



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Διπλωματική Εργασία**

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΦΙΛΙΚΩΝ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ  
ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΕ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ:**

**ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΥΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ  
ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ**

**ΒΑΪΟΣ ΣΑΒΒΑΪΔΗΣ**



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

**ΒΟΛΟΣ 2022**



© 2021 Βαΐος Σαββαΐδης

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

Τρίτος Εξεταστής        Γουργιώτης Παναγιώτης  
   Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,  
   Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας



## Ευχαριστίες

Με την παρούσα διπλωματική εργασία κλείνει ο κύκλος των προπτυχιακών σπουδών μου στο τμήμα των Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους επιβλέποντες καθηγητές μου Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Χρήστο Παπακωνσταντίνου και Επίκουρο Καθηγητή κ. Λάμπρο Κούτα για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή τους κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την Ιωάννα Σκυριανού για την καθοδήγηση της και την βοήθεια της κατά την διάρκεια των εργαστηριακών δοκιμών. Ακόμα ευχαριστώ την συμφοιτήτριά μου Πασχαλινά Φιλιππίδου για όλη την βοήθεια της κατά την διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας. Ιδιαίτερα θερμές ευχαριστίες θέλω να δώσω στην οικογένεια μου για την συνεχή συμπαράσταση τους, για τις πολύτιμες συμβουλές τους και για όλα όσα μου έχουν προσφέρει όλα αυτά τα χρόνια της ζωής μου αλλά και των σπουδών μου. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ τόσο το Τμήμα ελέγχου υλικών και ποιότητας δημοσίων έργων Θεσσαλίας και την εταιρία ΛΑΡΚΟ.

Βαΐος Σαββαΐδης





**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΦΙΛΙΚΩΝ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ  
ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΕ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ:  
ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΥΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ  
ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ**

Βαΐος Σαββαΐδης

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2022

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Παπακωνσταντίνου Χρήστος, Αναπληρωτής Καθηγητής

### **Περίληψη**

Η χρήση του τσιμέντου παρουσιάζει αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις διότι κατά την παραγωγή του εκπέμπονται μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) στην ατμόσφαιρα. Το γεγονός αυτό δημιουργεί την ανάγκη για στροφή σε υλικά που μειώνουν το αποτύπωμα άνθρακα. Πολλοί ερευνητές προτείνουν την αντικατάσταση του τσιμέντου με γεωπολυμερή. Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μια πιλοτική μελέτη σύνθεσης ανόργανων κονιαμάτων βασισμένων στα γεωπολυμερή με προσθήκη βιομηχανικών παραπροϊόντων. Πιο συγκεκριμένα, στο πειραματικό πρόγραμμα παρασκευάστηκαν δοκίμια γεωπολυμερών κονιαμάτων με χρήση διαφορετικών παραμέτρων ώστε να εξεταστεί η επίδρασή τους στη φυσική και μηχανική τους συμπεριφορά. Ο στόχος της εργασίας αυτής ήταν να αναπτυχθεί ένα φιλικό προς το περιβάλλον κονίαμα για χρήση σε επισκευές υφιστάμενων κατασκευών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι είναι εφικτό το να παρασκευαστεί κονίαμα βασισμένο στα γεωπολυμερή με χρήση σκόνης καμίνου το οποίο θα παρουσιάζει εφελκυστική και θλιπτική αντοχή αντίστοιχη με εμπορικά διαθέσιμα τσιμεντοειδή κονιάματα

**Λέξεις Κλειδιά:** *Γεωπολυμερή, Βιομηχανικά παραπροϊόντα, Κονιάματα ενίσχυσης, Τσιμεντοκονιάματα, Μετακαολίνη.*



# REINFORCEMENT OF EXISTING CONSTRUCTIONS WITH ENVIRONMENTALLY FRIENDLY MORTARS: MORTARS MADE BY INDUSTRIAL BY-PRODUCTS

Vaios Savvaides

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2022

Supervisor: Dr. Papakonstantinou Christos, Associate Professor

## Abstract

The use of cement has a negative environmental impact because during its production, cement industries emit substantial amounts of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) into the atmosphere. This creates the need for a shift to materials that reduce the carbon footprint. Many researchers suggest replacing cement with geopolymers. The present dissertation is a pilot study on the design of inorganic mortars based on geopolymers using industrial by-products. In this experimental program, specimens of geopolymer mortars were prepared using different parameters to investigate their effect on their physical and mechanical behavior. The objective of this work was to develop an environmentally friendly mortar for use in reinforcement of existing structures. Results has shown that it is possible to fabricate geopolymer mortars using blast furnace slag that exhibit mechanical properties equivalent to commercially available cementitious mortars.

**Keywords:** *Geopolymers, Industrial by-products, Reinforced mortar, Cement mortars, Metakaolin.*



<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b> .....	<b>15</b>
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	15
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b> .....	<b>25</b>
2.1 ΤΣΙΜΕΝΤΟ.....	25
2.1.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	25
2.1.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ .....	25
2.2 ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ .....	26
2.2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....	26
2.2.2 ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΕΝΙΣΧΥΣΕΩΝ .....	27
2.2.2.1 ΤΣΙΜΕΝΤΟΕΙΔΗ ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΓΙΑ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ .....	27
2.2.3 ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΗ.....	31
2.2.3.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΩΝ.....	33
2.2.3.2 ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΗ ΑΠΟ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ.....	35
2.2.3.2.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	35
2.2.3.2.2 ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ.....	35
2.2.3.2.3 ΣΚΩΡΙΕΣ ΚΑΜΙΝΩΝ .....	36
2.2.3.2.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΓΙΑ ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΩΝ.....	37
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b> .....	<b>43</b>
3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ.....	43
3.1.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	43
3.1.2 ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ .....	43
3.1.3 ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ .....	44
3.1.3.1 ΜΕΤΑΚΑΟΛΙΝΗ .....	45
3.1.3.2 ΣΚΟΝΗ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΚΑΜΙΝΩΝ.....	45
3.1.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ.....	46
3.1.5 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ.....	47

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</b> .....	<b>49</b>
4.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	49
4.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	51
4.2.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	51
4.2.2 ΔΟΚΙΜΙΟ BL_S-3-K1.....	51
4.2.3 ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΚΟΝΙΑ ΣΚΟΝΗ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΚΑΜΙΝΩΝ (ΣΠΚ).....	52
4.2.3.1 ΔΟΚΙΜΙΑ G_S-1, G_S-2, G_S-3, G_S-5 .....	52
4.2.3.2 ΔΟΚΙΜΙΑ G_S-6-6F , G_S-4-6F, G_S-4-12F.....	56
4.2.3.3 ΔΟΚΙΜΙΑ G_S-4KFL, G_S-4-K1, G_S-4-K2, G_S-4-K3.....	59
4.2.4 ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΣΥΝΔΙΑΣΜΟ ΚΟΝΙΑΣ ΣΚΟΝΗ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΚΑΜΙΝΩΝ (ΣΠΚ) ΚΑΙ ΜΕΤΑΚΑΟΛΙΝΗΣ (M) .....	63
4.2.4.1 ΔΟΚΙΜΙΑ G_S_A-1, G_S_A-3.2, G_S_A-4, G_S_A-5.1, G_S_A-5.2 .....	63
4.2.4.2 ΔΟΚΙΜΙΑ G_S_A-11-6F ΚΑΙ G_S_A-1-12F .....	67
4.2.4.3 ΔΟΚΙΜΙΑ G_S_A-1-K2 ΚΑΙ G_S_A-1-K3.....	69
4.2.4.4 ΔΟΚΙΜΙΑ G_S_A-1-K2-A, G_S_A-1-K2-B, G_S_A-1-K2-C, G_S_A-1-K2-D ΚΑΙ G_S_A-1-K2-E.....	72
4.2.5 ΣΕΤ 3 ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	74
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5</b> .....	<b>77</b>
5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	77
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6</b> .....	<b>ΣΦΑΛΜΑ! ΔΕΝ ΕΧΕΙ ΟΡΙΣΤΕΙ ΣΕΛΙΔΟΔΕΙΚΤΗΣ.</b>
6.1 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	79

Πίνακας 2.1 Μηχανικές ιδιότητες κονιαμάτων Escrig et. al. (2015). .....	20
Πίνακας 2.2 Μηχανικές ιδιότητες κονιαμάτων, Koutas & Papakonstantinou (2021). .....	21
Πίνακας 2.3 Αποτελέσματα μονοαξονικής θλίψης σε θερμοκρασίες 60 και 25 βαθμών Πάνιας et. al. (2005). .....	27
Πίνακας 2.4 Αναλογίες κονιαμάτων (Chi & Huang 2013) .....	30
Πίνακας 2.5 Αναλογίες γεωπολυμερών κονιαμάτων (Sitarz et al. 2020). .....	32
Πίνακας 2.6 Αναλογίες κονιαμάτων (Shang et al., 2018).....	33
Πίνακας 3.1 Συγκεντρωτικός πίνακας ονομάτων.....	36
Πίνακας 4.1 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων.....	41
Πίνακας 4.2 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων σετ τριών δοκιμών.....	42
Πίνακας 4.3 Αναλογίες κονιαμάτων μόνο με κονία σκόνης περιστροφικών καμίνων.....	44
Πίνακας 4.4 Αναλογίες δοκιμών με πρόσμιξη μετακαολίνης και σκόνης περιστροφικών καμίνων. ....	55
Πίνακας 4.5 Τιμές πρώτων δοκιμών από τα δοκίμια G_S-10-K, G_S_A-1-K1 και G_S_A-2.2-6F. ....	66
Πίνακας 4.6 Αναλογίες δοκιμών G_S-10-K, G_S_A-1-K1 και G_S_A-2.2-6F. ....	66





Σχήμα 1.1 Υφάσματα ενισχύσεων α) άνθρακα (grc.sika.com )β) γυαλιού (hlinsectscreen.com). .....	14
Σχήμα 1.2 Ινόπλεγμα (α) δυο διευθύνσεων, (β) τεσσάρων διευθύνσεων, (γ) τριών διαστάσεων.....	14
Σχήμα 2.1 Απλοποιημένο διάγραμμα της διαδικασίας παραγωγής τσιμέντου. Οι κόκκινοι κύκλοι υποδεικνύουν το ποσοστό των εκπομπών CO2 που σχετίζονται με την παρασκευή. (Maddalena et. al. 2018). ....	18
Σχήμα 2.2 Τρόποι αστοχίας, Koutas & Parakonstantinou (2021).....	21
Σχήμα 2.3 Επιρροή τύπου κονιάματος στην καμπτική ικανότητα, Koutas & Parakonstantinou (2021). ....	22
Σχήμα 2.4 Επιρροή τύπου κονιάματος στην καμπτική δυσκαμψία, Koutas & Parakonstantinou (2021). ....	23
Σχήμα 2.5 Διάγραμμα που φανερώνει την αύξηση των μελετών πάνω στα γεωπολυμερή ( <a href="https://www.sciencedirect.com/">https://www.sciencedirect.com/</a> ).....	24
Σχήμα 2.6 Αντοχή σε θλίψη συναρτήσει του χρόνου σε διάφορες θερμοκρασίες, 7 ημέρες μετά τη σύνθεση των γεωπολυμερών (Swanepoel and Strydom, 2002). ....	26
Σχήμα 2.7 Αντοχή σε θλίψη συναρτήσει του χρόνου σε διάφορες θερμοκρασίες, 28 ημέρες μετά τη σύνθεση των γεωπολυμερών (Swanepoel and Strydom, 2002). ....	26
Σχήμα 2.8 Τομή υφικαμίνου που δείχνει την εξαγωγή της ρευστής σκωρίας και του ρευστού σίδηρου ( <a href="http://www.orgkta.gr">www.orgkta.gr</a> ).....	29
Σχήμα 2.9 Θλιπτική αντοχή κονιαμάτων (α) Na2O 4%, (β) Na2O 6% (Chi & Huang 2013).....	31
Σχήμα 2.10 Εφελκυστική αντοχή κονιαμάτων (α) Na2O 4%, (β) Na2O 6% (Chi & Huang 2013) .....	31
Σχήμα 2.11 Εφελκυστική αντοχή δοκιμίων (Sitarz et al. 2020).....	32
Σχήμα 2.12 Θλιπτική αντοχή δοκιμίων (Sitarz et al. 2020). ....	32
Σχήμα 2.13 Θλιπτικές αντοχές κονιαμάτων (Shang et al., 2018). ....	34
Σχήμα 3.1 α) Φωτογραφία SEM που παρουσιάζει την μικροδομή της μετακαολίνης, (Végere et. al., 2019) β) Πούδρα μετακαολίνης. ....	37
Σχήμα 3.2 Πούδρα σκόνης περιστροφικών καμίνων.....	38
Σχήμα 3.3 Εφαρμογή κονιάματος μαζί με ινόπλεγμα πάνω σε μια επιφάνεια σκυροδέματος (ΚΑΡΑΜΠΕΛΑ Χ. 2021) .....	39
Σχήμα 3.4 Δοκιμή κάμψης τριών σημείων (α) πριν την επιβολή φορτίου, (β) μετα την αστοχία. .....	40
Σχήμα 3.5 Δοκιμή θλίψης.....	40

Σχήμα 4.1 Κάμψη τριών σημείων.....	42
Σχήμα 4.2 ΔΟΚΙΜΙΟ BL_S-3-K1.....	43
Σχήμα 4.3 Βαθμολογία εργασιμότητας των δοκιμών.....	44
Σχήμα 4.4 Εφελκυστική αντοχή δοκιμών.....	45
Σχήμα 4.5 Θλιπτική αντοχή δοκιμών. ....	46
Σχήμα 4.6 Δοκίμιο G_S-1.....	46
Σχήμα 4.7 Δοκίμιο G_S-2.....	47
Σχήμα 4.8 Δοκίμιο G_S-3.....	47
Σχήμα 4.9 Δοκίμιο G_S-5.....	47
Σχήμα 4.10 Εργασιμότητα δοκιμών που περιέχουν ίνες ενίσχυσης σε σύγκριση με το G_S-5. .....	48
Σχήμα 4.11 Εφελκυστικές αντοχές δοκιμών που περιέχουν ίνες ενίσχυσης σε σύγκριση με το G_S-5. ....	49
Σχήμα 4.12 Θλιπτικές αντοχές δοκιμών που περιέχουν ίνες ενίσχυσης σε σύγκριση με το G_S- 5.....	49
Σχήμα 4.13 Δοκίμιο G_S-6-6F.....	50
Σχήμα 4.14 Δοκίμιο G_S-4-6F.....	50
Σχήμα 4.15 Εργασιμότητα δοκιμών που περιέχουν ΚΟΗ σε σύγκριση με το G_S-4-6F.....	51
Σχήμα 4.16 Εφελκυστικές αντοχές δοκιμών που περιέχουν ΚΟΗ σε σύγκριση με το G_S-4-6F. .....	52
Σχήμα 4.17 Θλιπτικές αντοχές δοκιμών που περιέχουν ΚΟΗ σε σύγκριση με το G_S-4-6F..	53
Σχήμα 4.18 Δοκίμιο G_S-4-K1 .....	54
Σχήμα 4.19 Δοκίμιο G_S-4-K2 .....	54
Σχήμα 4.20 Δοκίμιο G_S-4-K3 .....	54
Σχήμα 4.21 Εργασιμότητα δοκιμών. ....	56
Σχήμα 4.22 Εφελκυστική αντοχή δοκιμών.....	56
Σχήμα 4.23 Θλιπτικές αντοχές δοκιμών.....	57
Σχήμα 4.24 Δοκίμιο G_S_A-1. ....	58
Σχήμα 4.25 Δοκίμιο G_S_A-3.2. ....	58
Σχήμα 4.26 Δοκίμιο G_S_A-4. ....	58
Σχήμα 4.27 Δοκίμιο G_S_A-5.1. ....	58
Σχήμα 4.28 Εργασιμότητα δοκιμών που περιέχουν ίνες ενίσχυσης. ....	59
Σχήμα 4.29 Εφελκυστικές αντοχές δοκιμών που περιέχουν ίνες ενίσχυσης. ....	60
Σχήμα 4.30 Θλιπτικές αντοχές δοκιμών που περιέχουν ίνες ενίσχυσης. ....	60

Σχήμα 4.31 Εργασιμότητα δοκιμών που περιέχουν ΚΟΗ σε σύγκριση με το G_S_A-11-6F..	61
Σχήμα 4.32 Εφελκυστική αντοχή δοκιμών που περιέχουν ΚΟΗ σε σύγκριση με το G_S_A-11-6F. ....	62
Σχήμα 4.33 Θλιπτικές αντοχές δοκιμών που περιέχουν ΚΟΗ σε σύγκριση με το G_S_A-11-6F. ....	62
Σχήμα 4.34 Δοκίμιο G_S_A-1-K2. ....	63
Σχήμα 4.35 Δοκίμιο G_S_A-1-K3. ....	63
Σχήμα 4.36 Εφελκυστικές αντοχές δοκιμών με διαφορετικούς τρόπους ξήρανσης. ....	64
Σχήμα 4.37 Θλιπτικές αντοχές δοκιμών με διαφορετικούς τρόπους ξήρανσης. ....	65
Σχήμα 4.38 Σύγκριση Εφελκυστικών αντοχών μεταξύ των τιμών από τις πρώτες δοκιμές και των τιμών από τα σετ. ....	67
Σχήμα 4.39 Σύγκριση θλιπτικών αντοχών μεταξύ των τιμών από τις πρώτες δοκιμές και των τιμών από τα σετ. ....	68

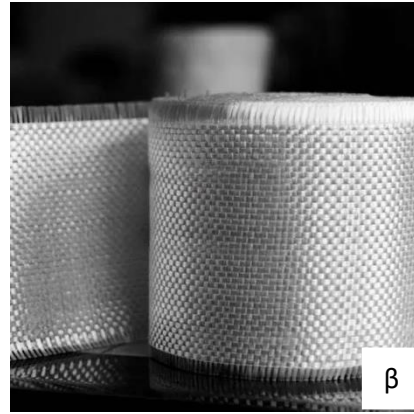
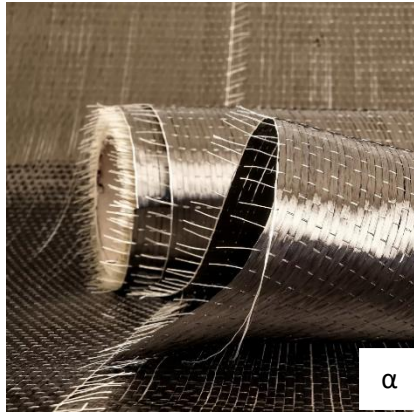


## 1.1 Εισαγωγή

Η ενίσχυση των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι τις τελευταίες δεκαετίες στις εργασίες του πολιτικού μηχανικού. Πιο συγκεκριμένα με την πάροδο του χρόνου η κατασκευές υπόκεινται σε φυσικές φθορές. Συμπληρωματικά εξαιτίας του ανεπαρκή σχεδιασμού σε παλιότερα χρόνια σε συνδυασμό με ελλείψεις κανονισμούς και τεχνολογία καθιστά πολλές υπάρχων κατασκευές ευαίσθητες σε φαινόμενα όπως ο σεισμός με κίνδυνο ανθρώπινες ζωές. Με δεδομένο τα παραπάνω η ενίσχυση κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος είναι σημαντική και σε ορισμένες περιπτώσεις επιτακτική.

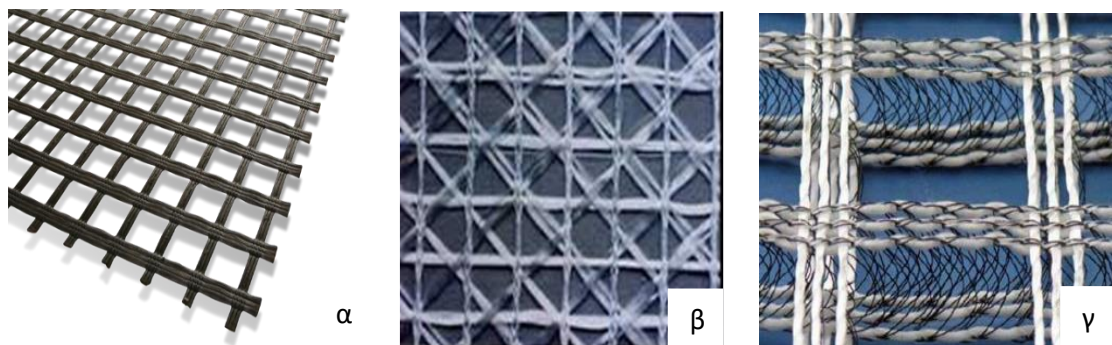
Οι ενισχύσεις ποικίλουν ανάλογα με τις ανάγκες της κατασκευής. Η παρούσα διπλωματική επικεντρώνεται στις ενισχύσεις με χρήση σύνθετων υλικών. Ειδικότερα τα σύνθετα υλικά ονομάζονται τα υλικά τα οποία αποτελούνται από δυο ή παραπάνω μέρη. Αυτή η κατηγορία αποτελείται από τα ινοπλισμένα πολυμερή ΙΟΠ (FRP- Fiber Reinforced Polymers) και τα Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα ΙΑΜ (TRM- Textile Reinforced Mortar).

Το πρώτο από τα δυο σύνθετα υλικά είναι ένας συνδυασμός από συνεχείς ίνες άνθρακα, γυαλιού ή αραμιδίου μαζί με εποξειδική ρητίνη, που είναι ένα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές (οργανικό υλικό) . Οι ίνες πωλούνται κυρίως ως εύκαμπτα υφάσματα και βρίσκονται σε μια ποικιλία συνδυασμό διευθύνσεων ανάλογα με τις ανάγκες της κατασκευής. Τα ΙΟΠ εφαρμόζονται σε διάφορα δομικά στοιχεία όπως δοκούς, υποστυλώματα και τοιχοποιίες. Μερικά από τα βασικά πλεονεκτήματα που τα χαρακτηρίζουν είναι η υψηλή εφελκυστική αντοχή, η ευελιξία και ευκολία εφαρμογής καθώς και το χαμηλό βάρος. Από την άλλη μεριά, υπάρχουν και μειονεκτήματα όπως για παράδειγμα η ευαισθησία σε πυρκαγιές, υπεριώδη ακτινοβολία καθώς και σε αλκαλικό περιβάλλον. Ακόμα το υψηλό κόστος της μήτρας επιφέρει αρνητική αντιμετώπιση. Τέλος η ρητίνη αποτελεί ίσως το μεγαλύτερο ελάττωμα της συγκεκριμένης μορφής ενίσχυσης από μεριάς μηχανικής, διότι έχει χαμηλή ολκιμότητα και ανθεκτικότητα. Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζονται υφάσματα άνθρακα και γυαλιού που υπάρχουν στην αγορά.



Σχήμα 2.1 Υφάσματα ενισχύσεων α) άνθρακα ([grc.sika.com](http://grc.sika.com)) β) γυαλιού ([hlinsectscreen.com](http://hlinsectscreen.com)).

Τα προβλήματα που συναντιόνται στα ΙΟΠ δημιουργούν την ανάγκη αναζήτησης ενός άλλου σύνθετου υλικού το οποίο να μπορεί να καλύψει ένα μεγαλύτερο φάσμα αναγκών με λιγότερα μειονεκτήματα. Για αυτό τον λόγο προτάθηκε ένα νέο σύνθετο υλικό το οποίο είναι τα ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα, IAM. Το υλικό αυτό αποτελείται από δυο άλλα υλικά, τις ίνες πλέγματος (ινοπλεγμα) και ένα κονίαμα τσιμεντοειδούς σύστασης (ανόργανο υλικό). Μερικά από τα πλεονεκτήματα είναι η υψηλή εφελκυστική αντοχή, ανθεκτικότητα σε διάβρωση, ευκολία εφαρμογής σε υγρές επιφάνειες κ.α. Σε σύγκριση με τα ΙΟΠ τα IAM υπερτερούν σε πολλούς τομείς. Για παράδειγμα τα IAM έχουν πιο χαμηλό κόστος, δεν απαιτούν εξειδικευμένο προσωπικό, δεν παρουσιάζουν πρόβλημα σε υψηλές θερμοκρασίες και σε φωτιά, είναι ανθεκτικά σε ακτινοβολίες και είναι πιο φιλικά προς τους εργαζόμενους. Με γνώμονα τα παραπάνω είναι εύκολο να βγει το συμπέρασμα ότι τα IAM είναι πιο υποσχόμενα και αξίζει η μελέτη τους. Στο Σχήμα 1.2 φαίνονται μερικά από τα ινοπλέγματα που χρησιμοποιούνται για ενίσχυσης.



Σχήμα 1.2 Ινοπλέγμα (α) δυο διευθύνσεων, (β) τεσσάρων διευθύνσεων, (γ) τριών διαστάσεων.

Ένα από τα προβλήματα που αντιμετωπίζεται με τα ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας είναι η ανόργανη μήτρα καθ' αυτή. Ειδικότερα, καθώς η συγκεκριμένη κονία είναι τσιμεντοειδή, υπάρχει μια εκτεταμένη ζήτηση για προϊόντα τσιμέντου με αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγής και κατά συνέπεια την δημιουργία αέριων ρύπων και πιο συγκεκριμένα αέρια θερμοκηπίου όπως διοξείδιο του άνθρακα CO<sub>2</sub>. Σε παγκόσμιο επίπεδο, το 8% των συνολικών εκπομπών CO<sub>2</sub> παράγονται από την τσιμεντοβιομηχανία. Πάνω από 3 δισεκατομμύρια τόνοι τσιμεντοκονίας παρασκευάστηκαν το έτος 2012 (Imbabi et. al., 2012) και σύμφωνα με τα στοιχεία του Παγκόσμιου Συμβουλίου Επιχειρήσεων για Βιώσιμη Ανάπτυξη (WBCSD), αναμένεται να φτάσει τους 3,7-4,4 δισεκατομμύρια τόνους έως το 2050. Παράλληλα οι Mahasenah et. al. (2003), αναφέρουν, βάση των στοιχείων της Ευρωπαϊκής Ένωσης Τσιμέντου (Cembureau) και του Διεθνή Οργανισμού Ενέργειας της Αμερικής, ότι ο λόγος συνολικών εκπομπών CO<sub>2</sub> προς την συνολική ζήτηση τσιμέντου σε χώρες της Ε.Ε, ΗΠΑ και Ασίας είναι μεταξύ 0,90 και 0,99 kg CO<sub>2</sub> ανά 1 kg τσιμέντου. Με άλλα λόγια η βιομηχανία εκπέμπει περίπου 900 kg διοξείδιο του άνθρακα για κάθε 1000 kg τσιμέντου. Εξάγεται εύλογα λοιπόν το συμπέρασμα ότι η διαδικασία παρασκευής τσιμέντου, και κατ' επέκταση κονιών με βάση το τσιμέντο, που χρησιμοποιείται δεν είναι φιλική προς το περιβάλλον και σε συνδυασμό με την περιβαλλοντική κρίση που μαστίζει τις τελευταίες δεκαετίες φέρει την ανάγκη για αναζήτηση πιο οικολογικών λύσεων.

Η κυρίαρχη πρόταση για πιο οικολογικές λύσεις που επικρατεί από τους ερευνητές τα τελευταία χρόνια είναι η χρήση γεωπολυμερών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι τα βιομηχανικά παραπροϊόντα όπως η σκωρία η οποία δημιουργείται κατά την παρασκευή μεταλλευμάτων σιδήρου, η ιπτάμενη τέφρα η οποία είναι αποτέλεσμα καύσης λιγνίτη και μια τεχνητή ποζολάνη η μετακολίνη. Έρευνες έχουν δείξει ότι αντικαθιστώντας το τσιμέντο με κονίες γεωπολυμερούς μπορούν να μειωθούν τις εκπομπές ρύπων 9-64% (Turner and Collins, 2013; McLellan et al., 2011).

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η ανάπτυξη κονιαμάτων φιλικών προς το περιβάλλον με σκοπό την ενίσχυση υφιστάμενων κτιρίων. Για αυτό τον σκοπό παρασκευάστηκαν δοκίμια διαστάσεων 160x40x40 mm<sup>3</sup> σε μεταλλικές μήτρες, εκ των οποίων μερικά από αυτά ενισχυθήκαν με ίνες.

Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν και δυο διαφορετικά αλκαλικά διαλύματα ώστε να εξεταστεί αν επηρεάζουν την συμπεριφορά του υλικού. Στην συνέχεια τα δοκίμια αφού πέρασαν περίπου 30 ημέρες υποβλήθηκαν σε δοκιμή κάμψης τριών σημείων και έπειτα σε μονοαξονική θλίψη. Με τα πειραματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν έγινε η σύγκριση με συμβατικά δοκίμια τσιμεντοκονίας αλλά και μεταξύ αυτών. Στόχος είναι να ευρεθεί κάποιο εναλλακτικό δοκίμιο που να έχει παρόμοιες ή ακόμα και καλύτερες ιδιότητες, όπως εργασιμότητα και αντοχή, από τα συμβατικά. Στο τέλος της εργασίας παρουσιάζονται ορισμένες προτάσεις που θα μπορούσαν να αποτελούν αντικείμενο μελέτης στο μέλλον.



## Κεφάλαιο 2

### 2.1 Τσιμέντο

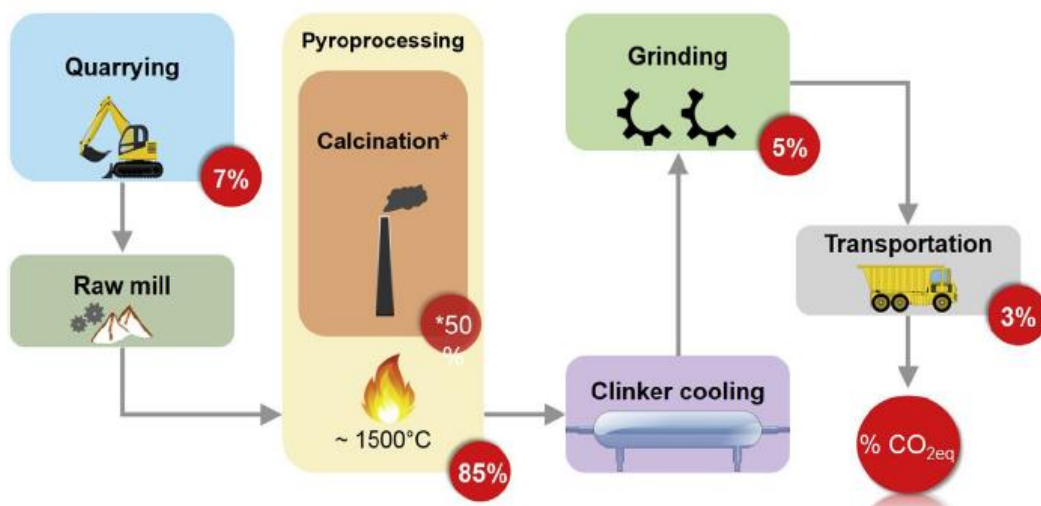
#### 2.1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το τσιμέντο είναι μια ουσία που χρησιμοποιείται ευρέως σε κατασκευαστικά έργα. Είναι ένα ανόργανο υλικό σε μορφή παιπάλης το οποίο αν αναμειχθεί με νερό και λεπτόκοκκη άμμο παράγει τσιμεντοκονίαμα το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τοιχοποιίες ή για ενισχύσεις ως συνδετικό υλικό μεταξύ ενός δομικού στοιχείου με το ινόπλεγμα. Επιπρόσθετα αν αναμειχθεί με άμμο, αδρανή και νερό παράγετε το σκυρόδεμα. Το τσιμέντο μπορεί να ταξινομηθεί ως μη υδραυλικό ή υδραυλικό. Η διαφορά των δύο κατηγοριών είναι ότι η πρώτη δεν πήζει σε υγρές συνθήκες αλλά πήζει όταν αντιδρά με το διοξείδιο του άνθρακα στον αέρα. Αντίθετα το τσιμέντο με υδραυλικές ιδιότητες πήζει λόγω μιας χημικής αντίδρασης μεταξύ των ξηρών στοιχείων και το νερό. Αυτό που χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο είναι το δεύτερο.

#### 2.1.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Η διαδικασία της παραγωγής του τσιμέντου χωρίζεται σε ορισμένα στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι η εξόρυξη πρώτων υλών. Η βασική πρώτη ύλη είναι τα αργιλικά πετρώματα και ο ασβεστόλιθος. Τα υλικά αυτά φορτώνονται σε φορτηγά και στη συνέχεια μεταφέρονται στο εργοστάσιο για σύνθλιψη το οποίο αποτελεί το δεύτερο στάδιο. Σε αυτό το σημείο τα πιο μεγάλα πετρώματα θραύονται σε μικρότερα ώστε να φτάσουν περίπου την διάμετρο των 30mm. Στη συνέχεια στο τρίτο στάδιο αλέθονται τα υλικά και γίνεται μια πρώτη ομογενοποίηση. Με άλλα λόγια υλικά όπως ο θραυσμένος ασβεστόλιθος, αργιλικά πετρώματα, οξείδιο του σιδήρου, οξείδιο του πυριτίου κ.α. αναμειγνύονται σε κατάλληλες αναλογίες. Αφού ολοκληρωθεί και αυτό το στάδιο έχουμε ένα μείγμα από μια λεπτή πούδρα που ονομάζεται φαρίνα. Έπειτα ξεκινάει το τέταρτο στάδιο όπου η φαρίνα ψήνεται περίπου στους 1500 °C και αρχίζει να λιώνει και να παράγει το προϊόν που ονομάζεται κλίνκερ. Τέλος στο πέμπτο στάδιο το κλίνκερ αλέθεται και αναμιγνύεται με κάποια άλλα υλικά όπως ο γύψος για να γίνει το τελικό προϊόν του τσιμέντου.

Αυτή η διαδικασία εκπέμπει μια ορισμένη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα. Από τις συνολικές εκπομπές, περίπου το 7% προέρχεται από τη διαδικασία εξόρυξης, το 85% προέρχεται από το τρίτο και το τέταρτο στάδιο, το 5% προέρχεται από το πέμπτο στάδιο και το υπόλοιπο 3% προέρχεται από τις εμπορικές μεταφορές. Όλα τα παραπάνω φαίνονται σύντομα και στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Απλοποιημένο διάγραμμα της διαδικασίας παραγωγής τσιμέντου. Οι κόκκινοι κύκλοι υποδεικνύουν το ποσοστό των εκπομπών CO<sub>2</sub> που σχετίζονται με την παρασκευή. (Maddalena et. al. 2018).

Συμπερασματικά, οι ανάγκες στον κατασκευαστικό τομέα που απαιτούν τα προϊόντα του τσιμέντου (τσιμεντοκονιάματα, σκυρόδεμα) πρέπει να μειωθούν ή να γίνει αντικατάσταση της πρώτης ύλης ώστε να μειωθούν σημαντικά τα ποσά εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα.

## 2.2 Κονιάματα

### 2.2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Με μια σύντομη ιστορική αναφορά τα κονιάματα προϋπήρχαν χιλιάδες χρόνια πριν. Σύμφωνα με ιστορικές πηγές τα κονιάματα χρησιμοποιήθηκαν ως μονωτικό υλικό και ως εξωτερική επένδυση για πηγάδια, υδραγωγεία καθώς και αρμούς τοιχοποιίας (Μογορούλιου et. al, 2000). Στη νοτιοανατολική Μεσόγειο και ιδιαίτερα στο νησί της Ρόδου, τα κονιάματα αποτελούσαν απαραίτητο υλικό για οικοδομικές και άλλες εργασίες από το 1000 π.Χ. (Efsthadiadis, 1978). Στην συνέχεια οι Ρωμαίοι ανέπτυξαν και δημιούργησαν τα πρώτα κονιάματα με ποζολανικά υλικά, όπως η ηφαιστειακή τέφρα, τα οποία είχαν υδραυλικές ιδιότητες. Αργότερα τον 18ο αιώνα

ανακαλύφθηκε ότι η καύση ασβεστόλιθου που περιέχει άργιλο παρήγαγε ένα υδραυλικό προϊόν κατάλληλο για την παρασκευή κονιάματος. Το 1824 ένας Άγγλος οικοδόμος ονόματι Joseph Aspdin δημιούργησε την πρώτη κονία τύπου Portland η οποία αποτελούνταν από ένα μείγμα ασβεστόλιθου, αργίλου και άλλων ορυκτών σε προσεκτικά ελεγχόμενες αναλογίες, τα οποία περνούσαν από μια διαδικασία θέρμανσης και στην συνέχεια άλεσης σε λεπτά σωματίδια. Σήμερα οι κονίες είναι προαναμεμιγμένες οι οποίες απαιτούν νερό και σε ορισμένες περιπτώσεις άμμο, ανάλογα με το σκοπό και την χρήση για τον οποίο παράγεται το απαιτούμενο κονίαμα όπως για παράδειγμα κατασκευή τοιχοποιίας, ενισχύσεις κατασκευών κ.α.

## **2.2.2 ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΕΝΙΣΧΥΣΕΩΝ**

### *2.2.2.1 Τσιμεντοειδή κονιάματα για ενισχύσεις κατασκευών*

Τα κονιάματα που χρησιμοποιούνται για τις ενισχύσεις με τα ΙΑΜ παίζουν ένα σημαντικό ρόλο καθώς δρουν ως συνδετικό υλικό που μεταφέρει τις ασκούμενες δυνάμεις στα ινοπλέγματα. Ωστόσο, για να επιτευχθεί αυτό, το κονίαμα πρέπει να έχει κάποιες φυσικές ιδιότητες, όπως να μην παρουσιάζει μεγάλη συστολή ξήρανσης με αποτέλεσμα να δημιουργούνται μικρορηγματώσεις, να έχει καλή εργασιμότητα για ευκολότερη εφαρμογή και να μην ρέει (αντίσταση σε διατμητικές δυνάμεις) ώστε να αποφευχθεί η πρώιμη αποκόλληση. Εκτός από τις φυσικές ιδιότητες, πρέπει να τηρούνται και ορισμένες μηχανικές, όπως η αντοχή, ώστε το κονίαμα να μπορεί να δεχθεί τις δυνάμεις χωρίς να αστοχήσει. Το πιο συνηθισμένο κονίαμα που καλύπτει αυτές τις ιδιότητες είναι το κονίαμα τύπου Portland.

Από πειραματικές έρευνες που έχουν γίνει στον τομέα των ενισχύσεων οπλισμένου σκυροδέματος, έχουν μελετηθεί διάφορα μείγματα τσιμεντοκονιαμάτων με μια ποικιλία υλικών και αναλογιών. Οι Escrig et. al. (2015), πραγματοποίησαν μια πειραματική έρευνα σχετικά με την ενίσχυση δοκών οπλισμένου σκυροδέματος με διαφορετικούς τύπους ινοπλέγματος και κονιαμάτων. Πιο συγκεκριμένα, όσον αναφορά τα κονιάματα, έγιναν πειράματα για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής και τις θλιπτικής αντοχής με βάση το πρότυπο EN 1015-11. Επιπλέον, στην έρευνα αναφέρετε ότι η εφελκυστική αντοχή υπολογίστηκε με βάση την αντοχή σε κάμψη. Εξετάστηκαν τέσσερα διαφορετικά τσιμεντοκονιάματα το καθένα με διαφορετικά

χαρακτηρίστηκα. Το πρώτο που αναφέρεται είναι ένα κονίαμα το οποίο αποτελείται από μια προαναμεμειγμένη κονία τσιμέντου υψηλής αντοχής με ίνες γυαλιού και από συνθετικά πολυμερή (PHDM) και σύμφωνα με τους ερευνητές είναι ειδικά σχεδιασμένο για τοιχοποιίες και για επισκευαστικούς λόγους. Το δεύτερο σε σειρά, είναι ένα υδραυλικό κονίαμα (XM750) με υψηλή συγκολλητική ικανότητα, ίνες και ειδικά πρόσθετα. Είναι ένα κονίαμα σχεδιασμένο για εφαρμογή σε επισκευές κατασκευών από σκυρόδεμα. Ακολουθεί, ένα υδραυλικό ποζολανικό κονίαμα (XM25) με πρόσθετα το οποίο είναι ιδανικό για κατασκευές τοιχοποιίας. Τέλος, παρουσιάζεται ένα υδραυλικό κονίαμα τροποποιημένο με πολυμερικές προσθήκες (R3). Στον Πίνακα 2.1 φαίνονται τα αποτελέσματα των δοκιμών.

*Πίνακας 2.1 Μηχανικές ιδιότητες κονιαμάτων Escrig et. al. (2015).*

<b>Mortar</b>	<b>Compression strength (MPa)</b>	<b>Flexural strength (MPa)</b>
PHDM	35.40 (2.53)	8.63 (0.57)
XM750	30.02 (2.21)	10.65 (0.80)
XM25	24.95 (1.64)	7.87 (0.78)
R3	24.65 (1.43)	8.13 (0.99)

Values in brackets indicate coefficient of variance.

Οι ερευνητές παρατήρησαν η ανεπαρκής πρόσφυση μεταξύ του κονιάματος με την επιφάνεια του σκυροδέματος ή/και με το ινόπλεγμα περιορίζει την μηχανική συμπεριφορά της ενίσχυσης με ΙΑΜ, εμποδίζοντας να φτάσει στο μέγιστο των δυνατοτήτων τους.

Μια ακόμα πειραματική έρευνα πραγματοποιήσαν οι Koutas and Parakonstantinou (2021). Πιο συγκεκριμένα, διεξάχθηκε έρευνα για ενίσχυση με ΙΑΜ με επίκεντρο τα κονιάματα ενισχύσεων ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά τους στην καμπτική ενίσχυση δοκών οπλισμένου σκυροδέματος. Στην μελέτη αναφέρονται δύο ειδών κονιάματα με ονομασίες M1 και M2. Και στους δύο τύπους κονιάματος, περιείχαν προαναμεμειγμένη κονία τσιμέντου με ίνες πολυπροπυλενίου με την διαφορά ότι στο M1 οι ίνες είχαν διάμετρο 15 mm ενώ στο M2 ήταν μικροΐνες. Ακόμα μια διαφορά στα δυο κονιάματα έγκειται στα πρόσθετα, δηλαδή στο M1 υπήρχαν συνθετικά πολυμερή ενώ το M2 περιείχε ποζολανικά μέρη. Οι μηχανικές ιδιότητες

προσδιορίστηκαν βάση του προτύπου EN 1015-11 με τα δοκίμια να ήταν διαστάσεων 40 mm × 40 mm × 160 mm. Στον Πίνακα 2.2 φαίνονται οι αντοχές σε θλίψη και εφελκυσμό.

Πίνακας 2.2 Μηχανικές ιδιότητες κονιαμάτων, Koutas & Parakonstantinou (2021).

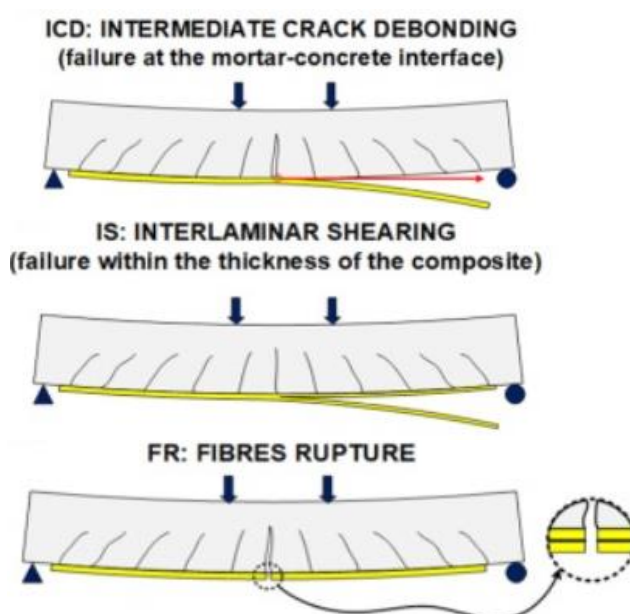
Mechanical property	Mortar M1	Mortar M2
Compressive strength on the day of testing (MPa)*	25.37 (1.07)	20.09 (0.97)
Flexural strength on the day of testing (MPa)*	7.22 (0.26)	5.25 (0.49)

\* Experimentally obtained values (standard deviation values in parenthesis).

Εκτός από τις μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων, στην συγκεκριμένη έρευνα γίνεται λόγος και στην συμπεριφορά αυτών σε σχέση με τις αστοχίες που συνέβησαν κατά το πειραματικό πρόγραμμα. Ειδικότερα, σύμφωνα με τους ερευνητές παρατηρήθηκαν τρεις διαφορετικές αστοχίες εκ των οποίων οι δυο από αυτές οφείλονται στο κονίαμα που χρησιμοποιήθηκε. Αναφορικά, οι τρεις αστοχίες ήταν:

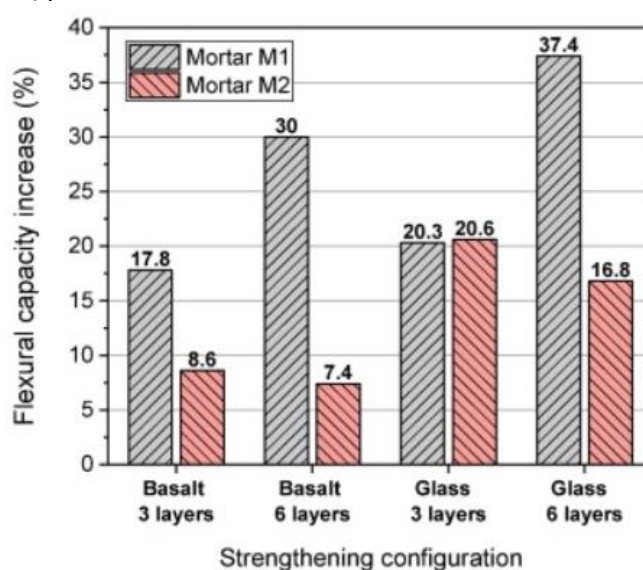
- Αποκόλληση του ΙΑΜ από την επιφάνεια του σκυροδέματος που ξεκινά από ενδιάμεση ρωγμή και εξαπλώνεται προς την στήριξη (ICD: Intermediate Crack Debonding),
- Διατμητική αστοχία εντός του σύνθετου υλικού (IS: Interlaminar Shearing),
- Θραύση ινών (FR: Fibres Rupture).

Στο Σχήμα 2.2 φαίνονται όλες οι αστοχίες σχηματικά.



Σχήμα 2.2 Τρόποι αστοχίας, Koutas & Parakonstantinou (2021).

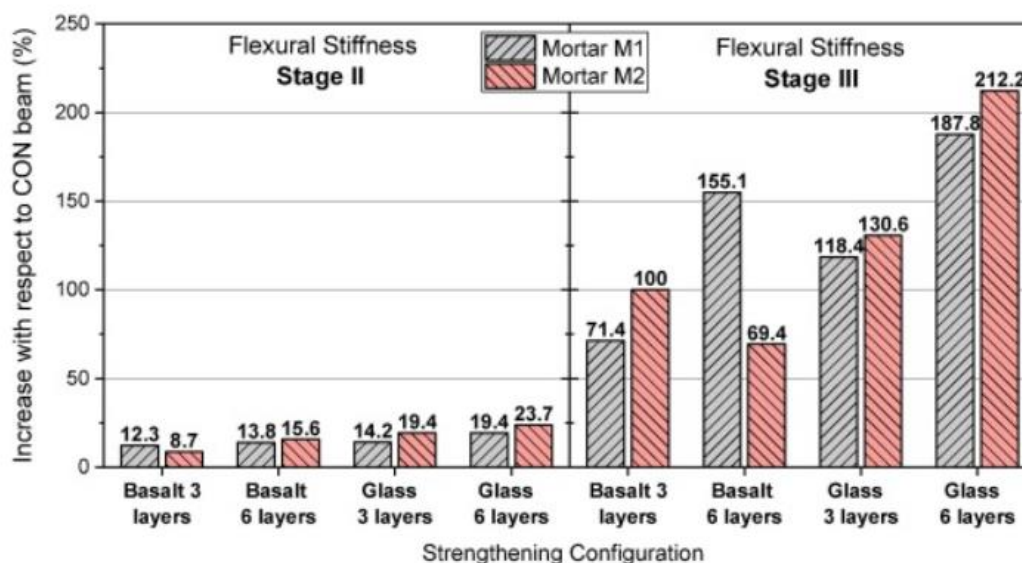
Με το σύνολο των πειραματικών δεδομένων που συγκεντρώθηκαν διαπιστώθηκε ότι το κονίαμα που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση έχει σημαντικό ρόλο. Με άλλα λόγια παρατηρήθηκε ότι η καμπτική ικανότητα του δομικού στοιχείου αυξάνεται όταν υπάρχει ενίσχυση με IAM και η ποσοστιαία αύξηση επηρεάζεται ανάλογα με τον τύπο του κονιάματος (Basalt 3 layers, Basalt 6 layers, Glass 6 layers). Από την άλλη μεριά, επισημάνθηκε ότι αν ο τύπος αστοχίας επέλθει με την θραύση ινών τότε το κονίαμα δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα (Glass 3 layers). Σύμφωνα με το Σχήμα 2.3 το κονίαμα M1 εμφάνισε μεγαλύτερη καμπτική ικανότητα σε σχέση με το M2.



Σχήμα 2.3 Επιρροή τύπου κονιάματος στην καμπτική ικανότητα, Koutas & Parakonstantinou (2021).

Ακόμα μια παράμετρος που μελετήθηκε στην εν λόγω έρευνα ήταν η συνεισφορά των IAM και κατ' επέκταση των κονιαμάτων στη καμπτική δυσκαμψία. Ειδικότερα, αυτό το σημείο χωρίζεται σε τρία στάδια με το πρώτο να είναι όταν το στοιχείο δεν έχει εμφανίσει ρηγματώσεις (Stage I), το δεύτερο να είναι όταν σχηματίζονται ρηγματώσεις έως την διαρροή του χάλυβα (Stage II) και το τρίτο στάδιο είναι μετά την διαρροή μέχρι την αστοχία (Stage III). Το πρώτο στάδιο, σύμφωνα με τους ερευνητές, εξαιρέθηκε, διότι οι μετρήσεις ήταν αρκετά ευαίσθητες με αποτέλεσμα τυχόν διαφορές ενδέχεται να εμπίπτουν στο στατιστικό σφάλμα. Στο δεύτερο στάδιο παρατηρήθηκε η επίδραση των διαφορετικών τύπων κονιαμάτων δεν επέφερε μεγάλες αλλαγές. Αντίθετα, στο τρίτο στάδιο το κονίαμα M2 εμφάνισε καλύτερα χαρακτηριστικά σε σχέση με την δυσκαμψία σε αντίθεση με το M1 κάτι το

οποίο μπορεί να οφείλεται στην πλαστική συμπεριφορά λόγω των συνθετικών πολυμερών που χρησιμοποιήθηκαν. Στο Σχήμα 2.4 φαίνονται σχηματικά τα αποτελέσματα.



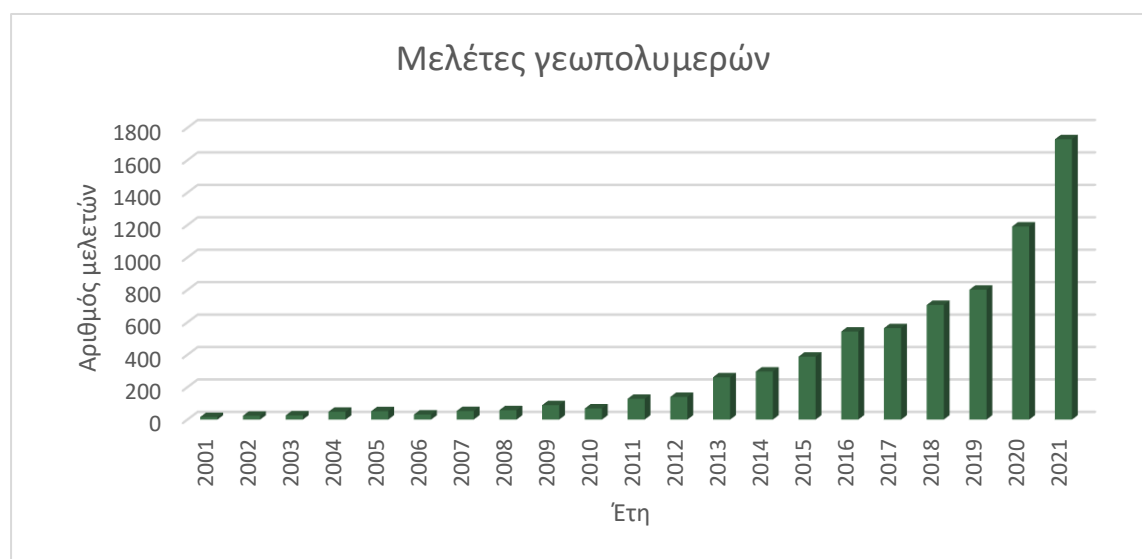
Σχήμα 2.4 Επιρροή τύπου κονιάματος στην καμπτική δυσκαμψία, Koutas & Parakonstantinou (2021).

Άλλες έρευνες, όπως των Tetta et al. (2015) και Raouf et al. (2016) αναφέρουν τα παρόμοια αποτελέσματα με τα παραπάνω. Με άλλα λόγια, και στις δυο έρευνες παρατηρούνται υψηλές εφελκυστικές και θλιπτικές αντοχές της τάξης των 8-9 Μρα και 26-38 Μρα αντίστοιχα. Επιπλέον, όπως και στις έρευνες των Escrig et al. (2015) και Koutas & Parakonstantinou (2021), έτσι και εδώ οι δύο ομάδες παρατήρησαν αστοχίες που οφείλονται στην αποκόλληση την διεπιφάνεια μεταξύ κονιάματος με σκυροδέματος είτε κονιάματος με ινόπλεγμα.

### 2.2.3 ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΗ

Τα πολυμερή έχουν αποτελέσει αντικείμενο μελέτης ανά τα χρόνια, αλλά ιδιαίτερα τις τελευταίες δυο δεκαετίες παρατηρείται μια αύξηση στο ενδιαφέρον των μελετητών όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Τα ανόργανα πολυμερή που είναι προϊόντα γεωχημείας ή γεωσύνθεσης, η οποία ορίζεται ως η διαδικασία κατασκευής τεχνητού πετρώματος σε θερμοκρασία μικρότερη από 100 °C με σκοπό την απόκτηση ιδιαίτερων χαρακτηριστικών, όπως σκληρότητα, θερμική σταθερότητα και μεγάλη διάρκεια ζωής, ονομάζονται γεωπολυμερή (Davidovits, 1999). Ακόμα, μια ακόμα

διεργασία που παρουσιάζει ομοιότητες με την γεωσύνθεση είναι ο γεωπολυμερισμός (Davidovits, 1999). Ο γεωπολυμερισμός βασίζεται στην χημική αντίδραση που συμβαίνει μεταξύ αργιλοπυριτικών οξειδίων με αλκαλικές πολυπυριτικές ενώσεις, κάτω από ισχυρές αλκαλικές συνθήκες (Xu & VanDeventer, 2000). Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται πολυμερικοί δεσμοί Si-O-Al. Η διαδικασία του γεωπολυμερισμού εξελίσσεται σε τέσσερα στάδια αλλά επειδή γίνονται ταυτόχρονα είναι δύσκολη η διάκριση τους με αποτέλεσμα να την καθιστά ιδιαίτερα πολύπλοκη.



Σχήμα 2.5 Διάγραμμα που φανερώνει την αύξηση των μελετών πάνω στα γεωπολυμερή (<https://www.sciencedirect.com/>).

Πολλά βιομηχανικά απόβλητα όπως η σκωρία καμίνου, ιπτάμενη τέφρα, σκόνη περιστροφικών καμίνων ακόμα και υλικά από κατεδαφισμένα κτίρια περιέχουν αργιλοπυριτικά οξείδια με μεγάλες ποσότητες Si και Al τα οποία χρησιμοποιούνται για το σχηματισμό γεωπολυμερών (Van Jaarsveld et al., 1997). Πέρα από τα παραπάνω ένα άλλο παραπροϊόν πλούσιο σε Si και Al ιδανικό για γεωπολυμερικές αντιδράσεις είναι η μετακαολίνη, που προέρχεται από τον καολινίτη.



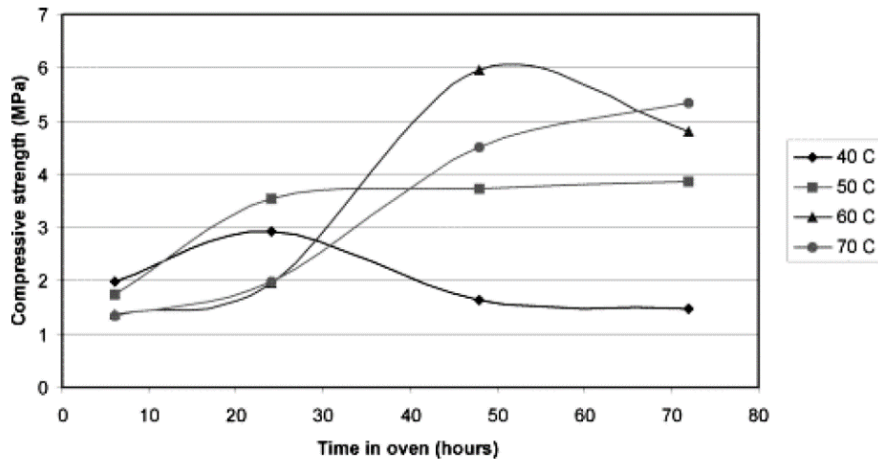
### 2.2.3.1 Ιδιότητες Γεωπολυμερών

Τα γεωπολυμερή έχουν αξιοσημείωτες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες. Μερικές από αυτές τις ιδιότητες είναι οι εξής:

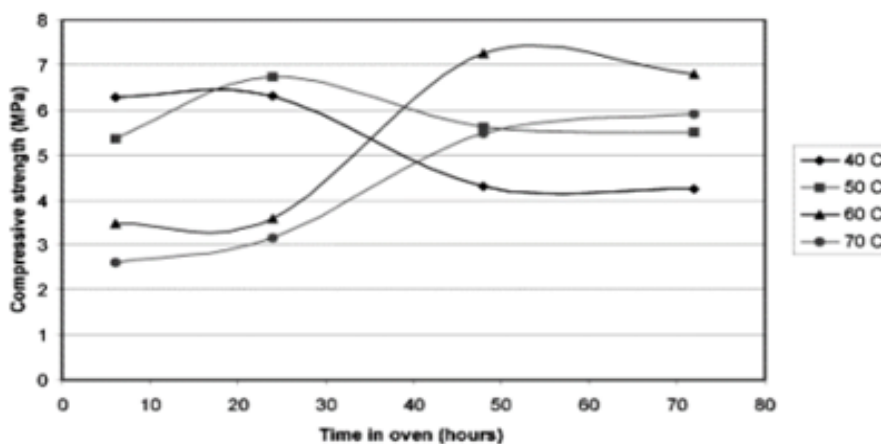
- Η θερμοκρασία που απαιτείται για τη σύνθεση των γεωπολυμερών κυμαίνεται μεταξύ 25 °C και 80 °C με αποτέλεσμα να μην απαιτεί μεγάλες ποσότητες ενέργειας
- Σε θερμοκρασίες μέχρι 800 °C έχει χαμηλή θερμική διαστολή
- Η ανθεκτικότητα σε υδατικό και όξινο περιβάλλον μπορεί να ξεπεράσει την αντίστοιχη του τσιμέντου Portland.
- Παρουσιάζουν σταθερότητα σε διαδοχικούς κύκλους θέρμανσης – ψύξης.
- Αναπτύσσουν υψηλές αντοχές σε εφελκυσμό και θλίψη.
- Παρουσιάζουν χαμηλή υδατοπερατότητα.

Με βάση αυτές τις ιδιότητες, ένα τυπικό πεδίο εφαρμογής για τα γεωπολυμερή είναι το πεδίο των κατασκευών και της παραγωγής δομικών υλικών. Πέρα από τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες, τα γεωπολυμερή συγκριτικά με άλλα αντίστοιχα προϊόντα του εμπορίου εμφανίζουν και άλλα πλεονεκτήματα, όπως χαμηλότερο κόστος και μικρότερη απαίτηση ενέργειας με αποτέλεσμα να αποτελούν επιλογές περισσότερο φιλικά προς το περιβάλλον. Συνεπώς, τα γεωπολυμερή αποτελούν μια πιο βιώσιμη λύση καθώς είναι ένας συνδυασμός χαμηλού κόστους και αξιοποίησης βιομηχανικών αποβλήτων.

Ένα χαρακτηριστικό που χρίζει ιδιαίτερης προσοχής όσο αφορά τα γεωπολυμερή είναι η θερμοκρασία κατά την οποία γίνεται η ξήρανση, καθώς επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις αντοχές τους. Οι Swanepoel and Strydom (2002), παρουσίασαν κάποια αποτελέσματα που φανερώνουν την σύνδεση της αντοχής σε θλίψη με την θερμοκρασία και τον χρόνο. Στα Σχήματα 2.6 και 2.7 φαίνονται τα αποτελέσματα.



Σχήμα 2.6 Αντοχή σε θλίψη συναρτήσει του χρόνου σε διάφορες θερμοκρασίες, 7 ημέρες μετά τη σύνθεση των γεωπολυμερών (Swaneroel and Strydom, 2002).



Σχήμα 2.7 Αντοχή σε θλίψη συναρτήσει του χρόνου σε διάφορες θερμοκρασίες, 28 ημέρες μετά τη σύνθεση των γεωπολυμερών (Swaneroel and Strydom, 2002).

Από τα δεδομένα αυτά και με αναλογίες υλικών γεωπολυμερούς, 60% ιπτάμενη τέφρα, 10% καολινίτης, 5% NaOH, 5% Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> και 20% H<sub>2</sub>O, παρατηρείται ότι, σε θερμοκρασίες μέχρι και 50 °C δεν επηρεάζεται το δείγμα και οι αλλαγές στην αντοχή οφείλονται κυρίως από φυσικά αίτια, όπως ο φυσικός ρυθμός εξάτμισης του νερού. Από την άλλη μεριά για θερμοκρασίες άνω των 60 °C υπάρχει μια αύξηση στην αντοχή το οποίο οφείλεται στην διαδικασία του γεωπολυμερισμού που έγινε με ραγδαίο ρυθμό. Οι Πάνιας et. al. (2005), αναφέρουν ότι οι συνθήκες ωρίμανσης των γεωπολυμερών επηρεάζουν σημαντικά την αντοχή που αναπτύσσουν όπως φαίνεται και στον Σχήμα 2.7. Από τις δυο έρευνες συνάγεται το συμπέρασμα ότι σε γεωπολυμερή ωφελούνται σε υψηλές θερμοκρασίες. Σύμφωνα όμως με τους Altan και Erdogan (2012), υπάρχει μια κρίσιμη θερμοκρασία στους 80 °C που τα γεωπολυμερή

παύουν να αυξάνουν την αντοχής τους. Σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος  $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  δεν επηρεάζονται σημαντικά τα γεωπολυμερή. Αυτό φαίνεται και στο Πίνακα 2.3, καθώς υπάρχει μια τυπική απόκλιση 0,7.

Πίνακας 2.3 Αποτελέσματα μονοαξονικής θλίψης σε θερμοκρασίες 60 και 25 βαθμών Πάνιας et. al. (2005).

Γεωπολυμερές	Συνθήκες ωρίμανσης		Χρόνος σκλήρυνσης	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)
	Θερμοκρασία	Χρόνος		
MEAG2-5A-6H-60°C-7D	60°C	6h	7 days	1,38
MEAG2-5A-24H-60°C-7D	60°C	24h	7 days	8,07
MEAG2-5A-48H-60°C-7D	60°C	48h	7 days	11,29
MEAG2-5A-72H-60°C-7D	60°C	72h	7 days	15,90
MEAG2-5A-6H-25°C-7D	25°C	6h	7 days	-
MEAG2-5A-24H-25°C-7D	25°C	24h	7 days	1,83
MEAG2-5A-48H-25°C-7D	25°C	48h	7 days	1,04
MEAG2-5A-72H-25°C-7D	25°C	72h	7 days	1,56

### 2.2.3.2 Γεωπολυμερή από βιομηχανικά παραπροϊόντα

#### 2.2.3.2.1 Γενικά

Εκτός από το επιθυμητό προϊόν, οι βιομηχανικές διεργασίες παράγουν και υποπροϊόντα ή αλλιώς παραπροϊόντα. Με άλλα λόγια παράγονται πολλά απόβλητα και υπολείμματα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν κύρια υλικά για άλλες κατεργασίες. Παλαιότερα η Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε) δεν αναγνώριζε αυτά τα υλικά σαν παραπροϊόντα αλλά παρά μόνο σαν απόβλητα. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια έχει υιοθετήσει τον όρο «βιομηχανικά παραπροϊόντα» και έχει συμπεριλάβει τα γενικά κριτήρια End of Waste (EoW), τα οποία ορίζουν πότε ένα υπόλειμμα παύει να είναι απόβλητο και μετατρέπεται σε προϊόν. Μερικά παραδείγματα από τα παραπροϊόντα είναι η ιπτάμενη τέφρα, σκωρία καμίνου κ.α.

#### 2.2.3.2.2 Ιπτάμενη τέφρα

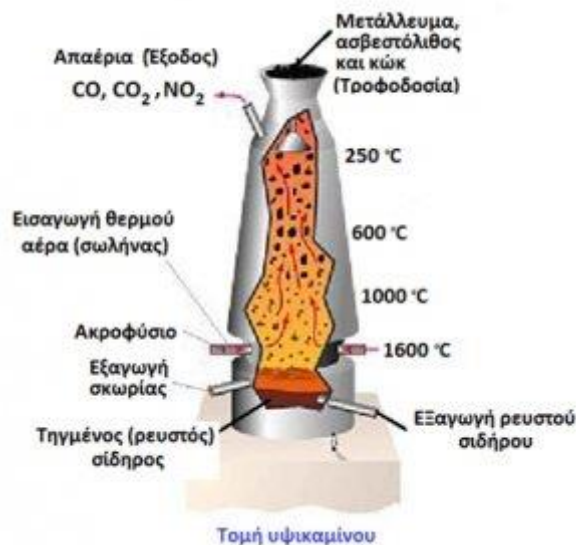
Η ιπτάμενη τέφρα (fly ash) είναι προϊόν καύσης λιγνίτη από σταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας. Η συγκομιδή γίνεται με ηλεκτροστατική ή μηχανική κατακρήμνιση των αιωρούμενων σωματιδίων. Με άλλα λόγια τοποθετούνται κάποια

ειδικά φίλτρα στους καπναγωγούς και γίνεται η περισυλλογή τους. Εκτός όμως από την ιπτάμενη τέφρα παράγονται ακόμα δυο ειδών τέφρας η καταπίπτουσα (bottom ash) και η διαφεύγουσα τέφρα (uncaptured particles) (Page et al. 1979). Η τέφρα όμως που ρυπαίνει την ατμόσφαιρα είναι η ιπτάμενη τέφρα η οποία αποτελεί το 95% κ.β της συνολικής παραγωγής (Παπαγιάννη και Παπαδοπούλου 1981). Η ιπτάμενη τέφρα χωρίζεται σε δυο κατηγορίες, την πυριτική και την ασβεστούχος ιπτάμενη τέφρα οι οποίες έχουν ποζολανικές ιδιότητες και αποτελείται κυρίως από οξειδία του σιδήρου, αργιλίου και πυριτίου. Επιπρόσθετα, η μορφή της είναι σφαιρικά σωματίδια λευκού έως γκριζου χρώματος με διάμετρο 0,01 έως 100μm (Adriano et al. 1980, Davison et al. 1974).

Στην Ελλάδα, παράγονται τεράστιες ποσότητες ιπτάμενης τέφρας, περίπου στους 12 εκατομμύρια τόνους, με το μεγαλύτερο ποσοστό να παράγεται από ατμοηλεκτρικούς σταθμούς της ΔΕΗ στις περιοχές της Κοζάνης, Πτολεμαΐδας και Μεγαλόπολης. Από το συνολικό ποσοστό μόνο το 10% αξιοποιείται σε αντίθεση με την Ευρώπης που φτάνει το 18%, κυρίως επειδή η ελληνική ιπτάμενη τέφρα υστερεί σε κάποια χαρακτηριστικά όπως η λεπτότητα και η ανομοιογένεια.

### **2.2.3.2.3 Σκωρίες καμίνων**

Η σκωρία είναι ένα παραπροϊόν το οποίο δημιουργείται όταν το μέταλλευμα σιδήρου λειώνει μαζί με κωκ σε καμίνους. Ειδικότερα, όταν το μείγμα των πρώτων υλών βρίσκεται σε τηγμένη κατάσταση δημιουργούνται δυο υλικά. Το πρώτο εξ αυτών είναι ο ρευστός σίδηρος και το δεύτερο η ρευστή σκωρία καμίνου Σχήμα 2.8. Στην συνέχεια γίνεται ο διαχωρισμός του κύριου προϊόντος από το παραπροϊόν το οποίο είναι ένα μη μεταλλικό προϊόν που αποτελείται από πυριτικές ενώσεις ασβεστίου, ενωμένες με διάφορα οξειδία όπως σιδήρου και αλουμινίου κατά ASTM (American Society for Testing and Material). Μετέπειτα, η σκωρία μπαίνει σε μια διαδικασία ψύξης που ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο γίνεται χωρίζεται σε διάφορες κατηγορίες. Αναφορικά μερικές από αυτές είναι αερόψυκτη σκωρία, κοκκοποιημένη σκωρία κ.α.



Σχήμα 2.8 Τομή υψικαμίνου που δείχνει την εξαγωγή της ρευστής σκωρίας και του ρευστού σιδήρου ([www.orykta.gr](http://www.orykta.gr)).

Οι σκωρίες αποτελούν ένα μεγάλο κομμάτι από το συνολικό ποσοστό τροφοδοσίας με τιμές να φτάνουν μεταξύ 10-15 % με αποτέλεσμα να παράγονται μεγάλες ποσότητες παραπροϊόντος. Στην Ελλάδα ετήσιος συγκεντρώνονται 350 χιλιάδες τόνοι σκωρίας. Επιπλέον, στην χώρα μας χρησιμοποιείται το υλικό αυτό κυρίως σε έργα οδοποιίας, όπως για παράδειγμα για αντιολισθητικούς τάπητες στην Εθνική Οδό Αθηνών – Θεσσαλονίκης το 1980 (Μουρατίδης and Κεχαγιά n.d.).

#### **2.2.3.2.4 Βιβλιογραφικές αναφορές για κονιάματα με χρήση γεωπολυμερών**

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω οι έρευνες και οι μελέτες γύρω από τα γεωπολυμερή έχει μεγάλη απήχηση την τελευταία δεκαετία, με αποτέλεσμα να υπάρχει ένα μεγάλο εύρος στην άντληση πληροφοριών. Μέσα από αυτές τις έρευνες φαίνεται να υπάρχει μια σύγκλιση προς την ανάμειξη παραπάνω από μία κονίες ώστε να δημιουργούνται σύνθετα κονιάματα με καλύτερες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες. Για παράδειγμα οι Zhou et al. (2016) και οι Soutsos et al. (2016) αναφέρουν ότι κονιάματα με βάση την ιπτάμενη τέφρα (ΚΙΠ) χρειάζονται υψηλές θερμοκρασίες και υψηλές συγκεντρώσεις σε αλκαλικό διάλυμα ώστε να αναπτύξουν μεγάλες αντοχές. Σε αντίθεση περίπτωση τα κονιάματα με βάση την σκωρία καμίνου (ΚΣΚ) δεν έχουν σαν βασική προϋπόθεση καμία από τις δυο συνθήκες (Huseien et al, 2016 και

Huseien et al, 2018). Παρ' όλα αυτά τα ΚΣΚ αντιμετωπίζουν άλλα ειδών προβλήματα όπως είναι η μεγαλύτερη συστολή ξήρασης σε σχέση με τα κονιάματα τύπου Portland (Chi & Huang 2013) και ο ταχύς ρυθμός πήξης. Συνεπώς, λόγω αυτών των μειονεκτημάτων που αντιμετωπίζονται και στις δυο περιπτώσεις η επιστημονική κοινότητα στράφηκε στην ανάμειξη των δυο κονιών.

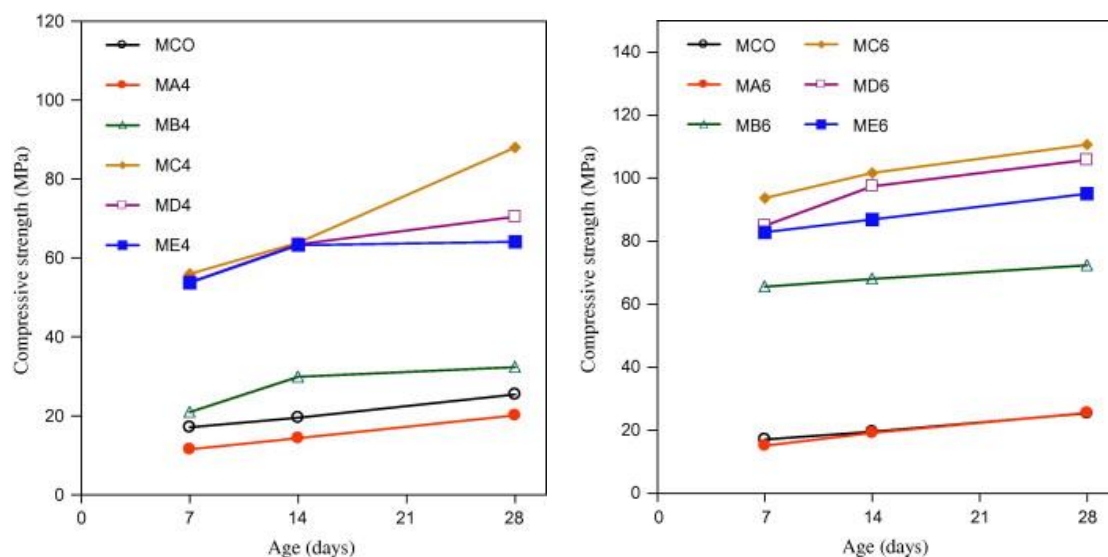
Μια πειραματική έρευνα που πρέπει να αναφερθεί είναι των Chi & Huang (2013) οι οποίοι μελέτησαν τις ιδιότητες κονιαμάτων με βάση την ιπτάμενη τέφρα, την σκωρία αλλά και την μίξη των δυο σε διάφορες αναλογίες. Ειδικότερα, παρασκευάστηκαν δοκίμια «ιπτάμενης τέφρας/σκωρίας» σε αναλογίες 100/0, 70/30, 50/50, 30/70, και 0/100 και με ονομασίες A, B, C, D, και E, αντίστοιχα. Επιπλέον προστέθηκε οξείδιο του νατρίου ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) σε συγκεντρώσεις 4% και 6%. Στον Πίνακα 2.4 φαίνονται ακριβώς οι αναλογίες. Ακόμα παρασκευάστηκε και ένα control κονίαμα με τσιμέντο Portland. Τέλος όλα τα κονιάματα διατηρήθηκαν σε θερμοκρασία 25°C.

Πίνακας 2.4 Αναλογίες κονιαμάτων (Chi & Huang 2013)

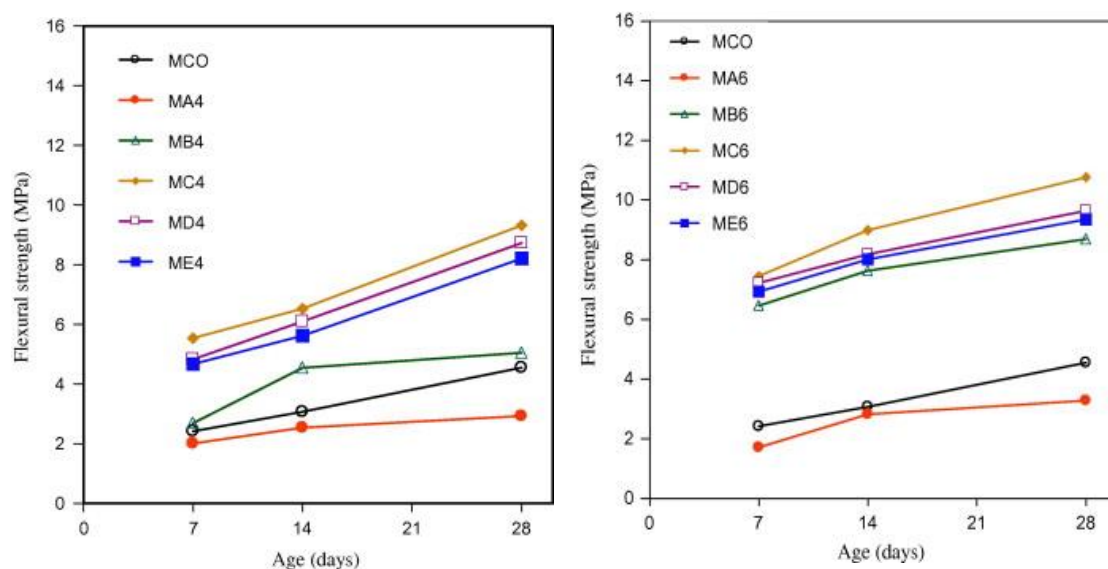
Mix No.	Water ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Cement ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	FA ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	GGBFS ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Fine aggregate ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	NaOH ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
MCO	264	528	–	–	1453	–	–
MA4	178.3	–	528	–	1453	72.3	13.4
MB4	178.3	–	369.6	158.4	1453	72.3	13.4
MC4	178.3	–	264	264	1453	72.3	13.4
MD4	178.3	–	158.4	369.6	1453	72.3	13.4
ME4	178.3	–	–	528	1453	72.3	13.4
MA6	135.4	–	550	–	1453	108.5	20.1
MB6	135.4	–	385	165	1453	108.5	20.1
MC6	135.4	–	275	275	1453	108.5	20.1
MD6	135.4	–	165	385	1453	108.5	20.1
ME6	135.4	–	–	550	1453	108.5	20.1

Με τις αναλογίες του Πίνακα 2.4 παρασκευάστηκαν δοκίμια για δοκιμές θλίψης με βάση το πρότυπο ASTM C109 και με διαστάσεις  $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ . Αντίστοιχα για τις δοκιμές κάμψης τα δοκίμια είχαν διαστάσεις  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$

και έγιναν βάση του προτύπου ASTM C348. Στα Σχήμα 2.9 και 2.10 φαίνονται τα αποτελέσματα.



Σχήμα 2.9 Θλιπτική αντοχή κονιαμάτων (α) Na<sub>2</sub>O 4%, (β) Na<sub>2</sub>O 6% (Chi & Huang 2013)



Σχήμα 2.10 Εφελκυστική αντοχή κονιαμάτων (α) Na<sub>2</sub>O 4%, (β) Na<sub>2</sub>O 6% (Chi & Huang 2013)

Βάση τα αποτελέσματα οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι τα κονιάματα (MA4 και MA6) που περιέχουν μόνο ιπτάμενη τέφρα έχουν τις χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες ακόμα και από τα το τσιμέντο Portland. Επιπλέον, παρατήρησαν ότι η προσθήκη σκωρίας αυξάνει την αντοχή του κονιάματος με την καλύτερη αναλογία ιπτάμενης τέφρας/σκωρίας να είναι 50/50. Επιπρόσθετα, το οξείδιο του νατρίου αυξάνει την απόδοση, καθώς η αντοχή αυξάνεται όταν η συγκέντρωση είναι 6%, όπως φαίνεται στο δείγμα MC6, το οποίο έχει θλιπτική αντοχή 110,6 MPa, ενώ το

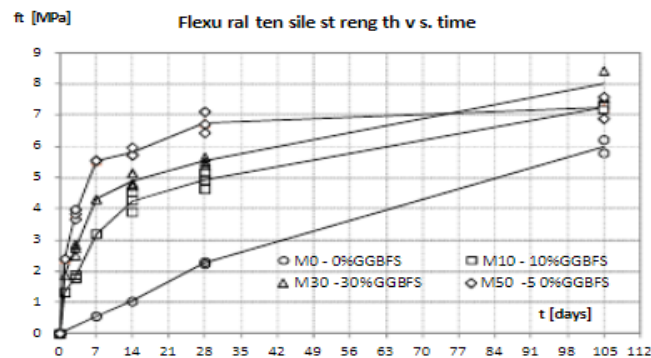
MC4 φτάνει τα 88,0 MPa. Ακόμα, όσο αναφορά τις εφελκυστικές αντοχές τα κονιάματα που περιέχουν 6% Na<sub>2</sub>O παρουσιάζουν μια αύξηση 10-16% σε σχέση με αυτά που έχουν 4% Na<sub>2</sub>O στις 28 μέρες.

Μια ακόμα πειραματική έρευνα που είχε παρόμοια αποτελέσματα με αυτά της προηγούμενης είναι των Sitarz et al. (2020). Πιο συγκεκριμένα, παρασκευαστικά δοκίμια με ιπτάμενη τέφρα και σκωρία καμίνου με αναλογίες που φαίνονται στο Πίνακα 2.5. Τα δοκίμια ήταν διαστάσεων 40 × 40 × 160 mm<sup>3</sup> και η θερμοκρασία ωρίμανσης ήταν στους 18°C±2°C.

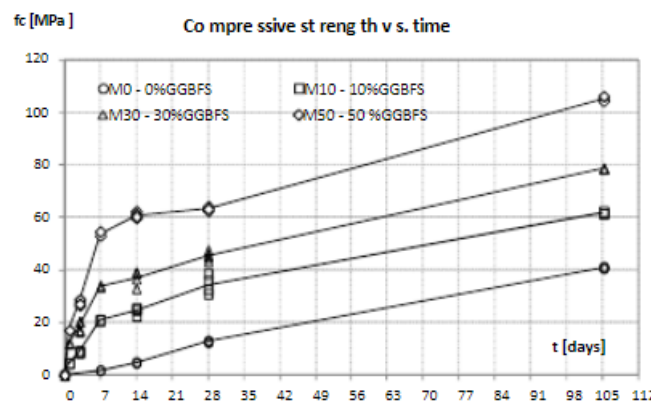
Πίνακας 2.5 Αναλογίες γεωπολυμερών κονιαμάτων (Sitarz et al. 2020).

Components	M0	M10	M30	M50
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]
Alkaline solution	330,7	333.9	340.6	347.5
FA	734,9	667.9	529.8	386.1
GGBFS	0,0	74.2	227.1	386.1
Sand (0/2mm)	1102,42	1113.2	1135.3	1158.3

Οι μετρήσεις της εφελκυστικής και η θλιπτικής αντοχής έλαβαν μέρος σε 1, 3, 7, 14, 28 και 105 ημέρες. Τα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνονται στα Σχήματα 2.11 και 2.12.



Σχήμα 2.11 Εφελκυστική αντοχή δοκιμών (Sitarz et al. 2020).



Σχήμα 2.12 Θλιπτική αντοχή δοκιμών (Sitarz et al. 2020).



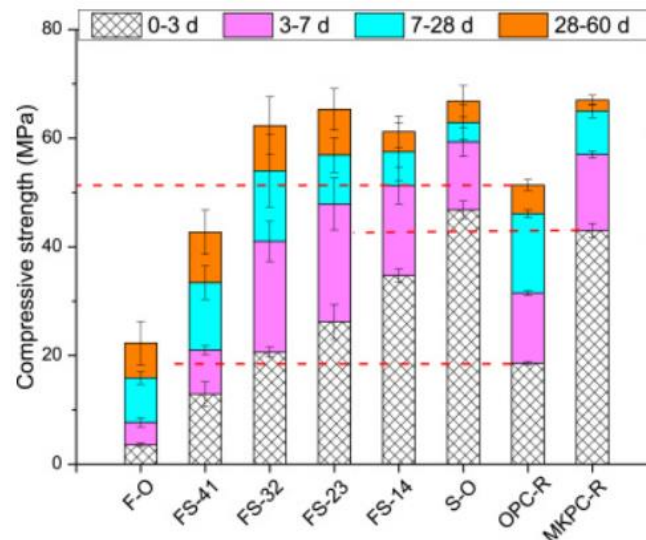
Παρατηρείται ότι και σε αυτή την έρευνα τα κονιάματα που περιέχουν μόνο ιπτάμενη τέφρα παρουσιάζουν τις χαμηλότερες αντοχές σε εφελκυσμό και θλίψη, σε αντίθεση με αυτά που περιέχουν σκωρία καμίνου. Συμπληρωματικά, φαίνεται από τα αποτελέσματα ότι, το κονίαμα με τις υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες είναι το M50 που έχει αναλογία ιπτάμενης τέφρας/σκωρία καμίνου 50/50.

Ένα ακόμα πείραμα διεκπεραιώθηκε από τους Shang et al., 2018. Στο πρόγραμμα παρασκευάστηκαν και σε αυτή την περίπτωση κονιάματα με ιπτάμενη τέφρα και σκωρία καμίνου με τις αναλογίες των υλικών να φαίνονται στο Πίνακα 2.6. Τα δοκίμια ήταν διαστάσεων  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  και η θερμοκρασία ωρίμανσης ήταν στους  $25^\circ\text{C}$ . Αξίζει να σημειωθεί ότι παρασκευάστηκαν και κονιάματα με τσιμέντο Portland (OPC) καθώς και με τσιμέντο με ενώσεις φωσφόρου, μαγνησίου και καλίου (MKPC).

Πίνακας 2.6 Αναλογίες κονιαμάτων (Shang et al., 2018).

Series <sup>a</sup>	Aluminosilicate source (mass ratio)		Alkali-silicate Activator (molar ratio)	Aggregate <sup>b</sup>
	FA	GGBS	Na <sub>2</sub> O:SiO <sub>2</sub> :H <sub>2</sub> O	
F—O	10	0	1:1.2:12	2.5
FS-41	8	2		
FS-32	6	4		
FS-23	4	6		
FS-14	2	8		
S—O	0	10		

Στο Σχήμα 2.13 παρατηρούνται οι θλιπτικές αντοχές των κονιαμάτων βάση των πειραματικών αποτελεσμάτων.



Σχήμα 2.13 Θλιπτικές αντοχές κονιαμάτων (Shang et al., 2018).

Φαίνεται και σε αυτή την περίπτωση ότι τα κονιάματα με υψηλότερα ποσοστά ιπτάμενης τέφρας έχουν χαμηλότερες αντοχές. Από την άλλη μεριά σύμφωνα με τους ερευνητές η αντικατάσταση σκωρίας επιβραδύνει την ανάπτυξη αντοχής μετά από επτά μέρες. Για παράδειγμα το δείγμα S-O μεταξύ του διαστήματος 7-60 μέρες η αύξηση ήταν μόνο 7.5 MPa σε αντίθεση με το FA-41 που στο ίδιο διάστημα ανέπτυξε 21.7 MPa. Ακόμα, αναφέρουν ότι το S-O ξεπερνάει το δοκίμιο MKPC με αποτέλεσμα να δίνει μια πιθανή βιώσιμη εναλλακτική λύση του κονιάματος MKPC.

## Κεφάλαιο 3

### 3.1 Πειραματικό Πρόγραμμα

#### 3.1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το πειραματικό πρόγραμμα εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του πανεπιστημίου Θεσσαλίας του τμήματος των Πολιτικών Μηχανικών. Αρχικά παρασκευάστηκε μια σειρά διαφορετικών κονιαμάτων βάση των οποίων κατασκευάστηκαν δοκίμια με διαστάσεις 40 x 40 x 160 (πλάτος x ύψος x μήκος, mm<sup>3</sup>). Μετά από δοκιμή κάμψης και θλίψης επιλέχθηκαν τα μείγματα που παρουσίασαν την υψηλότερη καμπτική αντοχή, ενώ στη συνέχεια, από αυτά προετοιμάστηκαν ξανά 3 φορές για να ελεγχθεί η συνοχή τους σε αυτές τις δοκιμές. Ο σκοπός είναι να παρατηρηθούν οι ιδιότητες αυτών των υλικών και να συγκριθούν με υλικά τύπου Portland που έχουν ελεγχθεί και πιστοποιηθεί.

#### 3.1.2 ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

Για την κατανόηση και την ομαδοποίηση των κονιαμάτων έγινε, από την αρχή του πειραματικού προγράμματος, μια σύμβαση για το πως θα ονομάζονται τα δοκίμια. Έτσι λοιπόν αποφασίστηκε ότι τα μείγματα θα ονομαστούν με βάση των τύπο A\_K<sub>1</sub>\_K<sub>2</sub>-X-Ψ. Πιο συγκεκριμένα το A αντιστοιχεί στο αλκαλικό διάλυμα, το K<sub>1</sub> και K<sub>2</sub> στην κονία που έχει το μείγμα που σε μερικές περιπτώσεις είναι πάνω από μια, έναν αριθμό X που καθορίζει την αναλογία των αδρανών και τέλος το Ψ υποδηλώνει κάποιο εξτρά υλικό που προστέθηκε στο μείγμα, όπως ίνες ενίσχυσης ή κάποιο οξείδιο. Για παράδειγμα το G\_S-1-6F είναι ένα μείγμα που αποτελείται από ένα αλκαλικό διάλυμα υδρύαλου (G), μια κονία σκωρίας (S), έχει μια μοναδική αναλογία αδρανών 1 και περιέχει ίνες ενίσχυσης 6mm. Παρακάτω φαίνονται στον Πίνακα 2 όλα συγκεντρωμένα. Παρασκευάστηκαν στο σύνολο 50 διαφορετικά δοκίμια αλλά λόγω του ότι τα 14 εξ' αυτών δεν κατάφεραν ποτέ να φτάσουν στις δοκιμές εφελκυσμού και θλίψης κρίθηκε ωφέλιμο να παραληφθούν λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων.

Πίνακας 3.1 Συγκεντρωτικός πίνακας ονομάτων.

BL_S-3-K1	G_S-4-K3	G_S_A-2.2-6F	G_S_A-11
G_S-1	G_S-6	G_S_A-2-Kfl	G_S_A-1-K2-A
G_S-2	G_S-10-K	G_S_A-3.2	G_S_A-1-K2-B
G_S-3	G_S_A-1	G_S_A-4	G_S_A-1-K2-C
G_S-5	G_S_A-1-6F	G_S_A-5.1	G_S_A-1-K2-D
G_S-4-6F	G_S_A-1-K1	G_S_A-5.2	G_S_A-1-K2-E
G_S-4-12F	G_S_A-1-K2	G_S_A-5.2-6F	
G_S-4-Kfl	G_S_A-1-K3	G_S_A-7	
G_S-4-K1	G_S_A-1-12F	G_S_A-8	
G_S-4-K2	G_S_A-2.2	G_S_A-10	
B: Υδρύαλος 1	BL: Υδρύαλος 2	G: Υδρύαλος 3	
F: Ίνες	K: KOH	S: Σκωρία	
		A: Μετακαολίνη	
A-E: Οι διαφορετικοί τρόποι που έγινε η διαδικασία ξήρανσης των δοκιμίων			

### 3.1.3 ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

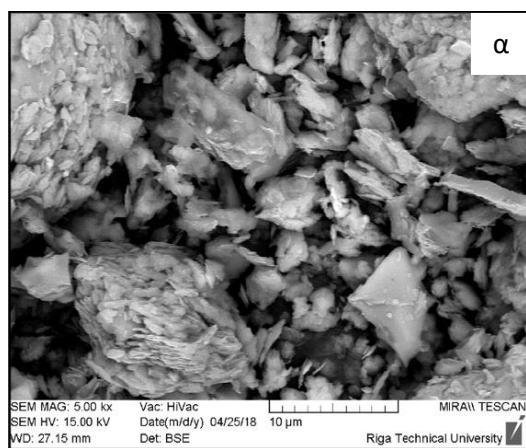
Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των δοκιμίων ήταν:

- Αλκαλικά διαλύματα
- Σκόνη περιστροφικών καμίνων
- Μετακαολίνη
- Νερό
- Αδρανή με διάμετρο 0.5 – 1 mm
- Αδρανή με διάμετρο 0 - 0.5 mm (παιπάλη)
- Ίνες ενίσχυσης
- Υδροξείδιο του καλίου

Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκαν δυο αλκαλικά διαλύματα που περιέχουν οξείδιο του καλίου ( $K_2O$ ), οξείδιο του πυριτίου ( $SiO_2$ ) και νερό σε διαφορετικές αναλογίες. Ο κύριος λόγος για τη χρήση των δύο λύσεων είναι η δυνατότητα επιλογής της συμπεριφοράς του δείγματος βάσει αυτών. Οι ίνες ενίσχυσης είναι ίνες πολυπροπυλενίου, η οποίες είναι ιδανικές για την αντιμετώπιση ρωγμών τόσο από συστολή ξήρανσης όσο και για θερμοκρασιακές μεταβολές. Τέλος οι κονίες για τα δοκίμια ήταν δυο. Η μια εξ αυτών είναι μια μετακαολίνη και η δεύτερη είναι ένα παραπροϊόν παραγωγής σιδηρονικελίου της εταιρίας «ΛΑΡΚΟ».

### 3.1.3.1 Μετακαολίνη

Η μετακαολίνη είναι τεχνητή ποζολάνη που παράγεται προσεκτικά ελεγχόμενες συνθήκες από την έψηση καολίνης σε θερμοκρασίες μεταξύ 650°C και 750°C (Black, 2016). Σε αυτές τις θερμοκρασίες καταστρέφεται η κρυσταλλική δομή του καολινίτη και απομακρύνονται το υδροξείδιο (OH), μετασχηματίζοντας την καολίνη ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) σε μετακαολίνη ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ ). Αυτή η διαδικασία ονομάζεται αφυδροξυλίωση (Dehydroxylation). Οι διάμετρος των κόκκων είναι της τάξης μεταξύ των 2 με 10  $\mu\text{m}$  όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1α και το χρώμα είναι κοντά στο άσπρο. Στο Σχήμα 3.1β φαίνεται η μορφή της μακροσκοπικά. Η χημική ανάλυση της μετακαολίνης που χρησιμοποιήθηκε για το συγκεκριμένο πειραματικό πρόγραμμα είναι 55%  $\text{SiO}_2$ , 40%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  και 5% από διάφορες άλλες ενώσεις.



Σχήμα 3.1 α) Φωτογραφία SEM που παρουσιάζει την μικροδομή της μετακαολίνης, (Veģere et. al., 2019)  
β) Πούδρα μετακαολίνης.

### 3.1.3.2 Σκόνη περιστροφικών καμίνων

Η σκόνη περιστροφικών καμίνων είναι ένα παραπροϊόν της παραγωγής σιδηρονικελίου. Είναι το υπόλειμμα ενός από τα στάδια παραγωγής του σιδηρονικελίου. Πιο συγκεκριμένα, η σκόνη απομακρύνεται από τις περιστροφικές καμίνους αφού ολοκληρωθεί η παραγωγή του κύριου προϊόντος. Αυτό το είδος σκόνης ονομάζεται σκόνη περιστροφικών καμίνων. Είναι ένα ιδιαίτερο υλικό καθώς δεν κατατάσσεται πλήρως στην οικογένεια των σκωριών καμίνου, ούτε της ιπτάμενης τέφρας αλλά θα μπορούσε να θεωρηθεί κάτι ενδιάμεσο από τις δύο κατηγορίες. Η

χημική σύσταση του αποτελείται κυρίως από  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  και άλλες ενώσεις με ποσοστά 31%, 32%, 11% και 26% αντίστοιχα. Η διάμετρος των σωματιδίων του κυμαίνεται από 0.05 mm έως 0.5 mm ενώ το χρώμα του είναι ένα σκούρο καφέ όπως φαίνεται στην Σχήμα 3.2. Η κονία αυτή είναι μια καλή και φιλική προς το περιβάλλον λύση αφενός γιατί δεν απαιτεί πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας για την παρασκευή της, σε αντίθεση με την μετακαολίνη, και αφετέρου επειδή χρησιμοποιείτε ένα υλικό που εάν δεν χρησιμοποιηθεί αλλού καλείται να αποτεθεί σε κάποιο ΧΥΤΑ (Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων) ή κάποιον άλλον σταθμό απορριμμάτων.



Σχήμα 3.2 Πούδρα σκόνης περιστροφικών καμίνων.

#### **3.1.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ**

Η διαδικασία παρασκευής των δοκιμίων ήταν αρκετά απλή. Αρχικά έπρεπε να γίνει η κοκκομετρική διαβάθμιση των ασβεστολιθικών αδρανών με χρήση ειδικής σειράς κοσκίνων. Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν κόκκοι μέγιστης διαμέτρου 1mm. Όλα τα υλικά στη συνέχεια ζυγίζονται με ειδική ζυγαριά ακριβείας πριν από την ανάμειξη. Στην συνέχεια σε έναν αναμεικτήρα προστέθηκαν όλα τα υλικά με μια συγκεκριμένη σειρά για βέλτιστη ομογενοποίηση του μείγματος. Στο πρώτο στάδιο, τα αδρανή αναμειγνύονταν μαζί με την κονία και στην συνέχεια προστίθονταν σταδιακά το αλκαλικό διάλυμα. Στα δείγματα τα οποία περιείχαν ίνες η ανάμειξη τους γινόταν πρώτα με το αλκαλικό διάλυμα και έπειτα με τα στερεά υλικά. Με τον ίδιο τρόπο αναμίχθηκαν τα δείγματα που περιείχαν υδροξείδιο του καλίου. Αφού λοιπόν υπήρχε ένα πλήρως ομοιογενές μείγμα, τοποθετούνταν σε μεταλλικές μήτρες οι οποίες πρώτα είχαν λιπανθεί με λαδί μηχανής ώστε να βοηθηθεί το δοκίμιο να ξεκολλήσει κατά την διαδικασία αφαίρεσης από την μήτρα. Έπειτα με χτυπήματα της μήτρας γινόταν ένας είδος δόνησης ώστε να απελευθερωθεί ο αέρας που είχε

εγκλωβιστεί στο μείγμα. Τέλος, μετά από τουλάχιστον 3 ημέρες, τα δοκίμια αφαιρέθηκαν από την μήτρα και συντηρήθηκαν στο εργαστήριο για περίπου 28 μέρες ώστε να αναπτύξουν την πλήρη αντοχή τους και να δοκιμαστούν σε δοκιμές κάμψης και θλίψης.

### **3.1.5 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ**

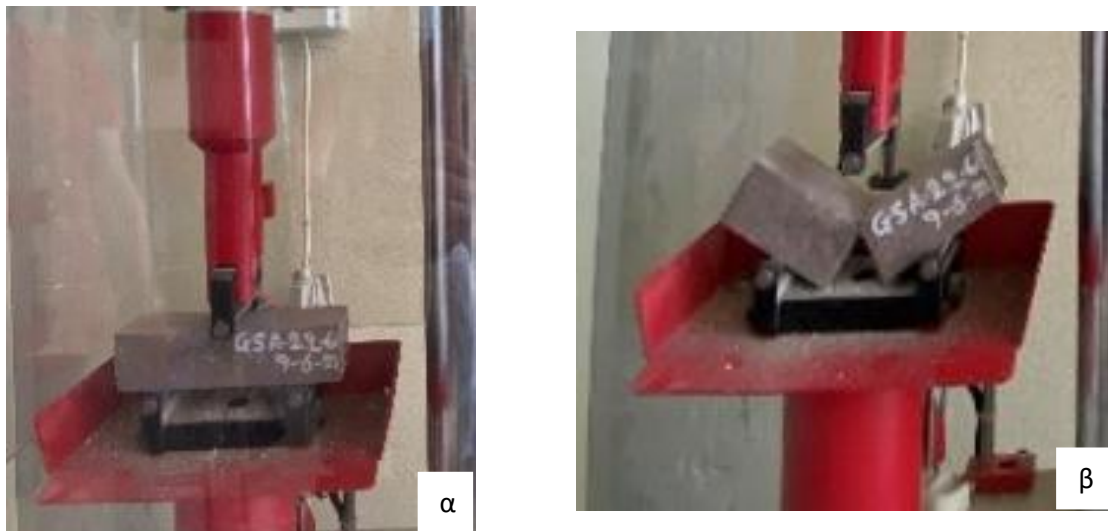
Οι βασικές ιδιότητες που εξέταζε το πειραματικό πρόγραμμα ήταν η εργασιμότητα καθώς και η θλιπτική και η εφελκυστική αντοχή. Η τελευταία προσδιορίστηκε έμμεσα με πειράματα κάμψης τριών σημείων.

Για την πρώτη ιδιότητα ο έλεγχος ήταν απλός καθώς όσο ήταν ακόμα νωπό το μείγμα εφαρμοζόταν σε μια κατακόρυφη λεία επιφάνεια σκυροδέματος μαζί με ένα μικρό κομμάτι ινοπλέγματος διαστάσεων περίπου 7x7 cm όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Με αυτόν τον τρόπο ήταν εύκολο να παρατηρηθεί, πρώτον αν το απλώνεται εύκολα στην επιφάνεια σκυροδέματος και δεύτερον αν το μείγμα ήταν αρκετά πυκνό ώστε να συγκρατήσει το ινόπλεγμα και να παραμείνει στην αρχική θέση εφαρμογής.



*Σχήμα 3.3 Εφαρμογή κονιάματος μαζί με ινόπλεγμα πάνω σε μια επιφάνεια σκυροδέματος (ΚΑΡΑΜΠΕΛΑ Χ. 2021)*

Για τον δεύτερο εργαστήριο έλεγχο τα δοκίμια αφού συντηρήθηκαν στο εργαστήριο για τουλάχιστον 30 μέρες ετοιμάστηκαν και μεταφέρθηκαν στο «Τμήμα ελέγχου υλικών και ποιότητας δημοσίων έργων Θεσσαλίας» για να δοκιμαστεί η αντοχή τους στον εφελκυσμό. Με αυτόν τον τρόπο πραγματοποιήθηκε δοκιμή κάμψης τριών σημείων (Σχήμα 3.4α). Η αστοχίες που παρατηρήθηκαν ήταν καθαρά ψαθυρές με τα δοκίμια να διαχωρίζονται στο μέσο (Σχήμα 3.4β). Στη συνέχεια τα δυο κομμάτια του δοκιμίου που προέκυψαν από το αρχικό μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο του πανεπιστήμιου ώστε να γίνει η δοκιμή σε θλίψη. Με μια ειδική πρέσα (Σχήμα 3.5) επιβλήθηκε σε κάθε κομμάτι φορτίο μονοαξονικής θλίψης ώστε να προσδιοριστεί η θλιπτική αντοχή του κάθε κονιάματος.



Σχήμα 3.4 Δοκιμή κάμψης τριών σημείων (α) πριν την επιβολή φορτίου, (β) μετά την αστοχία.



Σχήμα 3.5 Δοκιμή θλίψης.



## Κεφάλαιο 4

### 4.1 Πειραματικά αποτελέσματα

Στην παρούσα ενότητα θα γίνει αναφορά στα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών, ενώ παράλληλα θα παρατεθούν και κάποια σχόλια για αυτά. Υπενθυμίζεται ότι οι κύριοι στόχοι ήταν η εργασιμότητα του μείγματος και οι αντοχές σε εφελκυσμό (μέσω πειράματος κάμψης) και σε θλίψη. Ακολουθούν οι πίνακες 4.1 και 4.2, οι οποίοι περιέχουν όλα τα φορτία αστοχίας και τις αντοχές εφελκυσμού και θλίψης που υπολογίζονται με βάση τις εξισώσεις 4.1 και 4.2, αντίστοιχα. Στη δοκιμή θλίψης, δεδομένου ότι υπήρχαν δυο παρόμοια δείγματα για τον τελικό υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής λήφθηκε η μέση φόρτιση των δύο. Οι αντοχές υπολογίζονται σε MPa.

Πίνακας 4.1 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων.

A/A	Μέγιστο φορτίο F κάμψης [N]	Εφελκυστική αντοχή (από κάμψη) [MPa]	Μέσο φορτίο F θλίψης [kN]	Μέση θλιπτική αντοχή [MPa]
BL_S-3-K1	1776	4,32	13,5	8,48
G_S-1	1814	4,49	32,5	20,47
G_S-2	1739	4,18	22,6	14,01
G_S-3	1407	3,51	23,8	15,01
G_S-5	1472	3,58	20,2	12,67
G_S-4-6F	2238	5,68	33,0	21,28
G_S-4-12F	1635	4,08	77,1	48,79
G_S-4-Kfl	2007	5,08	29,0	18,67
G_S-4-K1	1751	4,39	23,0	14,84
G_S-4-K2	1629	4,13	27,0	17,38
G_S-4-K3	1436	3,55	18,9	11,87
G_S-6	2132	5,37	29,3	19,06
G_S_A-1	2474	5,81	55,5	34,38
G_S_A-1-K2	2634	6,29	51,3	32,20
G_S_A-1-K3	2579	5,97	54,3	33,14
G_S_A-1-12F	2407	5,81	62,8	39,66
G_S_A-2-2-6F	3447	8,14	115,5	72,24
G_S_A-2-Kfl	2653	6,25	113,0	70,45
G_S_A-3.2	2421	5,74	81,0	50,69
G_S_A-4	1469	3,53	79,0	49,84
G_S_A-5.1	1666	3,97	92,5	58,10
G_S_A-5.2	1504	3,58	89,0	55,63
G_S_A-5.2-6F	1795	4,24	130,0	81,21
G_S_A-7	0,594	0,00144	10,0	6,37
G_S_A-8	2576	6,24	71,5	45,51
G_S_A-10	2993	7,13	86,5	54,61
G_S_A-11	1848	4,36	63,7	39,57
G_S_A-1-K2-A	2193	5,19	40,9	25,39
G_S_A-1-K2-B	2832	6,53	45,8	28,06
G_S_A-1-K2-C	2055	4,84	48,5	30,24
G_S_A-1-K2-D	2005	4,78	51,3	32,07
G_S_A-1-K2-E	1817	4,23	55,0	33,99

Πίνακας 4.2 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων σετ τριών δοκιμών.

A/A	Μήκος L [mm]	Πλάτος B [mm]	Ύψος D [mm]	Μέγιστο Φορτίο F Κάμψης [kN]	Εφελκυστική Αντοχή (από κάμψη) [MPa]	Μέσο Φορτίο F Θλίψης [kN]	Μέση Θλιπτική Αντοχή [MPa]
G_S-10-K	158	41,3	39,2	2187	5,17	24,00	14,53
	158	40,94	39,2	2028	4,84	24,50	14,96
	157	42,19	39,42	1805	4,13	24,50	14,52
Μέσος Όρος					4,71		14,67
Τυπική Απόκλιση					0,43		0,21
G_S_A-1-K1	160	41,52	39,81	3169	7,22	51,90	31,25
	160	41,23	39,92	2944	6,72	39,35	23,86
	159	41,2	39,8	2759	6,34	54,90	33,31
Μέσος Όρος					6,76		29,47
Τυπική Απόκλιση					0,36		4,06
G_S_A-2.2-6f	160	40,73	40,41	2778	6,27	51,90	74,82
	159	40,38	39,85	2617	6,12	39,35	53,34
	159	40,13	39,74	1909	4,52	54,90	76,94
Μέσος Όρος					5,64		68,37
Τυπική Απόκλιση					0,79		10,66

$$\sigma = 1,5 \frac{F \cdot L}{b \cdot d^2} \quad (\text{εξ 4.1})$$

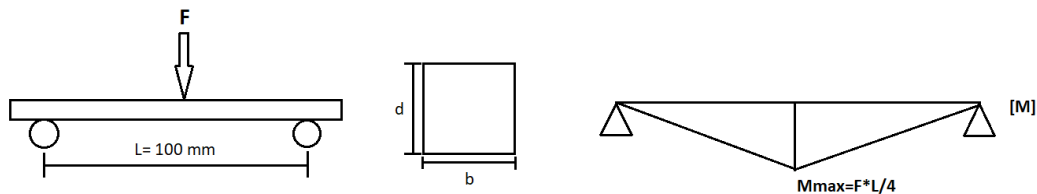
Όπου:

F : Μέγιστο φορτίο F κάμψης [N],

L : Η απόσταση μεταξύ των κυλίνδρων στήριξης [mm], L=100 mm,

b : Το πλάτος του δείγματος [mm],

d : Το ύψος του δείγματος [mm].



Σχήμα 4.1 Κάμψη τριών σημείων.

Ο παραπάνω τύπος είναι επακόλουθο της ροπής δοκού με συγκεντρωμένη δύναμη στο μέσο. Με άλλα λόγια ισχύει η σχέση  $\sigma = \frac{M \cdot y}{I}$ . Για ορθογωνική διατομή

$$I = \frac{b \cdot d^3}{12}, \quad y = \frac{d}{2} \quad \text{και} \quad M = \frac{F \cdot L}{4}. \quad \text{Άρα προκύπτει ότι} \quad \sigma = \frac{3}{2} * \frac{F \cdot L}{b \cdot d^2} = 1,5 * \frac{F \cdot L}{b \cdot d^2}.$$

$$\sigma = \frac{f}{b \cdot d} * 1000 \quad (\text{εξ 4.2})$$

Όπου:

F : Μέσο φορτίο F θλίψης [kN],

b : Το πλάτος του δείγματος [mm],

d : Το ύψος του δείγματος [mm], το οποίο θεωρήθηκε σταθερό στα 40mm.

## 4.2 Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

### 4.2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Για την καλύτερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων πρέπει να παρασταθούν κάποια σχόλια. Αρχικά η κλίμακα της εργασιμότητας βαθμολογήθηκε με τιμές που ξεκινάνε από τον αριθμό 1 και φτάνουν μέχρι τον αριθμό 5. Ειδικότερα, ένα κονίαμα που έχει βαθμολογία «1» σημαίνει ότι δεν είχε την κατάλληλη σύσταση για να απλωθεί ομοιόμορφα και εύκολα πάνω στην επιφάνεια του σκυροδέματος, ενώ από την άλλη μεριά το κονίαμα που φτάνει την βαθμολογία «5» είχε παρόμοια χαρακτηριστικά στην εφαρμογή με αυτά τα κονιάματα εμπορίου. Όλες οι άλλες βαθμολογίες ήταν κάτι ενδιάμεσο από αυτά τα δυο. Τέλος έχει γίνει η ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων για την καλύτερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

### 4.2.2 ΔΟΚΙΜΙΟ BL S-3-K1

Το συγκεκριμένο δοκίμιο είναι το μοναδικό με την χρήση του συγκεκριμένου υδρύαλου (BL). Εμφανίζει θιξοτροπικές ιδιότητες αλλά η εργασιμότητα και η υφή είναι σχεδόν ίδιες με αυτές των κονιαμάτων Portland. Από την άλλη μεριά η αντοχή σε εφελκυσμό μετρήθηκε στα 4.32 MPa ενώ η αντοχή σε θλίψη στα 8.48 MPa. Οι αντοχές αυτές σε συνδυασμό με άλλες αστοχίες άλλων δοκιμίων, όπως για παράδειγμα θραύση κατά την διαδικασία της αφαίρεσης του δοκιμίου από την μήτρα, δεν ήταν καθόλου ενθαρρυντικές, οπότε λήφθηκε η απόφαση να αποκλειστεί η συγκεκριμένη λύση. Τέλος εμφάνισε έντονο το φαινόμενο των πόρων όπως φαίνεται στην Σχήμα 4.2. Αυτό οφείλεται είτε στην κακή δόνηση του μείγματος με αποτέλεσμα να συγκρατήσει αρκετό αέρα μέσα είτε στην επικάλυψη της μεταλλικής μήτρας η οποία σε συνδυασμό με το μείγμα αντέδρασε χημικά προκαλώντας αυτό το φαινόμενο.



Σχήμα 4.2 ΔΟΚΙΜΙΟ BL\_S-3-K1

#### 4.2.3 ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΚΟΝΙΑ ΣΚΟΝΗ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΚΑΜΙΝΩΝ (ΣΠΚ)

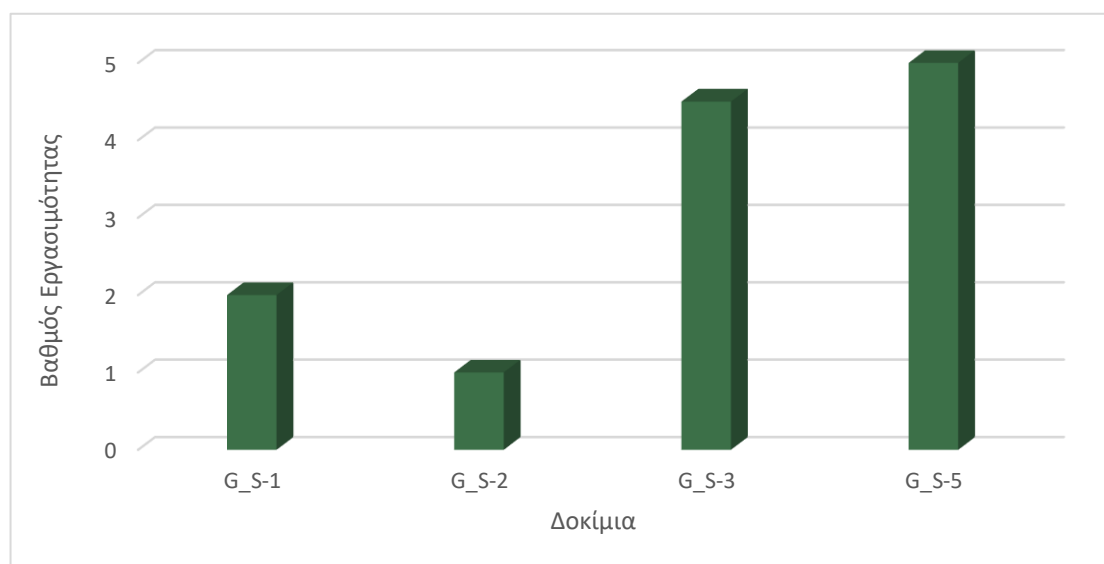
Ακολουθούν οι αναλογίες των μειγμάτων στον Πίνακα 4.3 μαζί με τα διαγράμματα εργασιμότητας και αντοχών θλίψης και εφελκυσμού καθώς και φωτογραφικό υλικό.

Πίνακας 4.3 Αναλογίες κονιαμάτων μόνο με κονία σκόνης περιστροφικών καμίνων.

A/A	Υδράλος	ΣΠΚ	Αδρανή 0.5-1 mm	Αδρανή 0-0.5 mm	Ίνες σε gr	KOH/%wt
G_S-1	1	1	1	1	-	
G_S-2	1	1,25	1	1	-	
G_S-3	1,1	1	1	1,4	-	
G_S-5	1,05	1	1	1,4	-	
G_S-6-6F	1,5	1,25	1	1,4	2,3	
G_S-4-6F	1,05	1	1	1,4	2,3	
G_S-4-12F	1,05	1	1	1,4	2,3	
G_S-4-Kfl	1,17	1	1	1,4	2,3	
G_S-4-K1	0,79	1	1	1,4	2,3	0,26/8% wt
G_S-4-K2	0,79	1	1	1,4	2,3	0,26/15% wt
G_S-4-K3	0,79	1	1	1,4	2,3	0,26/22,5% wt

##### 4.2.3.1 Δοκίμια G\_S-1, G\_S-2, G\_S-3, G\_S-5

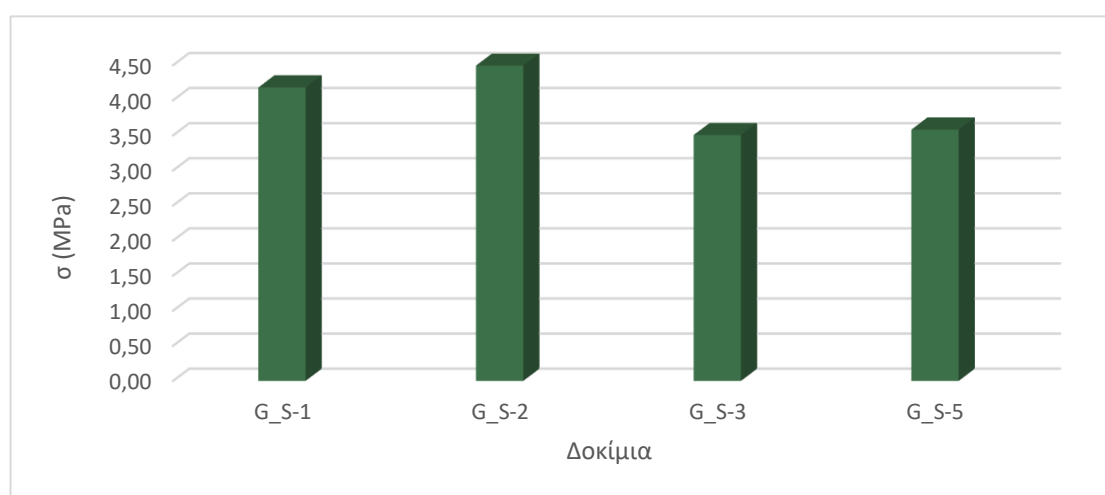
Στο Σχήμα 4.3 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η εργασιμότητα των δοκιμών τα οποία δεν εμπειρεύσαν κανένα άλλο πρόσθετο υλικό, όπως οι ίνες και διάλυμα υδροξειδίου του καλίου.



Σχήμα 4.3 Βαθμολογία εργασιμότητας των δοκιμών.

Το δοκίμιο G\_S-1 θα μπορούσε να αποτελεί το δοκίμιο “Control” με κονία ΣΠΚ λόγω του ότι οι αναλογίες του σε όλα τα υλικά είναι 1:1. Είναι σαφές ότι αν γίνει η σύγκριση μεταξύ του δοκιμίου G\_S-1 και G\_S-2 η εργασιμότητα του υλικού μειώνεται στο μισό. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της ποσότητας της ΣΠΚ κατά 25%. Αντίθετα αν παραμείνει η ποσότητας της ΣΠΚ σταθερή αλλά αυξηθεί ο υδρύαλος η εργασιμότητα του μείγματος αυξάνεται. Χρειάζεται προσοχή όμως η ποσοστιαία αύξηση, η οποία πρέπει να είναι μικρή, ειδάλλως το μείγμα θα γίνει υδαρές με αποτέλεσμα την ροή κατά την εφαρμογή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι τα δοκίμια G\_S-3 και G\_S-5, όπου το πρώτο δείγμα με αύξηση 10% βρίσκεται κάτω από το G\_S-5 με αύξηση 5% λόγω του φαινομένου που αναφέρθηκε.

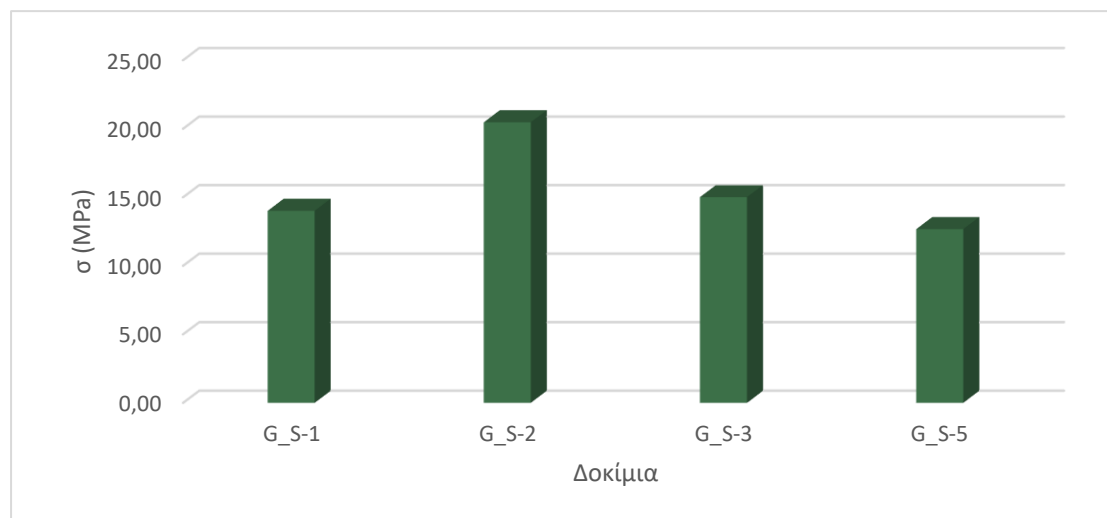
Στην συνέχεια, στο Σχήμα 4.4 φαίνονται οι εφελκυστικές αντοχές των δοκιμίων.



Σχήμα 4.4 Εφελκυστική αντοχή δοκιμίων.

Σε αντίθεση με την εργασιμότητα είναι εμφανές ότι η προσθήκη σκόνης περιστροφικών καμίνων συμβάλει θετικά στην αντοχή των δοκιμίων, όπως φαίνεται από τα G\_S-1 και G\_S-2. Επιπλέον, αντιστρόφως της εργασιμότητας, η αύξηση της ποσότητας υδρύαλου μειώνει την αντοχή των δοκιμίων. Ο λόγος στον οποίο μπορεί να οφείλεται αυτή η μείωση είναι γιατί η αύξηση των υγρών στοιχείων οδηγεί σε μεγαλύτερη συστολή ξήρανσης και δημιουργία μικρορηγματώσεων με συνέπεια την μείωση της αντοχής του δοκιμίου.

Τέλος για την συγκεκριμένη ομάδα δοκιμών, στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται οι θλιπτικές αντοχές.



Σχήμα 4.5 Θλιπτική αντοχή δοκιμών.

Όπως και στις εφελκυστικές αντοχές έτσι και στις θλιπτικές εμφανίζεται μια παρόμοια μορφή στα διαγράμματα. Για παράδειγμα μεταξύ των G\_S-1 και G\_S-2 υπάρχει και εδώ αύξηση αντοχής καθώς και στα G\_S-3 και G\_S-5 υφίστανται μείωση όπως και αντίστοιχα στις εφελκυστικές αντοχές. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι και στην θλιπτική αντοχή τα υλικά επηρεάζουν με τον ίδιο τρόπο. Με άλλα λόγια η ΣΠΚ αυξάνει την αντοχή ενώ ο υδρύαλος την μειώνει.

Γενικά, τα δοκίμια αν συγκριθούν και με τα τσιμεντοκονιάματα υστερούν κυρίως στις αντοχές. Για αυτό τον λόγο, έγιναν κι άλλες δοκιμές με άλλα πρόσθετα υλικά ώστε να βελτιωθούν η μηχανικές ιδιότητες.

Στα Σχήματα 4.6, 4.7, 4.8 και 4.9 φαίνονται τα δοκίμια.



Σχήμα 4.6 Δοκίμιο G\_S-1



Σχήμα 4.7 Δοκίμο G\_S-2



Σχήμα 4.8 Δοκίμο G\_S-3

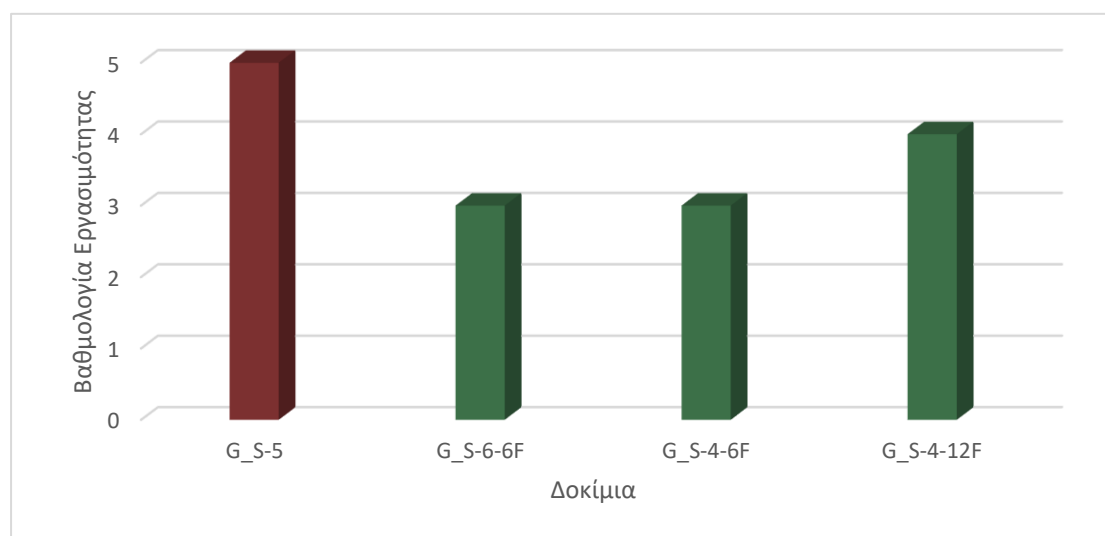


Σχήμα 4.9 Δοκίμο G\_S-5

#### 4.2.3.2 Δοκίμια G\_S-6-6F, G\_S-4-6F, G\_S-4-12F

Στην επόμενη φάση του πειράματος, προστέθηκαν ίνες ενίσχυσης ώστε να αυξηθούν ακόμα περισσότερο οι αντοχές. Επιλέχθηκαν κατά κύριο λόγο οι αναλογίες του δοκιμίου G\_S-5 εξαιτίας της καλύτερης εργασιμότητας.

Στο παρακάτω Σχήμα 4.10, γίνεται η σύγκριση της εργασιμότητας των δοκιμών που περιέχουν ίνες ενίσχυσης μεταξύ αυτών αλλά και με το G\_S-5 που δεν περιέχει ίνες.

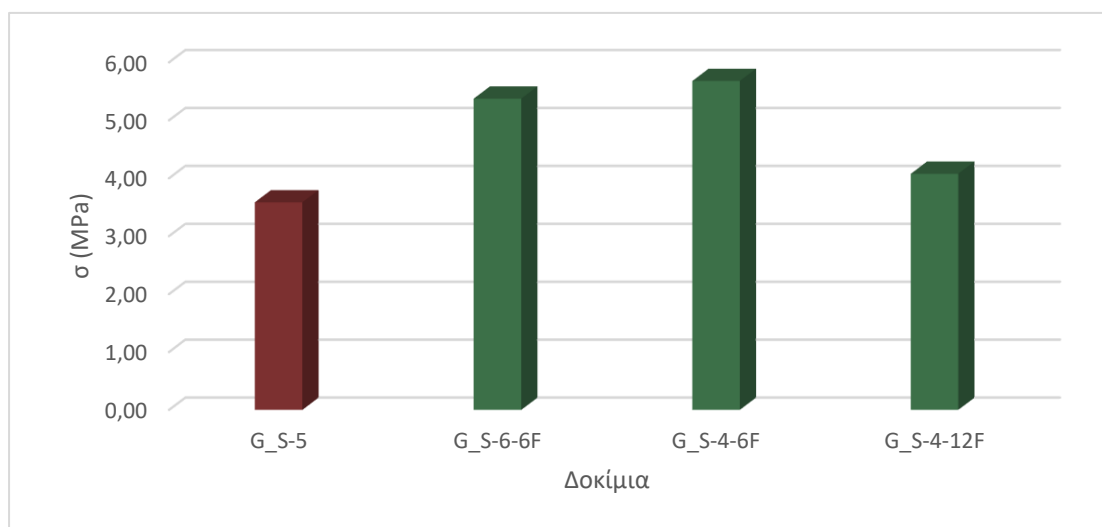


Σχήμα 4.10 Εργασιμότητα δοκιμών που περιέχουν ίνες ενίσχυσης σε σύγκριση με το G\_S-5.

Από το διάγραμμα φαίνεται ότι οι ίνες μειώνουν την εργασιμότητα του μείγματος καθώς το G\_S-5 που δεν περιέχει ίνες εμφανίζει την υψηλότερη βαθμολογία σε σχέση με τα υπόλοιπα που έχουν. Ακόμα οι αναλογίες των G\_S-4-6F και G\_S-4-12F είναι ίδιες με αποτέλεσμα η διαφορά που παρουσιάζουν να οφείλεται καθαρά και μόνο στις διαφορές που έχουν οι ίνες μεταξύ τους. Με άλλα λόγια το G\_S-4-6F έχει ένα μήκος ινών 6 mm ενώ το G\_S-4-12F έχει 12 mm. Άρα, για τα συγκεκριμένα δοκίμια οι μεγαλύτερες σε μήκος ίνες δίνουν ένα πιο εργάσιμο υλικό.



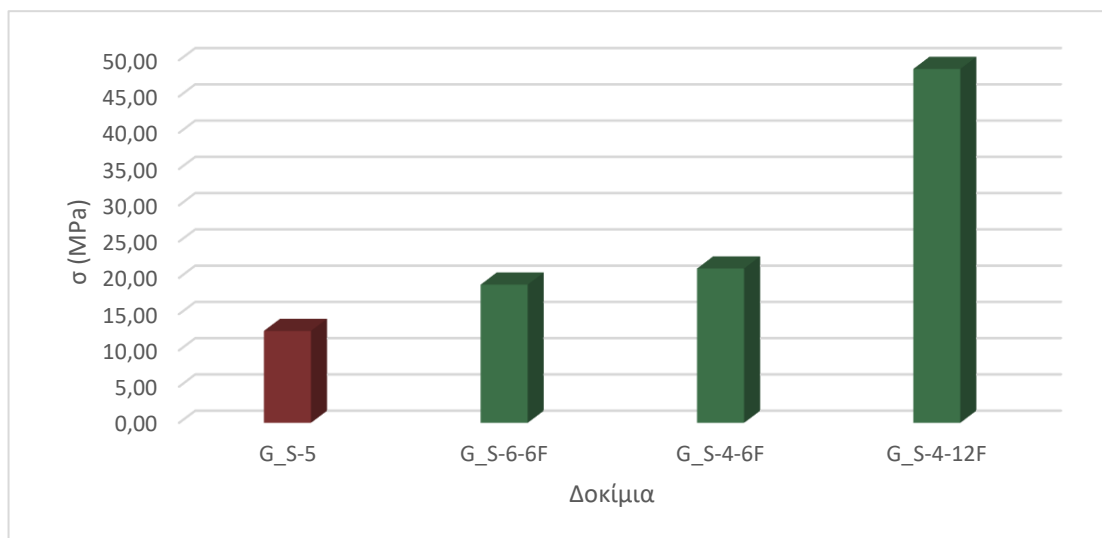
Στο Σχήμα 4.11, φαίνονται οι εφελκυστικές αντοχές των δοκιμών.



Σχήμα 4.11 Εφελκυστικές αντοχές δοκιμών που περιέχουν ίνες ενίσχυσης σε σύγκριση με το G\_S-5.

Είναι φανερό ότι οι ίνες έχουν αυξήσει την εφελκυστική αντοχή των δοκιμών από 50% έως 59% για τα δοκίμια G\_S-6-6F και G\_S-4-6F αντίστοιχα. Από την άλλη μεριά το δοκίμιο G\_S-4-12F έχει μια αύξηση της τάξης του 14%. Πιθανόν η διαφορά αυτή να οφείλεται στην καλύτερη διασπορά των ινών στον όγκο του δοκιμίου όταν οι ίνες είναι πιο κοντές. Στο δοκίμιο που περιέχει τις 12 χιλιοστών ίνες δεν είχε γίνει καλή διασπορά στο εσωτερικό, λόγω του μεγάλου μήκους τους, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν συσσωματώματα. Έτσι λοιπόν, οι ίνες δεν λειτούργησαν στο πλήρες των δυνατοτήτων τους με συνέπεια να μην παραλάβουν στο μέγιστο τις εφελκυστικές δυνάμεις.

Στο Σχήμα 4.12, παρατηρούνται οι θλιπτικές αντοχές των δοκιμών.



Σχήμα 4.12 Θλιπτικές αντοχές δοκιμών που περιέχουν ίνες ενίσχυσης σε σύγκριση με το G\_S-5.

Οι ίνες αυξάνουν και την θλιπτική αντοχή σύμφωνα με τα αποτελέσματα με τον ίδιο τρόπο που αυξάνεται και η εφελκυστική αντοχή. Το δοκίμιο G\_S-4-12F παρουσιάζει μια έντονη διαφορά σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια που έχουν ενισχυθεί με ίνες. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται κάποιου στατιστικού σφάλματος κατά την μέτρηση της θλιπτικής αντοχής.

Συμπεραίνοντας, οι ίνες ενίσχυσης φαίνεται να βοήθησαν στην αύξηση των θλιπτικών και των εφελκυστικών αντοχών, αλλά πάντα σε σχέση με τα τσιμεντοκονιάματα ακόμα δεν έχουν φτάσει τις επιθυμητές αντοχές.

Στα Σχήματα 4.13 και 4.14 φαίνεται φωτογραφικό υλικό των δοκιμών.



Σχήμα 4.13 Δοκίμιο G\_S-6-6F.

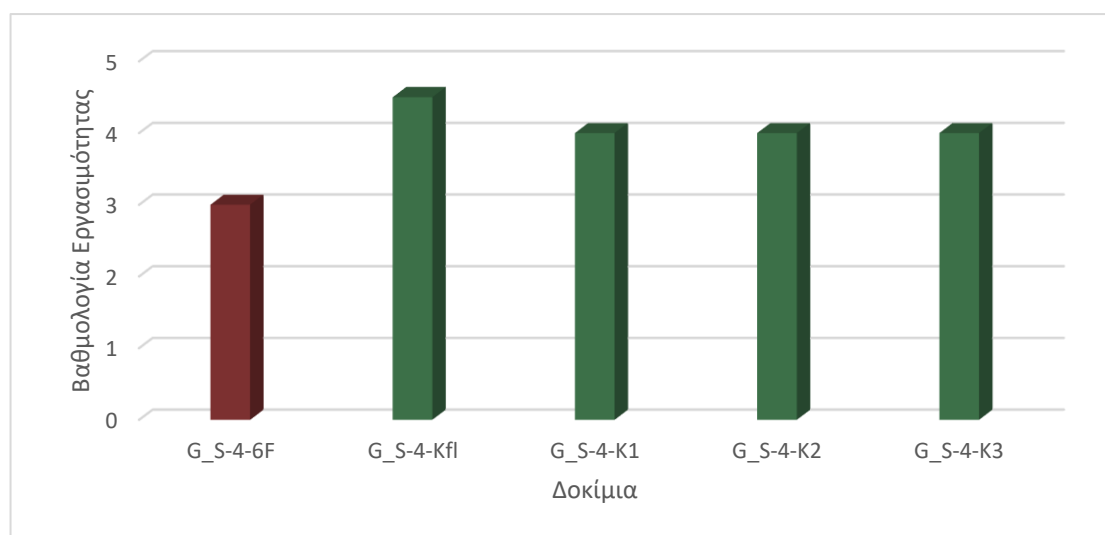


Σχήμα 4.14 Δοκίμιο G\_S-4-6F.

#### 4.2.3.3 Δοκίμια G\_S-4Kfl, G\_S-4-K1, G\_S-4-K2, G\_S-4-K3

Σαν τελική παράμετρο ώστε να βελτιωθούν κι άλλο οι μηχανικές αντοχές, ήταν η προσθήκη υδροξειδίου του καλίου. Η αναλογία υδρύαλου προς ΣΠΚ ήταν πάλι 1,05:1 με την διαφορά ότι 0,79 ήταν καθαρός υδρύαλος και το υπόλοιπο 0,26 ήταν διάλυμα ΚΟΗ. Όλα τα δοκίμια ήταν ενισχυμένα με ίνες 6 mm.

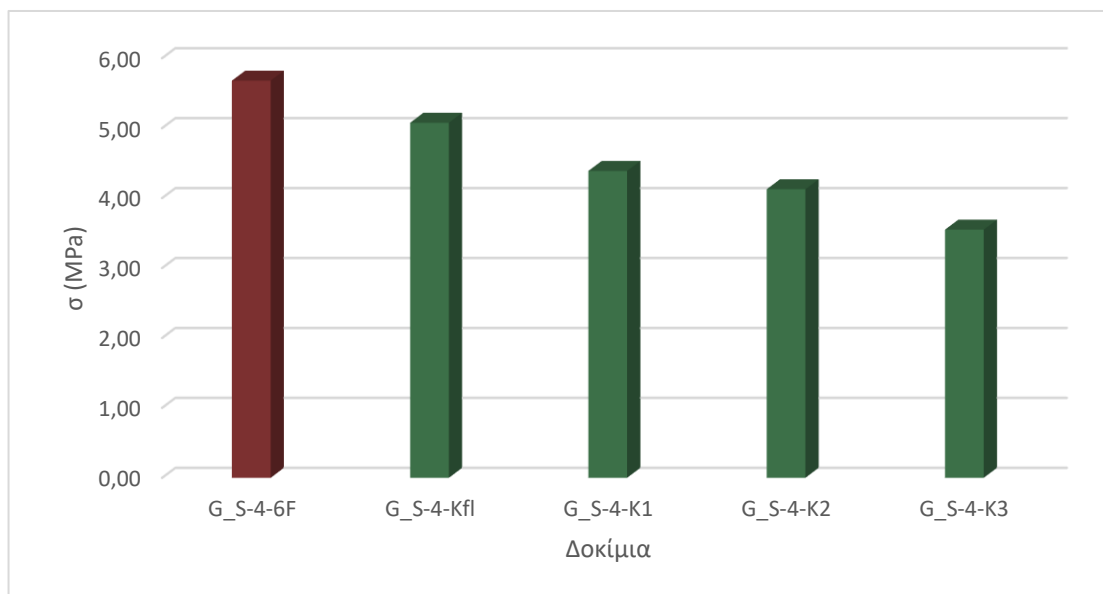
Στο Σχήμα 4.15, παρουσιάζεται η εργασιμότητα των δοκιμών τα οποία περιλαμβάνουν διάλυμα υδροξειδίου του καλίου σε διάφορες συγκεντρώσεις σε σύγκριση με το δοκίμιο G\_S-4-6F το οποίο έχει την ίδια σύσταση αλλά δεν περιέχει ΚΟΗ.



Σχήμα 4.15 Εργασιμότητα δοκιμών που περιέχουν ΚΟΗ σε σύγκριση με το G\_S-4-6F.

Στα συγκεκριμένα δοκίμια παρατηρείται ότι η προσθήκη του διαλύματος βοήθησε την εργασιμότητα όπως φαίνεται από το G\_S-4-6F με τα υπόλοιπα. Από την άλλη μεριά όταν το υδροξείδιο του καλίου βρίσκεται σε διάφορες συγκεντρώσεις δεν επηρεάζει την εργασιμότητα. Ίσως το μοναδικό χαρακτηριστικό που μπορεί να εμφανίζει κάποια μικρή διαφορά είναι η φυσική κατάσταση του ΚΟΗ. Πιο συγκεκριμένα το δοκίμιο G\_S-4Kfl που περιέχει ΚΟΗ σε στερεή μορφή νιφάδων φαίνεται να είναι ελάχιστα πιο εργάσιμο από τα υπόλοιπα τρία που περιέχουν το διάλυμα σε ρευστή μορφή.

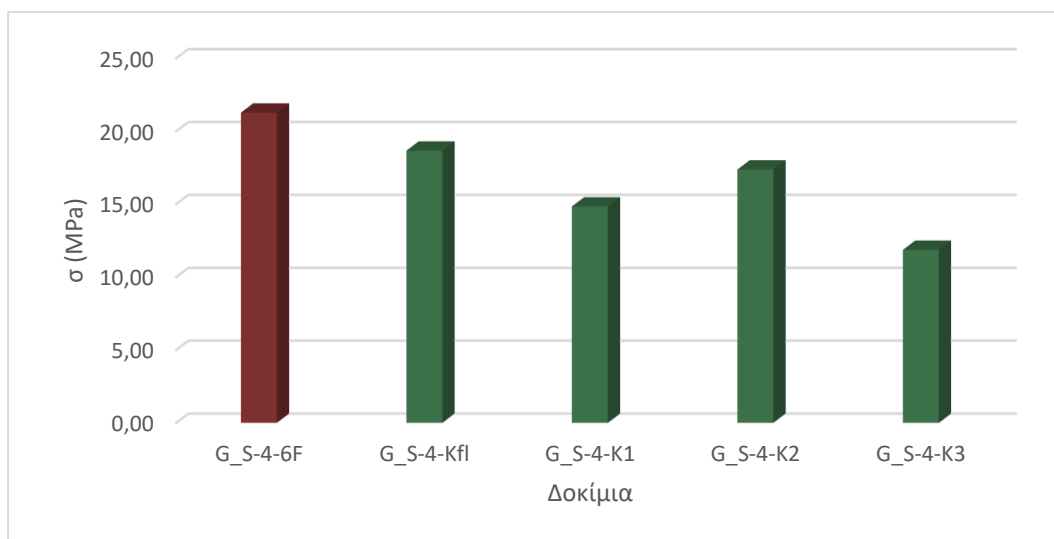
Στο Σχήμα 4.16, αποτυπώνονται οι εφελκυστικές αντοχές των δοκιμίων.



Σχήμα 4.16 Εφελκυστικές αντοχές δοκιμίων που περιέχουν ΚΟΗ σε σύγκριση με το G\_S-4-6F.

Από το διάγραμμα διαπιστώνεται ότι οι διάφορες συγκεντρώσεις υδροξείδιο του καλίου επηρεάζουν την εφελκυστική αντοχή του δοκιμίου. Πιο συγκεκριμένα όσο αυξάνεται το ποσοστό κατά βάρος μειώνεται η εφελκυστική αντοχή όπως φαίνεται από τα δοκίμια G\_S-4-K1, G\_S-4-K2 και G\_S-4-K3. Ο λόγος για την προσθήκη του διαλύματος ήταν για να βοηθήσει την αλκαλική αντίδραση ώστε να αντιδράσει το μεγαλύτερο μέρος της κονίας. Αυτό φαίνεται να γίνεται καλύτερα όσο το υδροξείδιο του καλίου βρίσκεται σε μορφή νιφάδων μιας και το δοκίμιο G\_S-4-KfI παρουσιάζει την μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή. Σε σύγκριση με το G\_S-4-6F φαίνεται ότι το διάλυμα ΚΟΗ επηρεάζει αρνητικά το δοκίμιο.

Στο Σχήμα 4.17, γίνεται η παρουσίαση των θλιπτικών αντοχών.



Σχήμα 4.17 Θλιπτικές αντοχές δοκιμίων που περιέχουν ΚΟΗ σε σύγκριση με το G\_S-4-6F.

Όπως αναδεικνύεται και από το διάγραμμα των θλιπτικών αντοχών το δοκίμιο G\_S-4-Kf1 έχει την μεγαλύτερη αντοχή. Τα υπόλοιπα τρία δοκίμια παρουσιάζουν μια αντίστοιχη συμπεριφορά με τις εφελκυστικές τους αντοχές. Η μοναδική διαφορά βρίσκεται στο δοκίμιο G\_S-4-K2 το οποίο δείχνει να έχει την μέγιστη αντοχή από τα τρία. Ένας τρόπος για να εξηγηθεί αυτή η απόκλιση είναι το στατιστικό σφάλμα. Με άλλα λόγια αν είχαν πραγματοποιηθεί κι άλλες δοκιμές θλίψης από το συγκεκριμένο δοκίμιο μπορεί να εμφάνιζε την ίδια ομοιομορφία όπως και τα άλλα. Τέλος και στις θλιπτικές αντοχές όπως και στις εφελκυστικές το διάλυμα ΚΟΗ μείωσε τις αντοχές των δοκιμίων.

Καταλήγοντας, η προσθήκη υδροξείδιο του καλίου μπορεί να βοήθησε την εργασιμότητα των δοκιμίων αλλά μείωσε τις αντοχές τους.

Στα Σχήματα 4.18, 4.19 και 4.20 φαίνονται τα δοκίμια G\_S-4-K1, G\_S-4-K2 και G\_S-4-K3 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.18 Δοκίμιο G\_S-4-K1



Σχήμα 4.19 Δοκίμιο G\_S-4-K2



Σχήμα 4.20 Δοκίμιο G\_S-4-K3

#### 4.2.4 ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΣΥΝΔΙΑΣΜΟ ΚΟΝΙΑΣ ΣΚΟΝΗ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΚΑΜΙΝΩΝ (ΣΠΚ) ΚΑΙ ΜΕΤΑΚΑΟΛΙΝΗΣ (Μ)

Στο επόμενο στάδιο αποφασίστηκε να γίνει μια μίξη από δυο κονίες με την πρώτη να είναι η σκόνη περιστροφικών καμίνων και η δεύτερη να είναι η μετακαολίνη. Ο λόγος για τον συνδυασμό των δυο κονιών ήταν ότι τα κονιάματα με μετακαολίνη παρουσιάζουν καλές μηχανικές ιδιότητες σύμφωνα με διάφορες έρευνες. Στον Πίνακα 4.4 φαίνονται οι αναλογίες των μειγμάτων.

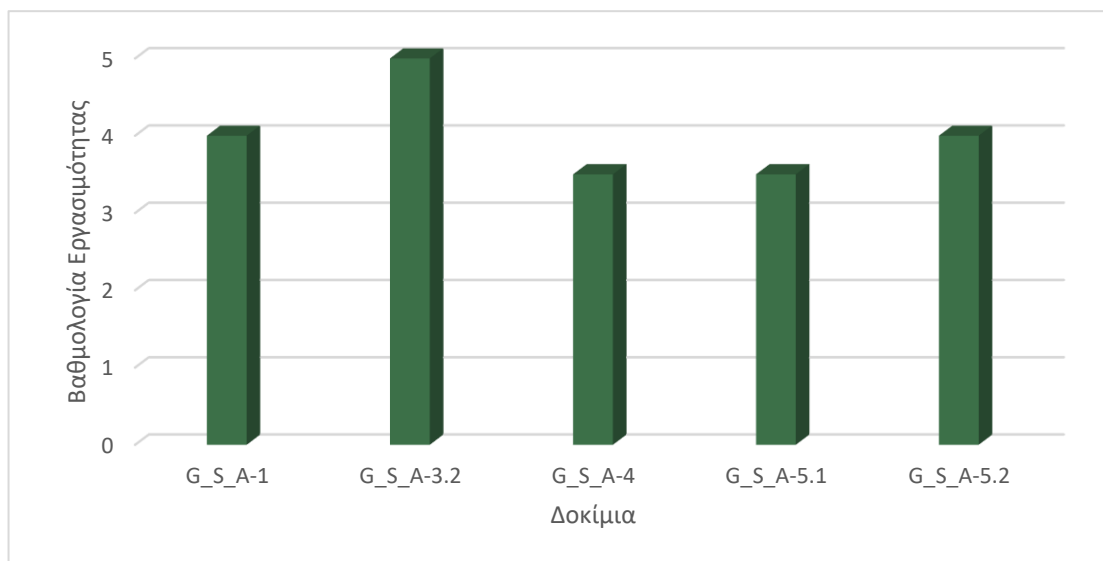
Πίνακας 4.4 Αναλογίες δοκιμών με πρόσμιξη μετακαολίνης και σκόνης περιστροφικών καμίνων.

A/A	Υδρύαλος	ΣΠΚ	Μετακαολίνη	Αδρανή 0.5-1 mm	Αδρανή 0-0.5 mm	ίνες σε gr	ΚΟΗ/%wt
G_S_A-1	2	1	1	1	2	-	
G_S_A-3.2	7	1	7	1,5	2	-	
G_S_A-4	2,2	1	2	0,1	0,25	-	
G_S_A-5.1	5	1	5	0,4	1,5	-	
G_S_A-5.2	5	1	5	1	1,5	-	
G_S_A-11-6F	2	1	1	1	2	2,3	
G_S_A-1-12F	2	1	1	1	2	2,3	
G_S_A-1-K2	1,5	1	1	1	3	2,3	0,5/22.5% wt
G_S_A-1-K3	1,5	1	1	1	3	2,3	0,5/15% wt
G_S_A-2-Kfl	3,21	1	3	1	1,5	2,3	
G_S_A-1-K2-A	1,5	1	1	1	3	2,3	0,5/22.5% wt
G_S_A-1-K2-B	1,5	1	1	1	3	2,3	0,5/22.5% wt
G_S_A-1-K2-C	1,5	1	1	1	3	2,3	0,5/22.5% wt
G_S_A-1-K2-D	1,5	1	1	1	3	2,3	0,5/22.5% wt
G_S_A-1-K2-E	1,5	1	1	1	3	2,3	0,5/22.5% wt

##### 4.2.4.1 Δοκίμια G\_S\_A-1, G\_S\_A-3.2, G\_S\_A-4, G\_S\_A-5.1, G\_S\_A-5.2

Στα δοκίμια που ακολουθούν δεν έχει προστεθεί κάποιο επιπλέον υλικό πέρα από τον υδρύαλο, την σκόνη περιστροφικών καμίνων, την μετακαολίνη και τα αδρανή. Αρχικά ο σκοπός ήταν να βρεθούν αναλογίες που θα ταιριάζουν στις ανάγκες του πειραματικού προγράμματος.

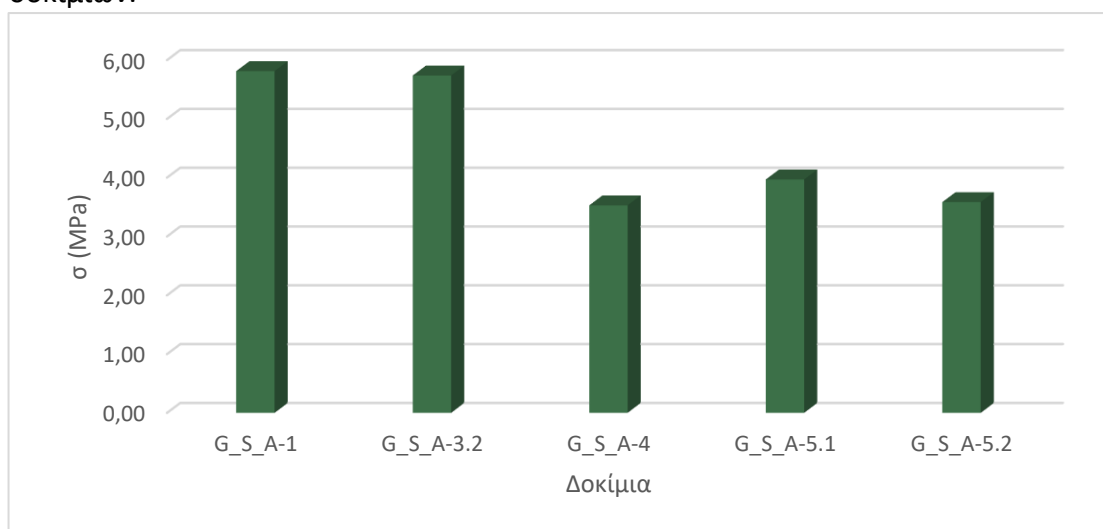
Στο Σχήμα 4.21, εμφανίζεται η βαθμολογία της εργασιμότητας των δοκιμών.



Σχήμα 4.21 Εργασιμότητα δοκιμών.

Παρατηρείται ότι όταν τα αδρανή είναι σε χαμηλές ποσότητες το μείγμα εμφανίζει χαμηλότερη βαθμολογία. Αυτό οφείλεται στο ότι παρουσίασαν μια πιο κολλώδες υφή με αποτέλεσμα να ήταν δύσκολο στο άπλωμα καθώς και στην εφαρμογή του πλέγματος. Η αναλογία υδρύαλου με μετακαολίνη δεν είναι ξεκάθαρο αν επηρεάζει την εργασιμότητα του υλικού εξαιτίας του γεγονός ότι γινόταν αρκετές αλλαγές στις μεταβλητές. Τέλος η σκόνη περιστροφικών καμίνων παραμένει με την αναλογία 1 λόγω των αποτελεσμάτων των δοκιμών που προαναφέρθηκαν στην ενότητα 4.2.3.

Στο Σχήμα 4.22, βρίσκεται το διάγραμμα με τις εφελκυστικές αντοχές των δοκιμών.

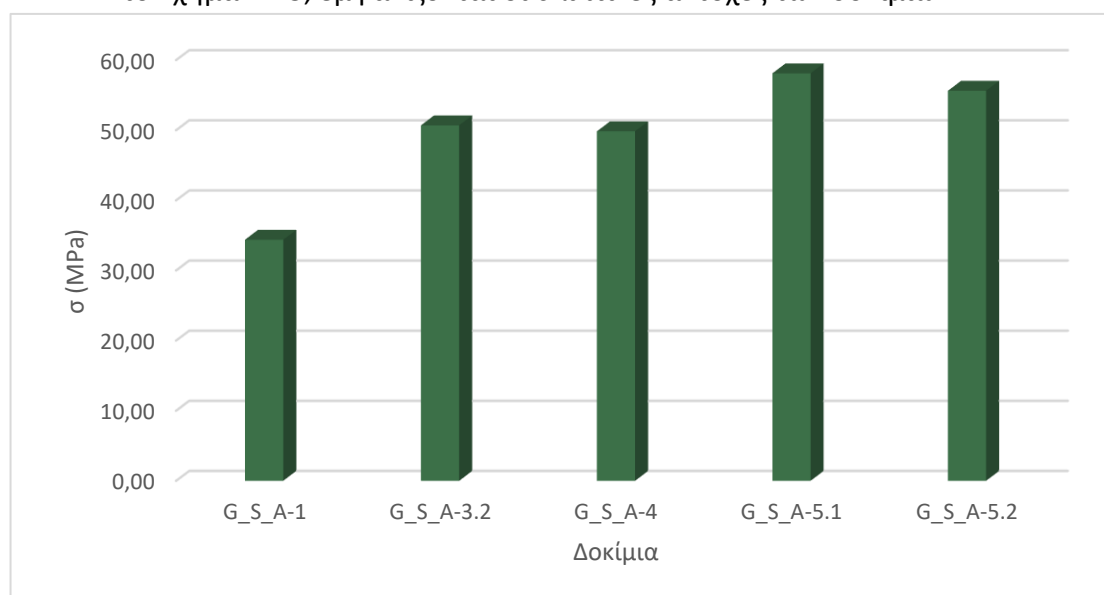


Σχήμα 4.22 Εφελκυστική αντοχή δοκιμών.



Στην περίπτωση των εφελκυστικών αντοχών και εδώ φαίνεται να επηρεάζουν τα αδρανή. Με άλλα λόγια τα δοκίμια G\_S\_A-4, G\_S\_A-5.1 και G\_S\_A-5.2 που εμπεριέχουν την μικρότερη αναλογία αδρανών τείνουν να έχουν τις μικρότερες αντοχές. Στην αντίθετη περίπτωση τα δοκίμια G\_S\_A-1 και G\_S\_A-3.2 που η αναλογία των αδρανών φτάνει το 3 έχουν μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή με μια ποσοστιαία διαφορά 36%. Ακόμα είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα δοκίμια G\_S\_A-4 και G\_S\_A-5.1 που είχαν την μικρότερη αναλογία αδρανών 0,5-1 mm παρουσίασαν έντονες ρηγματώσεις στην επιφάνεια αλλά και μικρορηγματώσεις στο σύνολο της επιφάνειάς τους με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η αντοχή τους.

Στο Σχήμα 4.23, εμφανίζονται οι θλιπτικές αντοχές των δοκιμών.

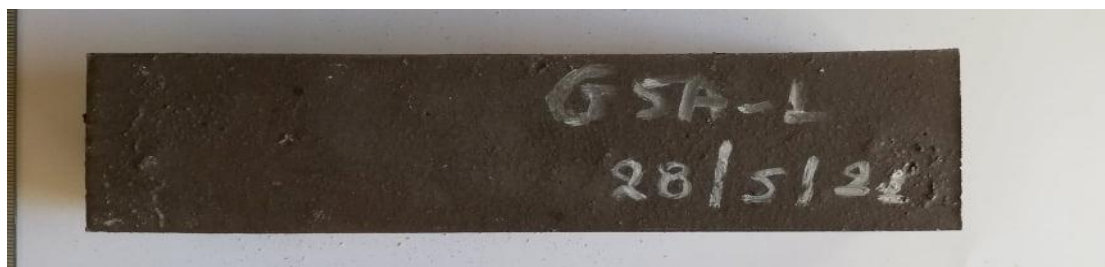


Σχήμα 4.23 Θλιπτικές αντοχές δοκιμών.

Όσο αναφορά την θλιπτική αντοχή των δοκιμών φαίνεται ότι τα αδρανή δεν έχουν κάποια άμεση επιρροή καθώς το δοκίμιο G\_S\_A-5.1 που έχει το μικρότερο ποσοστό αδρανών δεν θα είχε την μέγιστη αντοχή. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αναλογία υδρύαλου προς μετακαολίνη έχει την μεγαλύτερη βαρύτητα. Για παράδειγμα το δοκίμιο G\_S\_A-1 το οποίο έχει διπλάσια ποσότητα υδρύαλου από μετακαολίνη έχει την μικρότερη αντοχή σε σχέση με τα υπόλοιπα που κατά κύριο λόγο έχουν ίσες ποσότητες των δυο υλικών Αυτό συμβαίνει καθώς η καλή αλκαλική αντίδραση των μειγμάτων βασίζεται στις σχεδόν ίσες ποσότητες των αντιδρώντων.

Από το σύνολο των αποτελεσμάτων και σε σύγκριση με τα πρώτα γεωπολυμερή που περιείχαν μόνο σκόνη περιστροφικών καμίνων, φαίνεται ότι υπάρχει μια αύξηση στις μηχανικές ιδιότητες. Ωστόσο, καθώς τα αποτελέσματα δεν ήταν ιδανικά, πραγματοποιήθηκαν περαιτέρω πειραματικές δοκιμές με πρόσθετα υλικά.

Ακολουθούν στα Σχήματα 4.24, 4.25, 4.26 και 4.27 φωτογραφίες από τα δοκίμια.



Σχήμα 4.24 Δοκίμιο G\_S\_A-1.



Σχήμα 4.25 Δοκίμιο G\_S\_A-3.2.



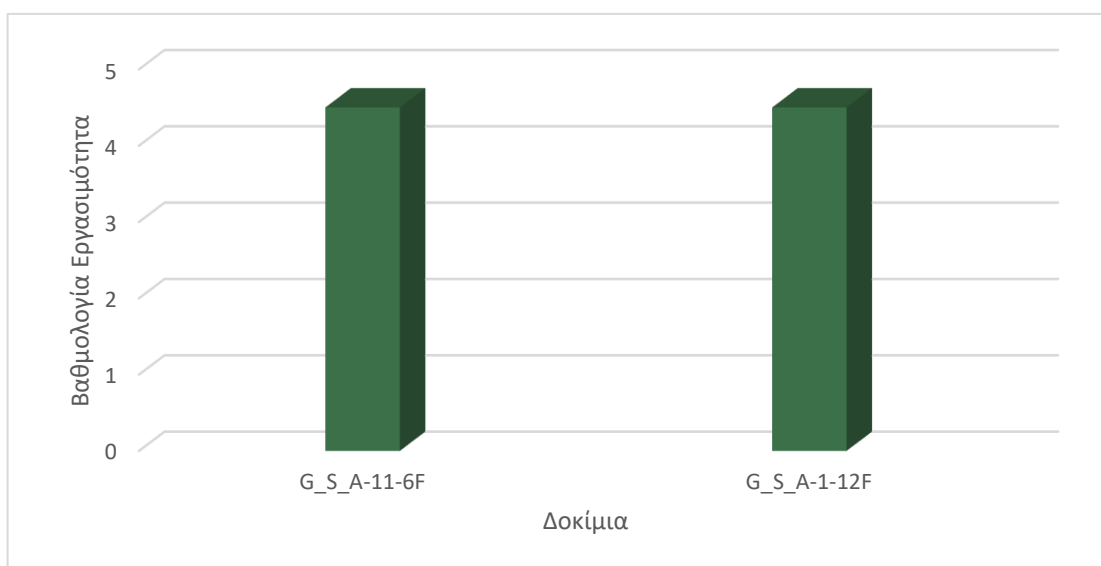
Σχήμα 4.26 Δοκίμιο G\_S\_A-4.



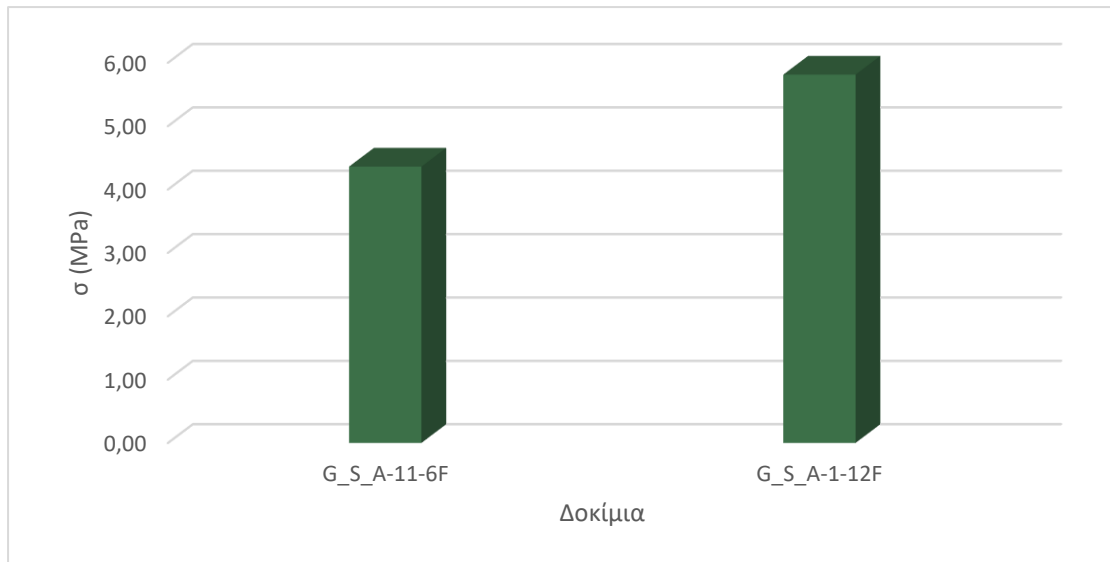
Σχήμα 4.27 Δοκίμιο G\_S\_A-5.1.

#### 4.2.4.2 Δοκίμια G\_S\_A-11-6F και G\_S\_A-1-12F

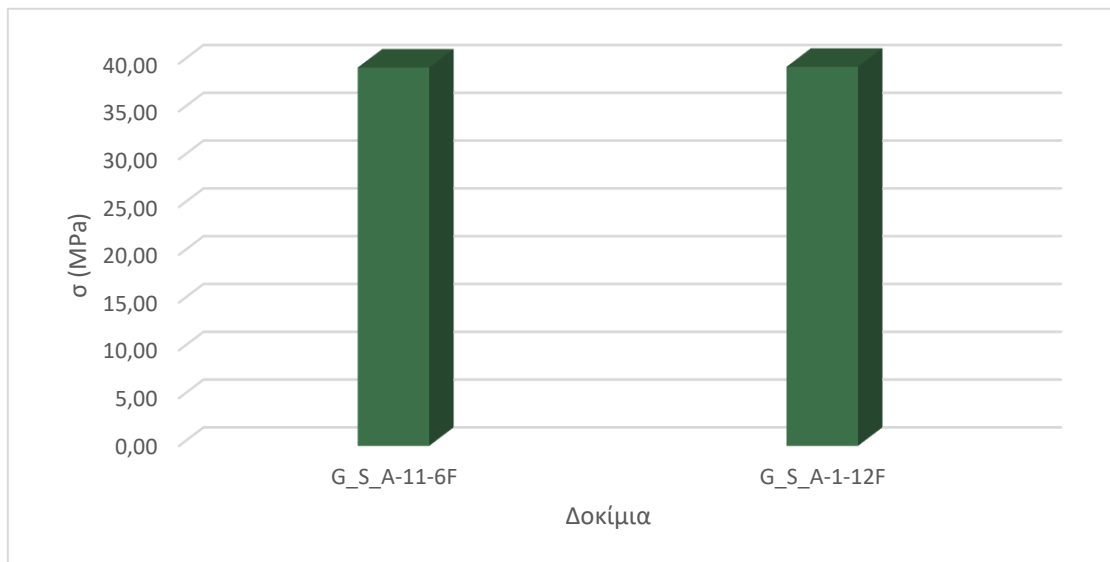
Στα δοκίμια που ακολουθούν προστέθηκαν ίνες ενίσχυσης πολυπροπυλενίου, ώστε να μειωθούν οι μικρορηγματώσεις και να αυξηθούν οι αντοχές τους. Τα δοκίμια G\_S\_A-11-6F και G\_S\_A-1-12F έχουν τις ίδιες ακριβώς αναλογίες υλικών. Το χαρακτηριστικό που αλλάζει είναι το μήκος των ινών, 6 mm και 12 mm αντίστοιχα. Το αποτέλεσμα στην εργασιμότητα όμως παραμένει το ίδιο χωρίς να επηρεάζει το μείγμα ιδιαίτερα όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.28. Από την άλλη μεριά το δοκίμιο G\_S\_A-1-12F παρουσιάζει κατά 33% μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή σε σχέση με το G\_S\_A-11-6F Σχήμα 4.29. Τέλος η θλιπτική αντοχή δεν επηρεάζεται καθώς σε μονοαξονική θλίψη σπάνε χωρίς να συνεισφέρουν στην ενίσχυση Σχήμα 4.30.



Σχήμα 4.28 Εργασιμότητα δοκιμίων που περιέχουν ίνες ενίσχυσης.



Σχήμα 4.29 Εφελκυστικές αντοχές δοκιμών που περιέχουν ίνες ενίσχυσης.

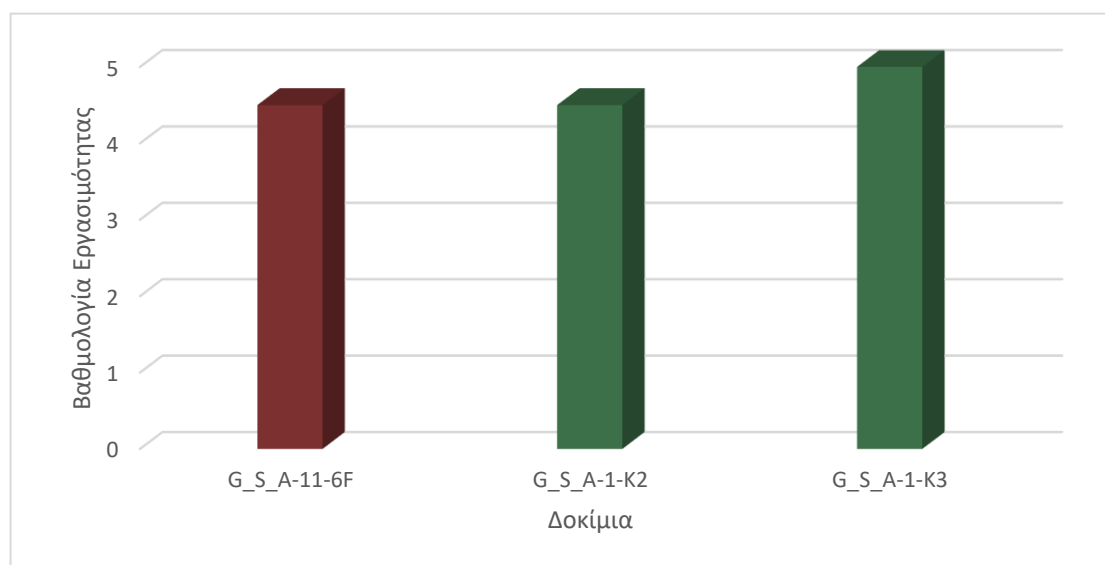


Σχήμα 4.30 Θλιπτικές αντοχές δοκιμών που περιέχουν ίνες ενίσχυσης.

#### 4.2.4.3 Δοκίμια G\_S\_A-1-K2 και G\_S\_A-1-K3

Στην συνέχεια του πειραματικού προγράμματος προστέθηκε διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (KOH) σε συγκεντρώσεις 15% κατά βάρος και 22,5% κατά βάρος.

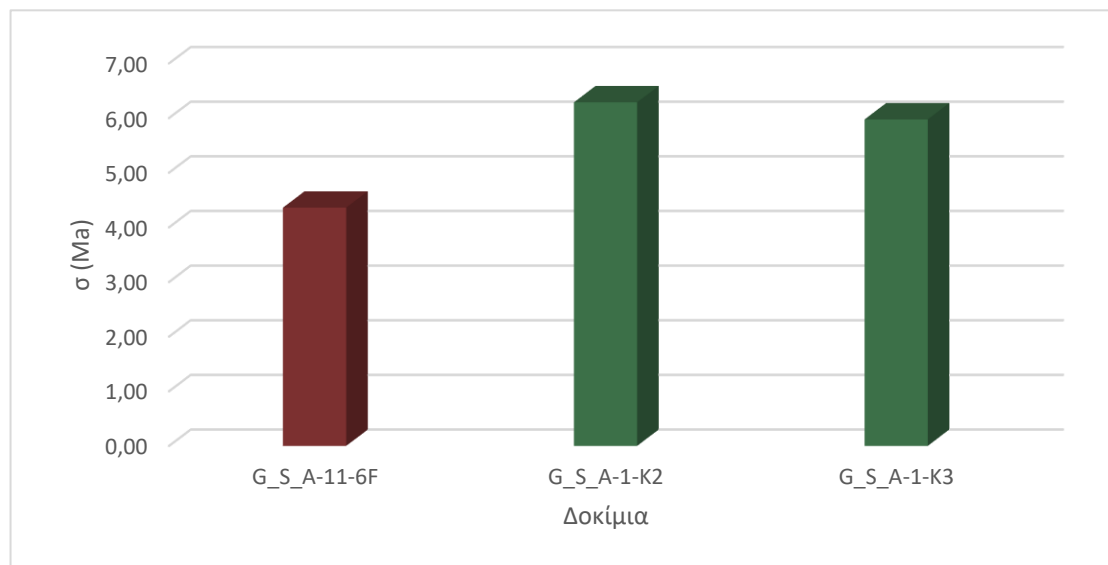
Στο Σχήμα 4.31, γίνεται η σύγκριση της εργασιμότητας των δοκιμών σε σχέση με το G\_S\_A-11-6F.



Σχήμα 4.31 Εργασιμότητα δοκιμών που περιέχουν KOH σε σύγκριση με το G\_S\_A-11-6F.

Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι η προσθήκη υδροξειδίου του νατρίου δεν επηρέασε την εργασιμότητα του υλικού.

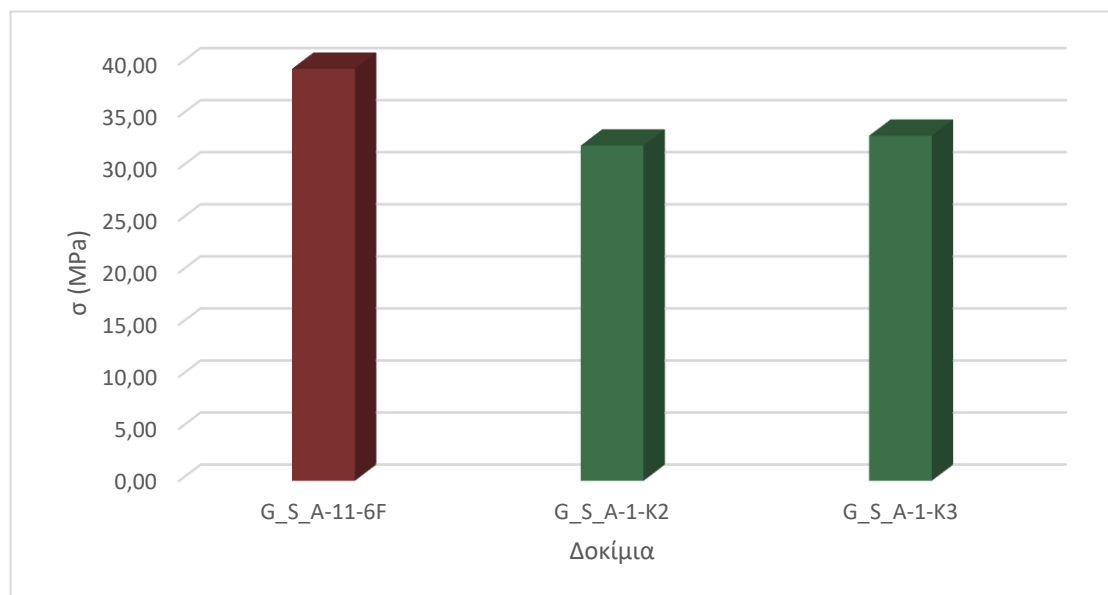
Στο Σχήμα 4.32, γίνεται η παρουσίαση των εφελκυστικών αντοχών των δοκιμών.



Σχήμα 4.32 Εφελκυστική αντοχή δοκιμών που περιέχουν ΚΟΗ σε σύγκριση με το G\_S\_A-11-6F.

Από την σύγκριση των G\_S\_A-1-K2 και G\_S\_A-1-K3 δεν παρατηρείται κάποια διαφορά μεταξύ των δοκιμών στις εφελκυστικές αντοχές. Αδιαμφισβήτητα η προσθήκη υδροξειδίου του καλίου ενίσχυσε τις αντοχές των δοκιμών μιας και αν συγκριθούν με το δοκίμιο G\_S\_A-11-6F με το οποίο έχουν τις πιο συγγενείς αναλογίες παρουσιάζουν αύξηση στην αντοχή τους με ένα ποσοστό που φτάνει το 41%.

Ακολουθεί το Σχήμα 4.33, που φαίνονται οι θλιπτικές αντοχές των δοκιμών.



Σχήμα 4.33 Θλιπτικές αντοχές δοκιμών που περιέχουν ΚΟΗ σε σύγκριση με το G\_S\_A-11-6F.

Σε αντίθεση με την εφελκυστική αντοχή το διάλυμα ΚΟΗ μείωσε τις θλιπτικές αντοχές των δοκιμίων όπως φαίνονται και στο διάγραμμα. Αν συγκριθούν τα δοκίμια G\_S\_A-1-K2 και G\_S\_A-1-K3 μεμονωμένα έχουν σχεδόν ίδιες θλιπτικές αντοχές κάτι το οποίο οδηγεί στο συμπέρασμα οι διαφορετικές συγκεντρώσεις διαλύματος δεν επηρεάζει την αντοχή σε θλίψη.

Ακολουθούν στα Σχήματα 4.34 και 4.35 φωτογραφικό υλικό.



Σχήμα 4.34 Δοκίμιο G\_S\_A-1-K2.

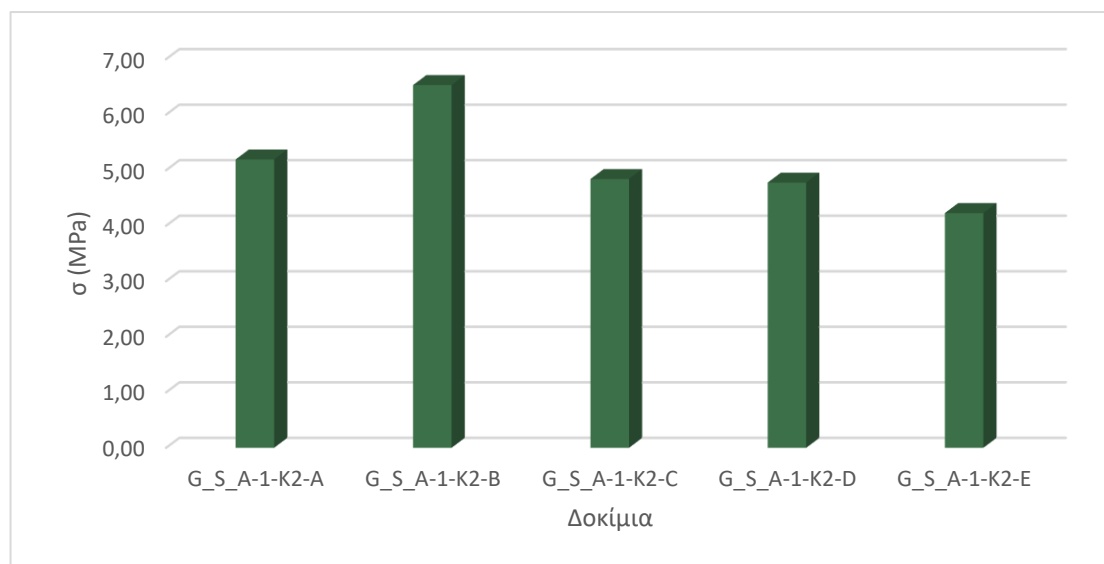


Σχήμα 4.35 Δοκίμιο G\_S\_A-1-K3.

#### 4.2.4.4 Δοκίμια G\_S\_A-1-K2-A, G\_S\_A-1-K2-B, G\_S\_A-1-K2-C, G\_S\_A-1-K2-D και G\_S\_A-1-K2-E

Οι συνθήκες συντήρησης των δοκιμίων κατά το διάστημα της πήξης και σκλήρυνσης, επιλέχθηκαν σαν ακόμα μια παράμετρος προς διερεύνηση. Ξειδικότερα, το δοκίμιο G\_S\_A-1-K2 το οποίο περιλαμβάνει και ίνες ενίσχυσης αλλά και διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου υποβλήθηκε σε πέντε διαφορετικούς τρόπους συντήρησης. Ο πρώτος τρόπος ήταν σε συνθήκες περιβάλλοντος ώστε να υπάρχει σαν ένα δοκίμιο «control» και χαρακτηρίζεται με το γράμμα Α. Ο δεύτερος τρόπος ήταν να γίνει επικάλυψη του δοκιμίου με μια πλαστική μεμβράνη και χαρακτηρίζεται με το γράμμα Β. Ο τρίτος τρόπος ήταν η περιτύλιξη ολόκληρου του δοκιμίου με μια υγρή λινάτσα και χαρακτηρίζεται με το γράμμα C. Ο τέταρτος τρόπος ήταν η επικάλυψη του δοκιμίου με μια λινάτσα και ανά δύο ημέρες γινόταν η διαβροχή του με νερό και στην συνέχεια έμενε στο αέρα σε θερμοκρασία δωματίου και χαρακτηρίζεται με το γράμμα D. Ο πέμπτος και τελευταίος τρόπος ήταν με την εμβάπτιση του δοκιμίου μέσα στο νερό και χαρακτηρίζεται με το γράμμα E.

Στο Σχήμα 4.36, φαίνονται οι εφελκυστικές αντοχές των δοκιμίων.

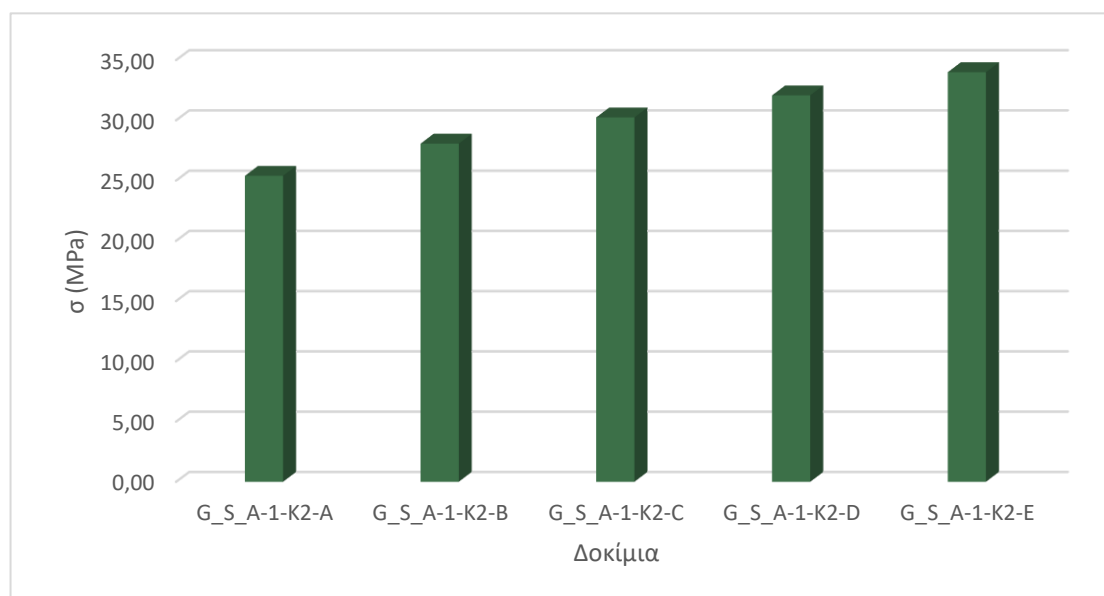


Σχήμα 4.36 Εφελκυστικές αντοχές δοκιμίων με διαφορετικούς τρόπους συντήρησης.



Με βάση το διάγραμμα παρατηρείται ότι οι εφελκυστικές αντοχές των δοκιμίων επηρεάζονται από τον τρόπο συντήρησης. Το μόνο δοκίμιο που παρουσίασε αύξηση στην αντοχή του είναι το G\_S\_A-1-K2-B με ποσοστό αύξησης 26%. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στην πιο ομαλή ξήρανση του δοκιμίου με αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση των ρηγματώσεων. Τα δοκίμια G\_S\_A-1-K2-C, G\_S\_A-1-K2-D και G\_S\_A-1-K2-E εμφάνισαν έντονες ρηγματώσεις στην επιφάνεια με αποτέλεσμα την μειωμένη αντοχή.

Τέλος στο Σχήμα 4.37, παρουσιάζονται και οι θλιπτικές αντοχές των δοκιμίων.



Σχήμα 4.37 Θλιπτικές αντοχές δοκιμίων με διαφορετικούς τρόπους συντήρησης.

Παρατηρείται ότι υπάρχει μια αύξουσα τάση των θλιπτικών αντοχών από το G\_S\_A-1-K2-A προς το G\_S\_A-1-K2-E. Αυτό πιθανώς οφείλεται στην αυξανόμενη υγρασία στην οποία γινόταν η συντήρηση των δοκιμίων καθώς στην κατεύθυνση στην οποία υπάρχει η αύξηση της αντοχής υπάρχει και αύξηση της υγρασίας με το G\_S\_A-1-K2-E να έχει την μέγιστη με ποσοστό 100%.

#### 4.2.5 ΣΕΤ 3 ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Από το σύνολο των πειραματικών αποτελεσμάτων επιλέχθηκαν μερικά δοκίμια ώστε να γίνει περαιτέρω μελέτη. Με άλλα λόγια παρασκευάστηκαν ξανά τα δοκίμια σε ομάδες των τριών (σετ δοκιμών) ώστε να ελεγχθεί η συνέπεια στις ιδιότητες τους. Τα δοκίμια αυτά ήταν τα G\_S-10-K, G\_S\_A-1-K1 και G\_S\_A-2.2-6F τα οποία είχαν την καλύτερη απόδοση κυρίως στην εφελκυστική αντοχή. Στον Πίνακα 4.5 φαίνονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από τις πρώτες δοκιμές ενώ στον Πίνακα 4.6 παρουσιάζονται οι αναλογίες των δοκιμών.

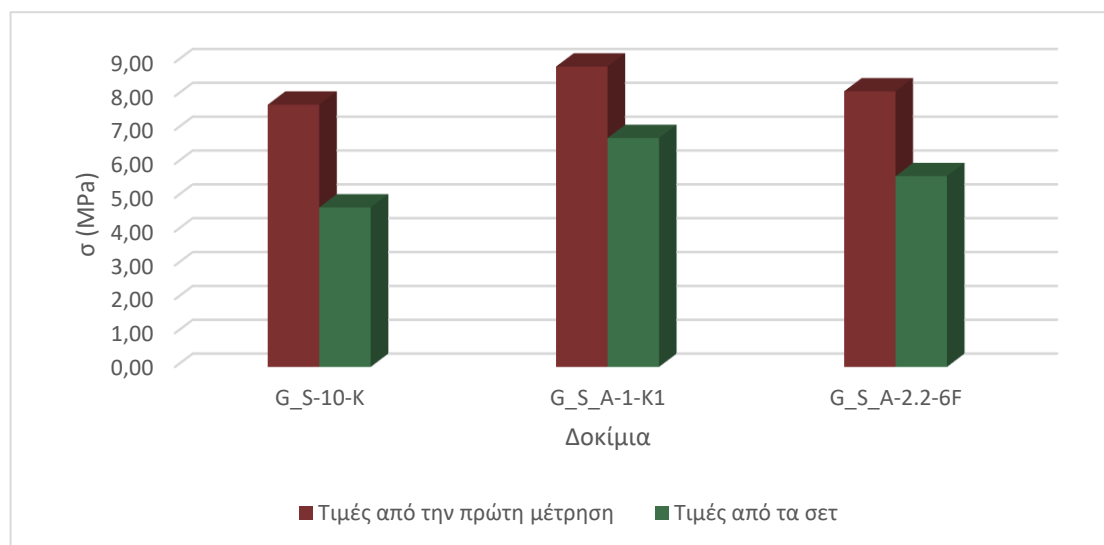
Πίνακας 4.5 Τιμές πρώτων δοκιμών από τα δοκίμια G\_S-10-K, G\_S\_A-1-K1 και G\_S\_A-2.2-6F.

A/A	Εργασιμότητα	Εφελκυστική αντοχή Μρα	Θλιπτική αντοχή Μρα
G_S-10-K	2	7,75	19,83
G_S_A-1-K1	4,5	8,87	40,18
G_S_A-2.2-6F	4,5	8,14	72,24

Πίνακας 4.6 Αναλογίες δοκιμών G\_S-10-K, G\_S\_A-1-K1 και G\_S\_A-2.2-6F.

A/A	Υδρύαλος	ΣΠΚ	Μετακαολίνη	Αδρανή 0.5-1 mm	Αδρανή 0- 0.5 mm	ίνες σε gr	KOH/%wt
G_S-10-K	1,05	1	-	1	1,4	2,3	-
G_S_A-1-K1	1,5	1	1	1	3,5	2,3	0,5/8% wt
G_S_A-2.2-6F	3,5	1	3	1	1,5	7	-

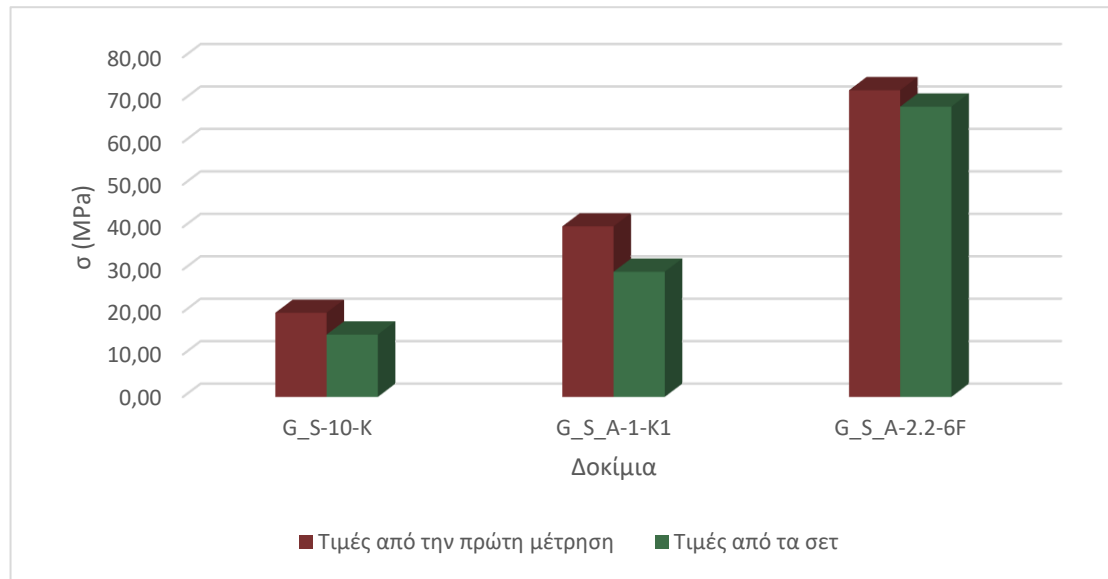
Ακολουθεί το Σχήμα 4.38 στο οποίο συγκρίνονται οι εφελκυστικές αντοχές των αποτελεσμάτων από τις αρχικές δοκιμές με τις δοκιμές των σετ.



Σχήμα 4.38 Σύγκριση Εφελκυστικών αντοχών μεταξύ των τιμών από τις πρώτες δοκιμές και των τιμών από τα σετ.

Οι εφελκυστικές αντοχές των δοκιμών G\_S-10-K, G\_S\_A-1-K1 και G\_S\_A-2.2-6F ήταν χαμηλότερες από την αρχική εκτίμηση. Πιο συγκεκριμένα όλα τα δοκίμια σε σχέση με τα πρώτα πειραματικά δεδομένα έχουν απόκλιση 39%, 24% και 31% αντίστοιχα. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι οι συνθήκες συντήρησης των δοκιμών κατά τις πρώτες εβδομάδες επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες. Πιο συγκεκριμένα η πρώτη συντήρηση των δοκιμών, με τις υψηλές αντοχές, έγινε περίπου σε θερμοκρασία 50°C. Αντίθετα η δεύτερη συντήρηση παρασκευή των σετ έγινε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος περίπου στους 30-35°C.

Τέλος στο Σχήμα 4.39, παρουσιάζονται συγκριτικά οι θλιπτικές αντοχές των δυο παρασκευών.



Σχήμα 4.39 Σύγκριση θλιπτικών αντοχών μεταξύ των τιμών από τις πρώτες δοκιμές και των τιμών από τα σετ.

Όπως και στις εφελκυστικές έτσι και θλιπτικές αντοχές παρατηρείται μια πτώση τιμών μεταξύ της πρώτης παρασκευής σε σχέση με τη δεύτερη. Πιο συγκεκριμένα η ποσοστιαία μείωση των θλιπτικών αντοχών είναι 26%, 27% και 5% αντίστοιχα. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, πιθανότατα αυτή η διαφορά να οφείλεται στη θερμοκρασία συντήρησης των δοκιμών.

## Κεφάλαιο 5

### 5.1 Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα σχετικά με τη μηχανική συμπεριφορά των κονιαμάτων ενίσχυσης:

- Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος κατά τη φάση της συντήρησης των δοκιμών φαίνεται να επηρεάζει ιδιαίτερα τις μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων όπως φάνηκε στα δοκίμια G\_S-10-K, G\_S\_A-1-K1 και G\_S\_A-2.2-6F.
- Τα δοκίμια που περιέχουν σύνθετη κονία με ανάμειξη σκόνης περιστροφικής καμίνου και μετακαολίνης (G\_S\_A) σε σύγκριση με τα δοκίμια που περιέχουν μόνο κονία σκόνης περιστροφικής καμίνου (G\_S) εμφανίζουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες.
- Η χρήση ινών συνέβαλλε στην ανάπτυξη μεγαλύτερων αντοχών.
- Η χρήση διαλύματος υδροξειδίου του καλίου φάνηκε να επιδρά θετικά στην ανάπτυξη μεγαλύτερων αντοχών στα κονιάματα που βασίζονται σε μετακαολίνη και σκόνη περιστροφικής καμίνου.
- Οι συνθήκες συντήρησης των δοκιμών επηρεάζει τις τελικές αντοχές όπως φαίνεται από τα κονιάματα G\_S\_A-1-K2-A, G\_S\_A-1-K2-B, G\_S\_A-1-K2-C, G\_S\_A-1-K2-D και G\_S\_A-1-K2-E.
- Η θλιπτική αντοχή των κονιαμάτων αυξάνεται όταν τα δοκίμια συντηρούνται σε συνθήκες αυξανόμενης υγρασίας.
- Η βέλτιστη αναλογία υδρύαλου προς κονία ήταν κοντά στην μονάδα ώστε να γίνεται καλύτερη αντίδραση με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται πλήρως οι αντοχές και να υπάρχει μια ισορροπία στην εργασιμότητα.



## Κεφάλαιο 6

### 6.1 Βιβλιογραφία

Γιαννοπούλου Ι., Πάνιας Δ. (n.d.). Γεωπολυμερή δομικά υλικά από στερεά αργιλοπυριτικά παραπροϊόντα, Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Καράμπελα Χ. ( 2021 ). Καμπτική ενίσχυση δοκών οπλισμένου σκυροδέματος με ΙΑΜ: πειραματική διερεύνηση αποδοτικότητας μήτρας γεωπολυμερούς σε συνδυασμό με πλέγματα ινών υάλου , Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος 2021.

Κατσαρού Ε. (2006). Σύνθεση και ιδιότητες γεωπολυμερών που παράγονται από ιπτάμενη τέφρα λιγνιτικών σταθμών, Μεταπτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2006.

Λάππα Ε. (2014). Μελέτη των παραμέτρων προσρόφησης  $\text{Cu}^{2+}$  σε σκωρίες βιομηχανίας χάλυβα, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Αθήνα 2014.

Μουρατίδης Α., Κεχαγιά Φ. (n.d.). Χρήση Σκαριών χαλυβουργίας σε αντιολισθηρούς τάπητες, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (Α.Π.Θ).

Νικολαΐδης Α. (2015). Παραγωγή γεωπολυμερών από τέλματα εμπλουτισμού χαλκοπυριτή Κύπρου, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2015.

Παναγιωτοπούλου Χ. (2009). Σύνθεση και ιδιότητες γεωπολυμερών απο βιομηχανικά πετρώματα και παραπροϊόντα, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Τμήμα Χημικών Μηχανικών.

Bernat, Ernest, et al. "Experimental and Analytical Study of TRM Strengthened Brickwork Walls under Eccentric Compressive Loading." *Construction and Building Materials*, July 2013, pp. 35–47. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.03.006.

Betonfix R52 - Kimia. <https://www.kimia.it/sites/default/files/docs/st/en-betonfix-r52.pdf>.

Black, L. "Low Clinker Cement as a Sustainable Construction Material." *Sustainability of Construction Materials*, 2016, pp. 415–457., <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100370-1.00017-2>.

Chi, Maochieh, and Ran Huang. "Binding Mechanism and Properties of Alkali-Activated Fly Ash/Slag Mortars." *Construction and Building Materials*, Mar. 2013, pp. 291–98. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.003.

Collins, Frank, and J. G. Sanjayan. "Effect of Pore Size Distribution on Drying Shrinking of Alkali-Activated Slag Concrete." *Cement and Concrete Research*, no. 9, Sept. 2000, pp. 1401–06. doi:10.1016/s0008-8846(00)00327-6.

Elsanadedy, Hussein M., et al. "Organic versus Inorganic Matrix Composites for Bond-Critical Strengthening Applications of RC Structures – State-of-the-Art Review." *Composites Part B: Engineering*, Oct. 2019, p. 106947. doi:10.1016/j.compositesb.2019.106947.

Escrig, Christian, et al. "Experimental and Analytical Study of Reinforced Concrete Beams Shear Strengthened with Different Types of Textile-Reinforced Mortar." *Construction and Building Materials*, May 2015, pp. 248–60. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.03.013.

Glavind, M. "Sustainability of Cement, Concrete and Cement Replacement Materials in Construction." *Sustainability of Construction Materials*, 2009, pp. 120–147., <https://doi.org/10.1533/9781845695842.120>.

"History of Lime in Mortar." Graymont, <https://www.graymont.com/en/markets/building-construction/mortar/history-lime-mortar>.

Huseien, Ghasan Fahim, Abdul Rahman Mohd Sam, et al. "Evaluation of Alkali-Activated Mortars Containing High Volume Waste Ceramic Powder and Fly Ash Replacing GBFS." *Construction and Building Materials*, June 2019, pp. 78–92. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.194.



Huseien, Ghasan Fahim, Jahangir Mirza, et al. "Influence of Different Curing Temperatures and Alkali Activators on Properties of GBFS Geopolymer Mortars Containing Fly Ash and Palm-Oil Fuel Ash." *Construction and Building Materials*, Oct. 2016, pp. 1229–40. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.08.153.

Huseien, Ghasan Fahim, Mohammad Ismail, et al. "Synergism between Palm Oil Fuel Ash and Slag: Production of Environmental-Friendly Alkali Activated Mortars with Enhanced Properties." *Construction and Building Materials*, May 2018, pp. 235–44. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.03.031.

Ismail, Idawati, et al. "Influence of Fly Ash on the Water and Chloride Permeability of Alkali-Activated Slag Mortars and Concretes." *Construction and Building Materials*, Nov. 2013, pp. 1187–201. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.07.106.

Koutas, Lampros N., and Christos G. Papakonstantinou. "Flexural Strengthening of RC Beams with Textile-Reinforced Mortar Composites Focusing on the Influence of the Mortar Type." *Engineering Structures*, Nov. 2021, p. 113060. doi:10.1016/j.engstruct.2021.113060.

Maddalena, Riccardo, et al. "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*, vol. 186, 2018, pp. 933–942., <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.138>.

MAHASENAN, N, et al. "The Cement Industry and Global Climate Change current and Potential Future Cement Industry CO<sub>2</sub> Emissions." *Greenhouse Gas Control Technologies - 6th International Conference*, 2003, pp. 995–1000., <https://doi.org/10.1016/b978-008044276-1/50157-4>.

Mapei - Adhesives, Sealants, Chemical Products for Building. [https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider17/products-documents/1064-planitophdm-gb.pdf?sfvrsn=5a87ef77\\_0](https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider17/products-documents/1064-planitophdm-gb.pdf?sfvrsn=5a87ef77_0).

Mapei - Adhesives, Sealants, Chemical Products for Building.  
[https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider17/products-documents/1065-planitophdmmxi-gb.pdf?sfvrsn=82fae8a8\\_0](https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider17/products-documents/1065-planitophdmmxi-gb.pdf?sfvrsn=82fae8a8_0).

Moropoulou, Antonia, et al. "Investigation of the Technology of Historic Mortars." *Journal of Cultural Heritage*, vol. 1, no. 1, 2000, pp. 45–58., [https://doi.org/10.1016/s1296-2074\(99\)00118-1](https://doi.org/10.1016/s1296-2074(99)00118-1).

Ombres, Luciano. "Analysis of the Bond between Fabric Reinforced Cementitious Mortar (FRCM) Strengthening Systems and Concrete." *Composites Part B: Engineering*, Feb. 2015, pp. 418–26. doi:10.1016/j.compositesb.2014.10.027.

Raouf, Saad M., et al. "Bond between Textile-Reinforced Mortar (TRM) and Concrete Substrates: Experimental Investigation." *Composites Part B: Engineering*, Aug. 2016, pp. 350–61. doi:10.1016/j.compositesb.2016.05.041.

Shang, Jun, et al. "Alternation of Traditional Cement Mortars Using Fly Ash-Based Geopolymer Mortars Modified by Slag." *Journal of Cleaner Production*, vol. 203, 2018, pp. 746–756., <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.255>.

Sitarz, Mateusz, et al. "Mechanical Behaviour and Permeability of Geopolymer Mortars." *MATEC Web of Conferences*, edited by T. Tracz et al., EDP Sciences, 2020, p. 01043. doi:10.1051/mateconf/202032201043.

Soutsos, Marios, et al. "Factors Influencing the Compressive Strength of Fly Ash Based Geopolymers." *Construction and Building Materials*, May 2016, pp. 355–68. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.11.045.

Tetta, Zoi C., et al. "Textile-Reinforced Mortar (TRM) versus Fiber-Reinforced Polymers (FRP) in Shear Strengthening of Concrete Beams." *Composites Part B: Engineering*, Aug. 2015, pp. 338–48. doi:10.1016/j.compositesb.2015.03.055.

Vegere, Kristine, et al. "Alkali-Activated Metakaolin as a Zeolite-like Binder for the Production of Adsorbents." *Inorganics*, vol. 7, no. 12, 2019, p. 141., <https://doi.org/10.3390/inorganics7120141>.

Zhou, Wei, et al. "A Comparative Study of High- and Low-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Fly Ash Based-Geopolymers: The Role of Mix Proportion Factors and Curing Temperature." *Materials & Design*, Apr. 2016, pp. 63–74. doi:10.1016/j.matdes.2016.01.084.