίνη M.

4.3.2 ΕΠΙΡΡΟΗ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑΣ ΑΔΡΑΝΩΝ

Όλα τα δοκίμια παρασκευάστηκαν με σταθερή αναλογία αδρανών 0,5-1mm και στην συνέχεια μεταβαλλόταν η αναλογία των αδρανών 0-0,5mm ώστε να προκύψει ένα εργάσιμο κονίαμα. Η αναλογία μετακαολίνης-υδρύαλου ήταν ίδια σε όλα τα κονιάματα ίση με 1:2. Παρατηρήθηκε ότι η μεγάλη αναλογία αδρανών 0.5-1mm δημιούργησε στο κονίαμα τραχειά υφή όπου διαχωριζόταν τα αδρανή από το γεωπολυμερές συνδετικό υλικό με αποτέλεσμα να μην έχει καλή εργασιμότητα το κονίαμα. Από την άλλη, η μεγάλη ποσότητα των αδρανών 0-0,5mm έκανε το κονίαμα πολύ πηχτό και πολύ κολλώδες ώστε να επαλειφθεί στην επιφάνεια σκυροδέματος. Παρατίθενται τα διαγράμματα με βάση τις μετακαολίνες Α και Μ με βασική παράμετρο διαφοροποίησης την κοκκομετρία των αδρανών στα Σχήματα 47 και 48.



Σχήμα 46. Επιρροή κοκκομετρίας των αδρανών στα δοκίμια με μετακαολίνη Α



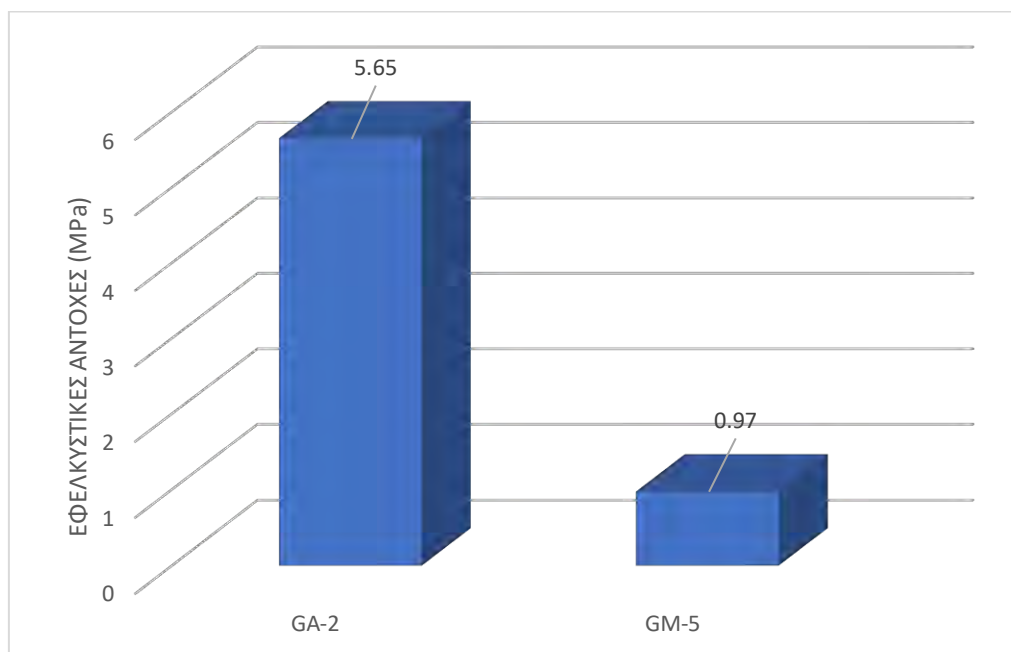
Σχήμα 47. Επιρροή κοκκομετρίας των αδρανών στα δοκίμια με μετακαολίνη Μ

Ξεκινώντας με τα δοκίμια από μετακαολίνη Α παρατηρείται ότι μια μέση εφελκυστική αντοχή κυμαίνεται στα 5,25MPa. Όσο αφορά τα δοκίμια GA-1 και GA-3 που έχουν αντίστροφη αναλογία στα αδρανή δεν υπάρχει μεγάλη απόκλιση στις εφελκυστικές τους αντοχές. Την καλύτερη εφελκυστική αντοχή όμως, ίση με 6,43 MPa την παρουσιάζει το δοκίμιο GA-4 με αναλογία αδρανών 0,5-1 και 0-0.5mm (1:5). Το δοκίμιο GA-4 έχει μεγάλη ποσότητα αδρανών 0-0.5mm που συνεπάγεται στην όχι και τόσο καλή εργασιμότητα αλλά αξίζει να σημειωθεί ό,τι η τιμή της εφελκυστικής του αντοχής είναι πολύ καλή παρόλο που δεν έχουν προστεθεί ίνες. Όσο αφορά το δοκίμιο GA-5 πρέπει να σημειωθεί ότι η μείωση στην αναλογία αδρανών προς το κονίαμα οδηγεί στην μείωση και της εφελκυστικής αντοχής.

Αντίστοιχα, τα δοκίμια από μετακαολίνη Μ εμφανίζουν μέση εφελκυστική αντοχή ίση με 1,22 MPa. Στην παρούσα κατάσταση τα δοκίμια GM-3 και GM-4 έχουν αντίστροφη αναλογία αδρανών και παρατηρείται εμφανής απόκλιση μεταξύ των τιμών αντοχών τους. Το ποσοστό μείωσης μεταξύ του κονιάματος GM-5 με την μεγαλύτερη αναλογία αδρανών από το GM-1 είναι περίπου 30%.

4.3.3 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΤΗΣ ΜΕΤΑΚΑΟΛΙΝΗΣ

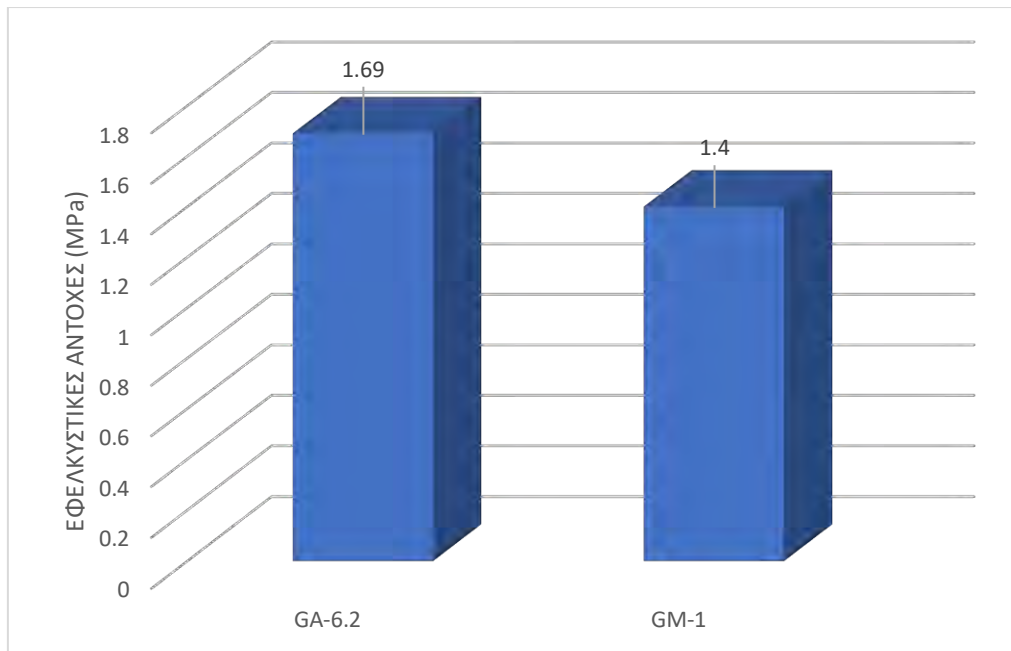
Σε αυτήν την πειραματική διάταξη χρησιμοποιώντας δύο τύπους μετακαολίνης την Α και την Μ στα κονιάματα είναι αναγκαίο να γίνει σύγκριση μεταξύ τους. Παρατίθεται το διάγραμμα μεταξύ δύο κονιαμάτων με την ίδια σύσταση με διαφορά τον τύπο της μετακαολίνης στο Σχήμα 49.



Σχήμα 48. Παράμετρος τύπος μετακαολίνης.

Η γενικότερη παρατήρηση είναι ό,τι η μετακαολίνη Μ δεν συνεργάζεται όπως θα περιμέναμε με τον υδρύαλο καθώς έχει ποσοστό μείωσης της εφελκυστικής αντοχής 82,8% με αποτέλεσμα οι εφελκυστικές αντοχές να είναι πολύ χαμηλές.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται άλλο ένα διάγραμμα με ίδια σύσταση κονιάματος και αδρανών αλλά με διαφορετικό τύπο μετακαολίνης με μια μικρή διαφορά ότι στο κονίαμα GA-2 έχει προστεθεί μικρή ποσότητα νερού ίση με 0,1 gr Σχήμα 50.



Σχήμα 49. Επίδραση τύπου μετακαολίνης στην εφελκυστική αντοχή των κονιαμάτων

Γίνεται αντιληπτό ό,τι δεν αποκλίνουν πολύ τα δύο δοκίμια. Το δοκίμιο GA-6.2 εμφανίζει καλύτερη εφελκυστική αντοχή λόγω της καλύτερης αντίδρασης της μετακαολίνης Α με τον υδρύαλο και ίσως επηρεάζεται θετικά και από την προσθήκη ποσότητας νερού που βοηθά να γίνει πιο εργάσιμο το κονίαμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Από την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξάγονται κάποια συμπεράσματα για τις ιδιότητες κονιαμάτων που βασίζονται στα γεωπολυμερή. Διαπιστώνεται λοιπόν ό,τι η συμπεριφορά των γεωπολυμερών κονιαμάτων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, ενώ μικρές αλλαγές στη σύσταση αποφέρουν σημαντικές αλλαγές στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητές τους. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν συγκεντρώνονται παρακάτω :

- Παρατηρήθηκε με μεγάλη διαφορά στις μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων που βασίστηκαν σε δύο διαφορετικές μετακαολίνες που εξετάστηκαν. Η χρήση μιας συγκεκριμένης μετακαολίνης είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγαλύτερων θλιπτικών και εφελκυστικών αντοχών.
- Παρατηρήθηκε ό,τι η βέλτιστη αναλογία μετακαολίνης έναντι υδρύαλου είναι γύρω στο 0,5.
- Τα τρία βέλτιστα κονιάματα τόσο σε σχέση με την εργασιμότητα όσο και σε σχέση με τις αντοχές ήταν το GA-7, GA-11, GA-6-K1.
- Οι ίνες πολυπροπυλενίου αντιμετωπίζουν τυχόν ρωγμές στα δοκίμια από την συστολή ξήρανσης και ενδεχόμενες θερμοκρασιακές μεταβολές, παρόλα αυτά πρέπει να χρησιμοποιούνται με την κατάλληλη αναλογία αδρανών καθώς δημιουργούν ένα πυκνό δίκτυο που μειώνει την ρευστότητα το κονιάματος.
- Οι ίνες ήταν προτιμότερο να αναδευτούν μέσα στον υδρύαλο πριν χρησιμοποιηθούν στο μίγμα ώστε να απορροφηθούν γρηγορότερα
- Οι ίνες 12mm λόγω του μεγάλου μήκους δημιούργησαν συσσωματώματα καθώς δεν έγινε καλή διασπορά με αποτέλεσμα να μην έχουν καλές τιμές αντοχών.

- Η χρήση ποσότητας 8% wt υδροξειδίου του καλίου KOH είχε θετική επίδραση καθώς έπηξε το κονίαμα πιο γρήγορα και δεν εμφάνισε ρωγμές συστολής ξήρανσης στην επιφάνεια του δοκιμίου του κονιάματος.
- Η μεγάλη αύξηση της ποσότητας των αδρανών με κοκκομετρική διαβάθμιση 0-0,5mm έκανε το κονίαμα πολύ πηχτό με αποτέλεσμα να μην είναι εύκολη η χρήση του για την κάλυψη επιφανειών σκυροδέματος.
- Αντίστοιχα, η αύξηση της ποσότητας των αδρανών κοκκομετρικής διαβάθμισης 0,5-1 mm δημιούργησε στο κονίαμα τραχιά υφή όπου διαχωριζόταν τα αδρανή από το γεωπολυμερές συνδετικό υλικό με αποτέλεσμα να μην έχει καλή εργασιμότητα το κονίαμα.

Ακολουθούν ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα:

- Προτείνεται περαιτέρω μελέτη για την εύρεση των παραγόντων που επηρεάζουν τις ιδιότητες των κονιαμάτων.
- Θα ήταν απαραίτητη η εξέταση των κονιαμάτων σε κάμψη και θλίψη σε δύο διαφορετικές χρονικές περιόδους δηλαδή στις πρώτες 7 μέρες και μετά στις 28.
- Θα μπορούσε να μελετηθεί και η επίδραση του υδροξειδίου του νατρίου NaOH αντί του υδροξειδίου του καλίου KOH

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ :

Βικιπαίδεια, ελεύθερη εγκυκλοπαίδεια 2015. Λήμμα γεωπολυμερή. Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο <https://en.wikipedia.org/wiki/Geopolymer> . Τελευταία ενημέρωση στις 25 Δεκεμβρίου του 2021

Βικιπαίδεια, ελεύθερη εγκυκλοπαίδεια 2015. Λήμμα κονίαμα .Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CE%BF%CE%BD%CE%AF%CE%B1%CE%BC%CE%B1>

Κατσαρού Ε. (2006). Σύνθεση και ιδιότητες γεωπολυμερών που παράγονται από ιπτάμενη τέφρα λιγνιτικών σταθμών, Μεταπτυχιακή Εργασία, ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ, Χανιά 2006

Τεκίδης, αριστοποίηση σύνθεσης γεωπολυμερών από μετακαολίνη , διπλωματική εργασία, τομέας χημικών μηχανικών, Αθήνα 2011]

Τσιτούρας Α. (2013). Αξιοποίηση ελληνικών καολινών στην τεχνολογία των γεωπολυμερών, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Αθήνα 2013

ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:

A. Bhutta, M. Farooq, N. Banthia (2019) Performance characteristics of micro fiber-reinforced geopolymer mortars for repair <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.210>

A.M. Rashad, S.R. Zeedan (2011)The effect of activator concentration on the residual strength of alkali-activated fly ash pastes subjected to thermal load <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.044>

Almutairi, A. L., Tayeh, B. A., Adesina, A., Isleem, H. F., & Zeyad, A. M. (2021). Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00733>

Ambrisi, a D., Cristofaro, M. T., & Stefano, M. de. (2008). Predictive Models for Evaluating Concrete Compressive Strength in Existing Buildings. *14th World Conference on Earthquake Engineering*.

B. Mehsas, M. Siline, L. Zeghichi (2021). Development of supplementary cementitious materials from Algerian kaolin: elaboration of metakaolin and assessment of pozzolanicity <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00444-2>

B.E. Jimma, P.R. Rangaraju (2014). Film-forming ability of flowable cement mortars and its application in mixture proportioning of pervious concrete. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.018>

Benhelal E., , Zahedi, G., Shamsaei, E., & Bahadori, A. (2013). Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry. In *Journal of Cleaner Production* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.049>

Çelikten, S., & Işıkdag, B. (2021). Properties of geopolymer mortars derived from ground calcined perlite and NaOH solution. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1080/19648189.2021.1879939>

H. Gao, H. Liu, L. Liao, L. Mei, F. Zhang, L. Zhang, S. Li, G. Lv (2020). A bifunctional hierarchical porous kaolinite geopolymer with good performance in thermal and sound insulation <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118888>

Hassan, A., Arif, M., & Shariq, M. (2019). Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment – A review of mechanical properties and microstructure. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 223). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.051>

Hua, X., Provis, J. L., van Deventer, J. S. J., & Krivenko, P. v. (2008). Characterization of Aged Slag Concretes. *ACI Materials Journal*, 105(2). <https://doi.org/10.14359/19753>

J Davidovits - Saint Quentin, (2008). Geopolymer Chemistry and Applications Institut Geopolymer <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.049>

L. Koutas, P. Papakonstantinou (2021). Flexural strengthening of RC beams with textile-reinforced mortar composites focusing on the influence of the mortar type. *Journal of Composites for Construction* <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113060>

M.S. Morsy, H. Shoukry, M.M. Mokhtar, A.M. Ali, S.A. El-Khodary (2018). Facile production of nano-scale metakaolin: an investigation into its effect on compressive strength, pore structure and microstructural characteristics of mortar <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.249>

Mao, J., Wang, Q., Qu, L., Zhang, H., Shi, Z., Xu, S., & Li, X. (2022). Study of mortar layer property of superhydrophobic metakaolin based cement mortar. *Journal of Building Engineering*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103578>

P. De Silva, K. Sagoe-Crenstil, V. Sirivivatnanon Kinetics of geopolymerization: role of Al_2O_3 and SiO_3 *Cem Concr Res*, 37 (2007), <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.003>

Palomo, A., Krivenko, P., Garcia-Lodeiro, I., Kavalerova, E., Maltseva, O., & Fernández-Jiménez, A. (2014). A review on alkaline activation: New analytical perspectives. *Materiales de Construction*, 64(315). <https://doi.org/10.3989/mc.2014.00314>

Pinto, A. T. (2004). *Metakaolin alkali-activated based binders* (Doctoral dissertation, PhD Thesis, University of Minho. Portugal).

Popel, G. N. (1999). Synthesis of a mineral-like stone on alkaline aluminosilikate binders to produce materials with increased corrosion resistance. In *Proceedings of the 2nd Int. Conference on Alkaline cements and Concretes, Kiev, Ukraine*.

Proaño, L., Sarmiento, A. T., Figueredo, M., & Cobo, M. (2020). Techno-economic evaluation of indirect carbonation for CO₂ emissions capture in cement industry: A system dynamics approach. *Journal of Cleaner Production*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121457>

R. Maddalena, J.J. Roberts, A. Hamilton (2018): Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of

innovative cements, *Journal of Cleaner Production*, 186, 933-942, doi:
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.138>

Ren, B., Zhao, Y., Bai, H., Kang, S., Zhang, T., & Song, S. (2021). Eco-friendly geopolymer prepared from solid wastes: A critical review. In *Chemosphere* (Vol. 267).
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128900>

Renaud, P., Chartier, S., & Kaufman, D. (2008). Properties of concrete by A.M. Neville. In *Proceedings of the 5th IASTED International Conference on Signal Processing, Pattern Recognition, and Applications, SPPRA 2008*.

Rowles, M., & O'Connor, B. (2003). Chemical optimisation of the compressive strength of aluminosilicate geopolymers synthesised by sodium silicate activation of metakaolinite. *Journal of Materials Chemistry*, 13(5). <https://doi.org/10.1039/b212629j>

S. Dawczyński, R. Krzywón, M. Górski, W. Dubińska, M. Samoszuk, *Geopolymer concrete - applications in civil engineering*, 2017.

S. Singh, M.U. Aswath, R.V. Ranganath (2020) Performance assessment of red mud based geopolymer bricks and prisms
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101462>

T.Y. Ni, W.B. Ma, Y. Yang, J.R. Yu, J.T. Liu, C.H. Jiang, C.P. Gu(2021). Interface reinforcement and a new characterization method for pore structure of pervious concrete.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121052>

X. Lv, K. Wang, Y. He, X. Cui(2019). A green drying powder inorganic coating based on geopolymer technology <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.163>

Xiao Yao, Zuhua Zhang, Huajun Zhu, Yue Chen (2009) Geopolymerization process of alkali-metakaolinite characterized by isothermal calorimetry, <https://doi.org/10.1016/j.tca.2009.04.002>

Y.H.M. Amran, R. Alyousef, H. Alabduljabbar, M. El-Zeadani (2020). Clean production and properties of geopolymer concrete; review <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119679>