



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΦΙΛΙΚΑ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΓΙΑ
ΧΡΗΣΗ ΣΕ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ: ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ»**

**ΓΙΑΛΟΓΛΟΥ ΝΙΚΟΛΕΤΑ
ΝΕΟΝΑΚΗ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ**



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

Βόλος, 2025

© 2025 Γιαλόγλου Νικολέτα – Νεονάκη Αικατερίνη

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 την Επιτροπή Εξέτασης:

Πρώτος εξεταστής:
(Επιβλέπων)

Δρ. Χρήστος Παπακωνσταντίνου
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος εξεταστής:
(Συνεπιβλέπων)

Δρ. Λάμπρος Κούτας
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής:

Δρ. Θεοχάρης Παπαθεοχάρης
Εντεταλμένος Διδάσκων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις θερμές μας ευχαριστίες στους επιβλέποντες της διπλωματικής μας εργασίας, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Χρήστο Παπακωνσταντίνου και Επίκουρο Καθηγητή κ. Λάμπρο Κούτα, για την πολύτιμη βοήθεια, την καθοδήγηση και την αμέριστη υποστήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας μας.

Επιπλέον, θα θέλαμε να εκφράσουμε την ευγνωμοσύνη μας προς τις υποψήφιες διδάκτορες Ιωάννα Σκυριανού και Ευτυχία Βαλιάκου για την ανεκτίμητη βοήθειά τους κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, καθώς και για τις πολύτιμες γνώσεις που μοιράστηκαν μαζί μας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες απευθύνουμε στα υπόλοιπα μέλη του Εργαστηρίου Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος, τον κ. Χάρη Παπαθεοχάρη και την υποψήφια διδάκτωρ Ματθίλδη Μοναστηρίδου, για την αδιάκοπη υποστήριξή τους.

Ακόμη, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τις οικογένειες μας για την ηθική και οικονομική υποστήριξη καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μας. Τέλος, θέλουμε να ευχαριστήσουμε τους φίλους μας για την υποστήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια της ακαδημαϊκής μας πορείας.

Διπλωματική Εργασία

ΦΙΛΙΚΑ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΕ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ: ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

Γιαλόγλου Νικολέτα

Νεονάκη Αικατερίνη

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ, ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, 2025

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη και ανάπτυξη κονιαμάτων φιλικών προς το περιβάλλον, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών. Αν και το σκυρόδεμα Portland έχει καθιερωθεί ως το βασικό υλικό στις σύγχρονες κατασκευές, οι έντονες εκπομπές CO₂ κατά την παραγωγή του έχουν εντείνει την ανάγκη για εύρεση βιώσιμων εναλλακτικών λύσεων. Το πειραματικό πρόγραμμα της διπλωματικής, επικεντρώνεται στην παραγωγή 19 κονιαμάτων με βάση το Calcium Sulfoaluminate Cement (CSA) και 19 κονιαμάτων με γεωπολυμερή. Στην παρασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν διάφορες πρώτες ύλες, όπως μετακαολίνη, σκόνη περιστροφικών καμίνων, ιπτάμενη τέφρα και προσυσκευασμένο κονίαμα CSA. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε, χαλαζιακή άμμος, αλκαλικός ενεργοποιητής, κιτρικό οξύ και ίνες πολυπροπυλενίου. Στα κονιάματα αυτά, εξετάστηκε η επίδραση παραμέτρων όπως η αναλογία των υλικών, το ποσοστό ινών και η παρουσία αδρανών. Μελετήθηκαν οι ιδιότητες και η συμπεριφορά τους στην νωπή αλλά και στην σκληρυμένη φάση. Υποβλήθηκαν σε δοκιμές με στόχο την αξιολόγηση της εργασιμότητας, του χρόνου πήξης, της πυκνότητας, καθώς και της καμπτικής και θλιπτικής αντοχής. Στόχος ήταν να προσδιοριστούν οι βέλτιστες συνθέσεις κονιαμάτων για χρήση σε ενισχύσεις κατασκευών. Τα πειραματικά αποτελέσματα για τα κονιάματα CSA ήταν θετικά, καθώς μπορούν να αποτελέσουν αξιόπιστες λύσεις, προσφέροντας ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες και υψηλή αντοχή. Αντίθετα, τα γεωπολυμερή κονιάματα δεν παρουσίασαν αντίστοιχα καλές μηχανικές ιδιότητες, επισημαίνοντας την ανάγκη για περαιτέρω έρευνες. Κάποια συμπεράσματα σχετικά με την αποδοτικότητα αυτών των υλικών παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία και προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντικές έρευνες, οι οποίες μπορούν να συμβάλλουν στην περαιτέρω βελτίωση της χρήσης τους στις κατασκευές.

Λέξεις κλειδιά: Γεωπολυμερή, Κονιάματα ενισχύσεων, Calcium Sulfoaluminate Cement, Αλκαλικά ενεργοποιούμενα υλικά, Μηχανικές ιδιότητες, Εργασιμότητα, Χρόνος πήξης

Diploma Thesis

ENVIRONMENTALLY FRIENDLY MORTARS FOR USE IN THE REINFORCEMENT OF EXISTING STRUCTURES: INVESTIGATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

Gialoglou Nikoleta

Neonaki Aikterini

UNIVERSITY OF THESSALY, DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, 2025

Abstract

This thesis aims at the study and development of environmentally friendly mortars, which can be used for strengthening of existing structures. Portland concrete has been established as the staple material in modern construction; however, the high amount of CO₂ emissions associated with its production have generated significant interest in finding sustainable alternatives. The experimental part of this thesis focuses on the production of 19 Calcium Sulfoaluminate Cement (CSA)-based mortars and 19-geopolymer based mortars. Various raw materials, including metakaolin, rotary kiln dust, fly ash and prepackaged CSA mortar were used to prepare the test specimens. Additionally, quartz sand, alkaline activator, citric acid and polypropylene fibers were incorporated. The study examined the effects of parameters such as material ratio, fiber content and aggregate gradation. Both fresh and hardened properties of the mortars were studied, including workability, setting time, density, flexural and compressive strength. The aim of the experimental work was to determine optimal mortar compositions that meet the performance requirements for structural strengthening. The results for CSA mortars were very promising, demonstrating satisfactory mechanical properties, suggesting they are reliable solutions. On the other hand, geopolymer mortars exhibited a not so good mechanical performance, highlighting the need for further investigations. Some conclusions are presented in this study, along with recommendations for future investigations that aim to enhance the use of these materials in reinforcement applications.

Keywords: *Geopolymers, Reinforcement mortars, Calcium Sulfoaluminate Cement, Alkali-activated materials, Mechanical properties, Workability, Durability, Setting time*

Πίνακας Περιεχομένων

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΚΙΝΗΤΡΟ ΚΑΙ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	1
1.2 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.....	1
1.3 ΣΚΟΠΟΣ	3
1.4 ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΤΟΥ ΤΟΜΟΥ.....	3
2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	5
2.1 ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ (IAM)	5
2.1.1 ΙΣΤΟΡΙΑ	5
2.1.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ IAM.....	7
2.1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ IAM	9
2.2 ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ	12
2.3 ΤΣΙΜΕΝΤΟ PORTLAND	13
2.4 ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΗ	15
2.4.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	15
2.4.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΩΝ	16
2.4.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΩΝ	17
2.4.4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΩΝ.....	18
2.4.5 ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	20
2.5 CALCIUM SULFOALUMINATE CEMENTS (CSA)	22
2.5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	22
2.5.2 BELITIC CALCIUM SULFOALUMINATE CEMENT	23
2.5.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ CSA	24
2.5.4 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ	25
2.5.5 ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΟΚΩΝ ΜΕ CSA.....	25
2.5.6 ΧΡΗΣΕΙΣ CSA	29
3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ.....	35
3.1 ΥΛΙΚΑ.....	35
3.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ	36
3.2.1 ΑΜΜΟΣ	36
3.2.2 ΙΝΕΣ	37
3.2.3 ΑΛΚΑΛΙΚΟ ΔΙΑΛΥΜΑ.....	38
3.2.4 ΚΙΤΡΙΚΟ ΟΞΥ	38
3.2.5 ΜΕΤΑΚΑΟΛΙΝΗ Μ	39
3.2.6 ΣΚΟΝΗ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΚΑΜΙΝΩΝ.....	41
3.2.7 ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ.....	42

3.2.8ΚΟΝΙΑΜΑ BCSA	44
3.3 ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	45
3.3.1Σειρά δοκιμών Α.....	45
3.3.2Σειρά δοκιμών Β.....	48
3.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	51
3.5 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ	56
3.5.1ΠΡΩΤΟ ΜΕΡΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	56
3.5.2ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΕΡΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	60
4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ	64
4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΩΤΟΥ ΜΕΡΟΥΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	64
4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΜΕΡΟΥΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	86
4.2.1ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ	86
4.2.2ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ.....	98
4.3 ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΜΕΙΓΜΑΤΑ.....	111
5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	115

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1 Κατασκευές τοιχοποιίας με ferrocemento (1944). (Tullia Lori, 2020).....	5
Σχήμα 2.2 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα. (R. Nivetha et al., 2023).....	6
Σχήμα 2.3 Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα. (Koutas et al., 2019).....	7
Σχήμα 2.4 Ινοπλέγματα.....	8
Σχήμα 2.5 Πείραμα κάμψης αμφιέρειστης δοκού. (Kurtz & Balaguru, 2001).....	9
Σχήμα 2.6 Ενίσχυση αμφιέρειστης δοκού με μανδύα. (Kurtz & Balaguru, 2001)	9
Σχήμα 2.7 Απλοποιημένο διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης ενισχυμένου δοκιμίου με IAM σε κάμψη (Koutas L. et al., 2019).	10
Σχήμα 2.8 Εφαρμογή σύνθετου υλικού για ενίσχυση σε τοιχοποιία (Xuan Wang et al., 2019).	11
Σχήμα 2.9 i)Επάλειψη υποστρώματος με κονίαμα ii)Περιτύλιξη Πλέγματος iii)Τελική επίστρωση με τσιμεντοκονία (Ζυγούρης Κ., 2007).....	12
Σχήμα 2.10 Παραγωγή γεωπολυμερών. (A. Hassan et al., 2019)	17
Σχήμα 2.11 Πλεονεκτήματα γεωπολυμερούς σκυροδέματος. (A. L. Almutairi et al., 2021).....	21
Σχήμα 2.12 Δοκιμές μακροχρόνιας κάμψης δοκών. (M. Leone et al., 2023).....	27
Σχήμα 2.13 (α) Παραμόρφωση μέσου ανοίγματος συναρτήσει του χρόνου έκθεσης και (β) παραμόρφωση μέσου ανοίγματος σε 0, 365 και 462 ημέρες. (M. Leone et al., 2023)	28
Σχήμα 2.14 Πλάτη ρωγμής. (M. Leone et al., 2023).....	28
Σχήμα 2.15 Τροποποιημένη διάταξη δοκιμής δοκού. (S. Cholostiakow et al., 2024)	33
Σχήμα 3.1 Μηχανή κοσκινίσματος ELE Sieve Shaker.....	36
Σχήμα 3.2 Ίνες πολυπροπυλενίου PP.....	38
Σχήμα 3.3 Κιτρικό οξύ.	39
Σχήμα 3.4 Μετακαολίνη M.....	40
Σχήμα 3.5 Σκόνη Π/Κ.	41
Σχήμα 3.6 Ιπτάμενη τέφρα.	43
Σχήμα 3.7 Κονίαμα BCSA.....	44
Σχήμα 3.8 Μορφή ονοματολογίας δοκιμών Σειράς Α.	45
Σχήμα 3.9 Μορφή ονοματολογίας δοκιμών Σειράς Β.	48
Σχήμα 3.10 α) Ζυγαριά πάγκου β) Ζυγαριά δαπέδου.....	52
Σχήμα 3.11 Ζύγισμα υλικών στο εργαστήριο.....	52
Σχήμα 3.12 Ανάμειξη υλικών σε αναδευτήρα.	53
Σχήμα 3.13 Γέμισμα καλουπιών.	54
Σχήμα 3.14 Ξεκαλούπωμα δοκιμίων.....	55
Σχήμα 3.15 Συντήρηση δοκιμίων σε δεξαμενή νερού.....	56
Σχήμα 3.16 Δοκιμές εργασιμότητας σε τράπεζα εξάπλωσης.	57
Σχήμα 3.17 Μέτρηση μάζας σε κυλινδρικό καλούπι.	58

Σχήμα 3.18 Προετοιμασία για μέτρηση χρόνου πήξης.....	59
Σχήμα 3.19 Δοκίμια πριν τη μέτρηση των διαστάσεων τους.....	60
Σχήμα 3.20 Υδραυλική πρέσα πριν (i) και μετά (ii) την αστοχία δοκιμίου.....	62
Σχήμα 3.21 Δοκίμια πριν (i) και μετά (ii) τη δοκιμή σε θλίψη.....	63
Σχήμα 4.1 Διάγραμμα ποσοστών FA-D με χρόνο πήξης.....	65
Σχήμα 4.2 Διάγραμμα λόγων B:S με χρόνο πήξης.....	66
Σχήμα 4.3 Διάγραμμα ποσοστών κυτταρικού οξέος με χρόνο πήξης.....	68
Σχήμα 4.4 Διάγραμμα θερμοκρασίας νερού με χρόνο πήξης.....	69
Σχήμα 4.5 Διάγραμμα ποσοστών FA-D με τιμή εξάπλωσης στα 5 λεπτά.....	71
Σχήμα 4.6 Διάγραμμα αρχικού χρόνου πήξης και εξάπλωσης για δοκίμια με διαφορετικά ποσοστά FA-D.....	72
Σχήμα 4.7 Διάγραμμα λόγων B:S με τιμή εξάπλωσης στα 5 λεπτά.....	74
Σχήμα 4.8 Διάγραμμα αρχικού χρόνου πήξης και εξάπλωσης για δοκίμια με διαφορετικούς λόγους B/S.....	75
Σχήμα 4.9 Διάγραμμα ποσοστών ινών με τιμή εξάπλωσης στα 5 λεπτά.....	76
Σχήμα 4.10 Διάγραμμα ποσοστών κυτταρικού οξέος με τιμές εξάπλωσης.....	78
Σχήμα 4.11 Διάγραμμα ποσοστών ινών με τιμές εξάπλωσης.....	79
Σχήμα 4.12 Διάγραμμα λόγων N/T με τιμές εξάπλωσης.....	81
Σχήμα 4.13 Διάγραμμα ποσοστών άμμου με τιμές εξάπλωσης.....	82
Σχήμα 4.14 Διάγραμμα λόγων B:S με καμπτική αντοχή 28 ημερών.....	87
Σχήμα 4.15 Διάγραμμα ποσοστών ινών με καμπτική αντοχή 28 ημερών.....	88
Σχήμα 4.16 Διάγραμμα καμπτικής αντοχής GP_optimal συναρτήσει του χρόνου (days).....	89
Σχήμα 4.17 Διάγραμμα ποσοστών κυτταρικού οξέος με καμπτική αντοχή 7 και 28 ημερών.....	91
Σχήμα 4.18 Διάγραμμα ποσοστών ινών με καμπτική αντοχή 7 και 28 ημερών.....	93
Σχήμα 4.19 Διάγραμμα λόγων N/T με καμπτική αντοχή 7 και 28 ημερών.....	94
Σχήμα 4.20 Διάγραμμα ποσοστών άμμου με καμπτική αντοχή 7 και 28 ημερών.....	96
Σχήμα 4.21 Διάγραμμα καμπτικής αντοχής 28 ημερών και εξάπλωσης για διαφορετικά ποσοστά άμμου.....	97
Σχήμα 4.22 Διάγραμμα λόγων B:S με θλιπτική αντοχή 28 ημερών.....	99
Σχήμα 4.23 Διάγραμμα ποσοστών ινών με θλιπτική αντοχή 28 ημερών.....	100
Σχήμα 4.24 Διάγραμμα θλιπτικής αντοχής GP_optimal συναρτήσει του χρόνου (days).....	102
Σχήμα 4.25 Διάγραμμα ποσοστών κυτταρικού οξέος με θλιπτική αντοχή 7 και 28 ημερών.....	104
Σχήμα 4.26 Διάγραμμα ποσοστών ινών με θλιπτική αντοχή 7 και 28 ημερών.....	105
Σχήμα 4.27 Διάγραμμα λόγων N/T με θλιπτική αντοχή 7 και 28 ημερών.....	107
Σχήμα 4.28 Διάγραμμα ποσοστών άμμου με θλιπτική αντοχή 7 και 28 ημερών.....	109
Σχήμα 4.29 Διάγραμμα θλιπτικής αντοχής 28 ημερών και εξάπλωσης για διαφορετικά ποσοστά άμμου.....	110
Σχήμα 4.30 Σύγκριση καμπτικής αντοχής GP_optimal με RS_optimal.....	113
Σχήμα 4.31 Σύγκριση θλιπτικής αντοχής GP_optimal με RS_optimal.....	113

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 Κύρια οξείδια χημικής σύστασης τσιμέντου Portland.	14
Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά ινών πολυπροπυλενίου (PP).....	37
Πίνακας 3.2 Χημική σύσταση πυριτικού καλίου.	38
Πίνακας 3.3 Χημική ανάλυση μετακαολίνης.....	40
Πίνακας 3.4 Χημική σύσταση Σκόνης Π/Κ.	42
Πίνακας 3.5 Χημική σύσταση ιπτάμενης τέφρας.	43
Πίνακας 3.6 Κύρια συστατικά κονιάματος BCSA.	45
Πίνακας 3.7 Αναλογίες υλικών για ποσοστά FA-D.	46
Πίνακας 3.8 Αναλογίες υλικών για λόγους B:S.	47
Πίνακας 3.9 Αναλογίες υλικών για ποσοστά ινών.	47
Πίνακας 3.10 Αναλογίες υλικών για ποσοστά κυτρινού οξέος.	49
Πίνακας 3.11 Αναλογίες υλικών για ποσοστά ινών.	49
Πίνακας 3.12 Αναλογίες υλικών για ποσοστά ινών.	50
Πίνακας 3.13 Αναλογίες υλικών για ποσοστά προσθήκης άμμου.	50
Πίνακας 3.14 Αναλογίες υλικών για διαφορετικές θερμοκρασίες νερού.....	51
Πίνακας 4.1 Τιμές χρόνου πήξης για ποσοστά FA-D.....	64
Πίνακας 4.2 Τιμές χρόνου πήξης για λόγους B:S.....	66
Πίνακας 4.3 Τιμές χρόνου πήξης για ποσοστά κυτρινού οξέος.....	67
Πίνακας 4.4 Τιμές χρόνου πήξης για θερμοκρασίες νερού.	68
Πίνακας 4.5 Τιμές εξάπλωσης 5 λεπτών για ποσοστά FA-D.	70
Πίνακας 4.6 Τιμές εξάπλωσης 5 λεπτών για λόγους B:S.....	73
Πίνακας 4.7 Τιμές εξάπλωσης 5 λεπτών για ποσοστά ινών.	76
Πίνακας 4.8 Τιμές εξάπλωσης 5, 15 και 30 min για ποσοστά κυτρινού οξέος.....	77
Πίνακας 4.9 Τιμές εξάπλωσης 5, 15 και 30 λεπτών για ποσοστά ινών.	79
Πίνακας 4.10 Τιμές εξάπλωσης 5, 15 και 30 min για λόγους N/T.	80
Πίνακας 4.11 Τιμές εξάπλωσης 5, 15 και 30 min για ποσοστά προσθήκης άμμου.....	82
Πίνακας 4.12 Τιμές πυκνότητας κονιαμάτων Σειράς A.	84
Πίνακας 4.13 Τιμές πυκνότητας κονιαμάτων Σειράς B.	84
Πίνακας 4.14 Τιμές καμπτικής αντοχής 28 ημερών για λόγους B:S.	86
Πίνακας 4.15 Τιμές καμπτικής αντοχής 28 ημερών για ποσοστά ινών.....	88
Πίνακας 4.16 Τιμές καμπτικής αντοχής 7, 14 και 28 ημερών για GP_optimal.	89
Πίνακας 4.17 Τιμές καμπτικής αντοχής 7 και 28 ημερών για ποσοστά κυτρινού οξέος.	91
Πίνακας 4.18 Τιμές καμπτικής αντοχής 7 και 28 ημερών για ποσοστά ινών.	92
Πίνακας 4.19 Τιμές καμπτικής αντοχής 7 και 28 ημερών για λόγους N/T.	94
Πίνακας 4.20 Τιμές καμπτικής αντοχής 7 και 28 ημερών για ποσοστά προσθήκης άμμου.	95

Πίνακας 4.21 Τιμές θλιπτικής αντοχής 28 ημερών για λόγους B:S.	98
Πίνακας 4.22 Τιμές θλιπτικής αντοχής 28 ημερών για ποσοστά ινών.	100
Πίνακας 4.23 Τιμές θλιπτικής αντοχής 7, 14 και 28 ημερών για GP_optimal.	101
Πίνακας 4.24 Τιμές θλιπτικής αντοχής 7 και 28 ημερών για ποσοστά κυτταρικού οξέος.....	103
Πίνακας 4.25 Τιμές θλιπτικής αντοχής 7 και 28 ημερών για ποσοστά ινών.....	105
Πίνακας 4.26 Τιμές θλιπτικής αντοχής 7 και 28 ημερών για λόγους N/T.....	106
Πίνακας 4.27 Τιμές θλιπτικής αντοχής 7 και 28 ημερών για ποσοστά προσθήκης άμμου.	108
Πίνακας 4.28 Αναλογίες βέλτιστου μείγματος Σειράς A.	111
Πίνακας 4.29 Αναλογίες βέλτιστου μείγματος Σειράς B.....	112

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΚΙΝΗΤΡΟ ΚΑΙ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Η ενίσχυση και αναβάθμιση των υφιστάμενων κατασκευών έχει καταστεί ιδιαίτερα σημαντική τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερα στην Ελλάδα που οι περισσότερες από αυτές έχουν ανεγερθεί πολλές δεκαετίες πριν, χωρίς να δίνεται μεγάλη βαρύτητα σε ζητήματα ανθεκτικότητας. Η πλειονότητα των κατασκευών αυτών εξακολουθούν να είναι σε χρήση μέχρι και σήμερα, παρόλο που η θεωρητική διάρκεια ζωής τους έχει εξαντληθεί. Επιπλέον, η έκθεση τους σε ακραίες καιρικές συνθήκες και έντονα σεισμικά φορτία έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής τους στο χρόνο. Κρίνεται αναγκαία, συνεπώς, η τακτική συντήρηση και, σε πολλές περιπτώσεις, η ενίσχυση των υφιστάμενων δομών. Οι μηχανικοί καλούνται να βρουν λύσεις που βελτιώνουν τη μακροχρόνια αντοχή, την ασφάλεια και την οικονομική βιωσιμότητα των κατασκευών, μειώνοντας ταυτόχρονα τις απαιτήσεις για πιθανές επισκευές. Λαμβάνοντας υπόψιν όλες αυτές τις παραμέτρους, ιδανικότερη λύση αποτελεί η ενίσχυση των δομικών στοιχείων των κατασκευών, η οποία δεν περιορίζεται μόνο στην καλύτερη σεισμική απόκριση, αλλά συμβάλλει και στην ασφαλή ανάληψη φορτίων με βάση τους σύγχρονους κανονισμούς.

1.2 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Τα σύνθετα υλικά, που εμφανίστηκαν στα μέσα του 20ου αιώνα, αποτελούν πλέον ένα από τα ερευνητικά θέματα της σύγχρονης τεχνολογίας. Η αυξημένη χρήση και δημοτικότητα τους στον τομέα της μηχανικής και της επιστήμης των υλικών οφείλεται στον εξαιρετικό συνδυασμό ιδιοτήτων, όπως η υψηλή δυσκαμψία, η ανθεκτικότητα και το χαμηλό βάρος, καθώς και η αντίσταση στη διάβρωση. Ένα σύνθετο υλικό συνήθως αποτελείται από μία βασική μήτρα ή συνδετικό υλικό, που περιβάλλει και συγκρατεί το ενισχυτικό υλικό ή οπλισμό, το οποίο είναι συνήθως ισχυρότερο. Το ενισχυτικό αυτό μπορεί να αποτελείται από σωματίδια, ίνες ή άλλα θραύσματα φυσικών ή συνθετικών

υλικών. Η μήτρα παρέχει ιδιότητες όπως η ολκιμότητα, η δυνατότητα μορφοποίησης και η θερμική αγωγιμότητα, ενώ η ενίσχυση παρέχει αντοχή και δυσκαμψία, μεταφέροντας το εφαρμοζόμενο φορτίο (D. K. Rajak et al., 2019).

Τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες γνωστά ως Ινοπλισμένα Πολυμερή - ΙΟΠ (Fiber Reinforced Polymers - FRP) είναι μια προηγμένη κατηγορία σύνθετων υλικών που αποτελούνται από μια πολυμερική μήτρα, ενισχυμένη με ίνες γυαλιού, άνθρακα ή αραμίδιου (Zaman et al., 2013). Ένα κοινό υλικό μήτρας είναι μια εποξειδική ρητίνη. Το εποξειδικό είναι μια γενική ονομασία για τα πολυμερή θερμικής πήξης υψηλής διασύνδεσης που επιτυγχάνουν τη διασύνδεση μέσω ενός μηχανισμού ανοίγματος δακτυλίου. Χρησιμοποιούνται ευρέως στην κατασκευαστική βιομηχανία λόγω των εξαιρετικών τους χαρακτηριστικών, όπως υψηλή αντοχή, χαμηλό βάρος, αντοχή στη διάβρωση και προσαρμοστικότητα στις απαιτήσεις της μηχανικής.

Τα FRP έχουν βρει εφαρμογή κυρίως στις ενισχύσεις κατασκευών, όπου χρησιμοποιούνται για την αποκατάσταση και ενίσχυση υφιστάμενων δομών. Οι βασικές εφαρμογές τους περιλαμβάνουν ενισχύσεις κάμψης και διάτμησης, περιμετρικές ενισχύσεις σε κολώνες και αντισεισμική ενίσχυση (L. Van Den Eijnde et al., 2003).

Παρ' όλα αυτά, η χρήση τους παρουσιάζει και ορισμένα προβλήματα, κυρίως λόγω των οργανικών ρητινών που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των ινών. Η ευαισθησία τους στις υψηλές θερμοκρασίες, η αδυναμία εφαρμογής τους σε υγρές επιφάνειες, το υψηλό κόστος των ρητινών και οι πιθανές τους επιπτώσεις στην υγεία των εργαζομένων και στο περιβάλλον είναι κάποιοι περιορισμοί που καθιστούν δύσκολη την εφαρμογή τους σε ορισμένες περιπτώσεις.

Για την αντιμετώπιση αυτών των περιορισμών, μια πιθανή λύση αποτελούν τα Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα – IAM (Textile Reinforced Mortars – TRM). Τα IAM αποτελούνται από πλέγματα ινών υψηλής αντοχής και από το ανόργανο συνδετικό υλικό. Οι ίνες, που μπορεί να κατασκευάζονται από υλικά όπως άνθρακας, γυαλί ή βασάλτης, είναι συνήθως πλεγμένες σε μια ή δύο διευθύνσεις, προσφέροντας ενίσχυση τόσο στην εφελκυστική αντοχή όσο και στην αντοχή σε διάτμηση. Το πάχος των πλεγμάτων είναι μικρό, ενώ το μέγεθος των πόρων μεταξύ των ινών διευκολύνει τη

διείσδυση του κονιάματος (Yousef A. Al-Salloum et al., 2011). Το κονίαμα που χρησιμοποιείται στα TRM είναι τσιμεντοειδές, συχνά τροποποιημένο με πολυμερή (polymer-modified mortar) για βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων και της συνάφειάς του. Περιλαμβάνει χαρακτηριστικά όπως υψηλή αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό, ικανότητα πρόσφυσης στο ύφασμα και στο υπόστρωμα σκυροδέματος και διάχυση υδρατμών, που επιτρέπει τη “διαπνοή” της κατασκευής (Triantafyllou et al., 2007).

Αυτοί είναι κάποιοι από τους λόγους που καθιστούν τα TRM μια εναλλακτική λύση για εφαρμογές ενίσχυσης και αποκατάστασης κατασκευών, ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπου οι θερμοκρασιακές συνθήκες, η υγρασία και η οικονομία αποτελούν κρίσιμους παράγοντες.

1.3 ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση και αξιολόγηση κονιαμάτων Calcium Sulfoaluminate Cements (CSA) αλλά και γεωπολυμερικής σύστασης, τα οποία αποτελούν πιο βιώσιμη εναλλακτική του τσιμέντου Portland, προκειμένου να ελεγχθεί αν είναι ικανά να χρησιμοποιηθούν για την ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές που αφορούσαν την αξιολόγηση της εργασιμότητας, του χρόνου πήξης, της πυκνότητας και των μηχανικών ιδιοτήτων (καμπτικής και θλιπτικής αντοχής) των δοκιμίων της διερεύνησης. Χρησιμοποιήθηκαν υλικά όπως νερό, πυριτικό κάλιο, ιπτάμενη τέφρα (FA), σκόνη Π/Κ (D), χαλαζιακή άμμος, κονία CSA, μετακαολίνη, ίνες πολυπροπυλενίου και κιτρικό οξύ. Για τα δοκίμια γεωπολυμερικής σύστασης, εξετάστηκε πως επηρεάζουν τις ιδιότητές τους παράμετροι όπως η ποσότητα FA-D, το ποσοστό των ινών και η προσθήκη άμμου στο μείγμα. Στα δοκίμια με κονία CSA οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν το ποσοστό κιτρικού οξέος, ο λόγος Νερού/Τσιμέντου, η προσθήκη χαλαζιακής άμμου και το ποσοστό των ινών. Για την κάθε κατηγορία κονιαμάτων δημιουργήθηκαν 19 διαφορετικά μείγματα.

1.4 ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΤΟΥ ΤΟΜΟΥ

Το παρόν κεφάλαιο ακολουθούν άλλα τέσσερα τα οποία δομούνται ως εξής:

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση στην οποία παρουσιάζονται οι κύριοι τρόποι ενίσχυσης των κατασκευών, καθώς και τα χαρακτηριστικά των βασικών κονιαμάτων.

Κεφάλαιο 3: Ανάλυση των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις αναμείξεις και περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας.

Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα από τις μετρήσεις και τις δοκιμές που υποβλήθηκαν τα δοκίμια.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και προτάσεις για πιθανές μελλοντικές έρευνες.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ (IAM)

2.1.1 ΙΣΤΟΡΙΑ

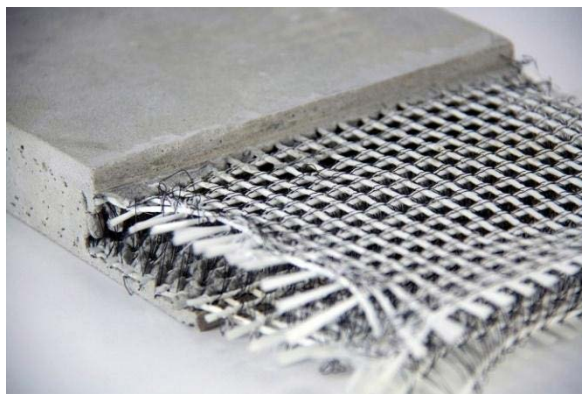
Η ιδέα της ενσωμάτωσης ενός πλέγματος υψηλής αντοχής σε μια μήτρα κονιάματος χρονολογείται από τα τέλη της δεκαετίας του 1840. Ο Josef-Louis Lambot πρότεινε τη χρήση συρμάτων σιδήρου ενσωματωμένων σε κονίαμα τσιμέντου για την κατασκευή σκαφών, δεξαμενών νερού κ.λπ. Σχεδόν έναν αιώνα αργότερα, ο Pier Luigi Nervi χρησιμοποίησε αποτελεσματικά το "ferrocemento" (Σχήμα 2.1), ένα είδος οπλισμένου κονιάματος που αποτελείται από γύψο εφαρμοσμένο πάνω από ένα ή περισσότερα στρώματα λεπτού χαλύβδινου πλέγματος, για την κατασκευή λεπών, σκληρών κελυφωτών κατασκευών για στέγες ή δεξαμενές νερού.



Σχήμα 2.1 Κατασκευές τοιχοποιίας με ferrocemento (1944). (Tullia Lori, 2020)

Η τεχνική αυτή καταχωρήθηκε το 1943 στην Ιταλία και χρησιμοποιήθηκε ευρέως σε αρκετά γνωστά έργα μηχανικής (Tullia Lori, 2020).

Πιο πρόσφατα στην Ευρώπη, αναπτύχθηκε μια παρόμοια τεχνολογία, γνωστή ως Textile Reinforced Concrete (TRC). Τα συστήματα TRC (Σχήμα 2.2) χρησιμοποιούν ανθεκτικά υφάσματα από γυαλί, άνθρακα ή αραμίδιο, σε συνδυασμό με σκυρόδεμα υψηλών αντοχών (De Santis S. et al., 2017). Χάρη στην υψηλή αντοχή τους τόσο σε θλίψη όσο και σε εφελκυσμό, κατασκευάζονται προκατασκευασμένα λεπτά δομικά στοιχεία, όπως μόνιμα καλούπια, προσόψεις και πεζογέφυρες.



Σχήμα 2.2 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα. (R. Nivetha et al., 2023)

Ο όρος αυτός εισήχθη έπειτα από μελέτες και χρησιμοποιήθηκε από τους Hegger and Voss (2008) στην Γερμανία, στα ευρενητικά κέντρα RWTH Aachen University. Λόγω όμως των λεπτόκοκκων αδρανών στις ανόργανες μήτρες δεν μπορούμε να τις βάλουμε στην ίδια κατηγορία με το σκυρόδεμα.

Κάποια χρόνια μετά στις Ηνωμένες Πολιτείες, δόθηκε η ονομασία Ινοπλέγματα σε Τσιμεντοειδή Μήτρα (Fabric Reinforced Cementitious Matrix - FRCM) και χρησιμοποιήθηκε από πολλούς ερευνητές μέχρι και πρόσφατα. Καθώς όμως η μήτρα δεν αποτελείται πάντα από τσιμεντοειδή κονιάματα η ορολογία αυτή δεν είναι ακριβής. Γι' αυτό στην παρούσα διπλωματική υιοθετήθηκε ο όρος Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM).

Η διαδικασία παραγωγής του τσιμέντου συμβάλλει στην αύξηση των εκπομπών CO₂ και άρα έχει δυσμενές περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Για αυτό τα τελευταία χρόνια ερευνήθηκαν υλικά φιλικά προς το περιβάλλον, γνωστά ως γεωπολυμερή, με σκοπό την χρήση τους σε συνδυασμό με το σκυρόδεμα ώστε να αποφευχθούν οι τόσο μεγάλες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

2.1.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ IAM

Όπως προαναφέρθηκε, τα IAM αποτελούνται από δύο επιμέρους υλικά (Σχήμα 2.3):

(α) τα πλέγματα ινών υψηλής αντοχής

(β) το ανόργανο συνδετικό υλικό

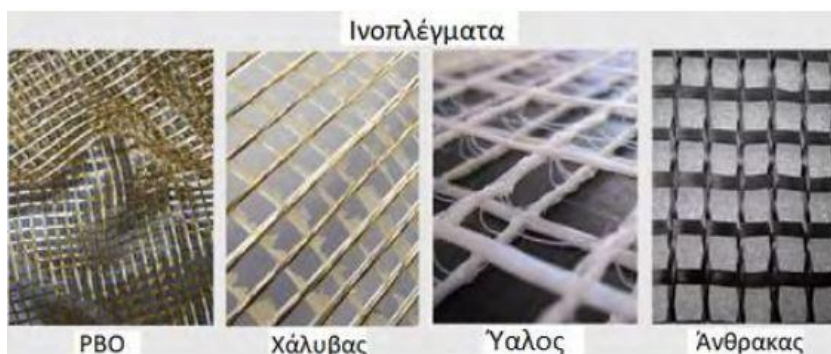


Σχήμα 2.3 Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα. (Koutas et al., 2019)

I. Ινοπλέγματα

Τα πλέγματα ινών παίζουν τον ρόλο του οπλισμού των IAM. Πρόκειται για «μανδύες» από δεσμίδες ινών υψηλής αντοχής που είναι υφασμένες ή ραμμένες σε τουλάχιστον δύο ορθογώνιες κατευθύνσεις, δημιουργώντας μια γεωμετρία ανοικτού πλέγματος (Σχήμα 2.4). Τα ανοίγματα αυτά υπάρχουν για την διείσδυση της μήτρας (κονιάματος) ανάμεσά τους, εξασφαλίζοντας την ανάπτυξη της μηχανικής εμπλοκής μεταξύ του οπλισμού και της ανόργανης μήτρας.

Οι ίνες μπορούν να είναι κατασκευασμένες από γυαλί, άνθρακα, βασάλτη, αραμίδιο, πολυπροπυλένιο (PP), πολυπαραφαινυλένιο βενζοβισοξαζόλιο (PBO) ή χάλυβα και έχουν υψηλή εφελκυστική αντοχή (>1500 MPa), με τις ίνες άνθρακα να υπερτερούν σε εφελκυστική αντοχή (>3000 MPa) και μέτρο ελαστικότητας.



Σχήμα 2.4 Ινοπλέγματα.

Αν και το πλέγμα από άνθρακα έχει καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά, λόγω του υψηλού κόστους και της διαδικασίας παραγωγής, συχνά προτιμάται η χρήση ινών από άλλα υλικά.

II. Ανόργανη μήτρα

Η ανόργανη μήτρα, εκτός του ότι λειτουργεί ως συνδετικό υλικό που μεταφέρει τις εφελκυστικές δυνάμεις στις ίνες δρσ και ως συγκολλητικό μέσο που συνδέει το ΙΑΜ με το υπόστρωμα. Επιπλέον προστατεύει και το πλέγμα καθώς δημιουργεί μια στρώση. Γι'αυτό το λόγο το ανόργανο μητρικό υλικό πρέπει να πληροί κάποιες προϋποθέσεις όπως:

- Υψηλή εργασιμότητα
- Ανθεκτικότητα σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες
- Υψηλό ιξώδες
- Αργό ρυθμό σκλήρυνσης
- Υψηλή συνάφεια για την αποφυγή πρόωρης αποκόλλησης

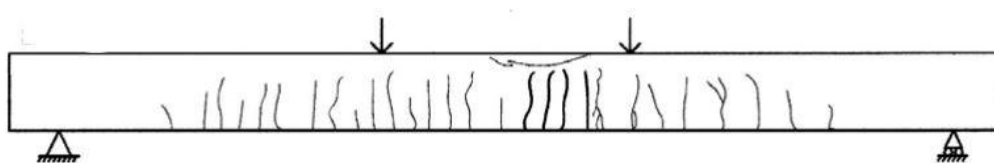
Τα κονιάματα που χρησιμοποιούνται περισσότερο σαν μήτρα στα ΙΑΜ είναι τα τσιμεντοειδή. Τα τελευταία χρόνια όμως έχουν έρθει στο επίκεντρο των ερευνών τα γεωπολυμερή κονιάματα καθώς, εκτός το ότι είναι φιλικά προς το περιβάλλον, η προσθήκη κλάσματος πολυμερών στο κονίαμα βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες και συγκεκριμένα την διατμητική τάση συνάφειας.

2.1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΙΑΜ

Η χρήση των ΙΑΜ για την ενίσχυση και αποκατάσταση υπαρχουσών κατασκευών αποτελεί πλέον μία από τις πιο σημαντικές και ευρέως εξεταζόμενες μεθόδους. Τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερες έρευνες ασχολούνται με την συμπεριφορά των ενισχυμένων μελών εξετάζοντας τις μηχανικές τους ιδιότητες υπό διαφόρων ειδών καταπονήσεις αλλά και τους τρόπους και μηχανισμούς αστοχίας τους.

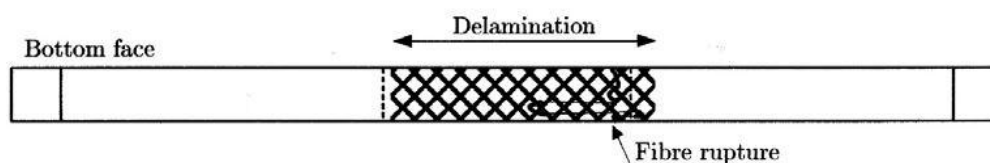
α. Ενίσχυση δοκών

Συνήθως αυτού του είδους η ενίσχυση εφαρμόζεται σε δοκούς (Σχήμα 2.5) και πλάκες με ανεπάρκεια στην κρίσιμη (μεσαία) διατομή.



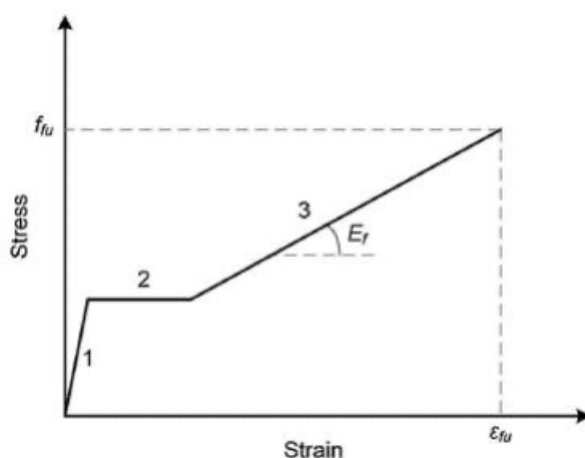
Σχήμα 2.5 Πείραμα κάμψης αμφιέριστης δοκού. (Kurtz & Balaguru, 2001)

Τα υλικά των ΙΑΜ έχουν εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή και γραμμικά ελαστική συμπεριφορά μέχρι την ψαθυρή αστοχία. Γι' αυτό τοποθετούνται στο εφελκυσμένο πέλμα με σκοπό την ανάληψη μέρους των τάσεων. Η πειραματική μελέτη σύμφωνα με τους (Kurtz & Balaguru, 2001), γίνεται με την κάμψη αμφιέριστης δοκού στην οποία έχει συγκολληθεί μανδύας ανόργανης μήτρας στο εφελκυσμένο (κάτω) πέλμα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.6):



Σχήμα 2.6 Ενίσχυση αμφιέριστης δοκού με μανδύα. (Kurtz & Balaguru, 2001)

Έρευνες έχουν δείξει ότι στοιχεία ενισχυμένα με ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας είχαν μικρότερο φορτίο διαρροής, μικρότερη δυσκαμψία μετά τη ενίσχυση, αλλά και μεγαλύτερη παραμορφωσιμότητα κατά την αστοχία, συγκριτικά με τα αντίστοιχα με πολυμερική μήτρα (Kurtz & Balaguru, 2001). Τα χαρακτηριστικά αυτά αποδίδονται στην ελαφρά μειωμένη διατμητική συνεργασία μεταξύ εξωτερικών οπλισμών και σκυροδέματος στην περίπτωση των IAM συγκριτικά με τα ΙΟΠ. Συγκεκριμένα, έχει προκύψει (Σχήμα 2.7) ότι η ενίσχυση μελών με IAM οδηγεί σε αύξηση του φορτίου αστοχίας κατά 10-20 % (Wiberg A., 2003).



Σχήμα 2.7 Απλοποιημένο διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης ενισχυμένου δοκιμίου με IAM σε κάμψη (Koutas L. et al., 2019).

b. Ενίσχυση Τοιχοποιίας

Οι κατασκευές φέρουσας τοιχοποιίας είναι πολύ ευαίσθητες σε σεισμική καταπόνηση. Γι' αυτό το λόγο και λόγω της παλαιότητας τους, συνήθως καθίσταται αναγκαία η ενίσχυση τους. Η μέθοδος των IAM έχει εφαρμοστεί κι εδώ με σημαντικά πλεονεκτήματα (Σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.8 Εφαρμογή σύνθετου υλικού για ενίσχυση σε τοιχοποιία (Xuan Wang et al., 2019).

Σύμφωνα με μία πειραματική έρευνα του Πανεπιστημίου της Πάτρας (Papanicolaou C. et al. 2007), κατά την οποία τοιχοποιίες ενισχύθηκαν αμφίπλευρα με μανδύες IAM, τα ενισχυμένα στοιχεία είχαν αυξημένη παραμορφωσιμότητα και αντοχή σε σχέση με τα αρχικά χωρίς ενίσχυση. Επιπλέον τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι οι πιο συχνοί τρόποι αστοχίας είναι οι εξής:

- Καταστροφή του μέλους της τοιχοποιίας και αποκόλλησης του μανδύα.
- Θραύση των ινών των σύνθετων υλικών.

c. Περίσφιγξη υποστυλωμάτων

Τα υποστυλώματα αποτελούν τα πιο κρίσιμα δομικά στοιχεία των κατασκευών από Ο.Σ. Στους σύγχρονους κανονισμούς θεωρείται ότι ακόμη και με σημαντικές βλάβες σε μια κατασκευή, τα υποστυλώματα συνεχίζουν να μεταφέρουν κατακόρυφα φορτία με αποτέλεσμα η κατασκευή να μην καταρρέει. Γι' αυτό το λόγο η ανάγκη ενίσχυσης των υποστυλωμάτων, τα οποία σχεδιάστηκαν με παλιότερους κανονισμούς, είναι σημαντικότερη και προηγείται έναντι της ενίσχυσης των υπολοίπων μελών.

Ένας από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους ενίσχυσης των υποστυλωμάτων είναι η περίσφιγξη του σκυροδέματος με IAM. Αυτή η τεχνική πραγματοποιείται με την εξωτερική επικόλληση ενός μανδύα ΙΟΠ ή IAM εγκάρσια στο διαμήκη άξονα του στοιχείου (Σχήμα 2.9).



Σχήμα 2.9 i)Επάλειψη υποστρώματος με κονίαμα ii)Περιτύλιξη Πλέγματος iii)Τελική επίστρωση με τσιμεντοκονία (Ζυγούρης Κ., 2007).

Στην περίπτωση της περίσφιγξης, αναπτύσσεται μια περίπλοκη κατάσταση τάσεων, που χαρακτηρίζεται από αξονική θλίψη και περιφερειακή τάση. Ουσιαστικά ο μανδύας ενεργοποιείται εμποδίζοντας την εγκάρσια διόγκωση του σκυροδέματος και παραλαμβάνοντας τις περιφερειακές τάσεις εκμεταλλευόμενοι την υψηλή εφελκυστική αντοχή του.

Με την περίσφιγξη των υποστρώματων, σύμφωνα με την έρευνα του Τριανταφύλλου (2004), επιτυγχάνεται :

- Αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος και της παραμορφωσιμότητας.
- Αύξηση της πλαστιμότητας, λόγω αύξησης της παραμορφωσιμότητας.
- Αύξηση της συνάφειας μεταξύ ράβδων οπλισμού και σκυροδέματος σε περιοχές ματίσεων.
- Καθυστέρηση της εμφάνισης λυγισμού των διαμήκων ράβδων σε περιοχές με έλλειψη συνδετήρων.

2.2 ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ

Τα κονιάματα αποτελούν από τα αρχαιότερα και πιο διαδεδομένα οικοδομικά υλικά, που χρησιμοποιούνται τόσο για συνδετικό υλικό όσο και για την ενίσχυση δομικών στοιχείων. Οι βασικές τους λειτουργίες περιλαμβάνουν την πρόσφυση μεταξύ

υλικών, τη διασφάλιση αντοχής στις περιβαλλοντικές συνθήκες και την ενίσχυση της συνολικής δομικής ακεραιότητας (Palomo et al., 2002). Η σύνθεση των κονιαμάτων περιλαμβάνει συνήθως τσιμέντο, αδρανή και νερό. Ιστορικά, τα παραδοσιακά κονιάματα ενίσχυαν την ανθεκτικότητά τους με τη χρήση φυσικών ινών όπως το ξύλο και το άχυρο. Σήμερα, η έμφαση έχει μετατοπιστεί στη χρήση καινοτόμων και βιώσιμων υλικών, όπως οι γεωπολυμερείς μήτρες, τα τσιμεντοειδή κονιάματα με βάση το CSA και οι φυσικές ίνες.

Τα σύγχρονα κονιάματα ενσωματώνουν επίσης καινοτομίες όπως η χρήση σούπερ-υδροφόβων προσθέτων, που βελτιώνουν τη συνοχή και την πρόσφυση στις επιφάνειες, ενώ μειώνουν την απορρόφηση νερού και αυξάνουν τη μακροχρόνια ανθεκτικότητα (Mao et al., 2022). Ειδικά στις εφαρμογές ενίσχυσης κατασκευών με σύνθετα υλικά όπως τα TRM (Textile Reinforced Mortars), η επιλογή της κατάλληλης μήτρας είναι κρίσιμη για τη διασφάλιση της απόδοσης του ενισχυτικού συστήματος.

Συνεπώς, η μελέτη των κονιαμάτων δεν περιορίζεται μόνο στη χρήση τους ως υλικά σύνδεσης, αλλά και στην κατανόηση της συμπεριφοράς τους σε σύγχρονες εφαρμογές αποκατάστασης και ενίσχυσης, με στόχο τη μακροχρόνια βιωσιμότητα και απόδοση των δομικών συστημάτων.

Η ανάπτυξη βιώσιμων κονιαμάτων με μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα, όπως οι γεωπολυμερείς μήτρες και τα κονιάματα με φυσικές ίνες, αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό βήμα προς τη δημιουργία ανθεκτικών και φιλικών προς το περιβάλλον κατασκευών. Ταυτόχρονα, η διερεύνηση της συμπεριφοράς αυτών των υλικών υπό διαφορετικές συνθήκες και οι συνδυαστικές λύσεις, όπως η χρήση CSA σε μήτρες χαμηλής υδατοπερατότητας, ανοίγουν νέους ορίζοντες στις κατασκευαστικές πρακτικές.

2.3 ΤΣΙΜΕΝΤΟ PORTLAND

Το τσιμέντο Portland αποτελεί το βασικό συστατικό της σύγχρονης βιομηχανίας κατασκευών, καλύπτοντας περίπου το 90% της παγκόσμιας ζήτησης για συνδετικά υλικά. Ωστόσο, η παραγωγή του συνοδεύεται από σημαντική περιβαλλοντική επιβάρυνση. Η διαδικασία παραγωγής του, που περιλαμβάνει την καύση αργίλου και ασβεστόλιθου για τη δημιουργία κλίνκερ, απελευθερώνει σημαντικές ποσότητες CO₂.

Πιο συγκεκριμένα, εκτιμάται ότι ευθύνεται για το 5-7% των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (Shi et al., 2011). Πρόκειται, επίσης, σύμφωνα με τους Winnefeld & Lothenbach (2010) για μια διαδικασία με μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις (θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας), αλλά και χρήση τεράστιων ποσοτήτων αργίλου και ασβεστόλιθου που εξαντλούν φυσικούς πόρους, ενώ η εξόρυξή τους προκαλεί οικολογικές διαταραχές.

Η χημική σύνθεση του τσιμέντου Portland περιλαμβάνει τόσο κύρια όσο και δευτερεύοντα οξείδια (Bediako & Amankwah, 2015). Τα κύρια οξείδια (Πίνακας 2.1) περιλαμβάνουν ασβέστη (CaO), διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2), οξείδια αλουμινίου (Al_2O_3) και οξείδιο του σιδήρου (Fe_2O_3), ενώ τα δευτερεύοντα οξείδια περιλαμβάνουν επίσης MgO , SO_3 , μερικά οξείδια αλκαλίων (K_2O και Na_2O) και μερικές φορές τη συμπερίληψη άλλων ενώσεων (πχ. P_2O_5 , Cl , TiO_2 , MnO_3).

Πίνακας 2.1 Κύρια οξείδια χημικής σύστασης τσιμέντου Portland.

Οξείδια	Ποσοστά
SiO_2	18 – 25 %
Fe_2O_3	0,15 – 6 %
Al_2O_3	3 – 8 %
CaO	58 – 68 %
MgO	0,02 – 7,5 %
SO_3	0 – 5,5 %
Na_2O	0 – 1 %
K_2O	0 – 2 %
Αλκάλια	0 – 1,5 %
Ελεύθερος ασβέστης	0 – 4 %

Η διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση για τσιμέντο, σε συνδυασμό με τις περιβαλλοντικές πιέσεις, καθιστούν επιτακτική την αντικατάσταση του τσιμέντου Portland, αλλά και την στροφή προς βιώσιμες εναλλακτικές οι οποίες μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του κατασκευαστικού τομέα (Maddalena et al., 2018). Τα γεωπολυμερή, τα τσιμέντα CSA και τα σύνθετα συστήματα με φυσικές

ίνες αναδεικνύονται ως αρκετά καλές λύσεις, συνδυάζοντας υψηλή απόδοση με χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

2.4 ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΗ

2.4.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η εξέλιξη των γεωπολυμερών μπορεί να εντοπιστεί στη δεκαετία του 1950, όταν οι Victor Glukhovsky και Pavel Krivenko στην Ουκρανία ανέπτυξαν αλκαλικά ενεργοποιημένα συστήματα που συνδύαζαν φάσεις CSH (Calcium-Silicate-Hydrate) με αργιλοπυριτικές φάσεις. Αυτά τα υλικά, γνωστά ως "soil-cements", βρήκαν εφαρμογή στην κατασκευή ενός υψηλού κτιρίου στη Ρωσία. Ο Glukhovsky εισήγαγε την ιδέα ότι οι γεωλογικές διαδικασίες μετατροπής ηφαιστειογενών πετρωμάτων σε ζεόλιθους σε χαμηλές θερμοκρασίες και πιέσεις μπορούν να αναπαραχθούν σε συστήματα τσιμέντου. Υποστήριξε ότι η κατευθυνόμενη σύνθεση αλκαλικών αργιλοπυριτικών υλικών θα μπορούσε να δημιουργήσει συνθετικούς λίθους με εξαιρετική ανθεκτικότητα και νέες χρήσιμες ιδιότητες (A. Hassan et al., 2019 / Nergis et al., 2018).

Το 1978, ο Joseph Davidovits εισήγαγε τον όρο "γεωπολυμερές" για να περιγράψει τα τρισδιάστατα, άμορφα έως ημικρυσταλλικά προϊόντα που προκύπτουν από την αντίδραση έντονα αλκαλικών διαλυμάτων με αργιλοπυριτικές πρώτες ύλες. Ο όρος αντικατοπτρίζει την ανόργανη προέλευσή τους (απουσία άνθρακα) και την συμπίκνωση ανόργανων υλικών σε πολυμερείς δομές μεγάλου μήκους. Η θεμελιώδης δομική μονάδα των γεωπολυμερών αποτελείται από τετράεδρα πυριτίου και αργιλίου, ενωμένα με οξυγόνο, σχηματίζοντας δεσμούς τύπου (-O-Si-O-Al-) (Bhutta et al., 2019).

Παράλληλα, από τα τέλη του 20ού αιώνα έως σήμερα, η έρευνα γύρω από τα γεωπολυμερή επεκτάθηκε σημαντικά λόγω της ανάγκης για βιώσιμα δομικά υλικά. Παρά την αρχική σύγχυση που προκαλείται από ποικίλες ονομασίες, όπως alkali-bonded ceramics, hydro-ceramics, και αλκαλικά ενεργοποιημένα τσιμέντα, η βασική αρχή της αλκαλικής ενεργοποίησης παραμένει κοινή. Τα γεωπολυμερή έχουν κερδίσει έδαφος

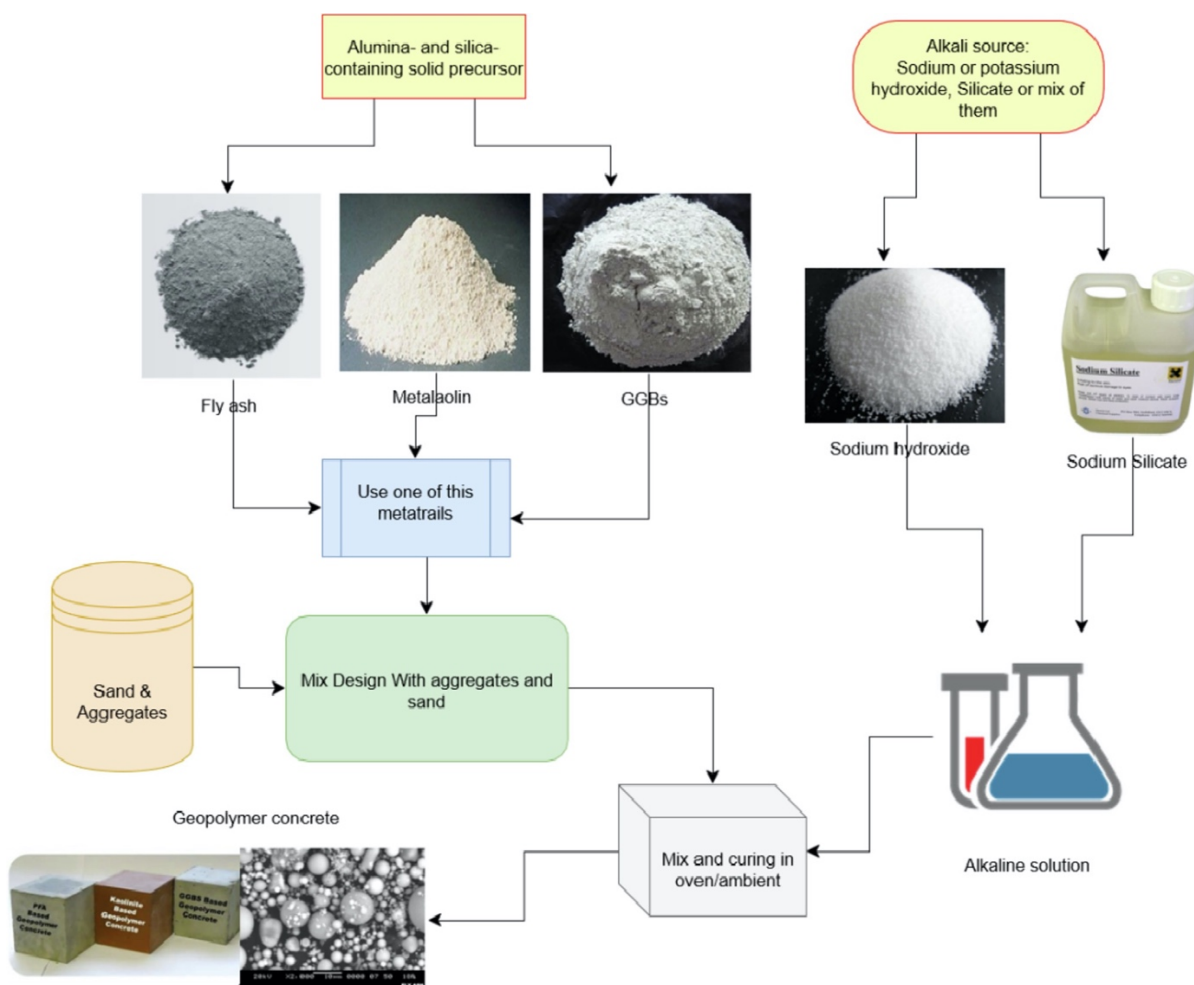
ως υλικά χαμηλού αποτυπώματος άνθρακα και ευνοϊκών μηχανικών και χημικών ιδιοτήτων.

2.4.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

Με βάση την πρώτη ύλη από την οποία παρασκευάζονται τα γεωπολυμερή μπορούν να χωριστούν σε διάφορες κατηγορίες. Ορισμένες από αυτές είναι οι ακόλουθες (A. Hassan et al., 2019):

- Γεωπολυμερή βασισμένα σε **μετακαολίνη**: Προέρχονται από την θερμική επεξεργασία του ορυκτού καολινίτη σε θερμοκρασίες 650-750 °C. Χαρακτηρίζονται από υψηλή αντιδραστικότητα και δυνατότητα πρόβλεψης των μηχανικών τους ιδιοτήτων.
- Γεωπολυμερή από **ιπτάμενη τέφρα** (fly ash): Προκύπτουν από βιομηχανικά παραπροϊόντα και παρουσιάζουν εξαιρετική χημική σταθερότητα και αντοχή. Ιδιαίτερα τα γεωπολυμερή από χαμηλού ασβεστίου ιπτάμενη τέφρα (low calcium fly ash - LCFA) χρησιμοποιούνται εκτενώς (John L. Provis, 2018).
- Γεωπολυμερή από **σκωρία υψικαμίνου** (GGBFS): Η σκωρία υψικαμίνου, ένα παραπροϊόν από τη χαλυβουργία, έχει υψηλή περιεκτικότητα σε πυριτικό ασβέστιο και αργίλιο. Ενισχύει την πρώιμη αντοχή των γεωπολυμερών και παρέχει υψηλή πυκνότητα. Ωστόσο, απαιτείται προσεκτική σκλήρυνση για αποφυγή συστολών και ρωγμών. (Shi et al., 2011)

Πολύ συχνό φαινόμενο είναι επίσης και ο συνδυασμός αυτών των πρώτων υλών, για την επίτευξη βέλτιστων ιδιοτήτων και τη δυνατότητα προσαρμογής στις απαιτήσεις κάθε έργου (Σχήμα 2.10).



Σχήμα 2.10 Παραγωγή γεωπολυμερών. (A. Hassan et al., 2019)

2.4.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

Τα γεωπολυμερή, και ειδικότερα το γεωπολυμερές σκυρόδεμα (Geopolymer Concrete - GPC), αναδεικνύονται ως βιώσιμη εναλλακτική στο συμβατικό σκυρόδεμα λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων τους. Η χρήση βιομηχανικών παραπροϊόντων, όπως η ιπτάμενη τέφρα και η σκωρία υψικαμίνου, μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθώς η παραγωγή τους απαιτεί χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και παράγει κατά περίπου 80% λιγότερες εκπομπές CO₂ σε σύγκριση με το τσιμέντο Portland (Davidovits, 1993). Επιπλέον, τα γεωπολυμερή παρουσιάζουν υψηλή μηχανική αντοχή, φτάνοντας σε τιμές θλίψης συγκρίσιμες ή ανώτερες από αυτές του σκυροδέματος Portland (John L. Provis, 2018). Σύμφωνα με τους (Shi et al., 2011) και (A. Hassan et al., 2019), είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά σε επαφές με χημικά προϊόντα, όπως θειικά και χλωριούχα ιόντα, και διατηρούν την απόδοσή τους σε ακραίες συνθήκες, όπως υψηλές θερμοκρασίες, καθιστώντας τα ιδανικά για πυράντοχες κατασκευές.

Ωστόσο, τα γεωπολυμερή συνοδεύονται και από προκλήσεις. Οι ιδιότητές τους επηρεάζονται έντονα από τη σύνθεση των πρώτων υλών και τις συνθήκες σκλήρυνσης, γεγονός που απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και έλεγχο στη διαδικασία παραγωγής. Επίσης, η χρήση αλκαλικών διαλυμάτων στον γεωπολυμερισμό ενέχει κινδύνους λόγω της διαβρωτικής τους φύσης, απαιτώντας ειδικά μέτρα ασφάλειας. Παρά τα πλεονεκτήματά τους, η έλλειψη διεθνών προτύπων και κανονισμών περιορίζει την ευρεία εφαρμογή τους, ενώ η ευαισθησία στις συνθήκες ωρίμανσης μπορεί να επηρεάσει την απόδοσή τους σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα. Επιπλέον, παρ' όλο που η χρήση παραπροϊόντων όπως η ιπτάμενη τέφρα και η σκωρία υψικαμίνου μειώνει σημαντικά το κόστος πρώτων υλών, η ανάγκη για αλκαλικά διαλύματα και ειδικές διαδικασίες σκλήρυνσης ενδέχεται να αυξήσουν το κόστος παραγωγής, συγκριτικά με το συμβατικό σκυρόδεμα.

2.4.4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

Οι ιδιότητες των γεωπολυμερών επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες. Μερικοί από αυτούς είναι οι εξής (Χ. Παναγιωτοπούλου, 2009):

I. ΜΟΡΙΑΚΟΤΗΤΑ ΑΛΚΑΛΙΩΝ (ΜΟΡΙΑΚΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ)

Η μοριακότητα των αλκαλίων, όπως το NaOH ή το KOH, είναι ένας κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει τον βαθμό γεωπολυμερισμού και τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Τα διαλύματα αυτά αποτελούνται από χημικές ενώσεις οι οποίες έχουν στερεή μορφή και διαλύονται στο νερό ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη μοριακότητα. Το αλκαλικό διάλυμα στο μείγμα λειτουργεί σαν ενεργοποιητής δηλαδή διευκολύνει τη διάλυση των αργιλοπυριτικών ενώσεων και την έναρξη της αντίδρασης γεωπολυμερισμού. Σύμφωνα με έρευνες οι αναλογίες των αλκαλικών διαλυμάτων

επηρεάζουν σημαντικά τη ρευστότητα, την αντοχή και την πυκνότητα του γεωπολυμερούς. Επιπλέον, με την σωστή αναλογία επιτυγχάνεται η μέγιστη αντοχή του υλικού λόγω καλύτερης αντίδρασης πολυμερισμού, βελτιώνεται η αντοχή στη χημική διάβρωση, επιτυγχάνεται μείωση της συρρίκνωσης ξήρανσης και τέλος δημιουργείται πυκνότερη δομή, μειώνοντας την πορώδη φύση του υλικού και αυξάνοντας την διάρκεια ζωής του.

Χαμηλές μοριακότητες, της τάξης των 4-6 M, δεν επαρκούν για την πλήρη αντίδραση γεωπολυμερισμού, με αποτέλεσμα γεωπολυμερή μειωμένης αντοχής και συνοχής. Αντίθετα, μοριακότητες μεταξύ 8-12 M θεωρούνται ιδανικές, καθώς προάγουν τη διάλυση των αργιλοπηριτικών φάσεων και τη δημιουργία πυκνής μικροδομής, που εξασφαλίζει υψηλή μηχανική απόδοση. Ωστόσο, πολύ υψηλές μοριακότητες, άνω των 12 M, μπορούν να προκαλέσουν πρόωρη καταβύθιση των προϊόντων της αντίδρασης, μειώνοντας τη συνοχή της μήτρας και τη μακροπρόθεσμη ανθεκτικότητα των γεωπολυμερών (A. Hassan et al., 2019).

II. ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΥΓΡΟΥ/ΣΤΕΡΕΟΥ (L/FA)

Η αναλογία μεταξύ αλκαλικού διαλύματος και στερεών πρώτων υλών, γνωστή ως L/FA, επηρεάζει την εργασιμότητα του μείγματος και τις τελικές ιδιότητες των γεωπολυμερών. Χαμηλές αναλογίες υγρού/στερεού, όπως 2:1, μπορούν να προκαλέσουν δυσκολίες στην ανάμειξη και να οδηγήσουν σε ανομοιογενή μήτρα, επηρεάζοντας αρνητικά τη μηχανική αντοχή. Από την άλλη πλευρά, αναλογίες 3:1 έως 4:1 θεωρούνται ιδανικές, καθώς επιτρέπουν την ομοιόμορφη διάχυση του αλκαλικού διαλύματος, εξασφαλίζοντας την πλήρη αντίδραση γεωπολυμερισμού και τη μέγιστη αντοχή. Υψηλότερες αναλογίες, πάνω από 4:1, αυξάνουν την πιθανότητα δημιουργίας πόρων, που μειώνουν την πυκνότητα και την ανθεκτικότητα του υλικού.

III. ΑΝΑΛΟΓΙΑ SI/AL

Η αναλογία Si/Al στη σύνθεση των γεωπολυμερών καθορίζει τόσο τη χημική δομή όσο και τις μηχανικές τους ιδιότητες. Χαμηλές αναλογίες Si/Al, μικρότερες του 2:1, οδηγούν σε σκληρές αλλά εύθραυστες δομές. Οι ιδανικές αναλογίες, που κυμαίνονται μεταξύ 2:1 και 3:1, προσφέρουν την καλύτερη ισορροπία μεταξύ μηχανικής αντοχής, χημικής σταθερότητας και θερμικής ανθεκτικότητας. Υψηλότερες αναλογίες Si/Al, άνω του 3:1, προσδίδουν μεγαλύτερη ευκαμψία στη μήτρα, αλλά μπορεί να μειώσουν

την χημική ανθεκτικότητα και τη μακροχρόνια σταθερότητα του υλικού (H. Wang et al., 2021).

IV. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ

Η θερμοκρασία κατά τη διαδικασία σκλήρυνσης επηρεάζει καθοριστικά τον ρυθμό και την ολοκλήρωση του γεωπολυμερισμού. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, κάτω από 40°C, η αντίδραση γεωπολυμερισμού είναι αργή, οδηγώντας σε προϊόντα χαμηλής αντοχής και ασθενή μικροδομή. Αντίθετα, θερμοκρασίες σκλήρυνσης μεταξύ 60-90°C είναι ιδανικές, καθώς επιταχύνουν την αντίδραση και προάγουν τη δημιουργία μιας πυκνής και ισχυρής μικροδομής. Ωστόσο, υπερβολικές θερμοκρασίες, πάνω από 90°C, μπορούν να προκαλέσουν απότομη απώλεια υγρασίας, ρωγμές και αστοχίες στη δομή του υλικού.

V. ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΩΝ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ

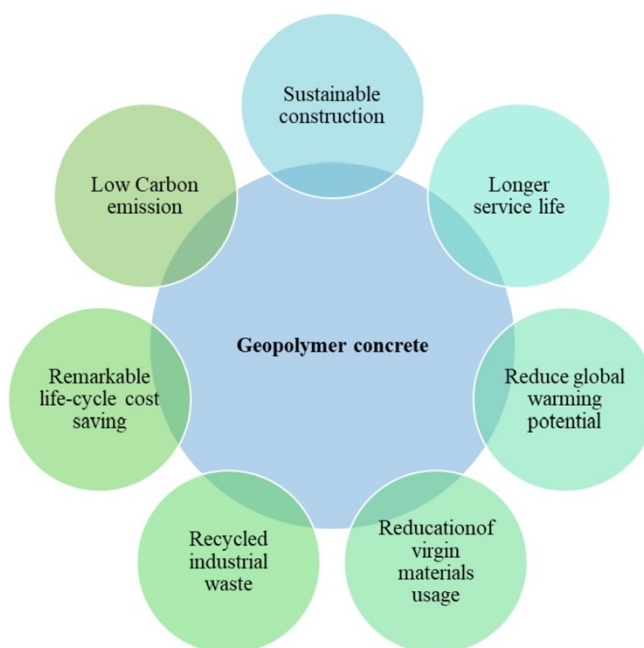
Η ποιότητα και η προέλευση των πρώτων υλών παίζουν κρίσιμο ρόλο στις ιδιότητες των γεωπολυμερών. Υλικά υψηλής καθαρότητας, όπως η ιπτάμενη τέφρα χαμηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο (LCFA), προάγουν την ομοιόμορφη ανάπτυξη μηχανικών ιδιοτήτων. Επιπλέον, η χρήση σκωρίας υψικαμίνου ενισχύει την πρώιμη αντοχή και τη συνοχή της μήτρας. Ωστόσο, υπερβολική χρήση σκωρίας μπορεί να οδηγήσει σε συρρίκνωση και εμφάνιση ρωγμών, που επηρεάζουν τη δομική σταθερότητα.

2.4.5 ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Το γεωπολυμερές σκυρόδεμα, αποτελεί μια βιώσιμη εναλλακτική στο συμβατικό σκυρόδεμα με βάση το τσιμέντο Portland, αξιοποιώντας βιομηχανικά υποπροϊόντα όπως η ιπτάμενη τέφρα και η σκωρία υψικαμίνου (N.B. Singh & B. Middendorf, 2020). Η παραγωγή του βασίζεται στη χρήση αλκαλικών διαλυμάτων που ενεργοποιούν τα

στερεά αργιλοπυριτικά υλικά, σχηματίζοντας μια συμπαγή δομή με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες (M. Nawaz et al., 2020). Το γεωπολυμερές σκυρόδεμα μειώνει τις εκπομπές CO₂ κατά περίπου 80% σε σύγκριση με το τσιμέντο Portland, συμβάλλοντας στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του κατασκευαστικού τομέα.

Το GPC παρουσιάζει πλεονεκτήματα (Σχήμα 2.11) όπως εξαιρετική αντοχή σε θλίψη, χημική διάβρωση και υψηλές θερμοκρασίες, που το καθιστούν ιδανικό για απαιτητικές εφαρμογές. Ειδικότερα, έχει αποδειχθεί πιο ανθεκτικό σε έκθεση σε θειικά και χλωριούχα ιόντα, καθιστώντας το κατάλληλο για κατασκευές σε θαλάσσια και διαβρωτικά περιβάλλοντα. Επιπλέον, το γεωπολυμερές σκυρόδεμα εμφανίζει συγκρίσιμη ή και ανώτερη συμπεριφορά σε όρους αντοχής σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα, ενώ η θερμική του αντίσταση το καθιστά ιδανικό για πυράντοχες εφαρμογές (A. L. Almutairi et al., 2021). Παρόλα αυτά, η ευαισθησία της σύνθεσής του στις αναλογίες των υλικών και στις συνθήκες σκλήρυνσης απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και διαδικασίες παραγωγής.



Σχήμα 2.11 Πλεονεκτήματα γεωπολυμερούς σκυροδέματος. (A. L. Almutairi et al., 2021)

2.5 CALCIUM SULFOALUMINATE CEMENTS (CSA)

2.5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα κονιάματα Calcium Sulfoaluminate Cements - CSA αναγνωρίζονται ως μια καινοτόμα και πιο βιώσιμη εναλλακτική λύση στα συμβατικά τσιμέντα Portland (OPC), συνδυάζοντας υψηλή απόδοση και χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αναπτύχθηκαν αρχικά τη δεκαετία του 1970 από την Κινεζική Ακαδημία Δομικών Υλικών, με στόχο τη δημιουργία ενός συνδετικού υλικού που να ανταποκρίνεται στις αυξημένες απαιτήσεις αντοχής και περιβαλλοντικής ευθύνης. Για την παραγωγή τους, χρησιμοποιούνται πρώτες ύλες όπως ο ασβεστόλιθος, ο βωξίτης και ο γύψος, ενώ η διαδικασία παραγωγής απαιτεί χαμηλότερες θερμοκρασίες καύσης (1300–1350 °C), μειώνοντας έτσι το ενεργειακό κόστος και τις εκπομπές CO₂ έως και 40% σε σύγκριση με το OPC (Q. Zhou et al., 2006).

Τα τσιμέντα CSA βασίζονται στο Ye'elimite (C₄A₃S̄), το οποίο είναι επίσης γνωστό ως ένωση του Klein από την πρωτοποριακή εργασία του Alexander Klein για τα τσιμέντα CSA στη δεκαετία του 1960 (A. Klein, 1964). Τα τσιμέντα CSA διακρίνονται για την ταχεία πήξη τους η οποία οφείλεται στο σχηματισμό ετρινγκίτη ως προϊόν ενυδάτωσης του Ye'elimite. Η σημαντική περιεκτικότητα σου σε πυριτικό διασβέστιο (C₂S), ή σε αγγλική ορολογία **Belite**, συμβάλλει στη μακροπρόθεσμη μηχανική αντοχή του υλικού. Επιπλέον, περιέχει **Anhydrite (CaSO₄)** και **Bassanite (CaSO₄)**, τα οποία λειτουργούν ως πηγές θεϊκού ασβεστίου και ρυθμίζουν την ταχύτητα ενυδάτωσης. Παρουσιάζονται, επίσης, δευτερεύουσες φάσεις, όπως η **Calcite (CaCO₃)**, που προέρχεται από ανθρακικό ασβέστιο, και η **Quartz (SiO₂)**, η οποία μπορεί να είναι υπόλειμμα από την παραγωγή του κλίνκερ. Η περιεκτικότητα σε αυτές τις φάσεις ποικίλλει ανάλογα με τη σύσταση του CSA και τις συνθήκες παραγωγής του (Burris & Kurtis, 2018).

Η χημική σύσταση ενός τυπικού CSA τσιμέντου (κατά βάρος) είναι η εξής (D. Zou et al., 2020):

- **CaO (Οξείδιο του Ασβεστίου):** 51.5%
- **Al₂O₃ (Οξείδιο του Αργιλίου):** 11.8%
- **SO₃ (Τριοξείδιο του Θείου):** 17.8%
- **SiO₂ (Διοξείδιο του Πυριτίου):** 7.8%
- **MgO (Οξείδιο του Μαγνησίου):** 1.0%

- **TiO₂ (Διοξείδιο του Τιτανίου): 0.7%**
- **Fe₂O₃ (Οξείδιο του Σιδήρου): 1.4%**
- **K₂O (Οξείδιο του Καλίου): 0.7%**
- **Na₂O (Οξείδιο του Νατρίου): 0.1%**
- **Απώλειες κατά την πύρωση (LOI): 9.6%**

Η παραγωγή των CSA ξεκίνησε στην Κίνα, όπου μικρές περιστροφικές κάμνοι, που προηγουμένως χρησιμοποιούνταν για την παραγωγή τσιμέντου Portland, προσαρμόστηκαν για την παραγωγή τους. Με την πάροδο του χρόνου, η παραγωγή επεκτάθηκε σημαντικά, ξεπερνώντας τους 1 εκατομμύριο τόνους ετησίως, και τα CSA άρχισαν να χρησιμοποιούνται σε παγκόσμιο επίπεδο. Εφαρμόζονται σε κατασκευές που απαιτούν σύντομη απόδοση αλλά και μακροπρόθεσμη ανθεκτικότητα και σε περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές (Glasser & Zhang, 2001) & (J. Kleib et al., 2021).

Με τον συνδυασμό των μοναδικών τους χαρακτηριστικών και της περιβαλλοντικής τους βιωσιμότητας, τα CSA αναδεικνύονται ως μια πολλά υποσχόμενη επιλογή για τη σύγχρονη βιομηχανία κατασκευών.

2.5.2 BELITIC CALCIUM SULFOALUMINATE CEMENT

Το κονίαμα Belitic Calcium Sulfoaluminate (BCSA), σύμφωνα με τους Kienzle & Thomas (2022) είναι ένας από τους διάφορους τύπους τσιμέντων CSA που ταξινομήθηκαν από τον Bescher (Bescher & Kim, 2019) και είναι αυτός που θα εξετάσουμε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Κατά μάζα, τα τσιμέντα BCSA περιλαμβάνουν 20-30 % **Ye'elimate**, 30-60 % **belite** (C₂S) και έως και 25 % **θειικό ασβέστιο** (C₃S). Το τσιμέντο αυτό περιέχει μεγαλύτερες ποσότητες belite (C₂S), το οποίο έχει ως αποτέλεσμα να ενυδατώνεται αργά αλλά να εμφανίζει πιο ισορροπημένη ανάπτυξη αντοχής. Αρχικά, εμφανίζει αντοχή χαμηλότερη από το CSA, αλλά συνεχίζει να αυξάνεται λόγω της ενυδάτωσης του belite σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Τα τσιμέντα BCSA προσφέρουν επίσης πρόσθετα πλεονεκτήματα όσον αφορά την ανθεκτικότητα σε προσβολή από θειικά άλατα. Η καταβύθιση του επτρινγκίτη στα πρώτα στάδια της ενυδάτωσης έχει ως αποτέλεσμα μια πυκνή μικροδομή με χαμηλή διαπερατότητα και πορώδεις (Thomas et al., 2018).

Μεγάλο μέρος των εκπομπών άνθρακα που σχετίζονται με το τσιμέντο Portland οφείλεται στην αποσύνθεση του ασβεστόλιθου προς σχηματισμό αλίτη (C_3S) και belite (C_2S), με τον πρώτο να είναι η κυρίαρχη πηγή εκπομπών CO_2 . Το BCSA δεν περιλαμβάνει φάση αλίτη και έχει πολύ χαμηλότερη συνολική περιεκτικότητα σε πυριτικό ασβέστιο από το τσιμέντο Portland. Όλα αυτά οδηγούν σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας και εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, αυξάνοντας το ενδιαφέρον για υιοθέτηση των τσιμεντών BCSA για διάφορες εφαρμογές και, στην περίπτωση μας, στις ενισχύσεις υφιστάμενων κατασκευών.

2.5.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ CSA

Σύμφωνα με τους Y. Tao et al. (2023), τα CSA διακρίνονται για τις μοναδικές τους ιδιότητες που τα καθιστούν μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση στο τσιμέντο Portland. Πιο συγκεκριμένα χαρακτηρίζονται από:

- Ταχεία ενυδάτωση
- Υψηλή πρώιμη αντοχή
- Πυκνή μικροδομή
- Χαμηλή αλκαλικότητα

Τα CSA χαρακτηρίζονται από πολύ γρήγορο ρυθμό ενυδάτωσης, με το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας ενυδάτωσης να εκλύεται τις πρώτες 2-12 ώρες, γεγονός το οποίο τους εξασφαλίζει ταχεία ανάπτυξη αντοχής, καθιστώντας τα ιδανικά για εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη απόδοση. Ο ετρινγκίτης, το κύριο προϊόν ενυδάτωσης, δημιουργεί μια πυκνή μικροδομή που μειώνει την απορρόφηση νερού και την είσοδο οξυγόνου, ενισχύοντας τη μακροχρόνια ανθεκτικότητα. Επιπλέον, η προσαρμοστικότητα στη σύνθεση των CSA επιτρέπει την εξατομίκευση των ιδιοτήτων τους ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, όπως η χρήση διαφορετικών τύπων και ποσοτήτων θεικού ασβεστίου. Ωστόσο, το χαμηλό pH τους μπορεί να αποτελέσει πρόκληση για την προστασία του οπλισμού σε ενισχυμένο σκυρόδεμα, κάτι που απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό.

2.5.4 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

Παρ' όλο που τα CSA προσφέρουν περιβαλλοντικά και τεχνικά πλεονεκτήματα, υπάρχουν αρκετές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την ευρύτερη εφαρμογή τους. Πιο συγκεκριμένα, οι Y. Tao et al. (2023) αναφέρονται σε :

- Υψηλό κόστος παραγωγής
- Περιορισμένη ανθεκτικότητα
- Αντιφατικές παρατηρήσεις για διάβρωση χάλυβα
- Ευαισθησία σε προσβολή θεικού μαγνησίου και θεικού οξέος
- Έλλειψη ολοκληρωμένων δεδομένων

Το υψηλό κόστος παραγωγής, λόγω των πρώτων υλών πλούσιων σε αλουμίνια που απαιτούνται αποτελεί σημαντικό περιορισμό, αν και η χρήση βιομηχανικών αποβλήτων μπορεί να μειώσει την οικονομική και περιβαλλοντική επιβάρυνση. Οι περιορισμοί στην ανθεκτικότητα, όπως η χαμηλή αντοχή στην ανθρακοποίηση και την υψηλή διάχυση χλωριδίων, καθιστούν αναγκαία τη βελτιστοποίηση της σύνθεσης για συγκεκριμένες εφαρμογές. Επιπλέον, οι αντιφατικές παρατηρήσεις για τη διάβρωση του χάλυβα λόγω του χαμηλού pH και η ευαισθησία σε επιθέσεις από θεικά άλατα και οξέα αναδεικνύουν την ανάγκη για περισσότερη έρευνα. Η ανάπτυξη πιο ολοκληρωμένων δεδομένων σχετικά με τις μακροχρόνιες επιδόσεις είναι απαραίτητη για την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων των CSA.

2.5.5 ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΟΚΩΝ ΜΕ CSA

Στη βιβλιογραφία υπάρχει περιορισμένος αριθμός μελετών σχετικά με τη μακροχρόνια μηχανική απόκριση των CSA. Ωστόσο, οι M. Leone et al. (2023) πραγματοποίησαν μια έρευνα σε δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος από συνδετικό υλικό κονιάματος CSA, με στόχο την ανάλυση της μακροχρόνιας απόκρισής τους σε συνθήκες φόρτισης και αποφόρτισης. Χρησιμοποιήθηκαν δύο σετ δοκών, με διαφορετικό ποσοστό CSA και συμβατικού τσιμέντου Portland. Οι δοκοί εκτέθηκαν για

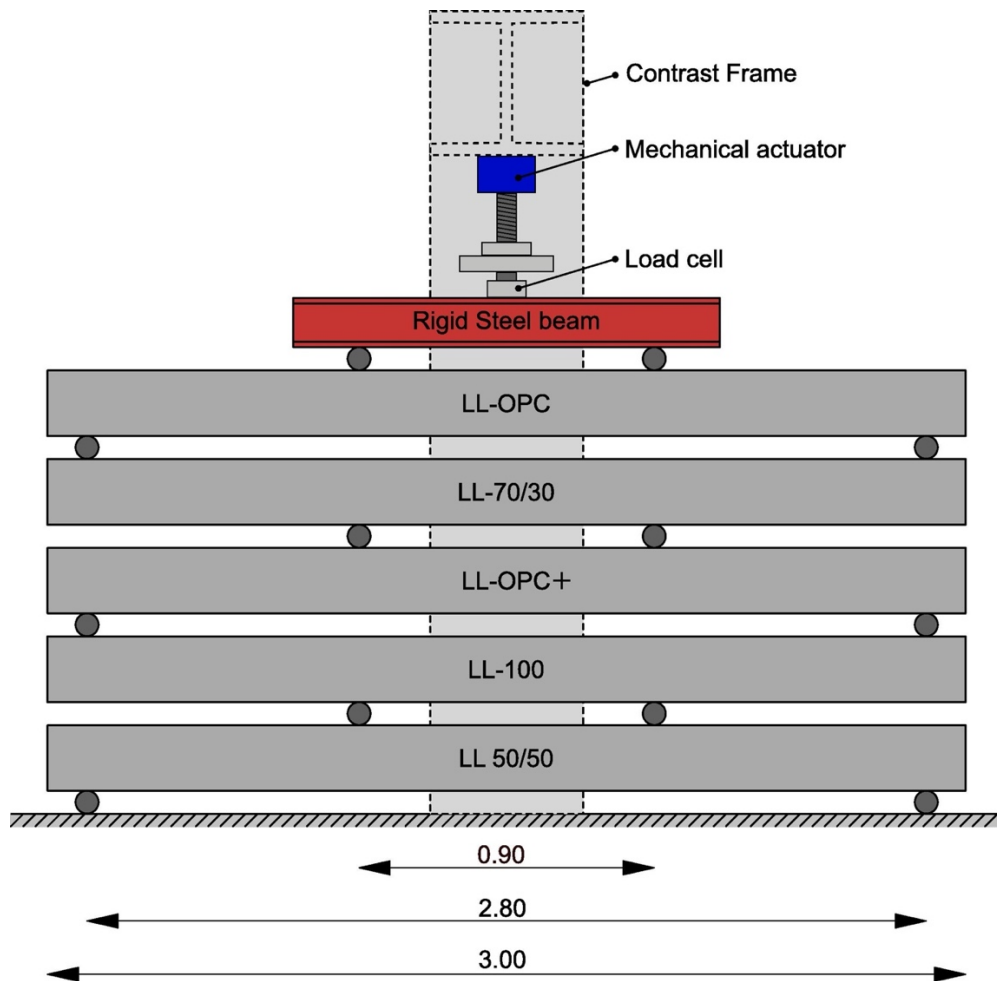
462 ημέρες σε εξωτερικό περιβάλλον και υποβλήθηκαν σε σταθερό φορτίο κάμψης τεσσάρων σημείων χρησιμοποιώντας μια πειραματική διάταξη «ad-hoc» που σχεδιάστηκε για την αναπαραγωγή των συνθηκών λειτουργίας στη ζωή. Αυτά τα σετ αναφέρονται ως LL (Μακροχρόνια Φορτισμένα). Στο ίδιο περιβάλλον εκτέθηκαν επιπλέον δοκοί χωρίς εφαρμοζόμενο φορτίο που αναφέρονται ως LUN (Μακροχρόνια Μη Φορτωμένα). Μετά την περίοδο έκθεσης, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων για να εκτιμηθεί η καμπτική συμπεριφορά μέχρι την αστοχία και η εξέλιξη της μορφής των ρωγμών. Τα αποτελέσματα των δοκών LL συγκρίθηκαν με αυτά των δοκών LUN, με στόχο την αξιολόγηση της επίδρασης των φορτίων. Επιπλέον, η μακροχρόνια απόκριση που παρατηρήθηκε σε αυτή τη μελέτη συγκρίθηκε με την βραχυπρόθεσμη απόκριση που εμφάνισε σε σχεδόν πανομοιότυπες συνθήκες μια αντίστοιχη πειραματική μελέτη των D. Colonna et al. (2019).

Διερευνήθηκαν οι ιδιότητες σε νωπή και σκληρυμένη κατάσταση πέντε μειγμάτων σκυροδέματος που παρασκευάστηκαν με τη χρήση OPC και CSA:

1. OPC (αμυγές τσιμέντο Portland)
2. OPC+ (προσθήκη γύψου και μείωση του λόγου νερού/συνδετικού)
3. CSA (αμυγές τσιμέντο CSA)
4. CSA/OPC (70/30): Μίγμα με 70% OPC και 30% CSA
5. CSA/OPC (50/50): Μίγμα ίσων αναλογιών OPC και CSA

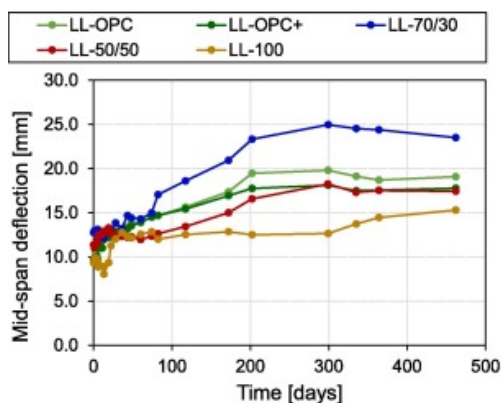
Και οι τέσσερις συνθέσεις περιείχαν την ίδια ποσότητα αδρανών υλικών και νερού, ενώ χρησιμοποιήθηκαν χημικά πρόσθετα για τη ρύθμιση της εργασιμότητας και της ταχύτητας ενυδάτωσης.

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη μακροχρόνια φόρτιση των δοκών LL (Σχήμα 2.12) εξιδανικεύτηκε αρχικά από τους E. Vasanelli et al. (2013). Ένα ενιαίο χαλύβδινο πλαίσιο χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή του φορτίου σε ένα σύνολο πέντε στοιβαγμένων δοκών. Δύο χαλύβδινοι κύλινδροι στήριξης τοποθετήθηκαν μεταξύ κάθε δοκού, εναλλάξ στο μέσο του ανοίγματος και στα άκρα, με στόχο την εφαρμογή κάμψης τεσσάρων σημείων σε κάθε μία από τις στοιβαγμένες δοκούς. Το σταθερό φορτίο εφαρμοζόταν μέσω μηχανικού γρύλου, ο οποίος συνδεόταν με τους άνω κυλίνδρους φόρτισης στο μέσο του ανοίγματος μέσω μιας άκαμπτης χαλύβδινης δοκού.

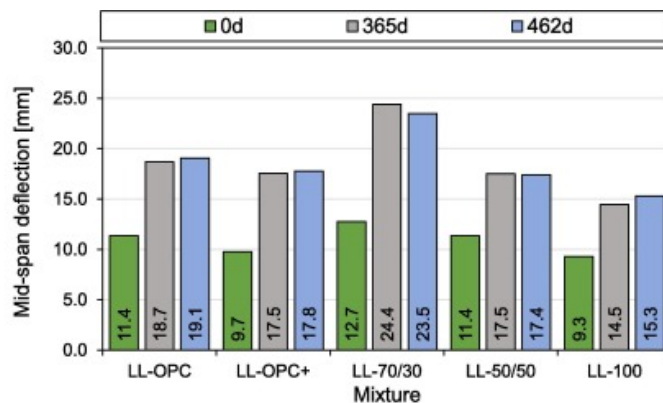


Σχήμα 2.12 Δοκιμές μακροχρόνιας κάμψης δοκών. (M. Leone et al., 2023)

Η εξέλιξη της παραμόρφωσης του μέσου ανοίγματος των δοκών LL (Long-Term Loaded) κατά τη διάρκεια της περιόδου έκθεσης και η παραμόρφωση του μέσου ανοίγματος στον χρόνο εφαρμογής του φορτίου (0 ημέρες), στις 365 και στις 462 ημέρες παρατίθενται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 2.13). Αξίζει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αντιπροσωπεύουν τις μέσες τιμές που υπολογίστηκαν για τις δύο ομάδες δοκών LL.



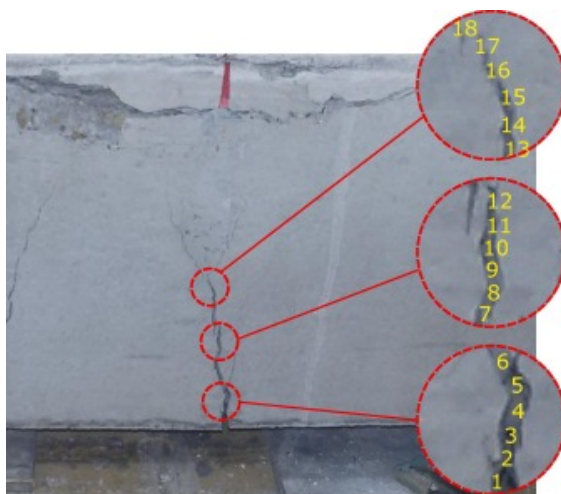
(α)



(β)

Σχήμα 2.13 (α) Παραμόρφωση μέσου ανοίγματος συναρτήσει του χρόνου έκθεσης και (β) παραμόρφωση μέσου ανοίγματος σε 0, 365 και 462 ημέρες. (M. Leone et al., 2023)

Χρησιμοποιήθηκαν οπτικές μέθοδοι για την καταγραφή του μήκους, του πλάτους και της κατανομής των ρωγμών (Σχήμα 2.14). Οι ρωγμές παρακολουθούνταν τόσο κατά τη συνεχή φόρτιση όσο και κατά τη δοκιμή μέχρι την αστοχία.



Σχήμα 2.14 Πλάτη ρωγμής. (M. Leone et al., 2023)

Παρατηρήθηκε ότι οι μακροχρόνιες επιδράσεις, όπως η καθίζηση στο μέσο της δοκού, επηρεάζουν τόσο τις δοκούς με OPC (Portland) όσο και αυτές με CSA. Στις δοκούς με χαμηλό ποσοστό CSA, η καθίζηση ήταν μεγαλύτερη, ενώ οι δοκοί με αμιγές CSA παρουσίασαν τη μικρότερη παραμόρφωση. Επιπλέον, οι δοκοί με OPC εμφάνισαν πιο ομοιόμορφη κατανομή ρωγμών, με περισσότερες αλλά στενότερες ρωγμές.

Στις δοκιμές τεσσάρων σημείων κάμψης, οι δοκοί που δεν είχαν υποστεί μακροχρόνια φόρτιση παρουσίασαν σχεδόν όμοια απόκριση ανεξάρτητα από τον τύπο του συνδετικού υλικού. Ωστόσο, στις μακροχρόνια φορτισμένες δοκούς, οι δοκοί με χαμηλό ποσοστό CSA εμφάνισαν χαμηλότερη δυσκαμψία πριν από τη διαρροή, ενώ οι δοκοί με υψηλό ποσοστό CSA παρουσίασαν αυξημένη δυσκαμψία σε κάμψη, ξεπερνώντας ακόμη και τις δοκούς OPC. Αυτό υποδεικνύει ότι η ερπυστική παραμόρφωση είναι πιο έντονη σε μίγματα σκυροδέματος με χαμηλή περιεκτικότητα σε CSA.

Οι αναλυτικές προσομοιώσεις έδειξαν ικανοποιητική αντιστοιχία μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων, υποδεικνύοντας την αξιοπιστία των υφιστάμενων διατυπώσεων και για στοιχεία που κατασκευάζονται με συνδετικό υλικό από CSA. Ωστόσο, η αυξημένη θλιπτική αντοχή των CSA καθιστά πιο δύσκολη τη μοντελοποίηση των μακροχρόνιων φαινομένων, όπως η ρευστότητα.

Συνολικά, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι το CSA είναι ένα αξιόπιστο υλικό για δομικές εφαρμογές, με υψηλή αντοχή και δυσκαμψία σε βραχυπρόθεσμο επίπεδο και συγκρίσιμη μακροχρόνια συμπεριφορά με το OPC. Παράλληλα, η παρατηρούμενη μη αναμενόμενη συμπεριφορά στις δοκούς με χαμηλό ποσοστό CSA υπογραμμίζει τη σημασία του προσεκτικού σχεδιασμού της αναλογίας OPC/CSA στις συνθέσεις σκυροδέματος.

2.5.6 ΧΡΗΣΕΙΣ CSA

Τα διογκωμένα εδάφη αποτελούν ένα κοινό πρόβλημα για τις υπερκείμενες γεωτεχνικές κατασκευές. Η σταθεροποίηση τους με βάση το ασβέστιο υιοθετείται εύκολα για να βελτιώσει και να ενισχύσει το προβληματικό υπόστρωμα αυξάνοντας την αντοχή και τη συμπεριφορά αλλαγής όγκου. Για τη βελτίωση του εδάφους, η χρήση ασβέστη και συνήθους τσιμέντου Portland για την αντιμετώπιση των διογκωμένων εδαφών αποτελεί κοινή πρακτική- ωστόσο, το τσιμέντο CSA μπορεί να αποτελέσει αποτελεσματική εναλλακτική λύση λόγω των μειωμένων περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Οι J. Pooni et al. (2020) διερεύνησαν τον μηχανισμό σταθεροποίησης των εκτεταμένων εδαφών που έχουν υποστεί επεξεργασία με CSA, προσδιορίζοντας τα

κύρια προϊόντα ενυδάτωσης και τα μικροδομικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τη δοσολογία του τσιμέντου CSA και τον ρυθμό ωρίμανσης. Χρησιμοποίησαν δοκιμές συμπίεσης για να εξετάσουν τη συμβατότητα με τη βέλτιστη περιεκτικότητα σε υγρασία και τη μέγιστη ξηρή πυκνότητα των τσιμεντοποιημένων εδαφών αλλά και δοκιμές αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη για να εξετάσουν την αντοχή των επεκτατικών εδαφών με τσιμέντο CSA σε σχέση με την περιεκτικότητα σε τσιμέντο CSA και τις διάρκειες ωρίμανσης. Εκτός αυτού, αξιολογήθηκαν οι αλλαγές στην ορυκτολογία και μικρομορφολογία των εδαφών για να κατανοήσουν τη μηχανική συμπεριφορά και τον μηχανισμό της CSA τσιμεντοποίησης.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το επεξεργασμένο έδαφος έχει μεγαλύτερη πυκνότητα και αυξημένη αντοχή, λόγω της αντίδρασης του τσιμέντου με το νερό και το έδαφος. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι η ποσότητα της τσιμεντοειδούς ύλης δεν επηρεάζει σημαντικά την αντοχή. Επιπλέον, η προσθήκη τσιμέντου CSA στη σταθεροποίηση του εδάφους εξυπηρετεί τη στροφή προς μια βιώσιμη προσέγγιση για τη μείωση των επιπτώσεων των παραδοσιακών τεχνικών σταθεροποίησης στον άνθρωπο.

Ακόμα, οι Péra και Ambroise (2004) έδειξαν ότι το σκυρόδεμα που κατασκευάζεται με τσιμέντο CSA μπορεί να αναπτύξει υψηλή πρώιμη αντοχή (40 MPa σε 6 ώρες), διατηρώντας παράλληλα την εργασιμότητα για 1 ώρα. Οι Guan et al. (2017), αποκάλυψαν ότι το τσιμέντο CSA είναι αποτελεσματικό στη μείωση της διόγκωσης και στην ανάπτυξη πρώιμης αντοχής, υπογραμμίζοντας τη σκοπιμότητα σε οδοστρώματα από σκυρόδεμα. Οι Shadravan et al. (2015), έδειξαν ότι το τσιμέντο CSA ήταν πολύ σταθερό όταν εφαρμόστηκε σε επίγειες πλάκες σκυροδέματος χωρίς μακροχρόνια συρρίκνωση, ρηγμάτωση ή στρέβλωση. Αυτές οι ευρείες εφαρμογές του τσιμέντου CSA οφείλονται στα αναφερόμενα πλεονεκτήματα που περιλαμβάνουν ταχεία αύξηση της αντοχής, μειωμένη συρρίκνωση, ανθεκτικότητα έναντι επιθετικών περιβαλλόντων και σημαντική αντοχή στην απόψυξη-παγοποίηση (Glasser & Zhang, 2001). Επιπλέον, καταναλώνει λιγότερη θερμοκρασία κατά την κατασκευή (~200 C χαμηλότερη από το OPC) (Juenger et al., 2011) και τα κύρια συστατικά του παράγουν 62,7% λιγότερο CO₂ σε σύγκριση με το τσιμέντο OPC (Subramanian et al., 2019).

Οι Bescher & Kim (2019) στην έρευνα τους αναφέρονται στο τσιμέντο CSA πλούσιο σε belite (BCSA), το οποίο παρουσιάζει έναν μοναδικό συνδυασμό πλεονεκτημάτων όπως χαμηλό ανθρακικό αποτύπωμα, ιδιότητα ταχείας αντοχής και αυξημένη

εφελκυστική αντοχή έχει ωθήσει πολλά αεροδρόμια και κυβερνητικές υπηρεσίες να το χρησιμοποιούν τακτικά για την αποκατάσταση των σκυροδεμάτων.

Το 1994, όταν ο σεισμός του Northridge προκάλεσε την κατάρρευση δύο σημαντικών ανισόπεδων κόμβων στο Λος Άντζελες, Καλιφόρνια, η κατάσταση έκτακτης ανάγκης απαιτούσε τη χρήση σκυροδέματος ταχείας αντοχής, που οδήγησε στην πρώτη χρήση σκυροδέματος με τσιμέντο BCSA από το Υπουργείο Μεταφορών της Καλιφόρνιας. Η επιτυχία αυτού του μεμονωμένου έργου έγινε καταλύτης για τη συνεχιζόμενη και τακτική χρήση του BCSA στην Καλιφόρνια.

Στην Καλιφόρνια, υπάρχουν αυστηρές συνέπειες για το άνοιγμα ενός τμήματος αυτοκινητοδρόμου καθυστερημένα και οι εργολάβοι είναι υπόλογοι για ποινή έως και \$1,000 ανά λεπτό για καθυστερήσεις στην επαναλειτουργία. Το τσιμεντοκονίαμα BCSA πληροί εύκολα τις προδιαγραφές απόδοσης, οι οποίες είναι 2,8 MPa αντοχή σε κάμψη για το άνοιγμα και 4,1 MPa αντοχή σε κάμψη μετά από 28 ημέρες. Μια παρόμοια προσέγγιση αποκατάστασης σκυροδέματος χρησιμοποιείται από πολλές διαφορετικές πολιτείες στις Ηνωμένες Πολιτείες.

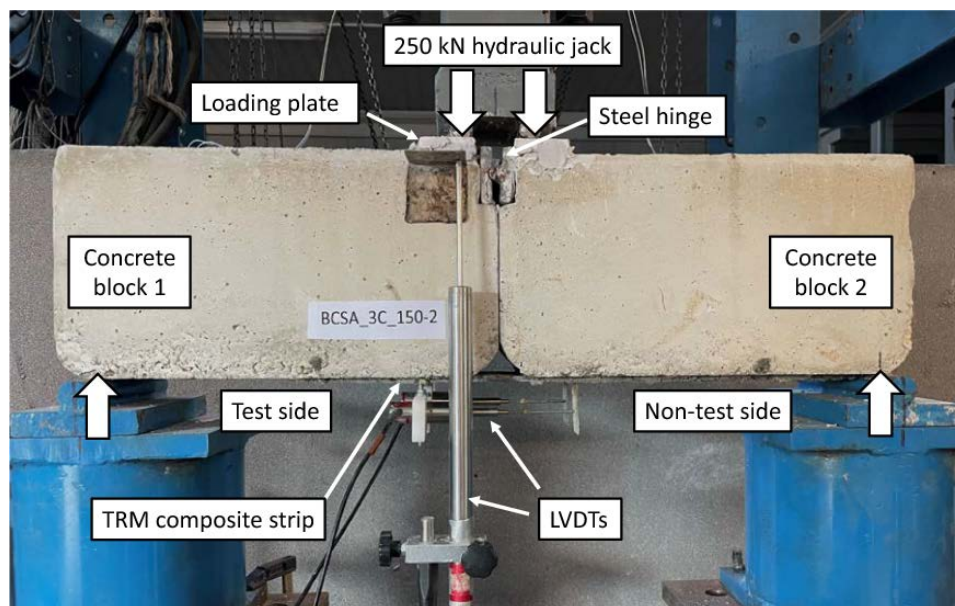
Όπως και στην περίπτωση της οδοστρωσίας αυτοκινητοδρόμου, η οδοστρωσία αεροδρομίου πρέπει συχνά να αποκαθίσταται μέσα σε παρόμοια σύντομα χρονικά διαστήματα. Το μεγαλύτερο έργο οδοστρωσίας αεροδρομίου μέχρι σήμερα είναι η αποκατάσταση του Διαδρόμου 16R (τώρα 16C) στο Διεθνές Αεροδρόμιο Seattle Tacoma (SEA), το οποίο πραγματοποιήθηκε μεταξύ 1994 και 2012. Οι προδιαγραφές του σκυροδέματος για την αποκατεστημένη επιφάνεια ήταν αντοχή σε κάμψη 3,44 MPa σε 4 ώρες με σχεδιαστική διάρκεια ζωής 20 ετών, βασισμένη σε αντοχή σε κάμψη 4,93 MPa μετά από 28 ημέρες. Το 2012, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος BCSA δοκιμάστηκε στα 8,0 MPa μετά από 15 χρόνια υπηρεσίας (Ramseyer & Bescher, 2014). Αυτή η σημαντική αύξηση της αντοχής (σχεδόν διπλασιασμός) σε 15 χρόνια υπηρεσίας δεν μπορεί να εξηγηθεί μόνο από την αύξηση της αντοχής που προκαλείται από τον σχηματισμό ετρινγκίτη, ο οποίος ολοκληρώνεται σχεδόν στις πρώτες 10 ώρες υδρόλυσης. Προφανώς, το σκυρόδεμα από τσιμέντο BCSA συνεχίζει να αποκτά αντοχή, και αυτή η αύξηση της αντοχής είναι αξιοσημείωτη.

Οι S. Cholostiakow et al. (2024), εξέτασαν τη συνάφεια IAM-σκυροδέματος μέσω πειραματικών δοκιμών έμμεσης διάτμησης (Modified Beam tests). Στη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη, δύο δοκίμια ΟΣ συνδέονται μεταξύ τους αποκλειστικά μέσω μίας λωρίδας σύνθετων υλικών IAM και συνολικά το σύστημα υποβάλλεται σε κάμψη.

Τα σύνθετα υλικά αποτελούνταν από πλέγματα άνθρακα υψηλής αντοχής συνδυασμένα με δύο διαφορετικά κονιάματα: (i) ένα εμπορικά διαθέσιμο συμβατικό τσιμεντοκονίαμα με βάση το τσιμέντο Portland και (ii) ένα τσιμεντοειδές κονίαμα με βάση το τσιμέντο BCSA. Ο στόχος αυτής της μελέτης ήταν να προσδιοριστεί πειραματικά αν η χρήση του τσιμεντοκονιάματος BCSA ως μήτρα του IAM μπορεί να αναπτύξει αντίστοιχη συμπεριφορά με το συμβατικό κονίαμα. Το κονίαμα BCSA σχεδιάστηκε ώστε να έχει παρόμοιες μηχανικές και φυσικές ιδιότητες με τον συνδετικό παράγοντα OPC, επιτρέποντας έτσι μια άμεση σύγκριση της συμπεριφοράς σύνδεσης των δύο συνδετικών υλικών. Η εργασιμότητα του κονιάματος BCSA καθώς και η καμπική και θλιπτική αντοχή ελέγχθηκαν με την προσαρμογή των αναλογιών νερού και κιτρικού οξέος μέχρι να επιτευχθούν συγκρίσιμες με το κονίαμα OPC τιμές την 35η ημέρα ωρίμανσης. Οι δοκιμές έμμεσης διάτμησης περιλάμβαναν εννέα ζεύγη δοκιμών (σύνολο δεκαοκτώ). Τα πρώτα οκτώ δοκίμια εξέτασαν τη χρήση συμβατικού OPC στα IAM ενώ αντίστοιχα τα υπόλοιπα οκτώ δοκίμια τη χρήση κονιάματος BCSA. Εξετάστηκαν τέσσερα μήκη επικόλλησης (50, 100, 150 και 200 mm) για προσδιοριστεί το ενεργό μήκος επικόλλησης των δύο συστημάτων, και κάθε δοκιμή επαναλήφθηκε δύο φορές για να αυξηθεί η εμπιστοσύνη στα αποτελέσματα. Τα τελευταία δύο δοκίμια είχαν συνδετικό υλικό BCSA, μήκος σύνδεσης 200 mm και δοκιμάστηκαν μετά από μόνο μία ημέρα (24 ώρες) ωρίμανσης μετά την εφαρμογή για να διερευνηθεί η δυνατότητα των ταχέων ιδιοτήτων πήξης του τσιμέντου BCSA. Ακολούθησαν XRD, TGA και SEM αναλύσεις για να παρέχουν επιπλέον πληροφορίες σχετικά με το χημικό δεσμό μεταξύ του κονιάματος και των πλεγμάτων, καθώς και για να παρατηρηθεί το επίπεδο εμποτισμού των ινών εντός του κονιάματος.

Αναλυτικότερα, η συνάφεια εξετάστηκε με έμμεσες δοκιμές χρησιμοποιώντας την πειραματική διάταξη του σχήματος (Σχήμα 2.15). Σε μια τέτοια διάταξη η εφελκυστική δύναμη εφαρμόζεται έμμεσα στο σύνθετο υλικό. Αυτή η μέθοδος δοκιμής μπορεί να προσομοιάσει την κατάσταση τάσης στο σύνθετο υλικό TRM πιο ρεαλιστικά σε σύγκριση με τις άμεσες δοκιμές εξόλκευσης. Στη συγκεκριμένη διερεύνηση, η τροποποιημένη δοκός με τη λωρίδα TRM συνδεδεμένη στο κάτω μέρος της στηρίχθηκε σε ελεύθερο άνοιγμα 700 mm. Μετά την τοποθέτηση της δοκού στην εξέδρα δοκιμών, οι πλάκες φόρτισης τοποθετήθηκαν πάνω σε μια παχιά στρώση γύψου, εξασφαλίζοντας ότι (i) θα επιτευχθεί πλήρης επαφή μεταξύ των χαλύβδινων τμημάτων και του σκυροδέματος και (ii) η λωρίδα TRM θα είναι σε θέση να μεταφέρει δυνάμεις από την έναρξη της δοκιμής.

Το φορτίο εφαρμόστηκε υπό σταθερό ρυθμό μετατόπισης 0,02 mm/s σε σερβοϋδραυλικό έμβολο 250 kN και μετρήθηκε από μια δυναμοκυψέλη συνδεδεμένη με το σύστημα συλλογής δεδομένων (Σχήμα 2.15). Η κατακόρυφη μετατόπιση των δοκιμών μετρήθηκε με τη χρήση ενός εξωτερικού γραμμικού μεταβλητού διαφορικού μετασχηματιστή (LVDT) που τοποθετήθηκε κάτω από τα σημεία φόρτισης. Επιπλέον, δύο LVDT τοποθετήθηκαν κάτω από τη δοκό για τη μέτρηση της σχετικής μετατόπισης της λωρίδας TRM προς το μπλοκ σκυροδέματος.



Σχήμα 2.15 Τροποποιημένη διάταξη δοκιμής δοκού. (S. Cholostiakow et al., 2024)

Βάσει των αποτελεσμάτων των δοκιμών, μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- Αν και έχουν παρόμοια αντοχή σε κάμψη, το σύστημα TRM με βάση το BCSA έδειξε απόδοση ανώτερη από το σύστημα TRM με βάση το OPC. Σχεδόν διπλασιασμός της ικανότητας αντοχής φορτίου επιτεύχθηκε σε σύγκριση με τη σειρά δοκιμών ενισχυμένων με βάση το OPC.
- Οι ιδιότητες ταχείας πήξης και ταχείας ανάπτυξης αντοχής του BCSA, επέτρεψαν την ανάπτυξη συνάφειας εντός 1 ημέρας αντίστοιχες με αυτές του συνδετικού υλικού OPC που έχει ωριμάσει για 35 ημέρες.
- Το συνδετικό υλικό BCSA επιτρέπει την εκμετάλλευση της αντοχής των υφασμάτων σε μεγαλύτερο βαθμό, χρησιμοποιώντας τις ίνες σε ποσοστό άνω του 30% της ονομαστικής τους μηχανικής αντοχής.

- Η χρήση του BCSA οδήγησε σε αλλαγή στους τρόπους αστοχίας και μετέφερε την αστοχία από τη διεπιφάνεια υφάσματος-κονιάματος στο ίδιο το ύφασμα. Αυτό οφειλόταν στη μεγαλύτερη σύνδεση με το πλέγμα ινών και η λεπτομερής μικροδομική ανάλυση έδειξε ότι ο ετρινγκίτης, ο οποίος αναπτύχθηκε γύρω από τις ίνες, βελτίωσε τον εμποτισμό των ινών.

- Το μήκος επικόλλησης είχε επιρροή στους τρόπους αστοχίας. Όσο υψηλότερη η αντοχή του κονιάματος, τόσο μεγαλύτερη είναι και η επίδραση του μήκους επικόλλησης στις μορφές αστοχίας.

- Οι αναλύσεις XRD, TGA και SEM αποδείχθηκαν χρήσιμες στην αναγνώριση της χημείας/ορυκτολογίας στη διεπιφάνεια συνδετικού-μήτρας καθώς και στην οπτικοποίηση της αλληλεπίδρασης συνδετικού-μήτρας.

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλύσουμε το πειραματικό πρόγραμμα που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος (ΕΤΚΟΣ) του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Συγκεκριμένα, στο πείραμα παρασκευάστηκαν 38 κονιάματα με διαφορετικά υλικά και αναλογίες, τα οποία χωρίστηκαν σε γεωπολυμερή κονιάματα και κονιάματα CSA. Στα δοκίμια αυτά, διερευνήθηκαν οι μηχανικές τους ιδιότητες (εργασιμότητα, αντοχές κ.α.) σε δύο φάσεις, πρώτα στο νωπό μείγμα και έπειτα στο σκληρυμένο.

3.1 ΥΛΙΚΑ

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνθεση των κονιαμάτων είναι τα εξής:

- Αλκαλικό διάλυμα πυριτικού καλίου
- Χαλαζιακή άμμος
- Ίνες πολυπροπυλενίου
- Κιτρικό οξύ
- Μετακαολίνη Μ
- Σκόνη περιστροφικών καμίνων
- Ιπτάμενη τέφρα
- Κονίαμα CSA
- Νερό

3.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

3.2.1 ΑΜΜΟΣ

Στην ανόργανη μήτρα η άμμος έχει τον ρόλο των λεπτών αδρανών. Η κοκκομετρία των αδρανών, έχει αποδειχτεί ότι έχει μεγάλη σημασία στον γεωπολυμερισμό. Για την μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή επιλέγεται όσο το δυνατόν μικρότερη κοκκομετρία της πρώτης ύλης, καθώς έτσι αυξάνεται η ειδική επιφάνεια και κατά συνέπεια η θλιπτική αντοχή. Στην παρούσα πειραματική έρευνα χρησιμοποιήθηκε χαλαζιακή άμμος με δύο ειδών διαμέτρου αδρανή $0.3 - 1.2 \text{ mm}$ και $0 - 0.3 \text{ mm}$ (πούδρα). Για να επιτευχθούν οι συγκεκριμένες διαβαθμίσεις των αδρανών έγινε κοσκίνισμα με ειδική μηχανή κοσκινίσματος (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1 Μηχανή κοσκινίσματος ELE Sieve Shaker.

Η χαλαζιακή άμμος αποτελείται από το πιο κοινό ορυκτό, τον πυρίτιο. Έχει αποδειχθεί ότι βελτιώνει την εργασιμότητα του κονιάματος, ενώ παράλληλα μια μικρή ποσότητα πούδρας μειώνει κατά πολύ την ρευστότητα του μίγματος. Επιπλέον, λόγω του χαμηλού της κόστους και της άφθονης διαθεσιμότητας της στο περιβάλλον χρησιμοποιείται πλέον αρκετά για την παραγωγή πολυμερών κονιαμάτων.

Η χαλαζιακή άμμος αποτελείται από το πιο κοινό ορυκτό, τον πυρίτιο. Τέλος, σύμφωνα με έρευνες η χαλαζιακή άμμος έχει μεγάλη ανθεκτικότητα σε ακραίες καιρικές συνθήκες (Aygörmez, Y., 2021).

3.2.2 ΙΝΕΣ

Οι ίνες που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής είναι συνθετικές ίνες πολυπροπυλενίου (PP) (Σχήμα 3.2). Συγκεκριμένα, κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά των ινών, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, είναι τα εξής (Πίνακας 3.1):

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά ινών πολυπροπυλενίου (PP).

EN 14889-2 : 2006 FIBERPLUS 6 Πολυμερικές ίνες για εφαρμογή σε σκυρόδεμα, κονιάματα και ενέματα χωρίς επίδραση στη στατικότητα	
Είδος πολυμερών	Πολυπροπυλένιο
Κατηγορία ινών	Κλάση Ia μικροινών
Μήκος	6 mm
Διάμετρος	$\leq 0,32$ mm
Μορφή	Ευθεία - μονόινη με κυκλική διατομή
Αντοχή σε εφελκυσμό	50 $\pm$ 10% cN/tex
	500 $\pm$ 10% MPa
Συνεκτικότητα με ίνες 0,9 kg/m ³ - Χρόνος Vebe (σκυρόδεμα αναφοράς : 8 s)	8 s

Η χρήση των ινών πολυπροπυλενίου σε αλκαλικά μείγματα κονιαμάτων, σύμφωνα με έρευνες, έχει δείξει ότι με προσθήκη 1% PP στο μείγμα αυξάνεται η θλιπτική αντοχή κατά 60%, μειώνεται η συστολή ξήρανσης και βοηθάει στην αντιμετώπιση των ρωγμών λόγω των θερμοκρασιακών μεταβολών. Αυτό συμβαίνει γιατί οι ίνες δημιουργούν ένα τριαξονικό οπλισμό, ομοιόμορφα κατανεμημένο στην μάζα του κονιάματος, ο οποίος λειτουργεί από την πρώτη στιγμή της πήξης. Συμπληρωματικά, οι ίνες πολυπροπυλενίου έχουν εύκολη εφαρμογή και χαμηλό κόστος.



Σχήμα 3.2 Ίνες πολυπροπυλενίου PP.

3.2.3 ΑΛΚΑΛΙΚΟ ΔΙΑΛΥΜΑ

Το πυριτικό κάλιο (K_2SiO_3) αποτελεί ένα αλκαλικό διάλυμα σε διαυγής υγρή μορφή και λειτουργεί και αυτό σαν ενεργοποιητής του γεωπολυμερούς. Η χημική του σύσταση, όπως αναγράφεται από τον κατασκευαστή, έχει ως εξής (Πίνακας 3.2):

Πίνακας 3.2 Χημική σύσταση πυριτικού καλίου.

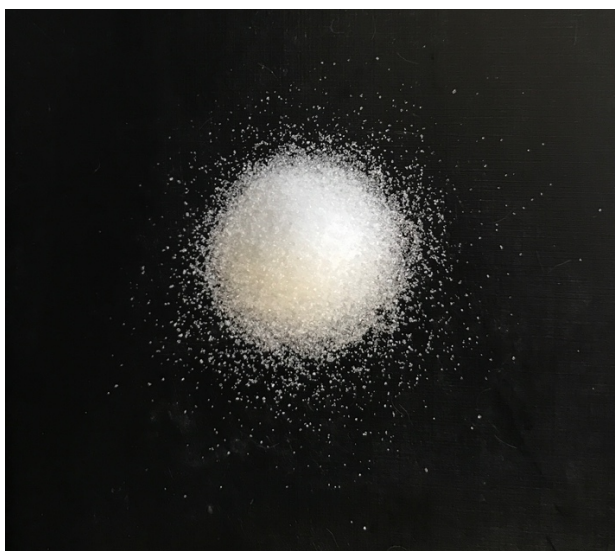
Χημικό στοιχείο	Βάρος (%)
SiO_2	23,6
K_2O	21,8

Έρευνες έχουν δείξει ότι τα κονιάματα που περιέχουν πυριτικό κάλιο παρουσιάζουν καλύτερη θερμική σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες, καλύτερη ποιότητα μικροδομής και χαμηλότερο πορώδες (Rocha T. S. et al, 2018).

3.2.4 ΚΙΤΡΙΚΟ ΟΞΥ

Το κιτρικό οξύ είναι ένα ασθενές οργανικό τρικαρβοξυλικό οξύ με χημικό τύπο $C_6H_8O_7$. Γενικά, χρησιμοποιείται ως επιβραδυντικό πρόσθετο καθώς επιβραδύνει τον

χρόνο πήξης. Στην παρούσα διπλωματική, έγινε χρήση του σαν επιβραδυντής μόνο στα μείγματα που είχαν σαν κύριο κονίαμα το BCSA. Το κιτρικό οξύ επιμηκύνει σημαντικά τον χρόνο πήξης, τόσο τον αρχικό όσο και τον τελικό, όταν προστίθεται σε περιεκτικότητες 0,25%-0,6%. Επιπρόσθετα, με την σωστή αναλογία, παρατηρείται η μέγιστη αύξηση της αντοχής σε θλίψη. Η προσθήκη μεγαλύτερης ποσότητας κιτρικού οξέος μπορεί να μειώσει την αποτελεσματικότητα στην επιμήκυνση του χρόνου πήξης αλλά και την θλιπτική αντοχή λόγω της υπερβολικής καθυστέρησης της ενυδάτωσης (D. Zou et al., 2020). Στο συγκεκριμένο πείραμα, το κιτρικό οξύ που χρησιμοποιήθηκε ήταν σε μορφή άχρωμης κρυσταλλικής σκόνης (Σχήμα 3.3), η οποία στην συνέχεια αναμείχθηκε με νερό για την σωστή διάλυση της.



Σχήμα 3.3 Κιτρικό οξύ.

3.2.5 ΜΕΤΑΚΑΟΛΙΝΗ Μ

Η μετακαολίνη Μ (Σχήμα 3.4) είναι ένα ποζολανικό υλικό και παράγεται από την καύση καολινίτη σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Το κύριο χαρακτηριστικό της είναι ότι έχει την ικανότητα να δεσμεύει μεγάλες ποσότητες υδροξειδίου του ασβέστου δημιουργώντας ένυδρες ασβεστοπυριτικές ενώσεις C-S-H (Μακρίδου Σ., Μάντσιου Β., 2022). Ακόμη, ενισχύει την εργασιμότητα του μείγματος και αναμειγνύεται με ευκολία προσδίδοντας μια απαλή και πλαστική υφή στο τελικό προϊόν. Η προσθήκη της γίνεται συχνά για να μειωθεί η εξάνθηση, να αυξηθεί η ανθεκτικότητα και να λειτουργήσει ως

συνδετικό υλικό με τον ασβέστη. Τέλος, με την προσθήκη της στο μίγμα, αυξάνεται η πυκνότητα του κονιάματος, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο και την αντοχή του.



Σχήμα 3.4 Μετακαολίνη Μ.

Η μετακαολίνη Μ έχει χρώμα κόκκινο, υψηλή αντιδραστικότητα, ειδικό βάρος 2,5 g/cm³, πυκνότητά ίση με 500 – 700 kg/m³, και κοκκομετρία που κυμαίνεται από 0,002-0,1 mm. Η χημική της σύσταση, όπως υποδεικνύεται από τον κατασκευαστή, έχει ως εξής (Πίνακας 3.3):

Πίνακας 3.3 Χημική ανάλυση μετακαολίνης.

Χημικό στοιχείο	Βάρος (%)
SiO ₂	67-69
Al ₂ O ₃	25-27
Fe ₂ O ₃	<2,5
K ₂ O	<0,2

3.2.6 ΣΚΟΝΗ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΚΑΜΙΝΩΝ

Η σκόνη Π/Κ (Σχήμα 3.5) είναι ένα παραπροϊόν της διαδικασίας παράγωγης σιδηρονικελίου. Συγκεκριμένα, η σκόνη που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα προέρχεται από το εργοστάσιο ΛΑΡΚΟ Γ.Μ.Μ.Α.Ε. Η διαδικασία παραγωγής της περιλαμβάνει την ανάμειξη μεταλλεύματος με γαιάνθρακα και την τοποθέτηση του σε περιστροφικές καμίνους, με θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 400°C έως 750-800°C. Από τα αέρια της καύσης έχουμε την συλλογή της “σκόνης” σε ειδικά φίλτρα. Το υλικό που έχει προθερμανθεί μπαίνει σε ηλεκτροκαμίνους, οι οποίοι αναπτύσσουν θερμοκρασίες της τάξης των 1600°C, ώστε να τηχθούν και να διαχωριστούν τα συστατικά και να εξαχθεί το τελικό προϊόν.



Σχήμα 3.5 Σκόνη Π/Κ.

Η σκόνη Π/Κ έχει χρώμα σκούρο καφέ, η κοκομετρία της κυμαίνεται από 0,045 - 0,5 mm. Η χημική της σύσταση, με βάση τον κατασκευαστή, έχει ως εξής (Πίνακας 3.4):

Πίνακας 3.4 Χημική σύσταση Σκόνης Π/Κ.

Χημικό στοιχείο	Βάρος (%)
SiO₂	30,82
Fe₂O₃	15,18
Al₂O₃	10,96
MgO	8,83
FeO	8,3
CaO	7,44

3.2.7 ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ

Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 450, ιπτάμενη τέφρα (Σχήμα 3.6) ορίζεται ως “το λεπτόκοκκο υλικό αποτελούμενο από κυρίως σφαιρικά, υαλώδη σωματίδια, προερχόμενα από την καύση κονιορτοποιημένου άνθρακα. Μπορεί να είναι πυριτικής ή ασβεστολιθικής προέλευσης (Κοντομηνά Α., 2017). Συγκεκριμένα, οι τέφρες διακρίνονται σε τύπους Class F και Class C, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C618. Η Class F είναι συνήθως φτωχή σε ασβέστιο και το άθροισμα των στοιχείων SiO₂, Al₂O₃ και Fe₂O₃ ξεπερνάει το 70%. Από την άλλη, η Class C περιέχει μεγαλύτερα ποσοστά ασβεστίου και το άθροισμα SiO₂, Al₂O₃ και Fe₂O₃ είναι πάνω από 50% (Tsimas & Moutsatsou-Tsima, 2004).

Η ιπτάμενη τέφρα που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα προέρχεται από το εργοστάσιο της ΔΕΗ στην Πτολεμαΐδα, παράγεται στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς του εργοστασίου και είναι ασβεστολιθικής προέλευσης.

Η ιπτάμενη τέφρα, όταν ενεργοποιείται κατάλληλα, μπορεί να παράγει γεωπολυμερή με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Συγκεκριμένα, έχουν χαμηλότερο πορώδες και υψηλότερη μηχανική αντοχή σε σχέση με το τσιμέντο Portland. Οι σφαιρικές μορφές των σωματιδίων της ιπτάμενης τέφρας βελτιώνουν τη συνοχή του υλικού και μειώνουν την διαπερατότητα. Τέλος, τα γεωπολυμερή που βασίζονται στην ιπτάμενη τέφρα παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε διάβρωση, περιβαλλοντικούς παράγοντες και θερότητα (Αλιάδης Δ. & Λίντας Δ., 2018).



Σχήμα 3.6 *Ιπτάμενη τέφρα.*

Η ιπτάμενη τέφρα έχει χρώμα γκρι, ειδικό βάρος $1,9-2,6 \text{ g/cm}^3$ και πυκνότητα ίση με $0,5-0,7 \text{ g/cm}^3$. Μία τυπική χημική σύσταση ασβεστολιθικής ιπτάμενης τέφρας (S. Tsimas & Moutsatsou-Tsima, 2004), είναι η εξής (Πίνακας 3.5):

Πίνακας 3.5 *Χημική σύσταση ιπτάμενης τέφρας.*

Χημικό στοιχείο	Βάρος (%)
SiO_2	25-60
CaO	1-35
Al_2O_3	10-30
Fe_2O_3	5-25

3.2.8 KONIAMA BCSA

Το κονίαμα που χρησιμοποιήθηκε στο παρόν πειραματικό πρόγραμμα (Σχήμα 3.7), είναι ένα προ-συσκευασμένο κονίαμα κατηγορίας BCSA, που περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα συστατικά, συμπεριλαμβανομένων των αδρανών, έτοιμο για ανάμειξη με νερό. Το υλικό αυτό είναι ένα υψηλής αντοχής και ταχείας πήξης κονίαμα για πολλαπλές χρήσεις και επισκευές. Ειδικότερα, είναι ένα υδραυλικό κονίαμα με υψηλή αντοχή σε θλίψη (σύμφωνα με τον κατασκευαστή, φτάνει τιμές 17 MPa και 45 MPa σε 1 ώρα και σε 28 ημέρες, αντίστοιχα), ταχείας ρύθμισης, που περιέχει υψηλής ποιότητας αδρανή, χωρίς μέταλλα. Σύμφωνα με το τεχνικό δελτίο ιδιοτήτων του υλικού, το κονίαμα αυτό σκληραίνει σε 15 λεπτά, επιτυγχάνει μέγιστη αντοχή στη 1 ώρα, είναι ανθεκτικό σε υγρό περιβάλλον και έχει χαμηλή συστολή ξήρανσης. Συμπερασματικά, είναι ένα ευέλικτο και φιλικό προς το περιβάλλον υλικό με πολλαπλές χρήσεις στον τομέα των κατασκευών και επισκευών.



Σχήμα 3.7 Κονίαμα BCSA.

Το χρώμα του είναι γκρι και έχει πυκνότητα ίση με $2.96 - 2.98 \text{ g/cm}^3$. Σύμφωνα με το φύλλο ιδιοτήτων του προϊόντος, η χημική σύσταση περιλαμβάνει τα εξής κύρια συστατικά (Πίνακας 3.6):

Πίνακας 3.6 Κύρια συστατικά κονιάματος BCSA.

Χημικό στοιχείο
SiO_2
Ca_2SiO_4
$\text{Al}_2\text{Ca}_6\text{O}_6(\text{SO}_4)_3$
CaSO_4

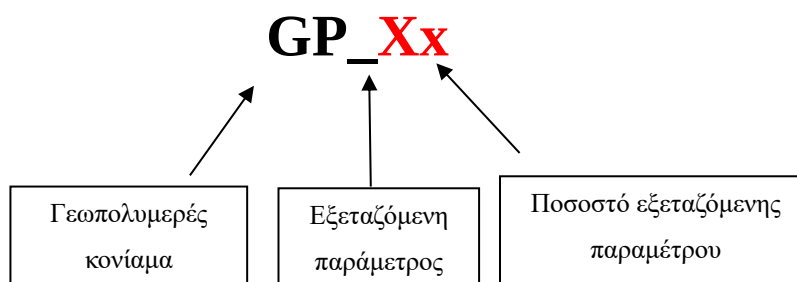
3.3 ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Παράμετροι διερεύνησης του πειράματος αποτέλεσαν τα υλικά της σύνθεσης του κονιάματος και οι μεταξύ τους αναλογίες. Συγκεκριμένα, τα μείγματα μας χωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τα είδη των κονιάματα που χρησιμοποιήθηκαν:

1. Σειρά δοκιμών A: δοκίμα με γεωπολυμερή κονιάματα
2. Σειρά δοκιμών B: δοκίμα με κονίαμα CSA

3.3.1 Σειρά δοκιμών A

Το συγκεκριμένο πειραματικό πρόγραμμα αποτελείται από δέκα εννέα μείγματα στα οποία δόθηκε η ονοματολογία ανάλογα με την παράμετρο που εξετάζεται κάθε φορά. Συγκεκριμένα, η γενική μορφή της ονοματολογίας έχει ως εξής (Σχήμα 3.8):

**Σχήμα 3.8** Μορφή ονοματολογίας δοκιμών Σειράς A.

Αρχικά, η πρώτη παράμετρος που εξετάστηκε ήταν η επιρροή του ποσοστού ιπτάμενης τέφρας (FA) και σκόνης Π/Κ (D) στο μείγμα. Έχουμε λοιπόν τα πρώτα μείγματα γεωπολυμερών με τις εξής αναλογίες υλικών (Πίνακας 3.7):

Πίνακας 3.7 Αναλογίες υλικών για ποσοστά FA-D.

Όνομα κονιάματος	Πυριτικό κάλιο	Ιπτάμενη τέφρα	Μετακαολί νη	Σκόνη Π/Κ	Άμμος 0.3- 1.2mm	Άμμος <0.3mm	Ίνες
GP_FA1_D1	3	1	1	1	1.5	3	1
GP_FA1.5_D0.5	3	1.5	1	0.5	1.5	3	1
GP_FA0.5_D1.5	3	0.5	1	1.5	1.5	3	1
GP_FA1.33_D0.67	3	1.33	1	0.67	1.5	3	1
GP_FA1.2_D0.8	3	1.2	1	0.8	1.5	3	1
GP_FA0.8_D1.2	3	0.8	1	1.2	1.5	3	1
GP_FA0.67_D1.33	3	0.67	1	1.33	1.5	3	1

Στη συνέχεια, διατηρήθηκαν οι αναλογίες ιπτάμενης τέφρας και σκόνης Π/Κ που μας δίνουν τις καλύτερες ιδιότητες και η επόμενη παράμετρος που εξετάστηκε ήταν το ποσοστό των γεωπολυμερών κονιαμάτων και του αλκαλικού διαλύματος έναντι του ποσοστού της άμμου στο μείγμα (Binder/Sand). Ειδικότερα, έγινε διερεύνηση των αναλογιών ιπτάμενης τέφρας, μετακαολίνης, σκόνης Π/Κ και πυριτικού καλίου ($FA+M+D+G = B$) προς τις αναλογίες άμμου $< 0,3\text{mm}$ και άμμου $0,3-1\text{mm}$ ($q+Q = S$) και προέκυψαν τα εξής μείγματα γεωπολυμερών (Πίνακας 3.8):

Πίνακας 3.8 Αναλογίες υλικών για λόγους B:S.

Όνομα κονιάματος	Πυριτικό κάλιο	Ιπτάμενη τέφρα	Μετακαολίνη	Σκόνη Π/Κ	Άμμος 0.3- 1.2mm	Άμμος <0.3mm	Ίνες
GP_B:S0.67	3	0.67	1	1.33	3	6	1
GP_B:S0,8	3	0.67	1	1.33	2.5	5	1
GP_B:S1	3	0.67	1	1.33	2	4	1
GP_B:S1.5	3	0.67	1	1.33	1.33	2.67	1
GP_B:S2	3	0.67	1	1.33	1	2	1

Έπειτα, συνεχίσαμε με τις αναλογίες των γεωπολυμερών και της άμμου που μας προσφέρουν βέλτιστα χαρακτηριστικά και αυτή την φορά έγιναν δοκιμές στα ποσοστά των ινών (F). Το μείγμα με ποσοστό ινών ίσο με 1 εξετάστηκε στην προηγούμενη ομάδα δοκιμών (GP_B:S1). Τα μείγματα που προκύπτουν έχουν τις εξής αναλογίες (Πίνακας 3.9):

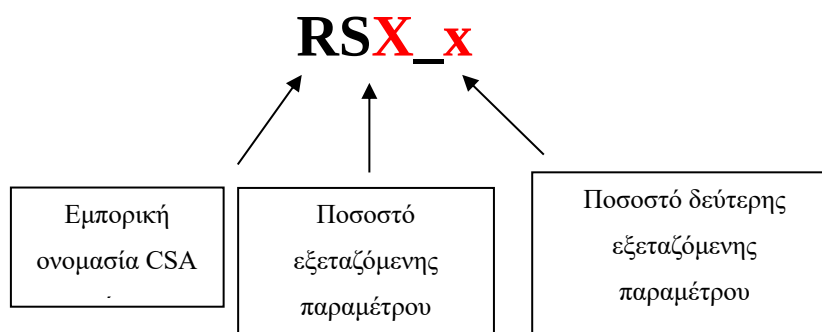
Πίνακας 3.9 Αναλογίες υλικών για ποσοστά ινών.

Όνομα κονιάματος	Πυριτικό κάλιο	Ιπτάμενη τέφρα	Μετακαολίνη	Σκόνη Π/Κ	Άμμος 0.3-1.2mm	Άμμος <0.3mm	Ίνες
GP_F0.125	3	0.67	1	1.33	2	4	0.125
GP_F0.25	3	0.67	1	1.33	2	4	0.25
GP_F0.5	3	0.67	1	1.33	2	4	0.5
GP_F0.75	3	0.67	1	1.33	2	4	0.75
GP_F1.25	3	0.67	1	1.33	2	4	1.25
GP_F1.5	3	0.67	1	1.33	2	4	1.5

Ολοκληρώνοντας, πραγματοποιήθηκε μια μεγάλης κλίμακας ανάμειξη των γεωπολυμερών με τις τελικές βέλτιστες αναλογίες (optimal) υλικών (GP_optimal).

3.3.2 Σειρά δοκιμών B

Το εν λόγω πειραματικό πρόγραμμα αποτελείται από δέκα εννέα μείγματα στα οποία δόθηκε, και σε αυτή την περίπτωση, η ονοματολογία ανάλογα με την παράμετρο που εξετάζεται κάθε φορά εκτός από το μείγμα αναφοράς (reference) με τις αρχικές αναλογίες. Συγκεκριμένα, το μείγμα αναφοράς φέρει την ονομασία REF, ενώ στα υπόλοιπα η γενική μορφή της ονοματολογίας έχει ως εξής (Σχήμα 3.9):



Σχήμα 3.9 Μορφή ονοματολογίας δοκιμών Σειράς B.

Στο συγκεκριμένο πειραματικό πρόγραμμα, η πρώτη παράμετρος που ερευνήθηκε είναι η επιρροή του κιτρικού οξέος στο μείγμα. Στην αναλογία του λόγου N/T το N αντιστοιχεί στο ποσοστό του νερού ενώ το T στο ποσοστό του κονιάματος CSA. Τα δοκίμια που προέκυψαν είχαν τις παρακάτω αναλογίες (Πίνακας 3.10):

Πίνακας 3.10 Αναλογίες υλικών για ποσοστά κιτρικού οξέος.

Όνομα κονιάματος	Λόγος N/T	Κιτρικό οξύ	Ίνες
REF	0.185	0	0.1
RS0.3	0.185	0.3	0.1
RS0.4	0.185	0.4	0.1
RS0.5	0.185	0.5	0.1
RS0.6	0.185	0.6	0.1
RS0.7	0.185	0.7	0.1

Στη συνέχεια, διατηρήθηκε η αναλογία του κιτρικού οξέος που μας προσφέρει τις καλύτερες ιδιότητες (RS0.6) και η επόμενη παράμετρος που εξετάστηκε ήταν το ποσοστό ινών στο μείγμα. Η περίπτωση με ποσοστό ινών 0.1 και κιτρικό οξύ 0.6 εξετάστηκε στα προηγούμενα δοκίμια. Έτσι λοιπόν, έχουμε τα εξής επόμενα μείγματα (Πίνακας 3.11):

Πίνακας 3.11 Αναλογίες υλικών για ποσοστά ινών.

Όνομα κονιάματος	Λόγος N/T	Κιτρικό οξύ	Ίνες
RS0.6_0.5	0.185	0.6	0.5
RS0.6_1	0.185	0.6	1

Επόμενη παράμετρος που ερευνήθηκε, διατηρώντας τα βέλτιστα ποσοστά κιτρικού οξέος και ινών, ήταν η επιρροή του λόγου N/T στο μείγμα. Η περίπτωση με λόγο N/T ίσο με 0.185 εξετάστηκε στα προηγούμενα δοκίμια. Αναλυτικότερα, οι αναλογίες των δοκιμίων που προέκυψαν διαμορφώθηκαν ως εξής (Πίνακας 3.12):

Πίνακας 3.12 Αναλογίες υλικών για ποσοστά ινών.

Όνομα κονιάματος	Λόγος N/T	Κιτρικό οξύ	Ίνες
RS0.6_0.155	0.155	0.6	0.1
RS0.6_0.165	0.165	0.6	0.1
RS0.6_0.17	0.17	0.6	0.1
RS0.6_0.175	0.175	0.6	0.1
RS0.6_0.18	0.18	0.6	0.1

Σε αυτό το σημείο, είναι απαραίτητο να αναφερθεί πως στο συνολικό ποσοστό του κονιάματος CSA, μετά την διαδικασία κοσκινίσματος, η αναλογία της κονιάς προς τα αδρανή ήταν 45% κονία και 55% αδρανή. Παράμετρος διερεύνησης των επόμενων δοκιμών ήταν η επιρροή της προσθήκης αδρανών στο συνολικό ποσοστό κονιάματος, διατηρώντας σταθερό τον λόγο N/T. Συγκεκριμένα, τα αδρανή που προστέθηκαν ήταν άμμος <0,3mm(q), άμμος 0,3-1mm (Q) και συνδυασμός των δύο αυτών. Οι νέες αναλογίες του λόγου κονία προς αδρανή που προέκυψαν μετά την προσθήκη άμμου ήταν 40/60 και 30/70 αντίστοιχα. Με βάση τα παραπάνω λοιπόν, παράχθηκαν τα εξής δοκίμια με αναλογίες υλικών (Πίνακας 3.13):

Πίνακας 3.13 Αναλογίες υλικών για ποσοστά προσθήκης άμμου.

Όνομα κονιάματος	Λόγος N/T	Κιτρικό οξύ	Ίνες	Συνολικό ποσοστό κονιάματος CSA (T)			
				Κονία	Αδρανή υλικού	q	Q
RS0.6_45/55	0.185	0.6	0.1	0.45	0.55	-	-
RS0.6_40/60_q	0.185	0.6	0.1	0.4	0.55	0.05	-
RS0.6_40/60_Q	0.185	0.6	0.1	0.4	0.55	-	0.05
RS0.6_40/60_Qq	0.185	0.6	0.1	0.4	0.55	0.025	0.025
RS0.6_30/70_q	0.185	0.6	0.1	0.3	0.55	0.15	-
RS0.6_30/70_Q	0.185	0.6	0.1	0.3	0.55	-	0.15
RS0.6_30/70_Qq	0.185	0.6	0.1	0.3	0.55	0.075	0.075

Τέλος, διατηρώντας τις κατάλληλες αναλογίες υλικών, εξετάστηκε η επιρροή της θερμοκρασίας του νερού στο μείγμα. Τα δοκίμια που προκύπτουν είναι τα εξής (Πίνακας 3.14):

Πίνακας 3.14 Αναλογίες υλικών για διαφορετικές θερμοκρασίες νερού.

Όνομα κονιάματος	Λόγος N/T	Κιτρικό οξύ	Ίνες	Θερμοκρασία νερού [°C]
RS0.6 (2.3)	0.185	0.6	0.1	2.3
RS0.6 (9.4)	0.185	0.6	0.1	9.4
RS0.6 (10.5)	0.185	0.6	0.1	10.5
RS0.6 (13.7)	0.185	0.6	0.1	13.7
RS0.6 (14.8)	0.185	0.6	0.1	14.8
RS0.6 (17.3)	0.185	0.6	0.1	17.3
RS0.6 (22.8)	0.185	0.6	0.1	22.8
RS0.6 (22.9)	0.185	0.6	0.1	22.9

Και σε αυτή τη σειρά δοκιμών επιλέχθηκε το μείγμα με τις βέλτιστες ιδιότητες σαν τελικό μείγμα (**RS_optimal**).

3.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Για τη δημιουργία των δοκιμών ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

1^ο ΒΗΜΑ ΖΥΓΙΣΜΑ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ

Αρχικά, προκειμένου να γίνει σωστά η ανάμειξη, επιβεβαιώθηκε πως τα στερεά υλικά είχαν την απαιτούμενη κοκκομετρική διαβάθμιση κοσκινίζοντας τα με τη

βοήθεια της μηχανής κοσκινίσματος (Σχήμα 3.1). Έπειτα, ζυγίστηκαν προσεκτικά όλα τα υλικά (Σχήμα 3.11) σε ζυγαριές μεγάλης ακρίβειας (Σχήμα 3.10) και περάστηκε ένα λεπτό στρώμα λαδιού στα καλούπια προκειμένου να διευκολυνθεί η διαδικασία αφαίρεσης των δοκιμών μετά τη σκλήρυνσή τους.

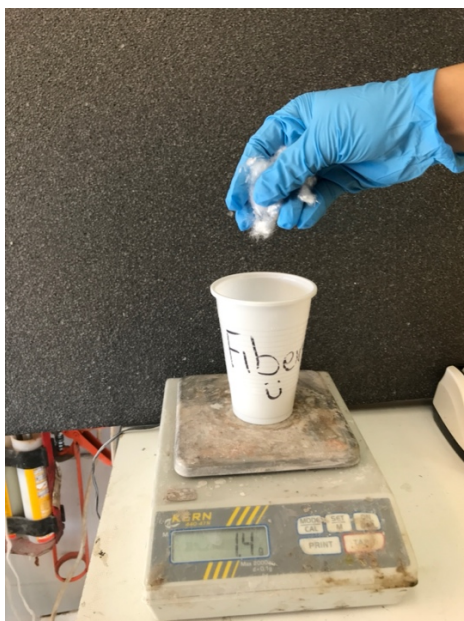


(α)



(β)

Σχήμα 3.10 α) Ζυγαριά πάγκου β) Ζυγαριά δαπέδου.



Σχήμα 3.11 Ζύγισμα υλικών στο εργαστήριο.

2^ο ΒΗΜΑ ΑΝΑΜΕΙΞΗ ΥΛΙΚΩΝ

Για την ανάμειξη των υλικών (Σχήμα 3.12), προστέθηκε στον αναδευτήρα πρώτα το υγρό συστατικό της εκάστοτε ανάμειξης (νερό ή πυριτικό κάλιο) και, για όποια μείγματα της σειράς Β χρειαζόταν, διαλύθηκε σε αυτό το κιτρικό οξύ και αφέθηκε να ενεργοποιηθεί για 2-3'. Στη συνέχεια, προστέθηκαν οι ίνες PP διαλύοντας τις για πιο ομοιόμορφη κατανομή στο μείγμα. Αφού αναμείχθηκαν μεταξύ τους όλα τα στέρεα υλικά, προστέθηκαν σιγά-σιγά στον κάδο του αναδευτήρα σταματώντας ενδιάμεσα την ανάμειξη για να αφαιρεθούν τυχόν υπολείμματα από τα τοιχώματα του. Για τα κονιάματα της σειράς Α ακολουθήθηκε η αντίστροφη διαδικασία (προστέθηκε το υγρό στα στερεά). Τέλος, όταν είχαν προστεθεί πλέον όλα τα υλικά στον κάδο, το μείγμα χτυπήθηκε σε υψηλή ταχύτητα για περίπου 10'. Σε αυτό το σημείο παρατηρήθηκε η θιξοτροπία των μειγμάτων (κυρίως των κονιαμάτων της σειράς Α) καθώς, όταν αυξανόταν η ταχύτητα ανάδευση τους, η σύστασή τους γινόταν λιγότερο παχύρρευστη και πιο ελαστική.



Σχήμα 3.12 Ανάμειξη υλικών σε αναδευτήρα.

3^ο ΒΗΜΑ ΓΕΜΙΣΜΑ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ

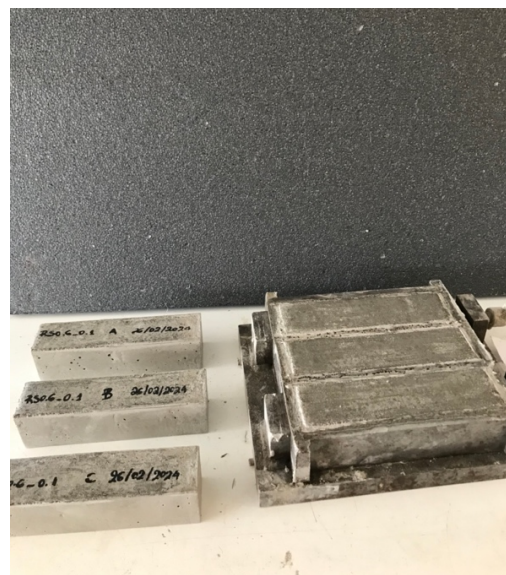
Αφού ολοκληρώθηκαν οι δοκιμές, σειρά είχε το γέμισμα των καλουπιών (Σχήμα 3.13). Τα καλούπια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μεταλλικές ορθογωνικές τριπλέτες με εσωτερικές διαστάσεις 160mm × 40mm × 40mm (μήκος × πλάτος × ύψος). Το γέμισμα τους έγινε σε δύο ισόποσες δόσεις, με πραγματοποίηση περίπου 50 δονήσεων ενδιάμεσα για τη σωστή συμπίκνωση του μείγματος και την αποφυγή δημιουργίας πόρων που μπορεί να προκαλέσουν σημαντική μείωση της αντοχής των δοκιμίων. Η συντήρηση τους μέχρι το ξεκαλούπωμα ήταν διαφορετική για κάθε σειρά δοκιμίων. Τα δοκίμια της σειράς Β, διατηρήθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C (+3/-2 °C) και με σχετική υγρασία, RH, 65% ($\pm$ 5%), ενώ τα δοκίμια της σειράς Α, τις πρώτες 7 ημέρες διατηρήθηκαν σε διαφανείς σακούλες σε ίδια θερμοκρασία αλλά με σχετική υγρασία, RH, 75% ($\pm$ 2%) για την αποφυγή έντονης συρρίκνωσης των δοκιμίων.



Σχήμα 3.13 Γέμισμα καλουπιών.

4^ο ΒΗΜΑ ΞΕΚΑΛΟΥΠΩΜΑ

Μετά από 1-2 μέρες πραγματοποιήθηκε η αφαίρεση των δοκιμίων από τα καλούπια με προσοχή να μην προκληθούν φθορές (Σχήμα 3.14).



Σχήμα 3.14 Ξεκαλούπωμα δοκιμίων.

5^ο ΒΗΜΑ ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ

Ο τρόπος συντήρησης των δοκιμίων της σειράς A και B μετά το ξεκαλούπωμα ήταν και πάλι διαφορετικός. Πιο συγκεκριμένα, τα δοκίμια της σειράς B τοποθετήθηκαν σε δεξαμενή νερού (Σχήμα 3.15) σταθερής θερμοκρασίας 23 °C και διατηρήθηκαν εκεί για 7 ή 28 ημέρες ανάλογα με τη δοκιμή στην οποία θα υποβαλλόταν η κάθε τριάδα. Τα δοκίμια της σειράς A τοποθετήθηκαν ξανά σε σακούλα με τις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούσαν στη συντήρησή τους πριν τη σκλήρυνση για 7 ημέρες. Μετά για τις επόμενες 21 ημέρες διατηρήθηκαν σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος 20 °C (+3/-2 °C) και RH: 65% (± 5%).



Σχήμα 3.15 Συντήρηση δοκιμίων σε δεξαμενή νερού.

3.5 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

3.5.1 ΠΡΩΤΟ ΜΕΡΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑΣ

Αρχικά, και ενώ το μείγμα ήταν ακόμα νωπό έγιναν δοκιμές για να ελεγχθεί η εργασιμότητα του. Η εργασιμότητα αντικατοπτρίζει την ευκολία και τη δυνατότητα εργασίας με νωπό κονίαμα κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Πρόκειται για τη σωστή συνοχή και στιβαρότητα που επιτρέπει στο μείγμα να χειρίζεται σωστά και να διαμορφώνεται σε κατασκευές, διατηρώντας παράλληλα την ομοιομορφία του.

Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 1015-3:1999, ο έλεγχος της εργασιμότητας του νωπού κονιάματος γίνεται μέσω της τιμής εξάπλωσης (flow value), που μετριέται με τη δοκιμή “flow table test”. Το πείραμα περιλάμβανε αρχικά την τοποθέτηση του νωπού μείγματος σε μια τράπεζα εξάπλωσης (Σχήμα 3.16) με τη βοήθεια ενός κωνικού καλουπιού το οποίο έδινε στο μείγμα το επιθυμητό σχήμα για τη συγκεκριμένη μέτρηση. Αφού γέμισε το καλούπι, το μείγμα υποβλήθηκε σε κατακόρυφες δονήσεις για να επιτευχθεί η συμπύκνωση του και να απελευθερωθεί ο εγκλωβισμένος αέρας.

Έπειτα, αφαιρέθηκε το καλούπι κάθετα και πραγματοποιήθηκαν 15 χτυπήματα (ανά 1 δευτερόλεπτο το καθ' ένα). Αφού εξαπλώθηκε το μείγμα και πήρε ένα στρογγυλό σχήμα, μετρήθηκαν και καταγράφηκαν οι δύο κάθετες διαμέτροι του. Έγιναν τρεις δοκιμές εργασιμότητας στο κάθε μείγμα (στα 5', 15' και 30' μετά την ανάμειξη).



Σχήμα 3.16 Δοκιμές εργασιμότητας σε τράπεζα εξάπλωσης.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΝΩΠΟΥ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ

Ενδιάμεσα από τις δοκιμές εργασιμότητας, έγινε προσδιορισμός της πυκνότητας του μείγματος σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 1015-6:1998. Αρχικά, για να υπολογιστεί η μάζα του, τοποθετήθηκε το μείγμα σε ένα κυλινδρικό καλούπι διαστάσεων 100mm × 50mm (ύψος × πλάτος) ή 150mm × 75mm (ύψος × πλάτος) σε δύο δόσεις, αφαιρώντας τον εγκλωβισμένο αέρα με δονήσεις ενδιάμεσα. Αφού ζυγίστηκε το συμπυκνωμένο μείγμα (Σχήμα 3.17), καταγράφηκε η τιμή της μάζας σε γραμμάρια και με τη χρήση της εξίσωσης (3.1) υπολογίστηκε η πυκνότητα, ρ_m , σε $\frac{kg}{m^3}$. Πραγματοποιήθηκαν τρεις μετρήσεις (στα 5', 15' και στα 30' μετά την ανάμειξη).

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3.1)$$

Όπου:

ρ_m : η πυκνότητα του νωπού μείγματος (kg/m^3);

m_1 : η μάζα του άδειου καλουπιού (g);

m_2 : η μάζα του καλουπιού γεμισμένο με κονίαμα (g);

V : ο όγκος του καλουπιού μέτρησης (mm^3)



Σχήμα 3.17 Μέτρηση μάζας σε κυλινδρικό καλούπι.

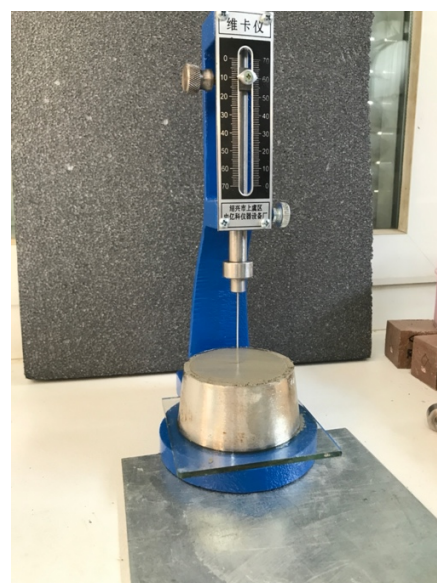
ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΡΧΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΠΗΞΗΣ (INITIAL SETTING TIME)

Σε αυτό το σημείο, το εκάστοτε κονίαμα τοποθετήθηκε σε κόλουρο κώνο συγκεκριμένων διαστάσεων, σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 196-3:2005, ο οποίος στη συνέχεια τοποθετήθηκε στη συσκευή Vicat (Vicat apparatus test) (Σχήμα 3.18). Σκοπός της δοκιμής αυτής ήταν ο προσδιορισμός του αρχικού χρόνου πήξης (initial setting time) του μείγματος, ο χρόνος δηλαδή που απαιτείται από τη στιγμή που προστίθεται νερό στο κονίαμα μέχρι η πάστα να χάσει την πλαστικότητά της. Κατά τη

διάρκεια αυτού του σταδίου, το μείγμα σκληραίνει αλλά παραμένει εργάσιμο. Η γνώση του αρχικού χρόνου πήξης του τσιμέντου είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της ποιότητας και της ανθεκτικότητας των κατασκευαστικών έργων. Ο ακριβής χρόνος βοηθά στον προγραμματισμό των κατασκευαστικών δραστηριοτήτων, στη μείωση του χρόνου διακοπής εργασιών και στη βελτιστοποίηση των πόρων. Για τη δοκιμή αυτή χρησιμοποιήθηκε μια εξειδικευμένη συσκευή που διαθέτει μια κατακόρυφη ράβδο με μια βελόνα στο άκρο της.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε αφού τοποθετήθηκε το καλούπι με το μείγμα στη συσκευή Vicat ήταν η ρύθμιση της βελόνας να είναι σε ύψος που οριακά ακουμπούσε το επάνω μέρος του γεμισμένου καλουπιού. Αυτό το σημείο ορίστηκε ως τιμή '0' στη μεζούρα της συσκευής. Στη συνέχεια αφέθηκε το κινητό μέρος του μηχανήματος να πέσει από το συγκεκριμένο ύψος και καταγράφηκε από το αναλόγιο η βύθιση της βελόνας. Η πρώτη διείσδυση αναμένεται να είναι 40 mm (όσο και το ύψος του κόλουρου κώνου).

Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε αρκετές φορές, έως ότου να σημειωθεί διαφορά στη βύθιση της τάξεως των 3 mm (δηλαδή για ένδειξη μικρότερη ή ίση από 37 mm). Όταν εμφανιζόταν αυτή η τιμή, επιβεβαιωνόταν με επανάληψη ρίψης της βελόνας σε άλλα δύο διαφορετικά σημεία. Εφόσον ίσχυε η ίδια τιμή, υπολογιζόταν η χρονική απόσταση από τη στιγμή που ξεκίνησε η ανάμειξη των υλικών ως αρχικός χρόνος πήξης του μείγματος.



Σχήμα 3.18 Προετοιμασία για μέτρηση χρόνου πήξης.

3.5.2 ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΕΡΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΣΚΛΗΡΥΜΕΝΟΥ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ

Μετά τη σκλήρυνση των δοκιμών ακολούθησε η αφαίρεση τους από τα καλούπια (Σχήμα 3.19) για να ακολουθήσουν οι επόμενες δοκιμές. Αφού μετρήθηκαν οι διαστάσεις του κάθε δοκιμίου (μήκος, πλάτος, ύψος) προκειμένου να προσδιοριστεί ο όγκος του, ζυγίστηκαν σε ζυγαριά ακριβείας (Σχήμα 3.10). Με βάση το πρότυπο EN 1015-10:2000 υπολογίστηκε, με το μέσο όρο τους, η μέση πυκνότητα του σκληρυμένου μείγματος με χρήση της εξίσωσης (3.2):

$$\rho_m = \frac{m}{V} \quad (3.2)$$

Όπου:

ρ_m : η πυκνότητα του σκληρυμένου μείγματος (kg/m^3);

m : η μάζα του δοκιμίου (g);

V : ο όγκος του δοκιμίου (mm^3)



Σχήμα 3.19 Δοκίμια πριν τη μέτρηση των διαστάσεων τους.

ANTOXH ΣΕ ΚΑΜΨΗ

Μετά από τη μέτρηση των διαστάσεων και της μάζας τους τα δοκίμια, των οποίων η εφελκυστική αντοχή έπρεπε να προσδιοριστεί, υποβλήθηκαν σε δοκιμή κάμψης τριών σημείων 7 και 28 ημέρες μετά την ανάμειξη. Η διαδικασία διεξήχθη βασισμένη στο πρότυπο EN 1015-11:2019. Οι δοκιμές έγιναν σε μηχανή κάμψης (υδραυλική πρέσα), η οποία είχε στη βάση της δύο κυλίνδρους στήριξης που παρέμεναν σταθεροί (Σχήμα 3.20). Ένας τρίτος κύλινδρος που υπήρχε στο πάνω μέρος ασκούσε το επιβαλλόμενο φορτίο στο κέντρο του δοκιμίου, το οποίο δεν ξεπερνούσε τα 50 N/sec. Αφού καταγράφηκε το φορτίο που προκάλεσε την αστοχία, υπολογίστηκε η αντοχή σε κάμψη, f , των δοκιμίων σε N/mm^2 με τη χρήση της εξίσωσης (3.3):

$$\sigma = 1,5 \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2} \quad (3.3)$$

Όπου:

F : το μέγιστο φορτίο που εφαρμόζεται στο δοκίμιο (N),

l : η απόσταση μεταξύ των κυλίνδρων στήριξης (mm), $l = 100mm$,

b : το πλάτος του δοκιμίου (mm),

d : το ύψος του δοκιμίου (mm).

Η οποία προέκυψε από την εξίσωση (3.4):

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I} \quad (3.4)$$

Όπου:

$$M = F \cdot l/4,$$

$$y = d/2,$$

$$I = (b \cdot d^3/12).$$



(i)



(ii)

Σχήμα 3.20 Υδραυλική πρέσα πριν (i) και μετά (ii) την αστοχία δοκιμίου.

ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ

Τα δύο κομμάτια των δοκιμίων που προέκυψαν από την καμπτική τους αστοχία, υποβλήθηκαν στη συνέχεια σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης ακολουθώντας και πάλι το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 1015-11:2019. Η μηχανή θλίψης που χρησιμοποιήθηκε (Σχήμα 3.21) είχε σταθερή κάτω πλάκα διαστάσεων 40 × 40 mm στην οποία τοποθετούνταν τα κομμάτια από τα δοκίμια. Στη συνέχεια, από την άνω πλάκα των ίδιων διαστάσεων, επιβαλλόταν φορτίο το οποίο ανερχόταν στα 0,8 kN/sec ταν, μετά από κάποια λεπτά, το δοκίμιο έφτανε στην αστοχία καταγραφόταν το μέγιστο φορτίο που την προκάλεσε και με τη χρήση της εξίσωσης (3.5) υπολογίστηκε η θλιπτική αντοχή των δοκιμίων, σε MPa.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{b \cdot d} \cdot 1000 \quad (3.5)$$

Όπου:

F : το φορτίο αστοχίας στη δοκιμή θλίψης (kN),

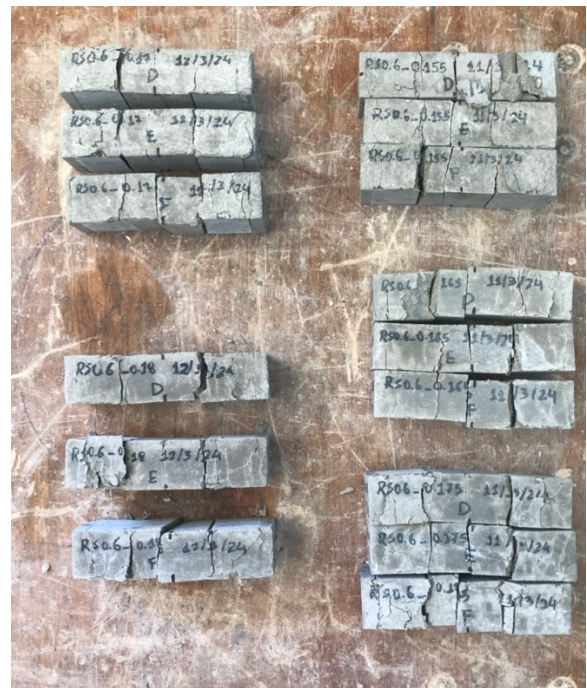
b : το πλάτος του δοκιμίου (mm),

d : το ύψος του δοκιμίου (mm).

Οι πραγματικές διαστάσεις του δοκιμίου που χρησιμοποιήθηκαν στην εξίσωση (3.5) ίσχυαν εφόσον δεν ξεπερνούσαν τα 40 x 40 mm, τις διαστάσεις δηλαδή των πλακών της μηχανής θλίψης. Στην περίπτωση που συνέβαινε το αντίθετο σε κάποια από αυτές τις τιμές, έμπαινε η τιμή 40 στην θέση της.



(i)



(ii)

Σχήμα 3.21 Δοκίμια πριν (i) και μετά (ii) τη δοκιμή σε θλίψη.

4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΩΤΟΥ ΜΕΡΟΥΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

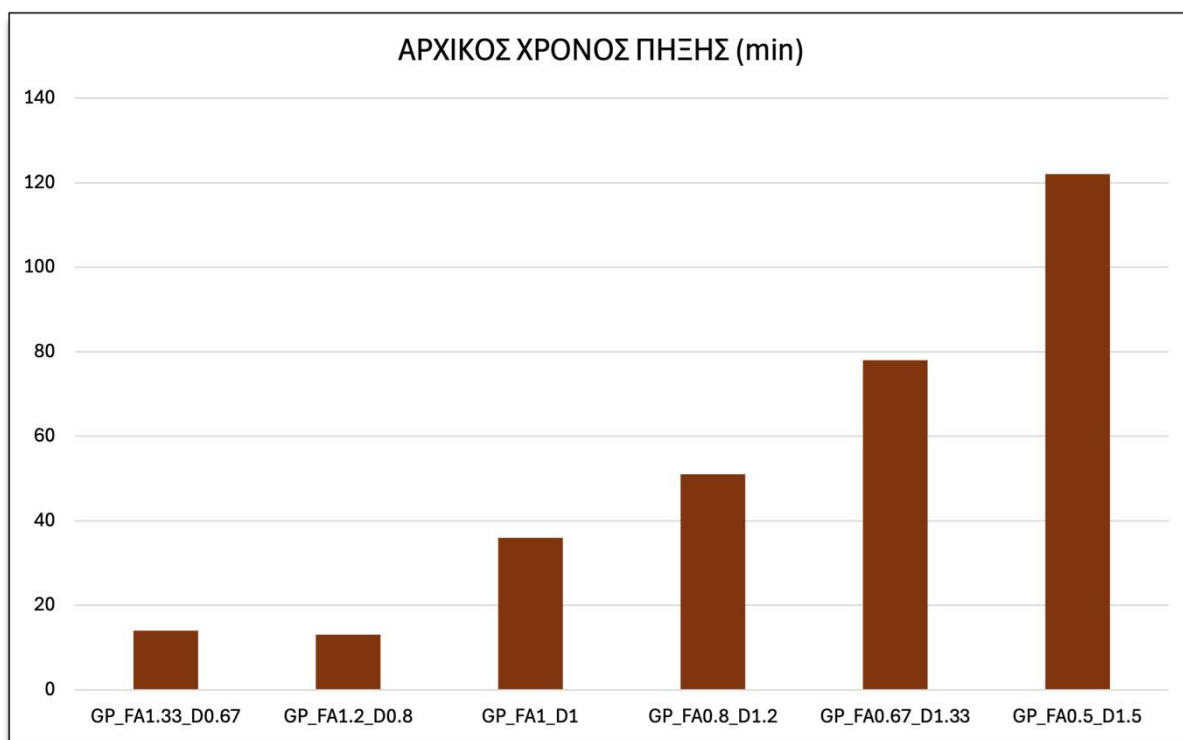
I. ΑΡΧΙΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΠΗΞΗΣ (INITIAL SETTING TIME)

Σειρά Α

Για τα δοκίμια της σειράς Α έγινε υπολογισμός του χρόνου πήξης αρχικά για εκείνα που εξετάστηκαν με τις διαφορετικές αναλογίες ιπτάμενης τέφρας (FA) – σκόνης Π/Κ (D). Οι τιμές τους κυμαίνονται μεταξύ 10-130 min, όπως φαίνεται και στον πίνακα (Πίνακας 4.1).

Πίνακας 4.1 Τιμές χρόνου πήξης για ποσοστά FA-D.

Όνομα κονιάματος	ΧΡΟΝΟΣ ΠΗΞΗΣ (min)
GP_FA1.5_D0.5	-
GP_FA1.33_D0.67	14
GP_FA1.2_D0.8	13
GP_FA1_D1	36
GP_FA0.8_D1.2	51
GP_FA0.67_D1.33	78
GP_FA0.5_D1.5	122



Σχήμα 4.1 Διάγραμμα ποσοστών FA-D με χρόνο πήξης.

Παρατηρήθηκε από το διάγραμμα (Σχήμα 4.1) πως το μεγάλο ποσοστό ιπτάμενης τέφρας στα μείγματα μειώνει σημαντικά το χρόνο πήξης τους, ενώ το υψηλότερο από αυτά (**GP_FA1.5_D0.5**) είχε τόσο σύντομο χρόνο πήξης που δεν μπόρεσε να γίνει η μέτρηση.

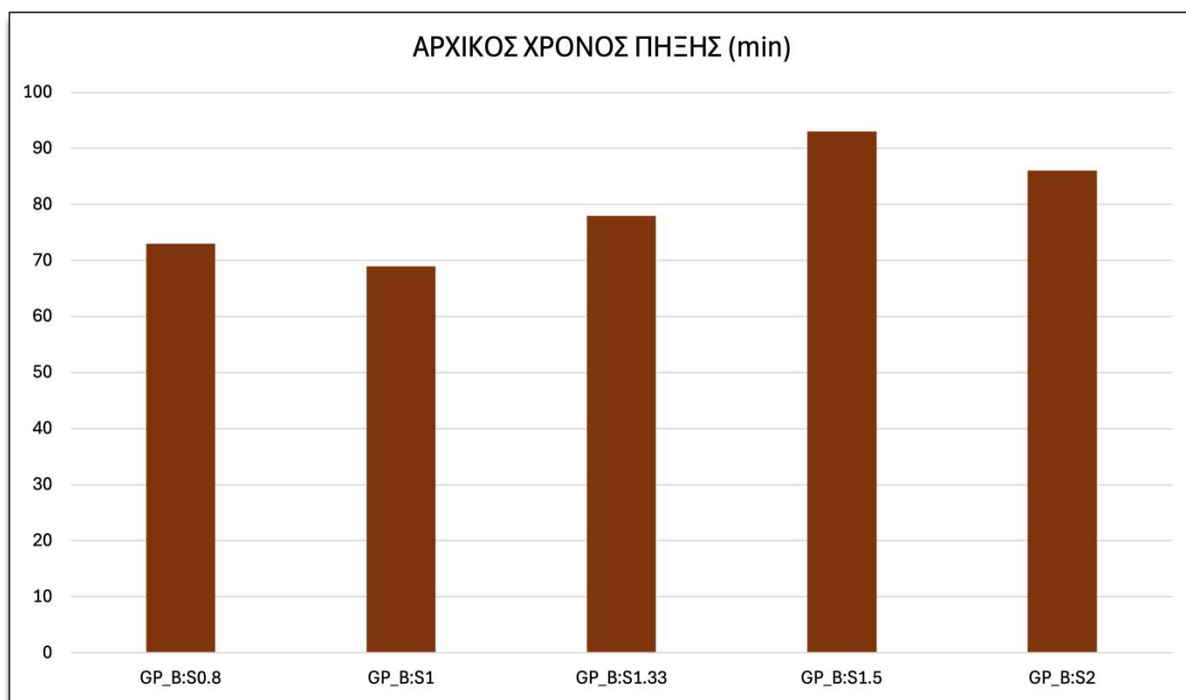
Το φαινόμενο αυτό πιθανόν να οφείλεται στην παρουσία υψηλής περιεκτικότητας ασβεστίου (CaO) στην ιπτάμενη τέφρα. Το ασβέστιο επιταχύνει τις χημικές αντιδράσεις και άρα τον χρόνο πήξης του μείγματος. Η ιπτάμενη τέφρα, ακόμη, είναι πλούσια σε SiO₂ και Al₂O₃, τα οποία είναι τα κύρια συστατικά που συμμετέχουν στην αντίδραση της αλκαλικής ενεργοποίησης, και η παρουσία τους σε μεγάλες ποσότητες συντομεύει την πήξη του μείγματος.

Σε αυτή τη μέτρηση υποβλήθηκαν επίσης και τα δοκίμια με διαφορετικούς λόγους Binder/Sand (B/S). Το μείγμα με τον μικρότερο λόγο (**GP_B:S0.67**) παρουσίασε ανομοιογενή σύσταση, λόγω υψηλού ποσοστού αδρανών με αποτέλεσμα να μην συμπεριληφθεί σε καμία μέτρηση.

Στην προκειμένη περίπτωση, οι τιμές των χρόνων πήξης των δοκιμών κυμαίνονται από 69 – 93 min όπως φαίνεται και στον πίνακα (Πίνακας 4.2) και δεν παρατηρήθηκε ξεκάθαρη αναλογία μεταξύ των παραμέτρων (Σχήμα 4.2). Επομένως, η συγκεκριμένη μέτρηση δεν έπαιξε πολύ σημαντικό ρόλο στη σύγκριση τους.

Πίνακας 4.2 Τιμές χρόνου πήξης για λόγους B:S.

Όνομα κονιάματος	ΧΡΟΝΟΣ ΠΗΞΗΣ (min)
GP_B:S0.67	-
GP_B:S1	69
GP_B:S0.8	73
GP_B:S1.33	78
GP_B:S2	86
GP_B:S1.5	93



Σχήμα 4.2 Διάγραμμα λόγων B:S με χρόνο πήξης.

Τα δοκίμια με τα διαφορετικά ποσοστά ινών δεν υποβλήθηκαν σε δοκιμές μέτρησης του χρόνου πήξης τους διότι η επιρροή τους είναι αμελητέα. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν αυτή την παράμετρο είναι οι κονίες του μείγματος (ιπτάμενη τέφρα, σκόνη Π/Κ, μετακαολίνη) και ο λόγος υγρού προς στερεό.

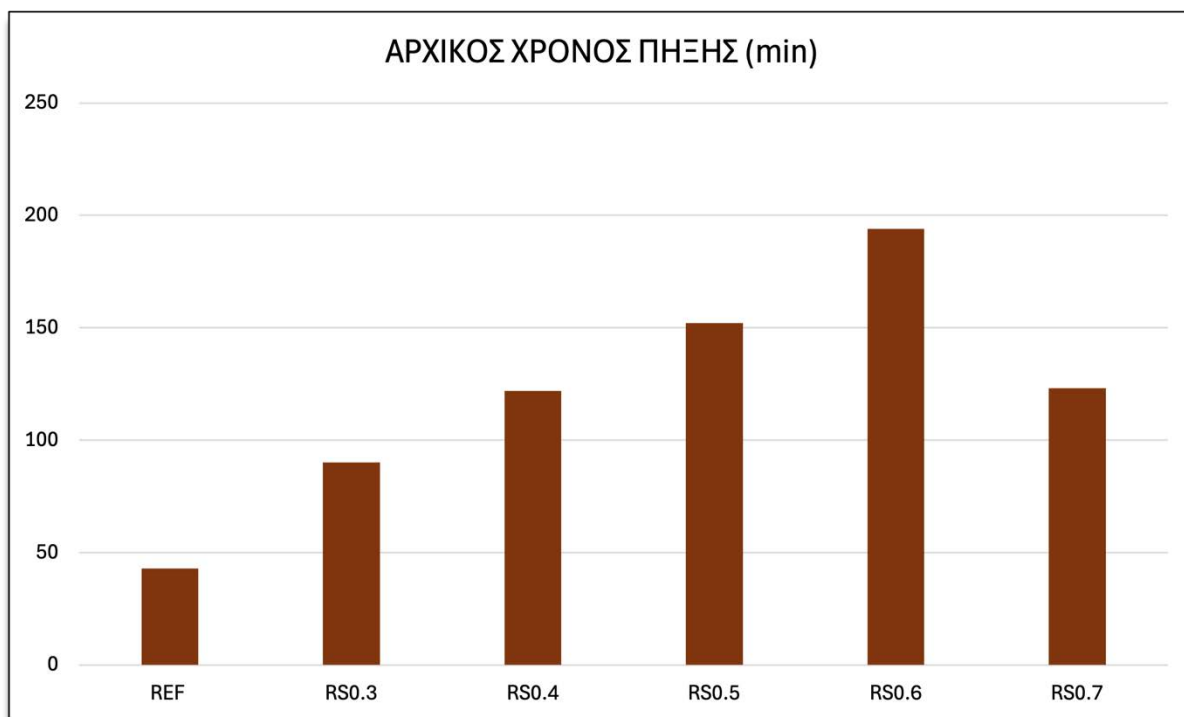
Σειρά Β

Στα δοκίμια της σειράς Β, η μέτρηση του χρόνου πήξης λήφθηκε υπόψιν κυρίως όταν εξεταζόταν η παράμετρος του ποσοστού κιτρικού οξέος και η θερμοκρασία του νερού στο μείγμα.

Η προσθήκη κιτρικού οξέος φαίνεται και από το διάγραμμα (Σχήμα 4.3) πως είναι ανάλογη της αύξησης του χρόνου πήξης του μείγματος μέχρι το ποσοστό του να φτάσει το 0,6%, με το οποίο επιτυγχάνεται και η μεγαλύτερη επιβράδυνση της πήξης (194 min). Αναλυτικά, οι τιμές του χρόνου πήξης για τα ποσοστά του κιτρικού οξέος παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.3):

Πίνακας 4.3 Τιμές χρόνου πήξης για ποσοστά κιτρικού οξέος.

per weight citric acid (%)	ΧΡΟΝΟΣ ΠΗΞΗΣ (min)
0	43
0.3	90
0.4	122
0.5	152
0.6	194
0.7	123

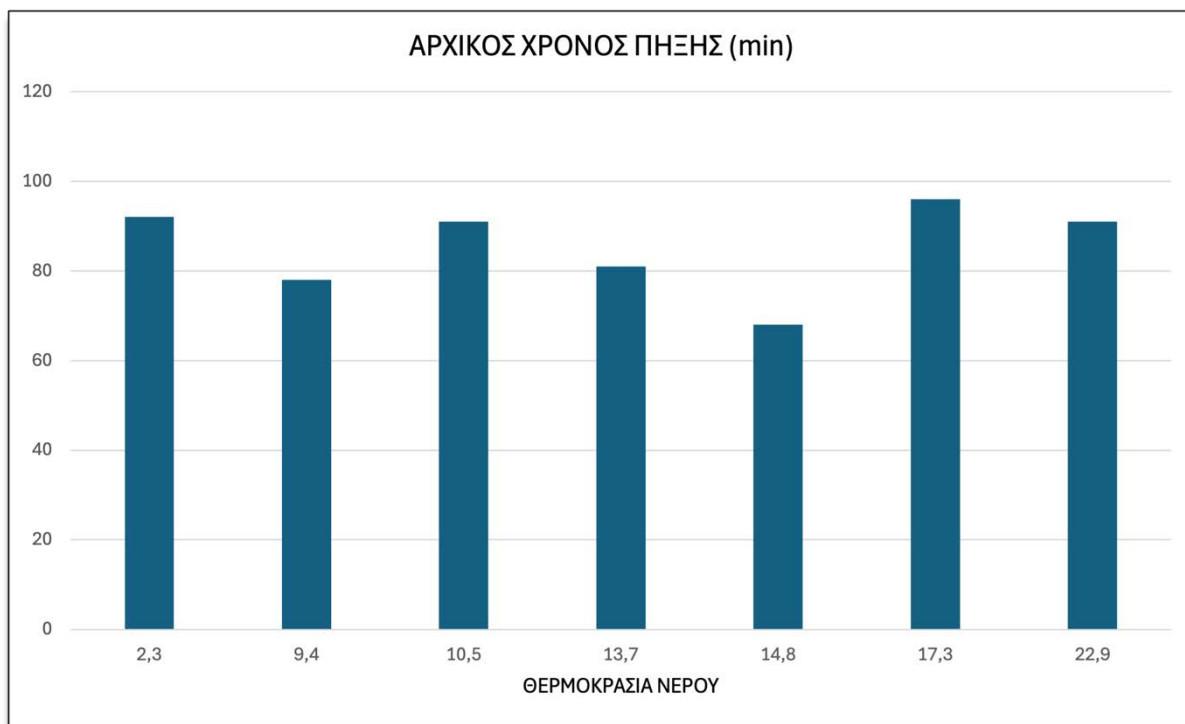


Σχήμα 4.3 Διάγραμμα ποσοστών κυτταρικού οξέος με χρόνο πήξης.

Ακόμα, εξετάστηκε η συμβολή της θερμοκρασίας του νερού του μείγματος στην μεταβολή του χρόνου πήξης. Οι τιμές των δοκιμών παρουσιάζονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.4):

Πίνακας 4.4 Τιμές χρόνου πήξης για θερμοκρασίες νερού.

Θερμοκρασία νερού (°C)	ΧΡΟΝΟΣ ΠΗΞΗΣ (min)
2,3	92
9,4	78
10,5	91
13,7	81
14,8	68
17,3	96
22,9	91



Σχήμα 4.4 Διάγραμμα θερμοκρασίας νερού με χρόνο πήξης.

Παρατηρείται τόσο από τον πίνακα όσο και από το διάγραμμα (Σχήμα 4.4) πως η θερμοκρασία του νερού επηρεάζει ελάχιστα τη μεταβολή του χρόνου πήξης του μείγματος, χωρίς κάποια αναλογική συμπεριφορά ως προς αυτήν. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει πως αυτή η παράμετρος δεν εξυπηρετεί τη διερεύνηση της συγκεκριμένης εργαστηριακής έρευνας και δεν θα ληφθεί υπόψιν.

II. ΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑ

Όπως προαναφέρθηκε, η εργασιμότητα μετρήθηκε από το πείραμα "flow table test" από το οποίο έγινε καταγραφή τριών τιμών εξάπλωσης (**flow value**) στα 5 λεπτά, 15 λεπτά και 30 λεπτά μετά την ανάμειξη.

Το πρότυπο **BS EN 1015-6:1999** χωρίζει την **εργασιμότητα** του νωπού κονιάματος σε **τρεις κατηγορίες**, ανάλογα με την **τιμή εξάπλωσης**:

1. Σκληρό κονίαμα (Stiff mortar) : **Τιμή εξάπλωσης**: < 140 mm

2. Πλαστικό κονίαμα (Plastic mortar) : **Τιμή εξάπλωσης:** 140 - 200 mm
3. Μαλακό κονίαμα (Soft mortar) : **Τιμή εξάπλωσης:** > 200 mm

Σειρά Α

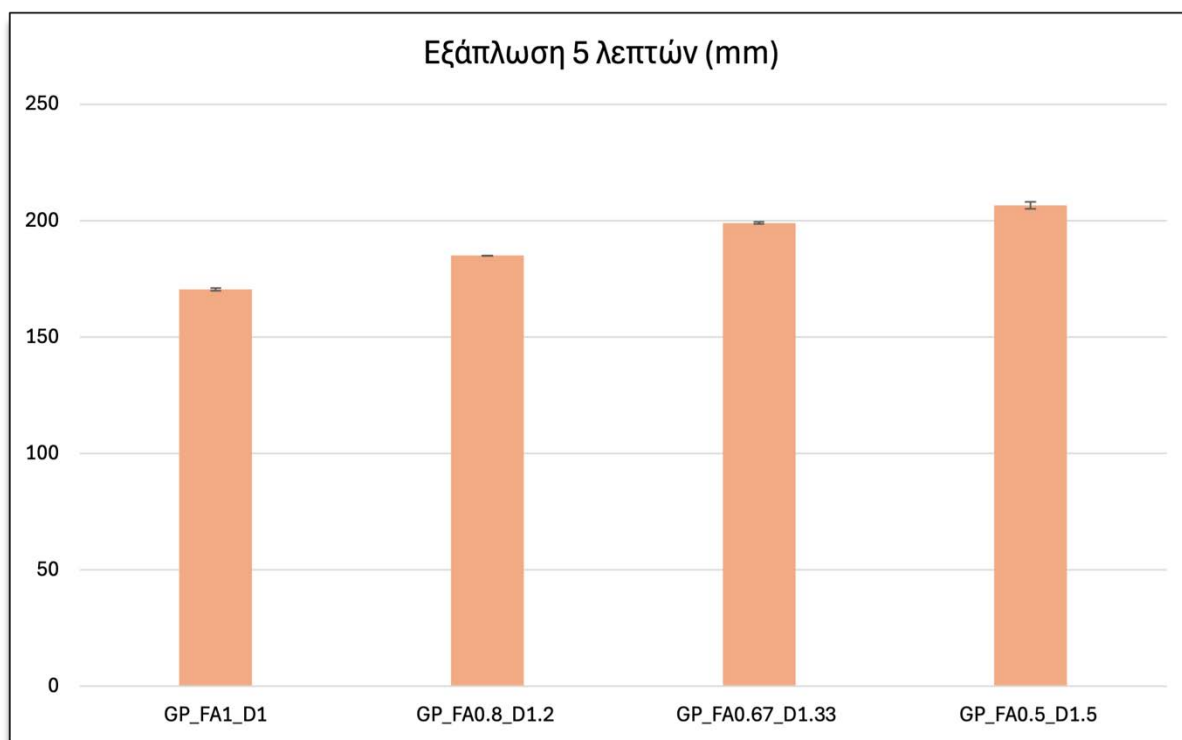
Για την σειρά δοκιμών Α με γεωπολυμερή κονιάματα δεν αποτυπώθηκαν τιμές εξάπλωσης στα 15 και 30 λεπτά μετά την ανάμειξη λόγω γρήγορης πήξης του κονιάματος. Επομένως, για κάθε μείγμα θα μελετηθούν οι τιμές εξάπλωσης στα 5 λεπτά μετά την ανάμειξη.

Αρχικά, μετρήθηκε η εργασιμότητα των μειγμάτων με τις διαφορετικές αναλογίες ιπτάμενης τέφρας (FA) – σκόνης Π/Κ (D). Οι τιμές αναγράφονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.5):

Πίνακας 4.5 Τιμές εξάπλωσης 5 λεπτών για ποσοστά FA-D.

Όνομα κονιάματος	Εξάπλωση 5 λεπτών (mm)
GP_FA1.5_D0.5	-
GP_FA1.33_D0.67	-
GP_FA1.2_D0.8	-
GP_FA1_D1	170,5 (0,5)
GP_FA0.8_D1.2	185 (0)
GP_FA0.67_D1.33	199 (0,5)
GP_FA0.5_D1.5	206,5 (1,5)

*μέσα στην παρένθεση η τυπική απόκλιση των τιμών



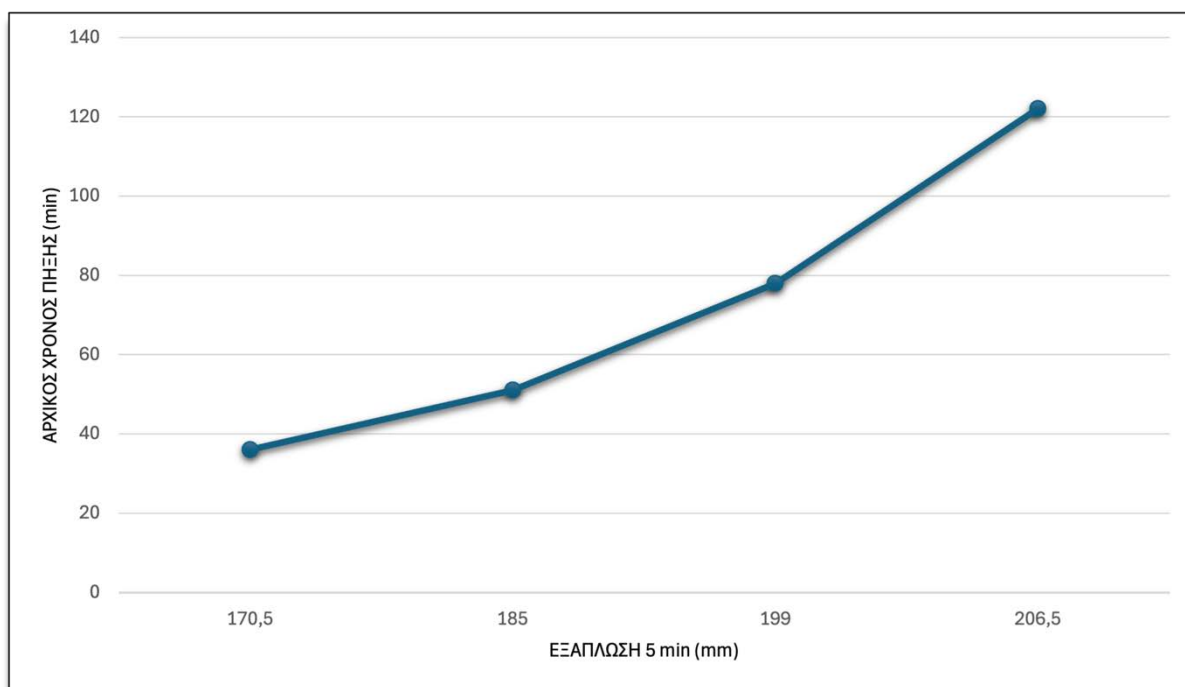
Σχήμα 4.5 Διάγραμμα ποσοστών FA-D με τιμή εξάπλωσης στα 5 λεπτά.

Όπως παρατηρείται στο διάγραμμα (Σχήμα 4.5), για τα μείγματα **GP_FA1.5_D0.5**, **GP_FA1.33_D0.67** και **GP_FA1.2_D0.8** δεν καταγράφηκαν τιμές. Τα συγκεκριμένα μείγματα παρουσίασαν ταχεία πήξη, με αποτέλεσμα να μην καταστεί δυνατή η λήψη τιμών εξάπλωσης στα 5 λεπτά. Επομένως, σύμφωνα με το πρότυπο, τα κονιάματα με μεγάλα ποσοστά ιπτάμενης τέφρας μπορούν να χαρακτηριστούν ως **σκληρά κονιάματα** με κακή εργασιμότητα. Η ιπτάμενη τέφρα περιέχει σημαντικές ποσότητες πυριτίου (SiO_2) και αλουμινίου (Al_2O_3), τα οποία είναι απαραίτητα για τη γεωπολυμεροποίηση. Η αύξηση της ποσότητας της ιπτάμενης τέφρας μπορεί να επηρεάσει τις χημικές αντιδράσεις και τη δομή του τελικού γεωπολυμερούς προϊόντος.

Στη συνέχεια παρατηρείται ότι όσο μειώνεται το ποσοστό της ιπτάμενης τέφρας και αυξάνεται το ποσοστό της σκόνης Π/Κ έχουμε μεγαλύτερες τιμές εξάπλωσης άρα καλύτερη εργασιμότητα. Οι τιμές των δοκιμών **GP_FA1_D1**, **GP_FA0.8_D1.2** και **GP_FA0.67_D1.33** βρίσκονται στην περιοχή 140-200 mm. Σύμφωνα με το πρότυπο τα συγκεκριμένα κονιάματα μπορούν να χαρακτηριστούν ως **πλαστικά**. Αυτό σημαίνει ότι εμφανίζουν ικανοποιητική εργασιμότητα, συνοχή και ισορροπία σε ρευστότητα και σκληρότητα.

Εξαίρεση αποτελεί το μείγμα με ονομασία **GP_FA0.5_D1.5** στο οποίο παρατηρούνται μεγάλα ποσοστά σκόνης Π/Κ. Στο κονίαμα αυτό η τιμή εξάπλωσης βρίσκεται στην περιοχή > 200 mm. Επομένως, προκύπτει ένα **μαλακό κονίαμα** με ανεπαρκή εργασιμότητα.

Σε αυτό το σημείο, κρίνεται σκόπιμο να τονιστεί η συσχέτιση μεταξύ του χρόνου πήξης και της εργασιμότητας των δοκιμών με διαφορετικές αναλογίες ιπτάμενης τέφρας (FA) – σκόνης Π/Κ (D). Συγκεκριμένα, στο (Σχήμα 4.6) παρουσιάζεται η σχέση του **αρχικού χρόνου πήξης** με τις **τιμές εξάπλωσης (5 λεπτών)** για τα δοκίμια του Πίνακα (Πίνακας 4.5).



Σχήμα 4.6 Διάγραμμα αρχικού χρόνου πήξης και εξάπλωσης για δοκίμια με διαφορετικά ποσοστά FA-D.

Καθώς αυξάνεται το ποσοστό της ιπτάμενης τέφρας, αυξάνεται ταυτόχρονα και η ποσότητα του πυριτίου (SiO_2) και αλουμινίου (Al_2O_3) στο μείγμα. Τα στοιχεία αυτά συμβάλουν σημαντικά στον γεωπολυμερισμό καθώς έχουν υψηλή αντιδραστικότητα με το αλκαλικό διάλυμα (πυριτικό κάλιο). Η αυξημένη περιεκτικότητα σε ιπτάμενη τέφρα οδηγεί σε ταχεία δέσμευση του υγρού στο μείγμα. Σαν αποτέλεσμα, επιταχύνεται

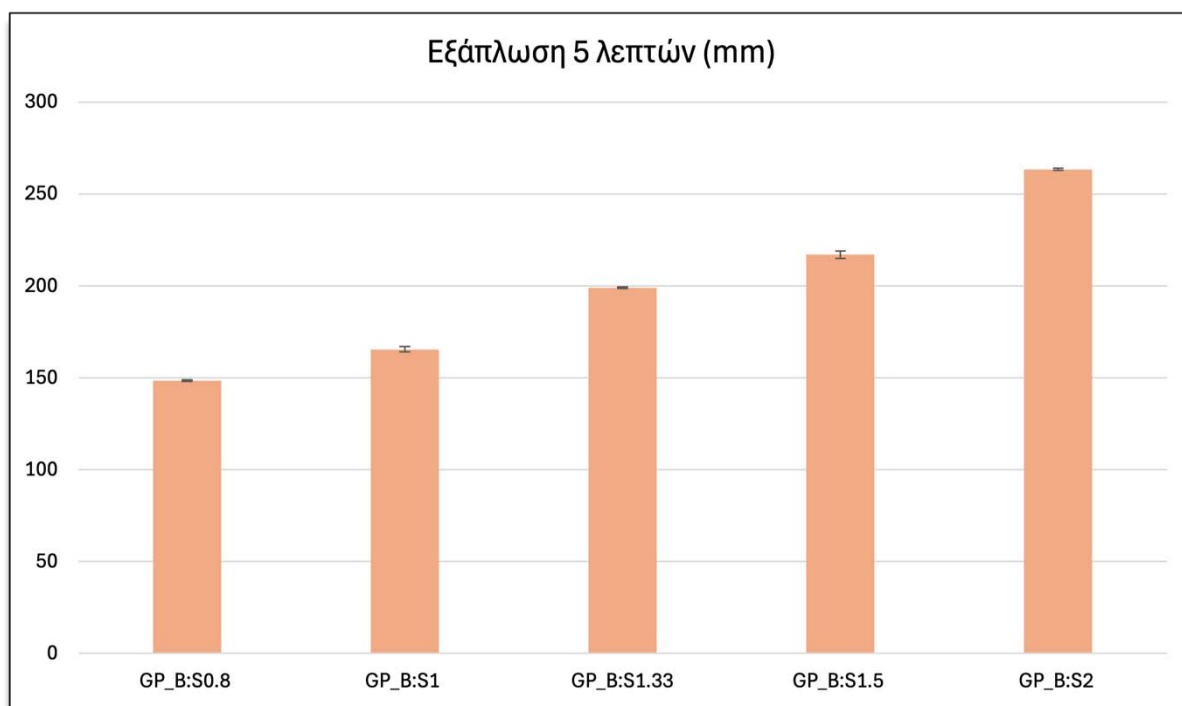
ο αρχικός χρόνος πήξης και συνεπώς έχουμε αυξημένη σκληρότητα στο μείγμα από τα πρώτα 5 λεπτά.

Έπειτα, παρατηρείται ότι όσο αυξάνονται οι τιμές εξάπλωσης, τόσο αυξάνεται και ο αρχικός χρόνος πήξης, με μια σχετική γραμμικότητα. Αυτό αποδεικνύει ότι η αυξημένη εργασιμότητα συνδυάζεται με μεγαλύτερο αρχικό χρόνο πήξης, κάτι που είναι αναμενόμενο σε γεωπολυμερή κονιάματα όπου η σύσταση και η αντιδραστικότητα των πρώτων υλών επηρεάζουν έντονα την ταχύτητα ανάπτυξης δεσμών και τη σκλήρυνση.

Στη συνέχεια, μετρήθηκαν οι τιμές εξάπλωσης για τα δοκίμια με διαφορετικούς λόγους Binder/Sand (B/S). Οι τιμές απεικονίζονται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 4.7):

Πίνακας 4.6 Τιμές εξάπλωσης 5 λεπτών για λόγους B:S.

Όνομα κονιάματος	Εξάπλωση 5 λεπτών (mm)
GP_B:S0.67	-
GP_B:S0.8	148,5 (0,5)
GP_B:S1	165,5 (1,5)
GP_B:S1.33	199 (0,5)
GP_B:S1.5	217 (2)
GP_B:S2	263,5 (0,5)



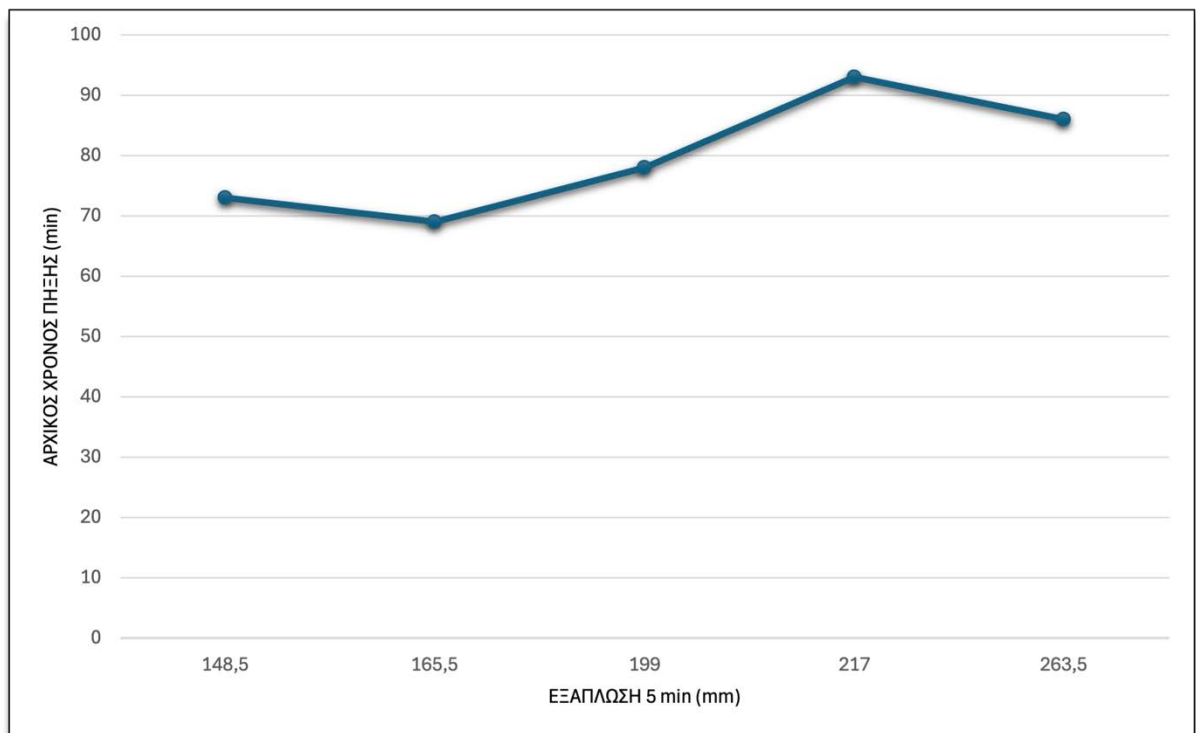
Σχήμα 4.7 Διάγραμμα λόγων B:S με τιμή εξάπλωσης στα 5 λεπτά.

Από τον πίνακα (Πίνακας 4.6) παρατηρείται πως για το κονίαμα **GP_B:S0.67** δεν έχει καταγραφεί τιμή εξάπλωσης. Το μείγμα με τον μικρότερο λόγο B/S, λόγω του μεγάλου ποσοστού αδρανών, εμφάνισε ανομοιογένεια. Η αναλογία των υπόλοιπων υλικών, που λειτουργούν και ως συνδετικό μέσο του μείγματος, δεν ήταν αρκετή για να καλύψει το μεγάλο ποσοστό των αδρανών. Το κονίαμα αυτό, σύμφωνα με το πρότυπο, χαρακτηρίζεται ως **σκληρό** με ακατάλληλη εργασιμότητα.

Τα μείγματα **GP_B:S0.8** και **GP_B:S1**, τα οποία περιέχουν χαμηλότερα ποσοστά άμμου, εμφάνισαν τιμές εξάπλωσης 140-200 mm. Επομένως, τα κονιάματα αυτά μπορούν να θεωρηθούν **πλαστικά** με επαρκή εργασιμότητα.

Τέλος, για τα μείγματα **GP_B:S1.5** και **GP_B:S2**, καταγράφηκαν τιμές εξάπλωσης > 200 mm. Επομένως, για τις εν λόγω αναλογίες, προκύπτουν **μαλακά** κονιάματα με μη ικανοποιητική εργασιμότητα. . Μείγματα με αυξημένη ρευστότητα συχνά εμφανίζουν δυσκολίες στην διαχείριση και την εφαρμογή.

Παρακάτω, για τα δοκίμια του πίνακα (Πίνακας 4.6) γίνεται σύγκριση του χρόνου πήξης και της εργασιμότητας για διαφορετικές αναλογίες **λόγου B/S**. Στο Σχήμα 4.8 δίνονται οι τιμές του **αρχικού χρόνου πήξης** συναρτήσει των **τιμών εξάπλωσης (5 λεπτών)**:



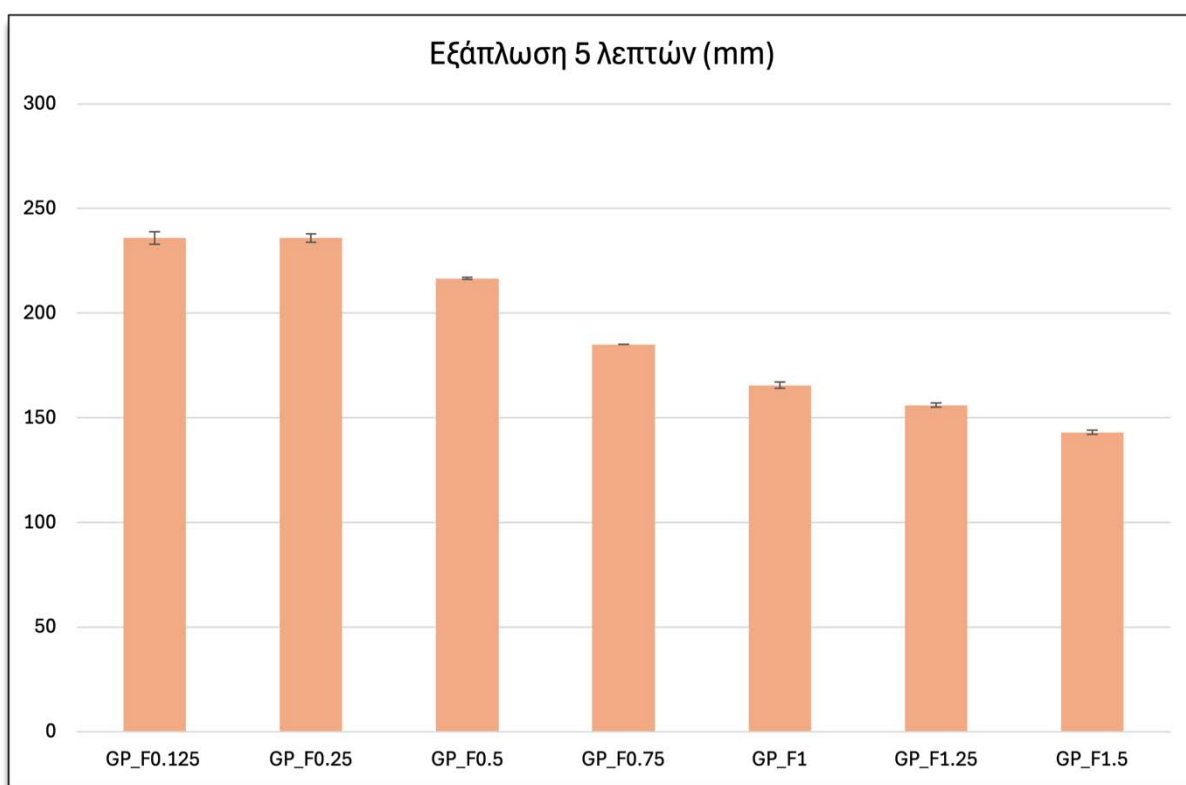
Σχήμα 4.8 Διάγραμμα αρχικού χρόνου πήξης και εξάπλωσης για δοκίμια με διαφορετικούς λόγους B/S.

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4.8, μεγάλες τιμές εξάπλωσης, δηλαδή υψηλή ρευστότητα, οδηγούν σε επιβράδυνση του αρχικού χρόνου πήξης. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει την αναμενόμενη σχέση μεταξύ του χρόνου πήξης και της εργασιμότητας.

Επόμενη παράμετρος που εξετάστηκε ήταν η επιρροή του ποσοστού των ινών στην εργασιμότητα του κονιάματος. Οι τιμές εξάπλωσης αποδίδονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.7):

Πίνακας 4.7 Τιμές εξάπλωσης 5 λεπτών για ποσοστά ινών.

Όνομα κονιάματος	Εξάπλωση 5 λεπτών (mm)
GP_F0.125	236 (3)
GP_F0.25	236 (2)
GP_F0.5	216,5 (0,5)
GP_F0.75	185 (0)
GP_F1	165,5 (1,5)
GP_F1.25	156 (1)
GP_F1.5	143 (1)

**Σχήμα 4.9** Διάγραμμα ποσοστών ινών με τιμή εξάπλωσης στα 5 λεπτά.

Από το Σχήμα 4.9 παρατηρείται ότι, για αναλογίες ινών 0.125, 0.25 και 0.5 τα μείγματα εμφάνισαν τιμές εξάπλωσης > 200 mm. Επομένως, τα κονιάματα με ονομασίες **GP_F0.125**, **GP_F0.25** και **GP_F0.5** χαρακτηρίζονται ως **μαλακά**. Αυτό σημαίνει ότι εμφανίζουν μη ικανοποιητική εργασιμότητα και υπερβολική ρευστότητα.

Για ποσοστά ινών 0.75 (**GP_F0.75**), 1 (**GP_F1**) και 1.25 (**GP_F1.25**), η εργασιμότητα μπορεί να θεωρηθεί ιδανική καθώς οι τιμές εξάπλωσης κυμαίνονται από 140-200 mm και άρα τα κονιάματα που προκύπτουν είναι **πλαστικά**.

Για το μείγμα με ποσοστό ινών 1.5 (**GP_F1.5**) διαπιστώνεται ότι η εξάπλωση είναι στην κατώτατη επιτρεπόμενη τιμή εργασιμότητας. Συνεπώς, το κονίαμα αυτό μπορεί να χαρακτηριστεί **οριακά πλαστικό**. Με την προσθήκη υπερβολικής ποσότητας ινών στο μείγμα, αυξάνονται οι τριβές και ο εγκλωβισμένος αέρας, με συνέπεια την αύξηση του πορώδους στο κονίαμα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη εργασιμότητα και χαμηλές αντοχές.

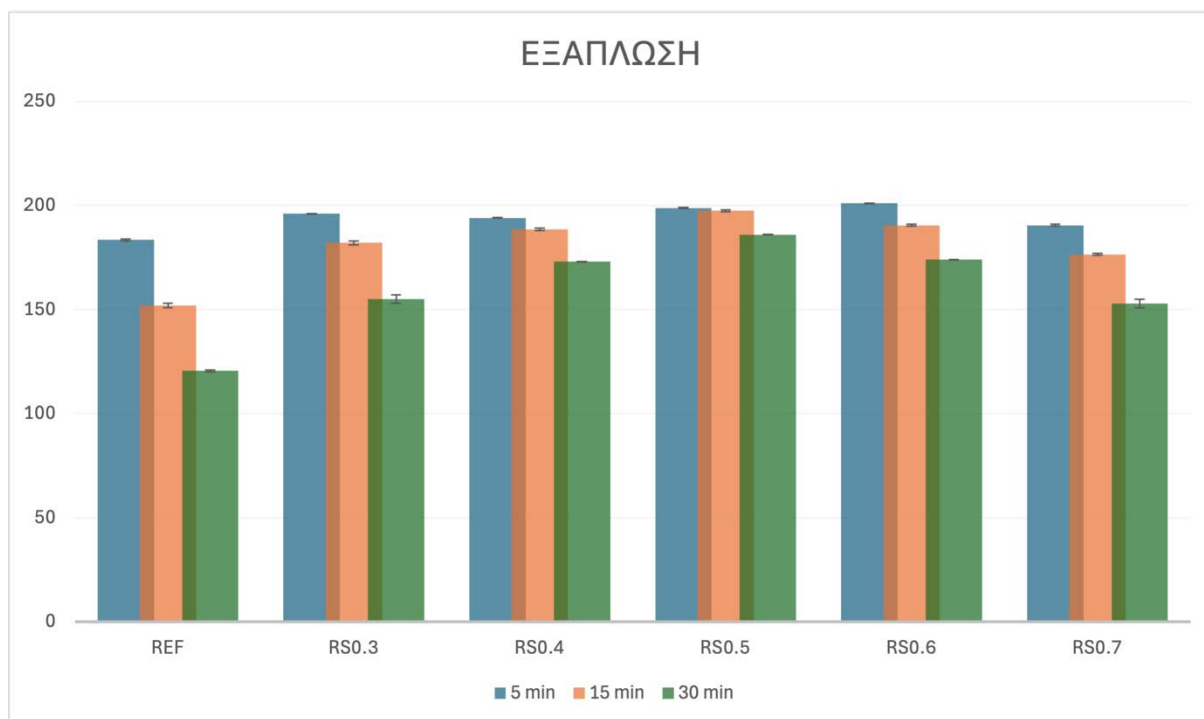
Σειρά Β

Για την σειρά Β με CSA κονιάματα, πραγματοποιήθηκε καταγραφή και των τριών τιμών εξάπλωσης στα 5, 15 και 30 λεπτά μετά την ανάμειξη.

Πρώτη παράμετρος που εξετάστηκε ήταν η επιρροή του κυττρικού οξέος στην εργασιμότητα του μείγματος. Προκύπτουν έτσι οι εξής τιμές εξάπλωσης (Πίνακας 4.8):

Πίνακας 4.8 Τιμές εξάπλωσης 5, 15 και 30 min για ποσοστά κυττρικού οξέος.

Όνομα κονιάματος	Εξάπλωση 5 λεπτών (mm)	Εξάπλωση 15 λεπτών (mm)	Εξάπλωση 30 λεπτών (mm)
REF	183.5 (0.5)	152 (1)	120.5 (0.5)
RS0.3	196 (0)	182 (1)	155 (2)
RS0.4	194 (0)	188.5 (0.5)	173 (0)
RS0.5	198.75 (0.25)	197.5 (0.5)	186 (0)
RS0.6	201 (0)	190.5 (0.5)	174 (0)
RS0.7	190.5 (0.5)	176.5 (0.5)	153 (2)



Σχήμα 4.10 Διάγραμμα ποσοστών κιτρικού οξέος με τιμές εξάπλωσης.

Όπως γίνεται αντιληπτό από το Σχήμα 4.10, το μείγμα αναφοράς με 0% ποσοστό κιτρικού οξέος, ενώ στα πρώτα 5 λεπτά μπορεί να χαρακτηριστεί ως πλαστικό με ικανοποιητική εργασιμότητα, στις επόμενες μετρήσεις παρατηρείται έντονη μείωση της τιμής εξάπλωσης. Συγκεκριμένα, το μείγμα στα 15 και 30 λεπτά μετά την ανάμειξη, έχει τιμή εξάπλωσης 152 mm και < 140 mm αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει ότι μετά τα 15 λεπτά, το κονίαμα αυτό, έχει αυξημένη σκληρότητα, κάτι που καθιστά την εργασιμότητα ακατάλληλη.

Στη συνέχεια, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό κιτρικού οξέος στο μείγμα τόσο συγκλίνουν οι τιμές εξάπλωσης των κονιαμάτων στα 5, 15 και 30 λεπτά. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα ήταν αναμενόμενα, δεδομένου ότι το κιτρικό οξύ αποτελεί επιβραδυντικό πρόσθετο. Αναλυτικότερα, τα κονιάματα **RS0.4**, **RS0.5** και **RS0.6** εμφάνισαν τιμές που κυμαίνονται στην περιοχή 140-200 mm, με καλύτερη εργασιμότητα αυτή του κονιαματος **RS0.5**. Τα μείγματα αυτά χαρακτηρίζονται ως **πλαστικά**.

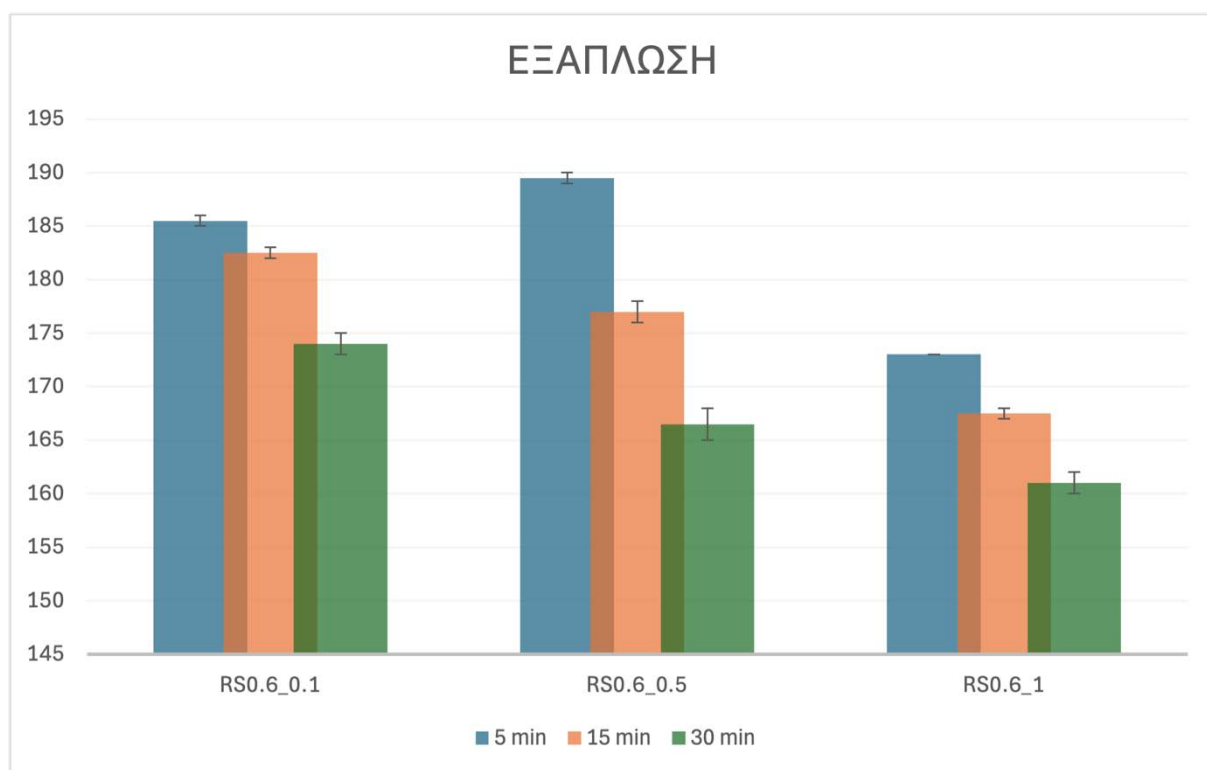
Αυτό που διαπιστώνεται είναι ότι όσο αυξάνεται η αναλογία του κιτρικού οξέος τόσο αυξάνεται και η τιμή εξάπλωσης, μέχρι την τιμή 0.5 που παρατηρείται έντονη

μείωση. Αυτό επιβεβαιώνει πως η προσθήκη μεγαλύτερης ποσότητας κιτρικού οξέος από την απαιτούμενη μπορεί να μειώσει την απόδοση σε εργασιμότητα του κονιάματος.

Η επόμενη παράμετρος που μελετήθηκε ήταν η επίδραση του ποσοστού των ινών στην εργασιμότητα του κονιάματος. Παρατίθενται οι ακόλουθες τιμές εξάπλωσης (Πίνακας 4.9):

Πίνακας 4.9 Τιμές εξάπλωσης 5, 15 και 30 λεπτών για ποσοστά ινών.

Όνομα κονιάματος	Εξάπλωση 5 λεπτών (mm)	Εξάπλωση 15 λεπτών (mm)	Εξάπλωση 30 λεπτών (mm)
RS0.6_0.1	185.5 (0.5)	182.5 (0.5)	174 (1)
RS0.6_0.5	189.5 (0.5)	177 (1)	166.5 (1.5)
RS0.6_1	173 (0)	167.5 (0.5)	161 (1)



Σχήμα 4.11 Διάγραμμα ποσοστών ινών με τιμές εξάπλωσης.

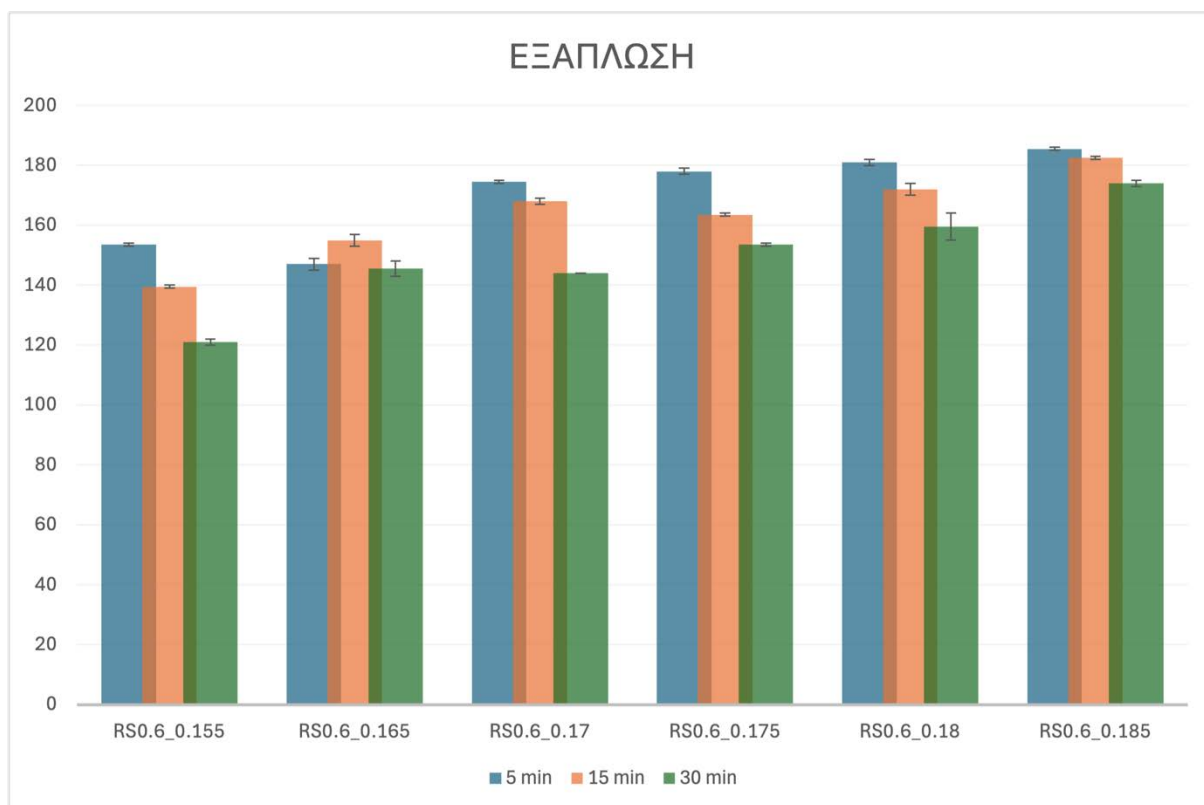
Από το Σχήμα 4.11 διαπιστώνεται ότι το κονίαμα με ποσοστό ινών 0.1 (**RS0.6_0.1**) παρουσιάζει την βέλτιστη εργασιμότητα. Είναι εμφανές ότι η αύξηση του ποσοστού των ινών οδηγεί σε μείωση της απόδοσης της εργασιμότητας. Συγκεκριμένα, για το δοκίμιο **RS0.6_0.5** παρατηρείται σημαντική μείωση της τιμής εξάπλωσης από τα 5 στα 15 και στα 30 λεπτά αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές υποδηλώνουν ότι μετά την ανάμειξη το μείγμα μας σκληραίνει με ταχύ ρυθμό, κάτι που καθιστά την εργασιμότητα του ακατάλληλη και δημιουργεί δυσκολίες στη χρήση του.

Το δοκίμιο **RS0.6_1** σύμφωνα με το (Σχήμα 4.11) εμφανίζει από τα πρώτα 5 λεπτά τις πιο χαμηλές τιμές εξάπλωσης καθώς προστέθηκε σε αυτό ποσότητα ινών 10 φορές μεγαλύτερη από το κονίαμα **RS0.6_0.1**. Εξ αυτών, καθίσταται σαφές ότι έχουμε ένα κονίαμα με αυξημένη σκληρότητα κάτι που ήταν αναμενόμενο καθώς οι ίνες δημιουργούν ένα πυκνότερο δίκτυο, το οποίο εμποδίζει τη ροή του μείγματος.

Στη συνέχεια, έχουμε τα αποτελέσματα των τιμών εξάπλωσης (Πίνακας 4.10) για τα κονιάματα με διαφορετικούς λόγους N/T. Στο Σχήμα 4.12, παρουσιάζονται οι μετρήσεις εργασιμότητας των δοκιμίων αυτών:

Πίνακας 4.10 Τιμές εξάπλωσης 5, 15 και 30 min για λόγους N/T.

Όνομα κονιάματος	Εξάπλωση 5 λεπτών (mm)	Εξάπλωση 15 λεπτών (mm)	Εξάπλωση 30 λεπτών (mm)
RS0.6_0.155	153.5 (0.5)	139.5 (0.5)	121 (1)
RS0.6_0.165	147 (2)	155 (2)	145.5 (2.5)
RS0.6_0.17	174.5 (0.5)	168 (1)	144 (0)
RS0.6_0.175	178 (1)	163.5 (0.5)	153.5 (0.5)
RS0.6_0.18	181 (1)	172 (2)	159.5 (4.5)
RS0.6_0.185	185.5 (0.5)	182.5 (0.5)	174 (1)



Σχήμα 4.12 Διάγραμμα λόγων N/T με τιμές εξάπλωσης.

Σύμφωνα με τα στοιχεία που αποτυπώνονται στο Σχήμα 4.12, παρατηρείται ότι ο μικρός λόγος N/T μας δίνει και περιορισμένη εργασιμότητα. Αναλυτικά, για τα κονιάματα **RS0.6_0.155**, **RS0.6_0.165** και **RS0.6_0.17** διαπιστώνεται ότι στα 30 λεπτά μετά την ανάμειξη οι τιμές εξάπλωσης υποδηλώνουν μειωμένη απόδοση σε εργασιμότητα. Τα δοκίμια αυτά μπορούν να χαρακτηριστούν ως **σκληρά** κονιάματα με δυσκολία στη χρήση. Τα αποτελέσματα αυτά ήταν αναμενόμενα καθώς ο λόγος νερού προς τσιμέντου έχει άμεση επίδραση στην ρευστότητα του μείγματος.

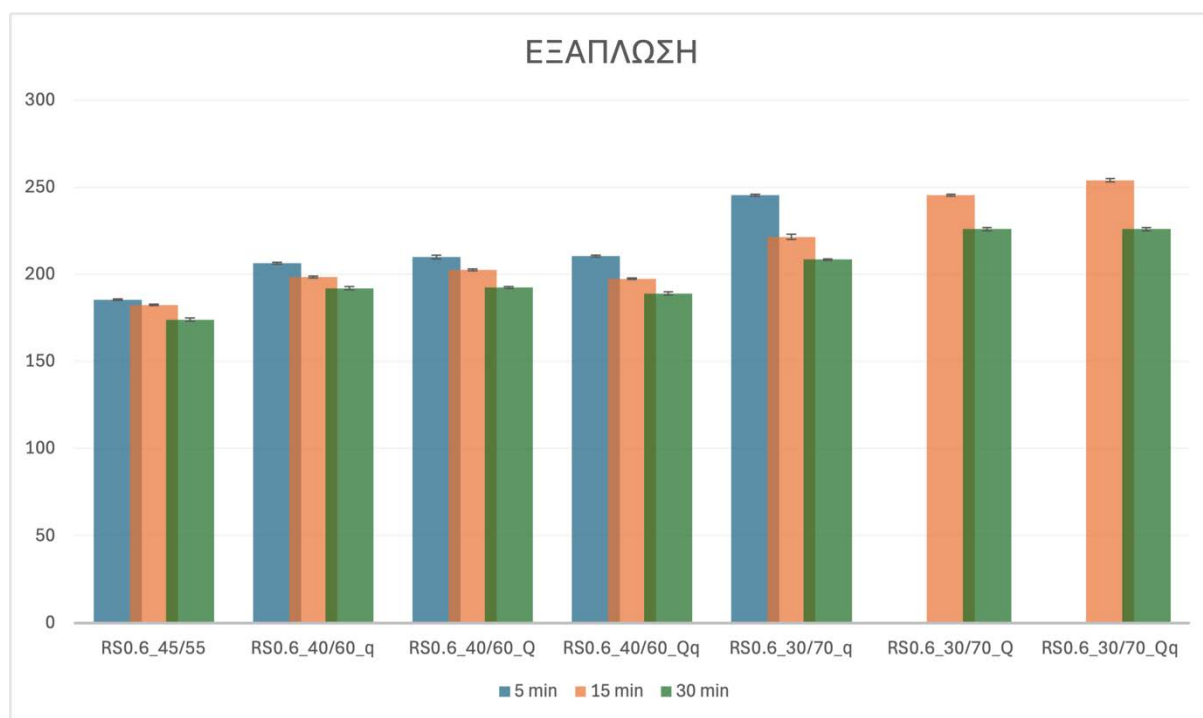
Τα υπόλοιπα 3 κονιάματα (**RS0.6_0.175**, **RS0.6_0.18** και **RS0.6_0.185**) μπορούν να χαρακτηριστούν **πλαστικά**, καθώς παρουσιάζουν ικανοποιητικές τιμές εξάπλωσης.

Την καλύτερη απόδοση εμφάνισε το κονίαμα **RS0.6_0.185**, με τις τιμές εξάπλωσης στα 5, 15 και 30 λεπτά να συγκλίνουν σημαντικά προσφέροντας έτσι την επιθυμητή εργασιμότητα.

Επόμενη παράμετρος διερεύνησης αποτέλεσε η επιρροή της προσθήκης αδρανών στο συνολικό ποσοστό κονιάματος, διατηρώντας σταθερό τον λόγο N/T . Οι τιμές εξάπλωσης αποδίδονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.11):

Πίνακας 4.11 Τιμές εξάπλωσης 5, 15 και 30 min για ποσοστά προσθήκης άμμου.

Όνομα κονιάματος	Εξάπλωση 5 λεπτών (mm)	Εξάπλωση 15 λεπτών (mm)	Εξάπλωση 30 λεπτών (mm)
RS0.6_45/55	185,5 (0.5)	182,5 (0.5)	174 (1)
RS0.6_40/60_q	206,5 (0.5)	198,5 (0.5)	192 (1)
RS0.6_40/60_Q	210 (1)	202,5 (0.5)	192,5 (0.5)
RS0.6_40/60_Qq	210,5 (0.5)	197,5 (0.5)	189 (1)
RS0.6_30/70_q	245,5 (0.5)	221,5 (1.5)	208,5 (0.5)
RS0.6_30/70_Q	-	245,5 (0.5)	226 (1)
RS0.6_30/70_Qq	-	254 (1)	226 (1)



Σχήμα 4.13 Διάγραμμα ποσοστών άμμου με τιμές εξάπλωσης.

Όπως διαπιστώνεται από την ανάλυση του διαγράμματος (Σχήμα 4.13), η αύξηση του ποσοστού των αδρανών προκαλεί αύξηση της ρευστότητας σχηματίζοντας έτσι **μαλακά** κονιάματα με δυσμενείς εργασιμότητες. Ειδικότερα, όλα τα μείγματα, εκτός του αρχικού (**RS0.6_45/55**), εμφάνισαν τιμές εξάπλωσης > 200mm στα 5 λεπτά ενώ στα 15 και 30 λεπτά δεν διαπιστώθηκε ιδιαίτερη μείωση των τιμών αυτών.

Για τα δοκίμια **RS0.6_30/70_Q** και **RS0.6_30/70_Qq** δεν καταγράφηκαν τιμές εξάπλωσης στα 5 λεπτά καθώς το μείγμα μας ήταν πολύ ρευστό. Ένα μαλακό μείγμα με πολύ αργή πήξη δεν είναι λειτουργικό καθώς δημιουργεί δυσκολία στην εφαρμογή.

Τα αποτελέσματα αυτά ήταν σύμφωνα με τις προσδοκίες καθώς η κονία επιτελεί τον ρόλο του πυκνωτικού μέσου, απορροφώντας το νερό και αυξάνοντας το ιξώδες του μείγματος. Η μείωση του ποσοστού της κονιάς και η αύξηση των αδρανών οδηγεί στην παρουσία μεγαλύτερης ποσότητας "ελεύθερου" νερού στο μείγμα, με συνέπεια την αύξηση της ρευστότητάς του. Επιπλέον, τα αδρανή δεν απορροφούν το νερό στο ίδιο βαθμό συγκριτικά με την κονία.

Το δοκίμιο που εμφάνισε την ευμενέστερη εργασιμότητα, ήταν το κονιάμα **RS0.6_45/55**, το οποίο δεν περιείχε επιπρόσθετα αδρανή.

Τέλος, στα δοκίμια με εξεταζόμενη παράμετρο την θερμοκρασία του νερού, δεν παρατηρήθηκε αισθητή μεταβολή των τιμών εξάπλωσης. Αυτό πιθανόν να σημαίνει ότι, η θερμοκρασία του νερού στο μείγμα δεν επηρεάζει την εργασιμότητα του κονιάματος.

III. ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ

Η πυκνότητα των μειγμάτων υπήρξε μια παράμετρος που δεν επηρέασε ιδιαίτερα τη σύγκριση τους καθώς δεν εμφάνισε αξιοσημείωτες διακυμάνσεις. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές της κυμαίνονται για τα κονιάματα της **Σειράς Α** μεταξύ 2112 – 2252 kg/m³ (νωπό μείγμα) και μεταξύ 1980 – 2096 kg/m³ (σκληρυμένο μείγμα), ενώ για τα κονιάματα της **Σειράς Β** το εύρος τιμών είναι 2220 – 2322 kg/m³ (νωπό μείγμα) και 2155 – 2217 kg/m³ (σκληρυμένο μείγμα). Αναλυτικότερα οι τιμές των πυκνοτήτων αποδίδονται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 4.12, Πίνακας 4.13):

Πίνακας 4.12 Τιμές πυκνότητας κονιαμάτων Σειράς Α.

Όνομα κονιάματος	Πυκνότητα νωπού μείγματος [kg/m ³]	Πυκνότητα σκληρυμένου μείγματος [kg/m ³]
GP_FA1_D1	2173	-
GP_FA0.5_D1.5	2181	2012 (13)
GP_FA0.8_D1.2	2141	-
GP_FA0.67_D1.33	2129	-
GP_B:S0.8	2212	2073 (9)
GP_B:S1	2194	2044 (8)
GP_B:S1.33	2194	2129 (36)
GP_B:S1.5	2113	1996 (8)
GP_B:S2	2112	1980 (7)
GP_F0.125	2197	2072 (15)
GP_F0.25	2252	2096 (9)
GP_F0.5	2208	2061 (10)
GP_F0.75	2173	2059 (9)
GP_F1.25	2203	2019 (25)
GP_F1.5	2208	2013 (23)
GP_optimal	2244	2042 (36)

Πίνακας 4.13 Τιμές πυκνότητας κονιαμάτων Σειράς Β.

Όνομα κονιάματος	Πυκνότητα νωπού μείγματος [kg/m ³]	Πυκνότητα σκληρυμένου μείγματος [kg/m ³]
RS0.5	2242	2170 (11)
RS0.7	2240	2188 (25)
RS0.4	2244	2217 (60)
RS0.3	-	2204 (8)
REF	-	2183 (11)
RS0.6	2264	2215 (12)
RS0.6_0.1	2239	2182 (23)
RS0.6_0.5	2233	2155 (26)
RS0.6_1	2220	2156 (25)

RS0.6_40/60_q	2264	2199 (9)
RS0.6_40/60_Q	2279	2185 (9)
RS0.6_40/60_Qq	2270	2189 (12)
RS0.6_30/70_q	2265	2163 (7)
RS0.6_30/70_Q	2265	2173 (12)
RS0.6_30/70_Qq	2269	2165 (10)
RS0.6_0.155	2322	2217 (25)
RS0.6_0.165	2254	2197 (12)
RS0.6_0.175	2268	2175 (16)
RS0.6_0.17	2267	2187 (23)
RS0.6_0.18	2246	2156 (32)

Παρατηρείται πως η πυκνότητα του σκληρυμένου μείγματος είναι μικρότερη από αυτή του νωπού και στις δύο σειρές κονιαμάτων. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς στο χρονικό διάστημα που μεσολάβησε ανάμεσα στις δύο μετρήσεις το υγρό της εκάστοτε ανάμειξης εξατμίζεται. Επιπλέον, ορισμένες διαδικασίες όπως οι αντιδράσεις γεωπολυμερισμού (κονιάματα Σειράς Α) και η ενυδάτωση του τσιμεντοπολτού (κονιάματα Σειράς Β) προκαλούν πορώδη δομή η οποία μειώνει την τελική πυκνότητα των δοκιμών.

Ωστόσο, η μέση διαφορά ανάμεσα στις δύο τιμές πυκνότητας των κονιαμάτων της Σειράς Α ($152,5 \text{ kg/m}^3$) είναι σχεδόν διπλάσια από αυτή των κονιαμάτων της Σειράς Β ($75,7 \text{ kg/m}^3$). Πιθανότερες αιτίες είναι τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην κάθε ανάμειξη αλλά και ο διαφορετικός τρόπος συντήρησης των δοκιμών.

4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΜΕΡΟΥΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

4.2.1 ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

Σειρά Α

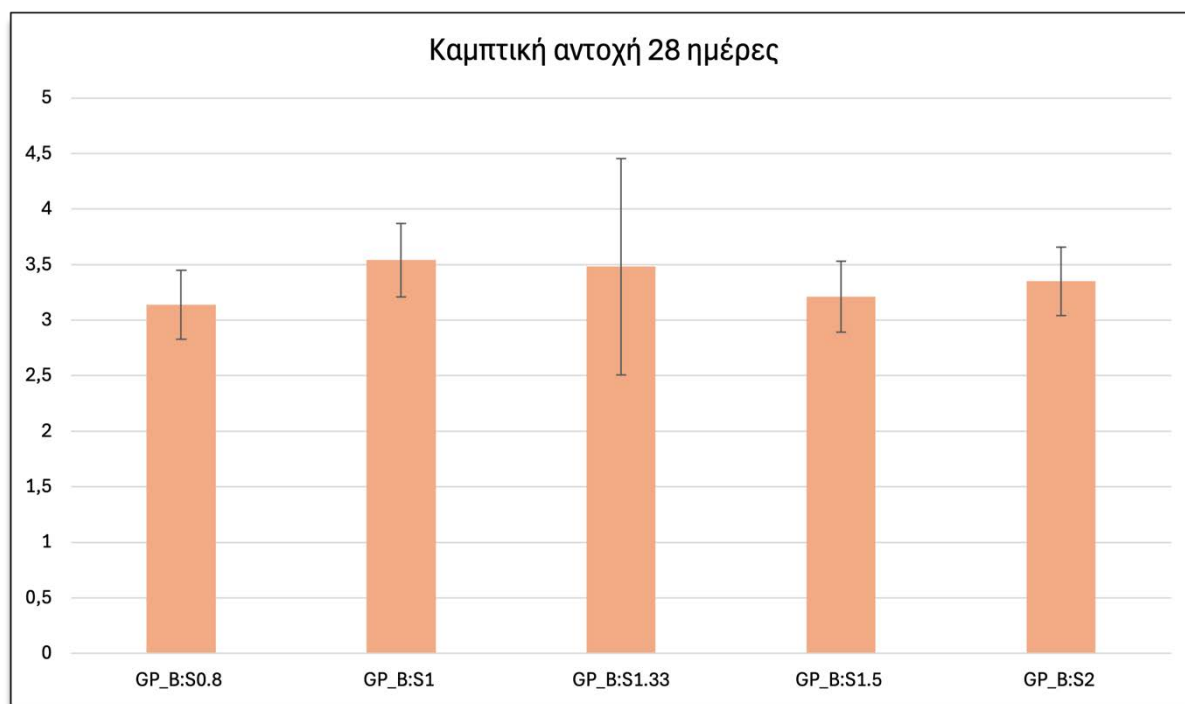
Για την Σειρά Α των δοκιμίων, έγινε έλεγχος της αντοχής τους σε κάμψη στις 28 ημέρες μετά την ανάμειξη. Εξαιρέση αποτέλεσε το τελικό μείγμα με τις βέλτιστες αναλογίες (optimal) υλικών, στο οποίο έγινε έλεγχος σε κάμψη τις 7, 14 και 28 ημέρες μετά την ανάμειξη.

Καταρχάς, για τα δοκίμια με διαφορετικές αναλογίες ιπτάμενης τέφρας (FA) – σκόνης Π/Κ (D) καταγράφηκαν τιμές μόνο για τα μείγματα **GP_FA0.5_D1.5** και **GP_FA0.67_D1.33**, με αντοχές **2.9 (0.31) MPa** και **3.48 (0.98) MPa** αντίστοιχα. Τα υπόλοιπα μείγματα είτε έπηξαν πολύ γρήγορα, είτε εμφάνισαν ανομοιογένειες καθιστώντας έτσι την καταγραφή καμπτικής αντοχής αδύνατη. Συνεπώς, η καμπτική αντοχή δεν αποτέλεσε παράγοντα στην επιλογή της βέλτιστης αναλογίας FA-D.

Έπειτα, έγινε έλεγχος σε καμπτική αντοχή των δοκιμίων με διαφορετικούς λόγους Binder/Sand (B/S). Παρακάτω, παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα της δοκιμής (Πίνακας 4.14):

Πίνακας 4.14 Τιμές καμπτικής αντοχής 28 ημερών για λόγους B:S.

Όνομα κονιάματος	Αντοχή σε κάμψη 28 ημέρες (MPa)
GP_B:S0.67	-
GP_B:S0.8	3.14 (0.31)
GP_B:S1	3.54 (0.33)
GP_B:S1.33	3.48 (0.98)
GP_B:S1.5	3.21 (0.32)
GP_B:S2	3.35 (0.31)



Σχήμα 4.14 Διάγραμμα λόγων B:S με καμπτική αντοχή 28 ημερών.

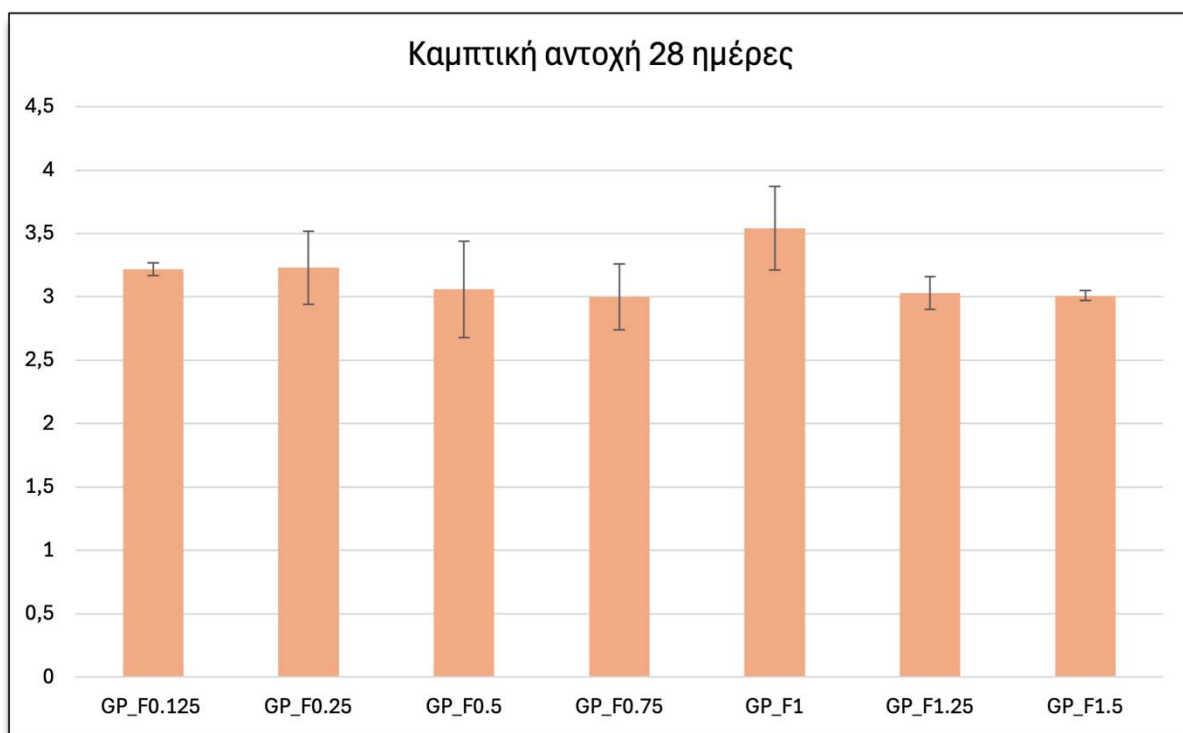
Γενικά, οι καμπτικές αντοχές των μειγμάτων αυτών κυμαίνονται από 3-3.6 MPa με ευμενέστερη αντοχή αυτή του δοκιμίου **GP_B:S1** με 3.54 MPa (Σχήμα 4.14). Η αμέσως επόμενη καλύτερη αντοχή καταγράφηκε για το δείγμα **GP_B:S1.33** και **GP_B:S2** αντίστοιχα. Την δυσμενέστερη καμπτική αντοχή εμφάνισε το μείγμα **GP_B:S0.8**.

Από τις μετρήσεις που έγιναν για τα συγκεκριμένα δοκίμια δεν μπορούμε να βγάλουμε κάποιο συμπέρασμα για την επιρροή του λόγου B/S στην καμπτική αντοχή των κονιαμάτων. Η μεταβολή της αντοχής δεν παρουσιάζει γραμμική ή σαφή συσχέτιση με την αύξηση του λόγου B/S. Οι τιμές που καταγράφονται δεν ακολουθούν σταθερή αυξητική ή μειωτική τάση, γεγονός που υποδηλώνει ότι η επίδραση του παράγοντα δεν είναι άμεσα προβλέψιμη ή αναλογική.

Στη συνέχεια, εξετάστηκαν τα δοκίμια που περιείχαν διαφορετικές αναλογίες ινών στο μείγμα. Παρακάτω, παρουσιάζονται οι μετρήσεις της καμπτικής αντοχής των κονιαμάτων αυτών (Πίνακας 4.15):

Πίνακας 4.15 Τιμές καμπτικής αντοχής 28 ημερών για ποσοστά ινών.

Όνομα κονιάματος	Αντοχή σε κάμψη 28 ημέρες (MPa)
GP_F0.125	3.22 (0.05)
GP_F0.25	3.23 (0.29)
GP_F0.5	3.06 (0.38)
GP_F0.75	3 (0.26)
GP_F1	3.54 (0.33)
GP_F1.25	3.03 (0.13)
GP_F1.5	3.01 (0.04)

**Σχήμα 4.15** Διάγραμμα ποσοστών ινών με καμπτική αντοχή 28 ημερών.

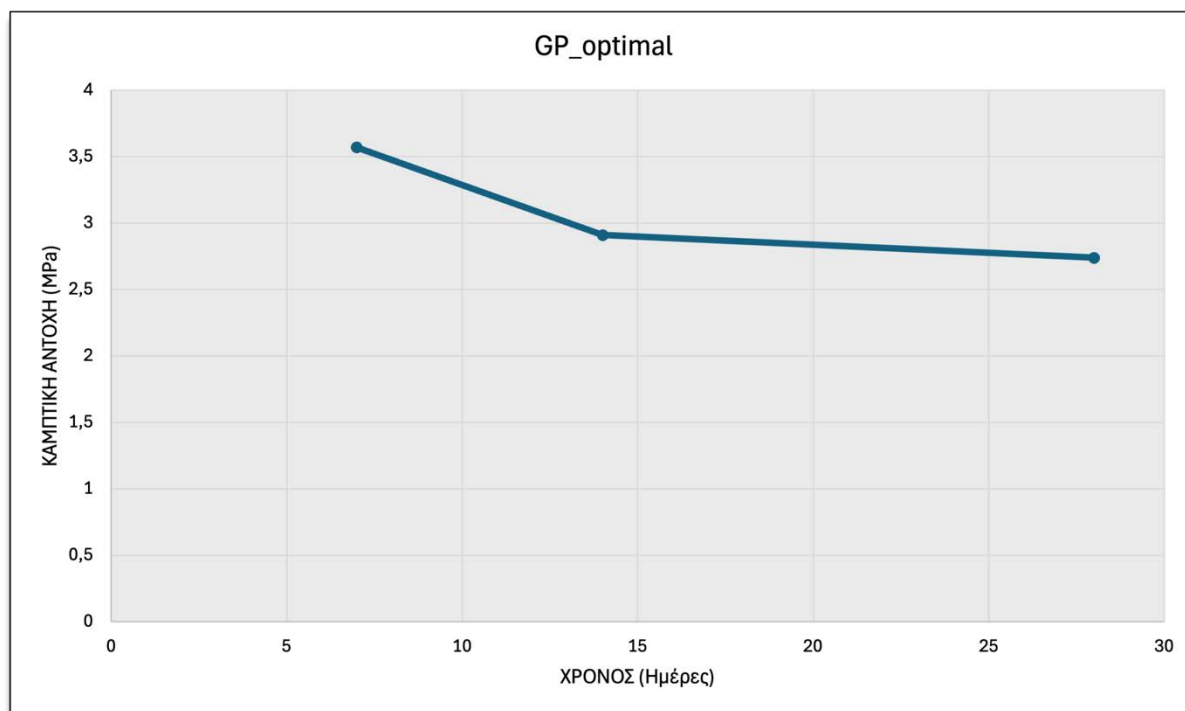
Από το Σχήμα 4.15 παρατηρούμε ότι οι αντοχές των δοκιμίων αυτών κυμαίνονται ομοίως από 3-3.6 MPa. Το δοκίμιο που εμφάνισε την ευμενέστερη καμπτική αντοχή είναι το **GP_F1** και την δυσμενέστερη το **GP_F0.75**.

Αντίστοιχα, και στην περίπτωση αυτή, οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για τα συγκεκριμένα δοκίμια δεν επιτρέπουν την εξαγωγή σαφών συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση του ποσοστού των ινών στην καμπτική αντοχή των κονιαμάτων.

Συνοψίζοντας, για τη σειρά Α, εξετάστηκε η αντοχή σε κάμψη του τελικού κονιάματος μεγάλης κλίμακας με τις βέλτιστες αναλογίες (optimal) υλικών. Στο μείγμα αυτό έγιναν έλεγχοι αντοχής στις 7, 14 και 28 ημέρες μετά την ανάμειξη. Τα δεδομένα που καταγράφηκαν είναι τα εξής (Πίνακας 4.16):

Πίνακας 4.16 Τιμές καμπτικής αντοχής 7, 14 και 28 ημερών για GP_optimal.

Όνομα κονιάματος	Αντοχή σε κάμψη 7 ημέρες (MPa)	Αντοχή σε κάμψη 14 ημέρες (MPa)	Αντοχή σε κάμψη 28 ημέρες (MPa)
GP_optimal	3.57 (0.08)	2.91 (0.36)	2.74 (0.23)



Σχήμα 4.16 Διάγραμμα καμπτικής αντοχής GP_optimal συναρτήσει του χρόνου (days).

Από το διάγραμμα (Σχήμα 4.16), διακρίνεται ότι τα δοκίμια **GP_optimal** στις 7 ημέρες ωρίμανσης παρουσιάζουν, συγκριτικά με τα υπόλοιπα δοκίμια, ικανοποιητική αντοχή σε κάμψη. Παρατηρείται όμως ότι, μετά τις πρώτες 7 ημέρες, αντί να αυξηθεί η αντοχή, όπως θα ήταν αναμενόμενο, η αντοχή μειώνεται. Συγκεκριμένα, το κονίαμα από τις 7 έως τις 14 ημέρες εμφανίζει μείωση στην αντοχή του σε κάμψη περίπου κατά 18.5% και από τις 14 έως τις 28 κατά 5.8 %.

Η εν λόγω μείωση, αν και απαιτεί περαιτέρω συζήτηση και διερεύνηση, πιθανών να μπορούσε να αποδοθεί στους εξής παράγοντες:

- **Ανισορροπία στη διαδικασία ενυδάτωσης:** Τις πρώτες 7 ημέρες, η αποθήκευση σε σακούλα με υγρασία 75% πιθανώς να οδήγησε στην ικανοποιητική αρχική ανάπτυξη αντοχής. Οι υδραυλικές αντιδράσεις (π.χ. ενεργοποίηση των ποζολανικών υλικών) προχώρησαν σωστά λόγω επαρκούς ενυδάτωσης. Μετά τις 7 ημέρες, η ξαφνική έκθεση σε υγρασία 65% ενδέχεται να μην επέτρεψε τον πολυμερισμό με τον ίδιο ρυθμό. Έτσι, η δομή του γεωπολυμερούς δεν εξελίχθηκε ομαλά, με αποτέλεσμα να μην αυξηθεί η αντοχή του, όπως θα ήταν αναμενόμενο.
- **Εμφάνιση μικρορρηγματώσεων:** Η μετάβαση σε ξηρότερες συνθήκες μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια υγρασίας και, κατ' επέκταση, σε συστολή. Η συστολή δημιουργεί μικρορωγμές στη δομή, μειώνοντας την καμπτική αντοχή του κονιάματος.

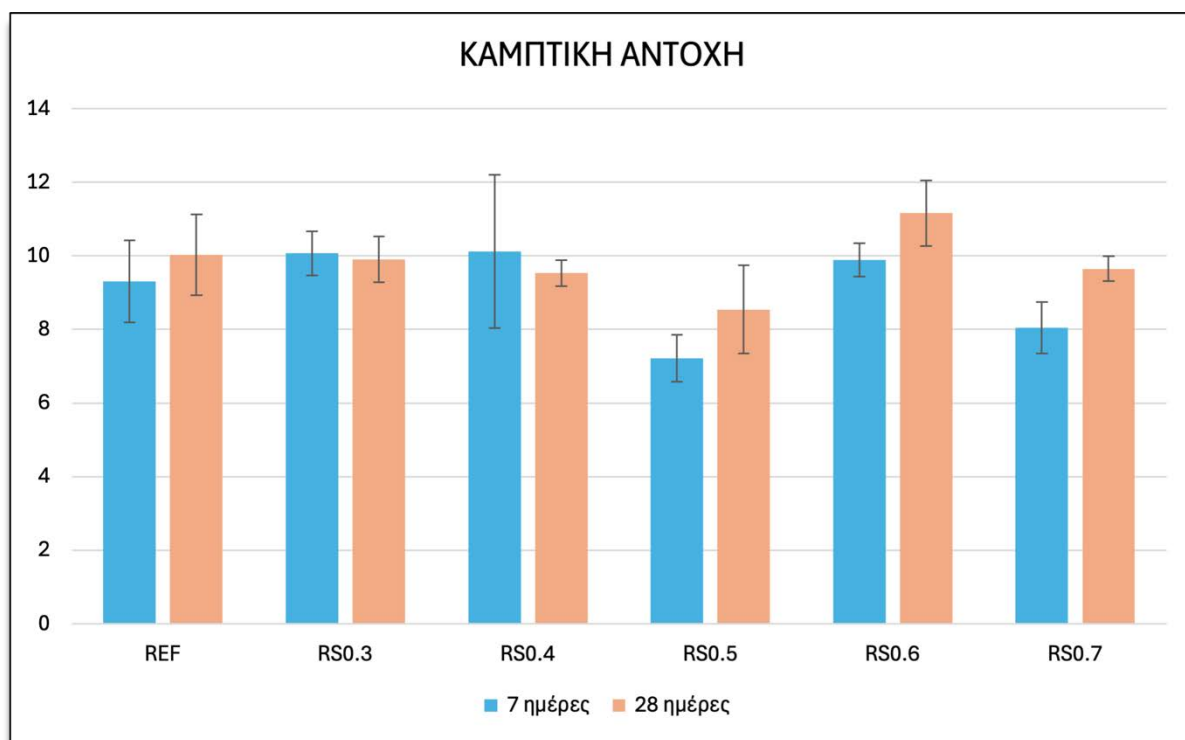
Σειρά Β

Για την Σειρά Β των δοκιμών, έγινε έλεγχος της αντοχής τους σε κάμψη στις 7 και 28 ημέρες μετά την ανάμειξη.

Ο πρώτος παράγοντας που διερευνήθηκε ως προς την επίδρασή του στην καμπτική αντοχή, ήταν το διαφορετικό ποσοστό κιτρικού οξέος στο μείγμα. Παρακάτω, παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών (Πίνακας 4.17):

Πίνακας 4.17 Τιμές καμπτικής αντοχής 7 και 28 ημερών για ποσοστά κιτρικού οξέος.

Όνομα κονιάματος	Αντοχή σε κάμψη 7 ημέρες (MPa)	Αντοχή σε κάμψη 28 ημέρες (MPa)
REF	9.31 (1.11)	10.03 (1.1)
RS0.3	10.07 (0.6)	9.91 (0.62)
RS0.4	10.12 (2.08)	9.53 (0.35)
RS0.5	7.22 (0.64)	8.54 (1.2)
RS0.6	9.89 (0.46)	11.16 (0.89)
RS0.7	8.05 (0.7)	9.65 (0.34)

**Σχήμα 4.17** Διάγραμμα ποσοστών κιτρικού οξέος με καμπτική αντοχή 7 και 28 ημερών.

Με βάση τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα συγκεκριμένα δοκίμια, δεν είναι εφικτό να εξαχθούν σαφή συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση του κιτρικού

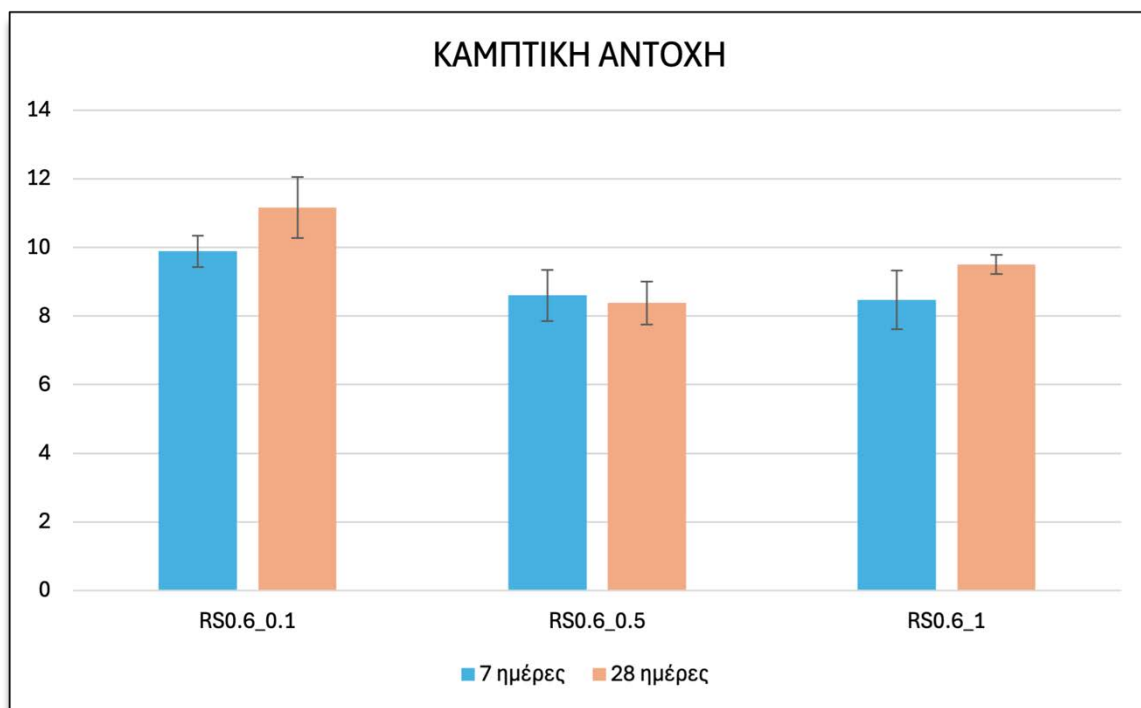
οξέος στην καμπτική αντοχή των κονιαμάτων. Η μεταβολή της αντοχής δεν φαίνεται να ακολουθεί γραμμική ή ξεκάθαρη συσχέτιση με την αύξηση του ποσοστού του κιτρικού οξέος (Σχήμα 4.17).

Ωστόσο, είναι δυνατό να διακριθεί το κονίαμα που ανέπτυξε την υψηλότερη αντοχή με το πέρας του χρόνου. Το δοκίμιο αυτό είναι το **RS0.6** και φαίνεται τις πρώτες 7 ημέρες να ανέπτυξε το 89 % της αντοχής σε κάμψη των 28 ημερών. Επιπρόσθετα, στις 28 ημέρες, παρατηρείται ότι η αντοχή του σε κάμψη έχει ξεπεράσει τα 11 MPa. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να διαπιστωθεί ότι το μείγμα αυτό εμφανίζει υψηλή πρόωμη αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό.

Η επόμενη παράμετρος που μελετήθηκε, ήταν η επίδραση του ποσοστού των ινών στην αντοχή του κονιάματος. Παρατίθενται οι ακόλουθες τιμές καμπτικής αντοχής (Πίνακας 4.18):

Πίνακας 4.18 Τιμές καμπτικής αντοχής 7 και 28 ημερών για ποσοστά ινών.

Όνομα κονιάματος	Αντοχή σε κάμψη 7 ημέρες (MPa)	Αντοχή σε κάμψη 28 ημέρες (MPa)
RS0.6_0.1	9.89 (0.46)	11.16 (0.89)
RS0.6_0.5	8.6 (0.75)	8.38 (0.62)
RS0.6_1	8.47 (0.86)	9.51 (0.28)



Σχήμα 4.18 Διάγραμμα ποσοστών ινών με καμπτική αντοχή 7 και 28 ημερών.

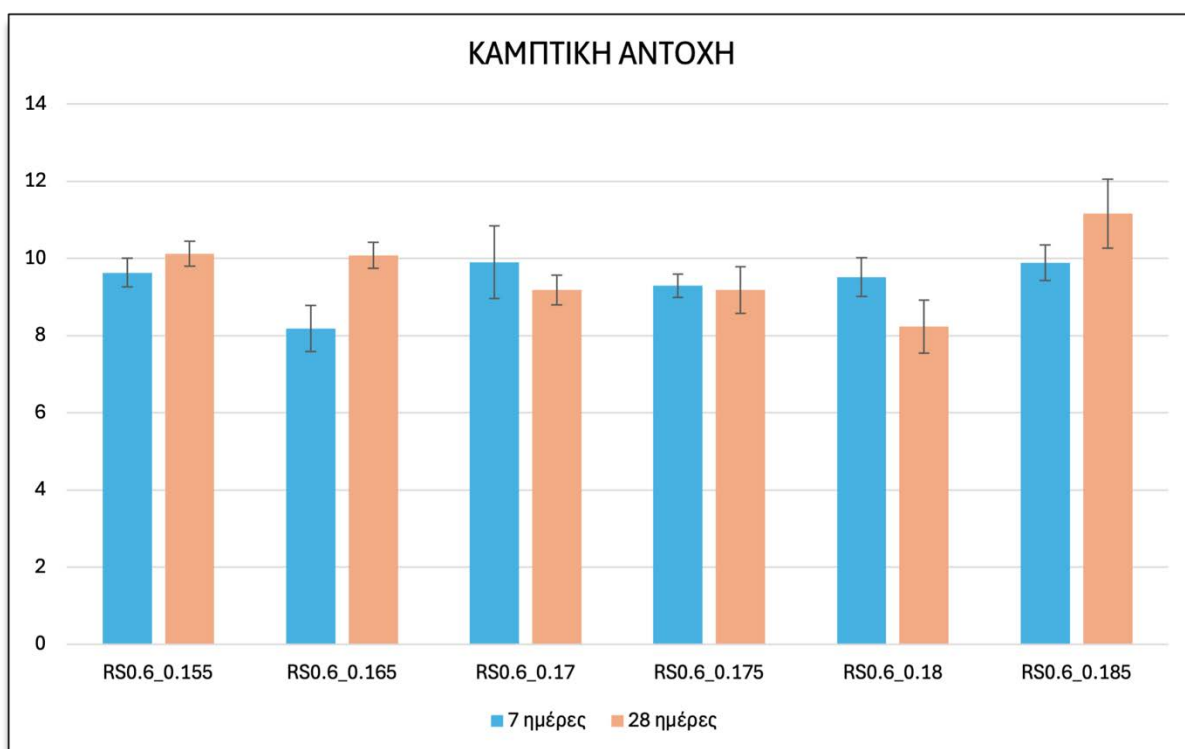
Διαπιστώνεται, λοιπόν, από το Σχήμα 4.18 πως και σε αυτήν την περίπτωση το κονίαμα με την υψηλότερη αντοχή είναι αυτό με ποσοστό ινών 0.1 και ποσοστό κίτρινου 0.6 (**RS0.6_0.1**). Ειδικότερα, τα δοκίμια **RS0.6_0.5** και **RS0.6_1** παρουσίασαν ικανοποιητική αντοχή στις 7 ημέρες, ωστόσο στις 28 ημέρες δεν παρατηρείται ιδιαίτερη αύξηση, με το δοκίμιο **RS0.6_0.5** να εμφανίζει μείωση. Η μείωση αυτή της αντοχής, μπορεί να οφείλεται σε αρκετούς παράγοντες και μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο για περαιτέρω έρευνα.

Μια πιθανή αιτία θα μπορούσε να είναι ότι, όταν αυξάνεται το ποσοστό των ινών, διαταράσσεται η μικροδομή του κονιάματος, περιορίζοντας τη συνοχή του μείγματος. Η παρουσία των ινών μπορεί να μειώσει την ενσωμάτωση και τη σύνδεση των σωματιδίων του κονιάματος, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη αντοχή, ειδικά αν οι ίνες δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένες.

Στη συνέχεια, έχουμε τα αποτελέσματα των αντοχών για τα κονιάματα με διαφορετικούς λόγους Νερού/Τσιμέντου (N/T). Παρακάτω, παρουσιάζονται οι μετρήσεις των δοκιμών αυτών (Πίνακας 4.19):

Πίνακας 4.19 Τιμές καμπτικής αντοχής 7 και 28 ημερών για λόγους N/T.

Όνομα κονιάματος	Αντοχή σε κάμψη 7 ημέρες (MPa)	Αντοχή σε κάμψη 28 ημέρες (MPa)
RS0.6_0.155	9.63 (0.37)	10.12 (0.32)
RS0.6_0.165	8.18 (0.6)	10.08 (0.34)
RS0.6_0.17	9.9 (0.94)	9.18 (0.39)
RS0.6_0.175	9.29 (0.3)	9.18 (0.6)
RS0.6_0.18	9.52 (0.5)	8,23 (0.69)
RS0.6_0.185	9.89 (0.46)	11,16 (0.89)



Σχήμα 4.19 Διάγραμμα λόγων N/T με καμπτική αντοχή 7 και 28 ημερών.

Όπως παρατηρείται, τα δοκίμια στις 7 ημέρες παρουσιάζουν ικανοποιητικές αντοχές με τιμές που κυμαίνονται από 8-10 MPa. Όπως προκύπτει από το Σχήμα 4.19 το κονίαμα που κατέγραψε τη υψηλότερη αντοχή ήταν αυτό με λόγο N/T ίσο με 0.185 (RS0.6_0.185). Ικανοποιητικές τιμές εμφάνισαν και τα δοκίμια RS0.6_0.155 και RS0.6_0.165, καθώς στις 28 ημέρες ανέπτυξαν καμπτική αντοχή μεγαλύτερη των 10 MPa.

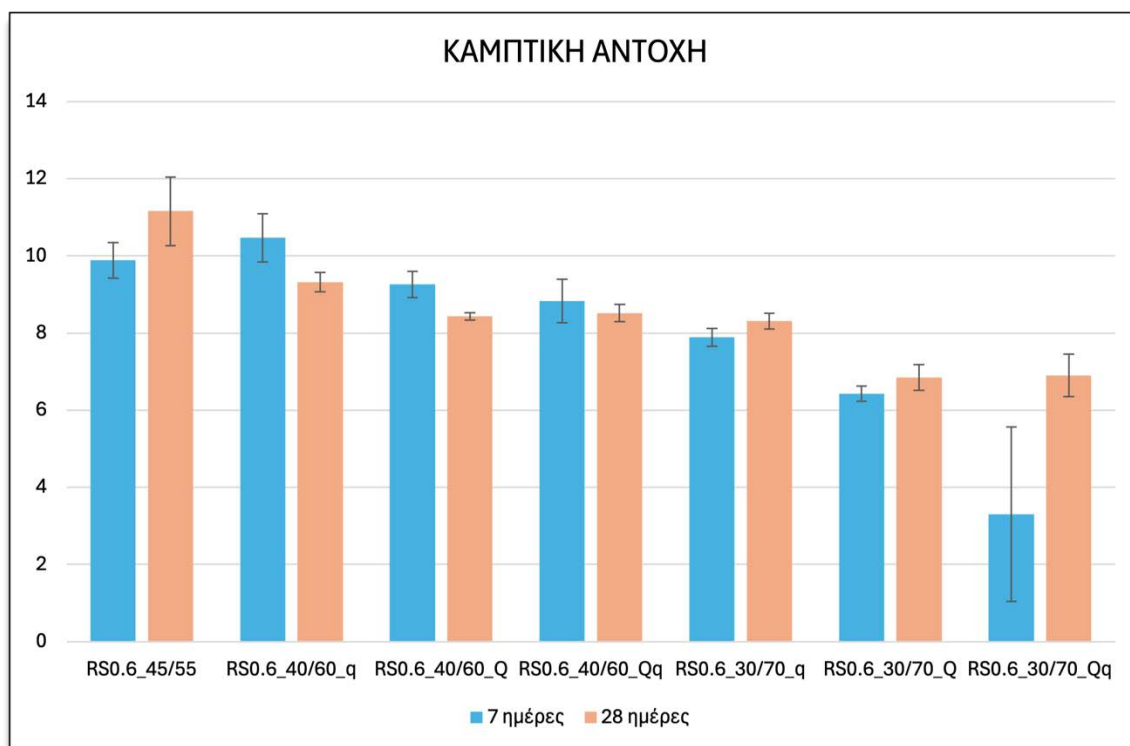
Αξίζει να επισημανθεί η μη αναμενόμενη μείωση της αντοχής των κονιαμάτων RS0.6_0.17, RS0.6_0.175 και RS0.6_0.18 μετά το πέρας των 28 ημερών. Η μείωση αυτή πιθανώς να οφείλεται σε διάφορες αντιδράσεις των υλικών του μείγματος που συνέβησαν κατά τη διάρκεια αυτού του διαστήματος.

Παρομοίως, και σε αυτή την περίπτωση, βάσει των μετρήσεων που διεξήχθησαν στα συγκεκριμένα δοκίμια, δεν είναι δυνατόν να εξαχθούν σαφή συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση του λόγου N/T στην καμπτική αντοχή των κονιαμάτων. Η διακύμανση της αντοχής δεν εμφανίζει γραμμική ή σαφώς καθορισμένη συσχέτιση με τη μεταβολή του λόγου N/T.

Τελευταίος παράγοντας που διερευνήθηκε ως προς την αντοχή, ήταν η προσθήκη αδρανών στο συνολικό ποσοστό κονιάματος, διατηρώντας σταθερό τον λόγο N/T. Οι τιμές της αντοχής σε κάμψη των μειγμάτων αυτών αποδίδονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.20):

Πίνακας 4.20 Τιμές καμπτικής αντοχής 7 και 28 ημερών για ποσοστά προσθήκης άμμου.

Όνομα κονιάματος	Αντοχή σε κάμψη 7 ημέρες (MPa)	Αντοχή σε κάμψη 28 ημέρες (MPa)
RS0.6_45/55	9.89 (0.46)	11.16 (0.89)
RS0.6_40/60_q	10.47 (0.62)	9.32 (0.25)
RS0.6_40/60_Q	9.26 (0.34)	8.43 (0.1)
RS0.6_40/60_Qq	8.83 (0.56)	8.52 (0.23)
RS0.6_30/70_q	7.89 (0.23)	8.31 (0.2)
RS0.6_30/70_Q	6.43 (0.2)	6.85 (0.33)
RS0.6_30/70_Qq	3.3 (2.26)	6.9 (0.55)



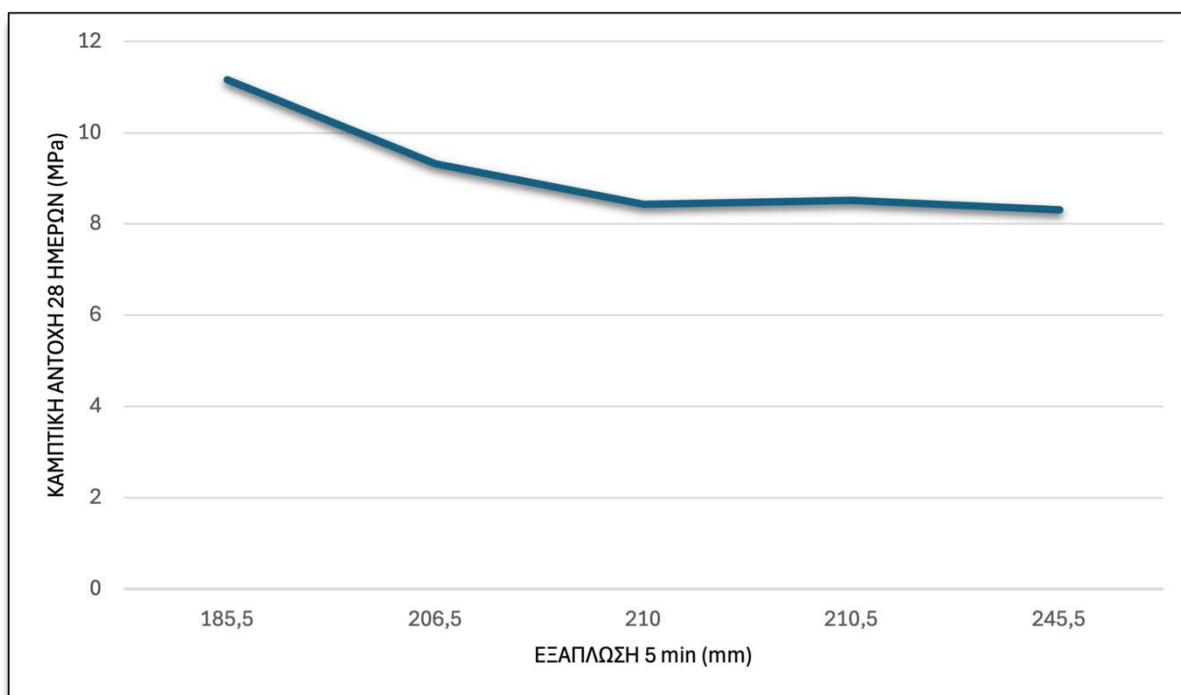
Σχήμα 4.20 Διάγραμμα ποσοστών άμμων με καμπτική αντοχή 7 και 28 ημερών.

Όπως διαπιστώνεται από την ανάλυση του διαγράμματος (Σχήμα 4.20), την καλύτερη αντοχή στις 7 ημέρες παρουσίασε το δοκίμιο **RS0.6_40/60_q**. Στις 28 ημέρες όμως, εμφάνισε μείωση της τιμής αυτής, με συνέπεια το κονίαμα **RS0.6_45/55** να αναπτύσσει υψηλότερη αντοχή με το πέρασ του χρόνου. Το κονίαμα με την δυσμενέστερη αντοχή φαίνεται να είναι το **RS0.6_30/70_Qq**. Αναλυτικότερα, το μείγμα αυτό παρουσίασε μη επιθυμητές τιμές από τις πρώτες 7 ημέρες καθώς η αντοχή του, από την αρχή, μετρήθηκε 67% μικρότερη από αυτή του μείγματος **RS0.6_45/55**.

Από τα δεδομένα των δοκιμών αυτών, προκύπτει το συμπέρασμα ότι **η αύξηση του ποσοστού των αδρανών στο μείγμα σχετίζεται με τη μείωση της αντοχής τους σε κάμψη**. Το εν λόγω συμπέρασμα είναι αναμενόμενο, δεδομένου ότι η αύξηση των αδρανών μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της συνοχής του μείγματος. Τα αδρανή υλικά δεν συμμετέχουν στις χημικές αντιδράσεις πήξης. Αν αυξηθούν πολύ, μειώνεται αναλογικά η ποσότητα των υπόλοιπων υλικών που συμβάλουν περισσότερο στην δομή του κονιάματος. Η δομή γίνεται ανομοιογενής, με περιοχές στις οποίες τα αδρανή δεν συνδέονται με το υπόλοιπο μείγμα και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της

αντοχής. Επιπλέον, αν η αύξηση των αδρανών δεν συνοδεύεται με ρύθμιση του ποσοστού του νερού, το μείγμα μας γίνεται αρκετά ξηρό, αυξάνεται η πορώδης δομή και κατά συνέπεια έχουμε πτώση της αντοχής.

Για τα δοκίμια του πίνακα (Πίνακας 4.20), αξίζει να αναφερθεί μια σημαντική παρατήρηση σχετικά με τη συσχέτιση της εργασιμότητας και της καμπτικής αντοχής του κονιάματος. Σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα, παρατηρήθηκε ότι μεγάλες τιμές εξάπλωσης παρουσιάζουν και μειωμένη καμπτική αντοχή. Το Σχήμα 4.21 απεικονίζει την εξέλιξη της **καμπτικής αντοχής (28 ημέρες)** σε συνάρτηση με τις **τιμές εξάπλωσης (5 λεπτά)** των δοκιμίων με **διαφορετικά ποσοστά Κονίας/Αδρανών**.



Σχήμα 4.21 Διάγραμμα καμπτικής αντοχής 28 ημερών και εξάπλωσης για διαφορετικά ποσοστά άμμου.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το Σχήμα 4.21 ήταν εύλογα και σε συμφωνία με τις αρχικές προσδοκίες καθώς η εργασιμότητα και η καμπτική αντοχή ενός κονιάματος σχετίζονται άμεσα. Υψηλή εργασιμότητα, δηλαδή αρκετά ρευστό μείγμα,

σημαίνει και αύξηση της πορώδους δομής μετά την εξάτμιση του νερού άρα και πτώση της αντοχής.

4.2.2 ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

Σειρά Α

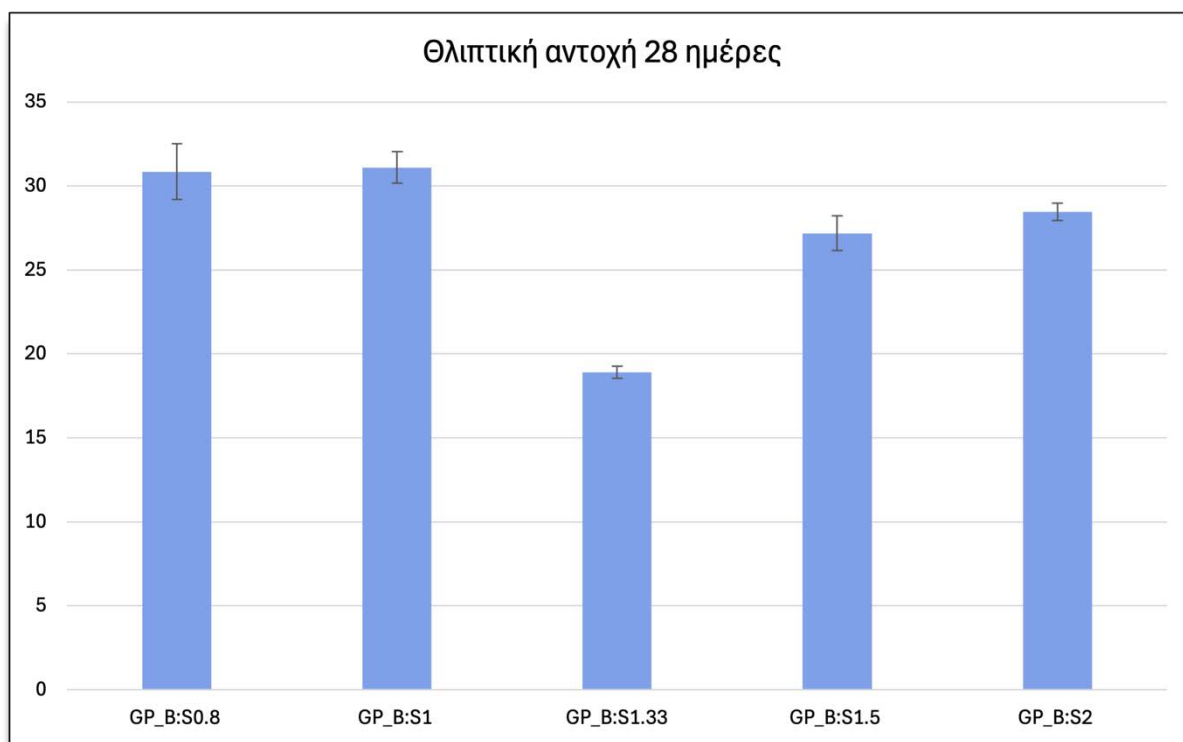
Όμοια με τον έλεγχο της καμπτικής αντοχής, για τα δοκίμια της Σειράς Α έγιναν δοκιμές θλίψης στις 28 ημέρες μετά την ανάμειξη. Αντίστοιχα και για το GP_optimal, έγινε έλεγχος της θλιπτικής του αντοχής στις 7, 14 και 28 ημέρες μετά την ανάμειξη.

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα δοκίμια με διαφορετικές αναλογίες ιπτάμενης τέφρας (FA) – σκόνης Π/Κ (D) έπηξαν γρήγορα με αποτέλεσμα να μην καταγραφούν τιμές ούτε για τη θλιπτική τους αντοχή.

Η διερεύνηση επομένως της θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων ξεκινάει με εκείνα που έχουν διαφορετικούς λόγους Binder/Sand (B/S). Οι τιμές τους καταγράφονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.21):

Πίνακας 4.21 Τιμές θλιπτικής αντοχής 28 ημερών για λόγους B:S.

Όνομα κονιάματος	Αντοχή σε θλίψη 28 ημέρες (MPa)
GP_B:S0.67	-
GP_B:S0.8	30.84 (1.66)
GP_B:S1	31.1 (0.94)
GP_B:S1.33	-
GP_B:S1.5	27.18 (1.03)
GP_B:S2	28.46 (0.53)



Σχήμα 4.22 Διάγραμμα λόγων B:S με θλιπτική αντοχή 28 ημερών.

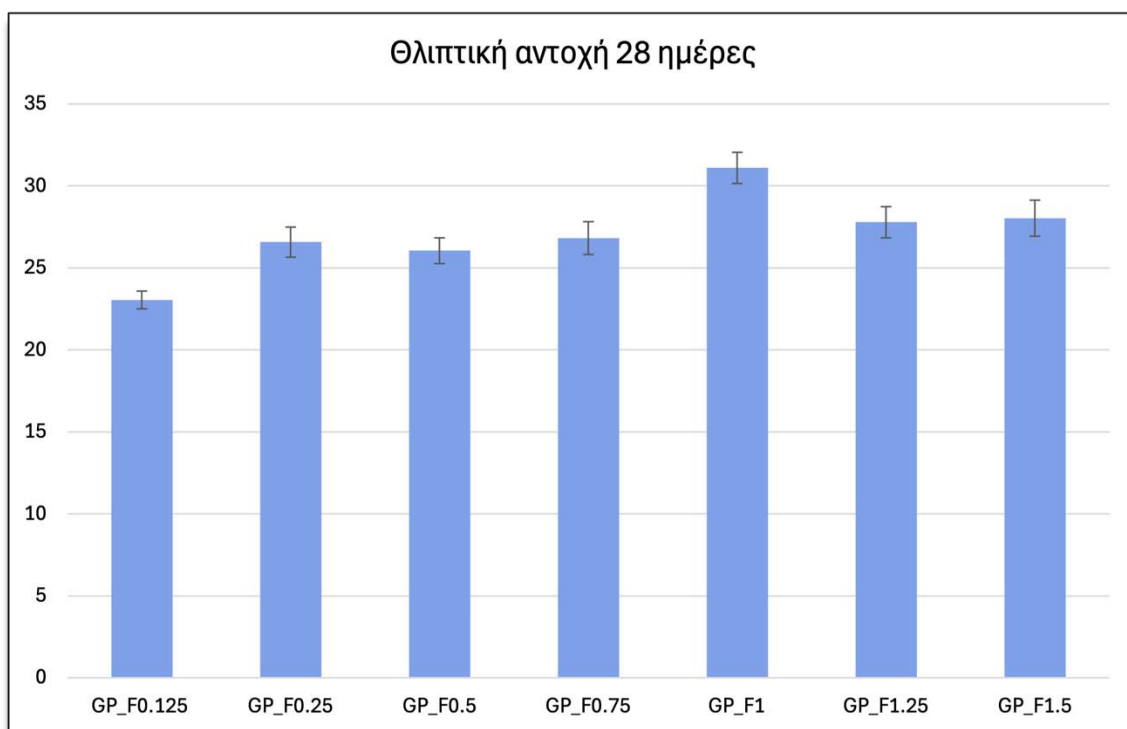
Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.22, οι θλιπτικές αντοχές των μειγμάτων αυτών κυμαίνονται από 27-32 MPa με ευμενέστερη αντοχή αυτή του δοκιμίου **GP_B:S1** με 31.1 MPa και δυσμενέστερη αυτή του **GP_B:S1.5** με 27.18 MPa.

Ωστόσο, η μεταβολή της θλιπτικής αντοχής δεν φαίνεται να σχετίζεται γραμμικά με την αύξηση του λόγου B/S. Το γεγονός αυτό εμποδίζει την εξαγωγή κάποιου συμπεράσματος σχετικά με την επιρροή αυτής της παραμέτρου στην θλιπτική αντοχή των μειγμάτων.

Στη συνέχεια, εξετάστηκαν τα δοκίμια στα οποία χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά ποσοστά ινών, διατηρώντας τον λόγο B:S ίσο με 1 λόγω ευμενέστερων τιμών αντοχής. Παρακάτω, παρουσιάζονται οι μετρήσεις της θλιπτικής αντοχής των κονιαμάτων αυτών (Πίνακας 4.22):

Πίνακας 4.22 Τιμές θλιπτικής αντοχής 28 ημερών για ποσοστά ινών.

Όνομα κονιάματος	Αντοχή σε θλίψη 28 ημέρες (MPa)
GP_F0.125	23.04 (0.54)
GP_F0.25	26.58 (0.91)
GP_F0.5	26.06 (0.79)
GP_F0.75	26.82 (0.99)
GP_F1	31.1 (0.94)
GP_F1.25	27.79 (0.95)
GP_F1.5	28.04 (1.1)

**Σχήμα 4.23** Διάγραμμα ποσοστών ινών με θλιπτική αντοχή 28 ημερών.

Όπως φαίνεται στον πίνακα (Πίνακας 4.22), οι τιμές της θλιπτικής αντοχής κυμαίνονται μεταξύ 23 – 32 MPa. Καθώς αυξάνεται το ποσοστό των ινών, οι τιμές της αντοχής μοιάζουν να αυξάνονται και αυτές με μια σχετική γραμμικότητα (Σχήμα 4.23). Η συμπεριφορά αυτή του διαγράμματος παρατηρείται μέχρι το ποσοστό ινών με τιμή 1 (GP_F1), το οποίο παρουσιάζει και την ευμενέστερη θλιπτική αντοχή ίση με 31.1 MPa.

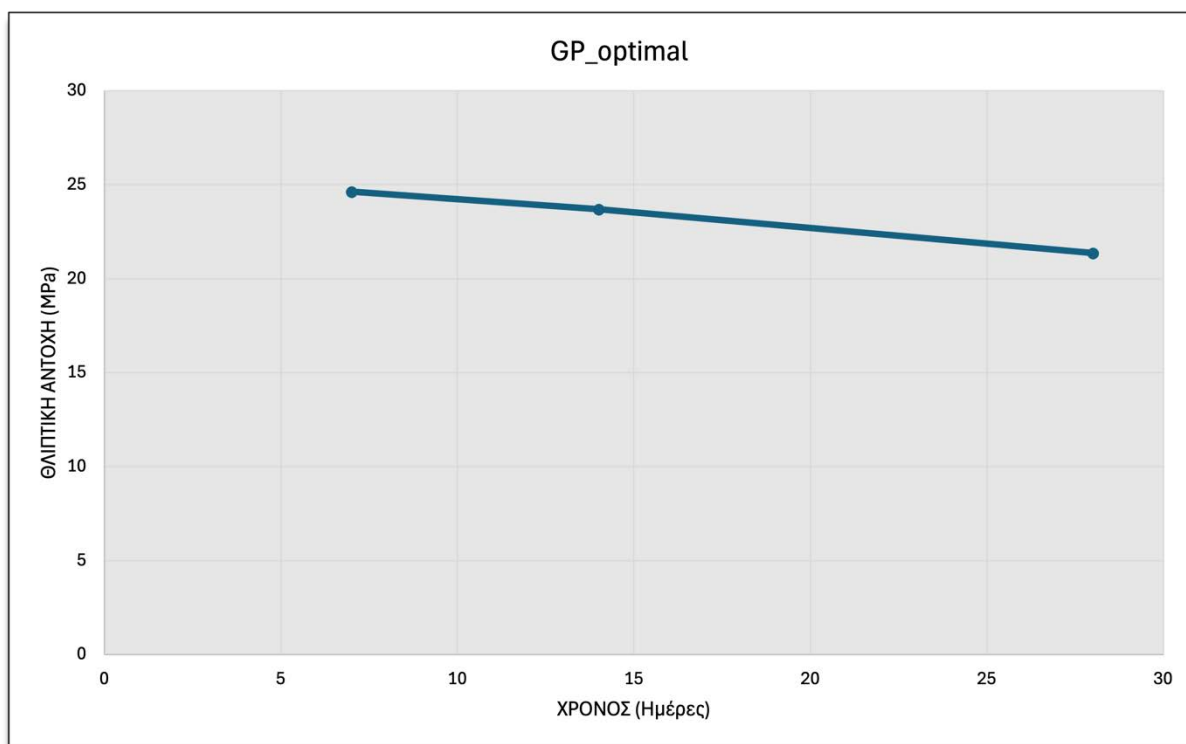
Μεγαλύτερα ποσοστά ινών φαίνεται να μειώνουν τη θλιπτική αντοχή με δυσμενέστερη αντοχή αυτή του δοκιμίου **GP_F0.125** με 23.04 MPa.

Συνεπώς, παρατηρείται πως για χαμηλές δοσολογίες οι ίνες μπορεί να συμβάλουν στη βελτίωση της συνοχής του μείγματος και στη μείωση της μικρορρηγμάτωσης, οδηγώντας σε ελαφρώς αυξημένη ή διατηρούμενη θλιπτική αντοχή. Η υπερβολική ποσότητα ινών ωστόσο, μπορεί να μειώσει την εργασιμότητα και να αυξήσει τα κενά αέρα στο μείγμα, οδηγώντας σε πτώση της θλιπτικής αντοχής.

Συνοψίζοντας, για τη σειρά A, εξετάστηκε η αντοχή σε θλίψη του τελικού κονιάματος με τις βέλτιστες αναλογίες (optimal) υλικών. Στο μείγμα αυτό έγιναν έλεγχοι θλιπτικής αντοχής στις 7, 14 και 28 ημέρες μετά την ανάμειξη. Τα δεδομένα που καταγράφηκαν είναι τα εξής (Πίνακας 4.23):

Πίνακας 4.23 Τιμές θλιπτικής αντοχής 7, 14 και 28 ημερών για GP_optimal.

Όνομα κονιάματος	Αντοχή σε θλίψη 7 ημέρες (MPa)	Αντοχή σε θλίψη 14 ημέρες (MPa)	Αντοχή σε θλίψη 28 ημέρες (MPa)
GP_optimal	24.63 (0.88)	23.69 (0.54)	21.36 (0.9)



Σχήμα 4.24 Διάγραμμα θλιπτικής αντοχής GP_optimal συναρτήσει του χρόνου (days).

Από το Σχήμα 4.24 παρατηρείται πως, όπως και στην περίπτωση της καμπτικής αντοχής, το βέλτιστο μείγμα των κονιαμάτων της Σειράς Α παρουσιάζει μείωση αντοχής σε βάθος χρόνου. Συγκεκριμένα από τις 7 στις 14 ημέρες εμφανίζει περίπου 4% πώση θλιπτικής αντοχής, ενώ από τις 14 στις 28 ημέρες η πώση είναι περίπου ίση με 10%.

Πιθανά αίτια της συγκεκριμένης συμπεριφοράς αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 4.2.1 για το ίδιο μείγμα (ανισορροπία στη διαδικασία ενυδάτωσης, συρρίκνωση λόγω απώλειας νερού). Επιπρόσθετα, με περαιτέρω ερεύνα θα μπορούσε να εξεταστεί το ενδεχόμενο η αναλογία της άμμου $< 0.3 \text{ mm}$ να είναι αρκετά υψηλή σε σχέση με τα συνδετικά υλικά, γεγονός που θα μπορούσε να δημιουργήσει μη συνεκτική δομή που εξασθενεί με το χρόνο. Ένας διαφορετικός τρόπος συντήρησης όπως η δοκιμή θερμικής σκλήρυνσης στους 60°C θα ήταν επίσης μια ενδιαφέρουσα δοκιμή.

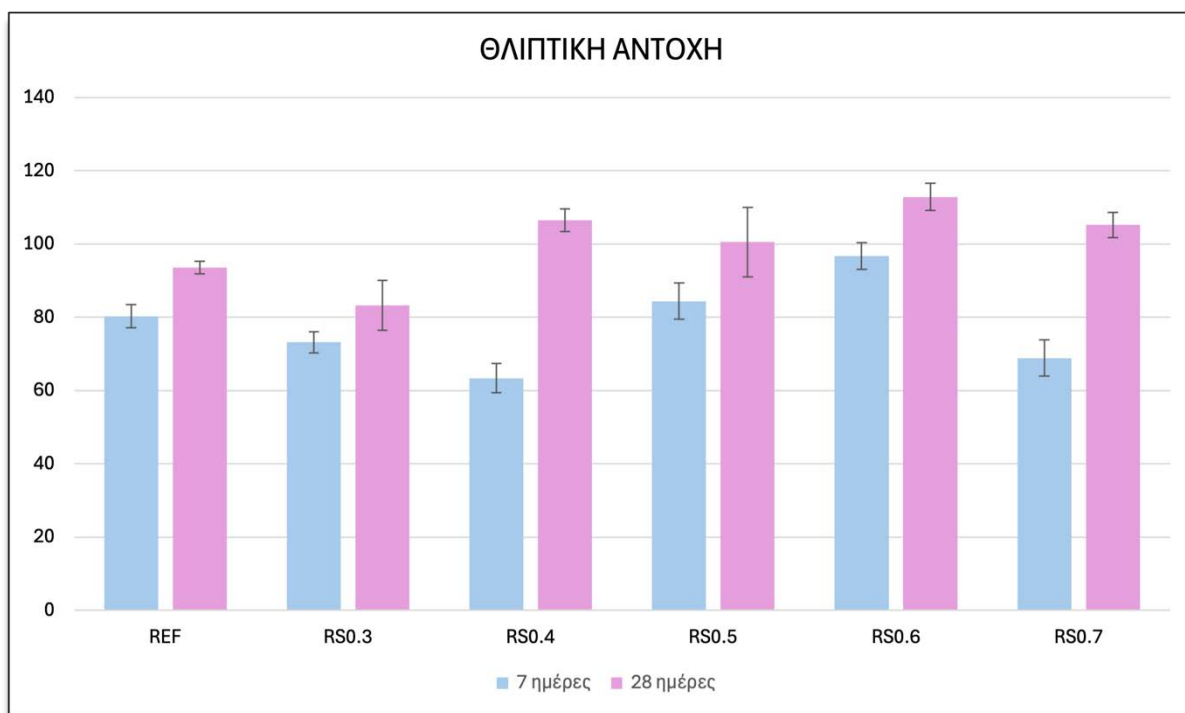
Σειρά Β

Για την Σειρά Β των δοκιμών, έγινε έλεγχος της αντοχής τους σε θλίψη στις 7 και 28 ημέρες μετά την ανάμειξη.

Αρχικά, διερευνήθηκε πως επηρεάζει το ποσοστό κιτρικού οξέος τη θλιπτική αντοχή του μείγματος. Παρακάτω, παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών (Πίνακας 4.24):

Πίνακας 4.24 Τιμές θλιπτικής αντοχής 7 και 28 ημερών για ποσοστά κιτρικού οξέος.

Όνομα κονιάματος	Αντοχή σε θλίψη 7 ημέρες (MPa)	Αντοχή σε θλίψη 28 ημέρες (MPa)
REF	80.32 (3.17)	93.62 (1.72)
RS0.3	73.19 (2.89)	83.3 (6.77)
RS0.4	63.37 (3.98)	106.5 (3.05)
RS0.5	84.45 (5)	100.59 (9.49)
RS0.6	96.74 (3.63)	112.9 (3.73)
RS0.7	68.92 (4.91)	105.24 (3.39)



Σχήμα 4.25 Διάγραμμα ποσοστών κιτρικού οξέος με θλιπτική αντοχή 7 και 28 ημερών.

Παρατηρείται από το Σχήμα 4.25 πως δεν υπάρχει κάποια συνέπεια στη μεταβολή που προκαλεί η προσθήκη κιτρικού οξέος στη θλιπτική αντοχή του μείγματος. Οι τιμές των δοκιμίων στις 7 ημέρες ωρίμανσης κυμαίνονται μεταξύ 63 – 97 MPa, ενώ στις 28 ημέρες οι τιμές ξεκινάνε από τα 83 MPa και φτάνουν μέχρι και τα 113 MPa.

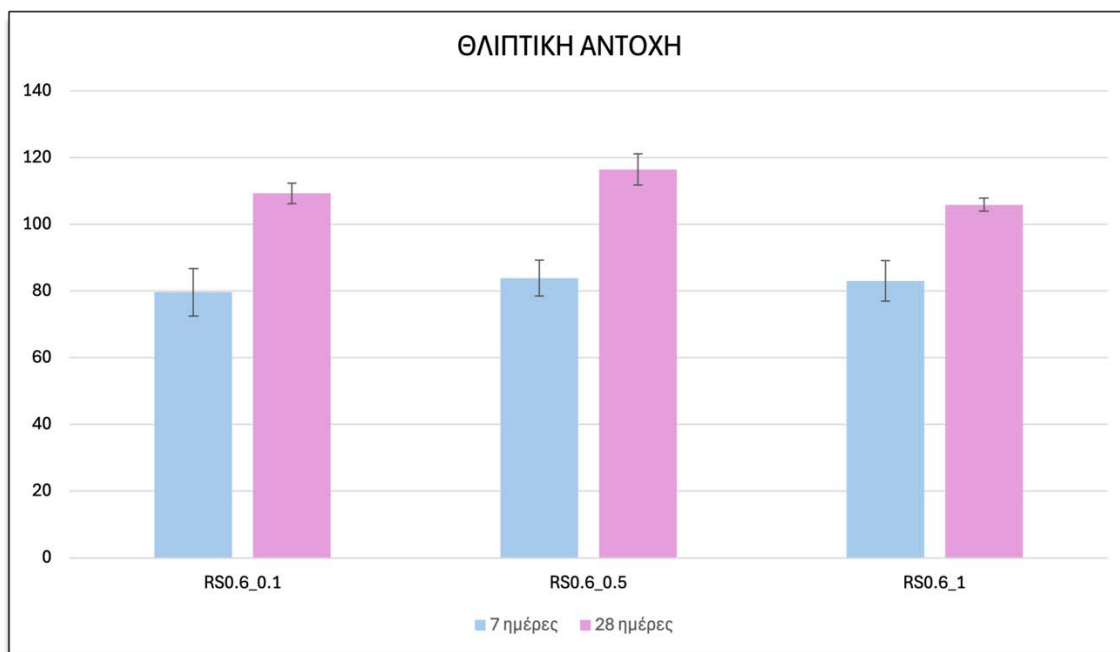
Τις ευμενέστερες τιμές και στις δύο μετρήσεις παρουσίασε το μείγμα που περιείχε 0.6% κιτρικό οξύ (**RS0.6**), οι οποίες ήταν 96.74 MPa και 112.9 MPa αντίστοιχα. Αξίζει να σχολιαστεί πως το συγκεκριμένο μείγμα από τις 7 μόλις ημέρες ωρίμανσης είχε αναπτύξει σχεδόν το 86% της θλιπτικής του αντοχής των 28 ημερών. Η συμπεριφορά του αυτή το καθιστά ιδανικό για χρήση σε κατασκευές που απαιτούν ταχεία ανάπτυξη αντοχής.

Στις 7 ημέρες ωρίμανσης δυσμενέστερη τιμή παρουσίασε το μείγμα με 0.4% κιτρικό οξύ (**RS0.4**) με τιμή 63.37 MPa και στις 28 ημέρες χαμηλότερη αντοχή είχε το μείγμα με ποσοστό 0.3% κιτρικό οξύ (**RS0.3**) με τιμή 83.3 MPa.

Επόμενη παράμετρος που εξετάστηκε ήταν η επίδραση του ποσοστού ινών στο μείγμα σε σχέση με τη θλιπτική του αντοχή. Διατηρήθηκε το ποσοστό του κιτρικού οξέος που παρουσίασε τις υψηλότερες τιμές θλιπτικής αντοχής. Οι τιμές που προέκυψαν παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.25):

Πίνακας 4.25 Τιμές θλιπτικής αντοχής 7 και 28 ημερών για ποσοστά ινών.

Όνομα κονιάματος	Αντοχή σε θλίψη 7 ημέρες (MPa)	Αντοχή σε θλίψη 28 ημέρες (MPa)
RS0.6_0.1	79.64 (7.12)	109.24 (3.12)
RS0.6_0.5	83.84 (5.43)	116.45 (4.66)
RS0.6_1	82.99 (6.05)	105.83 (1.95)



Σχήμα 4.26 Διάγραμμα ποσοστών ινών με θλιπτική αντοχή 7 και 28 ημερών.

Παρατηρείται τόσο από το διάγραμμα (Σχήμα 4.26) όσο και από τον πίνακα τιμών (Πίνακας 4.25) πως τα διαφορετικά ποσοστά ινών στο μείγμα επηρεάζουν ελάχιστα τη θλιπτική αντοχή των μειγμάτων. Συγκεκριμένα οι τιμές αντοχών στις **7 ημέρες** ωρίμανσης βρίσκονται μεταξύ 79 – 84 MPa και στις **28 ημέρες** μεταξύ 105 – 117 MPa. Με πολύ μικρή διαφορά, ευμενέστερες τιμές συναντώνται στο μείγμα με ποσοστό ινών 0.5% (**RS0.6_0.5**) το οποίο παρουσίασε αντοχή σε θλίψη 83.83 MPa στις πρώτες 7 ημέρες ωρίμανσης και 116.45 MPa στις 28 ημέρες.

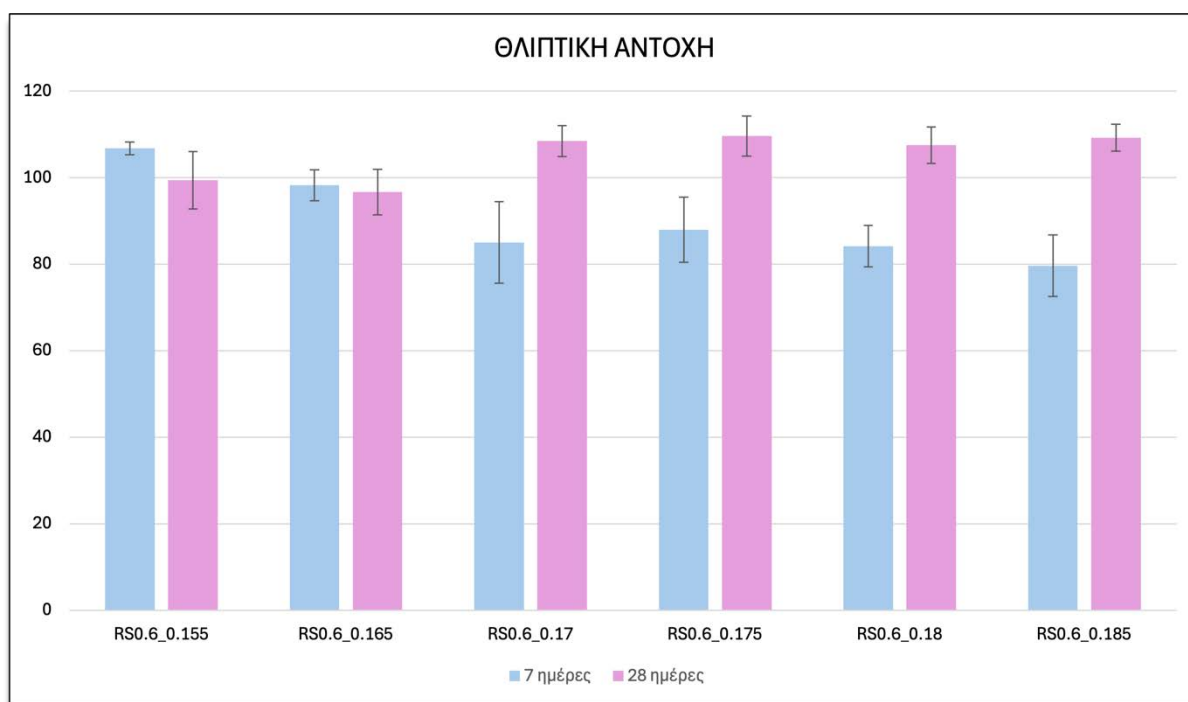
Η μικρή επιρροή των ινών στη θλιπτική αντοχή των μειγμάτων ήταν αναμενόμενη καθώς οι ίνες βοηθούν στην κατανομή των τάσεων και μειώνουν τη δημιουργία και διάδοση ρωγμών, αυξάνοντας σημαντικά την καμπτική αντοχή. Τα μείγματα με κονία CSA παρουσιάζουν ήδη υψηλή αντοχή σε θλίψη, οπότε η συμβολή των ινών είναι αμελητέα.

Έπειτα, εξετάστηκε η επιρροή του λόγου Νερού/ Τσιμέντου (N/T) στη θλιπτική αντοχή, διατηρώντας σταθερό το ποσοστό 0.1 των ινών και 0,6 του κυτρινού οξέος.

Οι μετρήσεις των δοκιμών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.26):

Πίνακας 4.26 Τιμές θλιπτικής αντοχής 7 και 28 ημερών για λόγους N/T.

Όνομα κονιάματος	Αντοχή σε θλίψη 7 ημέρες (MPa)	Αντοχή σε θλίψη 28 ημέρες (MPa)
RS0.6_0.155	106.79 (1.47)	99.42 (6.64)
RS0.6_0.165	98.25 (3.57)	96.65 (5.25)
RS0.6_0.17	85.03 (9.38)	108.49 (3.56)
RS0.6_0.175	87.99 (7.56)	109.61 (4.59)
RS0.6_0.18	84.21 (4.82)	107.52 (4.26)
RS0.6_0.185	79.64 (7.12)	109.24 (3.12)



Σχήμα 4.27 Διάγραμμα λόγων N/T με θλιπτική αντοχή 7 και 28 ημερών.

Από το Σχήμα 4.27 παρατηρείται πως τα δοκίμια με τους χαμηλότερους λόγους N/T (**RS0.6_0.155** & **RS0.6_0.165**) ενώ εμφανίζουν τις υψηλότερες θλιπτικές αντοχές στις πρώτες 7 ημέρες, στις 28 ημέρες παρουσιάζουν μείωση της αντοχής αυτής, με αποτέλεσμα να έχουν τις χαμηλότερες τελικές αντοχές. Τα υπόλοιπα δοκίμια παρουσιάζουν αυξητική συμπεριφορά στην αντοχή και στις 28 ημέρες ωρίμανσης οι τιμές τους εμφανίζουν ελάχιστη διαφορά (107 – 110 MPa). Συγκεκριμένα τα δοκίμια με την υψηλότερη τελική θλιπτική αντοχή είναι αυτά με λόγους N/T 0.175 (**RS0.6_0.175**) με τιμή αντοχής 109.61 MPa και 0.185 (**RS0.6_0.185**) με τιμή αντοχής 109.24 MPa.

Συγκριτικά με το τσιμέντο Portland, τα κονιάματα CSA παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά στη μεταβολή της θλιπτικής τους αντοχής με την αύξηση του λόγου N/T. Στο Portland τσιμέντο, η θλιπτική αντοχή αυξάνεται όσο μειώνεται ο λόγος N/T, επειδή η χαμηλότερη περιεκτικότητα σε νερό οδηγεί σε πιο πυκνή μικροδομή και λιγότερους πόρους. Η ανάπτυξη της αντοχής, ωστόσο, είναι αργή και συνεχής και παρουσιάζει την κυριότερη αύξηση μεταξύ 7 και 28 ημερών.

Αντίθετα, το CSA κονίαμα ενυδατώνεται πολύ πιο γρήγορα από το Portland, με ταχεία ανάπτυξη αντοχής στις πρώτες 24-72 ώρες. Σε χαμηλούς λόγους N/T, αναπτύσσει πολύ υψηλή αρχική θλιπτική αντοχή (7 ημέρες), αλλά η έλλειψη διαθέσιμου

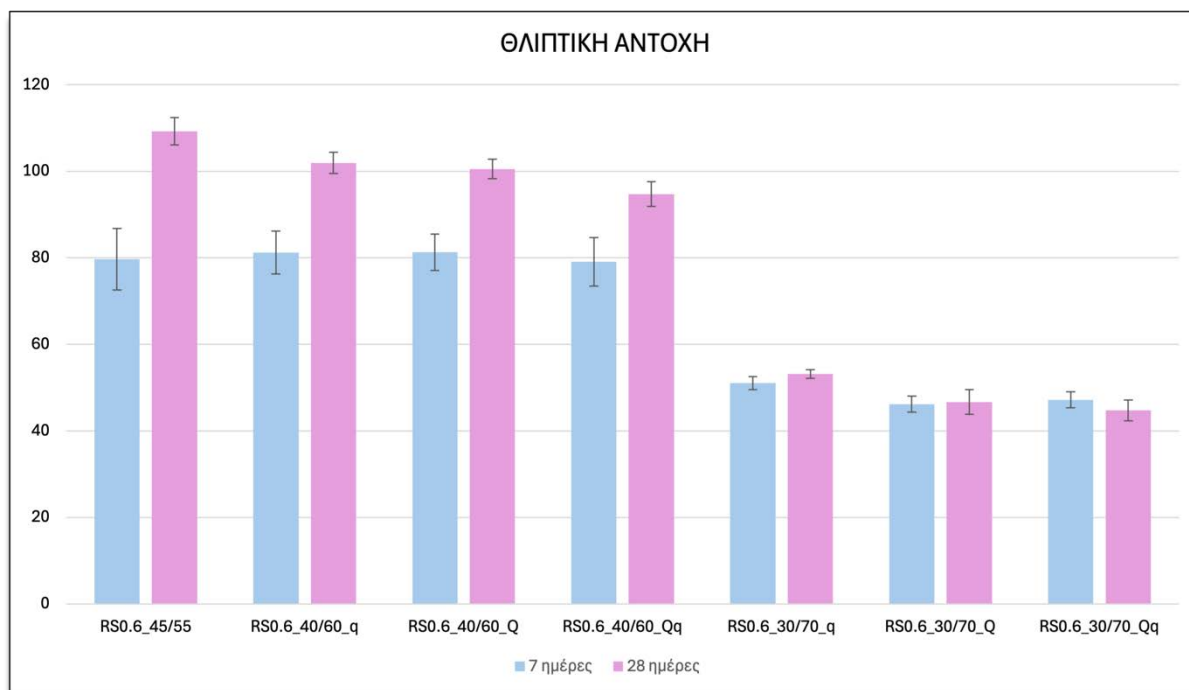
νερού πιθανόν να περιορίζει τη συνέχιση της ενυδάτωσης, οδηγώντας σε χαμηλότερη τελική αντοχή.

Σε υψηλότερους λόγους N/T, η ενυδάτωση διαρκεί περισσότερο, γεγονός που μπορεί να προκαλεί την ανάπτυξη μεγαλύτερης τελικής θλιπτικής αντοχής.

Τελευταία δοκιμή που έγινε ως προς τη θλιπτική αντοχή ήταν η εξέταση του παράγοντα της προσθήκης αδρανών στο συνολικό ποσοστό κονιάματος, διατηρώντας σταθερό τον λόγο N/T. Οι τιμές της αντοχής σε θλίψη των μειγμάτων αυτών αποδίδονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.27):

Πίνακας 4.27 Τιμές θλιπτικής αντοχής 7 και 28 ημερών για ποσοστά προσθήκης άμμου.

Όνομα κονιάματος	Αντοχή σε θλίψη 7 ημέρες (MPa)	Αντοχή σε θλίψη 28 ημέρες (MPa)
RS0.6_45/55	79.64 (7.12)	109.24 (3.12)
RS0.6_40/60_q	81.2 (4.99)	101.95 (2.48)
RS0.6_40/60_Q	81.27 (4.19)	100.51 (2.26)
RS0.6_40/60_Qq	79.1 (5.61)	94.74 (2.87)
RS0.6_30/70_q	51.07 (1.5)	53.13 (1.02)
RS0.6_30/70_Q	46.16 (1.87)	46.64 (2.86)
RS0.6_30/70_Qq	47.17 (1.87)	44.73 (2.43)



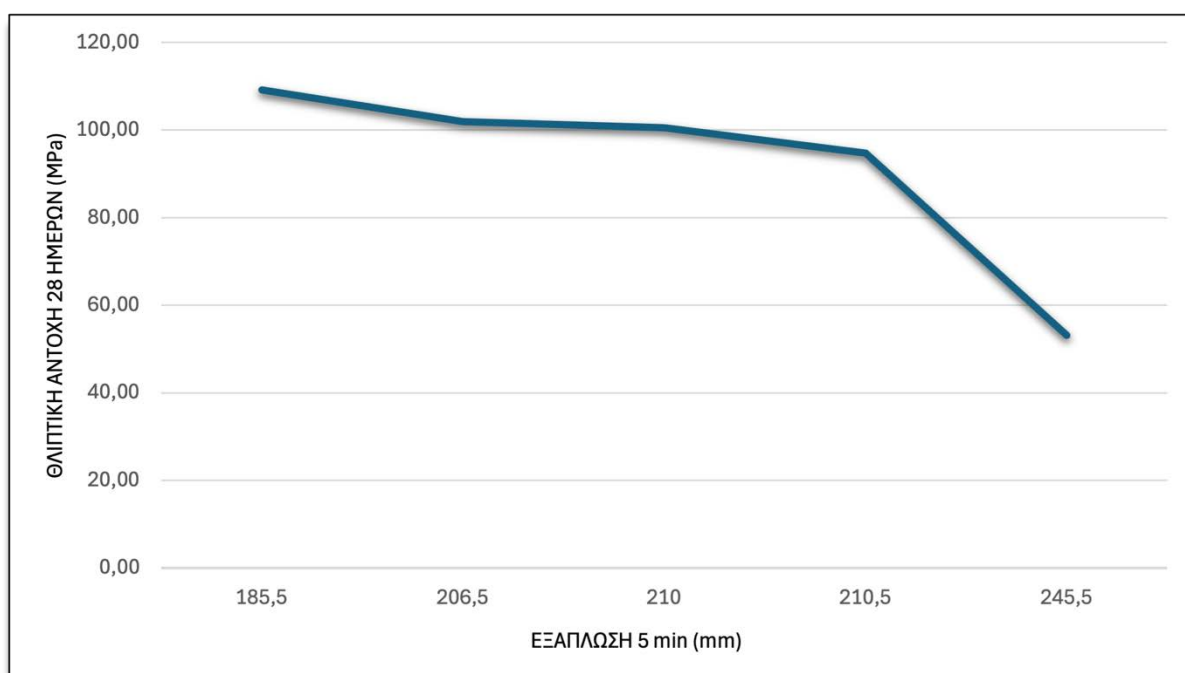
Σχήμα 4.28 Διάγραμμα ποσοστών άμμου με θλιπτική αντοχή 7 και 28 ημερών.

Από το Σχήμα 4.28 παρατηρείται ότι η αρχική σύσταση του μείγματος (**RS0.6_45/55**) έχει την ευμενέστερη αντοχή στις 28 ημέρες (109.24 MPa), που υποδηλώνει πως η υψηλότερη περιεκτικότητα σε κονία CSA ευνοεί τη μακροπρόθεσμη θλιπτική αντοχή. Στην περίπτωση που το ποσοστό Κονίας/Αδρανών είναι 40/60, όλα τα μείγματα φαίνεται να έχουν παρόμοια αντοχή στις 7 ημέρες (μεταξύ 79 – 82 MPa) η οποία αυξάνεται στις 28 ημέρες αλλά και πάλι δεν ξεπερνάει αυτή του RS0.6_45/55. Η προσθήκη μεγάλης ποσότητας χαλαζιακής άμμου με σύσταση 30/70, παρουσιάζει σημαντική πτώση της θλιπτικής αντοχής ιδιαίτερα για τα **RS_0.6_30/70_Q** και **RS_0.6_30/70_Qq** όπου στις **28 ημέρες** οι τιμές τους βρίσκονται **κάτω από τα 50 MPa**. Η μηδαμινή αύξηση της αντοχής σε αυτά τα μείγματα από τις 7 στις 28 ημέρες δείχνει ότι η μακροπρόθεσμη σκλήρυνση επηρεάζεται αρνητικά λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε κονία.

Μπορεί, επομένως, να σχολιαστεί πως η προσθήκη χαλαζιακής άμμου στα μείγματα μειώνει τη θλιπτική τους αντοχή, ιδιαίτερα στις 28 ημέρες ωρίμανσης. Η κοκκομετρία της άμμου φαίνεται επίσης να επηρεάζει τις τιμές της αντοχής. Συγκεκριμένα τα μείγματα που περιείχαν μόνο την άμμο με διάμετρο κόκκων 0 – 0.3 mm παρουσίασαν υψηλότερες τιμές θλιπτικής αντοχής από τα υπόλοιπα της ίδιας σύστασης. Αυτό

πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός ότι οι μεγαλύτεροι κόκκοι δεν ενσωματώνονται σωστά στη μήτρα και προκαλούν ασθενέστερους δεσμούς.

Ομοίως εδώ, για τα δοκίμια του πίνακα (Πίνακας 4.27), αξίζει να αναφερθεί η συσχέτιση της εργασιμότητας και της θλιπτικής αντοχής του κονιάματος. Σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα, παρατηρήθηκε ότι μεγάλες τιμές εξάπλωσης παρουσιάζουν και μειωμένη θλιπτική αντοχή. Το Σχήμα 4.29 απεικονίζει την εξέλιξη της **θλιπτικής αντοχής (28 ημέρες)** σε συνάρτηση με τις **τιμές εξάπλωσης (5 λεπτά)** των δοκιμίων με **διαφορετικά ποσοστά Κονίας/Αδρανών**.



Σχήμα 4.29 Διάγραμμα θλιπτικής αντοχής 28 ημερών και εξάπλωσης για διαφορετικά ποσοστά άμμου.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.29 ήταν αναμενόμενα και ταυτίζονται με τις αρχικές προβλέψεις, καθώς υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ της εργασιμότητας και της θλιπτικής αντοχής ενός κονιάματος. Συγκεκριμένα, μεγαλύτερη εργασιμότητα, δηλαδή πιο ρευστό μείγμα, οδηγεί σε αυξημένη πορώδη δομή μετά την εξάτμιση του νερού, γεγονός που συνεπάγεται μείωση της αντοχής.

4.3 ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΜΕΙΓΜΑΤΑ

Όλες οι παραπάνω δοκιμές συνέβαλλαν έτσι ώστε να εντοπιστούν οι βέλτιστες αναλογίες υλικών και για τις δύο σειρές κονιαμάτων. Πιο συγκεκριμένα:

Σειρά Α

Για τα κονιάματα της Σειράς Α ξεκινήσαμε επιλέγοντας τις ευμενέστερες αναλογίες Ιπτάμενης τέφρας – Σκόνης Π/Κ (FA-D). Κυριότερη παράμετρος που λήφθηκε υπόψιν για την κατοχύρωση των συγκεκριμένων αναλογιών ήταν η δοκιμή εργασιμότητας. Το μείγμα με την καλύτερη εργασιμότητα ήταν αυτό με αναλογίες 0.67–1.33 (GP_FA0.67_D1.33) το οποίο παρουσίασε και ικανοποιητική τιμή χρόνου πήξης.

Σειρά είχε ο λόγος Binder/Sand (B/S) ο οποίος αποφασίστηκε με σχετική ευκολία, καθώς το μείγμα με λόγο ίσο με 1 (GP_B:S1) εμφάνισε την καλύτερα εργασιμότητα, αλλά και τις καλύτερες τιμές καμπτικής και θλιπτικής αντοχής.

Τέλος, για την εύρεση του βέλτιστου ποσοστού ινών στο μείγμα, λήφθηκαν υπόψιν κυρίως οι τιμές της αντοχής σε κάμψη και θλίψη. Ευμενέστερες τιμές και στις δύο δοκιμές, εμφάνισε το μείγμα με ποσοστό ινών 1 (GP_F1).

Συγκεντρωτικά, οι αναλογίες του GP_optimal παρατίθενται παρακάτω (Πίνακας 4.28):

Πίνακας 4.28 Αναλογίες βέλτιστου μείγματος Σειράς Α.

Όνομα κονιάματος	Πυριτικό κάλιο	Ιπτάμενη τέφρα	Μετακαολίνη	Σκόνη Π/Κ	Άμμος 0.3- 1.2mm	Άμμος <0.3mm	Ίνες
GP_optimal	3	0.67	1	1.33	2	4	1

Σειρά Β

Στα κονιάματα της Σειράς Β, έγινε πρώτα έλεγχος βέλτιστου ποσοστού κιτρικού οξέος, με σκοπό να επιτευχθεί η επιθυμητή επιβράδυνση της πήξης χωρίς όμως να

μειωθεί η αντοχή του μείγματος. Ευμενέστερες τιμές χρόνου πήξης, καμπτικής και θλιπτικής αντοχής αλλά και αρκετά καλή εργασιμότητα παρουσίασε το κονίαμα με ποσοστό 0.6% (**RS0.6**).

Διατηρώντας αυτό το ποσοστό κιτρικού οξέος, έγινε στη συνέχεια διερεύνηση σε σχέση με το ποσοστό των ινών στο μείγμα. Υψηλότερη τιμή καμπτικής αντοχής, ευμενέστερη εργασιμότητα και αρκετά καλή θλιπτική αντοχή παρουσίασε το ποσοστό 0.1 (**RS0.6_0.1**).

Με αυτά τα ποσοστά κιτρικού οξέος και ινών να παραμένουν σταθερά, ακολούθησε η εξέταση του λόγου N/T που προσφέρει βέλτιστες ιδιότητες. Παρατηρήθηκε πως το μείγμα με λόγο 0.185 (**RS0.6_0.185**) παρουσίασε την καλύτερη εργασιμότητα και υψηλότερη αντοχή σε κάμψη, αλλά και αρκετά καλή θλιπτική αντοχή.

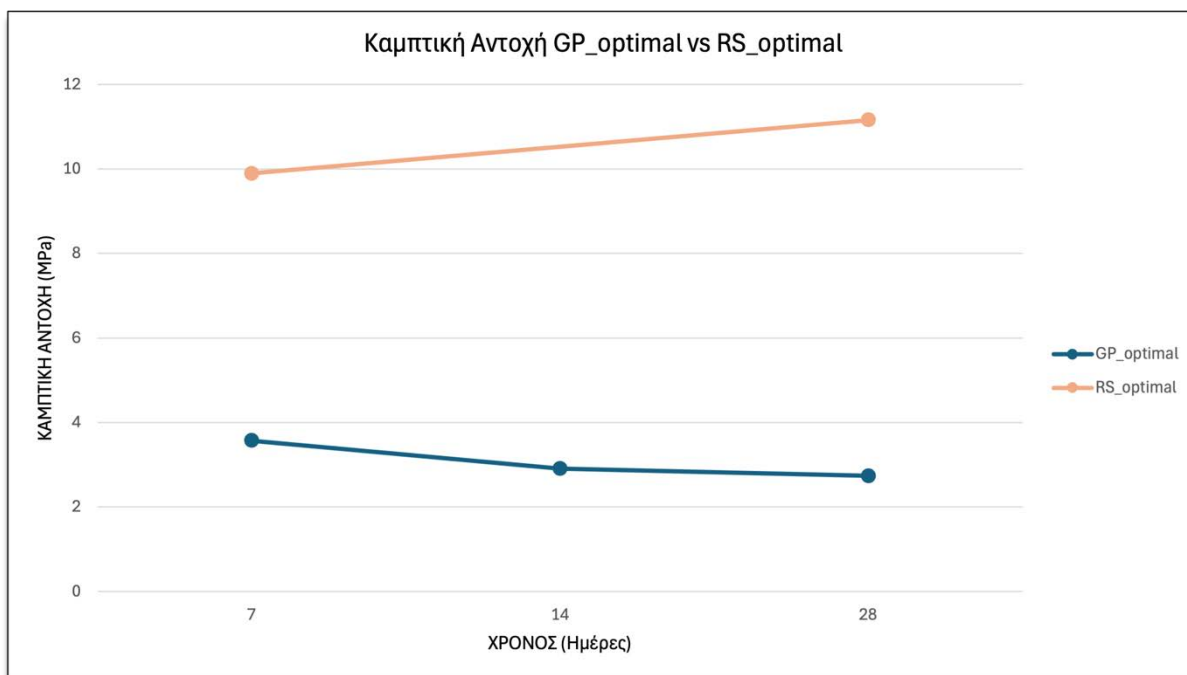
Τελευταίος παράγοντας που εξετάστηκε ήταν η επίδραση της προσθήκης χαλαζιακής άμμου στα αδρανή του μείγματος σε δύο διαφορετικές αναλογίες Κονίας/Αδρανών (40/60 και 30/70). Διαπιστώθηκε όμως, πως σε καμία από τις δοκιμές που υποβλήθηκαν τα κονιάματα με την άμμο δεν εμφάνισαν ευμενέστερες τιμές από εκείνο με την αρχική σύσταση. Δεν επιλέχθηκε επομένως η προσθήκη άμμου στη σύνθεση του βέλτιστου μείγματος της Σειράς B.

Συγκεντρωτικά, οι αναλογίες του RS_optimal παρατίθενται παρακάτω (Πίνακας 4.29):

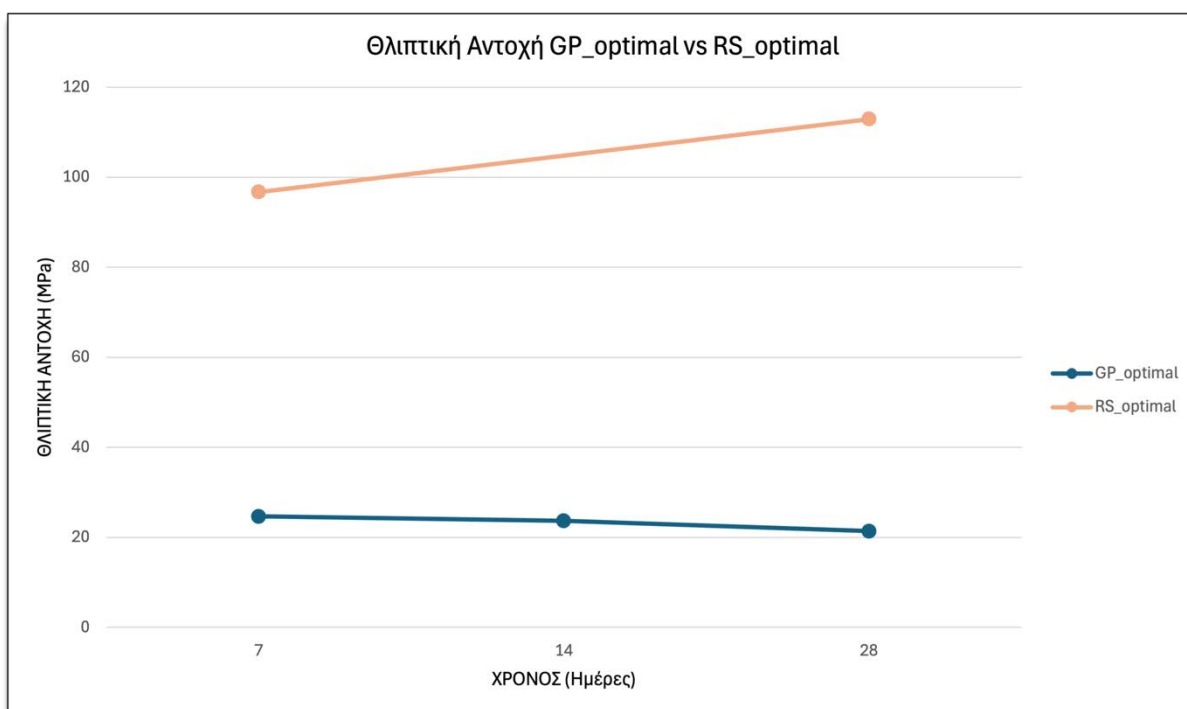
Πίνακας 4.29 Αναλογίες βέλτιστου μείγματος Σειράς B.

Όνομα κονιάματος	Λόγος N/T	Κιτριζό οξύ	Ίνες	Κονία/Αδρανή
RS_optimal	0.185	0.6	0.1	45/55

Στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 4.30)(Σχήμα 4.31), γίνεται σύγκριση της καμπτικής και της θλιπτικής αντοχής των μειγμάτων με τις βέλτιστες αναλογίες από κάθε σειρά δοκιμών. Αναλυτικά, στο (Σχήμα 4.30) συγκρίνεται η καμπτική αντοχή του **GP_OPTIMAL** στις 7, 14 και 28 ημέρες και η αντοχή του **RS_OPTIMAL** στις 7 και 28 ημέρες. Ομοίως, στο (Σχήμα 4.31) συγκρίνονται οι θλιπτικές αντοχές τους.



Σχήμα 4.30 Σύγκριση καμπτικής αντοχής GP_optimal με RS_optimal.



Σχήμα 4.31 Σύγκριση θλιπτικής αντοχής GP_optimal με RS_optimal.

Αυτό που παρατηρείται στο (Σχήμα 4.30) είναι ότι, η καμπτική αντοχή της σειράς B στις 28 ημέρες (**RS_OPTIMAL**) φτάνει σε τιμή έως και 3 φορές μεγαλύτερη από αυτή της σειράς A (**GP_OPTIMAL**). Η θλιπτική αντοχή της σειράς B στις 28 ημέρες φτάνει σε τιμή έως και 5 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της σειράς A (Σχήμα 4.31).

Τα αποτελέσματα αυτά ήταν αναμενόμενα, καθώς το CSA κονίαμα προσφέρει υψηλές πρώιμες αντοχές λόγω της ταχείας ενυδάτωσης και του σχηματισμού ετρινγκίτη, γεγονός που εξηγεί την υψηλή καμπτική αντοχή (9-12 MPa). Το γεωπολυμερές κονίαμα, ενώ έχει ανθεκτικότητα σε χημικά περιβάλλοντα και υψηλές θερμοκρασίες, εμφανίζει χαμηλότερες αντοχές. Το γεγονός αυτό πιθανόν να οφείλεται στη σύσταση του, η οποία μπορεί να προκάλεσε μικρο ρηγματώσεις στην φάση ωρίμανσης και να προέκυψαν σαν αποτέλεσμα μειωμένες αντοχές.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη διερεύνηση και αξιολόγηση βιώσιμων κονιαμάτων ενίσχυσης, με στόχο την εξεύρεση εναλλακτικών λύσεων φιλικών προς το περιβάλλον στον τομέα της ενίσχυσης δομικών υλικών. Από τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Για τα γεωπολυμερή κονιάματα:

- Η θλιπτική και καμπτική αντοχή των κονιαμάτων γεωπολυμερικής σύστασης αυξάνεται τις πρώτες 7 ημέρες, αλλά μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, γεγονός που πιθανόν να οφείλεται στην διαδικασία συντήρησης των δοκιμών.
- Μεγάλα ποσοστά ιπτάμενης τέφρας στο κονίαμα, μειώνουν σημαντικά το χρόνο πήξης και αυξάνουν υπερβολικά τη σκλήρυνση του μείγματος.

Για τα κονιάματα BCSA:

- Με την προσθήκη της βέλτιστης ποσότητας κιτρικού οξέος στο μείγμα κονιαμάτων BCSA επιτυγχάνεται η επιθυμητή επιβράδυνση του χρόνου πήξης. Η προσθήκη κιτρικού οξέος σε ποσοστό 0,6% επιβράδυνε τον χρόνο πήξης του κονιάματος κατά 151 λεπτά σε σχέση με το κονίαμα αναφοράς (0% κιτρικό οξύ).
- Τα κονιάματα με κιτρικό οξύ εξασφάλισαν την ανάπτυξη έως και 90% των συνολικών αντοχών από τις πρώτες 7 ημέρες. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν ευνοϊκό, δεδομένου ότι είχαμε στην διάθεση μας ένα κονίαμα ταχείας πήξης.
- Η προσθήκη ποσότητας κιτρικού οξέος πέραν της βέλτιστης τιμής, μπορεί να μειώσει την αποτελεσματικότητα στην επιβράδυνση του χρόνου πήξης αλλά και

την θλιπτική και καμπτική αντοχή πιθανόν λόγω της σημαντικής καθυστέρησης της ενυδάτωσης του τσιμεντοπολτού.

Συνολικά:

- Η τιμή εξάπλωσης είναι αντιστρόφως ανάλογη με την καμπτική και θλιπτική αντοχή των κονιαμάτων. Τα δοκίμια με υψηλή εργασιμότητα (κάθιση > 200 mm), παρουσίασαν αυξημένο πορώδες, γεγονός που οδήγησε σε μειωμένες αντοχές.
- Τα μεγάλα ποσοστά αδρανών μειώνουν αντίστοιχα την ποσότητα της κονίας στο μείγμα, με συνέπεια την σημαντική αύξηση της ρευστότητάς του και κατ' επέκταση τη μείωση των αντοχών.
- Μεγάλα ποσοστά ινών στο μείγμα υπάρχει πιθανότητα να οδηγήσουν σε συσσωματώσεις με αποτέλεσμα να διαταράσσεται η μικροδομή του κονιάματος και να μειώνεται η καμπτική του αντοχή.
- Η θλιπτική αντοχή δεν επηρεάζεται από την προσθήκη ινών στο μείγμα.
- Γενικά, φαίνεται ότι η χρήση των κονιαμάτων αυτών ως υλικό ενίσχυσης αποτελεί μια καλή εναλλακτική, φιλική προς το περιβάλλον, συμβάλλοντας στην αύξηση της αντοχής και της διάρκειας ζωής των κατασκευών και μειώνοντας πιθανόν το κόστος και την ενεργειακή κατανάλωση που απαιτείται για τη συντήρηση και αποκατάστασή των κτιρίων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αλιάδης, Δ., & Λίντας, Δ. (2019). *Αλκαλική ενεργοποίηση ιπάμενης τέφρας για την παρασκευή κονιαμάτων* (Doctoral dissertation, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης).

Ζυγούρης, Κ. (2007). *Σεισμική ενίσχυση μέσω περισφιγξης υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος σε περιοχές ματίσεων με πλέγματα συνεχών ινών σε ανόργανη μήτρα* (Doctoral dissertation).

Κοντομηνά, Α. (2017). *Αξιοποίηση της ιπάμενης τέφρας σε Ελλάδα και εξωτερικό*. <http://oceanis.lib2.uniwa.gr/xmlui/handle/123456789/3924>

Μακρίδου, Σ. Ν., & Μάντσιου, Β. Ζ. (2022). *Ανάπτυξη μη-τσιμεντοειδών κονιαμάτων φιλικών προς το περιβάλλον για χρήση σε ενισχύσεις υφιστάμενων κατασκευών* (Bachelor's thesis).

Παναγιωτοπούλου, Χ. (2009). *Σύνθεση και ιδιότητες γεωπολυμερών απο βιομηχανικά πετρώματα και παραπροϊόντα* (Doctoral dissertation, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Τμήμα Χημικών Μηχανικών. Τομέας Χημικών Επιστημών. Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας). <https://www.didaktorika.gr/eadd/handle/10442/18132>

Τριανταφύλλου, Α. Χ. (2004). *Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος Με Σύνθετα Υλικά (Ινοπλισμένα Πολυμερή) (2η). Αυτοέκδοση*

Almutairi, A. L., Tayeh, B. A., Adesina, A., Isleem, H. F., & Zeyad, A. M. (2021). Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00733. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509521002485>

Al-Salloum, Y. A., Siddiqui, N. A., Elsanadedy, H. M., Abadel, A. A., & Aqel, M. A. (2011). Textile-reinforced mortar versus FRP as strengthening material for seismically deficient RC beam-column joints. *Journal of Composites for Construction*, 15(6), 920-933. https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/%28ASCE%29CC.1943-5614.0000222?casa_token=Zn1mA-jS2NsAAAAA%3Ay649Q3bjZOiUxi-BJ2zl-La_6n6c5rs_u0jKqLebaQ5uOuY9kgu7Wuw2lUISzxD2gxTDcCqiqOg

Aygörmez, Y. (2021). Evaluation of the red mud and quartz sand on reinforced metazeolite-based geopolymer composites. *Journal of Building Engineering*, 43, 102528. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221003855?casa_token=lxP_qzBlZc4AAAAA:g8ZBf_J5VRqsPIeenNyDmQwdxBLyxQK8DNmy_6nnDUBVYtXKwMiqLeJL-E-9M_iV3bjLzrrJ

Bediako, M., & Amankwah, E. O. (2015). Analysis of chemical composition of Portland cement in Ghana: A key to understand the behavior of cement. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015(1), 349401. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2015/349401>

Bescher, E., & Kim, J. (2019, June). Belitic calcium sulfoaluminate cement: history, chemistry, performance, and use in the United States. In *Proceedings of the 1st International Conference on Innovation in Low-Carbon Cement and Concrete Technology* (pp. 24-26). https://www.researchgate.net/profile/Eric-Bescher/publication/334204807_Belitic_Calcium_Sulfoaluminate_Cement_History_Chemistry_Performance_and_Use_in_the_United_States/links/5d1cce24299bf1547c94fd66/Belitic-Calcium-Sulfoaluminate-Cement-History-Chemistry-Performance-and-Use-in-the-United-States.pdf

Bhutta, A., Farooq, M., & Banthia, N. (2019). Performance characteristics of micro fiber-reinforced geopolymer mortars for repair. *Construction and Building Materials*, 215, 605-612. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819310992?casa_token=mmRl_v

[DiFw0AAAAA:UlsREL-U3kjTitMTTuUmzaS2v5hzO00CVIDve-dV5rpGOl8BirPHbSWSalnAegCIPjRMwISz5A](#)

Burduhos Nergis, D. D., Abdullah, M. M. A. B., Vizureanu, P., & Tahir, M. M. (2018, June). Geopolymers and their uses. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 374, p. 012019). IOP Publishing.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/374/1/012019/meta>

Burris, L. E., & Kurtis, K. E. (2018). Influence of set retarding admixtures on calcium sulfoaluminate cement hydration and property development. *Cement and Concrete Research*, 104, 105-113.
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884617303940?casa_token=WjwpnGoSQNoAAAAA:Dwz5kJZSsYcZEgWUJFszMnOIKZ9B0qDzU4RiaLmtRvIQc3Zq5RGBU-bZrNMV0NeUVgxEW3W3gA

Cholostiakow, S., Ren, Z., Skyrianou, I., Koutas, L., Papakonstantinou, C., Bescher, E., & Hanein, T. (2024). Bond of textile-reinforced belite calcium sulfoaluminate cement mortar to concrete substrate. *Materials and Structures*, 57(4), 1-19.
<https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-024-02347-5>

Colonna, D., Leone, M., Aiello, M. A., Tortelli, S., & Marchi, M. I. (2019). Short and long-term behaviour of RC beams made with CSA binder. *Engineering Structures*, 197, 109370.
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014102961834197X?casa_token=tpmDU50zkQkAAAAA:-g0YOrDs1bz-Apf-4zGiOXBNumUaxwdYoIFG35-ReennqjvYENKDSHOV0qxejmwzPX8j2ZO9Qg

Davidovits, J. (1993). Geopolymer cements to minimize carbon dioxide greenhouse warming. *Ceram. Trans.*, 37(1), 165-182. https://www.researchgate.net/profile/Joseph-Davidovits/publication/284682578_Geopolymer_cement_to_minimize_carbon-dioxide_greenhouse-warming/links/5c016b0592851c63cab29f76/Geopolymer-cement-to-minimize-carbon-dioxide-greenhouse-warming.pdf

da Silva Rocha, T., Dias, D. P., França, F. C. C., de Salles Guerra, R. R., & de Oliveira, L. R. D. C. (2018). Metakaolin-based geopolymer mortars with different alkaline activators (Na⁺ and K⁺). *Construction and Building Materials*, 178, 453-461.
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818312480?casa_token=tvvp-

[QmktgoAAAA:6AN71nKzesOSkBUKeQjfZnPHJ_G1pARJLra6L1w_AULJybTI0qgzCp4j_oWLvIVgs8E2xwu8Z](#)

De Santis, S., Carozzi, F. G., de Felice, G., & Poggi, C. (2017). Test methods for textile reinforced mortar systems. *Composites Part B: Engineering*, 127, 121-132. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836816329249?via=ihub>

Glasser, F. P., & Zhang, L. (2001). High-performance cement matrices based on calcium sulfoaluminate–belite compositions. *Cement and Concrete Research*, 31(12), 1881-1886. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884601006494?casa_token=Y1TXkfSyX2EAAAAA:mpclewLcoeHQgqD0JNlrlDGhunTAEDd6ieNWDx36tclAvRnjG7blaIH4mRx0-ulqACc3Iy6gg

Guan, Y., Gao, Y., Sun, R., Won, M. C., & Ge, Z. (2017). Experimental study and field application of calcium sulfoaluminate cement for rapid repair of concrete pavements. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 11, 338-345. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11709-017-0411-0>

Hassan, A., Arif, M., & Shariq, M. (2019). Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment—A review of mechanical properties and microstructure. *Journal of cleaner production*, 223, 704-728. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619307401?casa_token=mwtxpe6Zkr0AAAAA:I3fU2rGg6FTEO65OiVSXVF6vek2_P0tq0YnBRhMGpnIPRrVqevCQbs8wEzMChGBppGdir791Zg

Hegger, J., & Voss, S. (2008). Investigations on the bearing behaviour and application potential of textile reinforced concrete. *Engineering structures*, 30(7), 2050-2056. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029608000126?casa_token=rQKGpwsysgQAAAAA:ttQkdOdFSckgjAMxfcbM8DjL1nJGHyLPZwJKdEepO-Ceeba_3O1M_RLNtnKHd71FjTyzBCWtu

Juenger, M. C. G., Winnefeld, F., Provis, J. L., & Ideker, J. H. (2011). Advances in alternative cementitious binders. *Cement and concrete research*, 41(12), 1232-1243. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884610002553?casa_token=ydNQxEme_GAAAAA:bMZ0MIjiw0yQGB7mcQ4nOvvhaPL842knk1vWZkdIwCn1Vj6Hi_SRwJh_v-eddm8HqW30UUD14Q

Kienzle, A., & Thomas, R. J. (2022). Engineering properties and setting time of belitic calcium sulfoaluminate (BCSA) cement concrete. *Construction and Building Materials*, 352, 128979.

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822026356?casa_token=AVeGA-xIDKQAAAAA:RvARM0RhyCepF9txKQKRat2DncO9VBBxD849VcErSdU7Sq03C2Kn_C A-QVuhf2h4gwlEiMguwQ

Kleib, J., Aouad, G., Benzerzour, M., Zakhour, M., & Abriak, N. E. (2021). Effect of calcium sulfoaluminate cements composition on their durability. *Construction and Building Materials*, 307, 124952.

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821027021?casa_token=Wi9I3Utg2NMAAAAA:RVaW8c9LwRvNJ7PvxR-MJpmZNSPznRWYM9v9ZBuC5haB81fpMjLSP8ROs_VditcE-r9pNW-gQ

Klein, A. (1964). Calciumaluminosulfate and expansive cements containing same. *US Patent*, (3), 155.

Koutas, L. N., Tetta, Z., Bournas, D. A., & Triantafyllou, T. C. (2019). Strengthening of concrete structures with textile reinforced mortars: State-of-the-art review. *Journal of Composites for Construction*, 23(1), 03118001.

[https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000882](https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000882)

Kurtz, S., & Balaguru, P. (2001). Comparison of inorganic and organic matrices for strengthening of RC beams with carbon sheets. *Journal of Structural Engineering*, 127(1), 35-42. [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:1\(35\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:1(35))

Leone, M., Blasi, G., & Colonna, D. (2023). Long-term flexural response of reinforced calcium sulfoaluminate/cement concrete beams. *Engineering Structures*, 292, 116585. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029623010003>

Lori, Tullia. "Il Padiglione alla Magliana di Pier Luigi Nervi: Restaurare il cemento armato." *Espazium*, 15 June 2020. https://www.espazium.ch/it/archi3-20_nervi

Maddalena, R., Roberts, J. J., & Hamilton, A. (2018). Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements. *Journal of cleaner production*, 186, 933-942.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618304505>

Mao, J., Wang, Q., Qu, L., Zhang, H., Shi, Z., Xu, S., & Li, X. (2022). Study of mortar layer property of superhydrophobic metakaolin based cement mortar. *Journal of Building Engineering*, 45, 103578.
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221014364?casa_token=9pO8-VzZWWIAAAAAA:qAptY9NnB8ITG544xS03wALehrPBd8TSN-YMyuSLboX1yn_FVyXHbziBTo3DPiI483300vduTQ

Nawaz, M., Heitor, A., & Sivakumar, M. (2020). Geopolymers in construction-recent developments. *Construction and Building Materials*, 260, 120472.
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820324776?casa_token=Bwdx5d1ph_wAAAAA:5z-i5gaE8RLlYzzhT5EKSHgSvxBDpQz6whNkrin65v4k_Izx_vkuwLUhUtx68DcFFrTXGPTMA

Nivetha, R., Vennila, A., & Dharshini, B. (2023). A review on various properties of textile reinforced concrete. *Materials Today: Proceedings*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323030663>

Palomo, A., Blanco-Varela, M. T., Martinez-Ramirez, S., Puertas, F., & Fortes, C. (2002, February). Historic mortars: characterization and durability. New tendencies for research. In *Advanced Research Centre for cultural heritage interdisciplinary projects, Fifth Framework Programme Workshop*.
https://www.researchgate.net/profile/M-Blanco-Varela/publication/266606654_Historic_Mortars_Characterization_and_Durability_New_Tendencies_for_Research/links/5486f3d00cf289302e2eaaa1/Historic-Mortars-Characterization-and-Durability-New-Tendencies-for-Research.pdf

Papanicolaou, C. G., Triantafyllou, T. C., Karlos, K., & Papathanasiou, M. (2007). Textile-reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: in-plane cyclic loading. *Materials and structures*, 40, 1081-1097.
<https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-006-9207-8>

Péra, J., & Ambroise, J. (2004). New applications of calcium sulfoaluminate cement. *Cement and concrete research*, 34(4), 671-676. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884603003764?casa_token=pgU4suLYIJkAAAAA:PmRA55jYOB7fLl-fOHk5sFCu-wGL8Kp4_pX0A2k3qBQtV4ouB4w_1rb0hknPEOVrWISA4bf1Axcg

Pooni, J., Robert, D., Giustozzi, F., Setunge, S., Xie, Y. M., & Xia, J. (2020). Novel use of calcium sulfoaluminate (CSA) cement for treating problematic soils. *Construction and Building Materials*, 260, 120433. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820324387?casa_token=sx3bmHe_FVoAAAAA:LyNy0WHlz-NcbCSdc_PZJu30fDev5SCtTpEFZ6K83_sn7Co10EJOxDYWuHTifoANGBZleYksg

Provis, J. L. (2018). Alkali-activated materials. *Cement and concrete research*, 114, 40-48. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884616307700?casa_token=uif6fqpDWcgAAAAA:3aC5rqh6CUqb2CrZCyp4AKiAuhFeBfyZAq_JXudNQaDC32A19r4TztIFkLR4pU7zgM2bf5qP4g

Rajak, D. K., Pagar, D. D., Kumar, R., & Pruncu, C. I. (2019). Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 6354-6374. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785419312086>

Ramseyer, C., & Bescher, E. (2014). *Performance of concrete rehabilitation using rapid setting calcium sulfoaluminate cement at the Seattle-Tacoma airport* (No. 14-1342). <https://trid.trb.org/View/1287767>

Shadravan, S., Ramseyer, C., & Kang, T. H. K. (2015). A long term restrained shrinkage study of concrete slabs on ground. *Engineering structures*, 102, 258-265. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029615005179?casa_token=wKSUIf0wmxcAAAAA:YAdoNK1k376PP3wqpoXgCcYhZe2vwy2WlZJcPV0pGVjx9vaYbx-CejYsoSE6VpfkDUZzHzPgA

Shi, C., Jiménez, A. F., & Palomo, A. (2011). New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and concrete research*, 41(7), 750-763. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884611000925?casa_token=UfdOQH

[WfvpsAAAAA:9F6r9oE_NzoR9p4gVWuqN2pq99eZmM-2cPtaTKvQLE8UWf0fF0dGPnIcrwt0Mig_oyfWQ1DfzQ](#)

Singh, N. B., & Middendorf, B. (2020). Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials*, 237, 117455. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819329071?casa_token=dU2hjSWHUHgAAAAA:RUTL76szJGrtHKNkC3tkNhemYngwM6Df9Hv-26U2U5MCeZIpfdV3fnEQBuVSjIcaKBEXah-7Q

Subramanian, S., Khan, Q., & Ku, T. (2019). Strength development and prediction of calcium sulfoaluminate treated sand with optimized gypsum for replacing OPC in ground improvement. *Construction and building materials*, 202, 308-318. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818331106?casa_token=dmZy-eQAchwAAAAA:SbPO2kSj-jn9bRILsBQS9ugUVG8eds8R6yPtX1BBH7OYhj_sASyUglwU_j2szqJYQ9mMjW1Xg

Tao, Y., Rahul, A. V., Mohan, M. K., De Schutter, G., & Van Tittelboom, K. (2023). Recent progress and technical challenges in using calcium sulfoaluminate (CSA) cement. *Cement and Concrete Composites*, 137, 104908. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946522005017?casa_token=m-5aES0d4W4AAAAA:XhyAaawxjpee-feDWaie9ZI8GD5cdDsJUDBBP47h5Qa2H5BlBLrDjyngICyteqhKhk_H-Tmjtg

Thomas, R. J., Maguire, M., Sorensen, A. D., & Quezada, I. (2018). Calcium Sulfoaluminate Cement: Benefits and applications. *Concrete International*, 40(4). https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Agcd%3A6%3A6846198/detailv2?sid=ebsco%3Aplink%3Ascholar&id=ebsco%3Agcd%3A128874422&crl=c&link_origin=scholar.google.com

Triantafyllou, P. E., & Bournas, D. A. (2007). Textile-Reinforced Mortar (TRM) versus FRP Confinement in Reinforced Concrete Columns. *ACI Structural Journal*. https://www.researchgate.net/publication/259571333_Textile-Reinforced_Mortar_TRM_versus_FRP_Confinement_in_Reinforced_Concrete_Columns

Tsimas, S., & Moutsatsou-Tsima, A. (2005). High-calcium fly ash as the fourth constituent in concrete: problems, solutions and perspectives. *Cement and concrete composites*, 27(2), 231-

237.

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946504000277?casa_token=MrXZp5FGNhoAAAAA:iKuTAGsf3JRpUK7PieSgVvTWzYzAWedve_TNct1Y6P3uLyZlaI7UilOUdZ02UUJ5JiL65KZZ

Van Den Einde, L., Zhao, L., & Seible, F. (2003). Use of FRP composites in civil structural applications. *Construction and building materials*, 17(6-7), 389-403. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061803000400?casa_token=4ruKSf3IP3gAAAAA:PY1VddDPR86NULyiTewIM--KE9LR_y2UKS7Fuq6_z2OPzagqH1aNpEIme_gFpaK1ky8G8lPyg

Vasanelli, E., Micelli, F., Aiello, M. A., & Plizzari, G. (2013). Long term behavior of FRC flexural beams under sustained load. *Engineering Structures*, 56, 1858-1867. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029613003593?casa_token=zwzTI2l9oXkAAAAA:30VOADpYUStR2LRpd_F0WyGAVfA6RKPO1yNgFMq1ucctnorPonyGMrgi16sJVns27e7V5FWKOOQ

Wang, H., Wu, H., Xing, Z., Wang, R., & Dai, S. (2021). The effect of various Si/Al, Na/Al molar ratios and free water on micromorphology and macro-strength of metakaolin-based geopolymer. *Materials*, 14(14), 3845. <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/14/3845>

Wang, X., Lam, C. C., & Iu, V. P. (2019). Comparison of different types of TRM composites for strengthening masonry panels. *Construction and Building Materials*, 219, 184-194. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819313583?casa_token=ML8h1vMJnEQAAAAA:0sFXq9pAtUWAC3VrgnFdLrT3CIkr_hj1N1YSgZJBR5hgSqwYFjrsCkSNx9t90nZH4jEVOnsq

Wiberg, A. (2003). *Strengthening of concrete beams using cementitious carbon fibre composites* (Doctoral dissertation, Bygghvetenskap). <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A9403&dswid=1065>

Winnefeld, F., & Lothenbach, B. (2010). Hydration of calcium sulfoaluminate cements—Experimental findings and thermodynamic modelling. *Cement and Concrete Research*, 40(8), 1239-1247. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884609002294?casa_token=aKvEEu

[FAKToAAAAA:O8MZGsChMAHvLiHFprfn23HU8XQdGAOQMtDJTdzpn wiET9C-dsTNz04hKAlQxsSg2gHd03dlw](https://doi.org/10.1177/0731684413492868?casa_token=5a0fdQXU-macAAAAA%3Ah3277DxSZcgF9zSsQpOpNGTqi0SvfCZAJgHdT-CcfqkNGckXLaL1xn38BiZObfn5HJjNmZ7q2Pz4)

Zaman, A., Gutub, S. A., & Wafa, M. A. (2013). A review on FRP composites applications and durability concerns in the construction sector. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32(24), 1966-1988. https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0731684413492868?casa_token=5a0fdQXU-macAAAAA%3Ah3277DxSZcgF9zSsQpOpNGTqi0SvfCZAJgHdT-CcfqkNGckXLaL1xn38BiZObfn5HJjNmZ7q2Pz4

Zhou, Q., Milestone, N. B., & Hayes, M. (2006). An alternative to Portland cement for waste encapsulation—the calcium sulfoaluminate cement system. *Journal of hazardous materials*, 136(1), 120-129. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389405007089?casa_token=R3mnGwtY1DEAAAAA:-cin6eicwQhKtRpeQdFMn9x4ylE5cKYTgfWGV04cyeFVSzyO64IOiEy_MovBgnN3D1PRbmdTHw

Zou, D., Zhang, Z., & Wang, D. (2020). Influence of citric acid and sodium gluconate on hydration of calcium sulfoaluminate cement at various temperatures. *Construction and Building Materials*, 263, 120247. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820322522?casa_token=iDl5J5FDb60AAAAA:s3migGgdb1QkXoj15dQesiforP0E9Xaw8C2eMxUg_xARLqCq5FCaGBsfA9RLrwL2AUavSFMKEw