



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

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

ΔΕΣΠΟΙΝΑ ΑΒΡΑΜΙΔΟΥ – ΕΥΓΕΝΙΑ ΤΖΙΟΥΚΛΗ

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

ΒΟΛΟΣ 2023

© 2023 Δέσποινα Αβραμίδου – Ευγενία Τζιούκλη

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

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (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. Ευριπίδης Μυστακίδης](#)
[Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας](#)

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Χρήστο Παπακωνσταντίνου, καθώς και τον συνεπιβλέποντα Επίκουρο Καθηγητή κ. Λάμπρο Κούτα για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή τους κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Οφείλω ευχαριστίες στην υποψήφια Διδάκτορα του Τμήματος Σκυριανού Ιωάννα για τις χρήσιμες συμβουλές της. Ευχαριστώ την συνάδελφο μου Ευγενία Τζιούκλη για την άψογη συνεργασία που είχαμε καθ' όλη την διάρκεια των πειραμάτων και της συγγραφής της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Ευχαριστώ τους φίλους και φίλες μου Αναστασία Απαζίδου, Θανάση Αραπάκη, Σοφία Μανώλα, Αχιλλέα Παπαγεωργίου, Κορίνα Παπουτσή και Δημήτρη Τσαγκλή για την ηθική υποστήριξή τους. Κυρίως, το πιο μεγάλο ευχαριστώ το οφείλω στους γονείς μου, Γιάννη και Κατερίνα και στον αδερφό μου, Φάνη, οι οποίοι με υποστήριξαν όλα αυτά τα χρόνια και πίστεψαν σε μένα.

Δέσποινα Αβραμίδου

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς τους καθηγητές μου κ. Χρήστο Παπακωνσταντίνου και κ. Λάμπρο Κούτα, για την ανεκτίμητη συμβολή αλλά και την καθοδήγησή τους κατά την διάρκεια της εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας. Φυσικά θέλω να ευχαριστήσω την υποψήφια Διδάκτορα του τμήματος Ιωάννα Σκυριανού για την εκτίμηση, την αφοσίωση και την υποστήριξή της καθ' όλη την διαδικασία. Ακόμη, αισθάνομαι βαθιά ευγνωμοσύνη για την ευκαιρία που μου δόθηκε να συνεργαστώ με την συναδέλφισσά μου Δέσποινα Αβραμίδου, όπου μαζί φέραμε εις πέρας την επιτυχή ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας. Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου, Πέτρο και Άννα-Μαρία, για την αμέριστη στήριξη, την πίστη και την αγάπη που μου παρείχαν σε όλη την διάρκεια αυτής της πορείας.

Ευγενία Τζιούκλη

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΦΙΛΙΚΩΝ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Δέσποινα Αβραμίδου – Ευγενία Τζιούκλη

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2023

Επιβλέπων Καθηγητής: Χρήστος Παπακωνσταντίνου, Αναπληρωτής Καθηγητής

Συνεπιβλέπων Καθηγητής: Λάμπρος Κούτας, Επίκουρος Καθηγητής

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην μελέτη Ινοπλεγμάτων σε Ανόργανη Μήτρα (IAM) και στη διερεύνηση της συνάφειας μεταξύ IAM και σκυροδέματος. Αναλυτικότερα, εξετάζεται η πιθανότητα αντικατάστασης της τσιμεντοειδούς μήτρας των IAM με μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης. Σε αυτό το πλαίσιο, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 22 δοκιμές έμμεσης διάτμησης (modified beam tests) στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος (ΟΣ). Στις δοκιμές αυτές, χρησιμοποιήθηκαν πρισματικά δοκίμια ΟΣ, τα οποία έφεραν στο κάτω πέλμα τους επικολλημένες στρώσεις IAM άνθρακα, ενώ οι παράμετροι των πειραμάτων ήταν το είδος της μήτρας (τσιμεντοειδής ή γεωπολυμερής), ο αριθμός των στρώσεων πλέγματος άνθρακα και το μήκος επικόλλησης (από 50 mm έως 150 mm). Προέκυψαν ορισμένα βασικά συμπεράσματα όπως το ότι τα IAM γεωπολυμερούς μήτρας είναι πιο αποδοτικά για χρήση σε IAM καθώς οδήγησαν σε υψηλότερες τιμές φορτίων και ορθών τάσεων και ότι οι μορφές αστοχίας των δοκιμίων ήταν τυπικές μορφές, σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία.

Λέξεις Κλειδιά: *Οπλισμένο Σκυρόδεμα (ΟΣ), Μελέτη συνάφειας, Δοκιμές έμμεσης διάτμησης, Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας (IAM), Ανόργανη μήτρα, Γεωπολυμερές,*

DEVELOPMENT OF ENVIRONMENTALLY FRIENDLY MORTARS FOR USE IN THE REINFORCEMENT OF EXISTING STRUCTURES

Despoina Avramidou – Eugenia Tzioukli

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2023

Supervisor: Christos Papakonstantinou, Associate Professor

Co-Supervisor: Lampros Koutas, Assistant Professor

Abstract

This thesis focuses on the investigation of an environmentally friendly mortar to be used in Textile Reinforced Mortars (TRM) systems and the study of the bond between TRM and concrete. More specifically, the possibility of replacing the cementitious matrix of TRMs with a matrix of geopolymer composition is investigated. In this context, a total of 22 modified beam tests were carried out in the Concrete Technology & RC Structures Lab of the Civil Engineering department. In these tests, prismatic RC specimens were used bonded using, carbon TRM layers attached to their bottom face. The examined experimental parameters were the type of matrix (cementitious or geopolymer), the number of carbon layers and the bond length (from 50 mm to 150 mm). The main conclusions of this study are that the specimens bonded with geopolymer matrix exhibited higher loads and normal stresses, while the observed failure modes were typical failure modes, in accordance with previous studies.

Keywords: *Reinforced Concrete (RC), Bond behaviour, Modified-beam test (MB), Textile Reinforced Mortars (TRM), Inorganic matrix, Geopolymer*

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1	Εισαγωγή	1
1.1	Αίτια και μέθοδοι ενίσχυσης κατασκευών	1
1.2	Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	3
Κεφάλαιο 2	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	4
2.1	Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας	4
2.1.1	Γενικά για ΙΑΜ	4
2.1.2	Περιγραφή του σύνθετου υλικού	5
2.1.3	Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα στο πεδίο των ενισχύσεων	8
2.1.4	Συνάφεια ΙΑΜ – Σκυροδέματος	16
2.2	Γεωπολυμερή	22
2.2.1	Γενικά για γεωπολυμερή	22
2.2.2	Ινοπλέγματα σε Γεωπολυμερή Μήτρα στο πεδίο των ενισχύσεων	24
2.2.3	Συνάφεια Γεωπολυμερούς – Σκυροδέματος	29
2.3	Σύνοψη Ανασκόπησης	34
Κεφάλαιο 3	Πειραματικό πρόγραμμα	35
3.1	Παράμετροι διερεύνησης	35
3.2	Πειραματική διάταξη	35
3.3	Γεωμετρία δοκιμών	37
3.4	Ιδιότητες υλικών	37
3.4.1	Σκυρόδεμα	37
3.4.2	Τσιμεντοειδές κονίαμα	37
3.4.3	Γεωπολυμερές κονίαμα	41
3.4.4	Πλέγμα	42
3.5	Προετοιμασία δοκιμών	43
3.5.1	Δοκίμια Ο/Σ	43
3.5.2	Διαδικασία επικόλλησης	43
3.5.3	Συντήρηση δοκιμών	44

Κεφάλαιο 4	Πειραματικά Αποτελέσματα και Σχολιασμός	46
4.1	Αποτελέσματα Σειράς Α (μήτρα τσιμεντοειδούς)	47
4.2	Αποτελέσματα Σειράς Β (μήτρα γεωπολυμερούς)	50
4.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων	52
Κεφάλαιο 5	Σύνοψη και Συμπεράσματα	72
Βιβλιογραφία		75

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: Μηχανικές ιδιότητες τσιμεντοκονιάματος.....	38
Πίνακας 3.2: Μηχανικές ιδιότητες δοκιμίων τσιμεντοειδούς κονιάματος.....	39
Πίνακας 3.3: Μηχανικές ιδιότητες δοκιμίων γεωπολυμερούς κονιάματος.....	41
Πίνακας 3.4: Ιδιότητες πλέγματος σύμφωνα με τον κατασκευαστή.....	42
Πίνακας 4.1: Πειραματικά αποτελέσματα Σειράς Α.....	47
Πίνακας 4.2: Πειραματικά αποτελέσματα Σειράς Β.....	50
Πίνακας 4.3: Σύγκριση μέγιστων φορτίων που καταγράφηκαν στα δοκίμια με IAM γεωπολυμερούς και τσιμεντοειδούς μήτρας αντίστοιχα.....	57
Πίνακας 4.4: Σύγκριση μέγιστων ορθών τάσεων που καταγράφηκαν στα δοκίμια με IAM τσιμεντοειδούς και γεωπολυμερούς μήτρας αντίστοιχα.....	58
Πίνακας 4.5: Σύγκριση μέγιστων βυθίσεων που καταγράφηκαν στα δοκίμια με IAM τσιμεντοειδούς και γεωπολυμερούς μήτρας αντίστοιχα.....	59
Πίνακας 4.6: Σύγκριση μέγιστων φορτίων που καταγράφηκαν στα δοκίμια με μία και τρεις στρώσεις άνθρακα αντίστοιχα.....	64
Πίνακας 4.7: Σύγκριση μέγιστων ορθών τάσεων που καταγράφηκαν στα δοκίμια με IAM τσιμεντοειδούς και γεωπολυμερούς μήτρας αντίστοιχα.....	65
Πίνακας 4.8: Σύγκριση μέγιστων βυθίσεων που καταγράφηκαν στα δοκίμια με IAM τσιμεντοειδούς και γεωπολυμερούς μήτρας αντίστοιχα.....	66

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Εποπτική περιγραφή του υλικού ενίσχυσης IAM (Κούτας, 2015).....	3
Σχήμα 2.1: Διαφορετικοί τύποι ινοπλεγμάτων και οι ιδιότητες τους (α) Πλέγμα άνθρακα, (β) Πλέγμα βασάλτη, (γ) Πλέγμα υάλου (Raooof and Bournas, 2017).....	6
Σχήμα 2.2: Εικόνες ενισχυμένων δοκιμών με 2 στρώσεις IAM από PBO έπειτα από επακόλουθη αστοχία (D' Ambrisi et al.2011).....	9
Σχήμα 2.3: Μορφές Αστοχίας Δοκιμών (Jung et al. 2015).....	10
Σχήμα 2.4: Καμπύλες φορτίου-τάσης πλέγματος (Jung et al. 2015).....	10
Σχήμα 2.5: Επιρροή καμπτικής αντοχής βάσει: (α) του αριθμού των στρώσεων του πλέγματος, (β) του είδους ενίσχυσης (IAM ή ΙΟΠ) (Raooof et al. 2017).....	11
Σχήμα 2.6: Μορφές αστοχίας (α) δοκιμίου αναφοράς, (β) δοκιμίου με IAM, (γ) δοκιμίου με ΙΟΠ (Tzoura and Triantafyllou, 2014).....	12
Σχήμα 2.7: Καμπύλες φορτίου-παραμόρφωσης για δοκίμιο αναφοράς, δοκίμια ενισχυμένα με τσιμεντοειδή και ρητινοειδή μήτρα (Triantafyllou και Papanicolaou 2006).....	13
Σχήμα 2.8: Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης για δοκίμια κυλινδρικής διατομής: (α) δοκίμιο αναφοράς και δοκίμια ρητινοειδούς μήτρας με 2-3 στρώσεις πλέγματος και (β) δοκίμιο αναφοράς και δοκίμια τσιμεντοειδούς μήτρας με 2-3 στρώσεις πλέγματος (Triantafyllou et al. 2006).....	15
Σχήμα 2.9: (α) Πειραματική διάταξη, (β) Αστοχία δοκιμίου αναφοράς, και (γ) Αστοχία δοκιμίου ενισχυμένου από μανδύες IAM (Al- Salloum 2011).....	16
Σχήμα 2.10: Μορφές αστοχίας (α) Μορφή I, (β) Μορφή II, (γ) Μορφή III, (δ) Μορφή IV, (ε) Μορφή V, (στ) Μορφή VI (Carozzi et al. 2017).....	17
Σχήμα 2.11: Πειραματικές διατάξεις: (α) απλή και (β) διπλή άμεση διάτμηση, (γ) άμεσος εφελκυσμός, έμμεση διάτμηση μέσω κάμψης (ε) τριών και (δ) τεσσάρων σημείων (Calabrese et al. 2020).....	18
Σχήμα 2.12: α) Καμπύλες δύναμης-ολίσθησης, β) Καμπύλες τάσης-ολίσθησης (Sneed et al. 2015).....	20
Σχήμα 2.13: α) Πειραματική διάταξη, β) Οπλισμός των πρισμάτων (Raooof et al. 2016).....	21
Σχήμα 2.14: Μορφές αστοχίας των δοκιμών: (α) μοναδική ρωγμή και ολίσθηση ινών εντός μήτρας, (β) αποκόλληση στην διεπιφάνεια κονιάματος/σκυροδέματος.....	22

Σχήμα 2.15: Ενδεικτικές εικόνες στερεών πρόδρομων ουσιών (α) μετακαολίνη, (β) αδρανές < 0.5 mm, (γ) αδρανές 0.5-1 mm (Parakonstantinou and Koutas, 2021).....	23
Σχήμα 2.16: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για κάθε δοκίμιο (Piątek και Siwowski 2022).....	25
Σχήμα 2.17: Καμπύλες παραμόρφωσης-χρόνου (Zhang et al. 2018).....	26
Σχήμα 2.18: Διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης για δοκίμιο αναφοράς και ενισχυμένα δοκίμια με τσιμεντοειδή και γεωπολυμερή μήτρα (Khair Allah et al. 2022).....	27
Σχήμα 2.19: Καμπύλες φορτίου - αξονικής μετατόπισης σε ενισχυμένα ή μη δοκίμια με 1 έως 3 στρώσεις πλέγματος άνθρακα (Zhang et al. 2016).....	28
Σχήμα 2.20: Αστοχία περισφιγμένων δοκιμίων υποβαλλόμενων σε: (α) 100°C, (β) 200°C και (γ) 300°C (Zhang et al. 2016).....	29
Σχήμα 2.21: Μορφές αστοχίας των δοκιμίων: (α) αποκόλληση στη διεπιφάνεια ΙΑΜ-υποστρώματος, (β) αποκόλληση στη διεπιφάνεια μήτρας-πλέγματος, (γ) θραύση ινών εκτός της μήτρας (Thermou et al. 2021).....	30
Σχήμα 2.22: Τυπικές μορφές αστοχίας: (α) Μορφή Ι, (β) Μορφή ΙΙ και (γ) Μορφή ΙΙΙ (Obaida et al.2021).....	31
Σχήμα 2.23: Διαγράμματα αντοχής συνάφειας – ολίσθησης για δοκίμια με τσιμεντοειδή και γεωπολυμερή μήτρα (Obaida et al. 2021).....	32
Σχήμα 2.24: (α) Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης, (β) Πειραματική διάταξη διπλής διάτμησης (Liu et al. 2022).....	33
Σχήμα 2.25: Εικόνες αστοχίας δοκιμίων (α) με γεωπολυμερές κονίαμα, (β) με ρητινούχο κονίαμα (Liu et al. 2022).....	33
Σχήμα 3.1: Πειραματική διάταξη.....	36
Σχήμα 3.2: Σχηματική απεικόνιση του πρισματικού δοκιμίου ΟΣ.....	37
Σχήμα 3.3: Μέτρηση εργασιμότητας με τη μέθοδο του δίσκου εξάπλωσης.....	39

Σχήμα 3.4: Δειγματοληψία κονιάματος σε μεταλλικές μήτρες.....	40
Σχήμα 3.5: α) Μηχανή κάμψης τριών σημείων, β) Μηχανή σύνθλιψης.....	40
Σχήμα 3.6: Πλέγμα άνθρακα.....	42
Σχήμα 3.7: Διαδικασία επικόλλησης IAM.....	44
Σχήμα 3.8: Συντήρηση δοκιμών στο χώρο του εργαστηρίου.....	45
Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ελευθέρου σώματος.....	46
Σχήμα 4.2: Εικόνες αστοχίας δοκιμών Σειράς Α: (α) Τύπου Ι, (β) Τύπου ΙΙ και (γ) Τύπου ΙΙΙ.....	49
Σχήμα 4.3: Διάγραμμα $\sigma_{\max}-l_b$ δοκιμών Σειράς Α.....	49
Σχήμα 4.4: Εικόνες αστοχίας δοκιμών Σειράς Β: (α) Τύπου Ι, (β) Τύπου ΙΙ και (γ) Τύπου ΙΙΙ.....	51
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα $\sigma_{\max}-l_b$ δοκιμών Σειράς Β.....	52
Σχήμα 4.6: Καμπύλες ορθής τάσης- βύθισης των δοκιμών τσιμεντοειδούς μήτρας με μία στρώση πλέγματος άνθρακα για όλα τα μήκη επικόλλησης.....	53
Σχήμα 4.7: Καμπύλες ορθής τάσης- βύθισης των δοκιμών τσιμεντοειδούς μήτρας με τρεις στρώσεις πλέγματος άνθρακα για όλα τα μήκη επικόλλησης.....	54
Σχήμα 4.8: Καμπύλες ορθής τάσης- βύθισης των δοκιμών γεωπολυμερούς μήτρας με μία στρώση πλέγματος άνθρακα για όλα τα μήκη επικόλλησης.....	55
Σχήμα 4.9: Καμπύλες ορθής τάσης- βύθισης των δοκιμών γεωπολυμερούς μήτρας με τρεις στρώσεις πλέγματος άνθρακα για όλα τα μήκη επικόλλησης.....	56
Σχήμα 4.10: Καμπύλες ορθής τάσης-βύθισης των δοκιμών με IAM τσιμεντοειδούς και γεωπολυμερούς μήτρας με 1 στρώση πλέγματος άνθρακα και μήκος επικόλλησης (α) 50 mm, (β) 75 mm, (γ) 100 mm και (δ) 150 mm.....	60
Σχήμα 4.11: Καμπύλες ορθής τάσης-βύθισης των δοκιμών με IAM τσιμεντοειδούς και γεωπολυμερούς μήτρας με 3 στρώσεις πλέγματος άνθρακα και μήκος επικόλλησης (α) 50 mm, (β) 75 mm, (γ) 100 mm και (δ) 150 mm.....	61

Σχήμα 4.12: Καμπύλες φορτίου-βύθισης των δοκιμίων με IAM τσιμεντοειδούς και γεωπολυμερούς μήτρας με 1 στρώση πλέγματος άνθρακα και μήκος επικόλλησης (α) 50 mm, (β) 75 mm, (γ) 100 mm και (δ) 150 mm	62
Σχήμα 4.13: Καμπύλες φορτίου-βύθισης των δοκιμίων με IAM τσιμεντοειδούς και γεωπολυμερούς μήτρας με 3 στρώσεις πλέγματος άνθρακα και μήκος επικόλλησης (α) 50 mm, (β) 75 mm, (γ) 100 mm και (δ) 150 mm	63
Σχήμα 4.14: Καμπύλες ορθής τάσης-βύθισης των δοκιμίων με IAM τσιμεντοειδούς μήτρας, με 1 και 3 στρώσεις πλέγματος άνθρακα και μήκος επικόλλησης (α) 50 mm, (β) 75 mm, (γ) 100 mm και (δ) 150 mm.....	67
Σχήμα 4.15: Καμπύλες ορθής τάσης-βύθισης των δοκιμίων με IAM γεωπολυμερούς μήτρας, με 1 και 3 στρώσεις πλέγματος άνθρακα και μήκος επικόλλησης (α) 50 mm, (β) 75 mm, (γ) 100 mm και (δ) 150 mm.....	68
Σχήμα 4.16: Καμπύλες φορτίου-βύθισης των δοκιμίων με IAM τσιμεντοειδούς μήτρας, με 1 και 3 στρώσεις πλέγματος άνθρακα και μήκος επικόλλησης (α) 50 mm, (β) 75 mm, (γ) 100 mm και (δ) 150 mm.....	69
Σχήμα 4.17: Καμπύλες φορτίου-βύθισης των δοκιμίων με IAM γεωπολυμερούς μήτρας, με 1 και 3 στρώσεις πλέγματος άνθρακα και μήκος επικόλλησης (α) 50 mm, (β) 75 mm, (γ) 100 mm και (δ) 150 mm.....	70

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1 Αίτια και μέθοδοι ενίσχυσης κατασκευών

Η Ελλάδα εντοπίζεται γεωγραφικά σε ζώνη έντονης σεισμικής δράσης, κατέχοντας την πρώτη θέση στην Ευρώπη αλλά και την Μεσόγειο, σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά στατιστικά δεδομένα. Ανατρέχοντας λοιπόν σε ιστορικά γεγονότα, γίνεται αντιληπτή η έλλειψη κανονισμών και προδιαγραφών των κατασκευών υφιστάμενων κτιρίων έναντι σεισμικών δράσεων με αποτέλεσμα καταστροφικοί σεισμοί να καταπλήσσουν την χώρα. Αφορμή αυτών, αποτέλεσε η αναθεώρηση όλων των ισχυόντων διατάξεων ενώ, παράλληλα, σηματοδοτήθηκε η έναρξη των προσπάθειών εκσυγχρονισμού του Αντισεισμικού Κανονισμού. Έπειτα από τις αναγκαίες τροποποιήσεις/συμπληρώσεις/διευκρινήσεις τέθηκε πλέον σε υποχρεωτική εφαρμογή η βελτιωμένη μορφή του ΕΑΚ2000 (Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός) όπου ισχύει έως σήμερα.

Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι η πλειονότητα των παλαιότερων κατασκευών απαιτεί ελάχιστη έως και εκτενέστερη επέμβαση, εφόσον η προμελέτη αντιβαίνει τους σύγχρονους κανονισμούς. Συγχρόνως, παρατηρείται μείωση της αντοχής/ ανθεκτικότητας λόγω της γήρανσης των υφιστάμενων κτιρίων από τη φυσική φθορά που προκαλείται είτε από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, είτε από ακραία φαινόμενα (π.χ. σεισμός). Επιπλέον, αλλαγές στην χρήση ή στον όγκο κυκλοφορίας είναι πιθανό να οδηγήσουν σε αυξανόμενες απαιτήσεις φορτίου με αποτέλεσμα τα συμβατικά πρότυπα ασφάλειας να μην ικανοποιούνται. Απόρροια αυτών αποτελεί η ανάγκη της αποτίμησης και ενίσχυσής τους. Με τον τρόπο αυτό, εξασφαλίζεται η ασφάλεια, υγεία και ευεξία των ενοίκων, ενώ επιτυγχάνεται η μείωση των επιπτώσεων στο φυσικό περιβάλλον και στην κλιματική αλλαγή, σε αντίθεση με την κατεδάφιση και την εκ νέου ανοικοδόμησή τους.

Αναλυτικότερα, το πρόβλημα ανοικοδόμησης έγκειται κυρίως στην παραγωγή τσιμέντου που αποτελεί μια ενεργοβόρα διαδικασία με επακόλουθο περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Στην πραγματικότητα, κάθε χρόνο παράγονται 4 δισεκατομμύρια τόνοι τσιμέντου και 7% εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα παγκοσμίως. Κατά την διαδικασία, απαιτείται υψηλή κατανάλωση πόρων και ενέργειας, κυρίως λόγω της καύσης ορυκτών καυσίμων όπως ο άνθρακας και το πετρέλαιο, άρα, εκπέμπονται ρύποι όπως διοξείδιο του θείου, οξείδια του αζώτου και σωματίδια, τα οποία βλάπτουν την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Τελικά προκύπτει η ανάγκη για τη μείωση των τοξικών αποβλήτων· εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, άλλων ρυπογόνων αερίων και σκόνης, που παράγονται κατά την διαδικασία και τελικά διοχετεύονται στην ατμόσφαιρα.

Έτσι, στην προσπάθεια εύρεσης νέων μεθόδων ενίσχυσης τίθεται ως παράμετρος, πλέον, η βελτιστοποίηση τόσο των υλικών που χρησιμοποιούνται, όσο και η εφαρμογή αυτών ώστε να προκύπτει χαμηλό οικολογικό αποτύπωμα. Ειδικότερα, η νέα τεχνική που χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια και κάνει χρήση προηγμένων υλικών: υφάσματα οργανικών ή ανόργανων ινών (π.χ. ίνες γυαλιού, αραμιδίου ή άνθρακα) και μήτρα εποξειδικής ρητίνης· τα γνωστά Ινοπλισμένα Πολυμερή ή αλλιώς ΙΟΠ (ή αγγλικός όρος FRP: Fiber Reinforced Polymers), αποτέλεσε τη βάση με την ειδοποιό διαφορά την αλλαγή των υλικών (κυρίως της εποξειδικής ρητίνης), στοχεύοντας σε μία λύση φιλικότερη προς το περιβάλλον. Αναλυτικότερα, η εποξειδική ρητίνη αντικαταστάθηκε από κονίαμα ανόργανης σύστασης (τσιμεντοκονίαμα), ενώ το ύφασμα από πλέγματα ινών (ινοπλέγματα), για την εξασφάλιση συνάφειας μεταξύ τους, και έτσι προέκυψαν τα Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (ή αγγλικός όρος TRM: Textile Reinforced Mortar).

Τα ΙΑΜ αποτελούν αντικείμενο μελέτης της επιστημονικής κοινότητας καθώς παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους ενίσχυσης. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση των ΙΑΜ προσδίδει αξιοσημείωτα οφέλη όσον αφορά την αντοχή, την ανθεκτικότητα, την ευελιξία, την σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας, καθιστώντας την πολύτιμη λύση για διάφορα κατασκευαστικά έργα. Εντούτοις, τα τελευταία χρόνια, διεξάγονται έρευνες για την αντικατάσταση του τσιμεντοκονιάματος με ανόργανα υλικά: τα λεγόμενα «γεωπολυμερή» για τη μείωση του οικολογικού αποτυπώματος.

1.2 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας διεξάχθηκαν πειράματα με στόχο την διερεύνηση συνάφειας μεταξύ IAM και σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα, ως μήτρα των IAM χρησιμοποιήθηκε τσιμεντοκονίαμα καθώς επίσης και γεωπολυμερή με σκοπό την ανάλυση των ιδιοτήτων τους και την σύγκριση μεταξύ τους. Επιπλέον, εξετάστηκε το μήκος επικόλλησης των σύνθετων υλικών, η συνάφεια αυτών με το σκυρόδεμα και ο αριθμός των στρώσεων των κονιαμάτων. Στο παρακάτω Σχήμα 1.1 απεικονίζεται το σύνθετο υλικό.



Σχήμα 1.1: Εποπτική περιγραφή του υλικού ενίσχυσης IAM (Κούτας, 2015).

Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας

2.1.1 Γενικά για IAM

Τα Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (αγγλικός όρος TRM: Textile Reinforced Mortar), καθώς επίσης γνωστά στη διεθνή βιβλιογραφία ως TRC: Textile Reinforced Concrete ή FRCM: Fiber-Reinforced Cementitious Matrix, αποτελούν ένα προηγμένο σύνθετο υλικό που αναπτύχθηκε τα τελευταία χρόνια τόσο για την επισκευή/αποκατάσταση των υφιστάμενων κτιρίων όσο και σε νέες κατασκευές (συμπεριλαμβανομένης και της προκατασκευής).

Η εντατική μελέτη και η συστηματική ανάπτυξη του σύνθετου υλικού στο τομέα των ενισχύσεων προκύπτει από μια πληθώρα πλεονεκτημάτων των IAM σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους αλλά και με την χρήση ινοπλισμένων πολυμερών (ΙΟΠ). Αρχικά, σε αντίθεση με τις καθιερωμένες τεχνικές, τα IAM έχουν αυξημένη εφελκυστική αντοχή σε σχέση με το βάρος λόγω του πλέγματος στο κονίαμα, επιτρέποντας του να αντέχει υψηλότερα φορτία και καταπονήσεις. Επιπλέον, η ταχύτητα και η ευκολία εφαρμογής διευκολύνει τον χειρισμό και την τοποθέτηση, μειώνοντας το κόστος εργασίας και μεταφοράς σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους ενίσχυσης όπως χαλύβδινες ράβδους ή πλέγμα. Παράλληλα, τα IAM μπορούν να εφαρμοστούν σε διάφορους τύπους επιφανειών, συμπεριλαμβανομένων καμπυλών ή ακανόνιστων σχημάτων. Αυτό τα καθιστά μια ευέλικτη λύση για την ενίσχυση διαφορετικών τύπων κατασκευών, όπως τοίχοι, κολώνες και δοκοί. Συμπληρωματικά, αξίζει να σημειωθεί αφενός η μείωση της ποσότητας τσιμέντου, συμβάλλοντας στον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και αφετέρου η διατήρηση της γεωμετρίας της κατασκευής με σκοπό την διαφύλαξη της αρχικής αισθητικής του κτιρίου. Τέλος, τα IAM προσδίδουν ανθεκτικότητα σε διάρκεια και αντίσταση σε

διάβρωση, εξαλείφοντας την ανάγκη για μέτρα προστασίας απ' αυτήν, ενώ μειώνουν τον κίνδυνο δομικών ζημιών με την πάροδο του χρόνου εν αντιθέσει με την ενίσχυση χάλυβα.

Ωστόσο, η χρήση των IAM απαλείφει συγχρόνως κάποια προβλήματα που σχετίζονται με τη χρήση των ΙΟΠ. Τα προβλήματα αυτά οφείλονται κυρίως στη χρήση ρητινών και συνοψίζονται στα εξής:

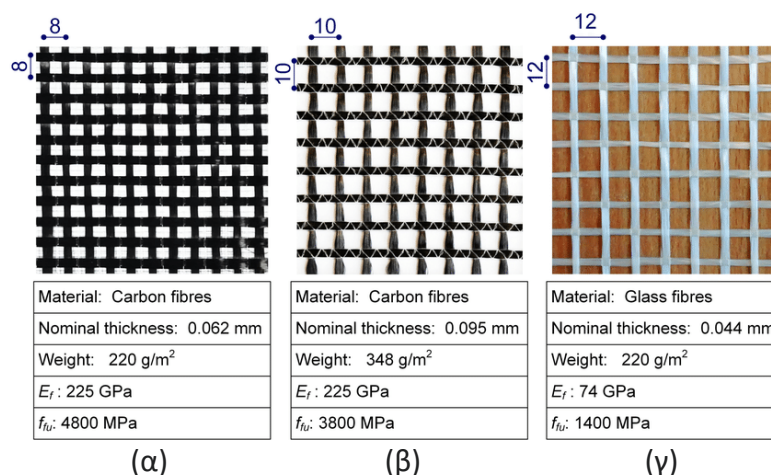
- Απώλεια αντοχής των ρητινών σε υψηλές θερμοκρασίες που ξεπερνούν τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (70°C – 80°C).
- Υψηλό κόστος ρητινών.
- Πιθανός κίνδυνος τραυματισμού του εργατικού δυναμικού, είτε μέσω άμεσης επαφής της ρητίνης με το ανθρώπινο δέρμα, είτε μέσω εισπνοής τοξικών ουσιών που εκπέμπονται.
- Δυσκολία εφαρμογής του ΙΟΠ σε υγρές επιφάνειες.
- Αδυναμία αναστροφής της ενίσχυσης.
- Πολυπλοκότητα εντοπισμού βλαβών σε στοιχεία ενισχυμένα με μανδύες ΙΟΠ.
- Ασυμβατότητα των ρητινών με τα υλικά του υποστρώματος (τοιχοποιίες, στοιχεία ΟΣ, ιστορικές/μνημειακές κατασκευές)
- Περιορισμός διέλευσης των ατμών υγρασίας μέσω των δομικών στοιχείων που καλύπτονται από μανδύες ΙΟΠ.

2.1.2 Περιγραφή του σύνθετου υλικού

Όπως προαναφέρθηκε, τα IAM είναι ένα σύνθετο υλικό που απαρτίζεται από δύο επιμέρους υλικά. Ως συνδετικό υλικό, ή αλλιώς μητρική ουσία, χρησιμοποιείται κονίαμα ανόργανης σύστασης, ενώ τον οπλισμό του σύνθετου υλικού αποτελούν τα πλέγματα ινών.

➤ Ινοπλέγματα

Τα ινοπλέγματα, ή αλλιώς πλέγματα ινών (Σχήμα 2.1), είναι ευθύγραμμοι κλώνοι ινών, οι οποίοι διατάσσονται σε δύο ή περισσότερες διευθύνσεις και σε συγκεκριμένες αποστάσεις μεταξύ τους με σκοπό την δημιουργία κενών ενδιάμεσα. Τα κενά αυτά ονομάζονται «βρογχίδες» και επιτρέπουν την διείσδυση του μητρικού υλικού (του κονιάματος) εξασφαλίζοντας την μηχανική εμπλοκή μεταξύ πλέγματος-οργανικής μήτρας.



Σχήμα 2.1: Διαφορετικοί τύποι ινοπλεγμάτων και οι ιδιότητες τους (α) Πλέγμα άνθρακα, (β) Πλέγμα βασάλτη, (γ) Πλέγμα υάλου (Raooof and Bournas, 2017)

Αναλυτικότερα, οι ίνες είναι υψηλής εφελκυστικής αντοχής (>1500 MPa) καθώς παραλαμβάνουν δυνάμεις, αξιοποιώντας τις μηχανικές τους ιδιότητες έτσι ώστε να λειτουργούν ως οπλισμός του σύνθετου υλικού. Τα πλέγματα που χρησιμοποιούνται για ενισχύσεις κατασκευών αποτελούνται είτε από ίνες άνθρακα, υάλου, αραμιδίου ή βασάλτη. Παρατηρείται ότι οι ίνες άνθρακα εμφανίζουν καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά: εφελκυστική αντοχή (>3000 MPa) και μέτρο ελαστικότητας (περίπου 230 GPa), σε σύγκριση με τις ίνες υάλου ή βασάλτη (περίπου 70 και 80 GPa αντίστοιχα). Όμως, λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής του άνθρακα, συχνά, προτιμάται η χρήση ινών υάλου ή βασάλτη.

Σημειώνεται ότι για την κατασκευή του ινοπλέγματος καθίσταται απαραίτητη η γεωμετρική σταθερότητα, δηλαδή η διατήρηση της ευθυγραμμίας των κλώνων σε κάθε διεύθυνση. Αυτό εξασφαλίζεται μερικώς είτε μέσω της ύφανσης των οριζόντιων και των κατακόρυφων κλώνων ινών (woven textiles) είτε μέσω απλής συγκράτησης των οριζόντιων με τους κατακόρυφους κλώνους με πρόσθετα νήματα που υφαίνονται με ειδικό τρόπο (non woven ή stitched textiles). Ωστόσο, σε κάθε περίπτωση η επικάλυψη των ινών του πλέγματος με κάποιο πρόσθετο πολυμερές (συνήθως ρητίνη) βελτιώνει ακόμη περισσότερο τη δομική ακεραιότητα του πλέγματος και συγχρόνως, αυξάνει την μηχανική αλληλοσύνδεση μεταξύ πλέγματος-μήτρας. Εντούτοις, έπειτα από την επικάλυψη με πολυμερές, παρατηρείται

αδυναμία προσαρμογής του υλικού σε πολύπλοκες γεωμετρίες, εξαιτίας της μείωσης της ευκαμψίας του.

➤ **Ανόργανη Μήτρα**

Ο ρόλος του κονιάματος εξυπηρετεί δύο σκοπούς, καθώς λειτουργεί ως μέσο για την μεταφορά των εφελκυστικών δυνάμεων στις ίνες υψηλής αντοχής του πλέγματος, αλλά και ως συγκολλητικό υλικό που εξασφαλίζει την συνάφεια του σύνθετου υλικού με το υπόστρωμα (π.χ. σκυρόδεμα). Στα IAM παρατηρείται η χρήση κονιαμάτων κυρίως ανόργανης σύστασης, ενώ η σύνθεση του κονιάματος αποτελεί σημαντικό παράγοντα επιρροής της συμπεριφοράς του σύνθετου υλικού σχετικά με την αποδοτικότητα ανάληψης φορτίων και την ανθεκτικότητα σε διάρκεια. Έτσι, για την επίτευξη κατά το δυνατόν μέγιστης συνάφειας μεταξύ ινών και μήτρας, η σύσταση του κονιάματος πρέπει να είναι λεπτόκοκκη (μέγιστος κόκκος αδρανών < 2mm) και υδαρής. Επιπλέον, παρακάτω συνοψίζονται μερικές αναγκαίες προϋποθέσεις του κονιάματος ώστε να εξασφαλίζεται η κατάλληλη σύνθεση και είναι οι εξής:

- ανθεκτικότητα έναντι των δυσμενών περιβαλλοντικών συνθηκών
- υψηλή εργασιμότητα
- υψηλό ιξώδες (για εύκολη εφαρμογή σε κατακόρυφες επιφάνειες)
- επαρκής διατμητική αντοχή, για την αποτροπή αποκόλλησης στη διεπιφάνεια IAM-σκυροδέματος

Για τη βελτιστοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων του κονιάματος και ειδικότερα της διατμητικής τάσης συνάφειας που αναπτύσσεται μεταξύ IAM και υποστρώματος, συνηθίζεται η προσθήκη κλάσματος πολυμερών. Κατά συνέπεια, αυξάνεται η εφελκυστική αντοχή του κονιάματος και η συνάφεια των κλώνων ινών (όταν δεν είναι επικαλυμμένοι) με τη μητρική ουσία λόγω της διείσδυσης των πολυμερών ανάμεσα στις ίνες από τις οποίες αποτελούνται οι κλώνοι.

2.1.3 Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα στο πεδίο των ενισχύσεων

Στην παρούσα ενότητα υποδεικνύεται μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με την καινοτόμο τεχνική ενίσχυσης υφιστάμενων κατασκευών που κάνει χρήση ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα. Κατά την τελευταία δεκαετία, τόσο η επιστημονική κοινότητα όσο και η βιομηχανία δείχνουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την νεωτεριστική αυτή εναλλακτική, διότι, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, προσφέρει πληθώρα πλεονεκτημάτων συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους ενίσχυσης. Πιο συγκεκριμένα, έχει μελετηθεί πειραματικά η απόκριση των μανδύων IAM με ανόργανη μήτρα τσιμεντοειδούς έναντι κάμψης και διάτμησης δοκών καθώς και η εφαρμογή τους ως περίσφιγξη υποστυλωμάτων αλλά και η περίπτωση ενίσχυσης κόμβων δοκού-υποστυλώματος.

Μια αξιολογή προσπάθεια πραγματοποιήσαν οι D’Ambrisi et al. (2011), οι οποίοι μελέτησαν την καμπτική απόκριση στοιχείων ΟΣ. Αρχικά 12 στοιχεία ορθογωνικής διατομής υποβλήθηκαν σε δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων με παραμέτρους: (α) τον αριθμό των στρώσεων του σύνθετου υλικού, (β) τις ιδιότητες της μήτρας και (γ) τις ιδιότητες του πλέγματος (ίνες άνθρακα ή ίνες PBO & διάταξη ινών). Με την ολοκλήρωση των πειραμάτων διεξάχθηκε το συμπέρασμα πως οι ιδιότητες της μήτρας επηρεάζουν αξιοσημείωτα της απόδοση της ενίσχυσης, διότι στις περισσότερες περιπτώσεις η αστοχία επήλθε από αποκόλληση στη διεπιφάνεια ινών-μήτρας και όχι σε αυτήν του σκυροδέματος-σύνθετου υλικού, (Σχήμα 2.2). Επιπροσθέτως, παρατηρήθηκε η συμβολή της ενίσχυσης με μανδύες IAM στην καμπτική αντοχή των στοιχείων, η οποία αυξάνεται μη αναλογικά σε σύγκριση με τον αριθμό των στρώσεων του πλέγματος. Παράλληλα, οι Elsanadedy et al. (2019) σημειώνουν έπειτα από διαφορετικές έρευνες για την καμπτική απόκριση στοιχείων ΟΣ ότι η αποδοτικότητα των IAM ως μέσο καμπτικής αλλά και διατμητικής ενίσχυσης εξαρτάται από τον αριθμό των στρώσεων, τη διάταξή αυτών, την επικάλυψη ή μη των ινών καθώς επίσης και των ιδιοτήτων της μήτρας.



(α)



(β)

Σχήμα 2.2: Εικόνες ενισχυμένων δοκιμίων με 2 στρώσεις IAM από PBO έπειτα από επακόλουθη αστοχία (D' Ambrisi et al.2011).

Οι Jung et al. (2015) διερεύνησαν πειραματικά τη συμπεριφορά ενισχυμένων δοκών με IAM τσιμεντοειδούς σύστασης έναντι κάμψης. Συνολικά 7 δοκοί ΟΣ μήκους 3.0 m και διατομής 170 mm x 300 mm δοκιμάστηκαν μέσω επιβολής φόρτισης τεσσάρων σημείων, με παραμέτρους τόσο τον αριθμό των στρώσεων όσο και την ποσότητα ινών άνθρακα του πλέγματος (δοκίμια Τύπου Α έναντι Τύπου Β, με μοναδική διαφορά τα τελευταία να περιέχουν περισσότερες ίνες άνθρακα). Συμπληρωματικά, η τσιμεντοειδής μήτρα προέκυψε από ανάμειξη τσιμέντου, λεπτών αδρανών, ινών πολυπροπυλενίου και πρόσμεικτων, ενώ το ινοπλέγμα από συνδυασμό ινών άνθρακα και υάλου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3, η μορφή αστοχίας των ενισχυμένων δοκιμίων που παρατηρήθηκε ήταν η αποκόλληση στην διεπιφάνεια ινών-μήτρας. Έπειτα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων, η αποδοτικότητα των ενισχυμένων δοκών κυμάνθηκε από 131.7% σε 219.8%, συγκριτικά με το δοκίμιο αναφοράς, όσο αυξάνεται η ποσότητα των ινών. Επιπλέον, η σχέση φορτίου-τάσης του ινοπλέγματος ήταν γραμμική πριν την εμφάνιση των αρχικών ρωγμών. Ωστόσο, με την άνοδο του φορτίου, η σχέση αυτή δεν μπορεί να θεωρηθεί γραμμική λόγω της ολίσθησης των ινών εντός της τσιμεντοειδούς μήτρας. Στην περίπτωση των δοκιμίων Τύπου Β, όμως, οι τάσεις ήταν μεγαλύτερες εν αντιθέσει με τα δοκίμια Τύπου Α. Στο παρακάτω Σχήμα 2.4 παρατίθενται οι καμπύλες φορτίου-τάσης ινοπλέγματος για τις ενισχυμένες δοκούς με διαφορετικό αριθμό στρώσεων.



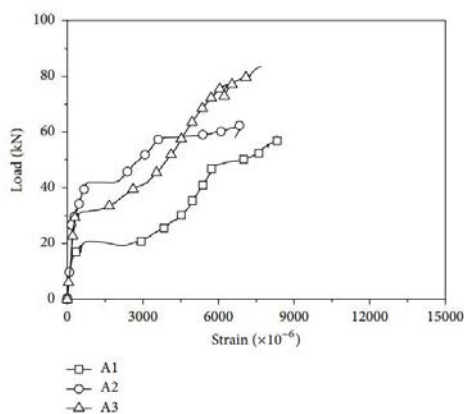
(α) Δοκίμιο Αναφοράς



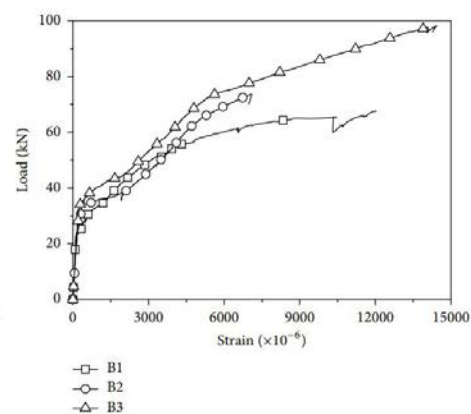
(β) Δοκίμιο Τύπου Α



(γ) Δοκίμιο Τύπου Β

Σχήμα 2.3: Μορφές Αστοχίας Δοκιμών (Jung et al. 2015)

(α) Δοκίμια Τύπου Α

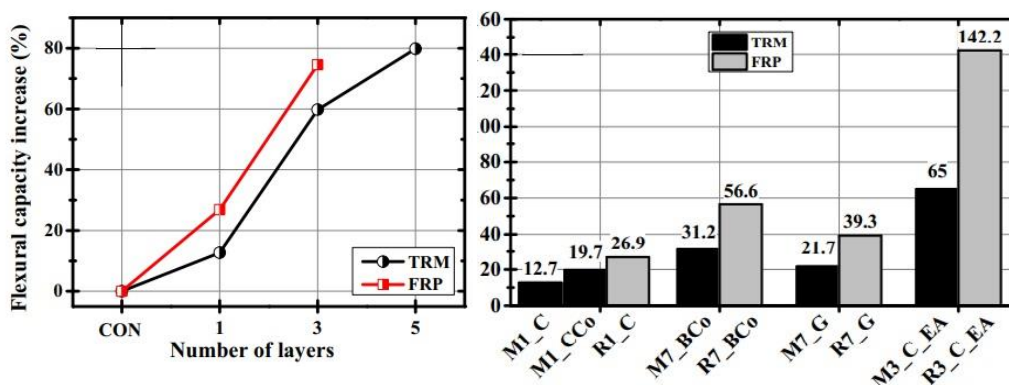


(β) Δοκίμια Τύπου Β

Σχήμα 2.4: Καμπύλες φορτίου-τάσης πλέγματος (Jung et al. 2015)

Εξετάζοντας την καμπτική απόκριση δοκών ΟΣ, ενισχυμένων με ΙΑΜ τσιμεντοειδούς μήτρας, είναι λογικό να αναφερθεί κανείς στην πολυδιάστατη μελέτη των Raoof et al. (2017). Οι ερευνητές επικεντρώθηκαν κυρίως στον αριθμό των στρώσεων, την προετοιμασία της επιφάνειας του υποστρώματος, το είδος του υφάσματος και το σύστημα αγκύρωσης. Αξίζει να τονισθεί ότι συνολικά διεξήχθησαν 13 δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων σε δοκούς

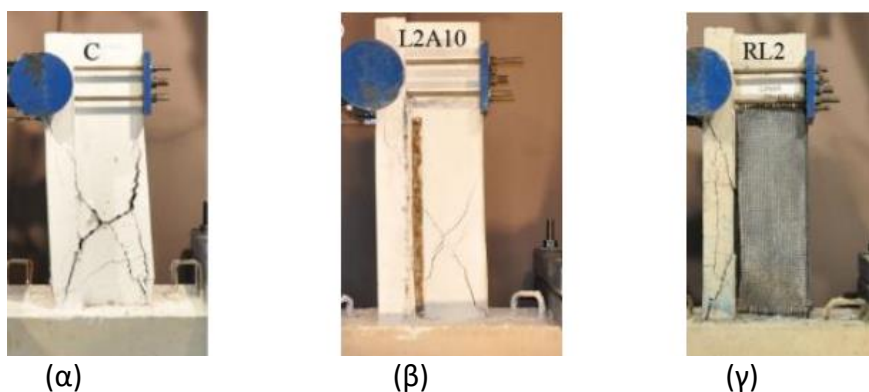
μεσαίας κλίμακας ενισχυμένες είτε με ΙΑΜ είτε με ΙΟΠ, ενώ ακολούθησε η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ τους. Επομένως, σημειώθηκε ότι ο βαθμός αποδοτικότητας του ΙΑΜ εξαρτάται από τον αριθμό των στρώσεων εφόσον αυξήθηκε από 0.47 σε 0.80 για 1-3 στρώσεις αντίστοιχα. Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζονται διαγράμματα που δείχνουν την επιρροή της καμπτικής αντοχής συναρτήσει του αριθμού των στρώσεων του πλέγματος καθώς επίσης του είδους ενίσχυσης. Σε γενικές γραμμές, και στις δύο περιπτώσεις βελτιώθηκε η συμπεριφορά των στοιχείων έναντι κάμψης, με το ΙΟΠ σύστημα να συνεισφέρει περισσότερο. Επιπλέον, αξίζει να τονιστεί ότι η επικάλυψη των ινών του πλέγματος με εποξειδική ρητίνη προκάλεσε περίπου 55% άνοδο της εφελκυστικής αντοχής του μανδύα ΙΑΜ. Τέλος, η αγκύρωση με τρίπλευρο μανδύα βελτίωσε ελάχιστα την αποτελεσματικότητα του ΙΑΜ, μόλις 9% μόνο, έναντι της περίπτωσης ενίσχυσης με ΙΟΠ όπου συνέβαλλε σε 90% αύξηση της εφελκυστικής αντοχής του σύνθετου υλικού.



Σχήμα 2.5: Επιρροή καμπτικής αντοχής βάσει: (α) του αριθμού των στρώσεων του πλέγματος, (β) του είδους ενίσχυσης (ΙΑΜ ή ΙΟΠ) (Raoof et al. 2017)

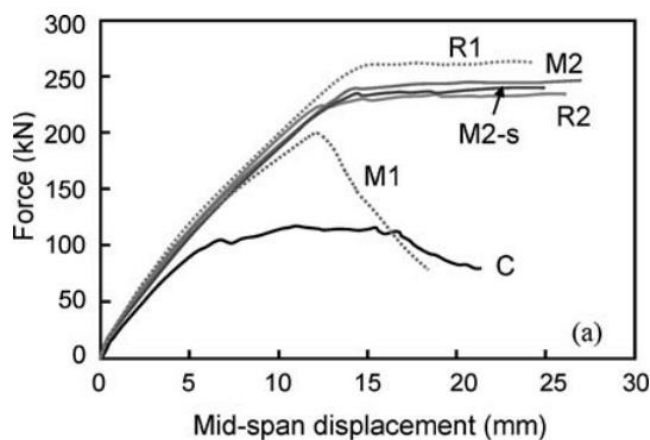
Μια πολυπαραμετρική μελέτη πραγματοποίησαν οι Tzoura και Triantafillou (2014) για την διερεύνηση της αποτελεσματικότητας τρίπλευρου μανδύα ΙΑΜ ως μέσο ενίσχυσης κατά της διατμητικής αστοχίας πλακοδοκών ΟΣ, Τ διατομής με στατική λειτουργία προβόλου. Συνολικά εκτελέστηκαν 13 δοκιμές κυκλικής φόρτισης σε ειδικά διαμορφωμένους δοκούς, ώστε η δεσπόζουσα αστοχία να είναι η διατμητική. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του σύνθετου υλικού, ήταν η σύνθεση πλέγματος ινών από άνθρακα με τσιμεντοειδές κονίαμα ως σύνδετικό υλικό, στο οποίο περιέχονταν πρόσμεικτα πολυμερή. Με βάσει τα αποτελέσματα, οι Tzoura και Triantafillou (2014) διαπίστωσαν πως η αγκύρωση

του μανδύα IAM αυξάνει σημαντικά την αποδοτικότητά του, η οποία είναι παρόμοια συγκριτικά με την περίπτωση ενίσχυσης με αγκυρωμένους μανδύες ΙΟΠ. Ακόμη, η απουσία αγκύρωσης IAM προκαλεί μείωση αποτελεσματικότητας κατά 50%. Στο Σχήμα 2.6 που ακολουθεί παρατίθενται ενδεικτικοί τρόποι αστοχίας των δοκιμίων με το πέρας των πειραμάτων.



Σχήμα 2.6: Μορφές αστοχίας: (α) δοκιμίου αναφοράς, (β) δοκιμίου με IAM, (γ) δοκιμίου με ΙΟΠ (Tzoura and Triantafyllou, 2014).

Εναλλακτικά, οι Triantafyllou και Papanicolaou (2006) μελέτησαν την διατμητική απόκριση δοκών ΟΣ, ενισχυμένων με τρίπλευρους μανδύες IAM. Τα 6 δοκίμια του πειράματος, μήκους 2.60 m και διατομής 150 mm x 300 mm, εξετάστηκαν μέσω κάμψης τεσσάρων σημείων, αναλυτικότερα, τα 4 δοκιμάστηκαν μονοτονικά ενώ τα υπόλοιπα υποβλήθηκαν σε κυκλική φόρτιση. Ουσιαστικά συνολικά 3 παράμετροι λήφθηκαν υπόψη κατά την πειραματική διαδικασία όπως η χρήση ανόργανης ή ρητινοειδούς μήτρας, ο αριθμός των στρώσεων του πλέγματος και ο τρόπος εφαρμογής τους. Έπειτα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων, οι συγγραφείς υποστήριξαν την ενίσχυση με IAM ως μια εξαιρετικά ελπιδοφόρα επιλογή για την αύξηση διατμητικής αντοχής στοιχείων ΟΣ. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήσαν άνοδο της διατμητικής αντοχής κατά 60 kN ανεξάρτητα από την μέθοδο τοποθέτησης του πλέγματος. Στην πραγματικότητα η αποδοτικότητα του συστήματος ενίσχυσης με IAM βελτιώθηκε περίπου 100% συγκριτικά με το δοκίμιο αναφοράς, σε αντίθεση με το σύστημα ΙΟΠ όπου διαπιστώθηκε ότι είναι πιο αποδοτικό από το αντίστοιχο IAM κατά 45%. Στο παρακάτω Σχήμα 2.7, απεικονίζονται οι καμπύλες φορτίου-παραμόρφωσης για όλα τα δοκίμια.

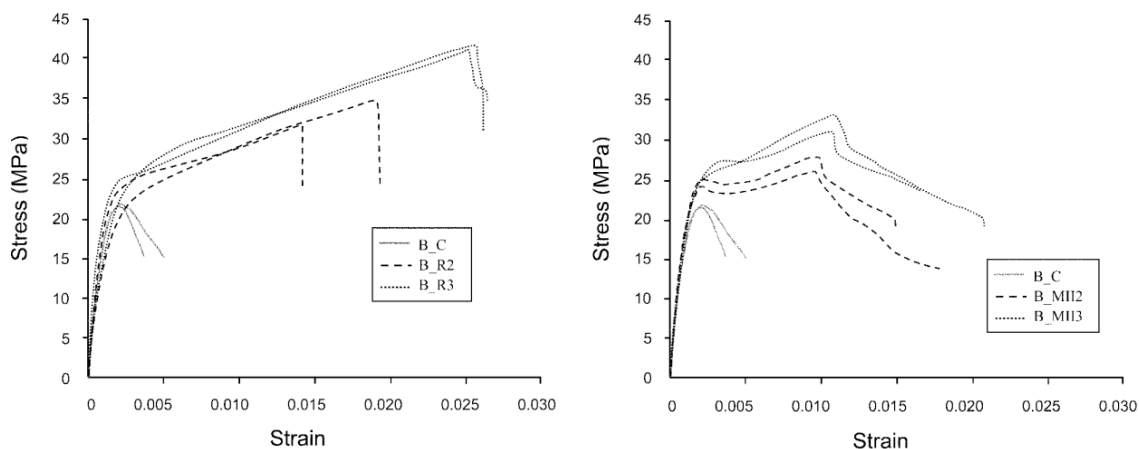


Σχήμα 2.7: Καμπύλες φορτίου-παραμόρφωσης για δοκίμιο αναφοράς, δοκίμια ενισχυμένα με τσιμεντοειδή και ρητινοειδή μήτρα (Triantafyllou και Papanicolaou 2006).

Μια ενδιαφέρουσα μελέτη για την διατμητική ενίσχυση δοκών ΟΣ με ΙΑΜ τσιμεντοειδούς μήτρας που είχαν υποστεί βλάβες πραγματοποίησαν οι Guo et al. (2022). Οι ερευνητές υπέβαλλαν επτά δοκίμια με τρίπλευρους μανδύες ΙΑΜ και ένα δοκίμιο αναφοράς, διαστάσεων 1700 mm x 200 mm x 300 mm, σε κάμψη τεσσάρων σημείων μονοτονικής φόρτισης. Συμπληρωματικά, οι παράγοντες που λήφθηκαν υπόψη κατά τη διαδικασία των πειραμάτων ήταν οι εξής: (α) το ποσοστό ενίσχυσης των ινών του υφάσματος, (β) ο βαθμός των ζημιών που έφεραν τα δοκίμια και (γ) ο τρόπος επιβολής του φορτίου (τα επίπεδα συνεχούς φόρτισης). Ακόμη, για την παραγωγή του σύνθετου υλικού χρησιμοποιήθηκε ινόπλεγμα άνθρακα δύο διευθύνσεων, και κονίαμα, η σύνθεση του οποίου προήλθε από ανάμειξη τσιμέντου, ιπτάμενης τέφρας, καπνού από πυρίτιο, σκόνης από ορυκτά, άμμου, νερού και μικρών ινών PVA. Προέκυψε ότι η μοναδική μορφή αστοχίας ήταν η θραύση των ινών του πλέγματος, παρόλο που η προσθήκη μικρών ινών PVA βελτίωσε την αποδοτικότητά τους. Εξετάζοντας, παράλληλα, την διατμητική αντοχή και την τελική παραμόρφωση, οι ενισχυμένοι δοκοί με μηδενικές βλάβες, παρουσίασαν αύξηση κατά 53.42-67.45% και 18.37-35.54%, αντίστοιχα, έναντι του δοκιμίου αναφοράς. Στην περίπτωση των δοκών όπου υπήρχαν βλάβες η άνοδος ήταν μικρότερη αλλά σημαντική με ποσοστό 18.32-53.78% και 12.24-14.12%, αντίστοιχα. Αναλυτικότερα, όταν ο βαθμός των ζημιών δεν ξεπερνά το όριο διαρροής επιτυγχάνεται πλήρης αποκατάσταση, αντιθέτως, όταν προσπεραστεί το σημείο

αυτό, η διατμητική ικανότητα είναι σημαντικά χαμηλότερη. Επιπλέον, οι τιμές αυτών των μεγεθών, όμως, φάνηκε να επηρεάστηκαν θετικά και από την αύξηση του ποσοστού ενίσχυσης του υφάσματος. Τέλος, όσο μεγάλωνε ο χρόνος που επιβάλλονταν το συνεχές φορτίο, η διατμητική αντοχή και η τελική παραμόρφωση μειώνονταν. Οι συγγραφείς επισημαίνουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αποφόρτιση πριν την ενίσχυση των δοκιμίων με βλάβες.

Από την άλλη πλευρά, το αντικείμενο έρευνας των Triantafillou et al. (2006) αφορούσε την χρήση μανδυνών IAM ως μέσο περίσφιξης υποστυλωμάτων. Ουσιαστικά, συνολικά 44 στοιχεία ΟΣ (κυλινδρικά και ορθογωνικά) υποβλήθηκαν σε δοκιμές θλίψης με παραμέτρους: (α) το είδος της μήτρας (τσιμεντοκονίαμα έναντι ρητίνης), (β) την αντοχή του κονιάματος (2 διαφορετικά μείγματα), (γ) τον αριθμό των στρώσεων του πλέγματος (2 έως 4 στρώσεις άνθρακα) και (δ) την ύπαρξη αγκύρωσης. Οι συγγραφείς διαπίστωσαν λοιπόν ότι η ενίσχυση υποστυλωμάτων μέσω IAM προσφέρει σημαντικά τόσο στην αύξηση της θλιπτικής αντοχής όσο και στην περίσφιξη του σκυροδέματος (δηλαδή την αποφυγή εκτίναξης της επικάλυψης του υποστρώματος). Η άνοδος αυτή είναι μεγαλύτερη με την προσθήκη περισσότερων στρώσεων πλέγματος και επηρεάζεται από την εφελκυστική αντοχή του κονιάματος, η οποία καθορίζει την μορφή αστοχίας που πρόκειται να προκληθεί στα δοκίμια (θραύση ινών ή αποκόλληση). Συμπληρωματικά, παρατηρήθηκε πως οι αστοχίες των υποστυλωμάτων με IAM ήταν λιγότερο απότομες συγκριτικά με των υποστυλωμάτων με ρητινοειδή μήτρα, γεγονός που αποδίδεται από τους συγγραφείς στη δημιουργία πολλαπλών ρηγματώσεων στο κονίαμα, κατά συνέπεια, στην εξάπλωση της κατανομής των ζημιών. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση των πρισμάτων κυλινδρικής διατομής με IAM παρουσιάστηκε μείωση της θλιπτικής αντοχής περίπου κατά 80% και κατά 50% πτώση της παραμόρφωσης έναντι των αντίστοιχων δοκιμίων με ρητίνη. Αντίθετα, για πρίσματα ορθογωνικής διατομής, η αποτελεσματικότητα σε όρους αντοχής παρέμεινε η ίδια, ενώ η παραμόρφωση υστερούσε ελάχιστα. Στο Σχήμα 2.8, παρατίθενται τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης για δοκίμια κυλινδρικής διατομής με τσιμεντοειδή και ρητινοειδή μήτρα.

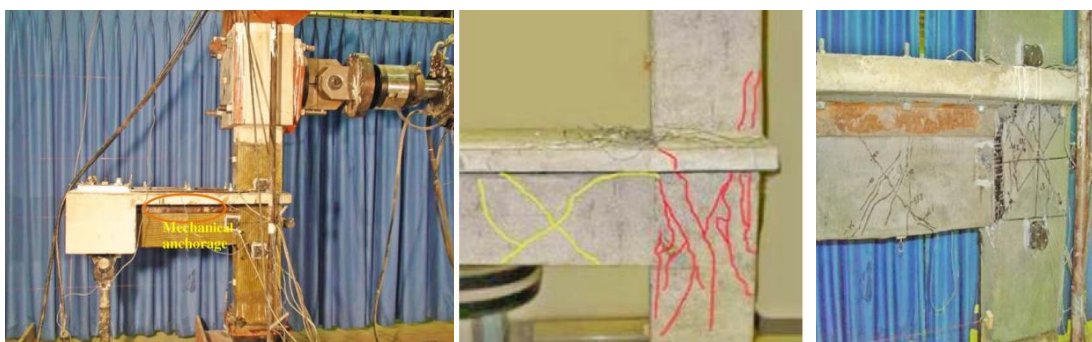


Σχήμα 2.8: Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης για δοκίμια κυλινδρικής διατομής: (α) δοκίμιο αναφοράς και δοκίμια ρητινοειδούς μήτρας με 2-3 στρώσεις πλέγματος και (β) δοκίμιο αναφοράς και δοκίμια τσιμεντοειδούς μήτρας με 2-3 στρώσεις πλέγματος (Triantafyllou et al. 2006)

Άλλη μια προσπάθεια κατανόησης της λειτουργίας των μανδυνών IAM ως μέσο περίσφιξης σε συνδυασμό με την μεταβολή της θερμοκρασίας κατέβαλλε ο Ombres (2017) μέσω δοκιμών θλίψης. Χρησιμοποίησε λοιπόν κυλινδρικά δοκίμια περιτυλιγμένα με IAM PBO τσιμεντοειδούς σύστασης με διαφορετικό αριθμό στρώσεων του υφάσματος ενώ πριν την έναρξη των πειραμάτων τα υπέβαλλε σε διάφορες θερμοκρασίες (50 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C και 250 °C) μέσω κυκλικής έκθεσης. Έπειτα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι η μέγιστη αντοχή των ενισχυμένων δοκιμίων μειώνεται εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασιακής έκθεσης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην μείωση της αντοχής του σκυροδέματος όταν υποβάλλεται σε κύκλους ψύξης/θέρμανσης. Επιπλέον, οι μέγιστες αλλά και οι τελικές ορθές τάσεις αυξήθηκαν σημαντικά για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 50 °C. Συγχρόνως η μορφή αστοχίας όλων των στοιχείων ήταν αποκόλληση των ινών από την μήτρα, η οποία δεν φάνηκε να επηρεάζεται λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας. Τέλος, τόσο η θερμοκρασία όσο και ο αριθμός των στρώσεων καθορίζει την ολκιμότητα των ενισχυμένων δοκιμίων. Πιο συγκεκριμένα με την άνοδο της θερμοκρασίας, η ολκιμότητα μειώνεται έως 15% για μια στρώση IAM PBO και κατά 50% για δύο στρώσεις IAM, συγκριτικά με την περίπτωση των δοκιμίων σε θερμοκρασία «δωματίου» (20 °C).

Η μοναδική πειραματική μελέτη για την ενίσχυση κόμβων δοκού-υποστυλώματος υλοποιήθηκε από τους Al- Salloum et al. (2011). Στο εργαστήριο λοιπόν επιτεύχθηκε

προσομοίωση σεισμού αναπαράγοντας ανακυκλιζόμενες φορτίσεις σε δοκίμιο αναφοράς, σε δύο δοκίμια με ΙΟΠ (άνθρακα-CFRP και υάλου-GFRP αντίστοιχα) και σε δοκίμιο με τρίπλευρους μανδύες IAM (ίνες άνθρακα σε συνδυασμό με τσιμεντοειδή μήτρα με προσθήκη πολυμερούς). Στο Σχήμα 2.9 (α) απεικονίζεται η πειραματική διάταξη. Σε κάθε περίπτωση ενίσχυσης χρησιμοποιήθηκαν μηχανισμοί αγκύρωσης για την αποφυγή αποκόλλησης του σύνθετου υλικού καθώς επίσης και για την πλήρη εκμετάλλευση των ιδιοτήτων των ινών. Ύστερα από την ολοκλήρωση των πειραμάτων εξετάστηκαν οι προκληθείσες ρωγμές όπου, σύμφωνα με το Σχήμα 2.9 (β) για το δοκίμιο αναφοράς, διαδίδονταν σε διαγώνιες κατευθύνσεις προς τα άκρα της άρθρωσης. Οι ίδιες διατμητικές ρωγμές εμφανίστηκαν πολύ αργότερα στο δοκίμιο με IAM όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9 (γ). Τελικά οι συγγραφείς οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι οι μανδύες IAM προσφέρουν αύξηση της αντοχής του συστήματος δοκού-υποστυλώματος κατά 15%, εν αντιθέτως με ενίσχυση μέσω ΙΟΠ, τόσο υάλου όσο και άνθρακα, που προκαλούν άνοδο της αντοχής κατά 50%. Παράλληλα, η χρήση μανδυνών IAM βελτίωσε αξιοσημείωτα την ικανότητα παραμόρφωσης με ποσοστό περίπου στο 50%. Τέλος, η αποδοτικότητα της πλευρικής παραμόρφωσης εξακριβώθηκε πως είναι παρόμοια για όλες τις μεθόδους ενίσχυσης.

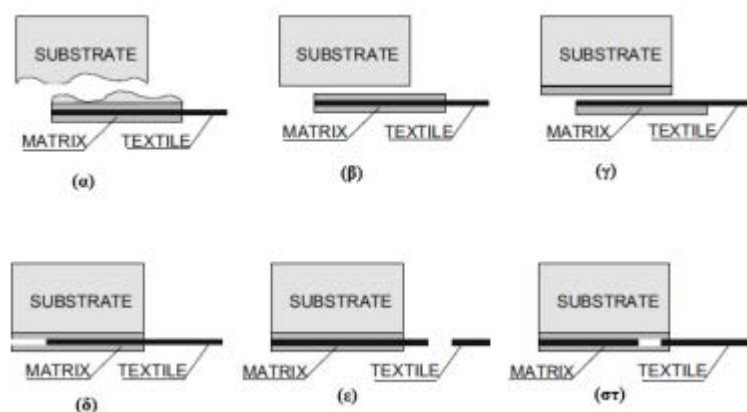


Σχήμα 2.9: (α) Πειραματική διάταξη, (β) Αστοχία δοκιμίου αναφοράς, και (γ) Αστοχία δοκιμίου ενισχυμένου από μανδύες IAM (Al- Salloum 2011)

2.1.4 Συνάφεια IAM – Σκυροδέματος

Η μελέτη της συνάφειας μεταξύ IAM και σκυροδέματος κρίνεται αναγκαία για την διασφάλιση της απόδοσης του σύνθετου υλικού. Ουσιαστικά, μέσω αυτής εξασφαλίζεται αποτελεσματική μεταφορά των φορτίων, με αποτέλεσμα να αποτρέπεται η πρόωρη

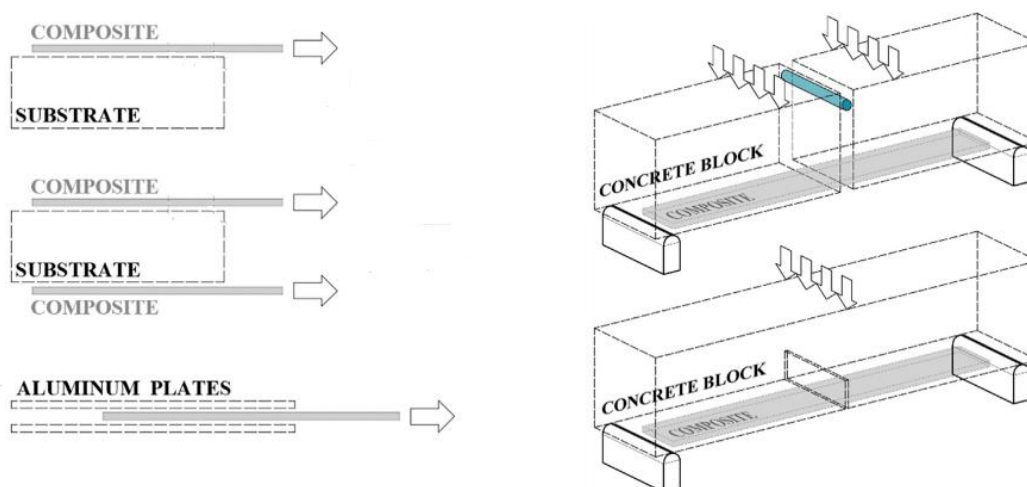
αποκόλληση ή αστοχία. Οι τρόποι αστοχίας που εμφανίζονται μέσω της ενίσχυσης με IAM κατηγοριοποιούνται ως εξής: (α) Μορφή I (αποκόλληση στην επιφάνεια σκυροδέματος-εκτίναξη της επικάλυψης), (β) Μορφή II (αποκόλληση στη διεπιφάνεια σκυροδέματος-μήτρας), (γ) Μορφή III (αποκόλληση στη διεπιφάνεια μήτρας-πλέγματος), (δ) Μορφή IV (ολίσθηση ινών εντός της μήτρας), (ε) Μορφή V (θραύση ινών εκτός του δεσμευμένου μήκους) και (στ) Μορφή VI (θραύση ινών εντός του δεσμευμένου μήκους). Εποπτική απεικόνιση των μορφών αστοχίας παρατίθενται στο Σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10: Μορφές αστοχίας (α) Μορφή I, (β) Μορφή II, (γ) Μορφή III, (δ) Μορφή IV, (ε) Μορφή V, (στ) Μορφή VI (Carozzi et al. 2017)

Εξετάζοντας τις διαφορετικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται στην έρευνα για το ειδικό ζήτημα συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και σύνθετου υλικού, είναι απαραίτητη η συμπερίληψη διαφορετικών παραγόντων και μεθοδολογιών προκειμένου να εξασφαλίζεται η πλήρης κατανόηση της συμπεριφοράς των υλικών και τελικά να επιτυγχάνεται η αποδοτικότερη εφαρμογή των IAM σε ενισχύσεις υφιστάμενων κατασκευών. Ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει αρκετές πειραματικές μεθόδους: απλή (Σχ. 2.11α) ή διπλή (Σχ. 2.11β) άμεση διάτμηση, άμεσος εφελκυσμός (Σχ. 2.11γ) καθώς επίσης και έμμεση διάτμηση μέσω κάμψης τριών (Σχ. 2.11ε) ή τεσσάρων (Σχ.2.11δ) σημείων. Αναλυτικότερα, στα πειράματα απλής άμεσης διάτμησης (single-lap test) επικολλάται μια λωρίδα IAM στην μια πλευρά του πρίσματος ΟΣ το οποίο παραμένει ακίνητο και στη συνέχεια ασκείται εφελκυστική δύναμη στο IAM. Ακολουθείται ακριβώς η ίδια διαδικασία για διπλή άμεση διάτμηση (double-lap

test) με δύο λωρίδες IAM να επικολλώνται παράλληλα στις δύο πλευρές του δοκιμίου. Σχετικά με τον άμεσο εφελκυσμό (pull-out test) η λωρίδα του σύνθετου υλικού συγκρατείται από την μια πλευρά μέσω δύο μεταλλικών πλακών ενώ εφελκύεται από το ελεύθερο άκρο. Στην περίπτωση έμμεσης διάτμησης μέσω κάμψης τεσσάρων σημείων (modified beam test) δύο πρίσματα ΟΣ συνδέονται στο άνω μέρος με κυλινδρική άρθρωση και στο κάτω μέρος με λωρίδα IAM. Σε αντίθεση με την τελευταία διάταξη (notched beam test) όπου διαφέρει έχοντας ενιαίο δοκίμιο ΟΣ με μια σχισμή κεντρικά στη κάτω μεριά με σκοπό την αποφυγή δημιουργίας ρηγμάτων στο σημείο αυτό.

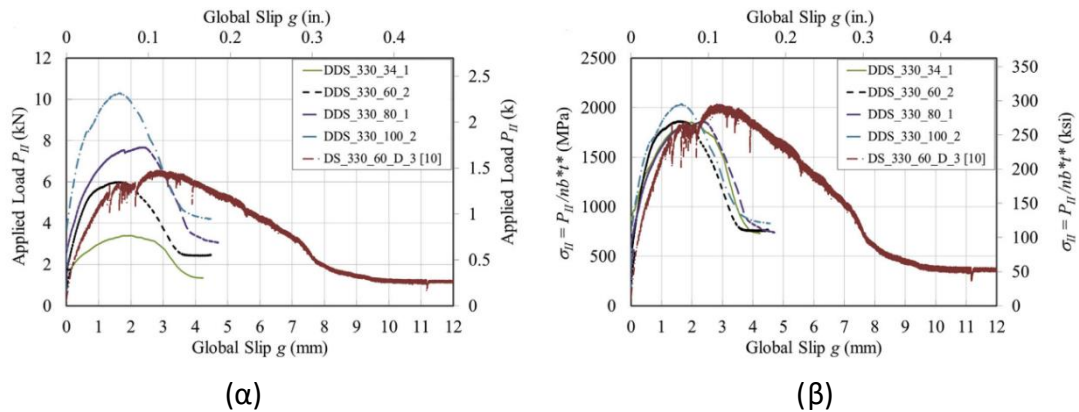


Σχήμα 2.11: Πειραματικές διατάξεις: (α) απλή και (β) διπλή άμεση διάτμηση, (γ) άμεσος εφελκυσμός, έμμεση διάτμηση μέσω κάμψης (ε) τριών και (δ) τεσσάρων σημείων (Calabrese et al. 2020).

Οι Calabrese et al. (2021) διεξήγαγαν μια σειρά πειραμάτων μέσω δύο διαφορετικών διατάξεων, τα εξαγόμενα αποτελέσματα των οποίων σύγκριναν μεταξύ τους για την καλύτερη κατανόηση της συνάφειας του σύνθετου υλικού. Ουσιαστικά, πραγματοποίησαν 8 δοκιμές απλής διάτμησης (single-lap tests) και 6 δοκιμές έμμεσης διάτμησης (modified beam tests) σε στοιχεία ΟΣ με IAM από PBO. Αξίζει να τονιστεί ότι για την δεύτερη πειραματική διάταξη χρησιμοποίησαν δύο διαφορετικούς τρόπους τοποθέτησης του IAM όπου στο άνοιγμα της κάτω πλευράς του δοκιμίου υπήρχε ινόπλεγμα, εμποτισμένο ή μη σε κονίαμα. Σε γενικές γραμμές οι αποκρίσεις του φορτίου ήταν παρόμοιες. Εντούτοις, η ανάπτυξη τάσης σε κάθετα στην διεπιφάνεια μήτρας-ινών λειτούργησε σαν μια πρόσθετη δύναμη τριβής με αποτέλεσμα την αύξηση αντοχής συνάφειας στις δοκιμές έμμεσης διάτμησης. Ειδικότερα, οι συγγραφείς δηλώνουν άνοδο κατά 24.8% και 5.9% στις περιπτώσεις ύπαρξης μήτρας στο

άνοιγμα του δοκιμίου και στην παρουσία μόνο ινών αντιστοίχως εν αντιθέσει της άμεσης διάτμησης. Όμως, η τάση σι προκαλεί βλάβη στις ίνες του πλέγματος, κυρίως όταν οι ίδιες δεν επικαλύπτονται με κονίαμα καθώς αποδεικνύεται μείωση της μέγιστης τάσης τους κατά 15.1%.

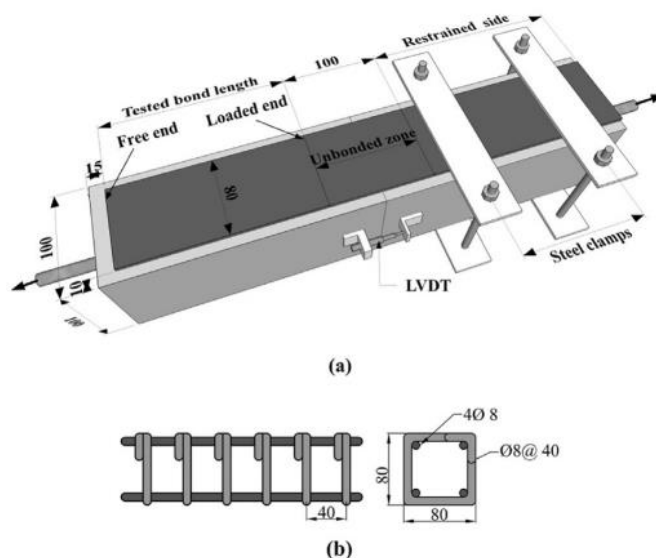
Άλλη μια προσπάθεια σύγκρισης πειραματικών διατάξεων σημειώθηκε από τους Sneed et al. (2015) όπου πραγματοποίησαν 16 δοκιμές διπλής διάτμησης σε στοιχεία ΟΣ με ΙΑΜ από ΡΒΟ, τα αποτελέσματα των οποίων αντιπαρατέθηκαν με αυτά που προέκυψαν από 58 δοκιμές απλής διάτμησης προηγούμενης μελέτης τους. Σύμφωνα με το Σχήμα 2.12α (συμβολισμός DS: απλή διάτμηση, DDS: διπλή διάτμηση), οι αποκρίσεις του φορτίου είναι παρόμοιες για τις δύο μεθόδους έως το σημείο του μέγιστου φορτίου. Στην πραγματικότητα, σε καθένα από τα δοκίμια διπλής διάτμησης προήλθε αστοχία λόγω αποκόλλησης στη μια μόνο λωρίδα μέσω ολίσθησης των ινών εντός της μήτρας. Έτσι, η τιμή του φορτίου που καταγράφηκε στο τέλος της δοκιμής είναι μεγαλύτερη απ' αυτής που αντιστοιχεί στην απλή διάτμηση. Αν συνέβαινε ταυτόχρονη αποκόλληση και των δύο λωρίδων, πιθανώς να παρατηρούνταν παρόμοια συμπεριφορά για τα δύο συστήματα. Επιπλέον, οι τιμές των μέγιστων τάσεων των δοκιμών της διπλής διάτμησης ήταν ελαφρώς μικρότερες από τις αντίστοιχες τάσεις που εκδηλώθηκαν κατά την απλή διάτμηση για ίδιο μήκος και πλάτος επικόλλησης του σύνθετου υλικού (μήκος: 330mm, πλάτος: 60mm), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.12β. Τέλος, επισημάνθηκε μικρότερη διασπορά στο τελικό φορτίο στην περίπτωση της διπλής διάτμησης.



Σχήμα 2.12: α) Καμπύλες δύναμης-ολίσθησης, β) Καμπύλες τάσης-ολίσθησης

(Sneed et al.2015)

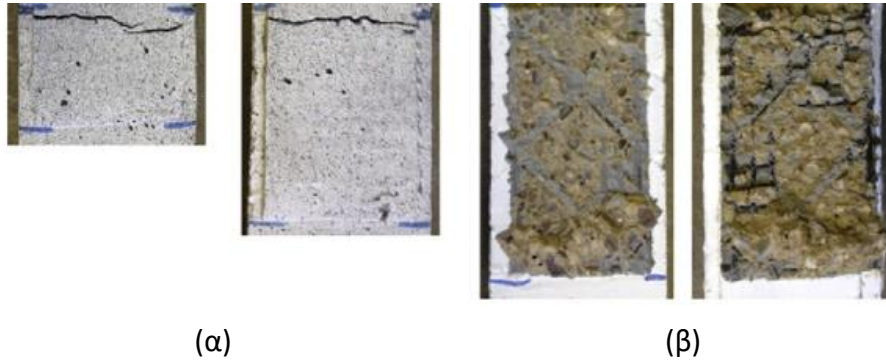
Οι Raoof et al. (2016) διερεύνησαν πειραματικά την συνάφεια IAM-σκυροδέματος, λαμβάνοντας υπόψιν διάφορες παραμέτρους: α) μήκος συνάφειας (από 50 έως 450mm), β) αριθμός στρώσεων ινοπλέγματος (1 έως 4 στρώσεις), γ) προετοιμασία της επιφάνειας σκυροδέματος, δ) θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (15 ή 30MPa), ε) επικάλυψη των ινών του ινοπλέγματος και στ) αγκύρωση του σύνθετου υλικού μέσω περιτύλιξης με IAM ύφασμα. Αναλυτικότερα, συνολικά 80 δοκίμια κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν σε διπλή διάτμηση. Η πειραματική διάταξη απεικονίζεται στο Σχήμα 2.13, όπου δύο πρίσματα Ο.Σ. τετραγωνικής διατομής 100mm συνδέονται μόνο μέσω στρώσεων IAM (πλάτους 80mm). Η προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος έγινε πριν την ενίσχυση, είτε μέσω αφαίρεσης ενός λεπτού στρώματος και δημιουργίας πλέγματος αυλακώσεων (με πάχος περίπου 3mm), είτε μέσω αμμοβολής. Ακολούθησε η ενίσχυση χρησιμοποιώντας πλέγματα με ή χωρίς επικάλυψη των ινών, με την εποξειδική ρητίνη ως υλικό επίστρωσης. Τέλος, σε ορισμένα δοκίμια, για την αγκύρωση του σύνθετου υλικού εφαρμόστηκε ινόπλεγμα 2 στρώσεων (πάχους 100mm) περιμετρικά του πρίσματος από την μια μόνο πλευρά και πραγματοποιήθηκε λείανση των γωνιών του πρίσματος για την αποφυγή συγκέντρωσης τάσεων.



Σχήμα 2.13: α) Πειραματική διάταξη, β) Οπλισμός των πρισμάτων (Raoof et al. 2016)

Παρατηρήθηκε λοιπόν ότι η συνάφεια αυξάνεται μη αναλογικά, είτε με το μήκος επικόλλησης όπου έπειτα από κάποιο ορισμένο σημείο η άνοδος είναι αμελητέα, είτε διατηρώντας σταθερό το μήκος επικόλλησης και αυξάνοντας τον αριθμό των στρώσεων με εντονότερη διαφορά από την 1^η στη 2^η στρώση. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μήκος αυτό ονομάζεται “ενεργό μήκος επικόλλησης” (L_{eff}) και κυμαίνεται περίπου 200-300mm. Όσον αφορά την προετοιμασία του υποστρώματος (αμμοβολή ή δημιουργία αυλακώσεων στο σκυρόδεμα) διαπιστώθηκε η αποτελεσματική μεταφορά των διατμητικών δυνάμεων από το σύνθετο υλικό στο σκυρόδεμα σε κάθε περίπτωση με αποτέλεσμα και οι δύο τρόποι να καθίστανται εξίσου κατάλληλοι. Επιπλέον, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.14, σημειώθηκαν δυο διαφορετικές μορφές αστοχίας: ολίσθηση των ινών εντός της μήτρας (1-2 στρώσεις TRM), αποκόλληση στην διεπιφάνεια κονιάματος/σκυροδέματος με ταυτόχρονη απομάκρυνση ενός λεπτού στρώματος σκυροδέματος (3-4 στρώσεις TRM). Έτσι, λογικό είναι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος να εξετάστηκε μόνο σε δοκίμια με 3-4 στρώσεις TRM όπου εμφανίζονταν αποκόλληση ενός μέρους του υποστρώματος. Τελικά, προέκυψε ότι για 50% μείωση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος επήλθε ελάττωση της συνάφειας κατά 7.5%. Από την άλλη η επικάλυψη των ινών με εποξειδική ρητίνη μελετήθηκε σε δοκίμια που εμφάνιζαν ολίσθηση των ινών του πλέγματος όπου εξακριβώθηκε η αλλαγή του τρόπου που αστοχούσαν (αποκόλληση στη διεπιφάνεια μήτρας-πλέγματος). Λόγω της σταθερότητας και

της ευκολίας εφαρμογής του πλέγματος με επικάλυψη επηρεάστηκε σημαντικά και η συνάφεια. Σχετικά με την αγκύρωση του σύνθετου υλικού μέσω περιτύλιξης με IAM ύφασμα επιβεβαιώθηκε η ουσιαστική αύξηση της συνάφειας (πάνω από 45% για 4 στρώσεις TRM), αποτρέποντας συγχρόνως και την αποκόλληση του IAM από το υπόστρωμα.



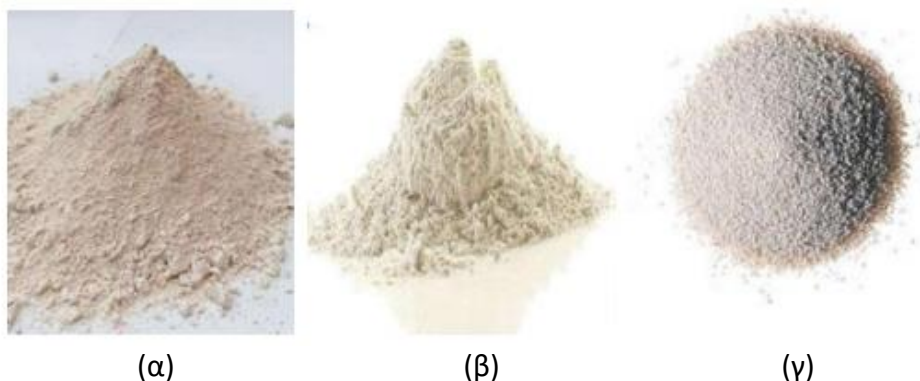
Σχήμα 2.14: Μορφές αστοχίας των δοκιμίων: (α) μοναδική ρωγμή και ολίσθηση των ινών εντός μήτρας, (β) αποκόλληση στην διεπιφάνεια κονιάματος/ σκυροδέματος.

2.2 Γεωπολυμερή

2.2.1 Γενικά για γεωπολυμερή

Τα γεωπολυμερή είναι ανόργανα πολυμερή και η τεχνολογία σύμφωνα με την οποία παράγονται ονομάζεται γεωπολυμερισμός. Αναλυτικότερα, κατά την διαδικασία του γεωπολυμερισμού, πραγματοποιείται μια χημική αντίδραση μεταξύ στερεών αργιλοπυριτικών υλικών (precursors), όπως ιπτάμενη τέφρα ή σκωρία υψικαμίνου, με διάλυμα αλκαλικού ενεργοποιητή (alkali activator), που συνήθως αποτελείται από υδροξείδια αλκαλικών μετάλλων ή πυριτικά άλατα. Έτσι δημιουργούνται συμπαγείς συγκολλητικές ουσίες (σχηματισμός πολυμερικών δεσμών -Si-O-Al-O-). Σχετικά με τις στερεές πρώτες ύλες χρησιμοποιούνται επίσης ασβεστόχος άργιλος, φυσικές ποζολάνες, ή σπανιότερα άργιλοι εμπλουτισμένοι με σίδηρο, διαφόρων ειδών σκωρίες παραπροϊόν της σιδηρούχου μεταλλουργίας, λάσπες εμπλουτισμένες με άργιλο, κόκκινη λάσπη, καολίνη, αλεσμένη τέφρα και τέφρες γεωργικών αποβλήτων. Ακολουθούν ενδεικτικές εικόνες στερεών πρώτων υλών, οι οποίες παρατίθενται στο Σχήμα 2.15. Όσον αφορά τους ενεργοποιητές, οι ευρέως χρησιμοποιούμενες ενώσεις είναι KOH, NaOH, K₂O ή Na₂O, ενώ σε

περιπτώσεις ενεργοποίησης πρόδρομων ουσιών με υψηλή περιεκτικότητα σε ασβέστιο, π.χ. σκωρίες υψικαμίνου, αποτελεσματικές μπορεί να αποδειχθούν οι ενώσεις Na_2SO_4 και Na_2CO_3 .



Σχήμα 2.15: Ενδεικτικές εικόνες στερεών πρόδρομων ουσιών (α) μετακαολίνη, (β) αδρανές < 0.5 mm, (γ) αδρανές 0.5-1 mm (Papakonstantinou and Koutas, 2021).

Ιστορικά, ως πρώτος ερευνητής θεωρείται ο Kuhl (1908): Γερμανός μηχανικός και χημικός με εξειδίκευση στο τσιμέντο, όπου κατοχύρωσε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας τον σχηματισμό ενός στερεού υλικού μέσω της αντίδρασης αλκαλικής πηγής με στερεές πρόδρομες ουσίες (αποτελούμενες από αλουμίνιο και πυρίτιο). Στη συνέχεια, την επιστημονική βάση έθεσε ο Purdon (1940), ο οποίος μελέτησε κυρίως την σκωρία υψικαμίνου σε αλκαλικό διάλυμα επιτυγχάνοντας ποσοστά αντοχής και αναπτύσσοντας τελικές δυνάμεις συγκρίσιμες με εκείνες του τσιμέντου Portland. Τα επόμενα χρόνια η έρευνα για τους αλκαλικούς ενεργοποιητές ήταν περιορισμένη μέχρι την δεκαετία του 1980 όπου ο Davidovits κατοχύρωσε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας αρκετά αργιλοπυριτικά σκευάσματα και καθιέρωσε τον όρο «γεωπολυμερές». Επιπλέον, ο Davidovits υποστήριξε την χρήση των γεωπολυμερών σε πολλές εφαρμογές είτε ως δομικό υλικό, ή ως επίχρισμα με υψηλή ανθεκτικότητα στη φωτιά, ακόμη, και στην αποκατάσταση της πολιτιστικής κληρονομιάς. Από τότε σημειώθηκε δραματική αύξηση στο πεδίο της έρευνας παγκοσμίως για την διερεύνηση/ανάπτυξη ακατέργαστων υλικών που υπήρχαν σε κάθε περιοχή και προσέφεραν ικανοποιητική απόδοση ως πρώτες ύλες. Πλέον, η παραγωγή των γεωπολυμερών ποικίλει ανάλογα με την περιοχή, την διαθεσιμότητα, την αξία και το κόστος των υλικών.

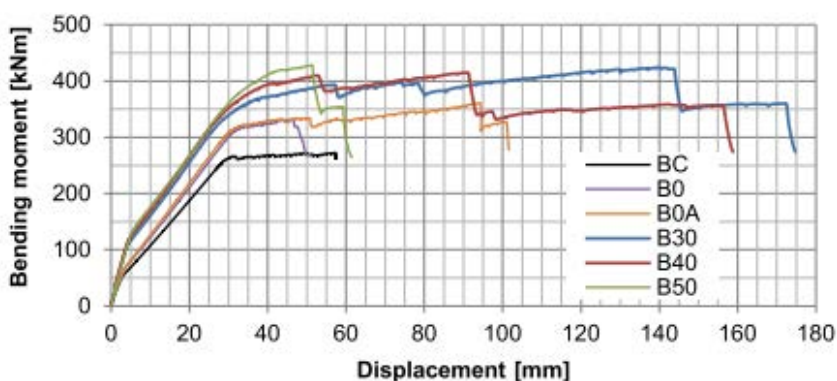
Τα γεωπολυμερή έχουν αποσπάσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας αλλά και της βιομηχανίας, καθώς αριθμούν μια σειρά πλεονεκτημάτων έναντι του συνηθισμένου τσιμέντου Portland. Το βασικότερο πλεονέκτημα της χρήσης γεωπολυμερών είναι το χαμηλό αποτύπωμα άνθρακα συγκριτικά με την παραγωγή τσιμέντου η οποία είναι υπεύθυνη για σημαντικό ποσοστό (περίπου 5-8% παγκοσμίως) εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Παράλληλα, περιορίζουν την ποσότητα των βιομηχανικών αποβλήτων που καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής, εφόσον χρησιμοποιούνται παραπροϊόντα: ιπτάμενη τέφρα ή σκωρία καμίνου, ως πρώτες ύλες για την σύνθεσή τους. Πέρα από τα περιβαλλοντικά οφέλη, εμφανίζουν υψηλές μηχανικές ιδιότητες: ανθεκτικότητα σε φωτιά/δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες, αντίσταση σε διάβρωση καθώς επίσης και μεγάλη θλιπτική αντοχή. Συγχρόνως, τα γεωπολυμερή είναι λιγότερο διαπερατά συγκριτικά με το τσιμέντο, επιβραδύνοντας έτσι την ροή του νερού μέσω εξασθενημένων εξωτερικών επιφανειών. Τέλος, σε περιπτώσεις εφαρμογής των γεωπολυμερών ως μέσο ενίσχυσης αναπτύσσεται ισχυρή συνάφεια μεταξύ της επιφάνειας του σκυροδέματος και του ινοπλέγματος. Ωστόσο, σημειώνεται ότι τα γεωπολυμερή εξακολουθούν να αποτελούν ένα αναπτυσσόμενο πεδίο με προοπτική εξέλιξης στην βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων τους και στην επέκταση των εφαρμογών τους.

2.2.2 Ινοπλέγματα σε Γεωπολυμερή Μήτρα στο πεδίο των ενισχύσεων

Στην παρούσα ενότητα υποδεικνύεται μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με την καινοτόμο τεχνική ενίσχυσης υφιστάμενων κατασκευών που κάνει χρήση ινοπλεγμάτων σε γεωπολυμερή μήτρα. Κατά την τελευταία δεκαετία, τόσο η επιστημονική κοινότητα όσο και η βιομηχανία δείχνουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την βιώσιμη αυτή εναλλακτική, διότι, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, προσφέρει πληθώρα πλεονεκτημάτων συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους ενίσχυσης. Οι έρευνες εντούτοις είναι αρκετά περιορισμένες. Πιο συγκεκριμένα, έχει μελετηθεί πειραματικά η συμπεριφορά των μανδύων IAM με ανόργανη μήτρα γεωπολυμερούς έναντι κάμψης και διάτμησης δοκών καθώς και η εφαρμογή τους ως περίσφιγξη υποστυλμάτων.

Εξετάζοντας την καμπτική συμπεριφορά στοιχείων ΟΣ ενισχυμένων με IAM γεωπολυμερούς σύστασης, οι Piątek και Siwowski εκτέλεσαν μια σειρά πειραμάτων υπό

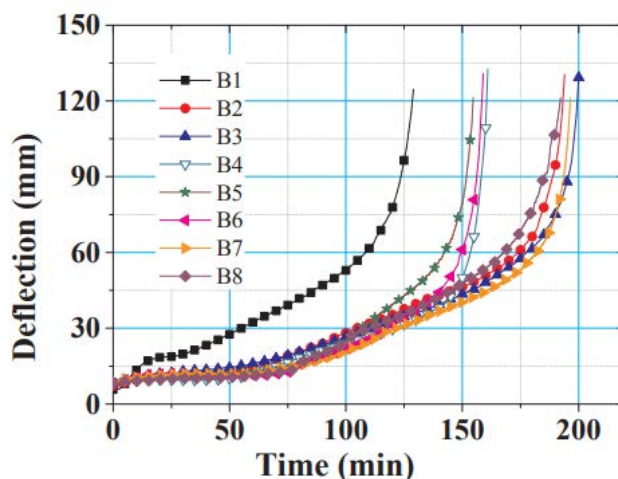
στατική φόρτιση μέσω κάμψης τεσσάρων σημείων. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποίησαν 5 μεγάλης κλίμακας δοκούς συν μια δοκό αναφοράς (μήκους 6.0 m και διατομής 500 mm x 420 mm), με παραμέτρους: (α) την προένταση (κατά 30%, 40% και 50%) ή μη των λωρίδων IAM αλλά και (β) με ή χωρίς σύστημα αγκύρωσης. Η σημαντικότερη παρατήρηση για απλώς ενισχυμένα δοκίμια ήταν η υψηλή αύξηση σε εύρος περίπου 22-33% της τελικής φέρουσας ικανότητας και επιπλέον 9% για την περίπτωση αγκυρωμένων άκρων εν αντιθέσει αυτών δίχως σύστημα αγκύρωσης, ενώ, από την άλλη πλευρά η τιμή της δυσκαμψίας σημείωσε μόνο μια ελαφριά άνοδο. Στην πραγματικότητα, όμως, τα δοκίμια με προεντεταμένες λωρίδες IAM ενίσχυσαν την τελική φέρουσα ικανότητα σε ποσοστό παραπάνω από το 50%, καθώς επίσης και εμφάνισαν αύξηση της δυσκαμψίας κατά 20-47% συγκριτικά με το δοκίμιο αναφοράς. Ωστόσο αξίζει να τονισθεί ότι η αστοχία των δοκών αυτών ήταν κατά προσέγγιση 102-147% πιο απότομη. Αξιολογώντας τον τρόπο αστοχίας των στοιχείων, οι συγγραφείς επισημαίνουν πως η προένταση μέχρι 40% αποτελεί βέλτιστη επιλογή, λόγω της έγκαιρης αναγνώρισης των πιθανών βλαβών που μπορεί να προκληθούν. Τέλος, οι συγγραφείς αναφέρουν ότι, λόγω της αποτελεσματικότητας των αγκυρώσεων, το σύστημα ενίσχυσης επιτρέπει τη χρήση υψηλότερου επιπέδου προέντασης έως 50-60%, εάν και εφόσον ληφθεί υπόψη η ξαφνική αστοχία στο πρώιμο στάδιο του σχεδιασμού. Στο Σχήμα 2.16 απεικονίζεται το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για κάθε δοκίμιο, όπου εύκολα διαπιστώνει κανείς την δυσκαμψία του κάθε στοιχείου μέσω της κλίσης του αρχικού ευθύγραμμου τμήματος.



Σχήμα 2.16: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για κάθε δοκίμιο
(Piątek και Siwowski 2022).

Οι Zhang et al. (2018) πραγματοποίησαν πειράματα για την διερεύνηση συστημάτων ενίσχυσης IAM σε δοκούς ΟΣ, υπό συνθήκες φωτιάς. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν ένα

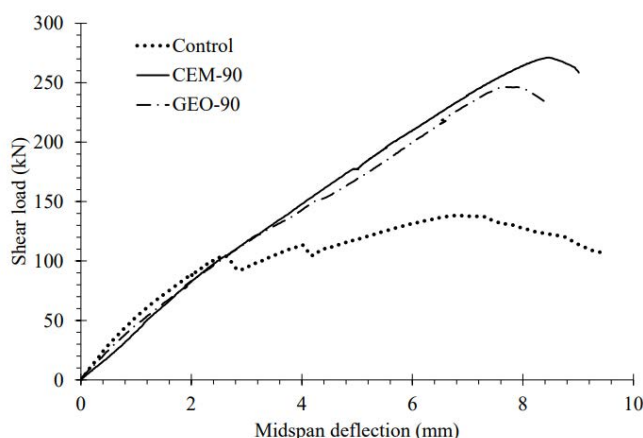
δοκίμιο αναφοράς και επτά δοκίμια ενισχυμένα με μανδύες IAM, διαστάσεων 5300 mm x 250 mm x 400 mm, ενώ οι παράμετροι της έρευνας ήταν οι εξής: (α) το υλικό του πλέγματος (ίνες βασάλτη ή άνθρακα), (β) ο αριθμός των στρώσεων (1 ή 2), (γ) το είδος της μήτρας (ρητίνη ή γεωπολυμερές), και (δ) η ύπαρξη ή όχι ασταριού μεταξύ πυρομόνωσης και σύνθετου υλικού. Συμπληρωματικά, η σύσταση του γεωπολυμερούς κονιάματος προέκυψε από την ανάμειξη μετακαολίνης και ιπτάμενης τέφρας σε συνδυασμό με ενεργοποιητή πυριτικού καλίου. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, η ενίσχυση ΙΟΠ σε δοκούς ΟΣ εξασφαλίζουν την επιθυμητή αντίσταση έναντι πυρκαγιάς μέχρι 3 ώρες, παρόλο που η εποξική ρητίνη χάνει την αντοχή συνάφειας σε υψηλές θερμοκρασίες, υπό την προϋπόθεση κατάλληλης μόνωσης και σωστής αγκύρωσης που εφαρμόζεται στις δοκούς. Αντιθέτως, στην περίπτωση του συστήματος ενίσχυσης IAM με γεωπολυμερή σύσταση φάνηκε να είναι λειτουργικό με χαμηλότερη παραμόρφωση έναντι του συστήματος ΙΟΠ με το ίδιο επιβαλλόμενο φορτίο. Αξίζει ωστόσο να τονισθεί ότι, σύμφωνα με το Σχήμα 2.17, μερικά στοιχεία IAM (B4, B5, και B6 δοκοί) δεν ανέπτυξαν καλύτερη αντίσταση σε σχέση με τα στοιχεία με ΙΟΠ, γεγονός που οφείλεται στην πρόωρη απώλεια της πυρομόνωσης.



Σχήμα 2.17: Καμπύλες παραμόρφωσης-χρόνου (Zhang et al. 2018).

Σε πρόσφατη μελέτη τους οι Khir Allah et al. (2022) διερεύνησαν την απόκριση δοκών ΟΣ έναντι τέμνουσας με εφαρμογή συστημάτων ενίσχυσης IAM. Αναλυτικότερα, χρησιμοποιήθηκαν τρεις μεγάλης κλίμακας δοκοί: ένα δοκίμιο αναφοράς και δύο ενισχυμένα δοκίμια με IAM γεωπολυμερούς και τσιμεντοειδούς σύστασης (μήκους 3300 mm και

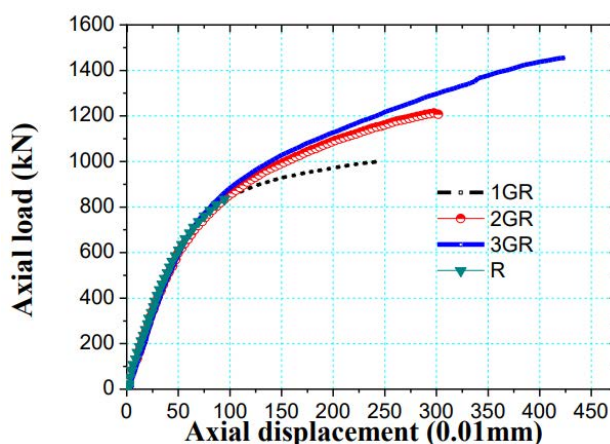
διατομής 150 mm x 500 mm), ενώ, υποβλήθηκαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων. Σημειώνεται ότι το πλέγμα αποτελούνταν από ίνες άνθρακα και η μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης περιείχε σκωρία καμίνου με ιπτάμενη τέφρα, άμμο ως λεπτό αδρανές και διαλυτικό διάλυμα πυριτικού νατρίου- πυριτικού υδροξειδίου. Με βάσει τα πειραματικά αποτελέσματα προέκυψε ότι το σύστημα ενίσχυσης IAM γεωπολυμερούς σύστασης συνέβαλλε σημαντικά στην αύξηση της διατμητικής αντοχής του δοκιμίου κατά 77% συγκριτικά με το δοκίμιο αναφοράς. Ωστόσο, η τσιμεντοειδής μήτρα υπέδειξε άνοδο κατά 95%. Στο Σχήμα 2.18 παρατίθενται τα διαγράμματα φορτίου-παραμόρφωσης για τα 3 δοκίμια. Τέλος, οι μορφές αστοχίας διέφεραν καθώς εμφανίστηκε διατμητική-θλιπτική αστοχία και αστοχία διαγώνιας θλίψης (σύνθλιψη του σκυροδέματος), ενώ δεν παρουσιάστηκε καμία περίπτωση εφελκυστικής αστοχίας στα δοκίμια.



Σχήμα 2.18: Διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης για δοκίμιο αναφοράς και ενισχυμένα δοκίμια με τσιμεντοειδή και γεωπολυμερή μήτρα (Khir Allah et al. 2022).

Την εφαρμογή των IAM με γεωπολυμερή μήτρα ως περίσφιξη κυλινδρικών δοκιμίων μελέτησαν οι Zhang et al. (2016), μέσω πειραμάτων υπό αξονική θλίψη με υποβαλλόμενη αυξανόμενη θερμοκρασία. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 20 δοκίμια διαστάσεων Φ150 x 300 mm, ενισχυμένα ή μη, ενώ ως παράμετροι της έρευνας τέθηκαν: ο αριθμός των στρώσεων του πλέγματος (1 έως 3 στρώσεις άνθρακα) και η θερμοκρασία (25°C, 100°C, 200°C και 300°C). Επιπλέον, η σύσταση της γεωπολυμερούς μήτρας προέκυψε από την ανάμειξη μετακαολίνης και ιπτάμενης τέφρας σε συνδυασμό με ενεργοποιητή πυριτικού καλίου.

Έπειτα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων διαπιστώθηκε η αξιοσημείωτη συνεισφορά ενίσχυσης ΙΑΜ με γεωπολυμερή μήτρα έναντι υψηλών θερμοκρασιών καθώς η θλιπτική αντοχή αυξήθηκε κατά 56.2%, 90.9% και 106.4% για 100, 200 και 300°C, η οποία είναι υψηλότερη της αντοχής σε θερμοκρασία «δωματίου», δηλαδή 25°C (41.8%). Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν για την επιρροή των στρώσεων στην αντοχή και αξονική μετατόπιση μέσω του Σχήματος 2.19 όπου παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου – αξονικής μετατόπισης για ενισχυμένα ή μη δοκίμια. Όλες οι καμπύλες δείχνουν να συμπίπτουν στην ελαστική περιοχή, ενώ μεγαλύτερη αντοχή και μετατόπιση σημειώνουν τα ενισχυμένα δοκίμια με αυξημένο αριθμό στρώσεων πλέγματος άνθρακα. Αυτό συμβαίνει διότι η ενεργοποίηση των ινών δεν έχει προλάβει να πραγματοποιηθεί σε αυτό το στάδιο. Από την άλλη πλευρά, η ολκιμότητα μειώθηκε. Τέλος, αξίζει να τονισθεί ότι οι συγγραφείς παρατήρησαν πως η μεταβολή θερμοκρασίας από 100°C σε 300°C επηρεάζει τον τρόπο αστοχίας των δοκιμών από αστοχία του σύνθετου υλικού σε θραύση του ινοπλέγματος άνθρακα, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.20.



Σχήμα 2.19: Καμπύλες φορτίου - αξονικής μετατόπισης σε ενισχυμένα ή μη δοκίμια με 1 έως 3 στρώσεις πλέγματος άνθρακα (Zhang et al. 2016).



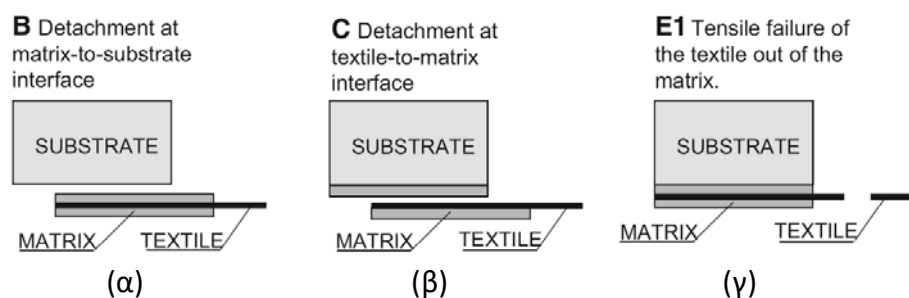
Σχήμα 2.20: Αστοχία περισφιγμένων δοκιμών υποβαλλόμενων σε: (α) 100°C, (β) 200°C και (γ) 300°C (Zhang et al. 2016).

2.2.3 Συνάφεια Γεωπολυμερούς – Σκυροδέματος

Η συνάφεια μεταξύ γεωπολυμερών και σκυροδέματος αποτελεί ένα σημαντικό πεδίο ερευνητικού ενδιαφέροντος στον τομέα της κατασκευαστικής βιομηχανίας. Η κατανόηση της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στα δύο αυτά υλικά συνιστά μια πρωτοποριακή εναλλακτική για την βιώσιμη δόμηση και τη μείωση του αντίκτυπου των κατασκευαστικών δραστηριοτήτων στο περιβάλλον. Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα διερεύνηση, κατόπιν σύντομης ανασκόπησης της βιβλιογραφίας, επικεντρώνεται στην εφαρμογή IAM γεωπολυμερούς μήτρας και αποσκοπεί στην ανάλυση/κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν τη συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και σύνθετου υλικού προκειμένου να συνεισφέρει στην ανάπτυξη και εφαρμογή νέων τεχνολογιών στον τομέα των ενισχύσεων υφιστάμενων κατασκευών.

Μια πολυπαραμετρική μελέτη πραγματοποίησαν οι Thermou et al. (2021) σε στοιχεία IAM ινών χάλυβα και γεωπολυμερούς μήτρας. Η επίδραση του αριθμού των στρώσεων του πλέγματος, της πυκνότητας των ινών αλλά και της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος αναλύθηκε μέσω μιας σειράς πειραματικών δοκιμών. Σχετικά με τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, οι ίνες του ινοπλέγματος επικαλύπτονταν από ψευδάργυρο, ενώ, η σύσταση του γεωπολυμερούς κονιάματος ήταν βασισμένη σε κρυσταλλική αντίδραση γεωσυνδετικών. Συμπληρωματικά, οι μορφές αστοχίας των δοκιμών που παρατηρήθηκαν παρατίθενται στο Σχήμα 2.21 και κατηγοριοποιούνται ως εξής: (α) Μορφή Ι (αποκόλληση στη διεπιφάνεια IAM-υποστρώματος), (β) Μορφή ΙΙ (αποκόλληση στη διεπιφάνεια μήτρας-

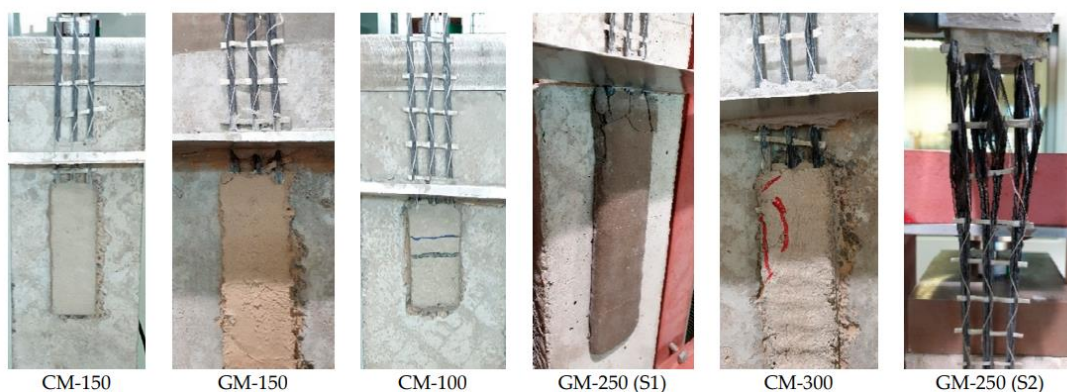
πλέγματος) και (γ) Μορφή III (θραύση ινών εκτός της μήτρας). Βάσει της ανάλυσης των αποτελεσμάτων που αναδύθηκαν από την παρούσα έρευνα, η πυκνότητα των ινών δεν επηρέασε το ενεργό μήκος επικόλλησης, το οποίο κυμαίνονταν στα 100 mm – 200 mm σε κάθε περίπτωση αλλά ούτε και την ικανότητα μεταφοράς του φορτίου. Όμως, η επιρροή της συνέβαλε στην συνάφεια μεταξύ των στρώσεων του ινοπλέγματος, αποδεικνύοντας ότι εξαρτάται από την ποσότητα διείσδυσης του κονιάματος στα κενά του πλέγματος. Επιπλέον, η χρήση περισσότερων στρώσεων σε συνδυασμό με την πυκνότητα των ινών επέφεραν αλλαγή στον τρόπο αστοχίας καθώς σε δοκίμια με 1-2 στρώσεις εμφανίστηκε αποκόλληση στην διεπιφάνεια σύνθετου υλικού-σκυροδέματος εν αντιθέσει των δοκιμών με 3 στρώσεις όπου η αστοχία επήλθε στην διεπιφάνεια ΙΑΜ-υποστρώματος. Τέλος, δεν προκλήθηκε ξεκάθαρη εικόνα για το πως επηρεάζει η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος την αντοχή συνάφειας.



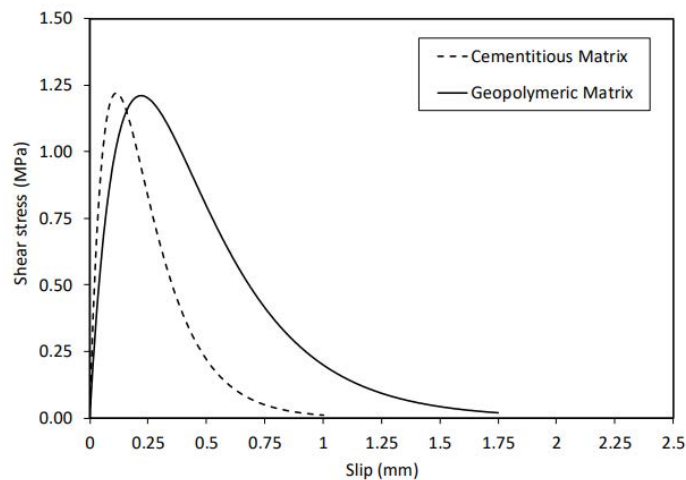
Σχήμα 2.21: Μορφές αστοχίας των δοκιμών: (α) αποκόλληση στη διεπιφάνεια ΙΑΜ-υποστρώματος, (β) αποκόλληση στη διεπιφάνεια μήτρας-πλέγματος, (γ) θραύση ινών εκτός της μήτρας (Thermou et al. 2021).

Οι Obaida et al. (2021) διεξήγαγαν πειράματα απλής διάτμησης (single-lap shear tests) σε 18 δοκίμια εφαρμόζοντας ΙΑΜ άνθρακα με γεωπολυμερές ή τσιμεντοειδές κονίαμα για την διερεύνηση της συνάφειας σκυροδέματος-μήτρας. Η γεωμετρία των δοκών ΟΣ όπου επικολλήθηκε το σύνθετο υλικό ήταν μήκους 550 mm και διατομής 150 mm x 150 mm. Αρχικά, οι δύο βασικοί παράγοντες που εξετάστηκαν είναι: (α) το υλικό της μήτρας (γεωπολυμερή ή τσιμεντοειδή) και (β) το μήκος επικόλλησης (50 mm – 300 mm). Επιπλέον, για την παρασκευή της μήτρας γεωπολυμερούς σύστασης χρησιμοποιήθηκαν: (α) ιπτάμενη τέφρα και σκωρία υψικαμίνου ως συνδετικά υλικά, (β) άμμος ερήμου ως λεπτό αδρανές, (γ) αλκαλικό διάλυμα ως ενεργοποιητή με βάση το πυριτικό νάτριο (SS) και το υδροξείδιο του νατρίου (SH) και (δ) υπερρευστοποιητής (πολυκαρβοξυλικός αιθέρας) για ενίσχυση της

εργασιμότητας. Μετά το πέρας των πειραμάτων, παρατηρήθηκαν 3 μορφές αστοχίας όπου οι συγγραφείς κατηγοριοποίησαν ως εξής: Μορφή I (ολίσθηση των ινών χωρίς ρηγμάτωση της μήτρας), Μορφή II (ρηγματώσεις στη μήτρα με ταυτόχρονη ολίσθηση των ινών και αποκόλληση στη διεπιφάνεια ινών-μήτρας) και Μορφή III (θραύση ινών εκτός της μήτρας). Χαρακτηριστικές εικόνες αστοχίας παρατίθενται στο Σχήμα 2.22. Συμπληρωματικά, τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με γεωπολυμερή μήτρα εμφάνισαν κατά προσέγγιση 71% υψηλότερα φορτία σε σύγκριση με τα αντίστοιχα τσιμεντοειδούς μήτρας, ενώ στην περίπτωση των στοιχείων με μήκος επικόλλησης τα 250 mm, η εν λόγω αύξηση πλησίασε το 84%. Όσον αφορά το ενεργό μήκος επικόλλησης, προσδιορίστηκε στα 170 mm και 150 mm για τσιμεντοειδή και γεωπολυμερή μήτρα αντίστοιχα. Τέλος, σύμφωνα με το Σχήμα 2.23, παρουσιάζονται τα διαγράμματα αντοχής συνάφειας-ολίσθησης για την διεπιφάνεια ινών-μήτρας όπου και στις δύο περιπτώσεις η διατμητική τάση λαμβάνει την τιμή 1.2 MPa, ενώ η διαφορά εντοπίζεται στην ολίσθηση που αντιστοιχεί στη μέγιστη διατμητική τάση καθώς και στην ενέργεια παραμόρφωσης εφόσον είναι υψηλότερες για δοκίμια με γεωπολυμερή μήτρα έναντι αυτών με τσιμεντοειδή μήτρα.



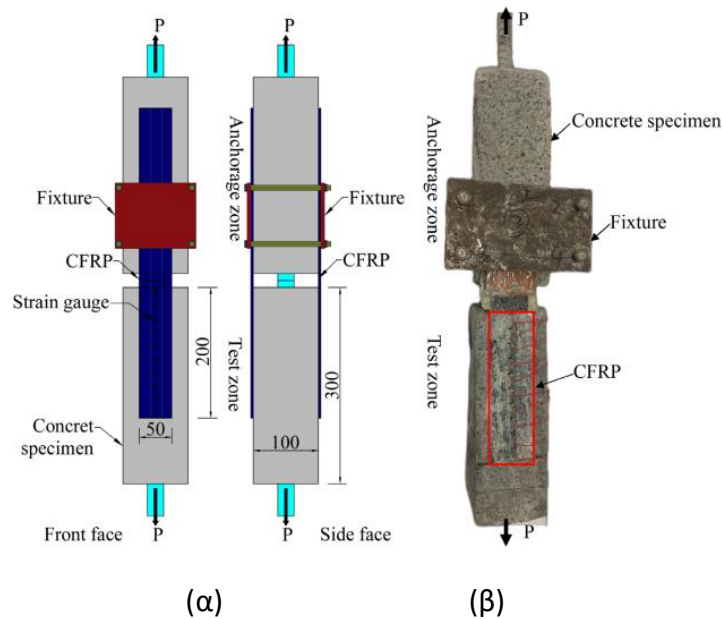
Σχήμα 2.22: Τυπικές μορφές αστοχίας: (α) Μορφή I, (β) Μορφή II και (γ) Μορφή III (Obaida et al.2021).



Σχήμα 2.23: Διαγράμματα αντοχής συνάφειας – ολίσθησης για δοκίμια με τσιμεντοειδή και γεωπολυμερή μήτρα (Obaida et al.2021).

Εναλλακτικά, οι Liu et al. (2022) μελέτησαν την συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και IAM γεωπολυμερούς μήτρας πραγματοποιώντας δοκιμές διπλής διάτμησης (double-lap shear tests). Σύμφωνα με τους συγγραφείς, η μέθοδος αυτή υπερτερεί συγκριτικά με την μέθοδο της απλής διάτμησης, λόγω ύπαρξης συμμετρίας, κατά συνέπεια, τον καλύτερο έλεγχο και την ελαχιστοποίηση της έκκεντρης φόρτισης. Συνολικά διεξήχθησαν 15 δοκιμές σε δοκούς, ενώ, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.24, η πειραματική διάταξη περιλάμβανε μια ζώνη 100 mm x 100 mm x 300 mm για την δοκιμή (test zone) και μια επιπλέον ζώνη για την αγκύρωση του IAM (anchorage zone). Συμπληρωματικά, εκτός από την χρήση γεωπολυμερούς μήτρας εκτελέστηκαν δοκιμές και με ρητινούχο κονίαμα, ως εκ τούτου, προέκυψε η σύγκριση μεταξύ τους. Ακόμη, το ύφασμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν από άνθρακα, ενώ το γεωπολυμερές κονίαμα παρασκευάστηκε με ανάμειξη ιπτάμενης τέφρας και σκόνης σκυριάς με αλκαλικό ενεργοποιητή. Έπειτα από την διεξαγωγή των πειραμάτων εμφανίστηκε μια ουσιαστική διαφορά στον τρόπο αστοχίας μεταξύ των δύο σύνθετων υλικών. Στην περίπτωση των δοκιμών γεωπολυμερούς μήτρας επήλθε αστοχία στο ίδιο το κονίαμα, σε αντίθεση μ' εκείνων ρητινούχου κονιάματος όπου παρατηρήθηκε θραύση του υποστρώματος. Ενδεικτικές εικόνες των μορφών αστοχίας των στοιχείων παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.25. Ακολούθησε ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι το σύστημα ενίσχυσης με γεωπολυμερή μήτρα επέδειξε εν γένει

ικανοποιητική συμπεριφορά. Σαφέστερα, αυτό γίνεται αντιληπτό καθώς η αντοχή συνάφειας (μέγιστη διατμητική τάση) άγγιξε το ποσοστό 93.6%-97.6% της αντίστοιχης αντοχής συνάφειας του συστήματος με ρητινούχο κονίαμα. Ομοίως, η μέγιστη διατμητική τάση και η δυσκαμψία κυμάνθηκαν σε ποσοστά 91%-94% και 95.7%-132.9% αντίστοιχα, ενώ η διατμητική τάση έναντι τιμών ολίσθησης πλησίασε σε ποσοστά 68.5%-98.2%.



Σχήμα 2.24: (α) Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης, (β) Πειραματική διάταξη διπλής διάτμησης (Liu et al.2022).



Σχήμα 2.25: Εικόνες αστοχίας δοκιμών (α) με γεωπολυμερές κονίαμα, (β) με ρητινούχο κονίαμα (Liu et al.2022).

2.3 Σύνοψη Ανασκόπησης

Καθώς ολοκληρώθηκε η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας όσον αφορά την χρήση IAM με γεωπολυμερή μήτρα, αναντίρρητα προκύπτει το συμπέρασμα ότι η καινοτόμος αυτή τεχνική επιδεικνύεται ως ιδιαίτερα ελπιδοφόρα για την ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών, ενώ συμβαδίζει και με την παγκόσμια δέσμευση για οικολογικές μεθόδους οικοδόμησης. Οι μελέτες που εξετάστηκαν έχουν διαφωτίσει τις διαφορετικές πτυχές και πιθανές εφαρμογές αυτής της προσέγγισης, επισημαίνοντας τις δυνατότητές της ως μια βιώσιμη και αποτελεσματική λύση ενίσχυσης. Ωστόσο, περαιτέρω έρευνα και πρακτικές εφαρμογές απαιτούνται εφόσον αναμφίβολα θα συνδράμουν στην εκτενέστερη κατανόηση επί του θέματος.

Κεφάλαιο 3 Πειραματικό πρόγραμμα

3.1 Παράμετροι διερεύνησης

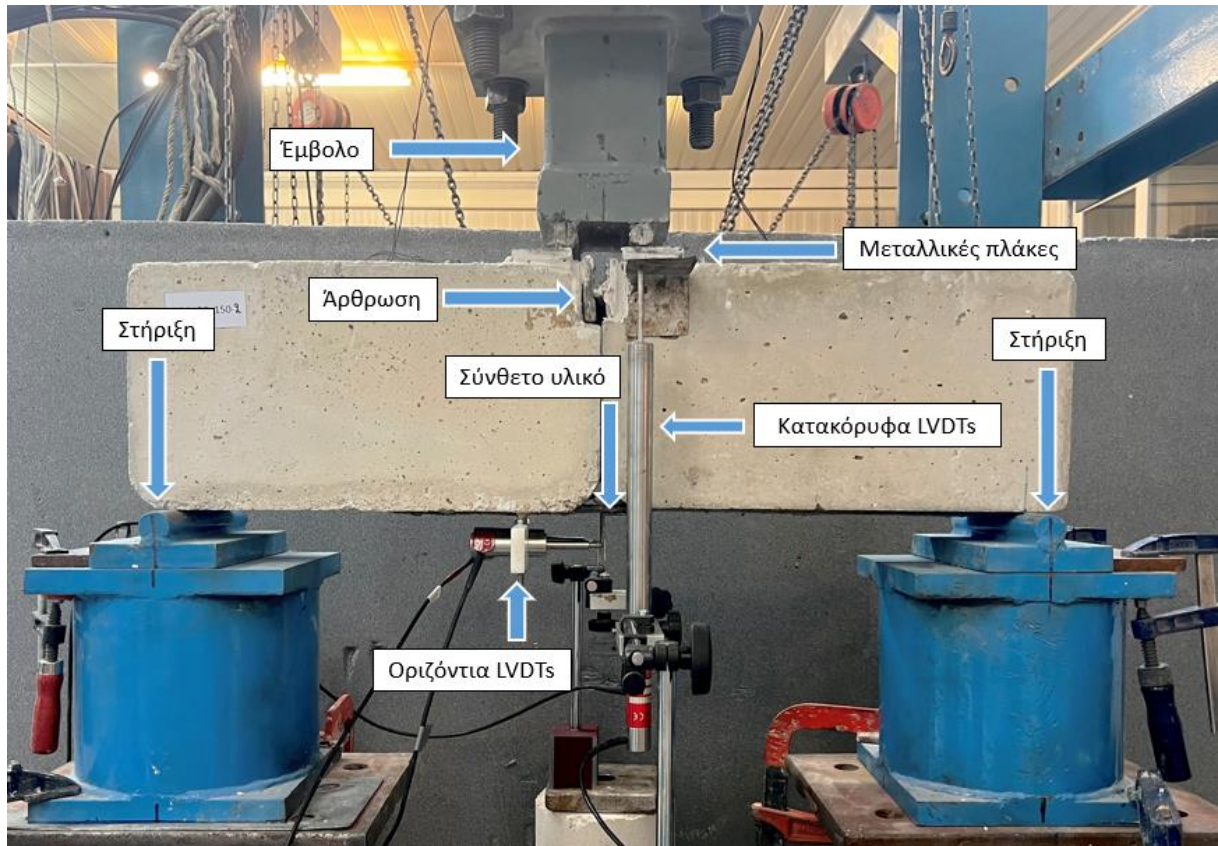
Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ως παράγοντες διερεύνησης τέθηκαν οι εξής: α) το είδος κονιάματος ως μήτρα στο σύνθετο υλικό, β) το μήκος επικόλλησης και γ) το πλήθος των στρώσεων πλέγματος άνθρακα.

Πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές πειραμάτων:

- Η Σειρά Α, με δοκίμια ΟΣ με ΙΑΜ τσιμεντοειδούς μήτρας με μήκη επικόλλησης 50 mm, 75 mm, 100 mm, 150 mm και με 1 ή 3 στρώσεις πλέγματος άνθρακα.
- Η Σειρά Β, με δοκίμια ΟΣ με ΙΑΜ γεωπολυμερούς μήτρας με μήκη επικόλλησης 50 mm, 75 mm, 100 mm, 150 mm και με 1 ή 3 στρώσεις πλέγματος άνθρακα.

3.2 Πειραματική διάταξη

Στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών πραγματοποιήθηκαν 22 πειράματα έμμεσης διάτμησης. Σε κάθε πείραμα χρησιμοποιήθηκαν 2 πρισματικά δοκίμια ΟΣ, τα οποία προηγουμένως είχαν εκτραχυνθεί στην επιφάνεια πάνω στην οποία θα επικολλούταν το σύνθετο υλικό. Αυτά τα 2 δοκίμια ενώνονται μεταξύ τους με μία άρθρωση που βρίσκεται στο άνω μέρος, ενώ στην κάτω πλευρά τοποθετείται το σύνθετο υλικό. Στο ένα μπλοκ σκυροδέματος, το ΙΑΜ επικολλάται σταθερά σε μήκος ίσο με 300 mm, ενώ στο δεύτερο μπλοκ το μήκος επικόλλησης διέφερε (50 mm, 75 mm, 100 mm ή 150 mm). Το κάθε σετ δοκιμίων στηρίζεται σε δύο αρθρώσεις, οι οποίες απέχουν μεταξύ τους 700 mm. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται απεικόνιση της πειραματικής διάταξης.

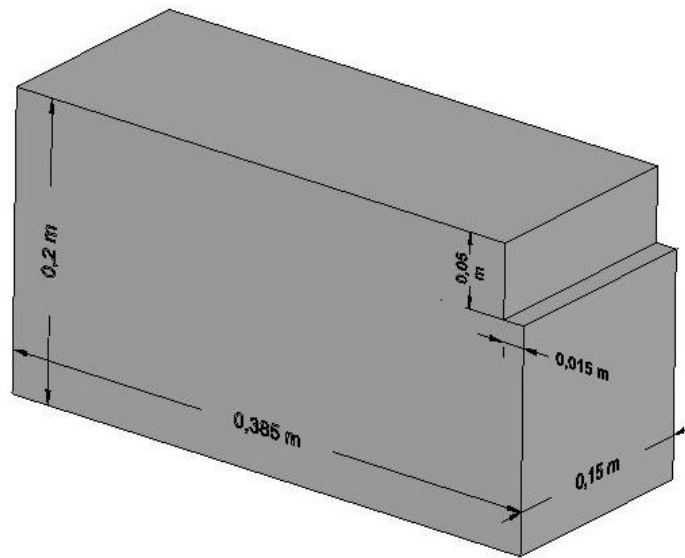


Σχήμα 3.1: Πειραματική διάταξη

Η επιβολή του φορτίου πραγματοποιήθηκε μέσω σερβό-υδραυλικού συστήματος με ρυθμό επιβολής μετακινήσεων ίσο με 0.01 mm/sec . Το φορτίο μεταφέρεται σε δύο σημεία μέσω άκαμπτου μεταλλικού εξαρτήματος, το οποίο βιδώθηκε στο έμβολο. Στα αντίστοιχα σημεία πάνω στο δοκίμιο επικολλήθηκαν με γύψο μεταλλικές πλάκες πλάτους 50 mm , με σκοπό την αποφυγή συγκέντρωσης τάσης. Δύο οριζόντια LVDT's τοποθετήθηκαν στο κάτω μέρος, ακριβώς στο σημείο ένωσης των δύο δοκιμίων ώστε να καταμετρηθεί η ολίσθηση. Στη σειρά πειραμάτων με το γεωπολυμερές κονίαμα Α χρησιμοποιήθηκε ένα κατακόρυφο LVTD στο πλαϊνό τμήμα για την μέτρηση της βύθισης, ενώ κατά τη δεύτερη σειρά πειραμάτων με το γεωπολυμερές κονίαμα Β προστέθηκε ένα ακόμα κατακόρυφο LVTD από το άλλο πλαϊνό τμήμα για καλύτερες μετρήσεις.

3.3 Γεωμετρία δοκιμίων

Τα δοκίμια ΟΣ, που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, είχαν διαστάσεις $200\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 385\text{ mm}$. Στην άνω γωνία κάθε δοκιμίου υπάρχει μία εγκοπή $50\text{ mm} \times 15\text{ mm}$, η οποία εξυπηρετεί στην τοποθέτηση της άρθρωσης σε αυτό το σημείο. Κάθε δοκίμιο διέθετε οπλισμό από ράβδους Φ8 με νευρώσεις στην κάτω παρειά και λείες ράβδους Φ6. Σχηματική απεικόνιση του πρισματικού δοκιμίου ΟΣ παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Σχηματική απεικόνιση του πρισματικού δοκιμίου ΟΣ.

3.4 Ιδιότητες υλικών

3.4.1 Σκυρόδεμα

Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν από έτοιμο εργοταξιακό γαρμπιλοσκυρόδεμα, που ανήκε στην κατηγορία αντοχής C12/15 με θλιπτική αντοχή 20.6 MPa . Η παραπάνω τιμή προέκυψε έπειτα από δοκιμές θλίψης τριών κυβικών δοκιμίων πλευράς 150 mm .

3.4.2 Τσιμεντοειδές κονίαμα

Για την παρασκευή του τσιμεντοειδούς κονιάματος, έγινε χρήση ενός εμπορικά διαθέσιμου τσιμεντοκονιάματος γενικής χρήσης, με ενεργά ποζολανικά συστατικά, το οποίο έχει σχεδιαστεί για να χρησιμοποιείται εξωτερικά σε δομικά στοιχεία. Στον Πίνακα 3.1

παρουσιάζονται οι μηχανικές του ιδιότητες, σύμφωνα με τον κατασκευαστή. Ο λόγος νερού/κονιάματος που χρησιμοποιήθηκε είναι 0,2.

Πίνακας 3.1: Μηχανικές ιδιότητες τσιμεντοκονιάματος.

Θλιπτική Αντοχή	Τάξεως M20
Καμπτική Αντοχή	0.15 N/mm ²

Πραγματοποιήθηκαν 2 αναμείξεις για το τσιμεντοειδές κονίαμα, καθώς η εφαρμογή τους στα δοκίμια έγινε τμηματικά. Μέρος των κονιαμάτων που παρασκευάστηκαν από κάθε ανάμειξη υποβλήθηκε σε δοκιμή εξάπλωσης, ώστε να ελεγχθεί η εργασιμότητά τους. Αρχικά, το κονίαμα τοποθετήθηκε σε έναν πλαστικό κόλουρο κώνο κατά το ήμισυ του ύψους και συμπυκνώθηκε με μεταλλική ράβδο μέσω ελαφρών χτυπημάτων. Στη συνέχεια, συμπληρώθηκε το υπόλοιπο μέρος, συμπυκνώθηκε με τον ίδιο τρόπο και ακολούθησε η επιπέδωση της επιφάνειάς του. Το καλούπι με το κονίαμα ήταν τοποθετημένο πάνω σε επίπεδο μεταλλικό δίσκο, που ονομάζεται δίσκος εξάπλωσης. Μετά την αφαίρεση του καλουπιού, πραγματοποιήθηκαν 25 κτύποι με σκοπό να μετρηθεί η εξάπλωση του μίγματος στο τέλος των κτύπων. Τότε, με τη βοήθεια μεταλλικού χάρακα μετρήθηκαν 2 διάμετροι της κυκλικής μάζας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Εν τέλη, όλα τα μείγματα κρίθηκαν ομοιόμορφα και συνεκτικά.



Σχήμα 3.3: Μέτρηση εργασιμότητας με τη μέθοδο του δίσκου εξάπλωσης

Από κάθε ανάμειξη πάρθηκαν δείγματα σε ειδικές μεταλλικές μήτρες διαστάσεων 40 mm × 40 mm × 160 mm, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4, ώστε να υπολογιστούν οι μηχανικές τους ιδιότητες οι οποίες παρατίθενται στον Πίνακα 3.2. Έπειτα από δοκιμές κάμψης τριών σημείων και δοκιμές θλίψης προέκυψαν για τα δύο μείγματα κατά μέσο όρο τα εξής: α) έμμεση εφελκυστική αντοχή από κάμψη 6.3 MPa, θλιπτική αντοχή 30.2 MPa και τυπικές αποκλίσεις 0.56 MPa και 2.25 MPa αντίστοιχα και β) έμμεση εφελκυστική αντοχή από κάμψη 8,94 MPa, θλιπτική αντοχή 25,3 MPa και τυπικές αποκλίσεις 0.63 MPa και 1.02 MPa αντίστοιχα.

Πίνακας 3.2: Μηχανικές ιδιότητες δοκιμών τσιμεντοειδούς κονιάματος.

	Έμμεση εφελκυστική αντοχή από κάμψη (MPa)	Θλιπτική αντοχή (MPa)
1 ^ο μείγμα	6.3	30.2
Τυπική απόκλιση	0.56	2.25
2 ^ο μείγμα	8.94	25.3
Τυπική απόκλιση	0.63	1.02



Σχήμα 3.4: Δειγματοληψία κονιάματος σε μεταλλικές μήτρες.

Τα μηχανήματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για να πραγματοποιηθούν οι δοκιμές της κάμψης τριών σημείων και της σύνθλιψης των δοκιμίων των κονιαμάτων παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.5.



α)

β)

Σχήμα 3.5: α) Μηχανή κάμψης τριών σημείων, β) Μηχανή σύνθλιψης.

3.4.3 Γεωπολυμερές κονίαμα

Για την παρασκευή του γεωπολυμερούς κονιάματος (GDA) χρησιμοποιήθηκε μετακαολίνη, ασβεστολιθική άμμος διαμέτρου 0.5 - 1mm και 0 – 0.5 mm, ίνες πολυπροπυλενίου 6 mm, σκόνη περιστροφικών καμίνων, νερό και η ενεργοποίηση πραγματοποιήθηκε μέσω διαλύματος πυριτικού καλίου.

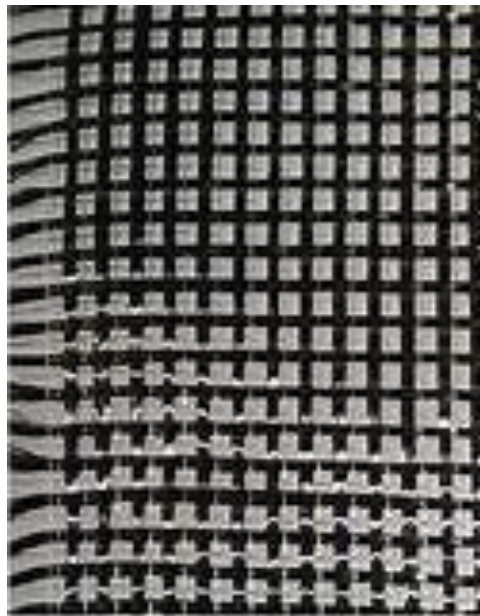
Πραγματοποιήθηκαν 3 αναμείξεις για το γεωπολυμερές κονίαμα και ακολουθήθηκαν οι ίδιες διαδικασίες με το τσιμεντοκονίαμα, οι οποίες αναφέρθηκαν παραπάνω, ώστε να προσδιοριστούν οι μηχανικές του ιδιότητες, που αναφέρονται στον Πίνακα 3.3. Έπειτα από δοκιμές κάμψης τριών σημείων και δοκιμές θλίψης προέκυψαν για τα τρία μείγματα κατά μέσο όρο τα εξής: α) έμμεση εφελκυστική αντοχή από κάμψη 7.25 MPa, θλιπτική αντοχή 40.29 MPa και τυπικές αποκλίσεις 1.12 MPa και 3.45 MPa αντίστοιχα, β) έμμεση εφελκυστική αντοχή από κάμψη 9.3 MPa, θλιπτική αντοχή 39.9 MPa και τυπικές αποκλίσεις 0.1 MPa και 1.06 MPa αντίστοιχα και γ) έμμεση εφελκυστική αντοχή από κάμψη 9.7 MPa, θλιπτική αντοχή 36.7 MPa και τυπικές αποκλίσεις 0.17 MPa και 1.34 MPa αντίστοιχα.

Πίνακας 3.3: Μηχανικές ιδιότητες δοκιμών γεωπολυμερούς κονιάματος.

	Έμμεση εφελκυστική αντοχή από κάμψη (MPa)	Θλιπτική αντοχή (MPa)
1 ^ο μείγμα	7.25	40.29
Τυπική απόκλιση	1.12	3.45
2 ^ο μείγμα	9.3	39.9
Τυπική απόκλιση	0.1	1.06
3 ^ο μείγμα	9.7	36.7
Τυπική απόκλιση	0.17	1.34

3.4.4 Πλέγμα

Για την ενίσχυση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε πλέγμα υψηλής αντοχής από ίνες άνθρακα δύο διευθύνσεων κάθετων μεταξύ τους και απεικονίζεται στο Σχήμα 3.6. Οι ιδιότητες του πλέγματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4. Σε κάθε δοκίμιο έγινε χρήση 1 ή 3 στρώσεων πλέγματος.



Σχήμα 3.6: Πλέγμα άνθρακα

Πίνακας 3.4: Ιδιότητες πλέγματος σύμφωνα με τον κατασκευαστή.

Υλικό	Άνθρακας
Επικάλυψη κλώνων ινών	Όχι
Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)	252
Βάρος (g/m ²)	170
Εφελκυστική αντοχή (kN/m)	240
Μέγεθος βρόγχων πλέγματος (mm × mm)	10×10
Ονομαστικό πάχος t _f (mm)	0.048

3.5 Προετοιμασία δοκιμών

3.5.1 Δοκίμια Ο/Σ

Τα πρισματικά δοκίμια σκυροδέματος χρειάστηκε να εκτραχυνθούν στην επιφάνεια πάνω στην οποία θα πραγματοποιούνταν η επικόλληση με το σύνθετο υλικό. Στην συνέχεια στρογγυλεύτηκαν οι γωνίες των δοκιμών, προκειμένου να μην συγκεντρωθούν τάσεις σε αυτό το σημείο. Τέλος, απομακρύνθηκε από το υπόστρωμα κάθε υπόλειμμα σκόνης, αδρανών κ.α.

3.5.2 Διαδικασία επικόλλησης

Η διαδικασία επικόλλησης που ακολουθήθηκε περιγράφεται λεπτομερώς από τα παρακάτω βήματα και ήταν κοινή για τις δύο σειρές δοκιμών:

Βήμα 1^ο : Σχεδιασμός σημαδιών, τα οποία όριζαν το πλαίσιο όπου θα εφαρμοστεί η ενίσχυση, ανάλογα με το κάθε μήκος επικόλλησης.

Βήμα 2^ο : Κοπή του πλέγματος άνθρακα στις κατάλληλες διαστάσεις, ώστε να ταιριάζει ακριβώς, βάση των παραπάνω σημαδιών.

Βήμα 3^ο : Παρασκευή του κάθε κονιάματος με τις κατάλληλες αναλογίες, με χρήση ζυγαριάς ακριβείας και αναδευτήρα.

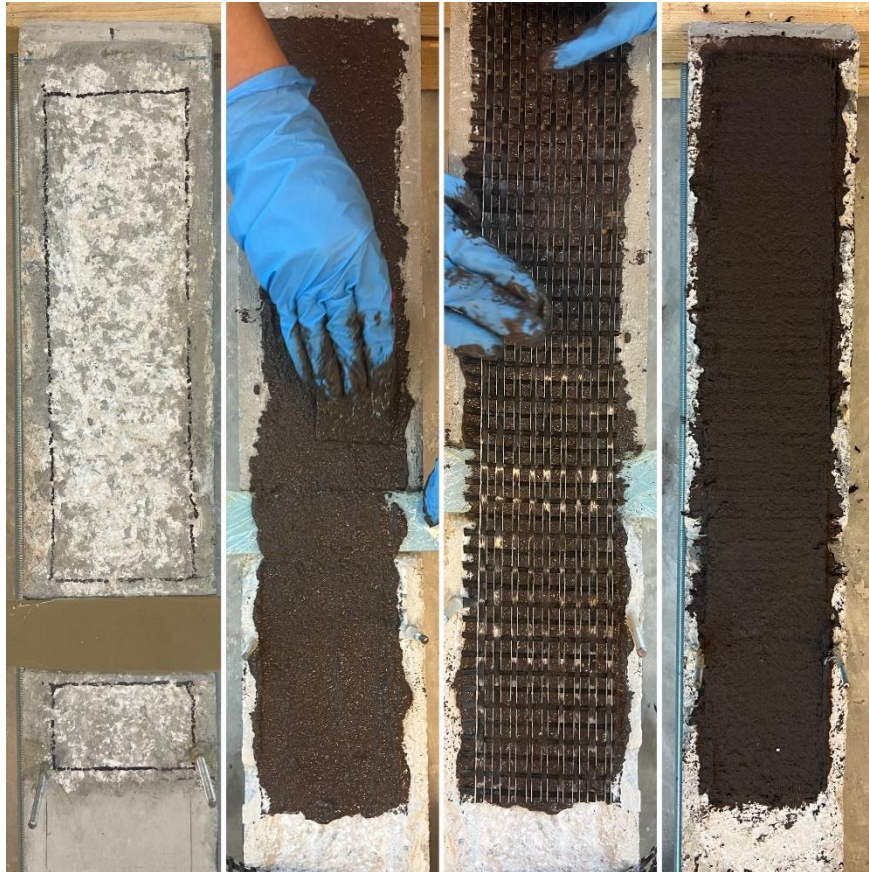
Βήμα 4^ο : Εφαρμογή 1^{ης} στρώσης κονιάματος πάχους 2mm - 3mm.

Βήμα 5^ο : Τοποθέτηση 1^{ης} στρώσης πλέγματος και άσκηση πίεσης ώστε να εισχωρήσει το κονίαμα στους βρόγχους του πλέγματος.

Τα δύο τελευταία βήματα ακολουθήθηκαν 1 ή 3 φορές ανάλογα με τον αριθμό στρώσεων πλέγματος που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε δοκίμιο.

Βήμα 6^ο : Τοποθέτηση τελικής στρώσης κονιάματος και φινιρίσμα.

Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται η διαδικασία επικόλλησης ΙΑΜ, όπως περιγράφεται στα παραπάνω βήματα.



Σχήμα 3.7: Διαδικασία επικόλλησης IAM.

Στο Σχήμα 3.6 είναι διακριτό ένα κομμάτι από αφρώδες σύνθετο υλικό τυλιγμένο με λεπτή πλαστική ταινία, το οποίο εξυπηρετεί στην ταυτόχρονη ενίσχυση των δύο δοκιμών Ο/Σ χωρίς να δημιουργείται κενό ανάμεσα τους. Πριν την έναρξη των δοκιμών κάμψης, αυτό το κομμάτι αφαιρέθηκε. Επίσης, τα δοκίμια τσιμεντοειδούς μήτρας χρειάστηκαν διαβροχή του σκυροδέματος πριν την εφαρμογή της 1^{ης} στρώσης, με σκοπό την αποφυγή απορρόφησης υγρασίας του υποστρώματος από το κονίαμα.

3.5.3 Συντήρηση δοκιμών

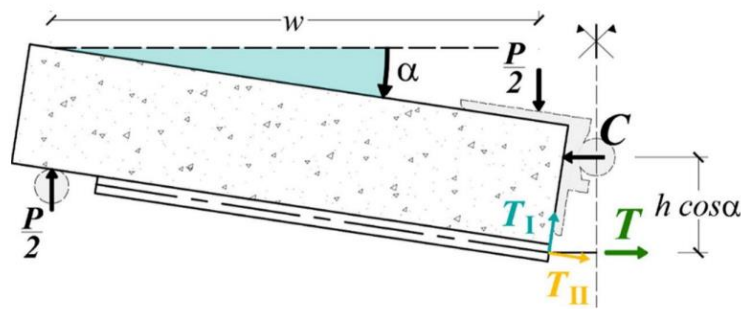
Μετά την επικόλληση του IAM, τα δοκίμια παρέμειναν στο χώρο του εργαστηρίου και διατηρήθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8, χωρίς να χρήζουν ιδιαίτερης μεταχείρισης .



Σχήμα 3.8: Συντήρηση δοκιμίων στο χώρο του εργαστηρίου.

Κεφάλαιο 4 Πειραματικά Αποτελέσματα και Σχολιασμός

Στο κεφάλαιο αυτό, πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία των αποτελεσμάτων των δοκιμών, μέσω υπολογιστικού φύλλου excel. Στο Σχήμα 4.1, παρουσιάζεται το Διάγραμμα ελευθέρου σώματος, από το οποίο προέκυψαν οι παρακάτω εξισώσεις λόγω ισορροπίας του συστήματος.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ελευθέρου σώματος.

Οι δυνάμεις T και T_{II} υπολογίστηκαν μέσω των Εξ.(4.1) και Εξ.(4.2) αντίστοιχα.

$$T = \frac{P \cdot w}{2 \cdot h \cdot \cos \alpha} \quad (4.1)$$

$$T_{II} = T \cdot \cos \alpha = \frac{P \cdot w}{2 \cdot h} \quad (4.2)$$

όπου P είναι το φορτίο του εμβόλου, w η απόσταση μεταξύ της στήριξης και του σημείου άσκησης του φορτίου, h η απόσταση από το μέσο της άρθρωσης έως το μέσο του σύνθετου υλικού και α η γωνία περιστροφής του δοκιμίου

Οι ορθές τάσεις προκύπτουν από την Εξ.(4.3).

$$\sigma_f = \frac{T_{II}}{A_f} \quad (4.3)$$

όπου A_f είναι το εμβαδόν του πλέγματος, το οποίο υπολογίζεται από την Εξ.(4.4).

$$A_f = k \cdot n \cdot A_{\kappa\lambda\omega\nu\nu} \quad (4.4)$$

όπου k είναι ο αριθμός των στρώσεων πλέγματος, $n=9$ ο αριθμός των κλώνων και $A_{κλώνου}$ το εμβαδόν του κλώνου το οποίο υπολογίζεται μέσω της Εξ.(4.5).

$$A_{κλώνου} = \frac{t_f * 1000}{\eta} \quad (4.5)$$

όπου $t_f = 0,048$ mm είναι το ονομαστικό πάχος του πλέγματος και το η προκύπτει από την Εξ.(4.6)

$$\eta = \frac{1000}{x} + 1 \quad (4.6)$$

όπου $x=100$ mm είναι η απόσταση των κλώνων.

Τελικώς, προέκυψε ότι το $A_f = 4,2772$ mm² στην περίπτωση της μίας στρώσης πλέγματος και $A_f = 12,8317$ mm² στην περίπτωση των τριών στρώσεων.

4.1 Αποτελέσματα Σειράς Α (μήτρα τσιμεντοειδούς)

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών της Σειράς Α. Τα δοκίμια φέρουν την ονομασία CM_αC_X_Y, όπου το CM αναφέρεται στη μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης, το $\alpha = 1$ ή 3 ανάλογα τις στρώσεις πλέγματος άνθρακα, το $X = 50$ ή 75 ή 100 ή 150 είναι το μήκος επικόλλησης και τέλος το Y παίρνει τις τιμές 1 έως 5, καθώς για κάθε μήκος επικόλλησης έχουν κατασκευαστεί δύο όμοια δοκίμια και σε ορισμένες περιπτώσεις χρειάστηκε να κατασκευαστούν μέχρι και 5, ώστε να ληφθούν τα απαραίτητα αποτελέσματα.

Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζονται εικόνες αστοχίας των δοκιμών της Σειράς Α. Όλα τα δοκίμια με 1 στρώση πλέγματος άνθρακα, εκτός του CM_1C_100_4 που παρουσίασε συνδυαστική αστοχία, αστόχησαν αποκλειστικά με ολίσθηση ινών εντός της μήτρας. Στην περίπτωση των τριών στρώσεων πλέγματος, η αστοχία ήταν Τύπου II και III. Σημειώθηκε διαστρωματική αποκόλληση στη διεπιφάνεια μήτρας-ινών στα δοκίμια CM_3C_50_1, CM_3C_50_2, CM_3C_100_1 (συνδυαστικά με Τύπου III), CM_3C_100_2 και CM_3C_150_1 (συνδυαστικά με Τύπου III). Σε αυτή την περίπτωση ο δεσμός στην διεπιφάνεια σκυροδέματος-κονιάματος είναι πιο ισχυρός από το δεσμό στο εσωτερικό του σύνθετου υλικού, το οποίο αστοχεί και μέρος του παραμένει προσκολλημένο στο υπόστρωμα. Τα δοκίμια CM_3C_75_2 και CM_3C_150_2 παρουσίασαν αποκλειστική αποκόλληση στη διεπιφάνεια μήτρας-σκυροδέματος με παράσυρση της επικάλυψης.

Πίνακας 4.1: Πειραματικά αποτελέσματα Σειράς Α.

Δοκίμιο	Μήκος επικόλλησης (mm)	z (mm)	w (mm)	P _{max} (kN)	σ _{fmax} (MPa)	Μορφή αστοχίας
CM_1C_50_2	50	183	316	3.44	695.02	Τύπου Ι*
CM_1C_50_4		184	323	3.3	677.2	Τύπου Ι
CM_1C_50_5		182	320	3	616.62	Τύπου Ι
CM_1C_75_1	75	177	318	3.7	777.07	Τύπου Ι
CM_1C_75_2		180	315	4.32	883.83	Τύπου Ι
CM_1C_100_3	100	181	328	3.9	826.17	Τύπου Ι
CM_1C_100_4		183	315	6.34	1275.42	Τύπου Ι, Τύπου ΙΙ**
CM_1C_150_1	150	184	325	0.6	123.89	Τύπου Ι
CM_1C_150_2		188	315	5.61	1098.72	Τύπου Ι
CM_3C_50_1	50	181	314	6.78	457.99	Τύπου ΙΙ
CM_3C_50_2		183	315	6	402.44	Τύπου ΙΙ
CM_3C_75_1	75	180	331	6.7	480.09	Τύπου ΙΙΙ***
CM_3C_75_2		184	325	8.25	567.78	Τύπου ΙΙΙ
CM_3C_100_1	100	186	313	7.45	505.25	Τύπου ΙΙ, Τύπου ΙΙΙ
CM_3C_100_2		181	315	7.6	515.39	Τύπου ΙΙ
CM_3C_150_1	150	182	315	11.3	762.09	Τύπου ΙΙ, Τύπου ΙΙΙ
CM_3C_150_2		182	315	12.31	830.23	Τύπου ΙΙΙ

*Τύπου Ι = ολίσθηση ινών εντός της μήτρας, **Τύπου ΙΙ = διαστρωματική αποκόλληση στη διεπιφάνεια μήτρας/ινών, ***Τύπου ΙΙΙ = αποκόλληση στη διεπιφάνεια μήτρας/σκυροδέματος με παράσυρση της επικάλυψης.



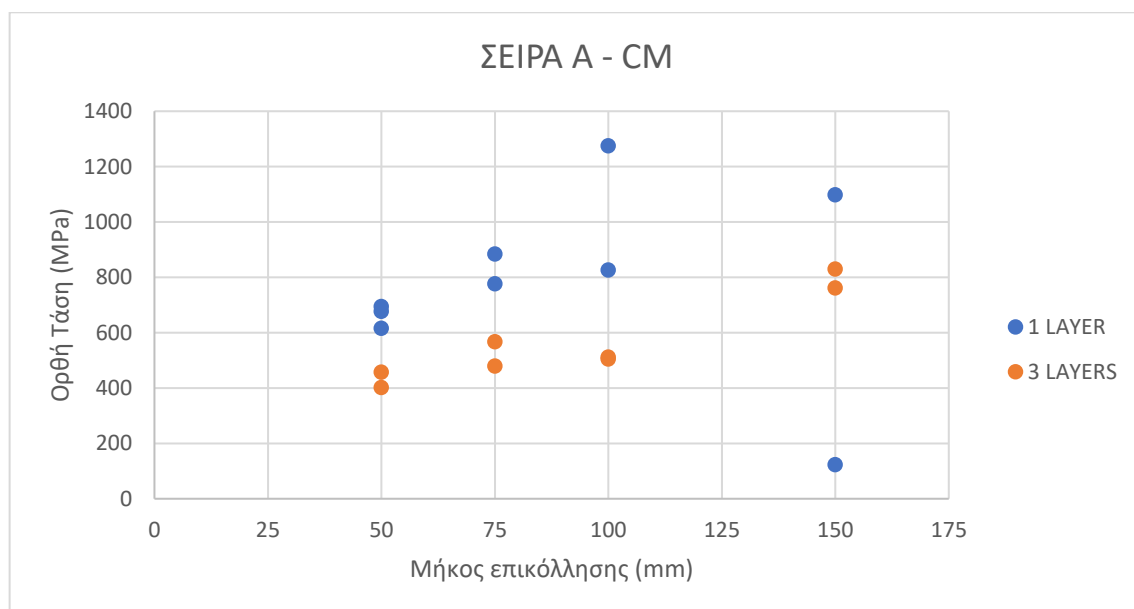
(α)

(β)

(γ)

Σχήμα 4.2: Εικόνες αστοχίας δοκιμίων Σειράς Α: (α) Τύπου Ι, (β) Τύπου ΙΙ και (γ) Τύπου ΙΙΙ.

Στο Σχήμα 4.3 που ακολουθεί παρουσιάζονται συνολικά οι μέγιστες τάσεις των δοκιμίων της Σειράς Α, συναρτήσει των μηκών επικόλλησης.



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα $\sigma_{\max}$ - l_b δοκιμίων Σειράς Α.

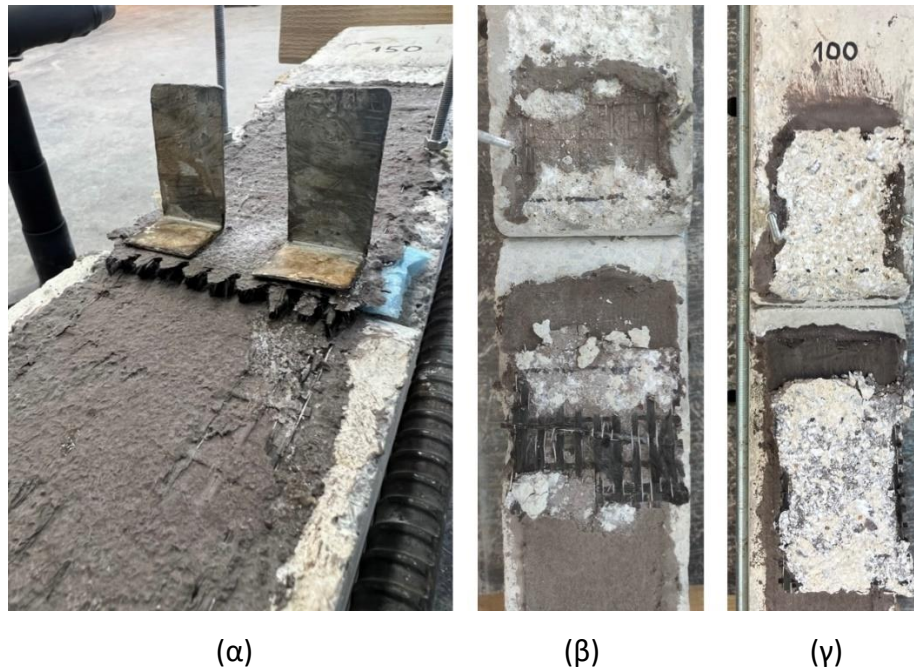
4.2 Αποτελέσματα Σειράς Β (μήτρα γεωπολυμερούς)

Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών της Σειράς Α. Τα δοκίμια φέρουν την ονομασία GDA_αC_X_Y, όπου το GDA αναφέρεται στη μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης, το α = 1 ή 3 ανάλογα τις στρώσεις πλέγματος άνθρακα, το X = 50 ή 75 ή 100 ή 150 είναι το μήκος επικόλλησης και τέλος το Y παίρνει τις τιμές 1 και 2, καθώς για κάθε μήκος επικόλλησης έχουν κατασκευαστεί δύο όμοια δοκίμια.

Πίνακας 4.2: Πειραματικά αποτελέσματα Σειράς Β.

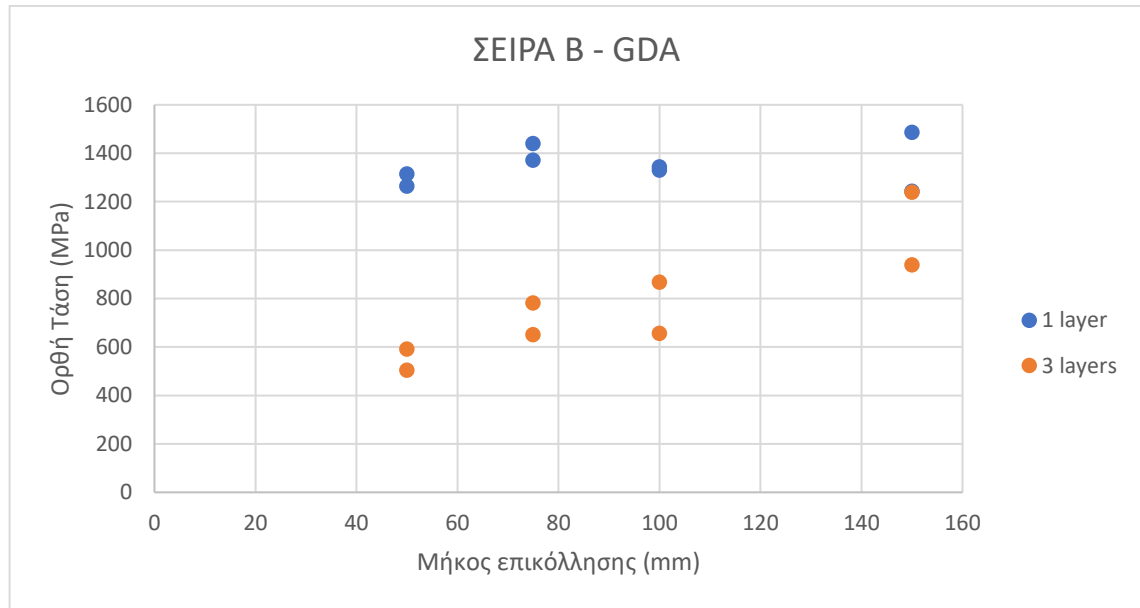
Δοκίμιο	Μήκος επικόλλησης (mm)	z (mm)	w (mm)	P _{max} (kN)	σ _{fmax} (MPa)	Μορφή αστοχίας
GDA_1C_50_1	50	178	318	6.29	1314.27	Τύπου Ι
GDA_1C_50_2		176	312	6.1	1264.1	Τύπου Ι
GDA_1C_75_1	75	174	314	6.5	1371.2	Τύπου Ι
GDA_1C_75_2		178	316	6.94	1439.34	Τύπου Ι
GDA_1C_100_1	100	180	320	6.4	1330.05	Τύπου Ι
GDA_1C_100_2		183	327	6.43	1343.79	Τύπου Ι
GDA_1C_150_1	150	180	311	7.36	1486.5	Τύπου Ι
GDA_1C_150_2		179	312	6.1	1242.92	Τύπου Ι
GDA_3C_50_1	50	182	322	8.58	591.44	Τύπου ΙΙΙ
GDA_3C_50_2		179	313	7.41	504.84	Τύπου ΙΙΙ
GDA_3C_75_1	75	183	315	9.7	650.61	Τύπου ΙΙΙ
GDA_3C_75_2		179	315	11.4	781.45	Τύπου ΙΙ, Τύπου ΙΙΙ
GDA_3C_100_1	100	175	307	9.6	656.23	Τύπου ΙΙΙ
GDA_3C_100_2		182	314	12.91	867.74	Τύπου ΙΙΙ
GDA_3C_150_1	150	183	310	14.23	939.28	Τύπου ΙΙΙ
GDA_3C_150_2		181	318	18.1	1239.13	Τύπου ΙΙΙ

Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζονται εικόνες αστοχίας των δοκιμών της Σειράς Β. Όλα τα δοκίμια με 1 στρώση πλέγματος άνθρακα αστόχησαν αποκλειστικά με ολίσθηση ινών εντός της μήτρας. Αξίζει να σημειωθεί πως στην περίπτωση του GDA_1C_150_2 η αστοχία σημειώθηκε στην μεριά του μη εξεταζόμενου μήκους επικόλλησης, δηλαδή στη μεγάλη πλευρά (300 mm). Στην περίπτωση των τριών στρώσεων πλέγματος το σύνολο των δοκιμών εμφάνισαν αποκλειστική αποκόλληση στη διεπιφάνεια μήτρας-σκυροδέματος με παράσυρση της επικάλυψης, εκτός του GDA_3C_75_2 όπου παρατηρήθηκε και διαστρωματική αποκόλληση στη διεπιφάνεια μήτρας-ινών. Τέλος, να επισημανθεί πως και το GDA_3C_150_2 αστόχησε από τη μεριά του μη εξεταζόμενου μήκους επικόλλησης.



Σχήμα 4.4: Εικόνες αστοχίας δοκιμών Σειράς Β: (α) Τύπου I, (β) Τύπου II και (γ) Τύπου III.

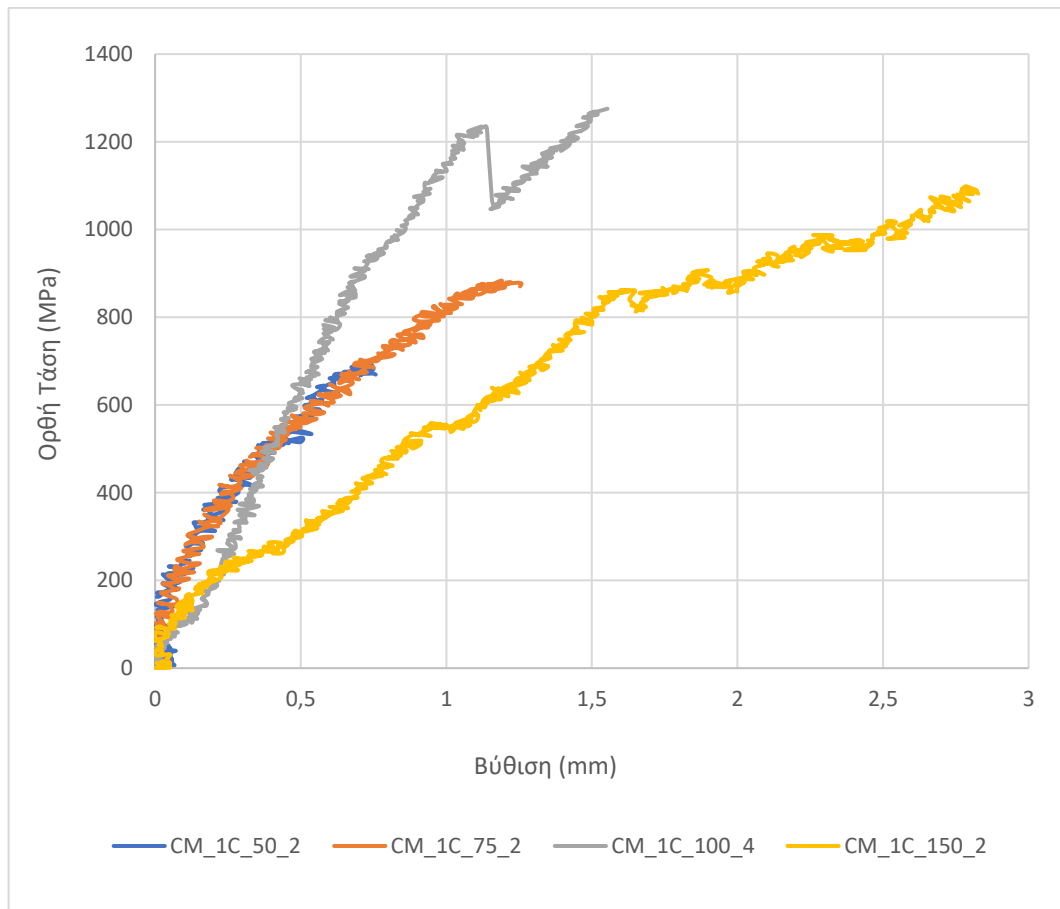
Στο Σχήμα 4.5 που ακολουθεί παρατίθεται συνολικά οι μέγιστες τάσεις των δοκιμών της Σειράς Β, συναρτήσει των μηκών επικόλλησης.



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα $\sigma_{\max}$ - l_b δοκιμών Σειράς Β.

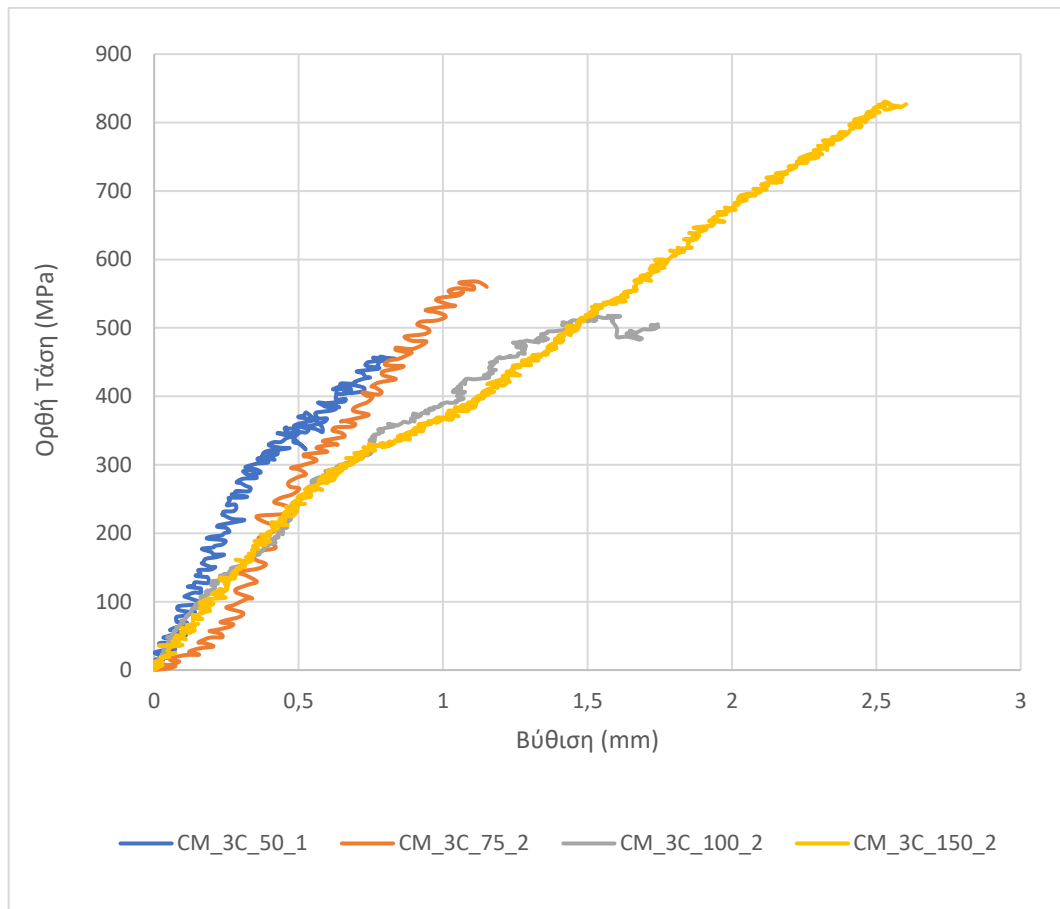
4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζονται οι καμπύλες ορθής τάσης-βύθισης των δοκιμών τσιμεντοειδούς μήτρας με μία στρώση πλέγματος άνθρακα για όλα τα μήκη επικόλλησης. Παρατηρείται ότι μικρότερες ορθές τάσεις προέκυψαν στο δοκίμιο με μήκος επικόλλησης 50 mm, ακολούθησε αυτό των 75 mm, έπειτα των 150 mm και τέλος αυτό με τις μεγαλύτερες ορθές τάσεις των 100 mm. Όσον αφορά τις βυθίσεις, μικρότερη τιμή βύθισης προέκυψε στο δοκίμιο των 50 mm, ακολούθησαν τα 75 mm, έπειτα τα 100 mm και τέλος τα 150 mm με την μεγαλύτερη βύθιση.



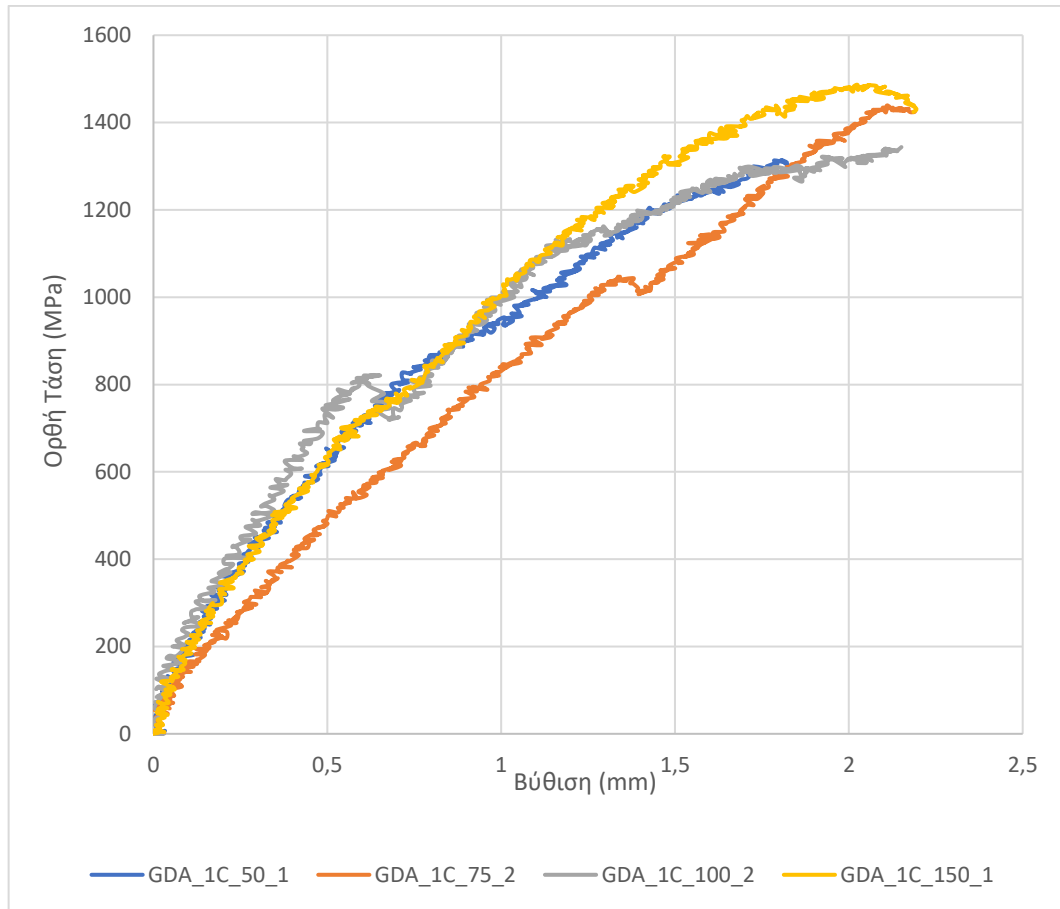
Σχήμα 4.6: Καμπύλες ορθής τάσης- βύθισης των δοκιμών τσιμεντοειδούς μήτρας με μία στρώση πλέγματος άνθρακα για όλα τα μήκη επικόλλησης.

Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζονται οι καμπύλες ορθής τάσης-βύθισης των δοκιμών τσιμεντοειδούς μήτρας με τρεις στρώσεις πλέγματος άνθρακα για όλα τα μήκη επικόλλησης. Παρατηρείται ότι μικρότερες ορθές τάσεις προέκυψαν στο δοκίμιο με μήκος επικόλλησης 50 mm, ακολούθησε αυτό των 100 mm, έπειτα των 75 mm και τέλος αυτό με τις μεγαλύτερες ορθές τάσεις των 150 mm. Όσον αφορά τις βυθίσεις, μικρότερη τιμή βύθισης προέκυψε στο δοκίμιο των 50 mm, ακολούθησαν τα 75 mm, έπειτα τα 100 mm και τέλος τα 150 mm με την μεγαλύτερη βύθιση.



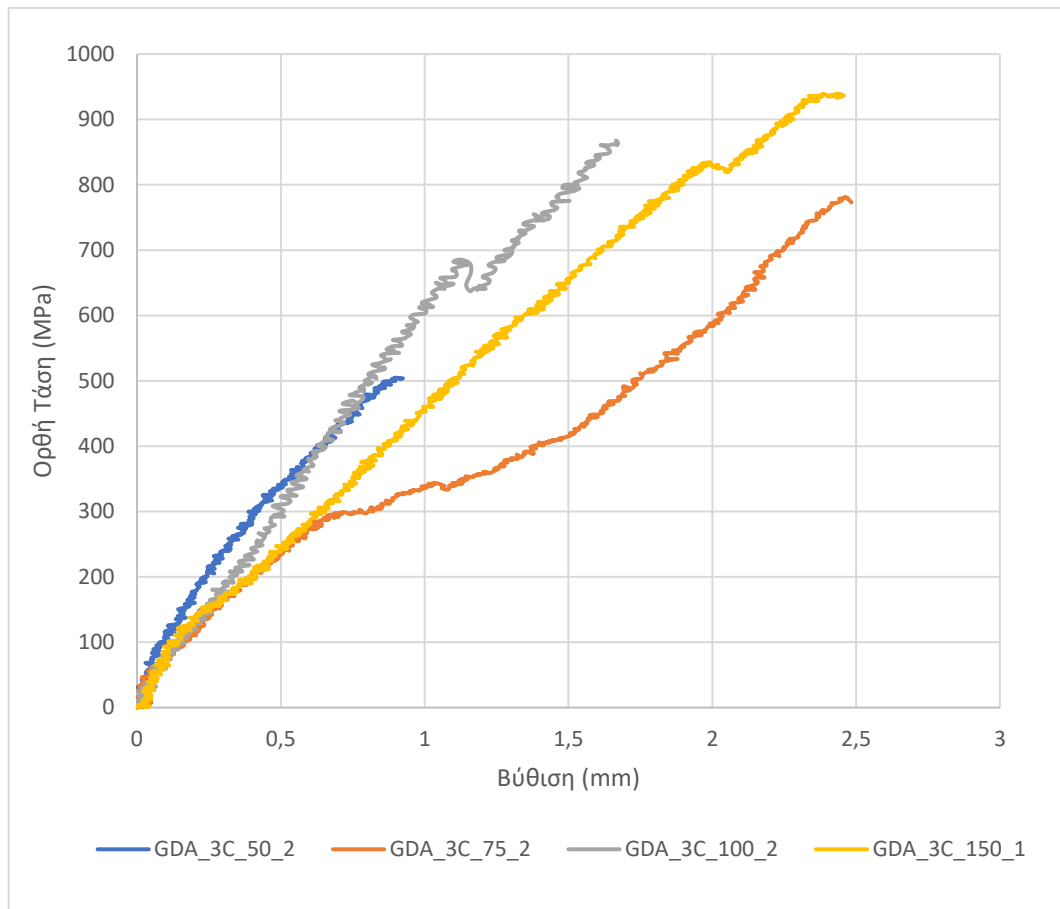
Σχήμα 4.7: Καμπύλες ορθής τάσης- βύθισης των δοκιμών τσιμεντοειδούς μήτρας με τρεις στρώσεις πλέγματος άνθρακα για όλα τα μήκη επικόλλησης.

Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζονται οι καμπύλες ορθής τάσης-βύθισης των δοκιμών γεωπολυμερούς μήτρας με μία στρώση πλέγματος άνθρακα για όλα τα μήκη επικόλλησης. Παρατηρείται ότι μικρότερες ορθές τάσεις προέκυψαν στο δοκίμιο με μήκος επικόλλησης 50 mm, ακολούθησε αυτό των 100 mm, έπειτα των 75 mm και τέλος αυτό με τις μεγαλύτερες ορθές τάσεις των 150 mm. Όσον αφορά τις βυθίσεις, μικρότερη τιμή βύθισης προέκυψε στο δοκίμιο των 50 mm, ακολούθησαν τα 150 mm, έπειτα τα 75 mm και τέλος τα 100 mm με την μεγαλύτερη βύθιση.



Σχήμα 4.8: Καμπύλες ορθής τάσης- βύθισης των δοκιμών γεωπολυμερούς μήτρας με μία στρώση πλέγματος άνθρακα για όλα τα μήκη επικόλλησης.

Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζονται οι καμπύλες ορθής τάσης-βύθισης των δοκιμών γεωπολυμερούς μήτρας με τρεις στρώσεις πλέγματος άνθρακα για όλα τα μήκη επικόλλησης. Παρατηρείται ότι μικρότερες ορθές τάσεις προέκυψαν στο δοκίμιο με μήκος επικόλλησης 50 mm, ακολούθησε αυτό των 75 mm, έπειτα των 100 mm και τέλος αυτό με τις μεγαλύτερες ορθές τάσεις των 150 mm. Όσον αφορά τις βυθίσεις, μικρότερη τιμή βύθισης προέκυψε στο δοκίμιο των 50 mm, ακολούθησαν τα 100 mm, έπειτα τα 150 mm και τέλος τα 75 mm με την μεγαλύτερη βύθιση.



Σχήμα 4.9: Καμπύλες ορθής τάσης- βύθισης των δοκιμών γεωπολυμερούς μήτρας με τρεις στρώσεις πλέγματος άνθρακα για όλα τα μήκη επικόλλησης.

Στον Πίνακα 4.3 γίνεται σύγκριση των μέγιστων φορτίων που καταγράφηκαν στα δοκίμια με IAM γεωπολυμερούς και τσιμεντοειδούς μήτρας αντίστοιχα, πρώτα στην περίπτωση της μίας και έπειτα στην περίπτωση των τριών στρώσεων. Σε κάθε περίπτωση έχει επιλεγθεί να συμπεριληφθεί ο μέσος όρος των μέγιστων φορτίων των δύο δοκιμών κάθε μήκους επικόλλησης. Παρατηρήθηκε πως τα μέγιστα φορτία που σημειώθηκαν στα δοκίμια με IAM γεωπολυμερούς μήτρας ήταν μεγαλύτερα σε σχέση με αυτά των δοκιμών με IAM τσιμεντοειδούς μήτρας. Στην περίπτωση της μίας στρώσης πλέγματος άνθρακα τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 50 mm εμφάνισαν την μεγαλύτερη αύξηση 95.3%, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 75 mm εμφάνισαν αύξηση 68.8%, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 100 mm εμφάνισαν αύξηση 26.5% και τέλος τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 150 mm εμφάνισαν την μικρότερη αύξηση 19.6%. Στην περίπτωση των τριών στρώσεων πλέγματος άνθρακα τα

δοκίμια με μήκος επικόλλησης 50 mm εμφάνισαν την μικρότερη αύξηση 15.8%, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 75 mm εμφάνισαν αύξηση 41.6%, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 100 mm εμφάνισαν τη μεγαλύτερη αύξηση 45.2% και τέλος τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 150 mm εμφάνισαν αύξηση 36.4%.

Πίνακας 4.3: Σύγκριση μέγιστων φορτίων που καταγράφηκαν στα δοκίμια με IAM γεωπολυμερούς και τσιμεντοειδούς μήτρας αντίστοιχα.

Μήκος επικόλλησης (mm)	P _{max} (kN)					
	1 LAYER			3 LAYERS		
	CM	GDA	ΑΝΑΛΟΓΙΑ GDA/CM	CM	GDA	ΑΝΑΛΟΓΙΑ GDA/CM
50	3.2	6.25	1.9531	6.4	7.41	1.1578
75	4	6.75	1.6875	7.45	10.55	1.4161
100	5.1	6.45	1.2647	7.75	11.25	1.4516
150	5.6	6.7	1.1964	11.8	16.1	1.3644

Στον Πίνακα 4.4 γίνεται σύγκριση των μέγιστων ορθών τάσεων που καταγράφηκαν στα δοκίμια με IAM γεωπολυμερούς και τσιμεντοειδούς μήτρας αντίστοιχα, πρώτα στην περίπτωση της μίας και έπειτα στην περίπτωση των τριών στρώσεων πλέγματος άνθρακα. Σε κάθε περίπτωση έχει επιλεχθεί να συμπεριληφθεί η μέγιστη ορθή τάση ανάμεσα στα δύο δοκίμια κάθε μήκους επικόλλησης. Παρατηρήθηκε πως οι μέγιστες ορθές τάσεις που σημειώθηκαν στα δοκίμια με IAM γεωπολυμερούς μήτρας ήταν μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές των δοκιμών με IAM τσιμεντοειδούς. Στην περίπτωση της μίας στρώσης πλέγματος άνθρακα τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 50 mm σημείωσαν την μεγαλύτερη αύξηση 89.1%, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 75 mm σημείωσαν αύξηση 62.9%, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 100 mm εμφάνισαν την μικρότερη αύξηση 5.4% και τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 150 mm εμφάνισαν αύξηση 35.3%. Στην περίπτωση των τριών στρώσεων πλέγματος άνθρακα τα δοκίμια με μήκος 50 mm παρουσίασαν αύξηση 10.2%, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 75 mm εμφάνισαν αύξηση 37.6%, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 100

mm σημείωσαν την μεγαλύτερη αύξηση 71.7% και τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 150 mm εμφάνισαν την μικρότερη αύξηση 13.1%.

Πίνακας 4.4: Σύγκριση μέγιστων ορθών τάσεων που καταγράφηκαν στα δοκίμια με IAM τσιμεντοειδούς και γεωπολυμερούς μήτρας αντίστοιχα.

Μήκος επικόλλησης (mm)	$\sigma_{\max}$ (MPa)					
	1 LAYER			3 LAYERS		
	CM	GDA	ΑΝΑΛΟΓΙΑ GDA/CM	CM	GDA	ΑΝΑΛΟΓΙΑ GDA/CM
50	695.02	1314.27	1.891	457.99	504.84	1.1023
75	883.83	1439.34	1.6285	567.78	781.45	1.3763
100	1275.42	1343.79	1.0536	505.25	867.74	1.7174
150	1098.72	1486.5	1.3529	830.23	939.28	1.1313

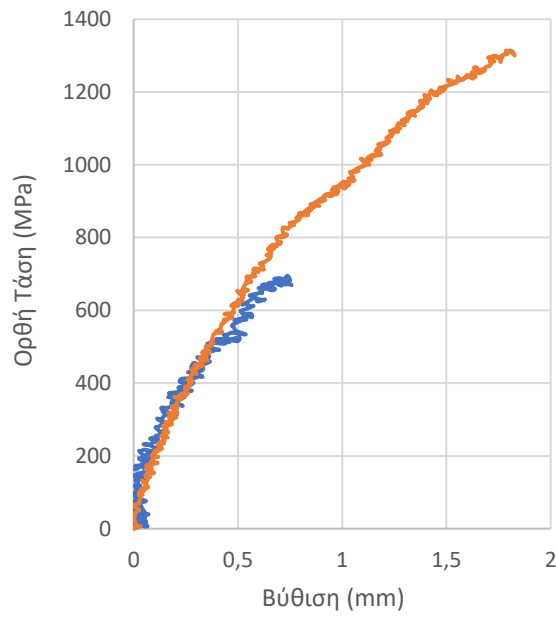
Στον Πίνακα 4.5 γίνεται σύγκριση των μέγιστων βυθίσεων που καταγράφηκαν στα δοκίμια με IAM γεωπολυμερούς και τσιμεντοειδούς μήτρας αντίστοιχα, πρώτα στην περίπτωση της μίας και έπειτα στην περίπτωση των τριών στρώσεων πλέγματος άνθρακα. Σε κάθε περίπτωση έχει επιλεχθεί να συμπεριληφθεί η μέγιστη βύθιση που αντιστοιχεί στο δοκίμιο που έφερε την μεγαλύτερη ορθή τάση ανάμεσα στα δύο δοκίμια κάθε μήκους επικόλλησης. Στη μία στρώση πλέγματος άνθρακα, παρατηρήθηκε πως οι μέγιστες βυθίσεις που σημειώθηκαν στα δοκίμια με IAM γεωπολυμερούς μήτρας ήταν μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές των δοκιμίων με IAM τσιμεντοειδούς εκτός από την περίπτωση των δοκιμίων με μήκος επικόλλησης 150 mm, όπου παρατηρήθηκε μείωση. Τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 50 mm εμφάνισαν την μεγαλύτερη αύξηση 144.8%, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 75 mm παρουσίασαν αύξηση 77.3%, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 100 mm σημείωσαν αύξηση 37.5% ενώ τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 150 mm εμφάνισαν μείωση 27.3%. Στις τρεις στρώσεις πλέγματος άνθρακα παρατηρήθηκε πως οι μέγιστες βυθίσεις που σημειώθηκαν στα δοκίμια με IAM γεωπολυμερούς μήτρας ήταν μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές των δοκιμίων με IAM τσιμεντοειδούς εκτός από την περίπτωση των δοκιμίων με μήκος επικόλλησης 100 mm και 150 mm, όπου παρατηρήθηκε μείωση. Τα δοκίμια με μήκος 50 mm

εμφάνισαν αύξηση 14.9%, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 75 mm εμφάνισαν την μεγαλύτερη αύξηση 120.8% ενώ τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 100 mm σημείωσαν μείωση 4.5% και τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 150 mm σημείωσαν μείωση 5.6%.

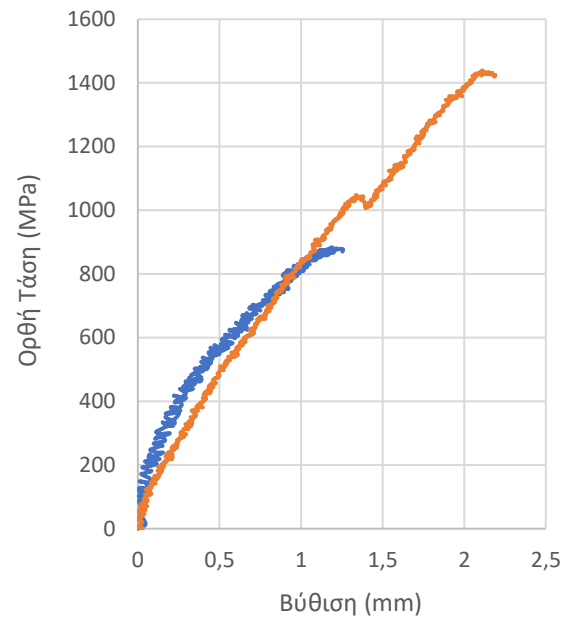
Πίνακας 4.5: Σύγκριση μέγιστων βυθίσεων που καταγράφηκαν στα δοκίμια με ΙΑΜ τσιμεντοειδούς και γεωπολυμερούς μήτρας αντίστοιχα.

Μήκος επικόλλησης (mm)	Βύθιση (mm)					
	1 LAYER			3 LAYERS		
	CM	GDA	ΑΝΑΛΟΓΙΑ GDA/CM	CM	GDA	ΑΝΑΛΟΓΙΑ GDA/CM
50	0.7376	1.80541	2.4477	0.78434	0.90139	1.1492
75	1.18986	2.10982	1.7732	1.11476	2.461195	2.2078
100	1.55364	2.135475	1.3745	1.7439	1.66507	0.9548
150	2.78355	2.024635	0.7274	2.52655	2.384045	0.9436

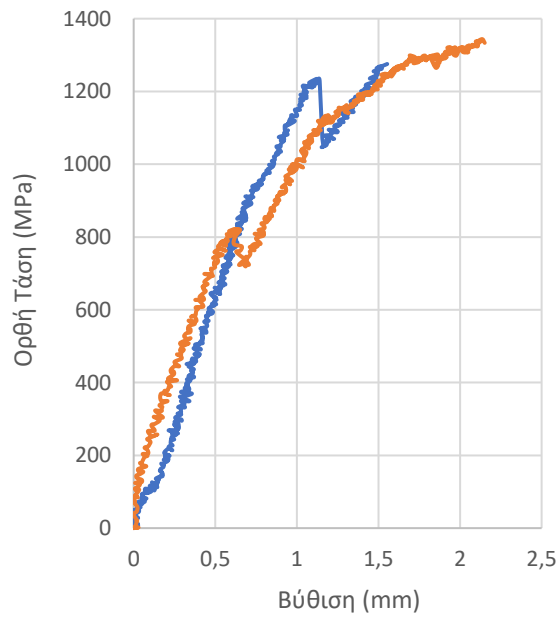
Στο Σχήμα 4.10 και 4.11 παρουσιάζονται οι καμπύλες ορθής τάσης-βύθισης των δοκιμίων με ΙΑΜ τσιμεντοειδούς και γεωπολυμερούς μήτρας με κοινό μήκος επικόλλησης και αριθμό στρώσεων πλέγματος άνθρακα. Στο Σχήμα 4.12 και 4.13 παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου-βύθισης των δοκιμίων με ΙΑΜ τσιμεντοειδούς και γεωπολυμερούς μήτρας με κοινό μήκος επικόλλησης και αριθμό στρώσεων πλέγματος άνθρακα.



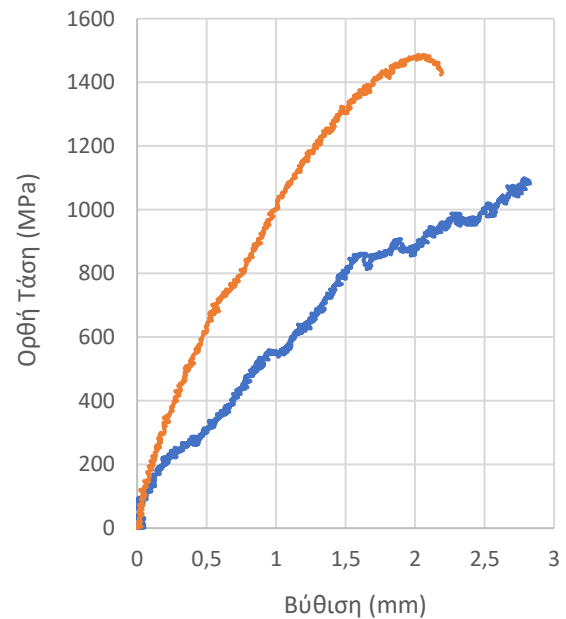
(α)



(β)

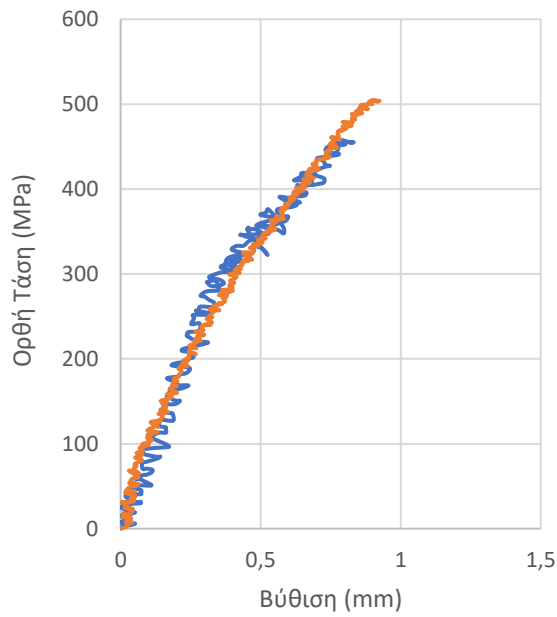


(γ)



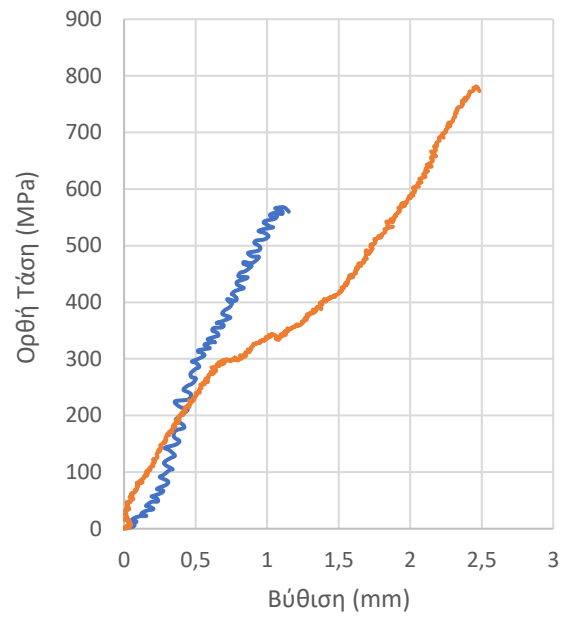
(δ)

Σχήμα 4.10: Καμπύλες ορθής τάσης-βύθισης των δοκιμών με IAM τσιμεντοειδούς και γεωπολυμερούς μήτρας με 1 στρώση πλέγματος άνθρακα και μήκος επικόλλησης (α) 50 mm, (β) 75 mm, (γ) 100 mm και (δ) 150 mm.



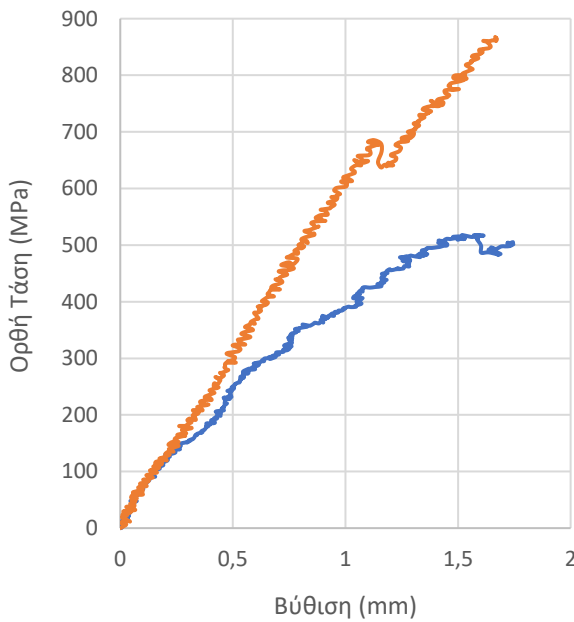
CM_3C_50_1 GDA_3C_50_1

(α)



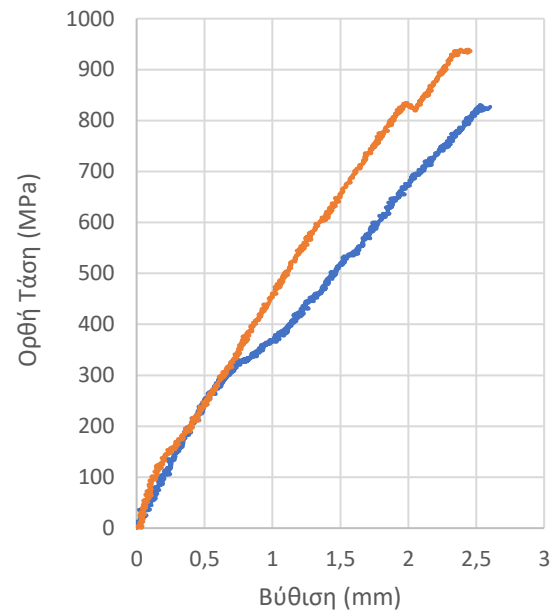
CM_3C_75_2 GDA_3C_75_2

(β)



CM_3C_100_2 GDA_3C_100_2

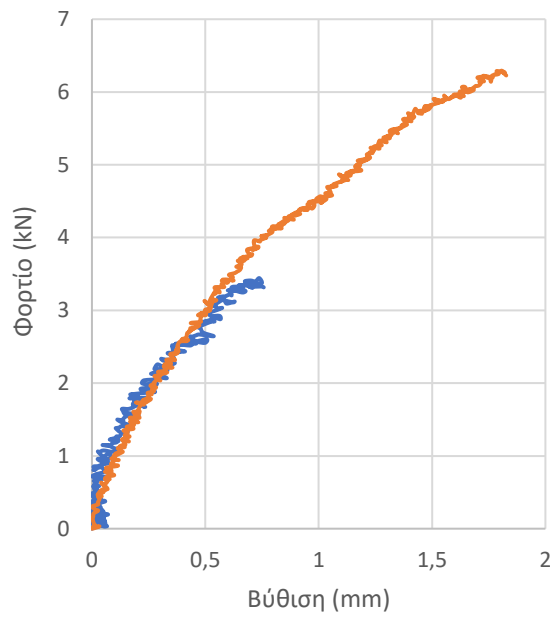
(γ)



CM_3C_150_2 GDA_3C_150_1

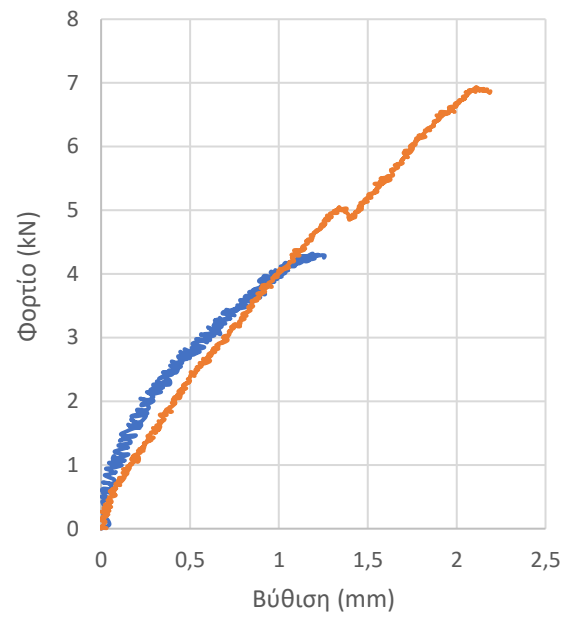
(δ)

Σχήμα 4.11: Καμπύλες ορθής τάσης-βύθισης των δοκιμών με ΙΑΜ τσιμεντοειδούς και γεωπολυμερούς μήτρας με 3 στρώσεις πλέγματος άνθρακα και μήκος επικόλλησης (α) 50 mm, (β) 75 mm, (γ) 100 mm και (δ) 150 mm.



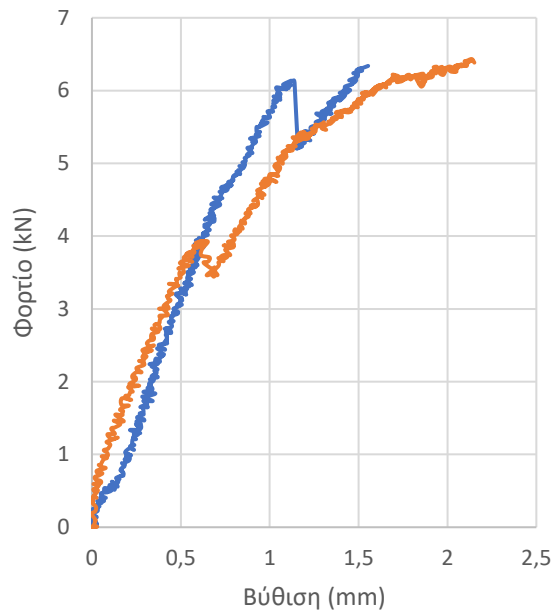
— CM_1C_50_2 — GDA_1C_50_1

(α)



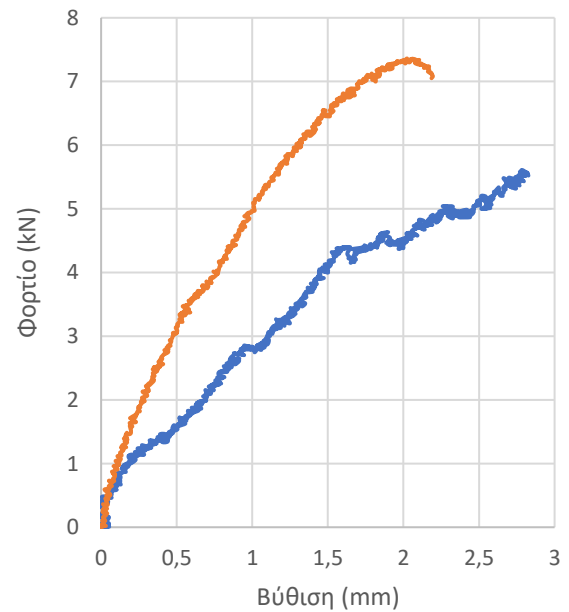
— CM_1C_75_2 — GDA_1C_75_2

(β)



— CM_1C_100_4 — GDA_1C_100_2

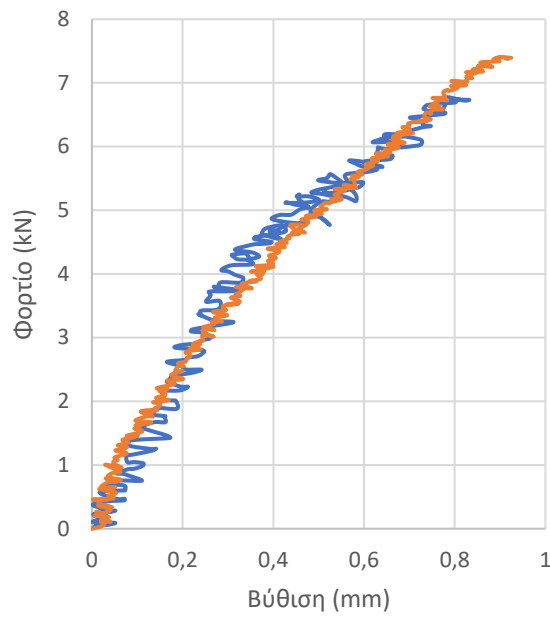
(γ)



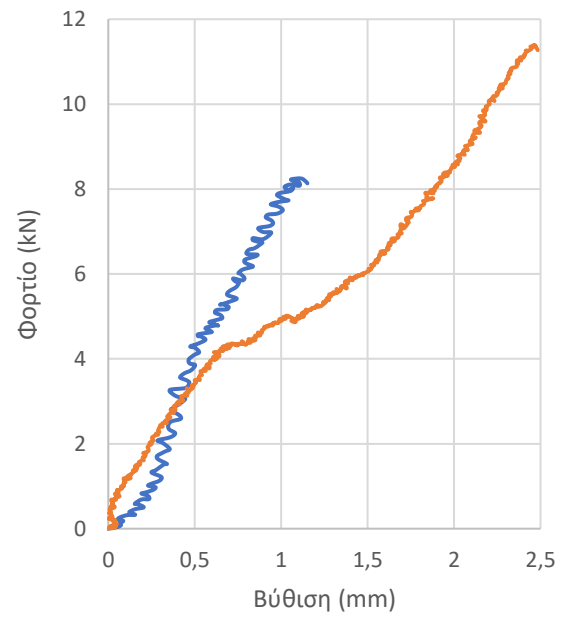
— CM_1C_150_2 — GDA_1C_150_1

(δ)

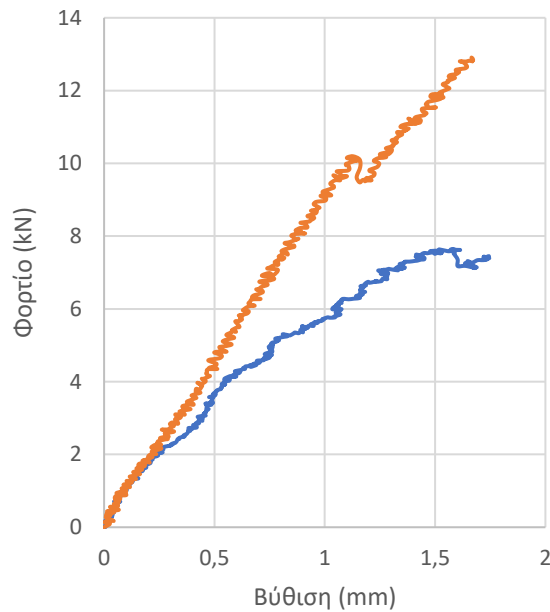
Σχήμα 4.12: Καμπύλες φορτίου-βύθισης των δοκιμών με ΙΑΜ τσιμεντοειδούς και γεωπολυμερούς μήτρας με 1 στρώση πλέγματος άνθρακα και μήκος επικόλλησης (α) 50 mm, (β) 75 mm, (γ) 100 mm και (δ) 150 mm.



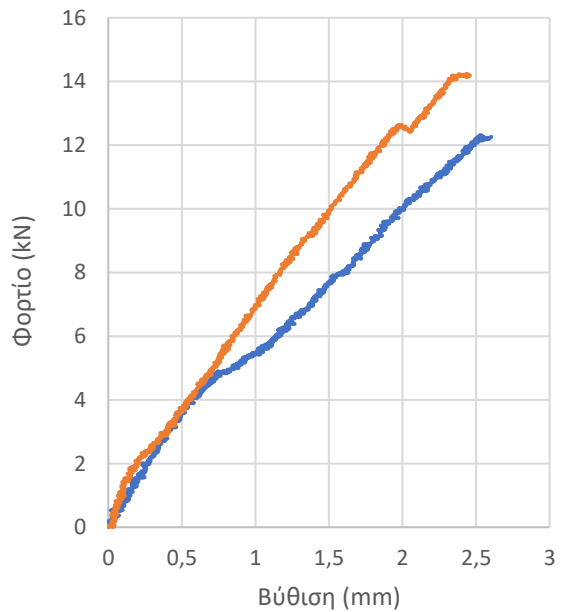
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 4.13: Καμπύλες φορτίου-βύθισης των δοκιμών με IAM τσιμεντοειδούς και γεωπολυμερούς μήτρας με 3 στρώσεις πλέγματος άνθρακα και μήκος επικόλλησης (α) 50 mm, (β) 75 mm, (γ) 100 mm και (δ) 150 mm.

Στον Πίνακα 4.6 γίνεται η σύγκριση των μέγιστων φορτίων που καταγράφηκαν στα δοκίμια με μία και τρεις στρώσεις άνθρακα αντίστοιχα, πρώτα στην περίπτωση της τσιμεντοειδούς και έπειτα της γεωπολυμερούς μήτρας. Σε όλα τα δοκίμια παρατηρήθηκε αύξηση μέγιστων φορτίων από τη μία στις τρεις στρώσεις. Στην περίπτωση του τσιμεντοειδούς κονιάματος, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 50 mm παρουσίασαν αύξηση 100%, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 75 mm παρουσίασαν αύξηση 86.3%, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 100 mm παρουσίασαν τη μικρότερη αύξηση 52% και τέλος τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 150 mm παρουσίασαν τη μεγαλύτερη αύξηση 110%. Στην περίπτωση του γεωπολυμερούς κονιάματος, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 50 mm παρουσίασαν την μικρότερη αύξηση 18.6%, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 75 mm παρουσίασαν αύξηση 56.3%, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 100 mm παρουσίασαν αύξηση 74.4% και τέλος τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 150 mm παρουσίασαν τη μεγαλύτερη αύξηση 140%.

Πίνακας 4.6: Σύγκριση μέγιστων φορτίων που καταγράφηκαν στα δοκίμια με μία και τρεις στρώσεις άνθρακα αντίστοιχα.

Μήκος επικόλλησης (mm)	P _{max} (kN)					
	CM			GDA		
	1 LAYER	3 LAYERS	ΑΝΑΛΟΓΙΑ 3L/1L	1 LAYER	3 LAYERS	ΑΝΑΛΟΓΙΑ 3L/1L
50	3.2	6.4	2	6.25	7.41	1.1856
75	4	7.45	1.8625	6.75	10.55	1.563
100	5.1	7.75	1.5196	6.45	11.25	1.7442
150	5.6	11.8	2.1071	6.7	16.1	2.403

Στον Πίνακα 4.7 γίνεται η σύγκριση των μέγιστων ορθών τάσεων που καταγράφηκαν στα δοκίμια με μία και τρεις στρώσεις άνθρακα αντίστοιχα, πρώτα στην περίπτωση της τσιμεντοειδούς και έπειτα της γεωπολυμερούς μήτρας. Σε όλα τα δοκίμια παρατηρήθηκε μείωση μέγιστων ορθών τάσεων από τη μία στις τρεις στρώσεις. Στην περίπτωση του τσιμεντοειδούς κονιάματος, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 50 mm παρουσίασαν μείωση

34.1%, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 75 mm παρουσίασαν μείωση 35.8%, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 100 mm παρουσίασαν μείωση 60.4% και τέλος τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 150 mm παρουσίασαν μείωση 24.4%. Στην περίπτωση του γεωπολυμερούς κονιάματος, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 50 mm παρουσίασαν μείωση 61.6%, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 75 mm παρουσίασαν μείωση 45.7%, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 100 mm παρουσίασαν μείωση 35.4% και τέλος τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 150 mm παρουσίασαν μείωση 36.8%.

Πίνακας 4.7: Σύγκριση μέγιστων ορθών τάσεων που καταγράφηκαν στα δοκίμια με ΙΑΜ τσιμεντοειδούς και γεωπολυμερούς μήτρας αντίστοιχα.

Μήκος επικόλλησης (mm)	$\sigma_{\max}$ (MPa)					
	CM			GDA		
	1 LAYER	3 LAYERS	ΑΝΑΛΟΓΙΑ 3L/1L	1 LAYER	3 LAYERS	ΑΝΑΛΟΓΙΑ 3L/1L
50	695.02	457.99	0.659	1314.27	504.84	0.3841
75	883.83	567.78	0.6424	1439.34	781.45	0.5429
100	1275.42	505.25	0.3961	1343.79	867.74	0.6457
150	1098.72	830.23	0.7556	1486.5	939.28	0.6319

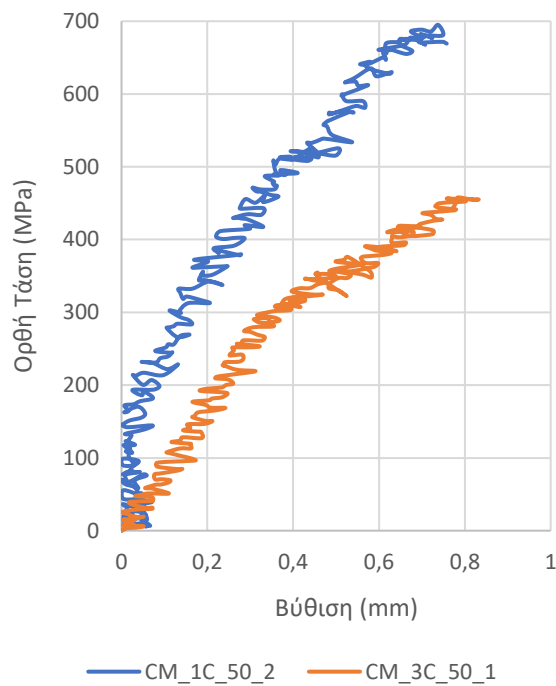
Στον Πίνακα 4.8 γίνεται η σύγκριση των μέγιστων βυθίσεων που καταγράφηκαν στα δοκίμια με μία και τρεις στρώσεις άνθρακα αντίστοιχα, πρώτα στην περίπτωση της τσιμεντοειδούς και έπειτα της γεωπολυμερούς μήτρας. Σε όλα τα δοκίμια παρατηρήθηκε αύξηση της βύθισης από τη μία στις τρεις στρώσεις. Στην περίπτωση του τσιμεντοειδούς κονιάματος παρατηρήθηκε αύξηση της βύθισης από τη μία στις τρεις στρώσεις πλέγματος εκτός από την περίπτωση των 75 mm και 150 mm. Τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 50 mm παρουσίασαν αύξηση 6.3%, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 75 mm παρουσίασαν μείωση 6.3%, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 100 mm παρουσίασαν αύξηση 12.3% και τέλος τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 150 mm παρουσίασαν μείωση 9.2%. Στην περίπτωση του γεωπολυμερούς κονιάματος παρατηρήθηκε αύξηση της βύθισης από τη μία στις τρεις

στρώσεις πλέγματος άνθρακα για τα μήκη επικόλλησης 75 mm και 150 mm και αντίστοιχη μείωση της βύθισης στα μήκη επικόλλησης 50 mm και 100 mm. Τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 50 mm παρουσίασαν μείωση 50.1%, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 75 mm παρουσίασαν αύξηση 16.7%, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 100 mm παρουσίασαν μείωση 22% και τέλος τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 150 mm παρουσίασαν αύξηση 17.8%.

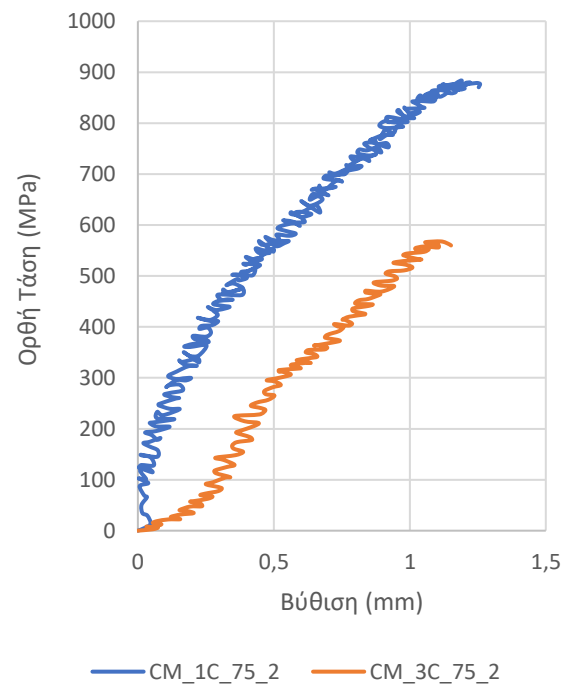
Πίνακας 4.8: Σύγκριση μέγιστων βυθίσεων που καταγράφηκαν στα δοκίμια με ΙΑΜ τσιμεντοειδούς και γεωπολυμερούς μήτρας αντίστοιχα.

Μήκος επικόλλησης (mm)	Βύθιση (mm)					
	CM			GDA		
	1 LAYER	3 LAYERS	ΑΝΑΛΟΓΙΑ 3L/1L	1 LAYER	3 LAYERS	ΑΝΑΛΟΓΙΑ 3L/1L
50	0.7376	0.78434	1.0634	1.80541	0.90139	0.4993
75	1.18986	1.11476	0.9369	2.10982	2.461195	1.1665
100	1.55364	1.7439	1.1225	2.135475	1.66507	0.7797
150	2.78355	2.52655	0.9077	2.024635	2.384045	1.1775

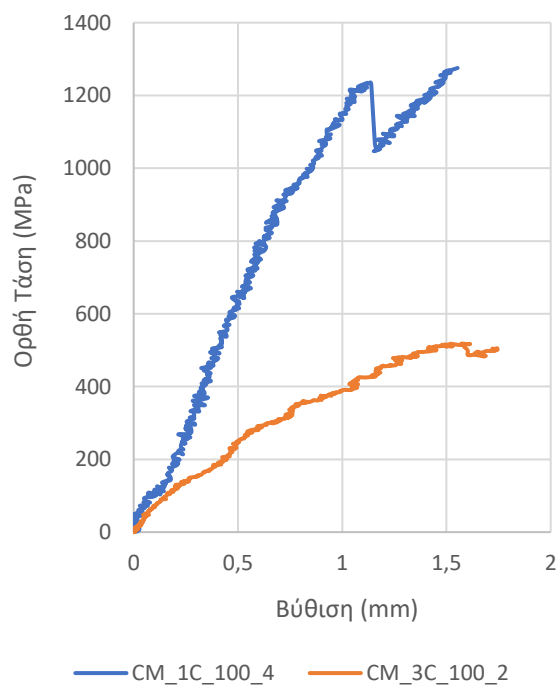
Στο Σχήμα 4.14 και 4.15 παρουσιάζονται οι καμπύλες ορθής τάσης-βύθισης των δοκιμίων με μία και τρεις στρώσεις πλέγματος άνθρακα αντίστοιχα, με κοινό μήκος επικόλλησης και είδος κονιάματος ως μήτρα στο σύνθετο υλικό. Στο Σχήμα 4.16 και 4.17 παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου-βύθισης των δοκιμίων με μία και τρεις στρώσεις πλέγματος άνθρακα αντίστοιχα, με κοινό μήκος επικόλλησης και είδος κονιάματος ως μήτρα στο σύνθετο υλικό. Διαπιστώνεται ότι με την αύξηση των στρώσεων πλέγματος άνθρακα αυξήθηκε το μέγιστο φορτίο όμως μειώθηκαν οι μέγιστες τάσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η τάση είναι αντιστρόφως ανάλογη του εμβαδού του πλέγματος το οποίο αυξάνεται από τη μία στις τρεις στρώσεις και έτσι παρατηρείται μείωση της τάσης.



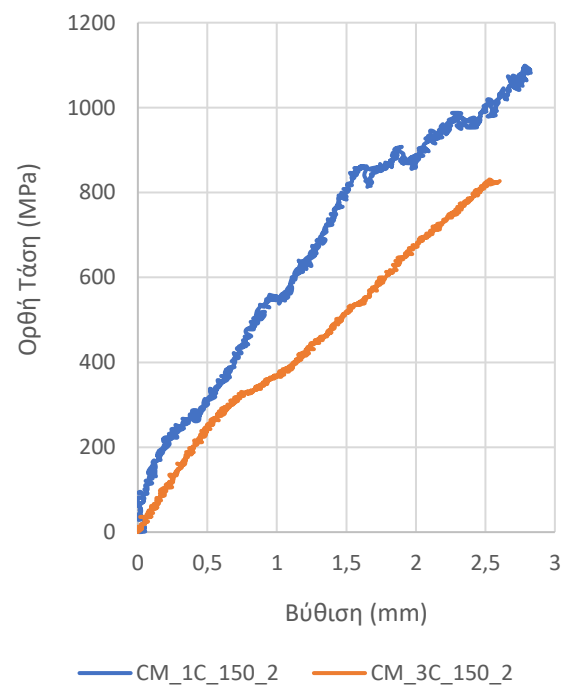
(α)



(β)

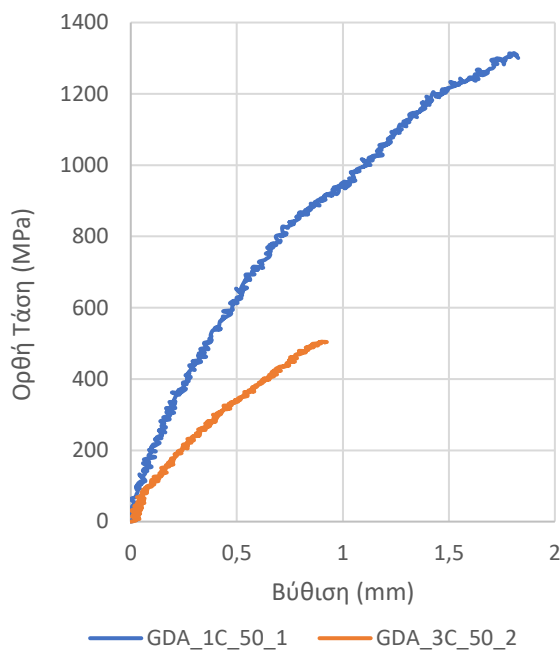


(γ)

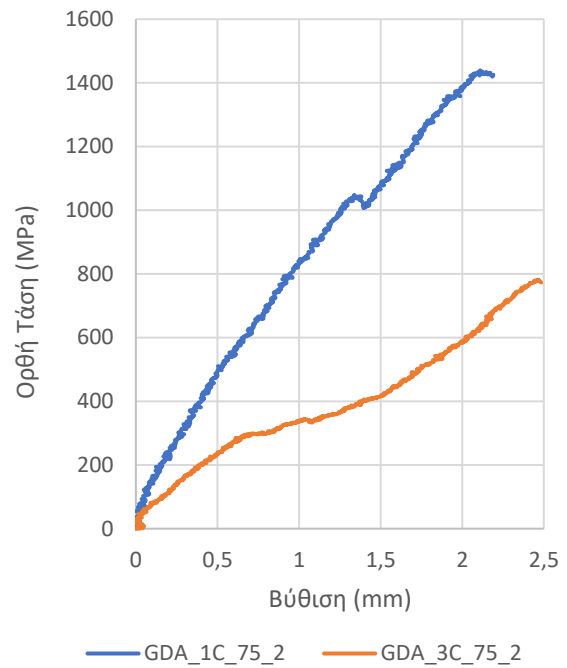


(δ)

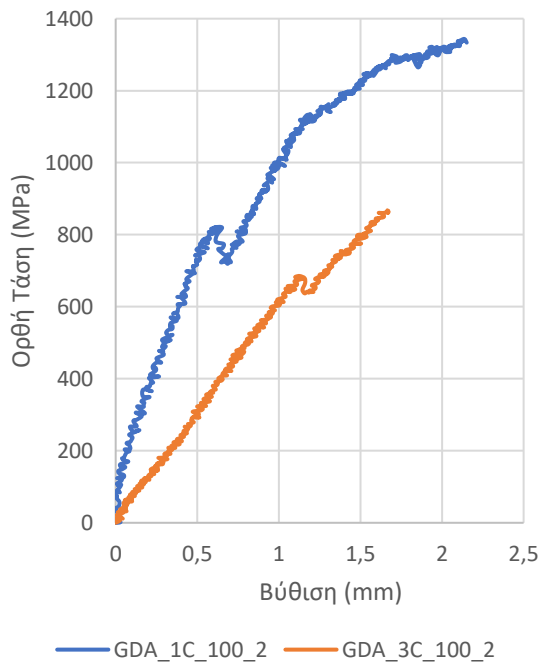
Σχήμα 4.14: Καμπύλες ορθής τάσης-βύθισης των δοκιμών με IAM τσιμεντοειδούς μήτρας, με 1 και 3 στρώσεις πλέγματος άνθρακα και μήκος επικόλλησης (α) 50 mm, (β) 75 mm, (γ) 100 mm και (δ) 150 mm.



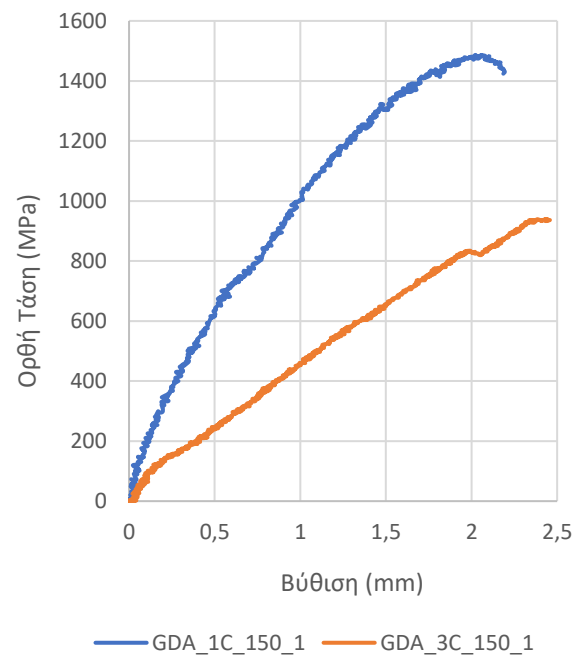
(α)



(β)

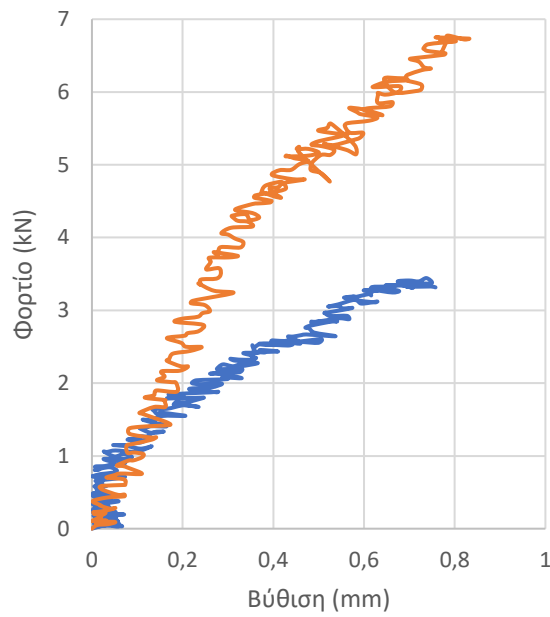


(γ)

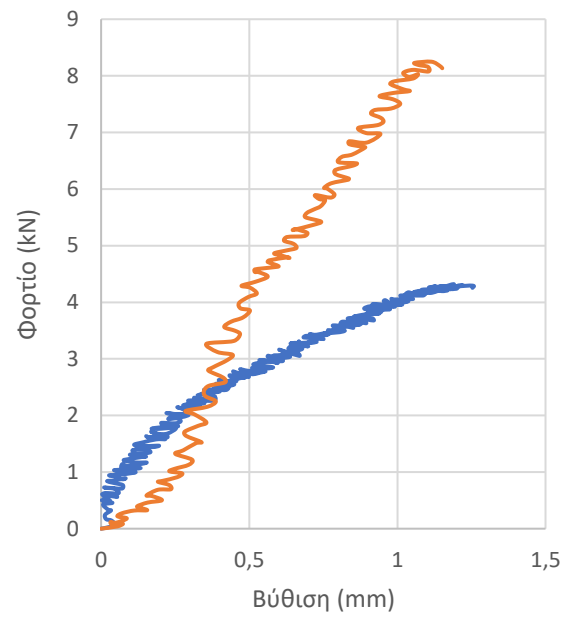


(δ)

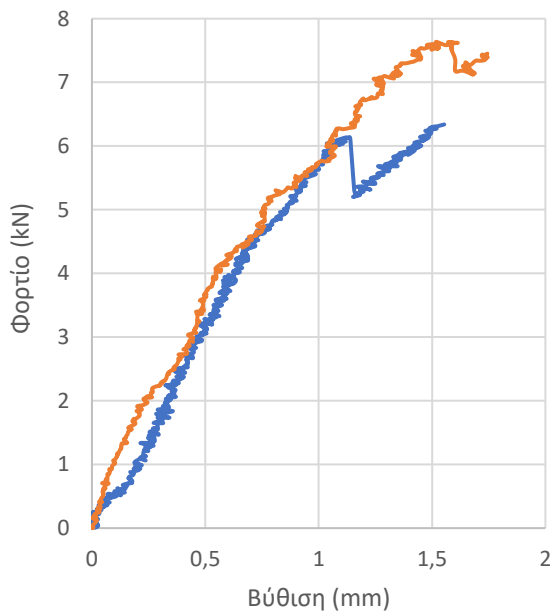
Σχήμα 4.15: Καμπύλες ορθής τάσης-βύθισης των δοκιμών με IAM γεωπολυμερούς μήτρας, με 1 και 3 στρώσεις πλέγματος άνθρακα και μήκος επικόλλησης (α) 50 mm, (β) 75 mm, (γ) 100 mm και (δ) 150 mm.



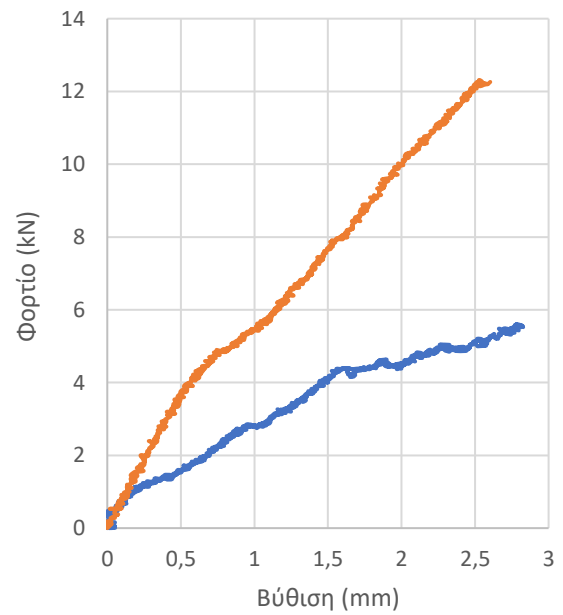
(α)



(β)

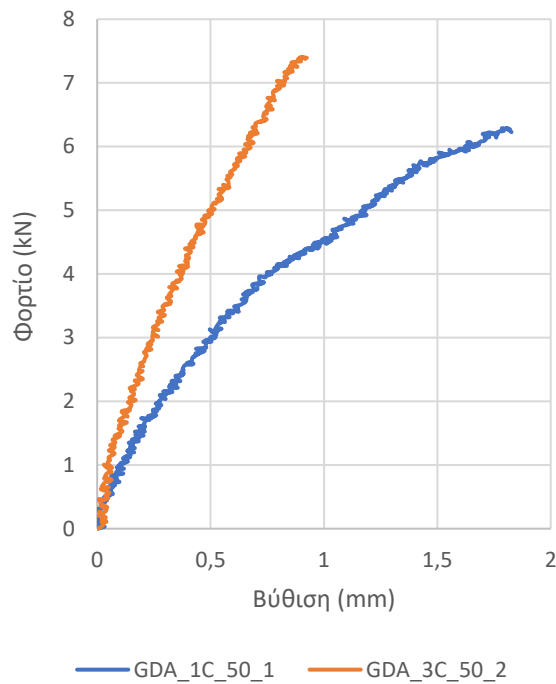


(γ)

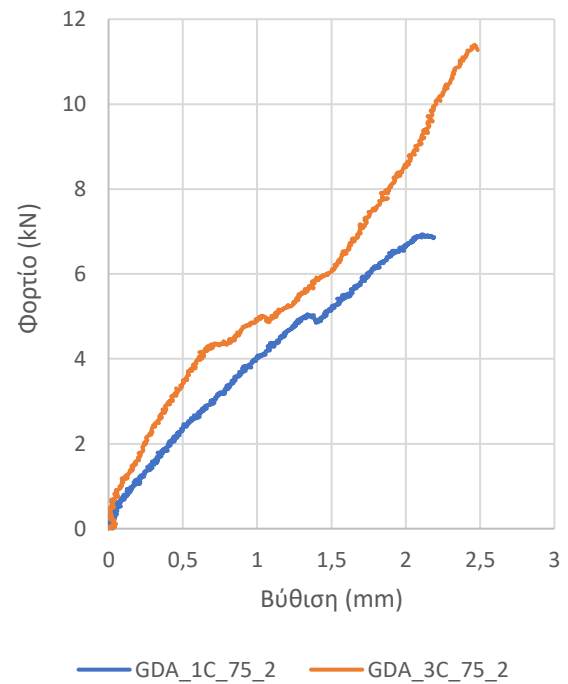


(δ)

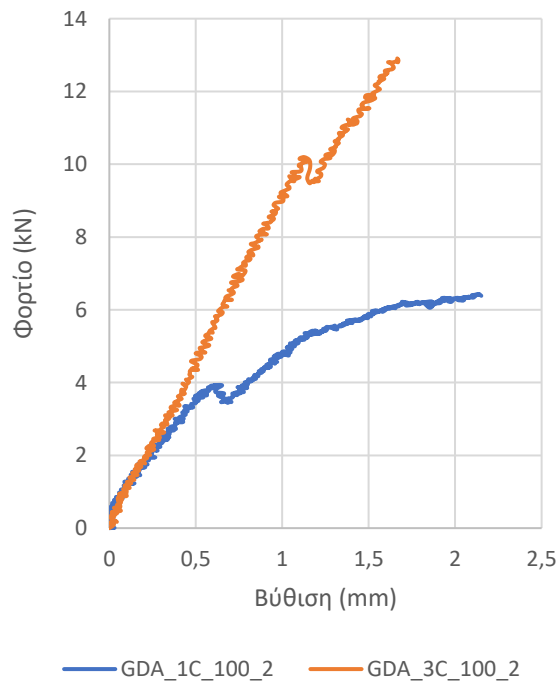
Σχήμα 4.16: Καμπύλες φορτίου-βύθισης των δοκιμών με ΙΑΜ τσιμεντοειδούς μήτρας, με 1 και 3 στρώσεις πλέγματος άνθρακα και μήκος επικόλλησης (α) 50 mm, (β) 75 mm, (γ) 100 mm και (δ) 150 mm.



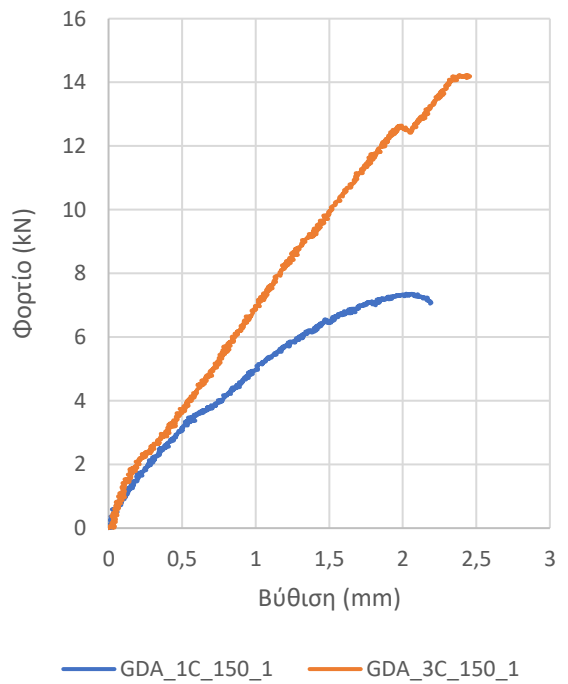
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 4.17: Καμπύλες φορτίου-βύθισης των δοκιμών με IAM γεωπολυμερούς μήτρας, με 1 και 3 στρώσεις πλέγματος άνθρακα και μήκος επικόλλησης (α) 50 mm, (β) 75 mm, (γ) 100 mm και (δ) 150 mm.

Η δυστένεια προκύπτει από την Εξ.(4.7):

$$k = A_f \cdot E_f \quad (4.7)$$

όπου A_f είναι το εμβαδόν του πλέγματος και E_f το μέτρο ελαστικότητας του.

Επομένως προκύπτει ότι τα δοκίμια με τρεις στρώσεις πλέγματος άνθρακα έχουν μεγαλύτερη δυστένεια. Αυτό επιβεβαιώνεται στα Σχήματα 4.16 και 4.17, όπου παρατηρείται πως για την περίπτωση των τριών στρώσεων πλέγματος, η κλίση των διαγραμμάτων φορτίου-βύθισης είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή στην περίπτωση της μιας στρώσης πλέγματος. Με την αύξηση της δυστένειας παρατηρείται λιγότερη παραμορφώση στο υλικό και έτσι είναι πιο εύκολο να αποκολληθεί. Οι ίνες δεν αξιοποιούν την μέγιστη αντοχή τους και γι' αυτό στην περίπτωση των τριών στρώσεων πλέγματος, τα δοκίμια αστόχησαν κυρίως με αποκόλληση στη διεπιφάνεια μήτρας/σκυροδέματος με παράσυρση της επικάλυψης.

Κεφάλαιο 5 Σύνοψη και Συμπεράσματα

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, εξετάστηκε η συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και ΙΑΜ άνθρακα και διερευνήθηκε αν είναι εφικτό να αντικατασταθεί η τσιμεντοειδής μήτρα του σύνθετου υλικού με γεωπολυμερές κονίαμα. Έπειτα από δοκιμές και ανάλυση των αποτελεσμάτων, τα κύρια συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν είναι τα εξής:

- Το γεωπολυμερές κονίαμα (GDA) που μελετήθηκε, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική επιλογή αντί του τσιμεντοκονιάματος σε συστήματα ενίσχυσης με πλέγματα άνθρακα.
- Όσον αφορά τα δοκίμια με ΙΑΜ τσιμεντοειδούς μήτρας οι ορθές τάσεις που σημειώθηκαν δεν παρουσίασαν αύξηση καθώς αυξήθηκε το μήκος επικόλλησης σε όλες τις περιπτώσεις. Αντιθέτως, οι βυθίσεις που προέκυψαν από όλα τα δοκίμια αυξήθηκαν με την ταυτόχρονη αύξηση του μήκους επικόλλησης.
- Όσον αφορά τα δοκίμια με ΙΑΜ γεωπολυμερούς μήτρας, οι ορθές τάσεις που σημειώθηκαν στα δοκίμια με τρεις στρώσεις πλέγματος άνθρακα αυξήθηκαν με την ταυτόχρονη αύξηση του μήκους επικόλλησης. Κάτι τέτοιο δεν παρατηρήθηκε σε όλα τα δοκίμια της μίας στρώσης πλέγματος άνθρακα. Ομοίως, ούτε όλες οι βυθίσεις, που προέκυψαν για μία και τρεις στρώσεις πλέγματος άνθρακα, δεν παρουσίασαν αύξηση καθώς αυξήθηκε το μήκος επικόλλησης.
- Στην περίπτωση της μίας στρώσης πλέγματος άνθρακα, τα μέγιστα φορτία που έφεραν τα δοκίμια γεωπολυμερούς μήτρας σημείωσαν αύξηση 95.3%, 68.8%, 26.5% και 19.6% για μήκος επικόλλησης 50 mm, 75 mm, 100 mm και 150 mm έναντι των μεγίστων φορτίων στην αντίστοιχη περίπτωση της τσιμεντοειδούς μήτρας. Όσον αφορά τις τρεις στρώσεις πλέγματος άνθρακα, τα μέγιστα φορτία που έφεραν τα δοκίμια γεωπολυμερούς μήτρας σημείωσαν αύξηση 15.8%, 41.6%, 45.2% και 36.4% για μήκος επικόλλησης 50 mm, 75 mm, 100 mm και 150 mm έναντι των μεγίστων φορτίων στην αντίστοιχη περίπτωση της τσιμεντοειδούς μήτρας.
- Στην περίπτωση του τσιμεντοκονιάματος, τα μέγιστα φορτία που έφεραν τα δοκίμια με τρεις στρώσεις πλέγματος άνθρακα σημείωσαν αύξηση 100%, 86.3%, 52% και 110.7% για μήκος επικόλλησης 50 mm, 75 mm, 100 mm και 150 mm

έναντι των μεγίστων φορτίων στην αντίστοιχη περίπτωση της μίας στρώσης πλέγματος. Όσον αφορά το γεωπολυμερές κονίαμα, τα μέγιστα φορτία που έφεραν τα δοκίμια με τρεις στρώσεις πλέγματος άνθρακα σημείωσαν αύξηση 18.6%, 56.3%, 74.4% και 140.3% για μήκος επικόλλησης 50 mm, 75 mm, 100 mm και 150 mm έναντι των μεγίστων φορτίων στην αντίστοιχη περίπτωση της μίας στρώσης πλέγματος.

- Στην περίπτωση της μίας στρώσης πλέγματος άνθρακα, οι μέγιστες ορθές τάσεις που έφεραν τα δοκίμια γεωπολυμερούς μήτρας σημείωσαν αύξηση 89.1%, 62.9%, 5.4% και 35.3% για μήκος επικόλλησης 50 mm, 75 mm, 100 mm και 150 mm έναντι των μεγίστων ορθών τάσεων στην αντίστοιχη περίπτωση της τσιμεντοειδούς μήτρας. Όσον αφορά τις τρεις στρώσεις πλέγματος άνθρακα, οι μέγιστες ορθές τάσεις που έφεραν τα δοκίμια γεωπολυμερούς μήτρας σημείωσαν αύξηση 10.2%, 37.6%, 71.7% και 13.1% για μήκος επικόλλησης 50 mm, 75 mm, 100 mm και 150 mm έναντι των μεγίστων φορτίων στην αντίστοιχη περίπτωση της τσιμεντοειδούς μήτρας.
- Στην περίπτωση του τσιμεντοκονιάματος, οι μέγιστες ορθές τάσεις που έφεραν τα δοκίμια με τρεις στρώσεις πλέγματος άνθρακα σημείωσαν μείωση 34.1%, 35.8%, 60.4% και 24.4% για μήκος επικόλλησης 50 mm, 75 mm, 100 mm και 150 mm έναντι των μεγίστων ορθών τάσεων στην αντίστοιχη περίπτωση της μίας στρώσης πλέγματος. Όσον αφορά το γεωπολυμερές κονίαμα, τα μέγιστα φορτία που έφεραν τα δοκίμια με τρεις στρώσεις πλέγματος άνθρακα σημείωσαν μείωση 61.6%, 45.7%, 35.4% και 36.8% για μήκος επικόλλησης 50 mm, 75 mm, 100 mm και 150 mm έναντι των μεγίστων ορθών τάσεων στην αντίστοιχη περίπτωση της μίας στρώσης πλέγματος.
- Στην περίπτωση της μίας στρώσης πλέγματος άνθρακα, οι μέγιστες βυθίσεις που προέκυψαν από τα δοκίμια γεωπολυμερούς μήτρας παρουσίασαν αύξηση 144.8%, 77.3% και 37.5% για μήκος επικόλλησης 50 mm, 75 mm και 100 mm και μείωση 27.3% για μήκος επικόλλησης 150 mm έναντι των μεγίστων βυθίσεων στην αντίστοιχη περίπτωση της τσιμεντοειδούς μήτρας. Όσον αφορά τις τρεις στρώσεις πλέγματος άνθρακα, οι μέγιστες βυθίσεις που προέκυψαν από τα

δοκίμια γεωπολυμερούς μήτρας σημείωσαν αύξηση 14.9% και 120.8% για μήκος επικόλλησης 50 mm και 75 mm και μείωση 4.5% και 5.6% για μήκος επικόλλησης 100 mm και 150 mm έναντι των μέγιστων βυθίσεων στην αντίστοιχη περίπτωση της τσιμεντοειδούς μήτρας.

- Στην περίπτωση του τσιμεντοκονιάματος, οι μέγιστες βυθίσεις που προέκυψαν από τα δοκίμια με τρεις στρώσεις πλέγματος άνθρακα σημείωσαν αύξηση 6.3% και 12.3% για μήκος επικόλλησης 50 mm και 100 mm και μείωση 6.3% και 9.2% για μήκος επικόλλησης 75 mm και 150 mm έναντι των μέγιστων βυθίσεων στην αντίστοιχη περίπτωση της μίας στρώσης πλέγματος. Όσον αφορά το γεωπολυμερές κονίαμα, οι μέγιστες βυθίσεις που προέκυψαν από τα δοκίμια τριών στρώσεων πλέγματος σημείωσαν αύξηση 16.7% και 17.8% για μήκος επικόλλησης 75 mm και 150 mm και μείωση 50.1% και 22% για μήκος επικόλλησης 50 mm και 100 mm έναντι των μέγιστων βυθίσεων στην αντίστοιχη περίπτωση της τσιμεντοειδούς μήτρας.
- Τα δοκίμια με τρεις στρώσεις πλέγματος εμφάνισαν συγκριτικά με αυτά της μίας στρώσης πλέγματος χαμηλότερες τάσεις που οφείλονταν στο μεγαλύτερο εμβαδόν πλέγματος, ενώ τα μέγιστα φορτία τους ήταν μεγαλύτερα.
- Τα δοκίμια με τρεις στρώσεις πλέγματος άνθρακα παρουσίασαν μεγαλύτερη δυστένεια συγκριτικά με αυτά με μία στρώση πλέγματος.
- Και στις δύο σειρές δοκιμών παρατηρήθηκαν τρεις διακριτές μορφές αστοχίας:
α) ολίσθηση ινών εντός της μήτρας β) διαστρωματική αποκόλληση στη διεπιφάνεια μήτρας-ινών, γ) αποκόλληση στη διεπιφάνεια μήτρας-σκυροδέματος με παράσυρση της επικάλυψης.

Βιβλιογραφία

➤ Ελληνική Βιβλιογραφία

Βαλιάκου Ε. (2022), Πειραματική διερεύνηση συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και σύνθετων υλικών ανόργανης μήτρας. Διπλωματική Εργασία, Βόλος: Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Κούτας Ν. Α. (2015), Νέες τεχνικές και υλικά για την ενίσχυση πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος μέσω εμφανιζόμενης τοιχοποιίας: Πειραματική και αναλυτική μελέτη. Διατριβή Διδακτορικού Διπλώματος, Πάτρα: Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

➤ Διεθνής Βιβλιογραφία

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.

Awani, O., El-Maaddaway, T. & Ismail, N. (2016). Fabric-reinforced cementitious matrix: A promising strengthening technique for concrete structures. *Construction and Building Materials*, 132, 94-111.

Calabrese, A. S., D'Antino, T., & Colombi, P. (2021). Experimental and analytical investigation of PBO FRCM-concrete bond behavior using direct and indirect shear test set-ups. *Composite Structures*, 264, 113672.

- Calabrese, A. S., D'Antino, T., Colombi, P., & Poggi, C. (2020). Study of the influence of interface normal stresses on the bond behavior of FRCM composites using direct shear and modified beam tests. *Construction and Building Materials*, 262, 120029.
- Carozzi, F. G., Bellini, A., D'Antino, T., Felice, G., Focacci, F., Hojdys, L., Laghi, L., Lanoye, E., Micelli, F., Panizza, M., & Poggi, C. (2017). Experimental investigation of tensile and bond properties of Carbon-FRCM composites for strengthening masonry elements. *Composites Part B*, 128, 100-119.
- D'Ambrisi, A., Focacci, F., & Luciano, F. (2012). Experimental analysis on bond between PBO-FRCM strengthening materials and concrete. *Composites: Part B*, 44, 524-532.
- Elsanadedy, H. M., Abbas, H., Almusallam, T. H., & Al-Salloum, Y. A. (2019). Organic versus inorganic matrix composites for bond-critical strengthening applications of RC structures—State-of-the-art review. *Composites Part B: Engineering*, 174, 106947.
- Falope, F.O., Lanzoni, L., & Tarantino, A.M. (2018). Modified hinged beam test on steel fabric reinforced cementitious matrix (SFRCM). *Composites Part B*, 146, 232-243.
- Guo, L., Deng, M., Chen, H., Li, R., Ma, X., & Zhang, Y. (2022). Experimental study on pre-damaged RC beams shear-strengthened with textile-reinforced mortar (TRM). *Engineering Structures*, 256, 113956.
- Jung, K., Hong, K., Han, S., Park, J., & Kim, J. (2015). Prediction of Flexural Capacity of RC Beams Strengthened in Flexure with FRP Fabric and Cementitious Matrix. *International Journal of Polymer Science*. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/868541>
- Katakalos, K., & Papakonstantinou, C. (2009). Fatigue of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Steel-Reinforced Inorganic Polymers. *Journal of Composites for Construction*. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2009)13:2(103)
- Khair Allah, N., El-Maaddawy, T., & El-Hassan, H. (2022). Shear Strengthening of Concrete Deep Beams with Geopolymer-Based Fabric-Reinforced Matrix Composites. *Conference on Civil Structural and Transportation Engineering*.

- Koutas, L. N., Tetta, Z., Bournas, D. A., & Triantafillou, T. C. (2019). Strengthening of concrete structures with textile reinforced mortars: state-of-the-art review. *Journal of Composites for Construction*, 23(1), 03118001.
- Liu, J., Su, X., & Yan, F. (2022). Experimental investigation on the effect of geopolymer adhesive on the bond behavior between CFRP and concretes. *Polymer Composites*, 43, 3259-3275.
- Obaida, F. A., El-Maaddawy, T., & EL-Hassan, H. (2021). Bond Behavior of Carbon Fabric-Reinforced Matrix Composites: Geopolymeric Matrix versus Cementitious Mortar. *Buildings*, 11, 207.
- Ombres, L. (2017). Structural performances of thermally conditioned PBO FRCM confined concrete cylinders. *Composite Structures*, 176, 1096-1106.
- Pacheco-Torgal, F., Abdollahnejad, Z., Miraldo, S., Basklouti, S., & Ding, Y. (2012). An overview on the potential of geopolymers for concrete infrastructure rehabilitation. *Construction and Building Materials*, 36, 1053-1058.
- Papakonstantinou, C. G., & Koutas, L. (2021). Textile-reinforced geopolymer mortar for strengthening of reinforced concrete elements: pilot study on mortar development. 1st Croatian Conference on Earthquake Engineering.
- Piątek, B., & Siwowski, T. (2022). Experimental study on flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with passive and active CFRP strips using a novel anchorage system. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00364-7>
- Provis, J. L. (2018). Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 114, 40-48.
- Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. (Eds.). (2013). Alkali activated materials: state-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM (Vol. 13). Springer Science & Business Media.

- Raoof, S. M., Koutas, L. N., & Bournas, D. A. (2016). Bond between textile-reinforced mortar (TRM) and concrete substrates: Experimental investigation. *Composites Part B: Engineering*, 98, 350-361.
- Raoof, S. M., Koutas, L. N., & Bournas, D. A. (2017). Textile-reinforced mortar (TRM) versus fibre-reinforced polymers (FRP) in flexural strengthening of RC beams. *Construction and Building Materials*, 151, 279-291.
- Sneed, L. H., D'Antino, T., Carloni, C., & Pellegrino, C. (2015). A comparison of the bond behavior of PBO-FRCM composites determined by double-lap and single-lap shear tests. *Cement and Concrete Composites*, 64, 37-48.
- Thermou, G. E., De Santis, S., de Felice, G., Alotaibi, S., Roscini, F., Hajirasouliha, I., & Guadagnini, M. (2021). Bond behaviour of multi-ply steel reinforced grout composites. *Construction and Building Materials*, 305, 124750.
- Triantafillou, T. C., and Papanicolaou, C. G. (2006). "Shear strengthening of reinforced concrete members with textile reinforced mortar (TRM) jackets." *Materials and Structures*, 39, 93- 103.
- Triantafillou, T. C., Papanicolaou, C. G., Zissimopoulos, P., & Laourdekis, T. (2006). Concrete confinement with textile-reinforced mortar jackets. *ACI structural journal*, 103-S04.
- Tzoura, E., and Triantafillou, T. C. (2014). "Shear strengthening of reinforced concrete T-beams under cyclic loading TRM or FRP jackets". *Materials and Structures*, doi: 10.1617/s11527- 014-0470-9.
- Wasim, M., Duc Ngo, T., & Law, D. (2021). A state-of-the-art review on the durability of geopolymer concrete for sustainable structures and infrastructure. *Construction and Building Materials*, 291, 123381.
- Zhang, H. Y., Hao, X., & Fan, W. (2016). Experimental study on high temperature properties of carbon fiber sheets strengthened concrete cylinders using geopolymer as adhesive. *Procedia Engineering*, 135, 47-55.

Zhang, H. Y., Lv, H. R., Kodur, V., & Qi, S. L. (2018). Comparative fire behavior of geopolymer and epoxy resin bonded fiber sheet strengthened RC beams. *Engineering Structures*, 155, 222-234.

Zhang, P., Zheng, Y., Wang, K., & Zhang, J. (2018). A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar. *Composites Part B*, 152, 79-95.

- Ιστοσελίδες

[European Union \(fipec-statistical-report.eu\)](http://fipec-statistical-report.eu)