



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ ΜΕΤΑΞΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ
ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ**

ΓΑΛΑΤΣΙΔΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

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

ΒΟΛΟΣ 2025

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. Κούτας Λάμπρος](#)
[Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας](#)

Δεύτερος Εξεταστής [Δρ. Παπακωνσταντίνου Χρήστος](#)
[Αναπληρωτής καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης](#)

Τρίτος Εξεταστής [Δρ. Θεοχάρης Παπαθεοχάρης](#)
[Εντεταλμένος Διδάσκων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας](#)

Ευχαριστίες

Θα ήθελα πρωτίστως να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στους επιβλέποντες της παρούσας διπλωματικής εργασίας, Επίκουρο Καθηγητή κ. Λάμπρο Κούτα και Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Χρήστο Παπακωνσταντίνου, για την πολύτιμη καθοδήγηση, την εμπιστοσύνη και τη στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια της ερευνητικής μου πορείας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Δρ. Χάρη Παπαθεοχάρη, Εντεταλμένο Διδάσκοντα και μέλος της εξεταστικής επιτροπής, για τις εύστοχες παρατηρήσεις και τις εποικοδομητικές του υποδείξεις έπειτα από ενδελεχή μελέτη της εργασίας μου.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην υποψήφια διδάκτορα του Τμήματος, κα Ιωάννα Σκυριανού, για τη διαρκή και πολύπλευρη υποστήριξή της σε όλα τα στάδια της εργασίας. Η συμβολή και οι καθοδηγητικές της παρεμβάσεις υπήρξαν καθοριστικές.

Ευχαριστώ θερμά τη συνάδελφό μου, κα Ευτυχία, καθώς και τα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου για τη βοήθειά τους στην υλοποίηση των πειραματικών διαδικασιών και για την ουσιαστική τους υποστήριξη.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την απεριόριστη ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου, Σπύρο και Δήμητρα, καθώς και στα αδέρφια μου, Κωνσταντίνο και Χρυσάνθη, για την αδιάκοπη αγάπη, συμπαράσταση και ενθάρρυνση που μου παρείχαν σε κάθε μου βήμα.

Αφιερώνω την παρούσα εργασία στον αδελφό μου, με βαθιά εκτίμηση και αγάπη.

Δημήτριος Γαλατσίδας

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ ΜΕΤΑΞΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ

Δημήτριος Γαλατσίδας

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2025

Επιβλέποντες Καθηγητές: Κούτας Λάμπρος, Επίκουρος Καθηγητής
Παπακωνσταντίνου Χρήστος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η μελέτη της συνάφειας μεταξύ Ινοπλεγμάτων Ανόργανης Μήτρας (IAM) και σκυροδέματος, με ιδιαίτερη έμφαση στη διερεύνηση της δυνατότητας αντικατάστασης της συμβατικής τσιμεντοειδούς μήτρας των IAM από μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης. Στο πλαίσιο αυτό, πραγματοποιήθηκαν συνολικά δώδεκα (12) δοκιμές έμμεσης διάτμησης στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος, σε πρισματικά δοκίμια, στο κάτω πέλμα των οποίων επικολλήθηκαν IAM από ίνες άνθρακα. Η πειραματική διερεύνηση επικεντρώθηκε στη μελέτη της διεπιφάνειας σκυροδέματος–σύνθετου υλικού, με βασικές παραμέτρους: (α) το είδος της μήτρας (τσιμεντοειδής ή γεωπολυμερής) και (β) το μήκος επικόλλησης (από 50 mm έως 200 mm). Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν συνοψίζονται στα εξής:

(α) Τα IAM με γεωπολυμερή μήτρα παρουσίασαν αυξημένες τιμές φορτίων και τάσεων σε σύγκριση με τα αντίστοιχα τσιμεντοειδούς μήτρας.

(β) Οι μορφές αστοχίας των δοκιμών ήταν σύμφωνες με τη σχετική βιβλιογραφία

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

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE BOND BETWEEN CONCRETE AND INORGANIC COMPOSITES

Dimitrios Galatsidas
University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2025

Supervisors: Koutas Lampros, Assistant Professor
Papakonstantinou Christos, Associate Professor

Abstract

This is a study of the bond between concrete and Textile Reinforced Mortars (TRMs). In particular, the current study aims to examine the potential use of a geopolymeric matrix as an alternative to cementitious mortars in TRMs. A modified beam (MB) test set-up was used to investigate the bond behavior at the concrete-composite interface. In total, 12 tests have conducted at Concrete Technology & RC Structures Lab of the department. Test parameters were: (a) the type of matrix (cementitious or geopolymeric) and (b) the bond length (50 mm to 200 mm). It was mainly found that: (a) the geopolymeric-matrix specimens exhibited higher ultimate loads and stresses than those of their cementitious-matrix counterparts, (b) the failure modes exhibited were typical modes, according to previous studies and (c) the effective bond length (l_{eff}) of the cementitious-matrix specimens was between 100 mm and 200 mm, while the l_{eff} of the geopolymeric-matrix specimens was not found.

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

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1	Εισαγωγή	Error! Bookmark not defined.
1.1	Σκοπός εργασίας	Error! Bookmark not defined.
1.3	Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας	Error! Bookmark not defined.
Κεφάλαιο 2	Σύνθετα Υλικά Και Ενίσχυση Κατασκευών	Error! Bookmark not defined.
2.1	Σύνθετα υλικά και δόμηση	Error! Bookmark not defined.
2.2	Ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας	Error! Bookmark not defined.
2.3	Τα ΙΑΜ στο πεδίο των ενισχύσεων του Οπλισμένου Σκυροδέματος (ΟΣ)	12
2.3.1	Ενίσχυση δοκών οπλισμένου σκυροδέματος έναντι κάμψης	13
2.3.2	Ενίσχυση σε τέμνουσα δοκών οπλισμένου σκυροδέματος	16
2.3.3	Περίσφιξη υποστυλωμάτων	20
2.3.4	Ενίσχυση κόμβων δοκού - υποστυλώματος	23
2.4	Γεωπολυμερη	37
2.5	Εφαρμογές γεωπολυμερών στις ενισχύσεις δομικών στοιχείων από ΟΣ	39
2.5.1	Ενίσχυση δοκών ΟΣ έναντι κάμψης	40
2.5.2	Ενίσχυση δοκών ΟΣ έναντι τέμνουσας	48
2.5.3	Μέσο περισφίξης υποστυλωμάτων ΟΣ	51
Κεφάλαιο 3	Πειραματικές Μετρήσεις	62
3.1	Πειραματική διαταξη	63
3.2	Γεωμετρία δοκιμών	64
3.3	Μηχανικές ιδιότητες υλικών	64

2.3.1 Σκυρόδεμα	64
2.3.2 Γεωπολυμερές κονίαμα	65
2.3.3 Τσιμεντοκονίαμα	66
2.3.4 Ενίσχυση κόμβων δοκού - υποστυλώματος	68
 Κεφάλαιο 4 Πειραματικά Αποτελέσματα και Σχολιασμός	 68
4.1 Αποτελέσματα σειράς Α (Μήτρα γεωπολυμερούς)	6Error! Bookmark not defined.
4.2 Μορφές αστοχίας δοκιμίων	70
4.3 Καμπύλες φορτίου βύθισης σειράς Α	70
4.4 Αποτελέσματα σειράς Β	72
4.5 Συγκρίσεις αποτελεσμάτων	74
 Κεφάλαιο 5 Σύνοψη και Συμπεράσματα	 Error! Bookmark not defined.
 Βιβλιογραφία	 78

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 : Σύγκριση χαρακτηριστικών οργανικής - ανόργανης μήτρας.....	3
Πίνακας 2 : Χαρακτηρηστικά Δοκιμίων	63
Πίνακας 3 : Μηχανικές ιδιότητες τσιμεντοκονιάματος.....	65
Πίνακας 4 : Ιδιότητες Πλέγματος άνθρακα σύμφωνα με τον κατασκευαστή.....	67
Πίνακας 5 : Πειραματικά αποτελέσματα Σειράς Α.....	69
Πίνακας 6 : Καμπύλες φορτίου-βύθισης δοκιμίων (α) GP_1C_50_1 και GP_1C_50_2, (β) GP_1C_100_1 και GP_1C_100_2 και (γ) GP_1C_200_1 και GP_1C_200_2.....	72
Πίνακας 7 : Πειραματικά αποτελέσματα Σειράς Β.....	73

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 : Περιγραφή Ινοπλέγματος Ανόργανης Μήτρας.....	1
Εικόνα 2 : (α) Δείγμα πλέγμα άνθρακα, (β) Δείγμα πλέγμα βασάλτη.....	9
Εικόνα 3 : Καθαρισμός επιφάνειας	10
Εικόνα 4 : Εξασφάλιση απαιτούμενης τραχύτητας	10
Εικόνα 5 : Ομαλοποίηση γωνιών	10
Εικόνα 6 : Επικάλυψη με τσιμεντοκονίαμα	11
Εικόνα 7 : Ανάπτυξη ινοπλέγματος.....	11
Εικόνα 8 : Τελική επικάλυψη με τσιμεντοκονίαμα	11
Εικόνα 9 : Αστοχία IAM, 2 στρώσεις PBO	15
Εικόνα 10 : Αστοχία IAM, 2 στρώσεις PBO.....	15
Εικόνα 11 : Στάδια ενίσχυσης δοκού ΟΣ	16
Εικόνα 12 : Αστοχία δοκιμίων	19
Εικόνα 13 : Μορφές αστοχίας διαφόρων δοκιμίων	22
Εικόνα 14 : Αστοχία δοκιμίων	23
Εικόνα 15 : Μορφές αστοχίας δοκιμίων	24
Εικόνα 16 : Πειραματική διάταξη	25
Εικόνα 17 : (α) Διάγραμμα δύναμης – ολίσθησης, (β) Διάγραμμα τάσης – ολίσθησης.....	26
Εικόνα 18 : Μέγιστη τάση απλής και διπλής διάτμησης.....	27
Εικόνα 19 : (α) Σχηματική απεικόνιση MB test, (β) Πειραματική διάταξη διάτμησης,	28
Εικόνα 20 : Μορφές αστοχίας	30
Εικόνα 21 : Μορφές αστοχίας	31
Εικόνα 22 : Μορφές επιφάνειας σκυροδέματος.....	33
Εικόνα 23 : Κατάσταση ινών ύστερα από την αστοχία του IAM.....	34
Εικόνα 24 : (α) Διάγραμμα τάσης με μήκος επικόλλησης, (β) Διάγραμμα φορτίου με μήκος επικόλληση.....	35
Εικόνα 25 : Μορφές αστοχίας στη διεπιφάνεια IAM – σκυροδέματος	37
Εικόνα 26 : Πρόδρομες ουσίες	39
Εικόνα 27 : Διάγραμμα φορτίου – παραμόρφωσης.....	41
Εικόνα 28 : (α) Δοκίμιο πολυμερούς κονιάματος με ράβδους χάλυβα	43
Εικόνα 29 : Διαγράμματα φορτίου - παραμορφώσεων δοκιμίων ενισχυμένων με	44

Κεφάλαιο 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κτιριακό απόθεμα του ελλαδικού χώρου προκύπτει επιτακτική η ανάγκη ενίσχυσης των δομικών στοιχείων των κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα είτε λόγω της έντονης σεισμικότητας είτε λόγω της μεγάλης ηλικίας των κτιρίων.

Σκοπός εργασίας

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η βιβλιογραφική καταγραφή των νέων σύνθετων υλικών των Ινοπλεγμάτων σε Ανόργανη Μήτρα (IAM) καθώς και η πειραματική μελέτη της συνάφειας μεταξύ ινοπλέγματος με μήτρα γεωπολυμερές και σκυροδέματος.

Ειδικότερα, διερευνώνται σε πειραματικό στάδιο η επιρροή διαφόρων παραμέτρων, όπως π.χ. το εύρος του μήκους επικόλλησης, οι μηχανικές ιδιότητες της ανόργανης μήτρας, στη συνάφεια της επιφάνειας σύνδεσης σύνθετου υλικού και σκυροδέματος.

Αναλυτικός σχολιασμός των πειραματικών συμπερασμάτων για τις μηχανικές ιδιότητες των Ινοπλεγμάτων Ανόργανης Μήτρας, παρουσιάζονται στα συμπεράσματα της εργασίας.

Το σύνθετο υλικό του IAM, παρουσιάζεται εποπτικά στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1 : Περιγραφή Ινοπλέγματος Ανόργανης Μήτρας

Διάρθρωση της Διπλωματικής Εργασίας

Η εργασία διαρθρώνεται σε δύο διακριτά τμήματα και σε επτά κεφάλαια. Στο πρώτο τμήμα που περιλαμβάνει τέσσερα κεφάλαια, καλύπτεται το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας, με εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση. Ενώ στο δεύτερο τμήμα, το οποίο περιλαμβάνει τα 5^ο – 7^ο κεφάλαια, περιλαμβάνονται οι πειραματικές διατάξεις, οι μετρήσεις

που έλαβαν χώρα και τα ωφέλιμα συμπεράσματα που εξάγονται από την όλη διπλωματική εργασία.

Αναλυτικότερα:

Το 1^ο κεφάλαιο περιλαμβάνει την εισαγωγή, το σκοπό και την γενικότερη οργάνωση της διπλωματικής εργασίας.

Στο 2^ο Κεφάλαιο εξετάζονται βασικές έννοιες που σχετίζονται με τα σύνθετα υλικά και την ανάγκη ενίσχυσης υφιστάμενων κατασκευών. Παρουσιάζονται οι κύριες μέθοδοι ενίσχυσης δομικών στοιχείων, με έμφαση στη χρήση Ινοπλεγμάτων Ανόργανης Μήτρας (IAM), των οποίων αναλύονται η διαδικασία εφαρμογής, τα πλεονεκτήματα και το πεδίο χρήσης τους. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στα γεωπολυμερή ως σύγχρονα υλικά με ιδιαίτερες μηχανικές και περιβαλλοντικές ιδιότητες, ενώ εξετάζεται η συνάφεια και η συνεργασία τους με συνθετικά υλικά και σκυρόδεμα στο πλαίσιο καινοτόμων τεχνικών ενίσχυσης.

Στο 3^ο Κεφάλαιο αναλύονται οι πειραματικές μετρήσεις των δοκιμών οπλισμένου σκυροδέματος με τα σύνθετα υλικά

Στο 4^ο Κεφάλαιο περιγράφονται τα πειραματικά αποτελέσματα και τα διαγράμματα φορτίου βύθισης

Ενώ στο 5^ο Κεφάλαιο παραθέτονται τα τελικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας.

Κεφάλαιο 2. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στην δόμηση. Αιτιολογείται η ανάγκη ενίσχυσης των κατασκευών καθώς επίσης παρουσιάζονται και οι διαθέσιμες μέθοδοι ενίσχυσης των δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Σύνθετα υλικά και δόμηση

Η ανάγκη για κάλυψη νέων αναγκών στον κατασκευαστικό κλάδο όπως μειωμένο ίδιο βάρος κατασκευής, υψηλή ανθεκτικότητα σε δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες και μικρό οικονομικό κόστος (Μπουρνάς, 2008) καθώς και η ανάγκη ενίσχυσης των δομικών στοιχείων υφισταμένων κτιρίων, δημιούργησε έναν νέο επιστημονικό τομέα στην επιστήμη του πολιτικού μηχανικού, με την εξεύρεση νέων τεχνικών λύσεων και νέων σύνθετων υλικών. Έτσι, προέκυψαν τα σύνθετα υλικά οργανικής και ανόργανης μήτρας (Δρίτσος, 2005).

Αναλυτικότερα, τα υλικά οργανικής μήτρας αποτελούνται από οργανικές ενώσεις, όπως πολυμερή, ρητίνες κλπ. Ενώ τα υλικά ανόργανης μήτρας αποτελούνται από ανόργανες ουσίες όπως τσιμέντο, κονιάματα κλπ.

Τα υλικά οργανικής μήτρας παρουσιάζουν ευαισθησία στην υγρασία και στη θερμότητα, ενώ μπορεί να αλληλοεπιδράσουν με άλλα στοιχεία, προκαλώντας χημικές αντιδράσεις. Τα υλικά ανόργανης μήτρας παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά σε εξωγενείς παράγοντες όπως η θερμοκρασία και η υγρασία (Bournas et al, 2007).

Χαρακτηριστικό	Υλικά οργανικής μήτρας	Υλικά ανόργανης μήτρας
Βάρος	Ελαφρύτερα	Βαρύτερα
Αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες	Χαμηλότερη	Υψηλότερη
Αντοχή και ακαμψία	Μέτρια	Υψηλή
Ευελιξία	Υψηλή	Περιορισμένη
Κόστος	Υψηλότερο	Χαμηλότερο

Πίνακας 1 : Σύγκριση χαρακτηριστικών οργανικής - ανόργανης μήτρας

(Πηγή : Ιδία επεξεργασία)

Ανάγκη ενίσχυσης κατασκευών

Ο κατασκευαστικός κλάδος τις τελευταίες δύο δεκαετίες, αντιμετωπίζει μια συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για αποκατάσταση, επανάχρηση, στατική ενίσχυση και γενικότερο ανασχεδιασμό των υφιστάμενων κτιρίων, κυρίως δομημένα από οπλισμένο σκυρόδεμα. Συνολικά στην Ευρωπαϊκή Ένωση για το έτος 2023, οι επενδύσεις για ανακαίνιση και επαναχρησιμοποίηση κτιρίων αντιπροσώπευαν το 30,3% των συνολικών επενδύσεων στον κατασκευαστικό κλάδο, όπως επισημαίνεται στην στατιστική αναφορά της Ευρωπαϊκής Ομοσπονδίας Κατασκευαστικής Βιομηχανίας – European Construction Industry Federation (FIEC, 2023).

Στην ελληνική επικράτεια, με βάση τα στοιχεία της Απογραφής Πληθυσμού – Κατοικιών 2021, το 88,4 % του συνολικού αριθμού των κτιρίων έχουν κατασκευαστεί πριν από το 2000 (ΕΛΣΤΑΤ, 2022). Γεγονός το οποίο καθιστά σαφές ότι, με την παρέλευση τόσων δεκαετιών, η αδιαμφισβήτητη γήρανση και η επακόλουθη φθορά των δομικών υλικών, μαζί με συνδυασμό και με άλλους παράγοντες όπως η έντονη σεισμικότητα που παρατηρείται στον ελλαδικό χώρο, η απουσία συντήρησης κατά τη διάρκεια λειτουργίας των οικοδομημάτων και οι κατά τόπους μη ευμενείς συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος έχουν ως συνέπεια τον περιορισμό της θεωρητικής αντοχής των κτιρίων.

Ταυτόχρονα, με την εξέλιξη της τεχνολογίας και της επιστήμης εν γένει, οι κανονισμοί δόμησης των κτιρίων τροποποιούνται (Νέος Οικοδομικός Κανονισμός, Νέος Αντισεισμικός Κανονισμός) και νέες απαιτήσεις προκύπτουν, όπως η ενεργειακή κατάταξη των κτιρίων (Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων). Κρίνεται επομένως επιτακτική και απαραίτητη η αναβάθμιση του κτιριακού αποθέματος και ειδικότερα των κτιρίων που είναι κατασκευασμένα από Οπλισμένο Σκυρόδεμα (ΟΣ).

Για την επίτευξη αυτού του στόχου, δεν αποτελεί οικονομικά αποδεκτή λύση η ολική καθαίρεση κτιρίων και οικοδομημάτων. Αντιθέτως, τεχνικά εφικτή και οικονομικά αποδεκτή λύση είναι η τοπική ενίσχυση των φερόντων στοιχείων των κτιρίων από ΟΣ, η οποία αποδεδειγμένα έχει ως αποτέλεσμα την ασφαλή στήριξη και ανάληψη των φορτίων λειτουργίας της κατασκευής καθώς επίσης και την καλύτερη συμπεριφορά του οικοδομήματος έναντι των σεισμών. Με τη χρήση σύνθετων υλικών, οι πολιτικοί μηχανικοί δύναται να διασφαλίσουν τόσο την προστασία του υπέρτατου αγαθού (της ανθρώπινης ζωής) και παρουσίας όσο και τη μέγιστη λειτουργικότητα του κτιρίου, αποφεύγοντας έτσι άλλες οικονομικά και

περιβαλλοντικά μη αποδεκτές λύσεις όπως η κατεδάφιση των υφιστάμενων δομικών στοιχείων.

Η ανάγκη ενίσχυσης των κτιρίων από ΟΣ προέρχεται από ποικίλους παράγοντες που σχετίζονται με την ασφάλεια, την ανθεκτικότητα και την λειτουργικότητα των κατασκευών (Δρίτσος, 2005). Οι κυριότερες αιτίες περιλαμβάνουν:

1. **Φθορά και γήρανση του υλικού:** Με την πάροδο του χρόνου, τα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα υφίστανται φυσιολογική φθορά λόγω των ιδιαίτερων περιβαλλοντικών συνθηκών (π.χ., υγρασία, ατμοσφαιρική ρύπανση). Η οξείδωση του σιδηρού οπλισμού (χάλυβα) μέσα στο σκυρόδεμα, λόγω της επαφής με το νερό ή την ατμοσφαιρική υγρασία, μειώνει τη συνολική αντοχή του υλικού και μπορεί να οδηγήσει σε ρωγμές και άλλες φθορές.
2. **Αναβάθμιση των κανονισμών:** Οι κανονισμοί δόμησης των κτιρίων διαφοροποιούνται και εξελίσσονται με την πάροδο του χρόνου, με αυστηρότερες απαιτήσεις για την ανθεκτικότητα, την ενεργειακή απόδοση και την αντισεισμική συμπεριφορά των κτιρίων. Έτσι, τα παλαιότερα κτίρια που κατασκευάστηκαν με βάση παλαιότερες προδιαγραφές και τεχνικές οδηγίες, συχνά απαιτείται η ενίσχυση τους, έτσι ώστε να ανταποκριθούν στις σύγχρονες απαιτήσεις ασφαλείας και λειτουργικότητας.
3. **Σεισμική δραστηριότητα:** Σε περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα, όπως η ελληνική επικράτεια, τα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα πιθανόν να χρειαστούν ενίσχυση για να μπορέσουν να αντέχουν στους σεισμούς. Οι απαιτήσεις για ορθή σεισμική ανταπόκριση των κτιρίων αυξάνονται, καθώς το υπάρχον κτιριακό απόθεμα μπορεί να μην πληροί τις νέες προδιαγραφές και απαιτήσεις των κανονισμών, έτσι ώστε να διασφαλιστεί η ανθρώπινη υγεία και ασφάλεια.
4. **Ανακαίνιση και αλλαγή χρήσης κτιρίων:** Πολλές φορές κτίρια τα οποία κατασκευάστηκαν για μια δεδομένη χρήση, ανακαινίζονται για να εξυπηρετήσουν άλλες χρήσεις (π.χ. από κατοικίες σε εμπορικά καταστήματα ή γραφεία). Αυτές οι αλλαγές χρήσεων μπορεί να απαιτήσουν ενίσχυση του Φέροντος Οργανισμού του κτιρίου, για να μπορέσουν να αντιμετωπιστούν οι αυξημένες απαιτήσεις φορτίων.

5. **Στρατηγικές αποκατάστασης και επανάχρησης κτιρίων:** Στο πλαίσιο της αποκατάστασης, επανάχρησης και προστασίας κτιρίων ιδιαίτερου αρχιτεκτονικού ενδιαφέροντος, η ενίσχυση των κτιρίων από ΟΣ μπορεί να επιλέγεται ως μέτρο για την αποκατάσταση των προβλημάτων στατικότητας ή τη βελτίωση της λειτουργικότητας των κτιρίων.
6. **Αντιμετώπιση εκτάκτων φαινομένων (π.χ., πλημμύρες, πυρκαγιές):** Οι σεισμικές δονήσεις, οι πλημμύρες και οι πυρκαγιές αποτελούν φυσικά φαινόμενα τα οποία μπορούν να επιδράσουν αρνητικά στην στατική επάρκεια και λειτουργικότητα των κατασκευών από ΟΣ. Η ενίσχυση των κτιρίων με σύγχρονα σύνθετα υλικά μπορούν να βελτιώσουν την αντοχή των οικοδομημάτων ενάντια σε τέτοιες φυσικές καταστάσεις και φαινόμενα.

Η ανάγκη ενίσχυσης των κτιρίων από ΟΣ προκύπτει, λοιπόν, από την ανάγκη για μεγαλύτερη ασφάλεια, ανθεκτικότητα και συμμόρφωση με τους σύγχρονους κανονισμούς και απαιτήσεις του κατασκευαστικού κλάδου.

Μέθοδοι ενίσχυσης

Οι τεχνικά διαθέσιμοι τρόποι ενίσχυσης των δομικών στοιχείων από ΟΣ, (Triantafillou et al., 2006) μπορούν να διαχωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

- τις συμβατικές, με τη χρήση μανδύα από χαλύβδινο οπλισμό και σκυρόδεμα ή κονιάματα
- τις νέες μεθόδους με τη χρήση σύνθετων υλικών, όπως τα Ινοπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ), τα οποία επικολλούνται εξωτερικά στα δομικά στοιχεία από ΟΣ.

Τα ΙΟΠ (αγγλικός όρος του Fiber Reinforced Polymers - FRP) αποτελούνται από δύο συστατικά. Το πρώτο είναι ύφασμα ινών υψηλής αντοχής, που μπορεί να είναι από άνθρακα, βασάλτη, αραμιδίου, ύαλο (Cerniauskas et al, 2020). Το δεύτερο συστατικό είναι ένα πολυμερή υλικό, συνήθως εποξική ρητίνη.

Τα τελευταία χρόνια, τα ΙΟΠ αποτελούν τη συνηθέστερη μέθοδο ενίσχυσης των δομικών στοιχείων από ΟΣ, διότι παρουσιάζουν πλήθος πλεονεκτημάτων. Αυτά είναι :

- Μεγάλη εφελκυστική αντοχή
- Υψηλή ανθεκτικότητα έναντι διάβρωσης
- Μικρό πρόσθετο πάχος καθώς επίσης και ίδιο βάρος, με συνέπεια να μην διαφοροποιείται ιδιαίτερα οι διαστάσεις και η γεωμετρία των ενισχυμένων δομικών στοιχείων και το συνολικό ίδιο βάρος του κτιρίου.
- Εύκολη και γρήγορη προσαρμογή τους ακόμη και σε διατομές με μη τυπική μορφή και σχήμα.

Αντιθέτως, τα ΙΟΠ εμφανίζουν και ορισμένα βασικά μειονεκτήματα, (Cerniauskas et al, 2020) που οφείλονται κυρίως στις ιδιότητες που προσδίδει το πολυμερές υλικό και αυτά είναι :

- Υψηλό κόστος των ρητινών
- Σημαντική μείωση της αντοχής του ΙΟΠ σε υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. πυρκαγιά)
- Αδυναμία εφαρμογής των ΙΟΠ σε επιφάνειες υγρές ή με αυξημένη υγρασία.
- Υψηλός κίνδυνος για το εργατικό προσωπικό που απασχολείται με την εγκατάσταση των ΙΟΠ, από ενδεχόμενη επαφή της επικίνδυνης για το ανθρώπινο δέρμα ρητίνης.

Εξαιτίας των σημαντικών μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν τα ΙΟΠ, η επιστημονική κοινότητα διερεύνησε κάποιες βελτιώσεις και τροποποιήσεις για την εξεύρεση εναλλακτικής και βελτιωμένης λύσης. Το ουσιαστικό αρνητικό στοιχείο ήταν το πολυμερές υλικό και προφανής ήταν η προσπάθεια για την εξεύρεση ενός άλλου υλικού με διαφορετικές ιδιότητες και ουσιαστικά διαφορετική σύσταση. Ειδικότερα, οι επιστήμονες πειραματίστηκαν και χρησιμοποίησαν σαν μήτρες σύνθετων υλικών, το τσιμεντοκονίαμα ή το υδραυλικό ασβεστοκονίαμα, τα οποία βασίζονται σε ανόργανα υλικά και παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα (Raoof & Bournas, 2017) όπως :

- Μικρό κόστος
- Πολύ καλή συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. πυρκαγιά)
- Δυνατότητα χρήσης αυτών ακόμη και σε φαινομενικά ακατάλληλες επιφάνειες π.χ. υγρές ή με υψηλή υγρασία

- αποφυγή σημαντικού εργατικού ατυχήματος των εργαζομένων κατά την φάση εγκατάστασης της μήτρας.

Λόγω της απαιτούμενης χαμηλής κοκκομετρίας των κονιαμάτων, η εναλλακτική αυτή λύση, δε βρήκε ουσιαστικά εφαρμογή στον τεχνικό κόσμο, διότι δεν επιτεύχθηκε η απαραίτητη συνάφεια μεταξύ οπλισμού και μήτρας, με συνέπεια το ύφασμα ινών υψηλής αντοχής, να μη δύναται να εμποτιστεί πλήρως με το κονίαμα και να λειτουργήσει ως ένα ενιαίο σώμα και υλικό.

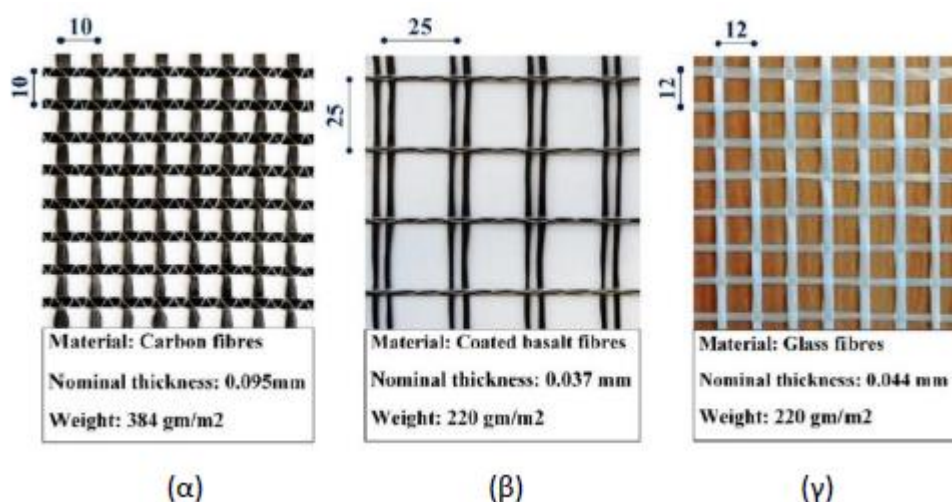
Οι ανωτέρω αιτίες είχαν ως συνέπεια την ανάπτυξη νέων σύνθετων υλικών, τα λεγόμενα Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM). Τα IAM (Textile Reinforced Mortars - TRMs) συνίστανται από δύο συστατικά. Το πρώτο είναι κλώνοι ινών από υλικά με υψηλή αντοχή διατεταγμένοι σε πλέγμα με μία ή δύο διευθύνσεις. Το δεύτερο συστατικό είναι ένα κονίαμα ανόργανης μήτρας. Έτσι, το αρχικό ύφασμα ινών εξελίσσεται και αντικαθίσταται από πλέγματα ινών, τα οποία διαθέτουν κενά διαστήματα, διαφόρων διαστάσεων ανά περίπτωση. Συνέπεια αυτών των βελτιώσεων ήταν να αυξηθούν δραστικά η διείσδυση του οπλισμού εντός της μήτρας και με αυτό τον τρόπο, τελικά, το νέο σύνθετο υλικό να συνδυάσει επιτυχημένα τόσο την εφελκυστική αντοχή από τις ίνες (π.χ. άνθρακα, υάλου, αραμιδίου ή βασάλτη), μαζί και με τα πλεονεκτήματα των ανόργανων λεπτόκοκκων κονιαμάτων (Raoof et al., 2017).

Την τελευταία δεκαετία, η επιστημονική κοινότητα έχει εστιάσει την έρευνα της στο αντικείμενο των IAM, που αποτελούν μία τεχνολογικά εξελιγμένη μέθοδο παραγωγής σύνθετων υλικών, τα οποία βρίσκουν πλήθος εφαρμογών στον τομέα των τεχνικών κατασκευών. Η έρευνα και η εξέλιξη αυτών των υλικών συνεχίζεται και υπάρχουν σημαντικά περιθώρια βελτίωσης αυτών των υλικών. Ειδικότερα, η διαδικασία παραγωγής του τσιμεντοκονιάματος, το οποίο λειτουργεί και ως μήτρα του IAM, συνεισφέρει σημαντικά στην αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου (CO₂) και να έχει δυσμενές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Στην διεθνή βιβλιογραφία, καταγράφονται περιορισμένες μελέτες και άρθρα, στα οποία ερευνάται η δυνατότητα αντικατάστασης του κονιάματος τσιμεντοειδούς υλικού των IAM, από άλλα ανόργανα κονιάματα, τα οποία παρουσιάζουν σημαντικά μικρότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση. Αυτά είναι τα λεγόμενα «γεωπολυμερή», που συνιστούν μία οικολογική εναλλακτική πρόταση στον τομέα των IAM (Papakonstantinou & Koutas, 2021).

2.2 Ινοπλέγματα ανόργανης μητρας

Γενικά για τα IAM

Τα IAM ως σύνθετα δομικά υλικά συντίθενται από δύο διακριτά επιμέρους υλικά: (α) το πλέγμα ινών (Εικόνα 2), τα οποίο αποτελεί τον «οπλισμό» του σύνθετου δομικού υλικού και (β) το εξαιρετικά λεπτόκοκκο σκυρόδεμα ή κονίαμα ανόργανης σύστασης, το οποίο αποτελεί τη μητρική ουσία (Triantafyllou & Paranicolaou, 2006).



Εικόνα 2 : (α) Δείγμα πλέγμα άνθρακα, (β) Δείγμα πλέγμα βασάλτη, (γ) Δείγμα πλέγμα υάλου
(Πηγή : Raoof and Bournas, 2017)

Το πλέγμα ινών αποτελείται από συνδυασμό ευθύγραμμων ομάδων ινών, σε κάθετη διάταξη, συνήθως σε δύο κατευθύνσεις, με κενά ενδιάμεσα και σταθερές αποστάσεις ανάμεσα στις ομάδες ινών, με στόχο την ύπαρξη κενών διαστημάτων. Η ύπαρξη των κενών διαστημάτων στα ινοπλέγματα του IAM έχει άμεση σχέση με τη διαδικασία διείσδυσης του λεπτόκοκκου σκυροδέματος ή κονιάματος εντός του πλέγματος και οδηγεί ουσιαστικά στην δημιουργία μηχανικής συνάφειας μεταξύ ινοπλέγματος και ανόργανης μήτρας. Το εύρος των κενών προσδιορίζεται κατά περίπτωση και εξαρτάται από τις εκάστοτε απαιτήσεις για την καλύτερη εφαρμογή του IAM. Τα πλέγματα ινών αποτελούν τον οπλισμό του σύνθετου υλικού και οι ίνες υψηλής αντοχής (π.χ. άνθρακα, υάλου, αραμιδίου ή βασάλτη) λειτουργούν ως τα δομικά στοιχεία που θα παραλάβουν τις εφελκυστικές τάσεις. Γι' αυτό το λόγο, η τοποθέτηση των ινοπλεγμάτων κατά μήκος της διεύθυνσης των κυρίων τάσεων, βοηθάει στην μέγιστη εκμετάλλευση των μηχανικών ιδιοτήτων των ινών (Μπουρνάς, 2008).

Ο ρόλος του λεπτόκοκκου σκυροδέματος ή κονιάματος εντός του σύνθετου υλικού είναι διπλός. Αφενός, αποτελεί τη βάση (μήτρα) του σύνθετου υλικού (η οποία οδηγεί τις εφελκυστικές τάσεις στις ίνες υψηλής αντοχής) και αφετέρου λειτουργεί και ως μέσο συγκόλλησης του IAM με το υπόστρωμα του δομικού στοιχείου (οπλισμένο σκυρόδεμα). Στα IAM χρησιμοποιείται λεπτόκοκκο σκυρόδεμα με μέγιστο κόκκο αδρανών 2 mm. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης και κονιάματα (π.χ. τσιμεντοκονίαμα ή ασβεστοκονίαμα). Η σύσταση των κονιαμάτων διαμορφώνει την συνολική «συμπεριφορά» του σύνθετου υλικού, σε σχέση με τη δυνατότητα ανάληψης εφελκυστικών τάσεων καθώς και την γενικότερη ανθεκτικότητα του (Vasconcelos et al, 2011).

Διαδικασία εφαρμογής IAM

Κατά τη διαδικασία εφαρμογής των IAM, αρχικά λαμβάνει χώρα κατάλληλη προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος πάνω στην οποία θα εφαρμοστεί το ινóπλεγμα έτσι ώστε να εξασφαλισθεί επαρκής πρόσφυση (Δρίτσος, 2005). Αναλόγως των περιπτώσεων μπορεί να περιλαμβάνει καθαρισμό της επιφάνειας από σκόνη, αύξηση / μείωση της τραχύτητας της επιφάνειας, ομαλοποίηση των γωνιών της επιφάνειας.



Εικόνα 3 : Καθαρισμός επιφάνειας



Εικόνα 4 : Εξασφάλιση απαιτούμενης τραχύτητας



Εικόνα 5 : Ομαλοποίηση γωνιών

Το τμήμα του δομικού στοιχείου που θα ενισχυθεί επικαλύπτεται με μια στρώση τσιμεντοκονιάματος. Στη συνέχεια, ξετυλίγεται το ινóπλεγμα και εφαρμόζεται στην περιοχή που απαιτείται.



Εικόνα 6 : Επικάλυψη με τσιμεντοκονίαμα



Εικόνα 7 : Ανάπτυξη ινοπλέγματος



Εικόνα 8 : Τελική επικάλυψη με τσιμεντοκονίαμα

Ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει στην απαιτούμενη αγκύρωση του ινοπλέγματος. Για να είναι αποτελεσματική η λειτουργία του ινοπλέγματος απαιτείται η αγκύρωση να είναι περίπου τα $2/3$ της πλευράς του δομικού στοιχείου που θα ενισχυθεί.

Στη συνέχεια, καλύπτεται το ινόπλεγμα με μια στρώση τσιμεντοκονίας, για την προστασία του συστήματος ενίσχυσης της κατασκευής. Για την ανάπτυξη της πλήρους αντοχής του συστήματος ενίσχυσης IAM απαιτούνται δεκαπέντε ημέρες.

Πεδίο εφαρμογής των IAM

Τα ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας (IAM) είναι μια καινοτόμος τεχνολογία η οποία χρησιμοποιείται συχνά τα τελευταία χρόνια, για την ενίσχυση και αποκατάσταση δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα, τοιχοποιία καθώς και άλλα δομικά υλικά.

Το πεδίο εφαρμογής των ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας είναι ευρύ (Παπαντωνίου, 2007) και περιλαμβάνει:

- Ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών: Τα IAM χρησιμοποιούνται για την επαύξηση της αντοχής καθώς και της φέρουσας ικανότητας των υφιστάμενων δομικών στοιχείων και οικοδομημάτων, τα οποία έχουν υποστεί καταπονήσεις και βλάβες από σεισμούς, πυρκαγιές, φθορές ή αλλαγές χρήσης.
- Αποκατάσταση ιστορικών και διατηρητέων κτιρίων: Τα IAM είναι ιδανική λύση για την αποκατάσταση ιστορικών και διατηρητέων κτιρίων, καθώς δεν αλλοιώνουν την

αρχιτεκτονική τους εμφάνιση και δεν προσθέτουν σημαντικό πρόσθετο ίδιο βάρος στον υφιστάμενο φέροντα οργανισμό της κατασκευής.

- Κατασκευή νέων δομικών έργων: Τα IAM μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στην κατασκευή νέων δομικών έργων, όπως κτιριακά συγκροτήματα, κατοικίες κλπ, προσφέροντας υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα.
- Ενίσχυση φέρουσας τοιχοποιίας: Τα IAM χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση φέρουσας τοιχοποιίας από τούβλο ή πέτρα, βελτιώνοντας έτσι την ανθεκτικότητά του κτιρίου έναντι σεισμικών αποκρίσεων.
- Εφαρμογές σε ειδικές κατασκευές: Τα IAM μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες ειδικές κατασκευές, όπως δεξαμενές, σιλό και αγωγοί από οπλισμένο σκυρόδεμα, προσφέροντας υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα.

2.3 Τα IAM στο πεδίο των ενισχύσεων του Οπλισμένου Σκυροδέματος (ΟΣ)

Την τελευταία δεκαετία, σημαντικές έρευνες έχουν δημοσιοποιηθεί σχετικά με τη διερεύνηση της χρήσης των IAM ως σύνθετα υλικά ενίσχυσης των δομικών στοιχείων των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα (ΟΣ). Ειδικότερα, έχουν ερευνηθεί μέσω εργαστηριακών πειραμάτων, η μηχανική συμπεριφορά των ενισχύσεων με σύστημα IAM σε καταπόνηση κάμψης και διάτμησης δοκών. Επίσης, έχει εξετασθεί η χρησιμοποίηση των IAM ως μέσο περίσφιγξης των υποστυλωμάτων ΟΣ αλλά επίσης έχει ελεγχθεί και η δυνατότητα του να ενισχύσουν τους κόμβους δοκού - υποστυλώματος. Οι εμπεριστατωμένες έρευνες που έχουν δει το φως της δημοσιότητας σε έγκυρα περιοδικά και αναφέρονται σε ενισχύσεις δομικών στοιχείων ΟΣ με συστήματα IAM ταξινομούνται όπως παρακάτω:

- Ενίσχυση δοκών έναντι κάμψης (ενδεικτική βιβλιογραφία, D' Ambrisi & Focacci 2011, Elsanadedy et al. 2013, Raoof et al. 2017, Raoof and Bournas 2017, Koutas & Papakonstantinou 2021).
- Ενίσχυση δοκών έναντι τέμνουσας (ενδεικτική βιβλιογραφία, Bruckner et al. 2006, Triantafillou & Papanicolaou 2006, Al-Salloum et al. 2012, Azam & Soudki 2014, Tzoura & Triantafillou 2014, Tetta & Bournas 2016).

- Περίσφιγξη υποστυλωμάτων ΟΣ (Triantafyllou et al. 2006, Bournas et al. 2007, Cerniauskas et al. 2020).
- Ενίσχυση με IAM των κόμβων δοκού - υποστυλώματος (Al-Salloum et al. 2011).

2.3.1 Ενίσχυση δοκών οπλισμένου σκυροδέματος έναντι κάμψης

Σε πρόσφατη μελέτη οι Raoof et al. (2017), μελέτησαν μέσω εργαστηριακών πειραμάτων τη συμπεριφορά των συστημάτων ενίσχυσης IAM έναντι κάμψης δοκών ΟΣ. Πιο συγκεκριμένα, διενήργησαν 13 δοκιμές μονοαξονικής κάμψης σε δοκούς ΟΣ, εξετάζοντας τους παρακάτω παράγοντες:

- (α) το υλικό της ενίσχυσης (IAM ή ΙΟΠ)
- (β) τον αριθμό των στρώσεων
- (γ) την κατάσταση της επιφάνειας του υλικού
- (δ) το υλικό του υφάσματος/πλέγματος
- (ε) το σύστημα αγκύρωσης.

Μελετώντας τα πειραματικά αποτελέσματα κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι και τα δύο είδη συστημάτων ενίσχυσης (IAM & ΙΟΠ) βελτίωσαν τη μηχανική συμπεριφορά καταπόνησης των δοκών ΟΣ έναντι μονοαξονικής κάμψης, όμως το σύστημα των IAM παρείχε την μικρότερη βελτίωση. Ωστόσο, με την επαύξηση των στρώσεων πλέγματος ινών των IAM από μια σε τρεις, παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της της καμπτικής ακαμψίας και αντοχής από 0.47 σε 0.80 (γεγονός που εμφανίζει μη αναλογική μεταβολή). Μια άλλη σημαντική διαπίστωση ήταν η πολύ ουσιαστική βελτίωση της αποτελεσματικότητας του μανδύα των συστημάτων ενίσχυσης IAM κατά 55%, στην περίπτωση που οι ίνες του σύνθετου υλικού είχαν πρόσθετη αλληλοκάλυψη. Πρέπει να επισημανθεί ότι σημαντική επαύξηση της αποτελεσματικότητας της καμπτικής ενίσχυσης διαδραμάτισε η αγκύρωση. Στην περίπτωση των ΙΟΠ, όταν τοποθετήθηκε τρίπλευρος μανδύας, παρουσιάστηκε αύξηση της αντοχής του ΙΟΠ κατά 90%! Αντιθέτως η επίδραση της αγκύρωσης στα συστήματα των IAM ήταν σημαντικά περιορισμένη και άγγιξε μόλις το 9%.

Παρόμοιες πειραματικές διατάξεις για τη μελέτη της μονοαξονικής καμπτικής ενίσχυσης δομικών στοιχείων ΟΣ έγιναν και από τους D' Ambrisi and Focacci (2011).

Ειδικότερα, διεξήγαγαν 24 δοκιμές μονοαξονικής κάμψης σε ορθογωνικά δοκίμια δοκών ΟΣ ενισχυμένα με μανδύες ενίσχυσης IAM με κυριότερες παραμέτρους:

- (α) τον αριθμό των στρώσεων
- (β) τις ιδιότητες της μήτρας
- (γ) τις φυσικές ιδιότητες των ινών πλέγματος (π.χ. άνθρακας).

Συμπερασματικά, αποδείχθηκε ότι η αντοχή του συστήματος ενίσχυσης των IAM έναντι μονοαξονικής κάμψης, αυξήθηκε, με μη αναλογικό τρόπο, με την ταυτόχρονη αύξηση του αριθμού των στρώσεων των πλεγμάτων ινών. Παράλληλα, επισημαίνεται η ουσιαστική επίδραση των μηχανικών ιδιοτήτων της ανόργανης μήτρας στην αντοχή του συνολικού συστήματος ενίσχυσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις των πειραματικών δοκιμών, η αστοχία προκλήθηκε από την αποκόλληση της διεπιφάνειας μεταξύ ινών και ανόργανης μήτρας και όχι από αποκόλληση στη διεπιφάνεια μεταξύ σκυροδέματος και σύνθετου υλικού, (Εικόνες 9 & 10).

Παρόμοια μελέτη διενήργησαν και οι Elsanadedy et al. (2013), σε έξι δοκούς ΟΣ ορθογωνικής διατομής, υποβαλλόμενες σε μονοαξονική κάμψη. Οι τρεις δοκοί ήταν εξωτερικά ενισχυμένες με πλέγμα ινών IAM από βασάλτη, ενώ μία δοκός ήταν ενισχυμένη με ύφασμα με άνθρακα (CFRP).

Οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν:

- (α) αριθμός στρώσεων
- (β) ιδιότητες ανόργανης μήτρας
- (γ) ιδιότητες πλέγματος.

Από τις πειραματικές δοκιμές προέκυψε τα εξής συμπεράσματα:

- Το σύστημα ενίσχυσης ΙΟΠ είναι ελάχιστα πιο αποδοτικό από το σύστημα ενίσχυσης IAM.
- Η παρουσία τρίπλευρης αγκύρωσης στους μανδύες επαυξάνει την αποτελεσματικότητα του συστήματος ενίσχυσης IAM.
- Η χρήση διαφορετικού είδους κονιάματος ως ανόργανη μήτρα έχει ως αποτέλεσμα ποικίλα αποτελέσματα, καθιστώντας έτσι το είδος του κονιάματος και των μηχανικών ιδιοτήτων της ανόργανης μήτρας, πολύ σημαντικό παράγοντα των συστημάτων ενίσχυσης των δομικών στοιχείων ΟΣ.

Σε πρόσφατη εξειδικευμένη μελέτη των Koutas and Papakonstantinou (2021) εξετάσθηκε η επιρροή των ιδιοτήτων της ανόργανης μήτρας στην ενίσχυση της καμπτικής αντοχής. Ειδικότερα, μελετήθηκαν πειραματικά εννέα δοκοί ΟΣ σε μονοαξονική κάμψη, με παραμέτρους διερεύνησης όπως παρακάτω:

- (α) τη σύστασης της μήτρας
- (β) το είδος και τον αριθμό των στρώσεων του πλέγματος (3 ή 6).

Από τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει το συμπέρασμα ότι το είδος της ανόργανης μήτρας καθορίζει την συνολική καμπτική συμπεριφορά του συστήματος ΙΑΜ. Επίσης, το είδος της μήτρας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο και στο είδος της μορφής αστοχίας, όταν αυτή δεν είναι αποτέλεσμα της θραύσης των ινών του πλέγματος.



Εικόνα 9 :Αστοχία ΙΑΜ, 2 στρώσεις PBO



Εικόνα 10 : Αστοχία ΙΑΜ, 2 στρώσεις PBO

(D' Ambrisi and Focacci 2011)

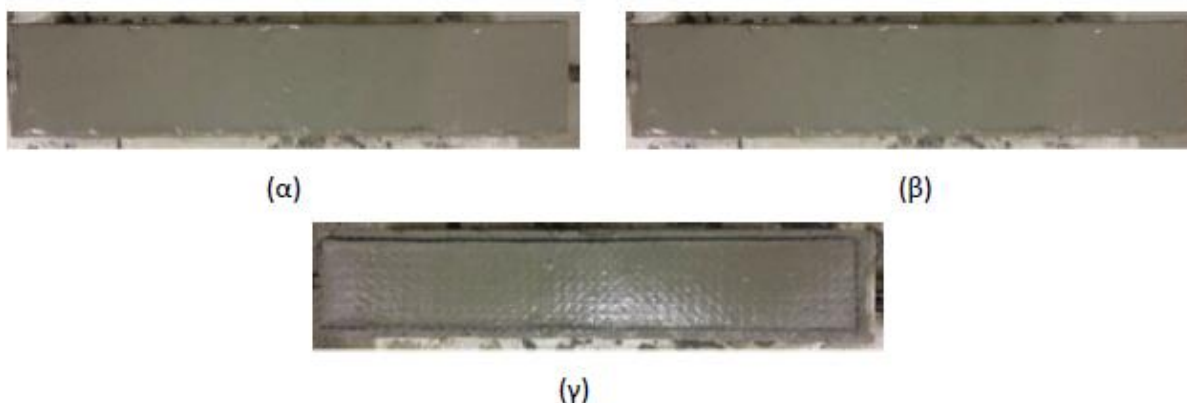
Στην διερεύνηση της επίδρασης των υψηλών θερμοκρασιών στην καταπόνηση έναντι κάμψης στοιχείων δοκών ΟΣ ενισχυμένα με ΙΑΜ, μελέτησαν στην εργασία τους οι Raoof and Bournas (2017). Η διαδικασία ενίσχυσης των δοκών ΟΣ με συστήματα ΙΑΜ παρουσιάζεται επιγραμματικά στην Εικόνα 11. Ειδικότερα, εξετάσθηκαν πειραματικά συνολικά 23 δοκιμές κάμψης σε δοκούς ΟΣ και οι εξεταζόμενες παράμετροι ήταν :

- (α) το υλικό ενίσχυσης (ΙΑΜ ή ΙΟΠ)
- (β) ο αριθμός των στρώσεων
- (γ) η επιφάνεια του υφάσματος (με επικάλυψη ή χωρίς επικάλυψη)
- (δ) το υλικό των ινών (άνθρακας, βασάλτης, υάλος)
- (ε) η αγκύρωση του πλέγματος.

Το σύστημα ενίσχυσης των δοκών ΟΣ με ΙΑΜ αποδείχθηκε σημαντικά πιο αποδοτικό από το σύστημα ενίσχυσης με ΙΟΠ καθώς σε κατάσταση υψηλών θερμοκρασιών (από 150°C

μέχρι 200°C) διατήρησε κατά σχεδόν 55% τη συνολική στατική απόδοση που εμφάνισε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (20°C). Εν αντιθέσει, το σύστημα ενίσχυσης με ΙΟΠ, απώλεσε πλήρως την αποδοτικότητα του. Επιπρόσθετα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την πειραματική μελέτη ήταν:

- Η θετική συνεισφορά της αύξησης των στρώσεων ενίσχυσης καθώς και της επικάλυψης των ινών των ΙΑΜ, στην επαύξηση της αντοχής των δοκών ΟΣ έναντι κάμψης.
- Η σχεδόν αμελητέα συνεισφορά της αγκύρωσης της ενίσχυσης των ΙΑΜ, στην ανθεκτικότητα των δοκών ΟΣ έναντι κάμψης, όταν αυτές βρίσκονται σε υψηλές θερμοκρασίες (150° C, 200° C).



Εικόνα 11 : Στάδια ενίσχυσης δοκού ΟΣ

(α) Επικάλυψη επιφάνειας με τσιμεντοκονίαμα

(β) Τοποθέτηση ινοπλέγματος

(γ) Τελική επικάλυψη με τσιμεντοκονίαμα

(Πηγή : Raoof and Bournas, 2017)

2.3.2 Ενίσχυση σε τέμνουσα δοκών οπλισμένου σκυροδέματος

Σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας καταγράφεται στην έρευνα, για την επαύξηση της αντοχής δοκών ΟΣ έναντι τέμνουσας, με τη χρήση σύνθετων υλικών με μανδύες ΙΑΜ.

Πριν από αρκετά χρόνια, οι Triantafyllou and Papanicolaou (2006), εξέτασαν έξι δοκούς ΟΣ με ορθογωνική διατομή, με τετράπλευρους μανδύες ΙΑΜ, σε μονοαξονική κάμψη, τόσο μονοτονικά όσο και σε συνθήκες κυκλικής επαναλαμβανόμενης φόρτισης. Στη συνέχεια,

συνέκριναν τα πειραματικά αποτελέσματα, με μια πρότυπο δοκού ΟΣ (δοκίμιο αναφοράς) που ήταν ενισχυμένο με μανδύα ΙΟΠ. Το σημαντικότερο συμπέρασμα που προέκυψε ήταν ότι σε σύγκριση με το δοκίμιο αναφοράς, καταγράφηκε σημαντικότερη αύξηση της αντοχής της δοκού ΟΣ έναντι διάτμησης, σε ποσοστό σχεδόν 100%. Επιπλέον, το σύστημα ενίσχυσης ΙΟΠ ήταν αποδοτικότερο σε σχέση με το αντίστοιχο σύστημα ενίσχυσης ΙΑΜ κατά 45%.

Πειραματικές δοκιμές μονοτονικής φόρτισης δοκού ΟΣ διενεργήθηκαν από τους Al-Salloum et al. (2012) και Azam & Soudki (2014) σε συνολικά 17 δοκούς ΟΣ ορθογωνικής διατομής, ενισχυμένες με μανδύες ΙΑΜ. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν ήταν:

- (α) ο αριθμός των στρώσεων του πλέγματος
- (β) ο τρόπος διάταξης των ινών ($0^{\circ}/90^{\circ}$ ή $-45^{\circ}/+45^{\circ}$)
- (γ) η τεχνική επικόλλησης του μανδύα (δίπλευροι ή τρίπλευροι).

Από τα πειραματικά αποτελέσματα της μελέτης, συμπεραίνεται ότι:

- ✓ Το δομικό στοιχείο ΟΣ ενισχυμένο με 4 στρώσεις μανδύα ΙΑΜ εμφάνισε αυξημένη αντοχή σε διάτμηση, σε σύγκριση με το δομικό στοιχείο ΟΣ με 2 στρώσεις (εμφανίζεται μη αναλογική αύξηση της αντοχής).
- ✓ Οι τρίπλευροι μανδύες ενίσχυσης παρουσιάζουν σημαντικότερη αντοχή από τους δίπλευρους.

Σχετικά με τη βέλτιστη διάταξη των ινών του πλέγματος, προέκυψε πειραματικά ότι η διάταξη σε γωνία $-45^{\circ}/+45^{\circ}$ έχει ως αποτέλεσμα να παρουσιάζεται αυξημένο ποσοστό ανάληψης τέμνουσας δύναμης, εφόσον η ανόργανη μήτρα του ΙΑΜ αποτελείται από τροποποιημένο τσιμεντοκονίαμα. Στη διεξαγωγή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν εμπορικά διαθέσιμα κονιάματα, διαφορετικής κοκκομετρικής σύστασης σε συνδυασμό με ινοπλέγματα (π.χ. βασάλτη, άνθρακα, ύαλο).

Την διερεύνηση της επίδρασης των υψηλών θερμοκρασιών στη διατμητική αντοχή και συμπεριφορά των μανδυνών ΙΑΜ, μελέτησαν στην εργασία τους οι Tetta & Bournas (2016). Ειδικότερα, μελετήθηκαν συστήματα ενίσχυσης ΙΑΜ και ΙΟΠ σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών. Οι παραμέτρους που διερευνήθηκαν ήταν:

- (α) το είδος της μήτρας (ρητίνη ή κονίαμα)
- (β) η θερμοκρασία
- (γ) η τεχνική επικόλλησης (side bonding, U-wrapping, full-wrapping)
- (δ) ο αριθμός των στρώσεων του μανδύα
- (ε) οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού (γεωμετρία και υλικό υφάσματος/πλέγματος).

Τα πειράματα διαχωρίστηκαν σε 2 γενικές κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιελάμβανε 28 δοκιμές μονοαξονικής κάμψης δοκών ΟΣ, ορθογωνικής διατομής. Οι 16 δοκιμές διεξήχθησαν υπό συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών (από 100°C έως 250°C), ενώ οι 12 άλλες δοκιμές διεξήχθησαν υπό κανονική θερμοκρασία περιβάλλοντος (20°C). Το σύνθετο υλικό ενίσχυσης τοποθετήθηκε σε συγκεκριμένο σημείο στο οποίο η καταπόνηση από διάτμηση ήταν ισχυρή. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών, προκύπτει ότι τα συστήματα ενίσχυσης ΙΑΜ επέδειξαν εξαιρετική μηχανική συμπεριφορά, σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών. Ενώ αντίθετα, τα συστήματα ενίσχυσης ΙΟΠ, παρουσίασαν σημαντική μείωση της ικανότητας ανάληψης τέμνουσας της τάξεως του 60% όταν η θερμοκρασία ανήλθε από τους 20°C (θερμοκρασία περιβάλλοντος) στους 100°C και μείωση της ικανότητας ανάληψης τέμνουσας κατά 88%, όταν αντίστοιχα η θερμοκρασία αυξήθηκε από 20° C στους 150°C.

Επιπρόσθετα παρατηρήθηκε ότι στα συστήματα ενίσχυσης ΙΑΜ, η μορφή αστοχίας διαφοροποιείται με την αύξηση των στρώσεων του ινοπλέγματος από 2 σε 3. Γεγονός το οποίο δεν συμβαίνει στα στοιχεία με μανδύες ΙΟΠ. Ακόμη η χρησιμοποίηση ινοπλεγμάτων άνθρακα, τα οποία παρουσιάζουν πυκνότερη γεωμετρία, είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής του δομικού στοιχείου. Αναφορικά με την τεχνική επικόλλησης των συστημάτων ενίσχυσης, αποδείχθηκε πειραματικά, όπως αναμενόταν, ότι αποτελεσματικότερη τεχνική επικόλλησης, η οποία οδηγεί και σε μεγαλύτερη αντοχή έναντι διάτμησης, είναι κατά σειρά απόδοσης:

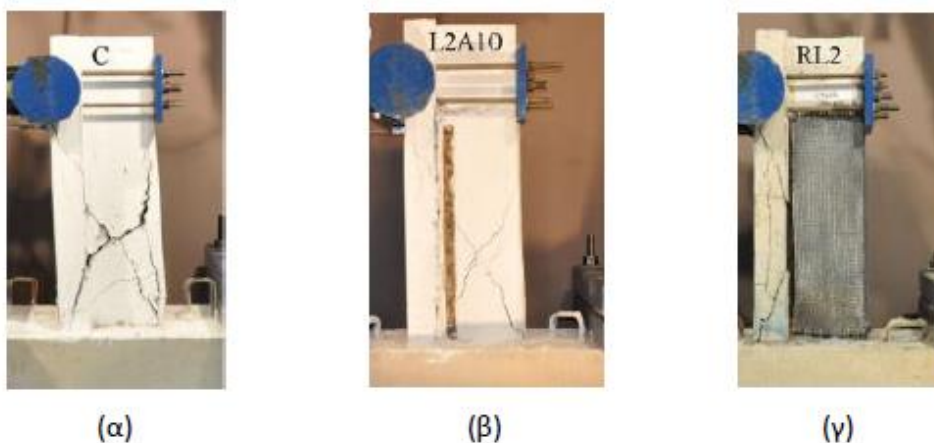
- Κλειστοί μανδύες (fully-wrapping)
- Τρίπλευροι μανδύες ανοιχτού τύπου (U-wrapping)
- Πλευρικά επικολλημένοι μανδύες (side-bonding).

Στη δεύτερη ομάδα εργαστηριακών πειραμάτων διερευνήθηκε η επίδραση των αγκυρίων στη επαύξηση της διατμητικής αντοχής του δοκιμίου. Διενεργήθηκαν 5 δοκιμές μονοαξονικής κάμψης σε δοκούς ΟΣ και διατομής τύπου Τ και μία δοκιμή με μανδύες τριών πλευρών TRM, τόσο σε υψηλή θερμοκρασία (150°C), όσο και σε κανονική θερμοκρασία (20°C). Από τα πειραματικά δεδομένα συμπεραίνεται ότι όλα τα δομικά στοιχεία διατήρησαν την στατική τους αποτελεσματικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα δοκίμια που ενισχύθηκαν χωρίς να αγκυρωθούν οι μανδύες, παρουσίασαν μείωση της επίδρασης του μανδύα κατά 30.5%, κυρίως λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, ενώ αντίθετα η χρήση των αγκυρίων, οδήγησε σε αύξηση της αποτελεσματικότητας του μανδύα ΙΑΜ κατά 80%.

Πρόσθετες ερευνητικές μελέτες που διεξήχθησαν με στόχο τη μελέτη της συμπεριφοράς των συστημάτων ΙΑΜ έναντι τέμνουσας σε κανονική θερμοκρασία, οδήγησαν σε παρόμοια

αποτελέσματα. Ειδικότερα, οι Bruckner et al. (2006) διεξήγαγαν δοκιμές μονοτονικής φόρτισης, σε δομικά στοιχεία πλακοδοκών, ορθογωνικής και Τ διατομής, ενισχυμένα με τρίπλευρους μανδύες ΙΑΜ υάλου με την ύπαρξη ή όχι αγκύρωσης. Παρατηρήθηκε βελτίωση της αποδοτικότητας του συστήματος ενίσχυσης στις δοκούς ορθογωνικής διατομής κατά περίπου 75%, ενώ στις δοκούς διατομής Τ η αντίστοιχη βελτίωση της αποδοτικότητας ήταν της τάξης του 33%.

Στη συνέχεια, οι Tzoura & Triantafillou (2014), μελέτησαν την επίδραση της αγκύρωσης σε τρίπλευρους μανδύες ΙΑΜ επί πλακοδοκών που λειτουργούσαν στατικά ως πρόβολοι. Συγκεκριμένα, εξέτασαν 13 δοκιμές κυκλικής φόρτισης και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι δύναται να αυξηθεί σημαντικά η αντοχή του συστήματος ΙΑΜ, εφόσον αυτό αγκυρωθεί επαρκώς. Τέλος, συγκρίνοντας τα συστήματα ενίσχυσης ΙΟΠ και ΙΑΜ, παρατηρήθηκε ότι σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η ύπαρξη αγκύρωσης. Πιο συγκεκριμένα, με την αγκύρωση των μανδυνών ενίσχυσης ΙΑΜ εμφανίζεται περίπου η ίδια αντοχή με τους μανδύες ενίσχυσης ΙΟΠ. Ενώ αντιθέτως, όταν απουσιάζει το σύστημα αγκύρωσης το ΙΑΜ εμφανίζει σημαντική μειωμένη αποτελεσματικότητα σε σχέση με το αντίστοιχο σύστημα ενίσχυσης ΙΟΠ (σημαντική μείωση κατά 50%). Στην Εικόνα 12, παρουσιάζονται μορφές αστοχίας των δοκιμών κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.



Εικόνα 12 : Αστοχία δοκιμών

(α) δοκίμιο αναφοράς

(β) δοκίμιο με ΙΑΜ με 2 στρώσεις

(γ) δοκίμιο με ΙΟΠ με 2 στρώσεις

(Πηγή : Tzoura and Triantafillou, 2014)

2.3.3 Περίσφιξη υποστυλωμάτων

Την εφαρμογή των μανδύων ενίσχυσης IAM στην περίσφιξη των υποστυλωμάτων ΟΣ, μελέτησαν οι Triantafyllou et al. (2006). Εξέτασαν την πειραματική εφαρμογή των συστημάτων IAM σε υποστυλώματα ΟΣ κυλινδρικής και ορθογωνικής διατομής, ως μέθοδο επαύξησης της δυνατότητας ανάληψης αξονικής θλίψης από το υποστυλώμα ΟΣ μέσω της περίσφιξης του.

Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκαν 44 δοκιμές αξονικής θλίψης, μονοτονικής φύσεως. Οι μεταβλητές που εξετάστηκαν ήταν:

- (α) το είδος της μήτρας (ανόργανη ή οργανική, ρητίνη)
- (β) η αντοχή της ανόργανης μήτρας (2 διαφορετικά μίγματα)
- (γ) ο αριθμός των στρώσεων του υφάσματος (2 ή 4 στρώσεις άνθρακα)
- (δ) την ύπαρξη ή μη αγκύρωσης.

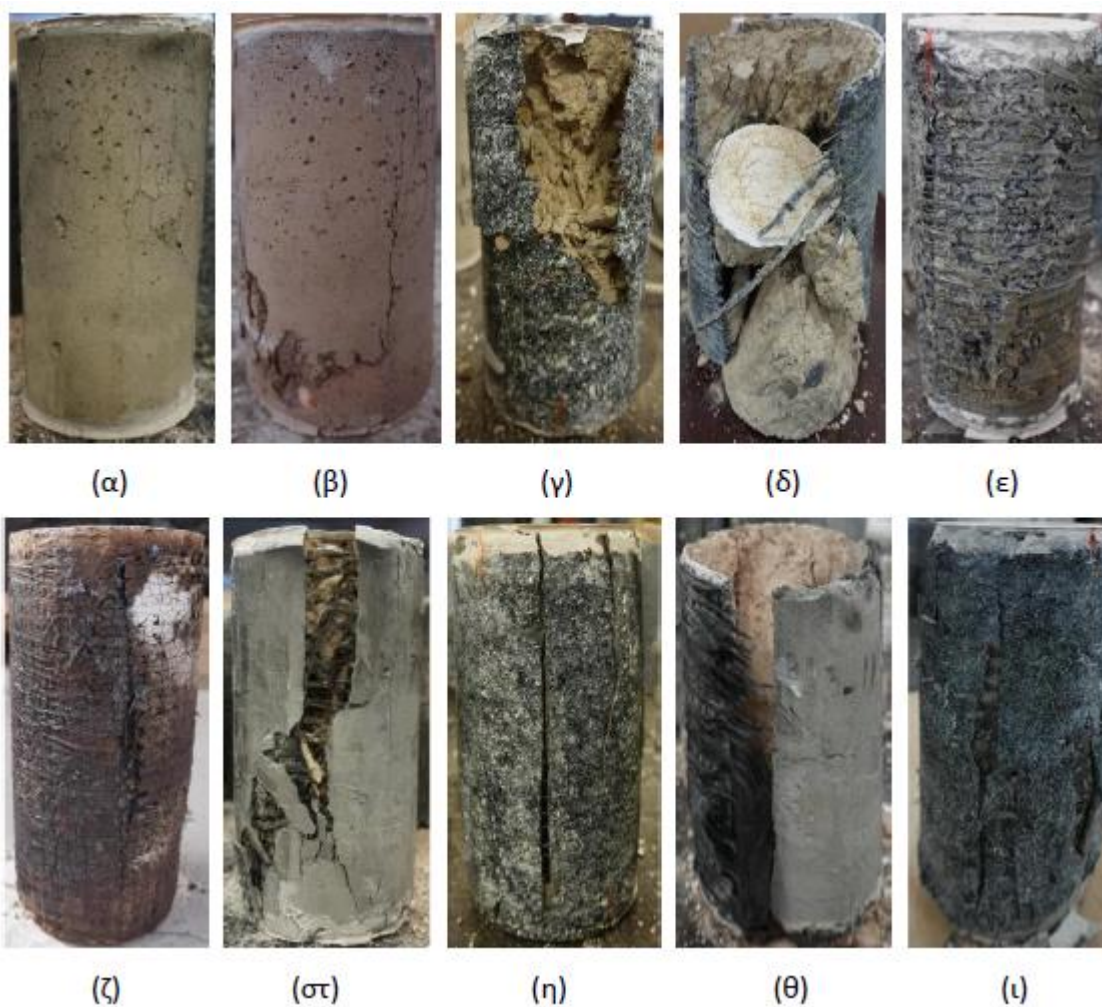
Σε μια άλλη μελέτη, οι Bournas et al. (2007) διεξήγαγαν 15 πειραματικές δοκιμές κεντρικής θλίψης, σε υποστυλώματα ΟΣ, ορθογωνικής διατομής. Οι κύριες παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν ίδιες με αυτούς των Triantafyllou et al. (2006), οι οποίες παρουσιάστηκαν ανωτέρω.

Τα συμπεράσματα των προαναφερθέντων ερευνητικών εργασιών αποδεικνύουν ότι οι μανδύες ενίσχυσης IAM, εμφανίζουν μειωμένη αντοχή σε σχέση με τους μανδύες ενίσχυσης ΙΟΠ. Όμως αποτελούν μία ικανοποιητική λύση ενίσχυσης της περίσφιξης των υποστυλωμάτων, και έχουν ως αποτέλεσμα σημαντική αύξηση της αντοχής του δομικού στοιχείου ΟΣ έναντι θλίψης.

Διερευνήθηκε, διεξοδικά, η επίδραση της διατομής του δοκιμίου στην αντοχή περίσφιξης των υποστυλωμάτων ΟΣ. Στα δοκίμια με κυλινδρική διατομή και με ενίσχυση IAM παρατηρήθηκε σημαντική πτώση της αντοχής τους (περίπου 80%) έναντι κεντρικής θλίψης και σε όρους παραμόρφωσης αστοχίας κατά 50% σε σχέση με τα δοκίμια ενισχυμένα με ΙΟΠ. Αντιθέτως, στα υποστυλώματα με ορθογωνική διατομή, ο μανδύας ενίσχυσης IAM, παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά, καθώς υπολείπεται έναντι του μανδύα ενίσχυσης ΙΟΠ μόλις 10%. Ένα άλλο συμπέρασμα που προέκυψε από την μελέτη είναι ότι, αυξάνοντας το ογκομετρικό ποσοστό του μανδύα (δηλαδή ουσιαστικά αύξηση των στρώσεων) έχει ως συνέπεια την αποτελεσματικότερη συμπεριφορά του συστήματος IAM, όσον αφορά τη

βελτίωση της θλιπτικής αντοχής του υποστυλώματος ΟΣ αλλά και στην επιβράδυνση της εκδήλωσης του φαινομένου του λυγισμού του διαμήκους οπλισμού. Τέλος, επισημαίνεται ότι η μορφή αστοχίας του συστήματος IAM είναι λιγότερο απότομη σε σχέση με την αστοχία του μανδύα ΙΟΠ, γεγονός που αιτιολογείται λόγω της μεγαλύτερης κατανομής της καταπόνησης διαμέσου των πολλαπλών ρηγμάτωσης του ανόργανου κονιάματος.

Την επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών στην εν γένει συμπεριφορά και αποτελεσματικότητα της περίσφιγξης των υποστυλωμάτων ΟΣ με IAM μελέτησαν οι Cerniauskas et al. (2020). Εξέτασαν 24 κυλινδρικά δοκίμια ΟΣ, ενισχυμένα εξωτερικά με στρώσεις IAM ή ΙΟΠ. Ταυτόχρονα, τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες από 20°C μέχρι και 400°C και οδηγήθηκαν σε κατάσταση αστοχίας μέσω κεντρικής θλίψης. Από τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών προέκυψε ότι η αποδοτικότητα των συστημάτων ενίσχυσης ΙΟΠ μειώθηκε σημαντικά με την παράλληλη αύξηση της θερμοκρασίας. Αντιθέτως, τα συστήματα ενίσχυσης IAM εμφάνισαν μεγαλύτερη αντοχή σε ποσοστό 150% σε σχέση με την αντοχή που εμφάνισαν τα συστήματα ενίσχυσης ΙΟΠ. Διαφορετικές μορφές αστοχίας παρατηρήθηκαν στις πειραματικές διατάξεις που διενήργησαν οι Cerniauskas et al. (2020) και απεικονίζονται στην Εικόνα 13.



Εικόνα 13 : Μορφές αστοχίας διαφόρων δοκιμίων

(α) δοκίμιο αναφοράς στους 20° C

(β) δοκίμιο αναφοράς στους 400° C

(γ) δοκίμιο με ΙΟΠ, 1 στρώση στους 20° C

(δ) δοκίμιο με ΙΟΠ, 3 στρώσεις στους 20° C

(ε) δοκίμιο με ΙΟΠ, 3 στρώσεις στους 400° C

(ζ) δοκίμιο με ΙΑΜ, 1 στρώση στους 20° C

(στ) δοκίμιο με ΙΟΠ, 3 στρώσεις στους 400° C

(η) δοκίμιο με ΙΑΜ, 1 στρώση στους 400° C

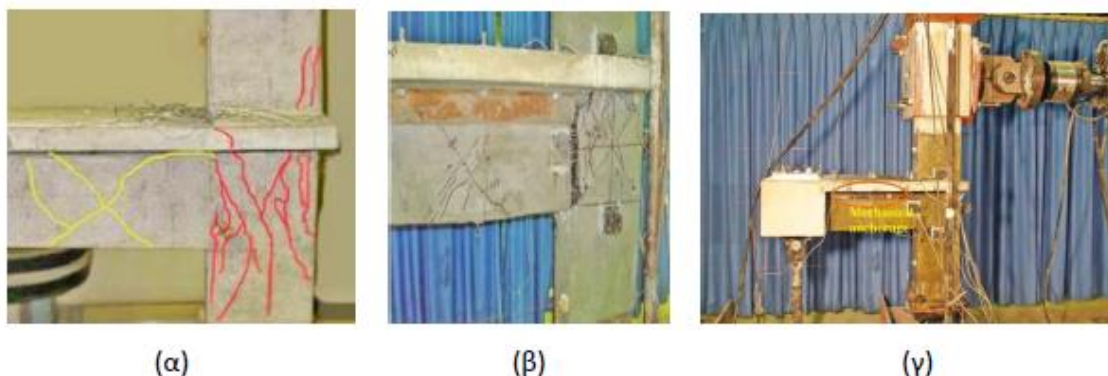
(θ)δοκίμιο με ΙΑΜ, 3 στρώσεις στους 400° C

(ι) δοκίμιο με ΙΑΜ, 3 στρώσεις στους 400° C

(Πηγή : Cerniauskas et al. 2020)

2.3.4 Ενίσχυση κόμβων δοκού - υποστυλώματος

Η ενίσχυση του κόμβου δοκός – υποστυλώμα μελετήθηκε από τους Al- Salloum et al. (2011). Ειδικότερα διεξήγαγαν 5 δοκιμές επαναλαμβανόμενης φόρτισης σε 2 δοκίμια με ενίσχυση ΙΟΠ, σε 1 δοκίμιο με μανδύα ενίσχυσης ΙΑΜ σε τρεις πλευρές και τέλος σε 2 δοκίμια αναφοράς. Η συνολική πειραματική διάταξη απεικονίζεται στην Εικόνα 14. Μετά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των πειραματικών δοκιμών, συμπεραίνεται ότι οι μανδύες ενίσχυσης ΙΑΜ επαύξησαν την ικανότητα παραμόρφωσης των δοκιμών σε ποσοστό 50%, ενώ ταυτόχρονα αύξησαν και την αντοχή τους αλλά μόνο σε ποσοστό 15%. Το ποσοστό αυτό θεωρείται χαμηλό, σε σύγκριση με την αντίστοιχη αύξηση της αντοχής που παρουσίασαν τα δοκίμια με ενίσχυση μανδύα ΙΟΠ, η οποία ήταν της τάξης του 50%. Οι συγγραφείς επισημαίνουν ότι παρόλη την περιορισμένη ύπαρξη πειραματικών δεδομένων, εκτιμάται ότι η χρήση αυξημένου αριθμού στρώσεων ΙΑΜ, δύναται να επιφέρει σημαντική βελτίωση, τόσο αντοχής έναντι διάτμησης όσο και της δυνατότητας παραμόρφωσης του κόμβου δοκού - υποστυλώματος, όμοια σχεδόν με αυτή που εμφανίζουν τα δοκίμια με μανδύες ενίσχυσης ΙΟΠ συστήματα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικές φωτογραφίες μορφών αστοχίας ενισχυμένου και συμβατικού δοκιμίων (Εικόνα 14).



Εικόνα 14 : Αστοχία δοκιμίων

(α) δοκίμιο αναφοράς

(β) δοκίμιο με ΙΑΜ

(γ) Συνολική διάταξη πειράματος

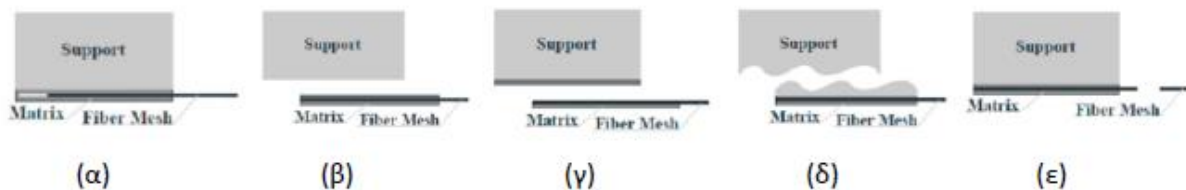
(Πηγή : Al- Salloum et al. 2011)

Αντοχή σε συνάφεια IAM - σκυροδέματος

Σημαντικός παράγοντας για την επιτυχή χρήση των IAM στην καθημερινή πρακτική, διαδραματίζει η κατανόηση της συνάφειας μεταξύ του σκυροδέματος και του σύνθετου υλικού. Για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου κρίνεται απαραίτητο, να ταξινομηθούν οι μορφές αστοχίας που δύναται να εμφανισθούν σε ένα σύστημα IAM, όπως αναφέρονται παρακάτω:

- (α) Μορφή I (ολίσθηση των ινών εντός της μήτρας)
- (β) Μορφή II (αποκόλληση επί της διεπιφάνειας σκυροδέματος - μήτρας)
- (γ) Μορφή III (αποκόλληση επί της διεπιφάνειας μήτρας - πλέγματος)
- (δ) Μορφή IV (αποκόλληση επί της επιφάνειας σκυροδέματος – με ταυτόχρονη εκτίναξη της επικάλυψης)
- (ε) Μορφή V (θραύση των ινών).

Συνολική απεικόνιση των μορφών αστοχίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 15.

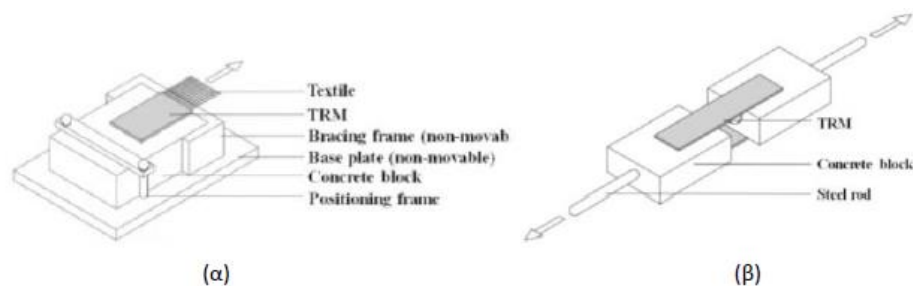


Εικόνα 15 : Μορφές αστοχίας δοκιμίων

(α) Μορφή I, (β) Μορφή II, (γ) Μορφή III, (δ) Μορφή IV, (ε) Μορφή V

(Πηγή : Elsanadedy et al. 2019)

Η αντοχή της συνάφειας μεταξύ IAM και σκυροδέματος έχει μελετηθεί, κατά κύριο λόγο μέσω των πειραματικών δοκιμών απλής ή διπλής διάτμησης. Μία λωρίδα ενίσχυσης IAM προστίθεται εξωτερικά από τη μία μόνο όψη του δοκιμίου ΟΣ, στις δοκιμές απλής διάτμησης. Στη συνέχεια, επιβάλλεται εφελκυστικό φορτίο στο σύστημα IAM, ενώ το στοιχείο του δοκιμίου ΟΣ μένει σταθερό και ακλόνητο. Αντίστοιχα και στις δοκιμές με διπλή διάτμηση, οι λωρίδες ενίσχυσης IAM κολλώνται εξωτερικά σε δύο στοιχεία δοκιμίων ΟΣ, που συνδέονται μεταξύ τους μόνο μέσω των λωρίδων αυτών (και από τις δύο πλευρές). Στη συνέχεια στα δοκίμια επιβάλλεται εφελκυστική δύναμη μέχρι την αστοχία του σύνθετου υλικού IAM. Οι ανωτέρω περιγραφόμενες πειραματικές διατάξεις, φαίνονται σχηματικά στην Εικόνα 16.



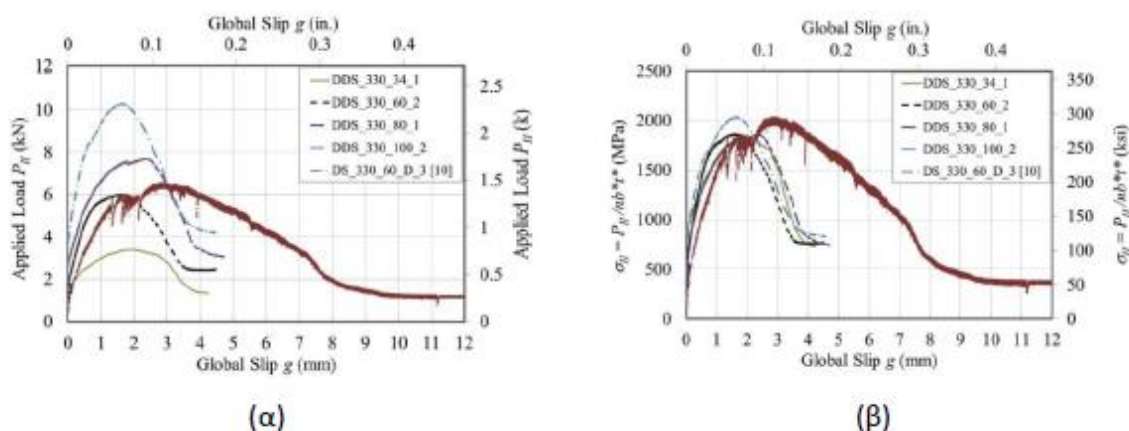
Εικόνα 16 : Πειραματική διάταξη
(α) Μονής διεύθυνσης, (β) Διπλής διεύθυνσης
(Πηγή : Elsanadedy et al. 2019)

Στο πλαίσιο ερευνητικής μελέτης οι Sneed et al. (2015), εξέτασαν 16 δοκίμια στοιχείων ΟΣ με ενίσχυση ΙΑΜ από ΡΒΟ, με διαφορετικά πλάτος και μήκος επικόλλησης. Όλα τα δοκίμια καταπονήθηκαν σε δοκιμές διπλής διάτμησης.

Στη συνέχεια, συγκρίνοντας τα συμπεράσματα αυτών των πειραμάτων σε σχέση με προηγούμενες μελέτες τους, κατά τις οποίες στοιχεία δοκιμών ΟΣ, με ίδια γεωμετρία, υποβλήθηκαν σε δοκιμές απλής διάτμησης, συμπέραναν ότι:

- Οι σχηματιζόμενες καμπύλες φορτίου – μετατόπισης και για τις δύο περιπτώσεις, είναι παρόμοιας μορφής, μέχρι του σημείου του μέγιστου φορτίου. Ειδικότερα, σε περίπτωση που στη δοκιμή διπλής διάτμησης, η αστοχία και αποκόλληση του σύνθετου υλικού πραγματοποιηθεί και στις δύο λωρίδες, ταυτόχρονα, τότε η συμπεριφορά του συστήματος μπορεί να παρομοιαστεί με αυτή της απλής διάτμησης.
- Αν σημειωθεί αστοχία και αποκόλληση σε μία από τις δύο λωρίδες, τότε η τιμή του μέγιστου φορτίου αστοχίας που θα καταγραφεί, παρουσιάζει μεγαλύτερη τιμή από την αντίστοιχη που προκύπτει από το πείραμα της απλής διάτμησης.
- Η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στα δοκίμια που καταπονήθηκαν σε διπλή διάτμηση ήταν σαφώς μικρότερη από την αντίστοιχη τάση που παρουσιάστηκε κατά την διαδικασία της απλής διάτμησης.
- Στην περίπτωση της απλής διάτμησης, σημειώθηκε μικρότερη διασπορά στο μέγιστο φορτίο αστοχίας.

Στην Εικόνα 17, παρουσιάζονται τα σχετικά διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης και τάσης - μετατόπισης για δοκίμια με μήκος επικόλλησης 330mm, που καταπονήθηκαν σε διπλή και σε απλή διάτμηση (δοκίμιο DS_330_60_D_3).



Εικόνα 17 : (α) Διάγραμμα δύναμης – ολίσθησης, (β) Διάγραμμα τάσης – ολίσθησης
(Πηγή : Sneed et al. 2015)

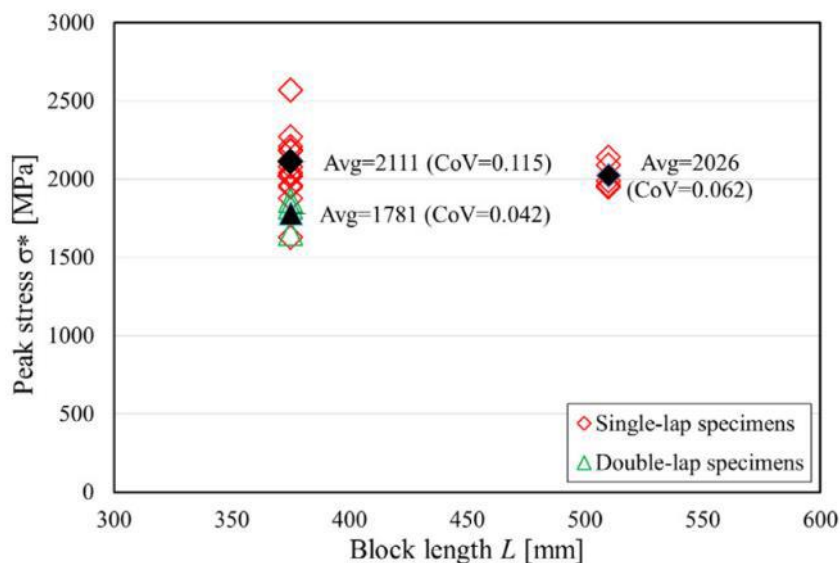
Η πειραματική διάταξη της καταπόνησης ενός δοκιμίου ΟΣ έναντι απλής διάτμησης, παρουσιάζει το πλεονεκτήματα της απλότητας, καθώς η εξωτερικά επιβαλλόμενη δύναμη, ασκείται απ' ευθείας στο σύνθετο υλικό. Αποτέλεσμα είναι, η δύναμη που ασκείται τελικά στο ΙΑΜ καθώς και η αναπτυσσόμενη τάση, να μπορεί να υπολογισθεί άμεσα και εύκολα, χωρίς την ανάγκη διενέργειας πρόσθετων υπολογισμών. Επισημαίνεται όμως, ότι η πειραματική διάταξη πρέπει να σχεδιαστεί πολύ προσεκτικά, έτσι ώστε το εξωτερικά επιβαλλόμενο φορτίο να ασκείται κεντρικά και ομοιόμορφα στο ΙΑΜ. Με αυτό τον τρόπο, περιορίζεται στο ελάχιστο η αθέλητη εκκεντρότητα του άξονα επιβολής του φορτίου ως προς τη στήριξη.

Πρακτικά, αυτή η πολύ μικρή εκκεντρότητα δε μπορεί να εξαλειφθεί τελείως και για αυτό το λόγο, οι D'Antino et al. (2016) διενήργησαν μία πειραματική έρευνα. Μελέτησαν συγκεκριμένα 20 δοκίμια σε απλή διάτμηση με ενίσχυση ΙΑΜ ΡΒΟ δομικά στοιχεία ΟΣ και προσπάθησαν να ερευνήσουν την επίδραση αυτής της αθέλητης εκκεντρότητας, στη συνάφεια μεταξύ συστήματος ΙΑΜ και υποστρώματος. Ειδικότερα, χρησιμοποίησαν πρίσματα ΟΣ με διαφορετικό μήκος που κυμαινόταν από $L1=375$ mm μέχρι και $L2=510$ mm. Στη συνέχεια, συνέκριναν τα εργαστηριακά αποτελέσματα που βρήκαν, με αντίστοιχα αποτελέσματα δοκιμών διπλής διάτμησης, σε πανομοιότυπα δοκίμια ΟΣ, τα οποία είχαν πραγματοποιήσει στο παρελθόν. Τελικά, συμπέραναν ότι η μικρή αθέλητη εκκεντρότητα δεν επηρεάζει σημαντικά τη μέγιστη τάση στις δοκιμές απλής

διάτμησης, σε κανένα από τα δύο μήκη δοκιμίων. Σχετικά με την μέγιστη τάση που καταγράφηκε στις δοκιμές απλής διάτμησης, συμπεραίνεται ότι:

(α) είναι παρόμοια στις δοκιμές με τα δύο διαφορετικά μήκη δοκιμίων και παρουσιάζουν μια μικρή διαφορά (περίπου 4%)

(β) σε σύγκριση με την αντίστοιχη μέγιστη τάση που καταγράφηκε στα πειράματα διπλής διάτμησης, αυτή είναι επαυξημένη κατά 16% για τα δοκίμια με μήκος $L_1=375$ mm και κατά 12% για τα δοκίμια με μήκος $L_2=510$ mm, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 18.



Εικόνα 18 : Μέγιστη τάση απλής και διπλής διάτμησης

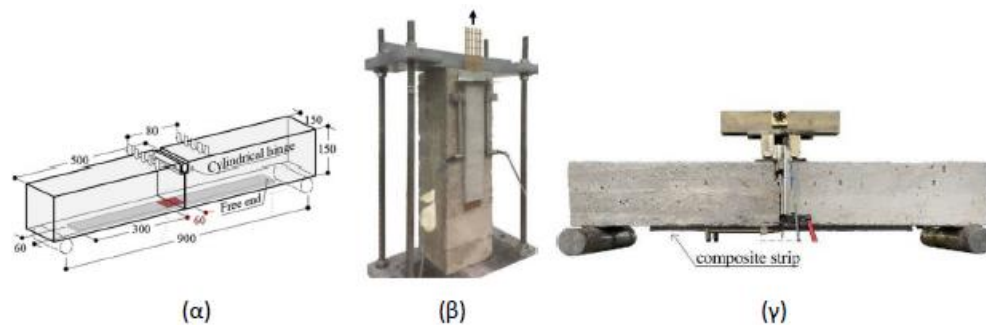
(Πηγή : D'Antino et al. 2016)

Σε μια πρόσφατη εργασία τους οι Calabrese et al. (2021), ασχολήθηκαν με μία εναλλακτική πειραματική διάταξη. Ειδικότερα, πραγματοποίησαν 6 δοκιμές έμμεσης διάτμησης στοιχείων ΟΣ ενισχυμένα με IAM PBO και 8 δοκιμές άμεσης διάτμησης. Σκοπός της μελέτης τους ήταν η σύγκριση της επιρροής της κάθε διάταξης στη τελική συνάφεια που παρουσίασε το σύνθετο υλικό.

Τα δοκίμια ΟΣ που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα έμμεσης διάτμησης αποτελούνταν από δύο πρίσματα ΟΣ, που συνδέονταν μεταξύ τους στο πάνω μέρος με κυλινδρική άρθρωση ενώ στο κάτω μέρος ήταν συνδεδεμένα με λωρίδα συστήματος IAM, όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 19. Εξετάστηκαν πειραματικά δύο διαφορετικές διατάξεις λωρίδων, που διέφεραν στην παρουσία, ή στην απουσία, μήτρας στο μεσαίο άνοιγμα του δοκιμίου ΟΣ. Παρατηρήθηκε ότι σε γενικές γραμμές, οι αποκρίσεις των φορτίων ήταν παρεμφερείς. Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκε ότι

παρουσίασαν αυξημένη αντοχή συνάφειας στις δοκιμές έμμεσης διάτμησης, σε σχέση με τις δοκιμές άμεσης διάτμησης, σε ποσοστό 24,8%, για τις περιπτώσεις ύπαρξης ανόργανης μήτρας στο κεντρικό άνοιγμα των δοκιμών και 5,9% για την περίπτωση παρουσίας μόνο ινών.

Η αύξηση στην αντοχή συνάφειας δικαιολογείται διότι αναπτύσσεται τάση σ_c κάθετη στη διεπιφάνεια μήτρας-ινών. Η τάση σ_c , προκαλεί καταπόνηση στις ίνες του πλέγματος, η οποία γίνεται εμφανέστερη στην περίπτωση απουσίας ανόργανης μήτρας, στο κεντρικό άνοιγμα του δοκιμίου. Τέλος, με βάση τα εργαστηριακά δεδομένα, η διασπορά που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα είναι περιορισμένη τόσο όσον αφορά τις δοκιμές απλής διάτμησης όσο και τις δοκιμές MB.



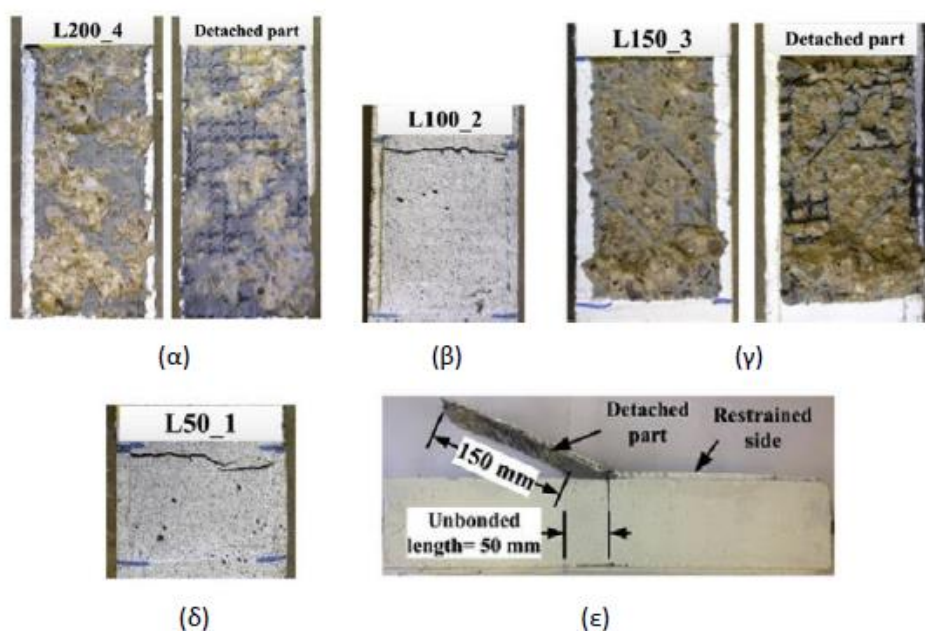
Εικόνα 19 : (α) Σχηματική απεικόνιση MB test, (β) Πειραματική διάταξη διάτμησης,
(γ) Πειραματική διάταξη MB test
(Πηγή : Calabrese et al. 2021)

Σημαντική πειραματική έρευνα διενήργησαν οι Raoof et al. (2016) και οι Younis and Ebead (2018), εξετάζοντας την συνάφειας IAM και σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα, διενήργησαν 98 δοκιμές άμεσης διάτμησης σε πρίσματα ορθογωνικής διατομής και εξέτασαν τις παρακάτω παραμέτρους:

- (α) το μήκος επικόλλησης των IAM (50 mm - 450 mm)
- (β) τον αριθμό στρώσεων (από 1 έως 4)
- (γ) το υλικό των ινών (άνθρακα, PBO, ύαλο)
- (δ) την προετοιμασία της επιφάνειας του υποστρώματος
- (ε) την επικάλυψη του ινοπλέγματος
- (στ) τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος
- (ζ) την αγκύρωση μέσω μανδυνών των IAM.

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές είναι:

- Με την αύξηση του μήκους επικόλλησης αυξάνεται και η αντοχή συνάφειας. Η αύξηση αυτή είναι μη αναλογική, ενώ υπάρχει ένα ανώτατο όριο, ενεργού μήκους επικόλλησης, πέρα από το οποίο, οποιαδήποτε αύξηση του μήκους επικόλλησης δεν επιφέρει επαύξηση της αντοχής συνάφειας.
- Με την αύξηση του αριθμού των στρώσεων αυξάνεται και η αντοχή συνάφειας. Η αύξηση αυτή γίνεται με μη αναλογικό τρόπο και ταυτόχρονα ο αριθμός των στρώσεων αλλάζει τον τρόπο αστοχίας του ΙΑΜ, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 20 (όταν υπάρχουν 1-2 στρώσεις έχουμε αστοχία της μορφής Ι, ενώ όταν υπάρχουν 3-4 στρώσεις έχουμε αστοχία της μορφής ΙV).
- Η επιλογή του υλικού ενίσχυσης, επηρέασε τη μορφή αστοχίας. Πιο συγκεκριμένα όταν το υλικό ενίσχυσης ήταν άνθρακας, παρουσιάστηκε μορφή αστοχίας Ι, όταν το υλικό ενίσχυσης ήταν ΡΒΟ, παρουσιάστηκε μορφή αστοχίας ΙΙ, ενώ όταν το υλικό ενίσχυσης ήταν ύαλος, παρουσιάστηκε μορφή αστοχίας V.
- Η μεταβολή της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος δεν επηρέασε τη σχέση συνάφειας συστήματος ΙΑΜ και σκυροδέματος. Αντιθέτως, η αγκύρωση του συστήματος είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής συνάφειας σε ποσοστό έως και 45%.



Εικόνα 20 : Μορφές αστοχίας

(α), (γ), (ε) Μορφή IV, αποκόλληση της διεπιφάνειας IAM – σκυροδέματος

(β), (δ) Μορφή I, ολίσθηση ινών μέσα στο IAM και δημιουργία ρωγμής

(Πηγή : Raoof et al., 2016)

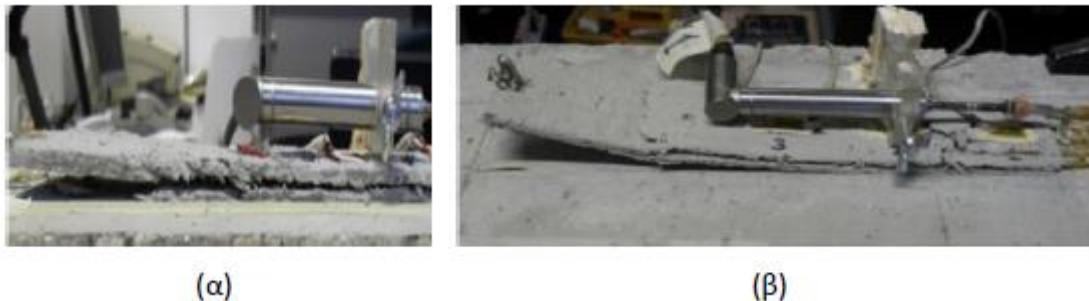
Σε μία άλλη πολυπαραμετρική μελέτη, ο Ombres (2015) εξέτασε 24 δοκίμια ΟΣ με IAM PBO, σε μια προσπάθεια να μελετήσει τη συνάφεια μεταξύ IAM και υποστρώματος και παράλληλα να διακρίνει τις μορφές αστοχίας των δοκιμίων ΟΣ. Ειδικότερα, εξέτασε τις παρακάτω παραμέτρους:

- (α) το μήκος επικόλλησης
- (β) το πλάτος επικόλλησης
- (γ) την ποσότητα του συστήματος ενίσχυσης.

Συμπεράσματα της προαναφερθείσας μελέτης ήταν:

- Η απώλεια συνάφειας μεταξύ IAM και υποστρώματος, εμφανίστηκε στη διεπιφάνεια μήτρας και πλέγματος (Μορφή αστοχίας III)
- Η αύξηση των στρώσεων του IAM, οδήγησε σε αστοχία της διεπιφάνειας IAM και σκυροδέματος (Μορφή αστοχίας II).

Χαρακτηριστικές εικόνες αστοχίας φαίνονται στην Εικόνα 21. Επισημαίνεται ότι, παρατηρήθηκε ολίσθηση των ινών, εντός της ανόργανης μήτρας προτού αστοχήσει το δοκίμιο.



Εικόνα 21 : Μορφές αστοχίας

(α) Αστοχία της διεπιφάνειας πλέγματος – μήτρας

(β) Αστοχία της διεπιφάνειας σκυροδέματος – μήτρας

(Πηγή : Ombres, 2015)

Την επίδραση που έχει η προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος στην τελική αντοχή συνάφειας, ερεύνησαν οι D'Antino et al. (2015). Υλοποίησαν 21 δοκιμές άμεσης διάτμησης σε στοιχεία ΟΣ. Κάθε δοκίμιο υποβλήθηκε σε διαφορετικές συνθήκες προετοιμασίας της επιφάνειας τους. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκαν συστήματα IAM PBO, με διάφορα μήκη (από 330 mm έως και 450 mm) και πλάτη επικόλλησης (από 60 mm έως και 80 mm) και με μεταβλητή παράμετρο την κατάσταση του σκυροδέματος (υπόστρωμα). Έτσι, παρασκευάσαν 18 δοκίμια με μη επεξεργασμένη επιφάνεια και 3 δοκίμια με επεξεργασμένη επιφάνεια.

Από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών συμπεραίνεται ότι η μορφή αστοχίας του δοκιμίου, επηρεάζεται από την προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα, τέσσερα δοκίμια με ανεπεξεργασμένη επιφάνεια εμφάνισαν ολική αποκόλληση όλου του πρόσθετου - σύνθετου υλικού από το υπόστρωμα (Μορφή αστοχίας II). Στα υπόλοιπα δεκατέσσερα δοκίμια παρουσιάστηκε ολίσθηση της διεπιφάνειας μήτρας και ινών (Μορφή αστοχίας III). Ενώ, τέλος, στην περίπτωση της επεξεργασμένης επιφάνειας σκυροδέματος, καταγράφηκαν δύο περιπτώσεις αποκόλλησης μέρους του σύνθετου υλικού και ειδικότερα μεταξύ μήτρας και ινών (Μορφή αστοχίας II) και μόνο μία περίπτωση θραύσης των ινών (Μορφή αστοχίας V).

Συγκρίνοντας τα συμπεράσματα των πειραμάτων με δοκίμια όμοιας γεωμετρίας, τα οποία είχαν δοκιμαστεί σε παλαιότερες μελέτες, η αστοχία των δοκιμών με μη επεξεργασμένη επιφάνεια, μπορεί να οφείλεται στη χαμηλή ποιότητα συνάφειας μεταξύ IAM και σκυροδέματος, σε σχέση και με την εμφάνιση ρωγμών στο κονίαμα της ανόργανης μήτρας. Τελικό συμπέρασμα της μελέτης είναι ότι, αν και η προετοιμασία της επιφάνειας δεν αποτελεί καθοριστικό παράγοντα, συνίσταται η χρήση δοκιμών με επεξεργασμένη επιφάνεια έτσι ώστε να αποφεύγεται η πιθανότητα της αποκόλλησης του πρόσθετου - σύνθετου υλικού από το υπόστρωμα του σκυροδέματος.

Σε άλλη σχετική μελέτη, οι Shrestha et al. (2017) μελέτησαν και αυτοί την προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος και την επίδραση της στην αντοχή συνάφειας του IAM. Ειδικότερα, διεξήχθησαν 72 δοκιμές pull-off σε στοιχεία πλακών ΟΣ με διαστάσεις 50 cm × 50 cm × 10 cm με πλέγμα IAM πάχους 1 cm. Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά είδη πλεγμάτων (άνθρακας, PBO) και μελετήθηκαν τρεις διαφορετικές καταστάσεις του υποστρώματος, όπως παρακάτω:

(α) λεία επιφάνεια

(β) με χαμηλό επίπεδο τραχύτητας

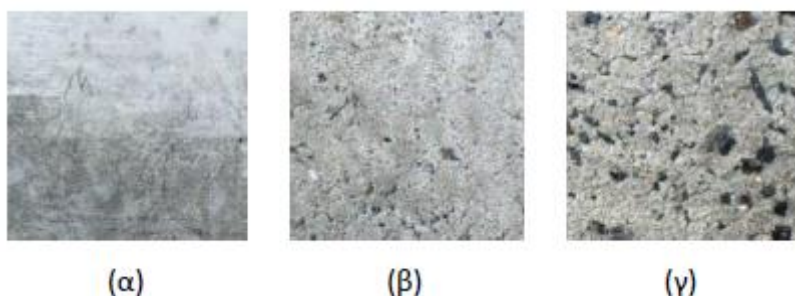
(γ) με υψηλό επίπεδο τραχύτητας, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 22.

Από τα πειραματικά αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι όσο το επίπεδο τραχύτητας της επιφάνειας του σκυροδέματος γίνεται πιο τραχύ, τόσο ο δεσμός του συστήματος IAM με το σκυρόδεμα γίνεται ισχυρότερος. Ειδικότερα, βελτιώθηκε σημαντικά, η αντοχή από 0.7 MPa σε 1.24 MPa στην περίπτωση χρήσης IAM με ίνες άνθρακα, όταν η αρχικά λεία επιφάνεια μετατράπηκε σε τραχιά (υψηλό επίπεδο). Αντίστοιχα, βελτιώθηκε αρκετά η αντοχή του δοκιμίου από 1.0 MPa σε 1.4 MPa στην περίπτωση χρήσης IAM-PBO, όταν η αρχικά λεία επιφάνεια μετατράπηκε σε τραχιά (υψηλό επίπεδο).

Σε παρεμφερή συμπεράσματα κατέληξαν και οι Ebead and Younis (2019), που έκαναν πειραματικές δοκιμές pull-off σε πλάκες ΟΣ παρόμοιας γεωμετρίας. Τα συμπεράσματα που εξάγονται από την ανωτέρω μελέτη είναι:

(α) η μορφή αστοχίας επηρεάζεται από την προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος

(β) το μέγιστο φορτίο στο οποίο υποβλήθηκε το δοκίμιο αυξήθηκε κατά 74%, όταν η επιφάνεια του σκυροδέματος είχε υποστεί επεξεργασία επιφάνειας, και ειδικότερα όταν παρουσίασε υψηλό επίπεδο τραχύτητας.



Εικόνα 22 : Μορφές επιφάνειας σκυροδέματος

(α) λεία επιφάνεια, (β) χαμηλή τραχύτητα, (γ) υψηλή τραχύτητα

(Πηγή : Shrestha et al. 2017)

Μία άλλη παράμετρος που μελετήθηκε από τους Signorini et al. (2018) ήταν η επικάλυψη των ινών του πλέγματος. Εξετάσθηκαν δύο περιπτώσεις, οι οποίες ήταν :

(α) χωρίς επικάλυψη

(β) με επικάλυψη ρητίνης ή πυριτίου

Διεξήχθησαν δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε μικρής κλίμακας δοκούς ΟΣ ενισχυμένες με IAM με πλέγματα. Συμπερασματικά προέκυψε ότι η επικάλυψη των ινών του πλέγματος προσδίδει αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα στη μηχανική συμπεριφορά του σύνθετου υλικού. Στην Εικόνα 23 παρουσιάζονται οι εικόνες των ινών, μετά την αστοχία του IAM.

Σε άλλη αντίστοιχη μελέτη, οι Raoof et al. (2016) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η επικάλυψη των ινών του πλέγματος με ρητίνη παρέχει διπλή επίδραση στα αποτελέσματα, καθώς:

(α) αλλάζει τη μορφή αστοχίας των δοκιμίων από ολίσθηση ινών εντός της μήτρας (Μορφή αστοχίας I) σε αποκόλληση στη διεπιφάνεια υφάσματος και μήτρας (Μορφή αστοχίας III)

(β) αυξάνεται η αντοχή συνάφειας.



Εικόνα 23 : Κατάσταση ινών ύστερα από την αστοχία του IAM

(α) ίνες χωρίς επικάλυψη, (β) ίνες με επικάλυψη πυριτίου, (γ) ίνες με επικάλυψη ρητίνης

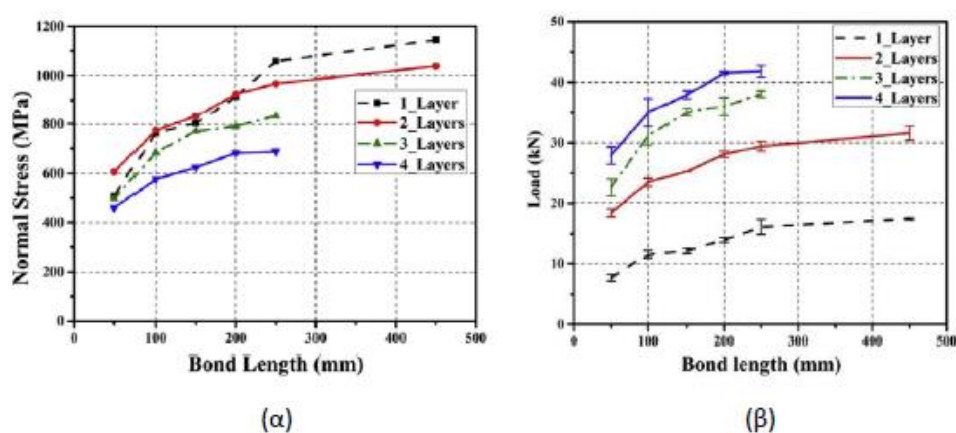
(Πηγή : Signorini et al., 2018)

Άλλη μία μεταβλητή, η οποία εξετάστηκε από τους Carloni et al. (2017), σχετικά με την επίδραση του στη συνάφεια IAM και σκυροδέματος είναι και ο ρυθμός φόρτισης των δοκιμίων. Ειδικότερα, οι επιστήμονες έκαναν μια διεξοδική έρευνα υλοποιώντας 73 δοκιμές άμεσης διάτμησης σε πρίσματα ΟΣ και ορθογωνικής διατομής, για να ερευνήσουν την επίδραση του ρυθμού φόρτισης (από 0.00042 mm/s έως 0.01260 mm/s) στη συνάφεια του IAM και σκυροδέματος. Όλα τα εξεταζόμενα δοκίμια ΟΣ αστόχησαν από αποκόλληση της διεπιφάνειας μήτρας και πλέγματος με κύριο αίτιο την ολίσθηση των ινών εντός του ελεύθερου άκρου του σύνθετου υλικού.

Στη συνέχεια των πειραματικών δεδομένων, τα συνέκριναν με τα αποτελέσματα παλαιότερης πειραματικής έρευνας και προέκυψε ότι ο ρυθμός φόρτισης του δοκιμίου, επιδρά στο μέγιστο φορτίο αστοχίας, χωρίς όμως να μπορεί να βρεθεί κάποια συγκεκριμένη αιτία και σχέση μεταξύ αυτών των δύο μεταβλητών. Πιο συγκεκριμένα, το μέγιστο φορτίο αστοχίας αυξήθηκε όταν αυξήθηκε και ο ρυθμός φόρτισης από 0.5 V σε 3 V και το μέγιστο φορτίο αστοχίας όλων των πειραμάτων να επιτυγχάνεται με ρυθμούς φόρτισης από 3 V έως 5V (1V= 0.00084 mm/s). Αντίθετα, όταν ο ρυθμός φόρτισης ανήλθε πάνω από 5 V παρατηρήθηκε μείωση του μέγιστου φορτίου αστοχίας.

Πρέπει να τονισθεί, όπως προκύπτει και από τις περισσότερες μελέτες συνάφειας IAM-σκυροδέματος, ότι το μήκος επικόλλησης αποτελεί έναν από τους βασικότερους παραμέτρους που επηρεάζουν σημαντικά την απόκριση του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση στο μήκος επικόλλησης είχε ως αποτέλεσμα τη μη γραμμική αύξηση της αντοχής της συνάφειας και του μέγιστου φορτίου αστοχίας του δοκιμίου. Η σχέση αυτή αποδεικνύεται

και στην εργασία των Raoof et al. (2016) και γίνεται άμεσα κατανοητή, μέσω των διαγραμμάτων τάσης – μήκους επικόλλησης που φαίνονται στην Εικόνα 24. Αντιθέτως, αναφορικά με το πλάτος επικόλλησης, παρόμοιες εργασίες απέδειξαν ότι το πλάτος δεν επηρεάζει την αντοχή συνάφειας. Συγκεκριμένα, σε μελέτη των Sneed et al. (2014) και D’Antino et al. (2014), στα συστήματα ενίσχυσης IAM και σκυροδέματος δεν παρατηρήθηκε καμία επίδραση του πλάτος επικόλλησης στη μέγιστη τάση αστοχίας του δοκιμίου, εξαιτίας της ανεξάρτητης δράσης των διαμηκών δεσμών ινών. Ωστόσο, παρατηρήθηκε μια περιορισμένη επίδραση του πλάτος επικόλλησης, όταν υπήρχε ενιαία δέσμη ινών, λόγω του διαφορετικού εμποτισμού των ινών εντός της ανόργανης μήτρας.



Εικόνα 24 : (α) Διάγραμμα τάσης με μήκος επικόλλησης, (β) Διάγραμμα φορτίου με μήκος επικόλλησης

(Πηγή : Raoof et al., 2016)

Με τη επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών στη συμπεριφορά της διεπιφάνειας IAM και σκυροδέματος, μελέτησαν οι Raoof and Bournas (2017). Πιο αναλυτικά, διενήργησαν 68 δοκιμές άμεσης διάτμησης, εξετάζοντας τις παρακάτω παράγοντες:

- (α) τη μήτρα του σύνθετου υλικού (ρητίνη ή κονίαμα)
- (β) τις συνθήκες θερμοκρασίας (20°C - 500°C)
- (γ) τον αριθμό των στρώσεων του πλέγματος (3 ή 4)
- (δ) τις συνθήκες φόρτισης (σταθερές και μεταβαλλόμενες).

Οι πειραματικές μετρήσεις έδειξαν ότι τα συστήματα IAM παρουσιάζουν εξαιρετικά καλή συμπεριφορά έναντι των υψηλών θερμοκρασιών, μιας και σε θερμοκρασία ακόμα και 400°C διατηρούν σχεδόν το 85% της αντοχής συνάφειας που εμφάνισαν σε θερμοκρασία

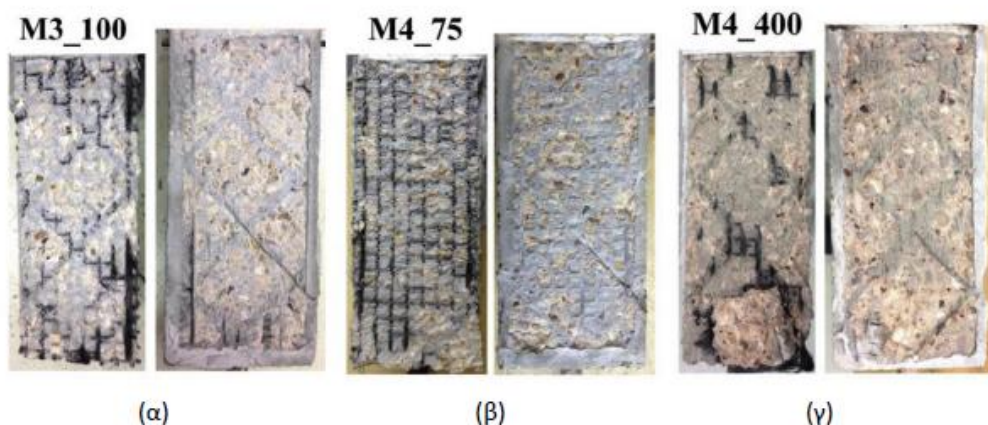
20oC. (περιβάλλοντος). Αντιθέτως, τα συστήματα ΙΟΠ, που απώλεσαν περίπου το 83% της αντοχής τους σε θερμοκρασία μόλις 150°C.

Αναφορικά με την μορφή αστοχίας των δοκιμίων, στα ΙΟΠ σημειώθηκαν δύο διαφορετικές μορφές αστοχίας, σε διαφορετικές θερμοκρασίες:

- Στους 50°C παρουσιάστηκε αποκόλληση της επιφάνειας του σκυροδέματος, μαζί με μέρος της επικάλυψης του σύνθετου υλικού.
- Ενώ σε μεγαλύτερες (75°C, 100°C και 150°C) παρουσιάστηκε αποκόλληση στη επιφάνεια μεταξύ του υποστρώματος και της ρητίνης.

Τα συστήματα ΙΑΜ, σε θερμοκρασίες έως και 500°C, παρουσίασαν αστοχία λόγω αποκόλλησης της διεπιφάνειας σκυροδέματος και ΙΑΜ, με παράλληλη αποκόλληση της επικάλυψης (Μορφή αστοχίας IV), όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 25.

Σημαντικό ρόλο στην αντοχή συνάφειας των ΙΑΜ - σκυροδέματος, διαδραματίζουν οι συνθήκες φόρτισης του δοκιμίου. Ειδικότερα, η αντοχή συνάφειας παρουσιάζεται σημαντικά αυξημένη όταν ο ρυθμός φόρτισης είναι σταθερός. Αντιθέτως, στα συστήματα ΙΟΠ παρουσιάζουν παρεμφερή συμπεριφορά και στις δύο καταστάσεις φόρτισης. Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι η επίδραση του αριθμού των στρώσεων στην βελτίωση της αντοχής συνάφειας, δεν εμφανίζει διακριτά αποτελέσματα. Σε πειράματα διαπιστώθηκε ότι τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με τέσσερις στρώσεις πλέγματος, εμφάνισαν μεγαλύτερη ικανότητα συνάφειας, στις εξεταζόμενες θερμοκρασιακές μεταβολές. Η επίδραση της αυξημένης θερμοκρασίας στη συνάφεια του συστήματος ΙΑΜ και σκυροδέματος μελετήθηκε και από τον Ombres (2015), ο οποίος σημείωσε ότι εμφανίζεται σημαντική αλλαγή στη συνάφεια για θερμοκρασίες άνω από τους 50°C. Πιο συγκεκριμένα, σε θερμοκρασία 100°C, το σύστημα παρουσίασε σημαντική μείωση του φορτίου αστοχίας, σε ποσοστό 36% για τα δοκίμια που έφεραν 1 στρώση πλέγματος ινών ΡΒΟ.



Εικόνα 25 : Μορφές αστοχίας στη διεπιφάνεια IAM – σκυροδέματος

(α) 3 στρώσεις πλέγματος, 100° C, (β) 4 στρώσεις πλέγματος, 75° C, (γ) 4 στρώσεις πλέγματος, 400° C

(Πηγή : Raoof and Bournas, 2017)

2.4 Γεωπολυμερή

Τα γεωπολυμερή είναι ανόργανα πολυμερή υλικά τα οποία παράγονται ως αποτέλεσμα της διαδικασίας της γεωσύνθεσης. Το 1908, ο Kuhl, Γερμανός χημικός και μηχανικός, με ειδίκευση στο τσιμέντο, ήταν ο πρώτος ερευνητής που μελέτησε την χημική αντίδραση μιας πηγής αλκαλίου μαζί με στερεές πρόδρομες ουσίες (από αλουμίνιο και πυρίτιο) για να παραχθεί ένα νέο στερεό υλικό, που διέθετε παρόμοιες ιδιότητες με το τσιμέντο Portland. Στη συνέχεια και άλλοι ερευνητές ολοκλήρωσαν παρεμφερή ερευνητικά έργα, όπως ο Purdon (1940) που συνδύασε σκωρία υψικαμίνου με το τσιμέντο, ενώ ο Glukhovsky (1959) αξιοποίησε τις σκουριές που παράγονται από τη μεταλλουργία σε ανάμειξη με το τσιμέντο. Μέχρι το 1980, περιορισμένες ήταν οι έρευνες για αυτά τα υλικά. Όμως το 1982, ο Davidovits, κατάφερε να κατοχυρώσει και με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας την παραγωγή αργιλοπυριτικών σκευασμάτων, ενώ το 2008, ήταν ο ίδιος που εισήγαγε τον επιστημονικό όρο «γεωπολυμερές».

Την τελευταία δεκαετία, ερευνητές μελετούν και εξετάζουν τη χρήση του γεωπολυμερούς, ως εναλλακτική λύση αντί της χρήσης των συμβατικών κονιαμάτων με βάση

το τσιμέντο, στα έργα υποδομών. Σύμφωνα με μελέτη των Provis and Van Deventer (2013), η παραγωγή των γεωπολυμερών κονιαμάτων παράγει μέχρι και 80% μειωμένους ρύπους CO₂ σε σχέση με την παραγωγή του συμβατικού τσιμέντου.

Σύμφωνα με μελέτη των Scrivener and Kirkpatrick (2008), οι βιομηχανίες παραγωγής τσιμέντου συνεισφέρουν σε ποσοστό 5 – 8% στις συνολικές εκπομπές CO₂, κυρίως εξαιτίας της πολύ υψηλής θερμοκρασίας (1500° C), η οποία απαιτείται για την παραγωγή του τσιμέντου. Σημειωτέον ότι το CO₂ ευθύνεται σε ποσοστό 65% στην διαμόρφωση του φαινομένου του θερμοκηπίου και στην κλιματική αλλαγή. Οπότε, γίνεται εύκολα αντιληπτό, ότι η χρήση των γεωπολυμερών αντί της χρήσης των συμβατικών τσιμεντοκονιαμάτων αποτελεί μια περιβαλλοντικά φιλική λύση και πρόταση.

Η διαδικασία της παραγωγής γεωπολυμερών, περιλαμβάνει την πραγματοποίηση μίας χημικής αντίδρασης, στην οποία στερεές αργιλοπυριτικές ενώσεις (precursors) αντιδρούν εντός αλκαλικού περιβάλλοντος, με τον λεγόμενο ενεργοποιητή, έτσι ώστε να παραχθούν σκληρυμένες συγκολλητικές ουσίες (πολυμερικοί δεσμοί). Συνήθως, ως στερεή πρώτη ύλη χρησιμοποιείται αργιλοπυριτικό υλικό σε συνδυασμό με:

- σκωρία υψικαμίνου
- τέφρα άνθρακα
- ασβεστόχος άργιλος
- φυσική ποζολάνη

Άλλα υλικά, που χρησιμοποιούνται σε σπανιότερες περιπτώσεις είναι:

- άργιλος πλούσια σε σίδηρο
- σκωρία από σιδηρούχες και μη μεταλλουργία
- λάσπη πλούσια σε άργιλο
- κόκκινη λάσπη
- καολίνη
- αλεσμένη τέφρα
- τέφρα γεωργικών αποβλήτων

Στην Εικόνα 26 παρουσιάζονται πρόδρομες ουσίες γεωπολυμερών.

Σχετικά με τους ενεργοποιητές, οι πιο διαδεδομένες χημικές ενώσεις είναι KOH, NaOH, K₂O ή Na₂O. Σε περίπτωση ουσιών με υψηλή περιεκτικότητα σε ασβέστιο, π.χ. σκωρία υψικαμίνου, αποτελεσματικοί ενεργοποιητές είναι οι χημικές ενώσεις Na₂SO₄ και Na₂CO₃.



Εικόνα 26 : Πρόδρομες ουσίες

(α) μετακαολίνη

(β) αδρανές < 0,5 mm

(γ) αδρανές 0,5 – 1 mm

(Πηγή : Parakonstantinou and Koutas, 2021)

Τα γεωπολυμερή υλικά παρουσιάζουν ένα σημαντικό μειονέκτημα και αυτό είναι το υψηλό κόστος προμήθειας των πρώτων υλών. Από την άλλη πλευρά όμως, παρουσιάζουν ένα πλήθος σημαντικών πλεονεκτημάτων έναντι του κοινού τσιμέντου Portland, όπως αναφέρονται παρακάτω:

- ✓ σημαντικά καλύτερες μηχανικές ιδιότητες
- ✓ πολύ καλή αντίσταση στη διάβρωση
- ✓ υψηλές θερμοκρασίες μετάπτωσης
- ✓ εξαιρετικές μηχανικές αντοχές σε δυσμενείς συνθήκες
- ✓ σχεδόν μηδενικές εκπομπές επικίνδυνων αερίων κατά τη διαδικασία καύσης.

Εφαρμογές γεωπολυμερών στις ενισχύσεις δομικών στοιχείων από ΟΣ

Τα τελευταία χρόνια, οι επιστημονικές έρευνες που αφορούν τη μελέτη της χρησιμοποίησης των γεωπολυμερών σε συστήματα ΙΑΜ, με σκοπό την ενίσχυση υφιστάμενων κτιρίων, είναι πληθυσματικές. Ειδικότερα, έχει πειραματικά μελετηθεί, η συμπεριφορά των ΙΑΜ με ανόργανη μήτρα γεωπολυμερούς, σε καταπόνηση κάμψης και διάτμησης δοκών ΟΣ όπως επίσης και η χρήση τους ως μέσο περίσφιγξης υποστυλωμάτων ΟΣ. Οι πειραματικές μελέτες που έχουν δημοσιευτεί σε έγκριτα διεθνή περιοδικά και σχετίζονται με το συγκεκριμένο πεδίο έρευνας, μπορούν να ταξινομηθούν όπως παρακάτω:

- Ενίσχυση δοκών ΟΣ έναντι κάμψης (Kurtz & Balaguru 2001, Menna et al. 2013, Bencardino & Condello 2016, Zhang et al. 2018, Al-Majidi et al. 2019, Peng et al. 2022, Zhang et al. 2022)
- Ενίσχυση δοκών ΟΣ έναντι τέμνουσας (Zhang et al. 2019, Khir Allah 2022)
- Μέσο περίσφιγξης υποστυλωμάτων ΟΣ (Zhang et al. 2016, Heng et al. 2017, Wang et al. 2021).

2.5.1 Ενίσχυση δοκών ΟΣ έναντι κάμψης

Μία από τις πρώτες προσπάθειες πειραματικής μελέτης για την εξέταση απόκρισης των ινοπλεγμάτων εντός ανόργανης μήτρας γεωπολυμερούς σύστασης στην ενίσχυση των κατασκευών ΟΣ, έναντι κάμψης, ανήκει στους Kurtz and Balaguru (2001).

Στα πλαίσια της μελέτης έγιναν έξι δοκιμές έναντι κάμψης σε δοκούς ΟΣ, με διαστάσεις δοκιμίων 3 m × 20 cm × 30 cm. Τα 2 δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν ως δοκίμια αναφοράς, το 1 δοκίμιο ενισχύθηκε με ύφασμα με άνθρακα και εποξική ρητίνη, ενώ τρία δοκίμια ενισχύθηκαν με ύφασμα με άνθρακα και ανόργανη μήτρα, που προήλθε από μείξη ενός ενεργοποιητή με αργιλοπυριτική πούδρα. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανωτέρω μελέτη, συνοψίζονται όπως παρακάτω:

(α)και τα δύο συστήματα ενίσχυσης, είτε οργανικής είτε ανόργανης μήτρας, επαύξησαν την αντοχή του στοιχείου ΟΣ, περίπου στο αυτό βαθμό.

(β) η παραμόρφωση που εμφάνισε το δοκίμιο στο οποίο είχε γίνει χρήση μήτρας γεωπολυμερούς σύστασης, κατά την επιβολή του φορτίου αστοχίας, ήταν περιορισμένη κατά 25%, σε σχέση με την αντίστοιχη παραμόρφωση που εμφάνισε το δοκίμιο στο οποίο είχε γίνει χρήση οργανικής μήτρας, στην ίδια κατάσταση αστοχίας.

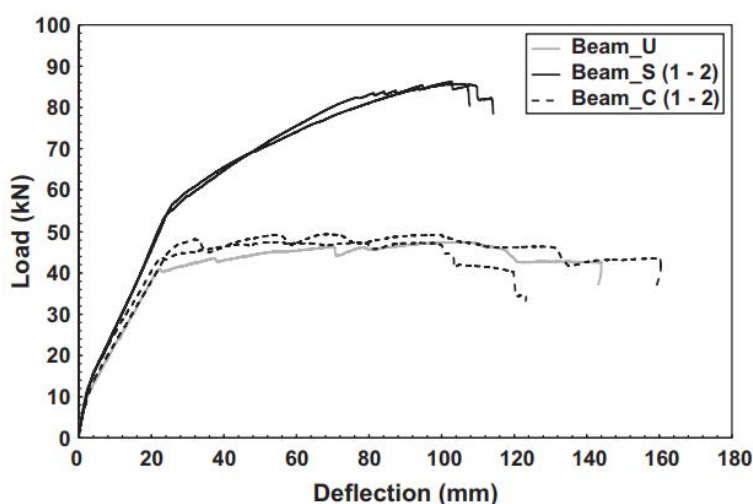
(γ) η μορφή αστοχίας σε κάθε περίπτωση ήταν διαφορετική. Ενώ η ανόργανη μήτρα οδήγησε σε αστοχία ινών, η οργανική μήτρα (εποξική ρητίνη) οδήγησε σε αποκόλληση.

Αρκετά χρόνια αργότερα, οι Menna et al. (2013), προσπάθησαν να μελετήσουν και να υπολογίσουν την καμπτική αντοχή δοκών ΟΣ ενισχυμένων με ΙΑΜ με μήτρα με γεωπολυμερές. Έτσι, εξέτασαν πέντε δοκίμια ΟΣ σε κάμψη τεσσάρων σημείων. Η ανόργανη μήτρα συνίστατο από πούδρα μετακαολίνης, το αδρανές ήταν πούδρα καθαρού χαλαζία, ενώ

ως ενεργοποιητής χρησιμοποιήθηκε συνδυασμός υδροξειδίου του νατρίου και διαλύματος πυριτικού νατρίου.

Η ουσιαστική μεταβλητή του πειράματος που εξετάσθηκε ήταν το είδος του υλικού των ινών του πλέγματος, άνθρακας ή χάλυβας. Από τα πειραματικά δεδομένα προέκυψε το διάγραμμα φορτίου – παραμόρφωσης, το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 27. Γίνεται άμεσα κατανοητό ότι όταν χρησιμοποιήθηκαν ίνες χάλυβα (Beam U), το γεωπολυμερές κονίαμα είχε εμποτίσει πάρα πολύ καλά των ίνες του χάλυβα, με συνέπεια να μην υπάρξουν φαινόμενα αποκόλλησης και τελικά το σύνθετο υλικό να αντέξει σημαντικά εφελκυστικά φορτία. Αντιθέτως, το σύστημα ενίσχυσης στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν ίνες άνθρακα (Beam C), δεν ήταν αποτελεσματικό καθώς προέκυψε μια πολύ μικρή αύξηση του μέγιστου φορτίου, σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς (Beam U). Το γεγονός αυτό αιτιολογείται από το ανεπαρκές μέγεθος των ινών που χρησιμοποιήθηκαν.

Τέλος, τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν, συσχετίστηκαν με παλαιότερες μελέτες πάνω στο ίδιο θέμα και προέκυψε ότι, το σύστημα IAM χάλυβα με γεωπολυμερή μήτρα, συμπεριφέρεται όμοια, αν όχι και καλύτερα από τα άλλα δοκιμαζόμενα συστήματα ενίσχυσης με μήτρα ρητίνης ή τσιμεντοκονιάματος, τα οποία εμφάνισαν στη ζώνη αγκύρωσης, διάφορα φαινόμενα αποκόλλησης.



Εικόνα 27 : Διάγραμμα φορτίου – παραμόρφωσης

(Πηγή : Menna et al., 2013)

Οι Bencardino & Condello (2016) και οι Al-Majidi et al. (2019), μελέτησαν το θέμα της διάβρωσης. Ειδικότερα, ερεύνησαν την συνεισφορά του συστήματος ενίσχυσης IAM με

γεωπολυμερή μήτρα, στην ενίσχυση στοιχείων ΟΣ, έναντι κάμψης, στα οποία όμως εμφανίζεται και το πρόβλημα της διάβρωσης.

Οι Bencardino and Condello (2016) μελέτησαν έξι δοκιμές κάμψης σε δοκούς ΟΣ, οι οποίες είχαν παρουσιάσει ήδη πρόβλημα διάβρωσης του οπλισμού και μερική αποδόμηση της επικάλυψης του σκυροδέματος. Οι ερευνητές διατήρησαν δύο από τα δοκίμια ως δοκίμια αναφοράς και ενίσχυσαν τα υπόλοιπα δοκίμια ΟΣ με ίνες χάλυβα σε ανόργανη μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης. Συμπέραναν ότι το σύστημα ενίσχυσης είναι επωφελές διότι παρουσιάστηκε αύξηση του μέγιστου φορτίου σε ποσοστό από 16% έως 30%.

Σε αντίστοιχη μελέτη, οι Al-Majidi et al. (2019) διαφοροποίησαν την πειραματική διαδικασία. Ειδικότερα, πρώτα ενίσχυσαν τα δοκίμια και στην συνέχεια τα υπέβαλλαν σε συνθήκες διάβρωσης. Στη συνέχεια, πραγματοποίησαν 16 δοκιμές κάμψης, στα ενισχυμένα δοκίμια και στα μη ενισχυμένα στοιχεία, τα οποία λειτούργησαν ως δοκίμια αναφοράς.

Οι μέθοδοι ενίσχυσης των δοκιμών που εξετάσθηκαν, ταξινομούνται όπως παρακάτω:

- (α) με μία στρώση κονιάματος
- (β) στρώση κονιάματος σε συνδυασμό με ράβδους χάλυβα
- (γ) τρίπλευροι μανδύες κονιάματος
- (δ) με μία στρώση σκυροδέματος.

Στην Εικόνα 28 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές εικόνες των δοκιμών.

Τα γεωπολυμερή κονιάματα περιλάμβαναν ίνες χάλυβα ή ίνες πολυβινυλικής αλκοόλης (PVA). Το κονίαμα ήταν συνδυασμός άμμου, ιπτάμενης τέφρας, κοκκοποιημένη σκωρία υψικάμινου, καπνό πυρίτιου και ως αλκαλικός ενεργοποιητής ήταν υδροξείδιο του καλίου και διάλυμα πυριτικού καλίου. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την πειραματική διάταξη χρήσης IAM σε συνδυασμό με γεωπολυμερές κονίαμα ήταν θετικά. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε τόσο αύξηση του μέγιστου φορτίου αντοχής όσο και αύξηση της ολκιμότητας των ενισχυμένων στοιχείων. Πιο αναλυτικά, το μέγιστο φορτίο αντοχής των ενισχυμένων δοκιμών, ήταν έως και 2 φορές μεγαλύτερο, από αυτό του δοκιμίου αναφοράς. Αντίστοιχα και οι τιμές ολίσθησης που καταγράφηκαν (0.34mm-0.82mm), ήταν μικρότερες από τις τιμές ολίσθησης των ενισχυμένων με σκυρόδεμα δοκιμών, γεγονός που αιτιολογείται διότι εμφανίζονται καλύτερες συνθήκες συνάφειας.

Όταν χρησιμοποιήθηκαν τρίπλευροι μανδύες γεωπολυμερούς υλικού, το μέγιστο φορτίο αντοχής αυξήθηκε σε ποσοστό 50% σε σύγκριση με το δοκίμιο αναφοράς. Αναφορικά με την συμπεριφορά των διαβρωμένων στοιχείων, τα ενισχυμένα δοκίμια με συμβατικό σκυρόδεμα εμφάνισαν μείωση της αντοχής τους σε κάμψη κατά 37%. Τα ενισχυμένα δοκίμια με γεωπολυμερές κονίαμα (ίνες χάλυβα), παρουσίασαν μείωση της αντοχής τους σε κάμψη μόλις κατά 3%. Τέλος, τα ενισχυμένα δοκίμια με κονίαμα ινών PVA, δεν εμφάνισαν καμία επίδραση στην αντοχή τους σε κάμψη λόγω διάβρωσης (Εικόνα 29).



(α)

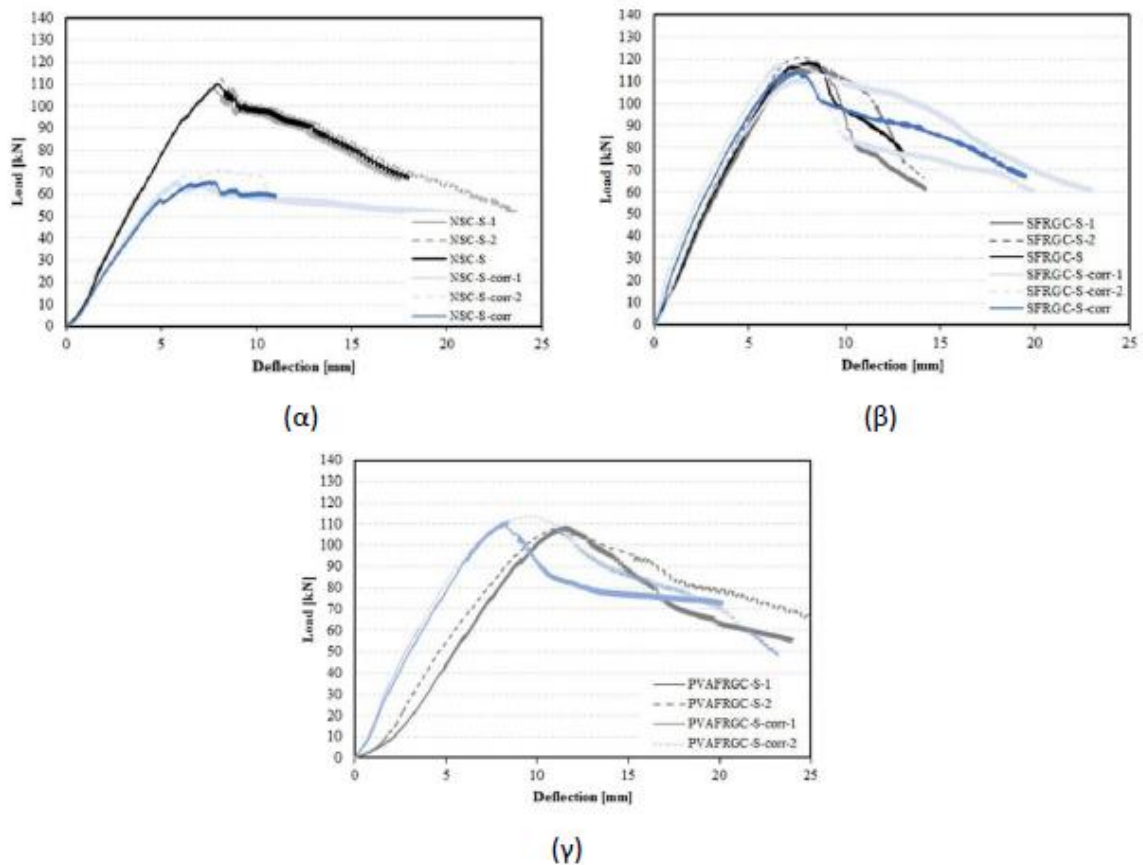


(β)

Εικόνα 28 : (α) Δοκίμιο πολυμερούς κονιάματος με ράβδους χάλυβα

(β) δοκίμιο γεωπολυμερούς κονιάματος με τρίπλευρους μανδύες

(Πηγή : Al-Majidi et al., 2019)



Εικόνα 29 : Διαγράμματα φορτίου - παραμορφώσεων δοκιμίων ενισχυμένων με
(α) σκυρόδεμα

(β) γεωπολυμερές με 3% ίνες χάλυβα

(γ) γεωπολυμερές με 2% ίνες PVA

(Πηγή : Al-Majidi et al., 2019)

Σε μελέτη των Peng et al. (2022), ερευνήθηκε η συμπεριφορά των ενισχυμένων με ίνες και γεωπολυμερή, δοκών ΟΣ έναντι κάμψης. Συνολικά, μελετήθηκαν 11 δοκίμια δοκών ΟΣ έναντι κάμψης, ενισχυμένα με ράβδους χάλυβα μικρής όμως διαμέτρου. Εξετάστηκαν οι παρακάτω παράμετροι:

(α) το υλικό της μήτρας (γεωπολυμερές ή ρητίνη)

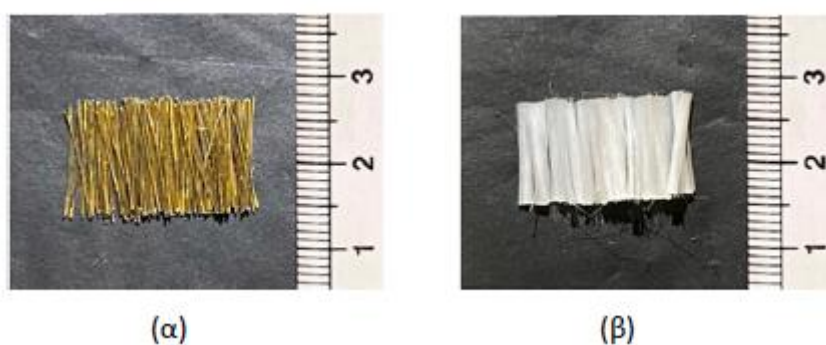
(β) ο οπλισμός της μήτρας (απλή ή με ίνες PVA/χάλυβα)

(γ) ο αριθμός και η διάμετρος των χαλύβδινων ράβδων.

Για τη σύνθεση των ανόργανων κονιαμάτων χρησιμοποιήθηκαν ποικίλες αναλογίες ιπτάμενης τέφρας και σκουριάς, πυριτικό νάτριο καθώς και ανθρακούχο νάτριο ως αλκαλικοί

ενεργοποιητές μαζί με ίνες PVA και χάλυβα με διαφορετικά μήκη και διαμέτρους, όπως φαίνονται στην Εικόνα 30.

Όλα τα δοκίμια που εξετάσθηκαν παρουσίασαν σημαντικά υψηλότερο μέγιστο φορτίο αντοχής αλλά και φορτίο διαρροής. Επιπλέον, παρουσίασαν υψηλότερη δυσκαμψία σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς. Τόσο το ενισχυμένο δοκίμιο με γεωπολυμερές όσο και το ενισχυμένο δοκίμιο με ρητίνη, εκδήλωσαν παρεμφερή συμπεριφορά. Ειδικότερα, τα ενισχυμένα δοκίμια με γεωπολυμερές παρουσίασαν αύξηση στο μέγιστο φορτίο αντοχής από 73% έως και 98%. Η αύξηση στο φορτίο διαρροής που παρουσίασαν τα δοκίμια ήταν της τάξεως από 26%-85%. Τέλος, όταν στο γεωπολυμερές κονίαμα προστεθούν και ίνες χάλυβα, παρουσιάζεται αύξηση του μέγιστου φορτίου διαρροής αλλά και παράλληλα περιορίζεται η εμφάνιση ρωγμών. Όμως, η επίδραση των ινών χάλυβα δεν έχει ως συνέπεια την σημαντική αύξηση του μέγιστου φορτίου αντοχής.



Εικόνα 30 : Ίνες (α) χάλυβα, (β) πολυβινυλικής αλκοόλης – PVA

(Πηγή : Peng et al., 2022)

Την καμπτική συμπεριφορά συστημάτων IAM με γεωπολυμερή μήτρα σε πλάκες ΟΣ μίας κύριας διεύθυνσης, μελέτησαν οι Zhang et al. (2022). Επέβαλαν σε καταπόνηση κάμψης τεσσάρων σημείων, συνολικά 8 πλάκες ΟΣ με διαστάσεις 10 cm × 60 cm × 420 cm. Οι μεταβλητές που εξετάσθηκαν ήταν:

- (α) ο αριθμός των στρώσεων του πλέγματος
- (β) η γεωμετρία του πλέγματος
- (γ) η ύπαρξη αγκύρωσης
- (δ) το είδος της μήτρας.

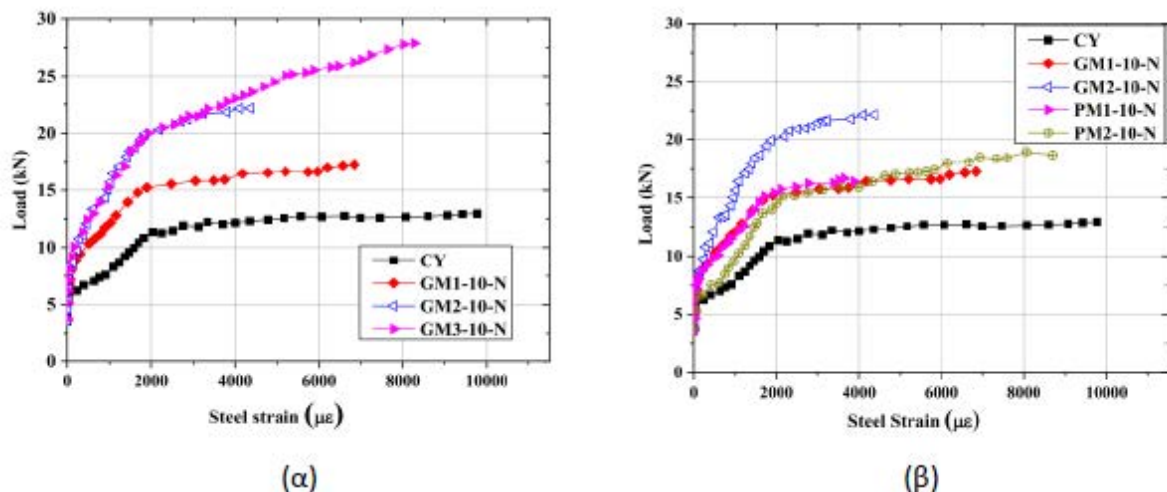
Πιο συγκεκριμένα, εξετάσθηκαν 2 πλέγματα άνθρακα και 2 κονιάματα (τσιμεντοειδές και γεωπολυμερές). Το γεωπολυμερή κονίαμα ήταν μείγμα ιπτάμενης τέφρας (με χαμηλή

περιεκτικότητα σε ασβέστιο), μετακαολίνης, άμμου ποταμού καθώς και διαλύματος πυριτικού καλίου ως ενεργοποιητής. Από τα πειραματικά δεδομένα εξάγεται το συμπέρασμα ότι, το σύστημα ενίσχυσης IAM με τη χρήση μήτρας γεωπολυμερούς είναι μία αποτελεσματική μέθοδο ενίσχυσης πλακών ΟΣ μίας διεύθυνσης έναντι κάμψης.

Ο αριθμός των στρώσεων του IAM διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην αύξηση της αντοχής της πλάκας ΟΣ. Ειδικότερα, όταν χρησιμοποιήθηκαν δύο και τρεις στρώσεις IAM, οδήγησε σε αύξηση της αντοχής της πλάκας ΟΣ κατά 26%, 53% και 92%, σε σύγκριση με το αντίστοιχο δοκίμιο αναφοράς.

Τονίζεται, ότι η καμπτική αντοχή που εμφάνισαν οι ενισχυμένες με σύστημα IAM και γεωπολυμερή μήτρα πλάκες ήταν μεγαλύτερη από την καμπτική αντοχή που εμφάνισαν οι ενισχυμένες με IAM τσιμεντοειδούς μήτρας πλάκων ΟΣ. Η επίδραση του αριθμού των στρώσεων του συστήματος IAM και το είδος της μήτρας, γίνεται εύκολα αντιληπτή από τα διαγράμματα της Εικόνας 31.

Σημαντικό ρόλο στην αντοχή των πλακών διαδραματίζει η κατανομή και η γεωμετρία του πλέγματος των ινών. Αποδείχθηκε, ότι οι πλάκες ΟΣ που διέθεταν ομοιόμορφη κατανομή του πλέγματος εμφάνισαν μεγαλύτερη αντοχή. Τελικά, τα συστήματα ενίσχυσης IAM με γεωπολυμερή μήτρα, υπερτερούν από τα αντίστοιχα συστήματα ενίσχυσης IAM τσιμεντοειδούς μήτρας, με δεδομένο ότι και τα δυο συστήματα διαθέτουν την ίδια ποσότητα πλέγματος.



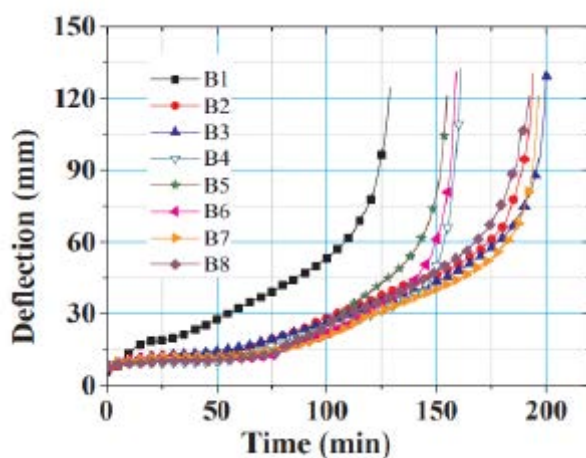
Εικόνα 31 : Διαγράμματα φορτίου - μετατόπισης
συναρτήσε (α) των στρώσεων πλέγματος
(β) του είδους της μήτρας
(Πηγή : Zhang et al., 2022)

Οι Zhang et al. (2018) μελέτησαν την αποτελεσματικότητα των συστημάτων ενίσχυσης IAM γεωπολυμερούς μήτρας και ΙΟΠ, σε συνθήκες πυρκαγιάς. Επέβαλαν δοκούς ΟΣ με διαστάσεις 25 cm × 40 cm × 530 cm για να μελετήσουν την αντίσταση σε πυρκαγιά. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν:

- (α) το είδος του υφάσματος (ίνες βασάλτη ή άνθρακα)
- (β) τον αριθμό των στρώσεων (1 ή 2)
- (γ) τον τύπο της μήτρας (ρητίνη ή γεωπολυμερές)
- (δ) την ύπαρξη ή όχι ασταριού μεταξύ πυρομόνωσης και σύνθετου υλικού.

Το γεωπολυμερές κονίαμα που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία, παρασκευάστηκε από μείξη με μετακαολίνη και ιπτάμενη τέφρα με ενεργοποιητή πυριτικό κάλιο. Διενεργήθηκαν συνολικά οκτώ πειράματα. Το ένα ήταν το δοκίμιο αναφοράς, ενώ στα άλλα επτά δοκίμια εφαρμόστηκε εξωτερική ενίσχυση. Το σύστημα ΙΟΠ παρουσίασε ικανοποιητική θερμική αντίσταση για περισσότερο από 3 ώρες.

Το σύστημα ενίσχυσης IAM γεωπολυμερούς μήτρας παρέμεινε λειτουργικό και εμφάνισε μικρότερη παραμόρφωση έναντι της φόρτισης, σε σχέση με το σύστημα ΙΟΠ. Ωστόσο, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της Εικόνας 32, οι ενισχυμένες με συστήματα IAM δοκοί B4, B5, και B6 δεν παρουσίασαν μεγαλύτερη θερμική αντίσταση σε σχέση με τα στοιχεία ενίσχυσης ΙΟΠ, γεγονός που αιτιολογείται λόγω της πρόωρης απώλειας της πυρομόνωσης.



Εικόνα 32 : Διάγραμμα παραμόρφωσης – χρόνου

(Πηγή : Zhang et al., 2018)

2.5.2 Ενίσχυση δοκών ΟΣ έναντι τέμνουσας

Οι Zhang et al. (2019) μελέτησαν τη χρήση μήτρας με γεωπολυμερές σε συστήματα IAM για την ενίσχυση των δοκών ΟΣ έναντι της τέμνουσας. Ειδικότερα, πραγματοποίησαν δέκα πειραματικές δοκιμές μονοτονικής φόρτισης σε δοκούς ΟΣ, διαστάσεων 15 cm × 30 cm × 200 cm). Τα οκτώ δοκίμια είχαν ενισχυθεί με τρίπλευρο μανδύα IAM με ίνες άνθρακα, ένα δοκίμιο ενισχύθηκε με μανδύα ΙΟΠ και ένα δοκίμιο λειτούργησε ως δοκίμιο αναφοράς.

Στα συστήματα IAM χρησιμοποιήθηκε γεωπολυμερής μήτρα, η οποία αποτελούσε μίξη διαλύματος πυριτικού καλίου, μετακαολίνης, ιπτάμενης τέφρας και άμμου. Οι παράγοντες που εξετάστηκαν ήταν:

- (α) η ύπαρξη ή όχι ενίσχυσης
- (β) ο αριθμός των στρώσεων του σύνθετου υλικού
- (γ) η γεωμετρία του υφάσματος
- (δ) η μήτρα της ενίσχυσης (ανόργανη ή οργανική)
- (ε) η αγκύρωση μέσω χαλύβδινων λωρίδων (πάχους 3mm).

Για την εξαγωγή ακριβέστερων συμπερασμάτων, η καταγεγραμμένη συμπεριφορά του σύνθετου υλικού με χρήση γεωπολυμερούς μήτρας, συγκρίθηκε με τα αποτελέσματα παλαιότερης μελέτης, στην οποία είχαν χρησιμοποιηθεί συστήματα IAM με μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν ότι, στα IAM με μήτρα γεωπολυμερούς βελτιώθηκε σημαντικά η διατμητική αντοχή των δοκιμίων. Ειδικότερα, η διατμητική αντοχή του δοκιμίου αυξήθηκε κατά 47.1% σε σύγκριση με το δοκίμιο αναφοράς. Όταν εφαρμόστηκε αύξηση των στρώσεων των IAM με τη χρήση 1 ή 2 στρώσεων, η διατμητική αντοχή του δοκιμίου αυξήθηκε κατά 105.9%. Τέλος, όταν εφαρμόστηκε αγκύρωση των μανδυνών με χαλύβδινες λωρίδες, παρουσιάστηκε αύξηση της διατμητικής αντοχής από 14.7% έως 20.6%.

Το σύστημα ενίσχυσης με μανδύα ΙΟΠ (με 1 στρώση υφάσματος και μήτρα ρητίνης) σε σύγκριση με το σύστημα IAM, δεν παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα, αφού διαθέτει το 50% της διατμητικής αντοχής. Ωστόσο, το σύστημα IAM με γεωπολυμερή μήτρα αποτελεί μια πολύ καλή εναλλακτική πρόταση για την ενίσχυση στοιχείων ΟΣ, διότι παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα:

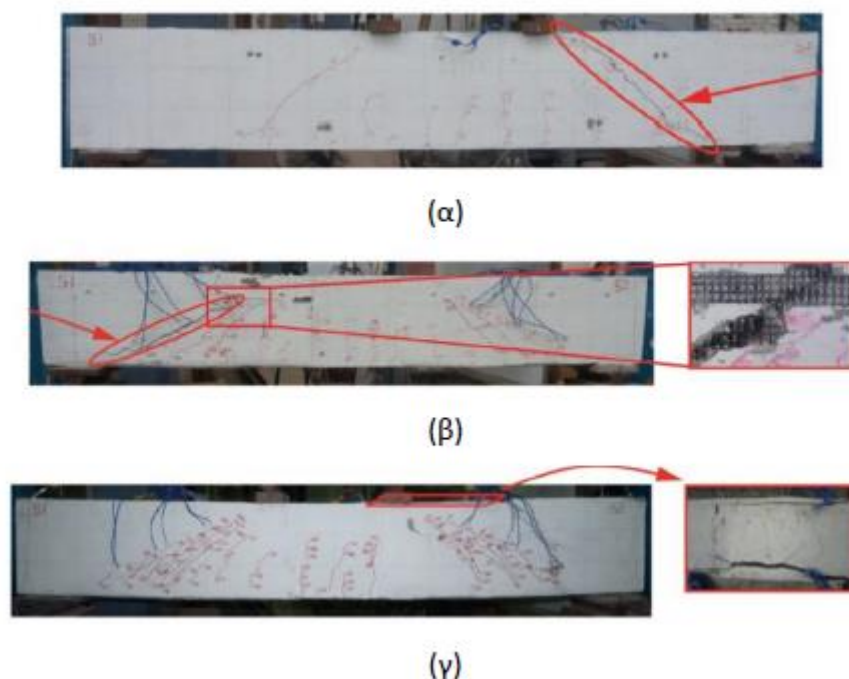
- Καλύτερη απόκριση στη φωτιά
- Μεγαλύτερη αντίσταση στη διάβρωση
- Καλύτερη συμπεριφορά στις δυσμενείς καιρικές συνθήκες.

Τέλος, συγκρίνοντας και τα δύο συστήματα IAM (TRM και TRGM) διαπιστώνεται ότι εμφανίζουν παρεμφερή συμπεριφορά όταν δε εφαρμόζεται σύστημα αγκύρωσης. Ενώ, οι αγκυρωμένοι τρίπλευροι μανδύες παρουσιάζουν υψηλότερες ενεργές τάσεις, αγγίζοντας τις τάσεις των πλήρως αγκυρωμένων συστημάτων IAM.

Επισημαίνεται ότι κατά την πειραματική διαδικασία παρατηρήθηκαν τρεις διαφορετικές μορφές αστοχίας:

- (α) η διατμητική αστοχία
- (β) συνδυασμός διατμητικής αστοχίας με θραύση ινών
- (γ) αποκόλληση του μανδύα ενίσχυσης (με ταυτόχρονη αποκόλληση της επικάλυψης του σκυροδέματος).

Αναλυτικές εικόνες των μορφών αστοχίας παρουσιάζονται στην Εικόνα 33.



Εικόνα 33 : Αστοχίες

(α) από διάτμηση

(β) από διάτμηση και θραύση ινών

(γ) από αποκόλληση μανδύα

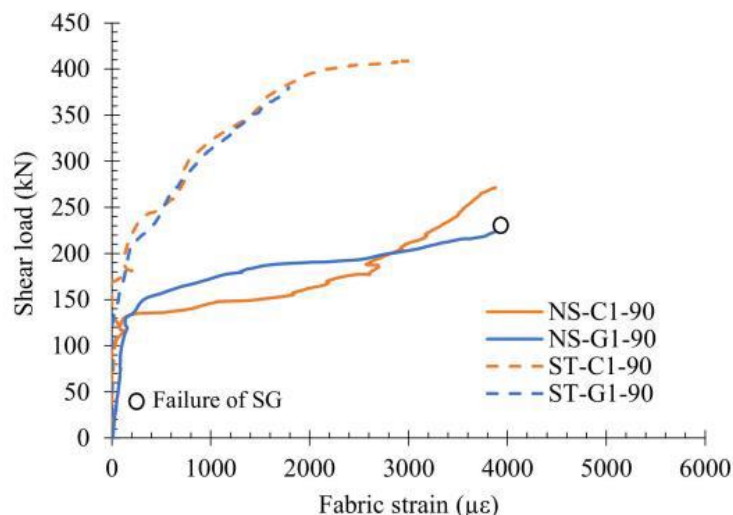
Τη βελτίωση της διατμητικής αντοχής δοκών ΟΣ, μελέτησαν οι Khir Allah et al. (2022) και συγκεκριμένα την επαύξηση της αποδοτικότητας των συστημάτων ενίσχυσης IAM με μήτρα γεωπολυμερούς. Η πειραματική έρευνα περιλάμβανε την καταπόνηση έναντι κάμψης τεσσάρων σημείων, 10 μεγάλης κλίμακας δοκών διαστάσεων 330 cm × 15 cm × 50 cm. Οι παράμετροι που διερευνήθηκαν ήταν οι εξής:

- (α) η ύπαρξη συνδετήρων ή όχι
- (β) ο αριθμός των στρώσεων IAM
- (γ) ο προσανατολισμός των ινών
- (δ) το είδος της μήτρας (τσιμεντοειδές ή γεωπολυμερές υλικό).

Το πλέγμα αποτελούταν από ίνες άνθρακα, η μήτρα γεωπολυμερούς ήταν μείγμα σκωρίας καμίνου υπό μορφή κόκκων και ιπτάμενη τέφρα, άμμος ως λεπτόκοκκο αδρανές και ένα αλκαλικό διάλυμα, από πυριτικό νάτριο και πυριτικό υδροξείδιο.

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τις πειραματικές διατάξεις ήταν:

- το γεωπολυμερές είναι δυνατόν να υποκαταστήσει με το ίδιο αποτέλεσμα την τσιμεντοειδή μήτρα των τυπικών IAM, για τις ενισχύσεις έναντι τέμνουσας δύναμης.
- το σύστημα ενίσχυσης IAM με γεωπολυμερές είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της διατμητικής αντοχής σε ποσοστό 77%, όταν δεν υπήρχαν συνδετήρες, και 9% στην περίπτωση ύπαρξης συνδετήρων.
- Σε σχέση με το τυπικό IAM, παρατηρήθηκε περιορισμένη διατμητική αντοχή σε ποσοστό από 7% μέχρι 9%. Το τυπικό διάγραμμα διατμητικού φορτίου - παραμόρφωσης για τα δοκίμια τσιμεντοειδούς σύστασης αλλά και για τα δοκίμια με γεωπολυμερή μήτρα, παρουσιάζεται στην Εικόνα 34.
- Οι μορφές αστοχίας που εμφανίστηκαν διέφεραν από διατμητική και θλιπτική αστοχία μέχρι και αστοχία διαγώνιας θλίψης (σύνθλιψη σκυροδέματος). Σε κανένα δοκίμιο δεν εμφανίστηκε μορφή αστοχίας λόγω εφελκυσμού.



Εικόνα 34 : Γράφημα διατμητικού φορτίου – παραμόρφωσης
(Πηγή : Khir Allah et al., 2022)

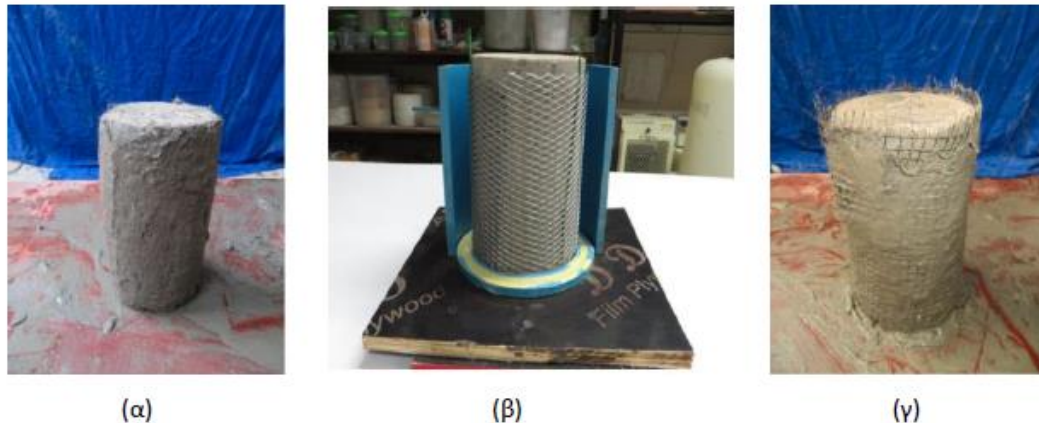
2.5.3 Μέσο περίσφιξης υποστυλωμάτων ΟΣ

Για τη χρήση των ΙΑΜ γεωπολυμερούς μήτρας ως μέσο περίσφιξης κυλίνδρων ΟΣ, μελέτησαν οι Heng et al. (2017) και οι Wang et al. (2021). Εξέτασαν πειραματικά συνολικά 48 κυλινδρικά δοκίμια ΟΣ διαστάσεων 10 cm x 20 cm x 15 cm / 30 cm) σε αξονική θλίψη. Τα δοκίμια είχαν ενισχυθεί με μανδύες είτε από πλέγματα ινών βασάλτη είτε από μεταλλικά πλέγματα. Για ανόργανη μήτρα χρησιμοποιήθηκαν είτε ιπτάμενη τέφρα και ενεργοποιητή από υδροξείδιο του νατρίου και υδροξείδιο του πυριτίου, είτε μείγμα από ιπτάμενη τέφρα, σκόνη από υψικαμίνο, χαλαζιακή άμμο και αλκαλικό ενεργοποιητή, υπερρευστοποιητή και ίνες PVA. Φωτογραφίες των ενισχυμένων δοκιμίων παρουσιάζονται στην Εικόνα 35.

Από τα συμπεράσματα της μελέτης προκύπτει ότι, τα ΙΑΜ με μήτρα γεωπολυμερή αποτελούν εναλλακτική πρόταση για την περίσφιξη των θλιβόμενων στοιχείων ΟΣ. Ειδικότερα, προκύπτει ότι παρατηρήθηκε αύξηση της μέγιστης θλιπτικής αντοχής των δομικών στοιχείων ενώ ταυτόχρονα αυξήθηκε και η αξονική δυσκαμψία και η δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας των ενισχυμένων δοκιμίων.

Η αύξηση των στρώσεων ενίσχυσης του ΙΑΜ οδηγεί σε αντίστοιχη αύξηση της θλιπτικής αντοχής, της δυσκαμψίας του δομικού στοιχείου και της δυνατότητας απορρόφησης ενέργειας του δοκιμίου. Ενώ η αύξηση της αντοχής της ανόργανης μήτρας δεν

επηρεάζει σχεδόν καθόλου τη μέγιστη θλιπτική αντοχή. Μονάχα η ολκιμότητα και η δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας του δοκιμίου επηρεάζονται. Τονίζεται ότι, η αντοχή συνάφειας μεταξύ του σκυροδέματος και του σύνθετου υλικού ήταν ισχυρή, γεγονός το οποίο οδήγησε σε μορφή αστοχίας μονολιθικού τύπου, με την δημιουργία χαρακτηριστικών κατακόρυφων ρωγμών, όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 36.



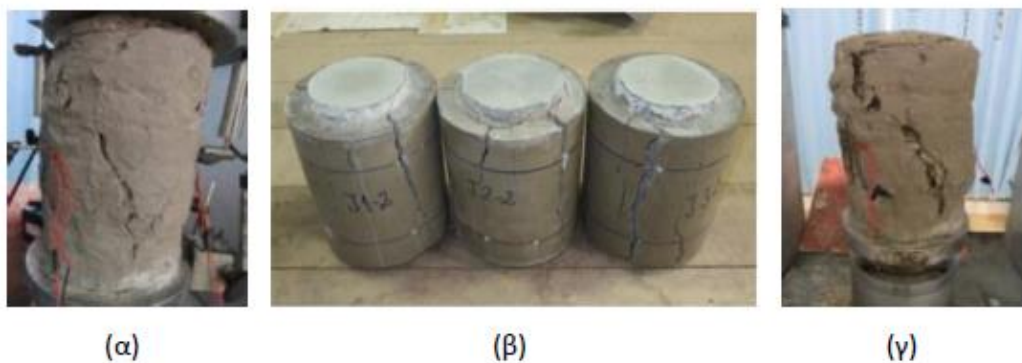
Εικόνα 35 : Ενισχυμένα κυλινδρικά δοκίμια

(α) με γεωπολυμερές κονίαμα

(β) με πλέγμα μεταλλικών ινών

(γ) με πλέγμα βασάλτη

(Πηγή : Heng et al., 2019, Wang et al., 2021)



Εικόνα 36 : Αστοχία ενισχυμένων κυλινδρικών δοκιμίων

(Πηγή : Heng et al., 2019, Wang et al., 2021)

Οι Zhang et al. (2016) μελέτησαν την επίδραση της αυξημένης θερμοκρασίας στην αντοχή δοκιμίων ΟΣ ενισχυμένων με συστήματα ΙΑΜ γεωπολυμερούς μήτρας. Εξετάσθηκαν, συνολικά 20 κυλινδρικά δοκίμια ΟΣ με διάμετρο Φ 15 cm και ύψος 30 cm, κάποια ήταν

ενισχυμένα και κάποια ήταν χωρίς ενίσχυση και υποβλήθηκαν σε δοκιμές θλίψης. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν ήταν:

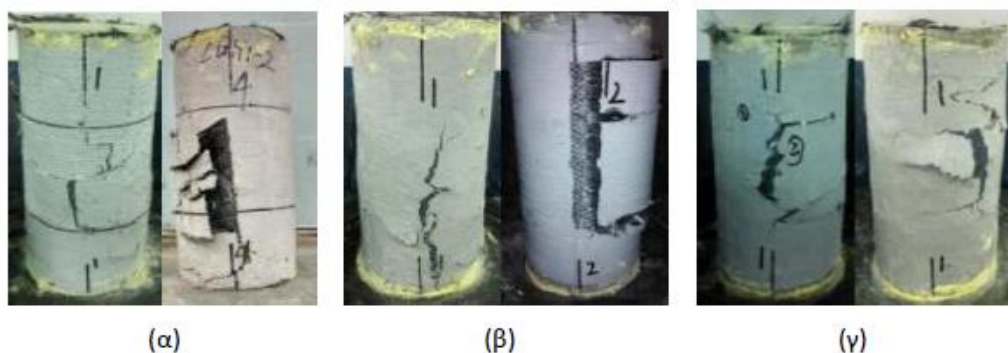
(α) οι στρώσεις του υφάσματος άνθρακα (1, 2 ή 3)

(β) η θερμοκρασία (25°C, 100°C, 200°C και 300°C).

Η μήτρα γεωπολυμερούς αποτελούσε μίγμα ιπτάμενης τέφρας και μετακαολίνης, σε αναλογία 1:1, για ενεργοποιητή χρησιμοποιήθηκε πυριτικό αλκάλιο.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα πειραματικά δεδομένα είναι ότι:

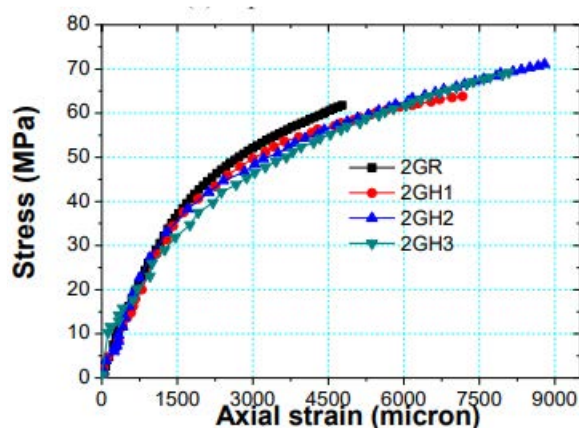
- Σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών, η περίσφιξη με σύνθετο υλικό γεωπολυμερούς μήτρας είναι αποτελεσματική και αυξάνει σημαντικά τη θλιπτική αντοχή του δομικού στοιχείου ΟΣ.
- Η ολκιμότητα όμως του δομικού στοιχείου ΟΣ, μειώνεται.
- Η μεταβολή της θερμοκρασίας από 100°C σε 300°C, επιδρά και στη μορφή αστοχίας του δοκιμίου. Πιο συγκεκριμένα, ενώ σε θερμοκρασία 100° C, το δοκίμιο παρουσιάζει αστοχία στο σύνθετο υλικό, σε θερμοκρασία 300° C, η αστοχία προκύπτει από τη θραύση του υφάσματος άνθρακα. Αναλυτικές φωτογραφίες παρουσιάζονται στην Εικόνα 37.
- Το γεωπολυμερές κονίαμα παρουσιάζει πολύ καλή αντίσταση σε υψηλές θερμοκρασίες (έως 300°C), όπως γίνεται κατανοητό και από τη δέσμη των διαγραμμάτων τάσης – παραμόρφωσης και για θερμοκρασίες από 25°C, 100°C, 200°C μέχρι και 300°C (Εικόνα 38).



Εικόνα 37 : Αστοχία περισφιγμένων κυλινδρικών δοκιμίων σε θερμοκρασία

(α) στους 100° C, (β) στους 200° C, (γ) στους 300° C

(Πηγή : Zhang et al., 2018)



Εικόνα 38 : Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης σε θερμοκρασία 100°C, 200° C και 300° C
(Πηγή : Zhang et al. 2018)

Συνάφεια σκυροδέματος και συνθετικών υλικών με γεωπολυμερή

Μετά την βιβλιογραφική ανασκόπηση του ερευνητικού έργου στον τομέα της εφαρμογής των συστημάτων IAM με μήτρα γεωπολυμερή στις ενισχύσεις των κατασκευών ΟΣ, παρατίθεται η, ομολογουμένως, περιορισμένη βιβλιογραφία που αναφέρεται στο ειδικότερο ζήτημα της ποιότητας της συνάφειας μεταξύ του σκυροδέματος και του σύνθετου υλικού.

Αυτές οι περιορισμένες μελέτες εστιάζουν κυρίως στο φαινόμενο της απλής διάτμησης σε δοκίμια ΟΣ, ενισχυμένα με πλέγματα ινών (χάλυβας, άνθρακας).

Οι Carabba et al. (2017), εξέτασαν την επίδραση των συστατικών από το γεωπολυμερές στην ποιότητα της συνάφειας του σύνθετου υλικού με το σκυρόδεμα. Ειδικότερα, υποβλήθηκαν 8 πρίσματα ΟΣ και διαστάσεων 15 cm x 15 cm x 60 cm, σε απλή διάτμηση, τα οποία ήταν ενισχυμένα με συστήματα IAM γαλβανισμένου χάλυβα, με υψηλή αντοχή. Η πειραματική διάταξη (single-lap shear tests), φαίνεται στην Εικόνα 39.

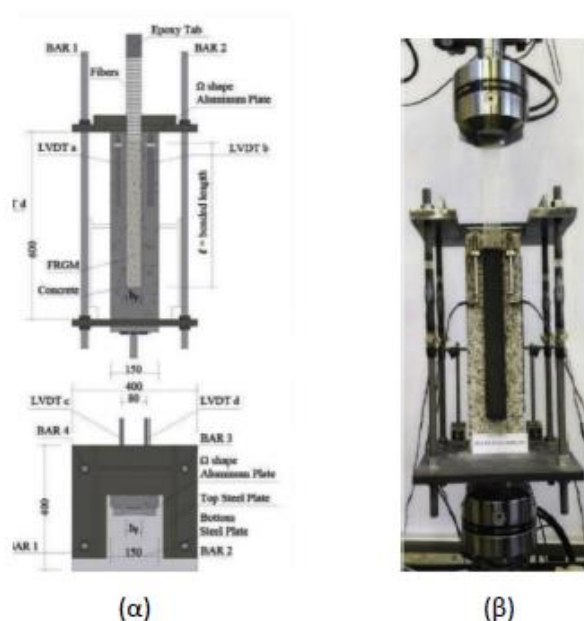
Ως μήτρα των σύνθετων υλικών χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά γεωπολυμερή κονιάματα. Τα βασικά συστατικά και στα τρία κονιάματα ήταν:

- (α) ιπτάμενη τέφρα άνθρακα
- (β) πυριτική άμμο για αδρανές

ενώ χρησιμοποιήθηκε και ένα από τα τρία διαλύματα υδροξειδίου του νατρίου κάθε φορά, με διαφορετική μοριακή συγκέντρωση (8M, 6M και 4M).

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις πειραματικές δοκιμές ήταν:

- Η μείωση στη μοριακή συγκέντρωση του NaOH εντός του διαλύματος ενεργοποίησης είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής συνάφειας στη διεπιφάνεια μήτρας και ινών. Έτσι το συνολικό σύστημα ενίσχυσης παρουσίασε βελτιωμένη αποτελεσματικότητα.
- Πρέπει να επισημανθεί ότι στα σύνθετα υλικά τα οποία περιλαμβάνουν γαλβανισμένες ίνες χάλυβα, σημείο ιδιαίτερης σημασίας είναι ο περιορισμός της χημικής αντίδρασης ανάμεσα στο αλκαλικό περιβάλλοντος της μήτρας μετά την επικάλυψη ψευδαργύρου των ινών.
- Σχετικά με τη μορφή αστοχίας των δοκιμίων, εμφανίστηκε κυρίως αποκόλληση του εξωτερικού στρώματος μήτρας από το εσωτερικό και δεν εμφανίστηκε αποκόλληση στη διεπιφάνεια μήτρας – σκυροδέματος. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι υπήρξε επαρκή συνάφεια μεταξύ του σύνθετου υλικού και του υποστρώματος.



Εικόνα 39 : Πειραματική διάταξη

(α) Σχηματική απεικόνιση, (β) Απλής διάτμησης

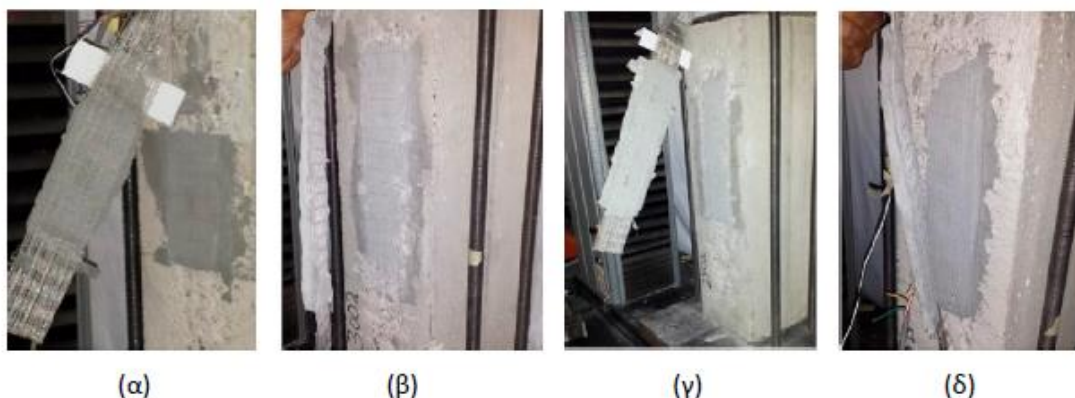
(Πηγή : Carabba et al., 2017)

Η διερεύνηση του μήκους συνάφειας για τα ΙΑΜ γεωπολυμερούς μήτρας ήταν το αντικείμενο της έρευνας των Bencardino et al. (2017). Ειδικότερα, διεξήχθησαν 12 δοκιμές απλής διάτμησης σε δοκούς ΟΣ με κανονική κλίμακα. Τα δοκίμια ενισχύθηκαν με έναν

συνδυασμό πλέγματος ινών ανοξειδωτου χάλυβα σε συνδυασμό με πυράντοχη γεωπολυμερή μήτρα. Η μεταβλητή που εξετάσθηκε ήταν το μήκος επικόλλησης, το οποίο διαφοροποιούνταν από 10 cm μέχρι και 40 cm, ενώ το πλάτος επικόλλησης παρέμεινε σταθερό (5 cm).

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την συνολική έρευνα ήταν:

- το ενεργό μήκος επικόλλησης για το συγκεκριμένο σύστημα ενίσχυσης, ορίζεται στα 20 cm
- τα διαγράμματα δύναμης – ολίσθησης για το συνολικό σύστημα σκυρόδεμα - σύνθετο υλικό, είναι παρόμοια με τα διαγράμματα δύναμης – ολίσθησης των συστημάτων ΙΟΠ και σκυροδέματος.
- η αστοχία του δοκιμίου παρουσιάστηκε στη διεπιφάνεια ίνες - μήτρα (Εικόνα 40) και αιτιολογείται διότι οι μηχανικές ιδιότητες του υποστρώματος δεν επηρεάζουν σε καμία περίπτωση τη συνάφεια του συστήματος.



Εικόνα 40 : Αστοχίες δοκιμίων

(α) με $l_b = 100$ mm, (β) με $l_b = 300$ mm, (γ) με $l_b = 250$ mm, (δ) με $l_b = 250$ mm

(Πηγή : Bencardino et al., 2017)

Οι Thermou et al. (2021) διενήργησαν μία πολυπαραγοντική μελέτη σε στοιχεία με συστήματα ΙΑΜ με ίνες χάλυβα και μήτρα γεωπολυμερούς. Ειδικότερα, οι παράγοντες που εξετάσθηκαν ήταν:

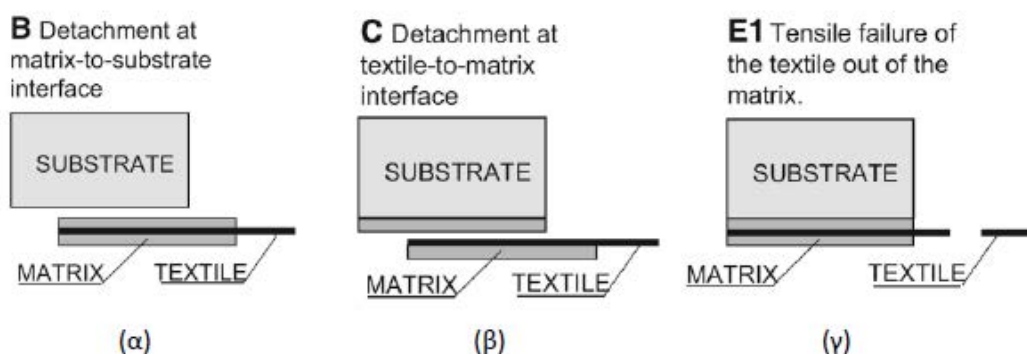
- (α) ο αριθμός των στρώσεων
- (β) η πυκνότητα των ινών
- (γ) η θλιπτική αντοχή του υποστρώματος.

Η γεωπολυμερής μήτρα που χρησιμοποιήθηκε ήταν βασισμένη σε κρυσταλλική αντίδραση γεωσυνδετικών.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη των πειραμάτων απλής διάτμησης, ήταν:

- η αύξηση του αριθμού των στρώσεων είχε ως αποτέλεσμα τη μη γραμμική αύξηση της αντοχής. Έτσι, τα IAM με μεγάλο αριθμό στρώσεων εμφάνισαν χαμηλότερη αποτελεσματικότητα σε σύγκριση με τα IAM με ένα στρώμα ενίσχυσης.
- η χρήση υφασμάτων με χαμηλή πυκνότητα ινών οδηγεί σε μειωμένη αποτελεσματικότητα του συστήματος ενίσχυσης
- από τα πειραματικά δεδομένα δεν προκύπτει σαφή επίδραση στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.

Διάφορες μορφές αστοχίας που παρουσίασαν τα δοκίμια φαίνονται στην Εικόνα 41.



Εικόνα 41 : Διάφορες μορφές αστοχίας (α) αποκόλληση διεπιφάνειας IAM – υποστρώματος, (β) αποκόλληση διεπιφάνειας πλέγματος – μήτρας, (γ) θραύση των ινών

(Πηγή : Thermou et al., 2021)

Οι Obaida et al. (2021) μελέτησαν τη συνάφεια μεταξύ των συστημάτων ενίσχυσης IAM με ίνες άνθρακα και της μήτρας γεωπολυμερών συστατικών. Ειδικότερα, εξέτασαν 18 δοκούς ΟΣ, διαστάσεων 55 cm x 15 cm x 15 cm σε καταπόνηση απλής διάτμησης. Οι διαφορετικές παράμετροι που εξέτασαν ήταν:

- (α) το είδος τη μήτρας (τσιμεντοειδή ή γεωπολυμερή)
- (β) το μήκος επικόλλησης (από 5 cm μέχρι και 30 cm).

Για τη μήτρα γεωπολυμερούς χρησιμοποιήθηκαν: ιπτάμενη τέφρα, άμμος ερήμου, αλκαλικό διάλυμα με ενεργοποιητή με πυριτικό νάτριο καθώς και υδροξείδιο του νατρίου ενώ χρησιμοποιήθηκε και υπερρευστοποιητής για την ενίσχυση της εργασιμότητας του κονιάματος.

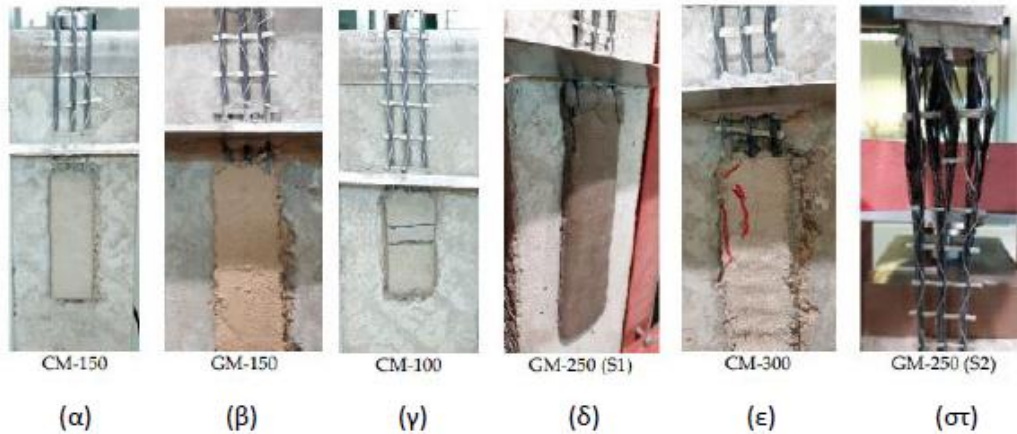
Από τα πειραματικά δεδομένα, κατέταξαν σε 3 κατηγορίες τις μορφές αστοχίας που εμφανίστηκαν:

- ✓ Μορφή I (ολίσθηση των ινών χωρίς όμως να υπάρξει ρηγμάτωση της μήτρας)
- ✓ Μορφή II (ρηγμάτωση της μήτρας με ταυτόχρονη ολίσθηση των ινών και αποκόλληση της διεπιφάνειας ινών και μήτρας)
- ✓ Μορφή III (θραύση ινών σε περιοχή εκτός της μήτρας).

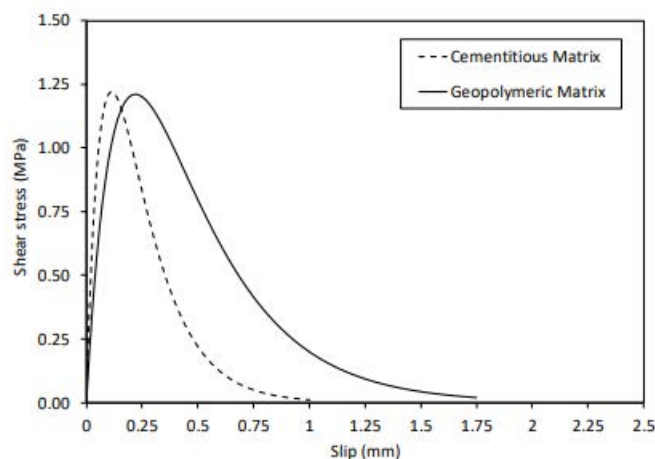
Χαρακτηριστικές εικόνες των μορφών αστοχίας των δοκιμών παρουσιάζονται στην Εικόνα 42. Επιπρόσθετα, καθορίστηκε το ωφέλιμο ενεργό μήκος επικόλλησης για τα δοκίμια με τσιμεντοειδή στα 17 cm, ενώ για τα δοκίμια με γεωπολυμερή μήτρα το ωφέλιμο ενεργό μήκος ήταν 15 cm.

Συμπερασματικά, η μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης ήταν πιο αποτελεσματική, καθόσον τα δοκίμια ΟΣ που ενισχύθηκαν με αυτήν, παρουσίασαν αύξηση της αντοχής τους σε μεγαλύτερα φορτία της τάξεως του 71%, σε σχέση με τα αντίστοιχα δοκίμια που ενισχύθηκαν από τσιμεντοειδή μήτρα. Επιπρόσθετα, όταν το μήκος επικόλλησης είχε μήκος 25 cm, η αύξηση της αντοχής του δοκιμίου προσέγγισε το σημαντικότερο ποσοστό του 84%.

Τέλος, διαμορφώθηκαν διαγράμματα αντοχής συνάφειας και ολίσθησης για τη διεπιφάνεια μήτρας – ινών. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 43, η τιμή της ολίσθησης που αντιστοιχεί στη μέγιστη διατμητική τάση και η συνολική ενέργεια παραμόρφωσης του δοκιμίου είναι μεγαλύτερες, όταν το δοκίμιο ενισχύθηκε με γεωπολυμερή μήτρα σε σύγκριση με το αντίστοιχο δοκίμιο που ενισχύθηκε με τσιμεντοειδή μήτρα. Επισημαίνεται όμως ότι και στις δύο περιπτώσεις η μέγιστη διατμητική τάση παραμένει σταθερή (1.2MPa).



Εικόνα 42 : Αστοχίες δοκιμών (α) τσιμεντοειδούς μήτρας και $l_b=15$ cm, (β) γεωπολυμερούς μήτρας και $l_b=15$ cm, (γ) τσιμεντοειδούς μήτρας και $l_b=10$ cm, (δ) γεωπολυμερούς μήτρας και $l_b=10$ cm, (ε) τσιμεντοειδούς μήτρας και $l_b=30$ cm και (στ) γεωπολυμερούς μήτρας και $l_b=30$ cm
(Πηγή : Obaida et al., 2021)



Εικόνα 43 : Διάγραμμα αντοχής συνάφειας – ολίσθησης
(Πηγή : Obaida et al., 2021)

Οι Liu et al. (2022) εστίασαν τη μελέτη τους στη συνάφεια του συστήματος IAM με γεωπολυμερή μήτρα και του σκυροδέματος αλλά υποβάλλοντας τα δοκίμια τους σε διπλή διάτμηση (double-lap shear tests). Το πλεονέκτημα το οποίο διαθέτει η μέθοδος της διπλής διάτμησης, σε σχέση με την απλή διάτμηση είναι ότι λόγω της συμμετρίας φόρτισης ελαχιστοποιείται η εκκεντρότητα της φόρτισης. Ειδικότερα, μελέτησαν 15 δοκίμια δοκών ΟΣ σε συνθήκες διπλής διάτμησης. Η μία ζώνη φόρτισης είχε διαστάσεις 10 cm × 10 cm × 30 cm,

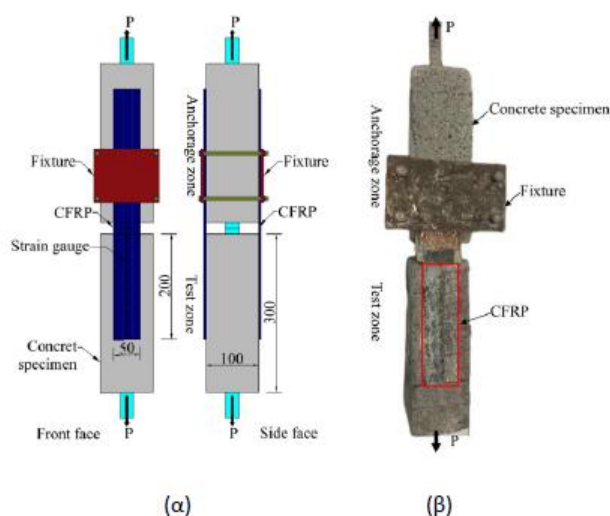
καθώς υπήρχε και μία επιπλέον ζώνη στην οποία γινόταν η αγκύρωση του συστήματος IAM. Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης παρουσιάζεται στην Εικόνα 44. Στην πειραματική διάταξη μελετήθηκαν οι παρακάτω παράμετροι:

- (α) το είδος της μήτρας (γεωπολυμερές ή ρητίνη)
- (β) ο αριθμός των στρώσεων (1 ή 2)
- (γ) η τεχνική που χρησιμοποιήσαν για τη διείδυση των ινών ενίσχυσης στο κονίαμα.

Το ύφασμα που χρησιμοποίησαν ήταν από άνθρακα, ενώ το γεωπολυμερές κονίαμα ήταν μείξη από υπτάμενη τέφρα, σκόνη σκωρίας μαζί με αλκαλικό ενεργοποιητή (υδριάλος).

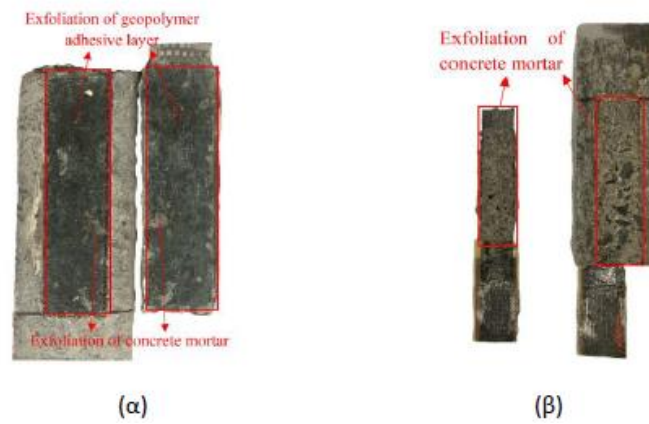
Από τα συμπεράσματα της μελέτης προκύπτει ότι, η μορφή της αστοχίας διαφέρει. Στην περίπτωση χρήσης γεωπολυμερούς κονιάματος η αστοχία εμφανίζεται στο σύνθετο υλικό, ενώ στην περίπτωση της χρήσης ρητίνης η αστοχία παρουσιάζεται στο υπόστρωμα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 45.

Συμπερασματικά, το σύστημα με γεωπολυμερή μήτρα παρουσίασε ικανοποιητική συμπεριφορά. Πιο συγκεκριμένα, η αντοχή συνάφειας που καταγράφηκε ήταν σε ποσοστό της τάξεως του 93.6% μέχρι 97.6% της αντίστοιχης αντοχής συνάφειας που παρουσίασε το σύστημα με ρητινούχο κονίαμα. Παρομοίως, η μέγιστη διατμητική τάση κατέγραψαν ποσοστά της τάξεως του 91% μέχρι 94%, ενώ η δυσκαψία κατέγραψε ποσοστά της τάξεως του 95.7% μέχρι 132.9%. Τέλος, η διατμητική τάση σε σχέση με τις τιμές ολίσθησης άγγιξε ποσοστά 68.5% μέχρι 98.2%.



Εικόνα 44 : Πειραματική διάταξη (α) Σχηματική απεικόνιση, (β) Διπλής διάτμησης

(Πηγή : Liu et al., 2022)



Εικόνα 45 : Αστοχία δοκιμίων (α) με γεωπολυμερές κονίαμα, (β) με ρητινούχο κονίαμα

(Πηγή : Liu et al., 2022)

Κεφάλαιο 3. Πειραματικές μετρήσεις

Οι παράμετροι που διερευνώνται στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι:

(α) το υλικό της μήτρας στο σύνθετο υλικό και

(β) το μήκος επικόλλησης. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν δύο διακριτές σειρές πειραμάτων:

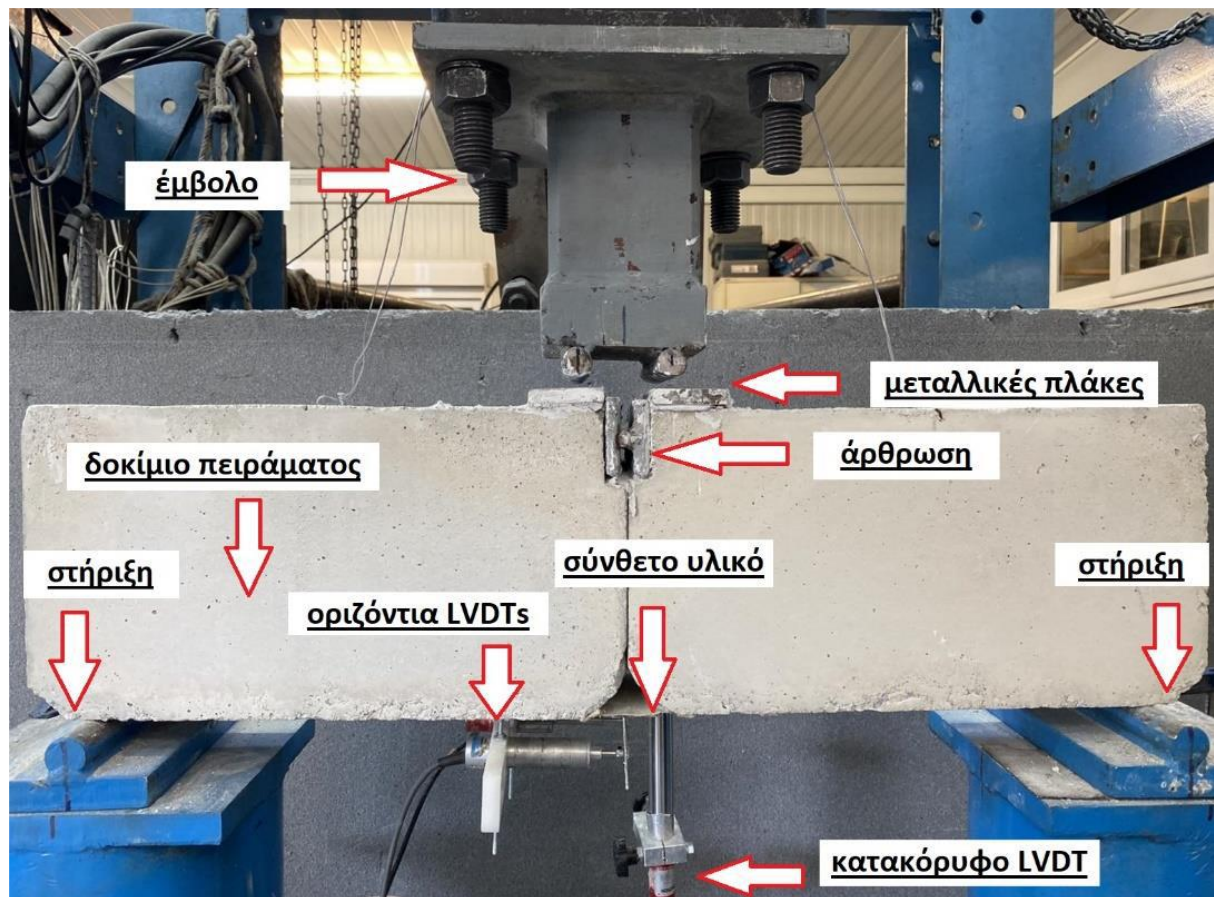
- Σειρά Α, η οποία περιλαμβάνει δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος με ενίσχυση ινών άνθρακα (IAM) και γεωπολυμερή μήτρα, και
- Σειρά Β, στην οποία εξετάζονται δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος με IAM και τσιμεντοειδή μήτρα.

Για κάθε σειρά πειραμάτων εφαρμόστηκαν τρία διαφορετικά μήκη επικόλλησης των IAM: (α) 50 mm, (β) 100 mm και (γ) 200 mm.

3.1 Πειραματική διάταξη

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν συνολικά δώδεκα δοκιμές έμμεσης διάτμησης. Σε κάθε δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν δύο πρισματικά δοκίμια οπλισμένου σκυροδέματος, τα οποία συνδέονταν μεταξύ τους μέσω άρθρωσης στο άνω μέρος, ενώ στο κάτω μέρος συνδέονταν με το σύνθετο υλικό.

Το μήκος επικόλλησης του IAM στο ένα τμήμα σκυροδέματος παρέμεινε σταθερό και ίσο με 300 mm, ενώ στο δεύτερο μεταβαλλόταν, λαμβάνοντας τις τιμές 50 mm, 100 mm ή 200 mm. Κάθε δοκίμιο υποστηριζόταν σε δύο σημεία μέσω αρθρώσεων, με καθαρή απόσταση μεταξύ τους 700 mm. Το IAM δεν ερχόταν σε άμεση επαφή με τις αρθρώσεις, προκειμένου να αποφευχθεί η άσκηση άμεσης πίεσης από τις μεταλλικές πλάκες των στηρίξεων. Εποπτική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης παρατίθεται στην Εικόνα 46.



Εικόνα 46 : Πειραματική διάταξη δοκιμών στο εργαστήριο

Η φόρτιση των δοκιμών πραγματοποιήθηκε μονοτονικά μέσω σερβοϋδραυλικού συστήματος, με σταθερό ρυθμό επιβολής μετακινήσεων ίσο με 0,01 mm/sec. Στο άκρο του εμβόλου προσαρμόστηκε άκαμπτο μεταλλικό εξάρτημα, το οποίο μετέφερε το φορτίο σε δύο σημεία, με αποτέλεσμα την επιβολή κάμψης τεσσάρων σημείων στα δοκίμια.

Για την αποφυγή τοπικής αστοχίας λόγω συγκέντρωσης τάσεων, στα σημεία εφαρμογής του φορτίου τοποθετήθηκαν μεταλλικές πλάκες πλάτους 50 mm. Η καταγραφή των μετακινήσεων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση οριζόντιων και κατακόρυφων αισθητήρων μετατόπισης τύπου LVDT, με συχνότητα δειγματοληψίας 2 Hz

3.2 Γεωμετρία δοκιμών

Για την ανάγκη των πειραμάτων, χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 24 πρισματικά δοκίμια ΟΣ διαστάσεων 200 mm × 150 mm × 385 mm. Σημειώνεται ότι σε κάθε δοκίμιο υπήρχε μία μικρή εσοχή 50 mm × 15 mm στην άνω γωνία, για τις ανάγκες της πειραματικής διάταξης.

5.3 Ιδιότητες υλικών

5.3.1 Σκυρόδεμα

Για την κατασκευή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε έτοιμο εργοταξιακό γαρμπιλοσκυρόδεμα, κατηγορίας αντοχής C12/15. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές θλίψης σε τρία κυβικά δοκίμια, διαστάσεων 150 mm × 150 mm × 150 mm. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών προέκυψε ότι η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ανέρχεται σε 20,6 MPa, με τυπική απόκλιση 0,52 MPa.

5.3.2 γεωπολυμερές κονιάμα

Για την παρασκευή της γεωπολυμερούς μήτρας, επιλέχθηκαν ως πρώτες ύλες μετακαολίνη και ασβεστολιθική θραυστή άμμος, με κοκκομετρικές διαβαθμίσεις 0–0,5 mm και 0,5–1 mm. Η ενεργοποίηση του συστήματος επιτεύχθηκε με τη χρήση διαλύματος πυριτικού καλίου, ενώ ως υγρό ανάμιξης χρησιμοποιήθηκε απιονισμένο νερό. Στο μείγμα προστέθηκαν επίσης ίνες πολυπροπυλενίου (PP) μήκους 6 mm, με στόχο την ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων. Δεδομένου ότι η επικόλληση των δοκιμών πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια, παρασκευάστηκαν αντίστοιχα δύο διαφορετικά κονιάματα. Για την αξιολόγηση της αντοχής τους, ακολουθήθηκε η μεθοδολογία του προτύπου **BS EN 1015-11:1999**, με τη χρήση πρισματικών δοκιμών διαστάσεων 40 mm × 40 mm × 160 mm (βλ. Σχήμα 3.5). Τα δοκίμια υποβλήθηκαν αρχικά σε δοκιμές κάμψης τριών σημείων και στη συνέχεια σε δοκιμές θλίψης. Αναλυτικά, τα αποτελέσματα των δύο μιγμάτων ήταν τα εξής:

- **Μείγμα (α):** έμμεση εφελκυστική αντοχή από κάμψη 7,9 MPa, θλιπτική αντοχή 47,0 MPa, με τυπικές αποκλίσεις 0,31 MPa και 3,46 MPa αντίστοιχα.
- **Μείγμα (β):** έμμεση εφελκυστική αντοχή από κάμψη 5,8 MPa, θλιπτική αντοχή 37,7 MPa, με τυπικές αποκλίσεις 0,45 MPa και 5,6 MPa αντίστοιχα.

5.3.3 Τσιμεντοκονίαμα

Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης, χρησιμοποιήθηκε ένα εμπορικά διαθέσιμο τσιμεντοειδές κονίαμα γενικής χρήσης, το οποίο περιέχει ενεργά ποζολανικά συστατικά και είναι κατάλληλο για εξωτερικές εφαρμογές σε δομικά στοιχεία. Το συγκεκριμένο κονίαμα επιλέχθηκε λόγω της ευρείας χρήσης του σε επεμβάσεις αποκατάστασης και της σταθερότητας των ιδιοτήτων του υπό συνήθεις συνθήκες περιβάλλοντος.

Οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού παρέχονται από τον κατασκευαστή και συνοψίζονται στον Πίνακα 3. Κατά την προετοιμασία του μείγματος, εφαρμόστηκε λόγος νερού προς ξηρό υλικό ίσο με 0,20, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προϊόντος.

Αντοχή σε θλίψη	Τάξεως M20
Αντοχή σε κάμψη	0,15 N/mm ²

Πίνακας 3 Μηχανικές ιδιότητες τσιμεντοκονιάματος

Για τον ακριβή προσδιορισμό της μηχανικής αντοχής του τσιμεντοειδούς κονιάματος, κατά τη φάση της παρασκευής πραγματοποιήθηκε λήψη έξι πρισματικών δοκιμίων, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προτύπου **BS EN 1015-11:1999**. Τα δοκίμια είχαν διαστάσεις 40 mm × 40 mm × 160 mm και υποβλήθηκαν σε δοκιμές κάμψης και θλίψης.

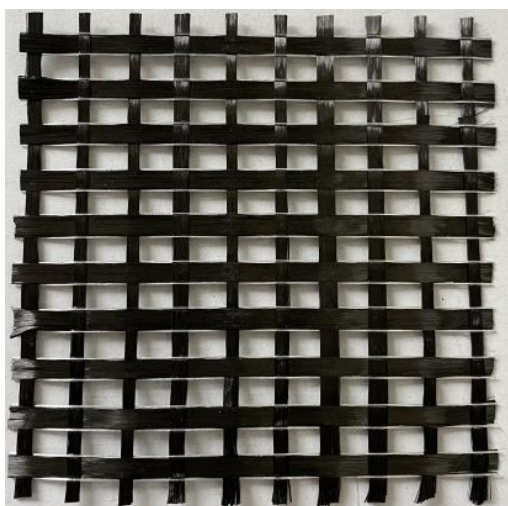
Με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών, προέκυψαν οι εξής μέσες τιμές:

- **Έμμεση εφελκυστική αντοχή από κάμψη:** 6,3 MPa (τυπική απόκλιση: 0,56 MPa)
- **Θλιπτική αντοχή:** 30,2 MPa (τυπική απόκλιση: 2,25 MPa)

5.3.4 Πλέγμα άνθρακα

Στην παρούσα πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε πλέγμα άνθρακα υψηλής αντοχής, το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 47. Το συγκεκριμένο πλέγμα επιλέχθηκε λόγω της υψηλής μηχανικής αντοχής και της καλής συμπεριφοράς του ως ενισχυτικό υλικό σε σύνθετα συστήματα επισκευής ή ενίσχυσης δομικών στοιχείων.

Οι αναλυτικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες του πλέγματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 4. Σε κάθε δοκίμιο εφαρμόστηκαν συνολικά **τρεις διαδοχικές στρώσεις πλέγματος**, ώστε να διασφαλιστεί η ομοιόμορφη κατανομή της ενίσχυσης κατά μήκος της επιφάνειας και να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση του σύνθετου συστήματος



Εικόνα 47 : Πλέγμα άνθρακα

Υλικό	Άνθρακας
Επικάληψη κλώνων ινών	Όχι
Μέτρο ελαστικότητας (Gpa)	252
Βάρος (g/m ²)	170
Εφελκυστική αντοχή (kN/m)	240
Μέγεθος πλέγματος (mmxmm)	10x10
Ονομαστικό πάχος tf (mm)	0,048

Πίνακας 4 : Ιδιότητες Πλέγματος άνθρακα σύμφωνα με τον κατασκευαστή

Κεφάλαιο 4. Πειραματικά αποτελέσματα και σχολιασμός

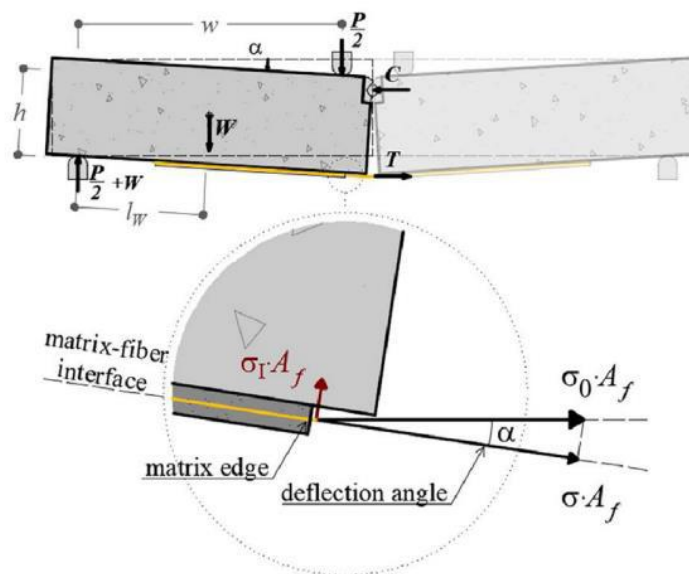
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές. Η επεξεργασία των μετρήσεων και η εξαγωγή των αριθμητικών αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση υπολογιστικού φύλλου **Microsoft Excel**, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή, ταξινόμηση και ανάλυση των δεδομένων.

$$\sigma = \frac{P \times W}{2 \times h}$$

όπου:

- **P** είναι το φορτίο που εφαρμόζεται μέσω του εμβόλου,
- **w** είναι η απόσταση μεταξύ της στήριξης και του σημείου εφαρμογής του φορτίου,
- **h** είναι η απόσταση από το μέσο της άρθρωσης έως το μέσο της επιφάνειας του σύνθετου υλικού.

Η εξίσωση αυτή προκύπτει από την εφαρμογή των συνθηκών ισορροπίας στο σύστημα και τεκμηριώνεται αναλυτικά μέσω του διαγράμματος ελευθέρου σώματος που παρουσιάζεται στην Εικόνα 48.



Εικόνα 48 :Διάγραμμα ελευθέρου σώματος έμμεσης διάτμησης.(Calabrese et al, 2021)

4.1 Αποτελέσματα Σειράς Α (Μήτρα Γεωπολυμερούς)

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών της Σειράς Α, τα οποία συνοψίζονται στον Πίνακα 5. Η εν λόγω σειρά αφορά δοκίμια με μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης, ενισχυμένα με μια στρώση πλέγματος από ίνες άνθρακα.

Η ονοματολογία των δοκιμών βασίζεται στην ακόλουθη σημειογραφία:

GP_1C_X_Y, όπου:

- **GP** (Geopolymer): υποδηλώνει τη χρήση γεωπολυμερούς μήτρας,
- **1C** (1 Carbon layer): αναφέρεται στην στρώση πλέγματος άνθρακα,
- **X**: δηλώνει το μήκος επικόλλησης σε mm, με τιμές **50**, **100** ή **200**,
- **Y**: διαφοροποιεί τα δοκίμια ανά μήκος επικόλλησης και παίρνει τις τιμές **1** ή **2**, καθώς για κάθε μήκος κατασκευάστηκαν δύο πανομοιότυπα δοκίμια.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων στο σχετικό πίνακα συνοδεύεται από τις αντίστοιχες μετρήσεις φορτίου και υπολογισμένης ορθής τάσης, με σκοπό την περαιτέρω ανάλυση της συμπεριφοράς του σύνθετου συστήματος υπό φόρτιση.

ΔΟΚΙΜΙΟ	Μήκος επικόλλησης lb(mm)	w [mm]	h [mm]	Pmax [kN]	σmax [Mpa]
GP_1C_50-1	50	314	181	4,76	955,7499488
GP_1C_50-2		316	182	5,95	1195,690883
GP_1C_100-1	100	313	184	5,82	1145,871075
GP_1C_100-2		318	179	5,89	1211,087834
GP_1C_200-1	200	315	186	6,87	1346,606183
GP_1C_200-2		312	181	7,2	1436,464088

Πίνακας 5 : Πειραματικά αποτελέσματα Σειράς Α

Συγκριτικά με το φορτίο που καταγράφηκε στα δοκίμια GP_1C_50_1 και GP_1C_50_2, τα δοκίμια GP_1C_100_1 και GP_1C_100_2 και τα δοκίμια GP_1C_200_1 και GP_1C_200_2 εμφάνισαν μεγαλύτερο φορτίο κατά περίπου 1 kN αντίστοιχα. Αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς

σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, αυξάνοντας το μήκος επικόλλησης από 50 mm σε 100 mm θα πρέπει να παρατηρείται μη γραμμική αύξηση του φορτίου.

6.2 Μορφές αστοχίας δοκιμών

Οι μορφές αστοχίας που παρατηρήθηκαν στα δοκίμια κατατάσσονται στις εξής δύο κατηγορίες:

- **Τύπου I:** Αποκόλληση στη διεπιφάνεια μήτρας–πλέγματος (*debonding at the matrix–textile interface or interlaminar shearing*).
- **Τύπου II:** Αποκόλληση από την επιφάνεια του σκυροδέματος, συνοδευόμενη από μερική αποκόλληση του ίδιου του σκυροδέματος (*debonding from the concrete surface accompanied with peeling off of the concrete cover*).

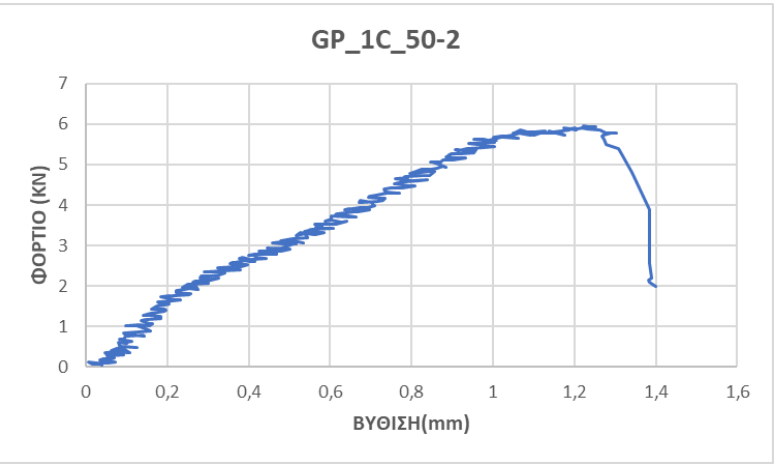
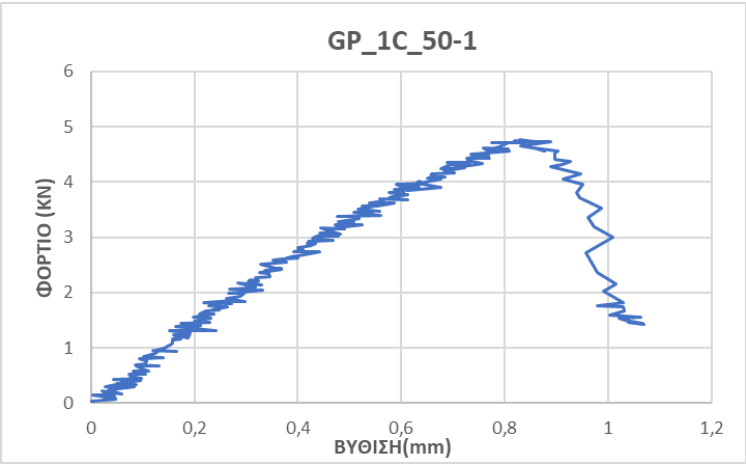
Η πλειονότητα των δοκιμών εμφάνισε αποκλειστικά αστοχία Τύπου I, γεγονός που υποδηλώνει ότι ο δεσμός μεταξύ του σκυροδέματος και του επιστρωμένου κονιάματος ήταν ισχυρότερος σε σύγκριση με τον εσωτερικό δεσμό εντός του σύνθετου υλικού. Ως αποτέλεσμα, κατά την αστοχία, μέρος του ενισχυμένου γεωπολυμερούς συστήματος παρέμεινε επικολλημένο στο υπόστρωμα σκυροδέματος.

Εξαίρεση αποτελούν τα δοκίμια **GP_1C_50_2** και **GP_1C_200_2**, στα οποία παρατηρήθηκε αστοχία **Τύπου II**, υποδηλώνοντας διαφορετική κατανομή ή ένταση των δυνάμεων επικόλλησης στο συγκεκριμένο μήκος επικόλλησης ή ενδεχομένως μικροδομικές διαφοροποιήσεις στο υπόστρωμα

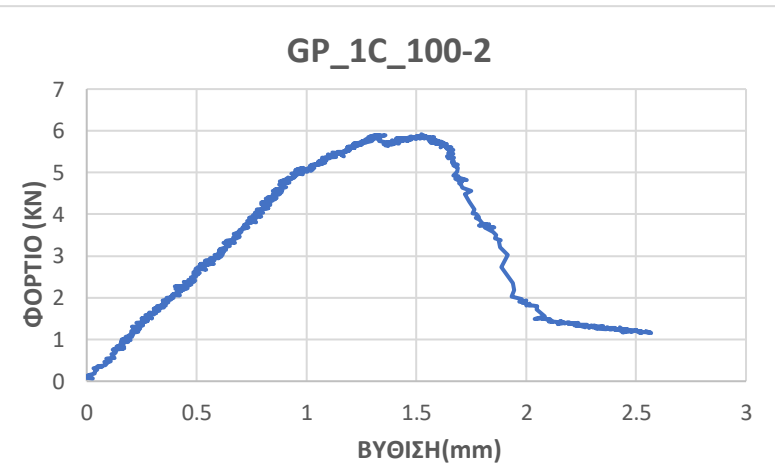
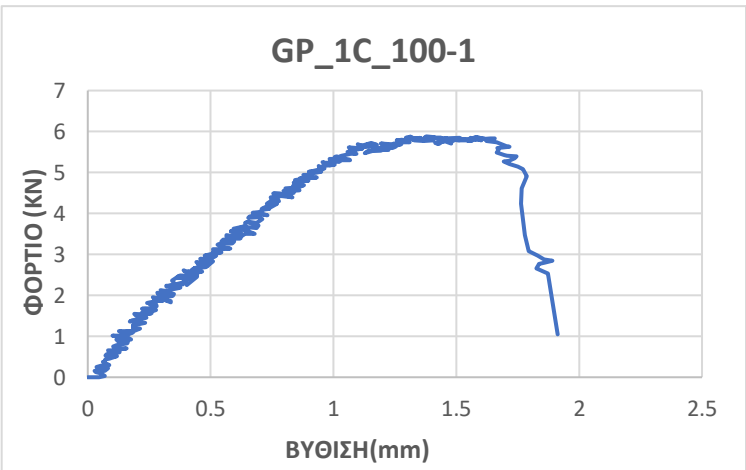
4.3 Καμπύλες φορτίου βύθισης Σειράς A

Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου–βύθισης που καταγράφηκαν για τα δοκίμια της Σειράς A. Οι καμπύλες αυτές απεικονίζουν τη μηχανική συμπεριφορά των σύνθετων συστημάτων υπό φόρτιση και παρέχουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη δυσκαμψία, τη φέρουσα ικανότητα και τη μορφή αστοχίας κάθε δοκιμίου.

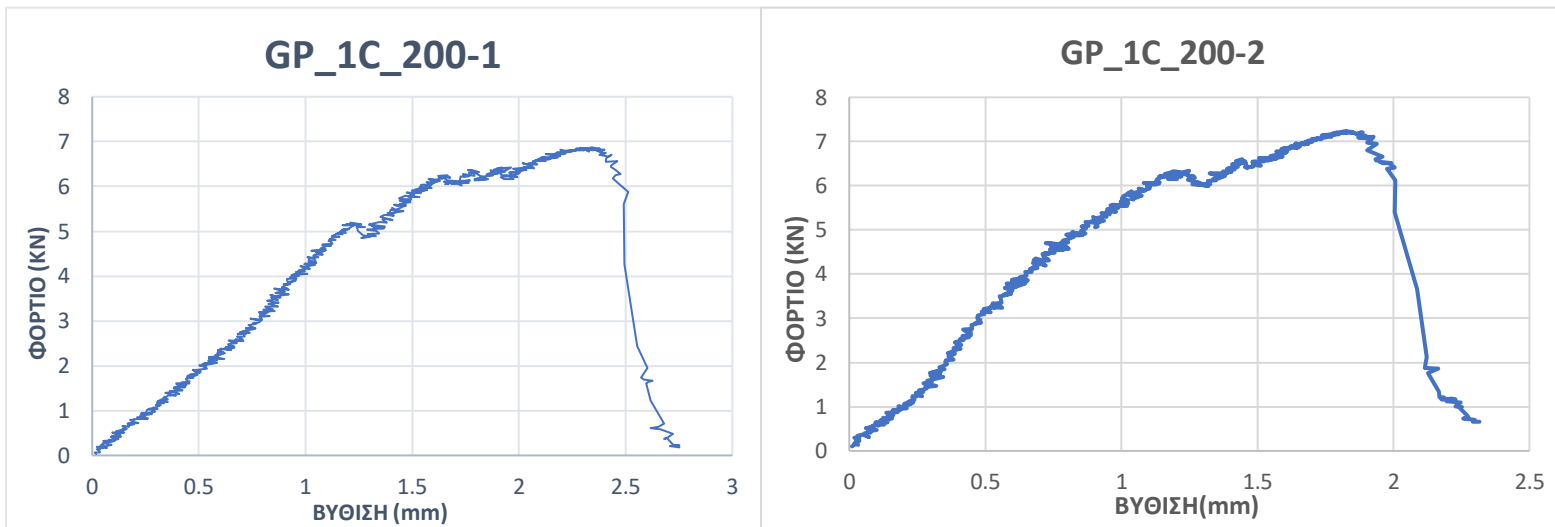
Στον κατακόρυφο άξονα αποτυπώνεται το φορτίο που ασκείται μέσω του εμβόλου, μετρούμενο σε μονάδες [kN], ενώ στον οριζόντιο άξονα καταγράφεται η βύθιση, δηλαδή η κατακόρυφη μετατόπιση που μετράται από τον αισθητήρα LVDT, σε μονάδες [mm].



α)



β)



γ)

Πίνακας 6 : Καμπύλες φορτίου-βύθισης δοκιμίων (α) GP_1C_50_1 και GP_1C_50_2, (β) GP_1C_100_1 και GP_1C_100_2 και (γ) GP_1C_200_1 και GP_1C_200_2

Σύμφωνα με τις καμπύλες φορτίου–βύθισης που παρουσιάζονται στον Πίνακα παρατηρείται σαφής συσχέτιση μεταξύ του μήκους επικόλλησης (l_b) και της μέγιστης φέρουσας ικανότητας των δοκιμίων.

Συγκεκριμένα, η αύξηση του μήκους επικόλλησης από 50 mm σε 100 mm συνοδεύεται από αύξηση του μέγιστου φορτίου κατά περίπου 1,5 kN. Η τάση αυτή ενισχύεται περαιτέρω όταν το μήκος επικόλλησης αυξάνεται στα 200 mm, όπου καταγράφεται επιπλέον αύξηση του μέγιστου φορτίου κατά περίπου 2,5 kN, σε σύγκριση με τα δοκίμια των 100 mm.

Τα αποτελέσματα αυτά καταδεικνύουν τη θετική επίδραση του μήκους επικόλλησης στην αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης, ενισχύοντας την παραδοχή ότι μεγαλύτερες επιφάνειες επαφής οδηγούν σε καλύτερη κατανομή των φορτίων και καθυστερημένη έναρξη αποκόλλησης.

6.4 Αποτελέσματα Σειράς Β (Τσιμεντοειδής Μήτρα)

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών της Σειράς Β, όπως συνοψίζονται στον Πίνακα 7. Η εν λόγω σειρά αφορά δοκίμια στα οποία χρησιμοποιήθηκε τσιμεντοειδής μήτρα, ενισχυμένη με μια στρώση πλέγματος από ίνες άνθρακα.

Η ονοματολογία των δοκιμών της Σειράς Β ακολουθεί την ίδια λογική με αυτή της Σειράς Α και καθορίζεται ως εξής:

CM_1C_X_Y, όπου:

- CM (Cementitious Matrix): υποδηλώνει τη χρήση τσιμεντοειδούς μήτρας,
- 1C (1 Carbon layer): αναφέρεται στις τρεις στρώσεις πλέγματος άνθρακα,
- X: δηλώνει το μήκος επικόλλησης σε mm (50, 100, ή 200),
- Y: διακρίνει τα δύο πανομοιότυπα δοκίμια για κάθε μήκος επικόλλησης (1 ή 2).

Ο Πίνακας περιλαμβάνει τις μετρήσεις των μέγιστων φορτίων, τις αντίστοιχες υπολογισμένες τάσεις και λοιπά παρατηρηθέντα χαρακτηριστικά κατά τη διάρκεια των δοκιμών, επιτρέποντας την άμεση σύγκριση με τα αποτελέσματα της Σειράς Α.

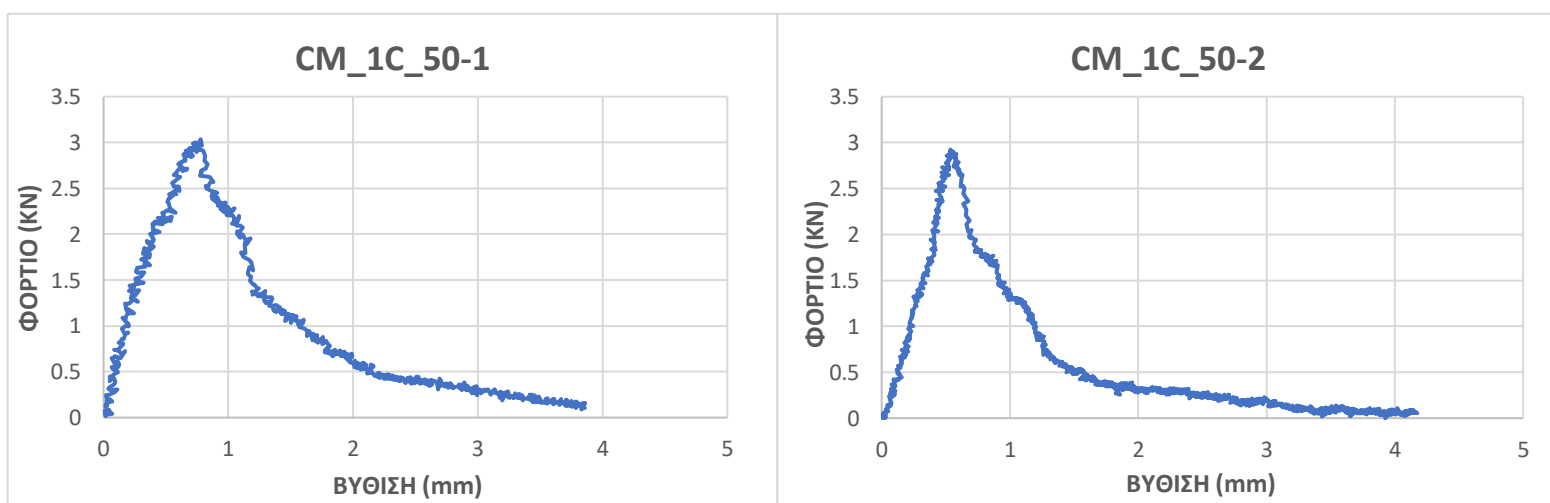
Όνομα δοκιμίου	Μήκος επικόλλησης lb(mm)	w [mm]	h [mm]	P _{max} [kN]	σ _{max} [Mpa]
CM_1C_50-1	50	316	183	3,22	643,54
CM_1C_50-2		323	184	2,92	593,27
CM_1C_100-1	100	317	179	2,45	502,18
CM_1C_100-2		328	181	3,76	788,62
CM_1C_200-1	200	318	180	4,26	871,06
CM_1C_200-2		313	182	3,57	710,60

Πίνακας 7 : Πειραματικά αποτελέσματα Σειράς Β

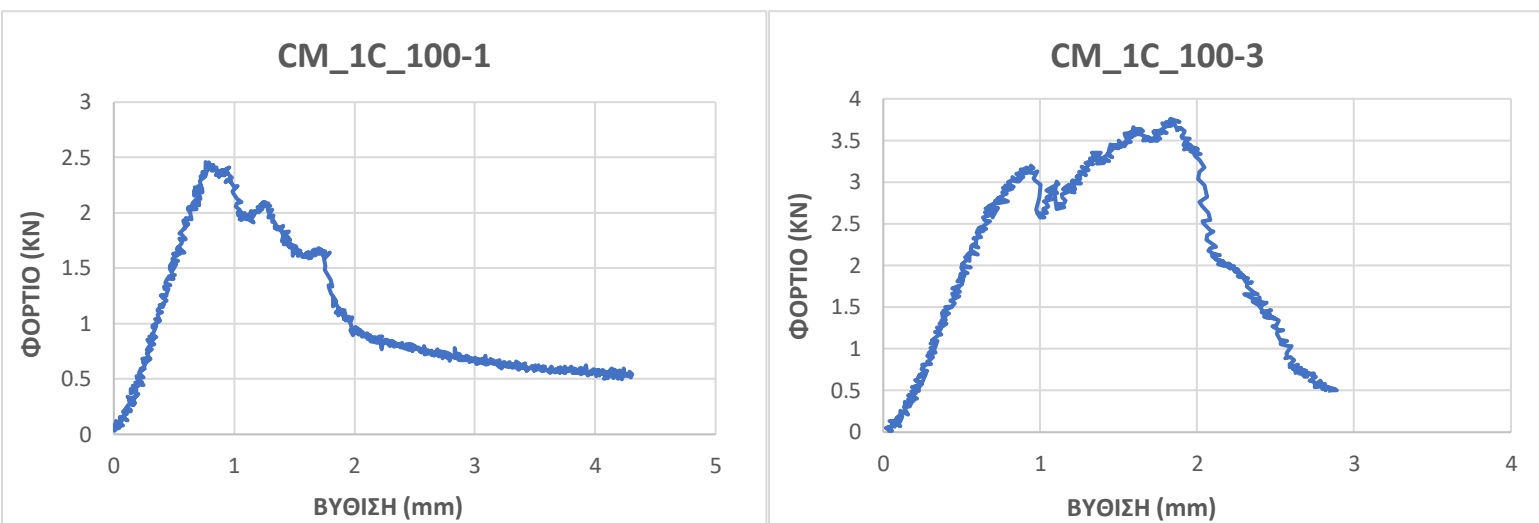
Αξίζει να σημειωθεί ότι, με εξαίρεση το δοκίμιο CM_3C_100_1, όλα τα δοκίμια της Σειράς Β παρουσίασαν αποκλειστικά μορφή αστοχίας Τύπου Ι. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η συνοχή στη διεπιφάνεια σκυροδέματος–κονιάματος ήταν επαρκώς ισχυρή, με αποτέλεσμα η αστοχία να εντοπίζεται στο εσωτερικό του σύνθετου υλικού, δηλαδή στη διεπιφάνεια μήτρας–πλέγματος.

Ως συνέπεια της αστοχίας αυτής, μέρος του σύνθετου υλικού παρέμεινε προσκολλημένο στο υπόστρωμα, γεγονός που επιβεβαιώνει την αποτελεσματικότητα της πρόσφυσης του τσιμεντοειδούς κονιάματος στο σκυρόδεμα, ενώ αναδεικνύει ως πιο ευάλωτο σημείο τον ενδογενή δεσμό εντός του σύνθετου συστήματος.

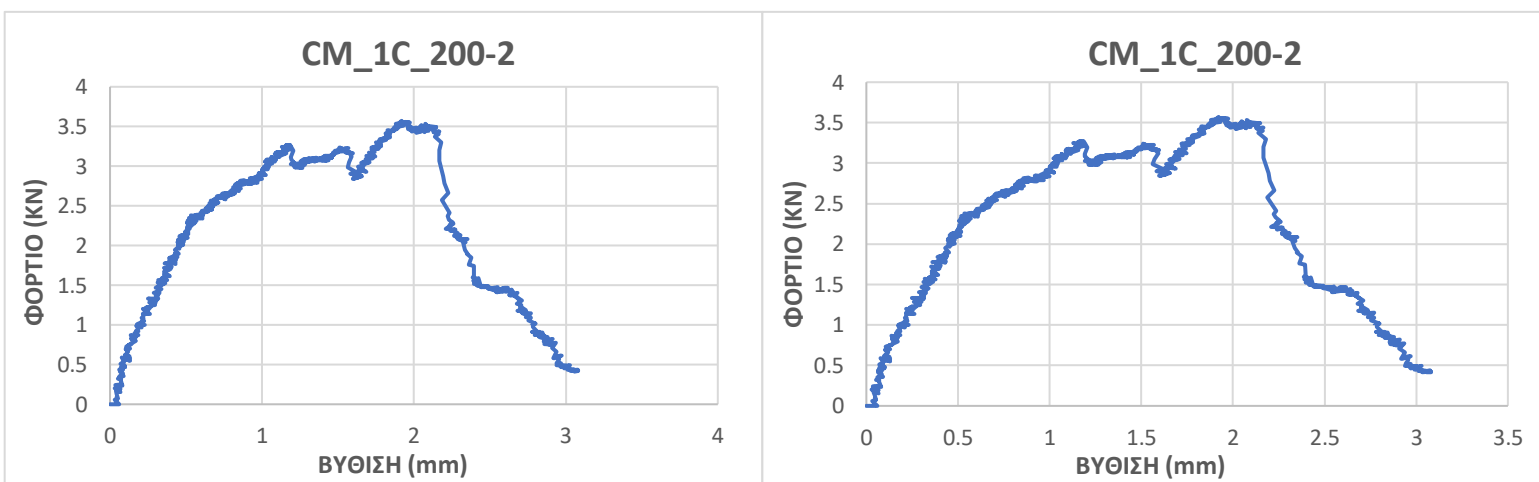
Στον Πίνακα 8 παρατίθενται οι καμπύλες φορτίου-βύθισης των δοκιμών της Σειράς Β.



α)



β)



γ)

Πίνακας 8: Καμπύλες φορτίου-βύθισης δοκιμών (α) CM_1C_50_1 και CM_1C_50_2, (β) CM_1C_100_1 και CM_1C_100_2 και (γ) CM_1C_200_1 και CM_1C_200_2

6.5 Συγκρίσεις αποτελεσμάτων

Για την πληρέστερη κατανόηση των πειραματικών αποτελεσμάτων, στον Πίνακα 9 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι μέσες τιμές των μέγιστων φορτίων ανά μήκος επικόλλησης για τις δύο σειρές δοκιμών (Σειρά Α – γεωπολυμερής μήτρα και Σειρά Β – τσιμεντοειδής μήτρα).

Συνολικά, τα μέγιστα φορτία που καταγράφηκαν στα δοκίμια με γεωπολυμερή μήτρα ήταν σημαντικά υψηλότερα από εκείνα με τσιμεντοειδή μήτρα, ανεξαρτήτως μήκους επικόλλησης. Πιο αναλυτικά:

- Για μήκος επικόλλησης 50 mm, παρατηρείται αύξηση 74% στο μέσο μέγιστο φορτίο.
- Για μήκος επικόλλησης 100 mm, η αύξηση ανέρχεται σε 89%.
- Για μήκος επικόλλησης 200 mm, καταγράφεται η υψηλότερη αύξηση, της τάξης του 80%.

Τα αυξημένα αυτά φορτία που παρατηρήθηκαν στα δοκίμια με γεωπολυμερή μήτρα υποδεικνύουν καλύτερη συνάφεια τόσο μεταξύ της μήτρας και του πλέγματος, όσο και με το υπόστρωμα σκυροδέματος. Η βελτιωμένη αυτή πρόσφυση συμβάλλει στην αποτελεσματικότερη μεταφορά των φορτίων εντός του σύνθετου συστήματος, αυξάνοντας τη συνολική φέρουσα ικανότητα.

Μήκος επικόλλησης [mm]	Pmax		GP/CM
	GP	CM	
50	5,355	3,07	1,74
100	5,855	3,105	1,89
200	7,035	3,915	1,80

Πίνακας 9: Σύγκριση μέγιστων φορτίων μεταξύ δοκιμίων με IAM γεωπολυμερούς και IAM τσιμεντοειδούς μήτρας.

Αντίστοιχη σύγκριση μπορεί να πραγματοποιηθεί και ως προς τις ορθές τάσεις που αναπτύχθηκαν στα δοκίμια κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Στον Πίνακα 10 παρατίθενται συγκεντρωτικά οι τιμές των μέγιστων ορθών τάσεων για τα δοκίμια με IAM γεωπολυμερούς μήτρας και για εκείνα με IAM τσιμεντοειδούς μήτρας.

Όπως προκύπτει από τα δεδομένα, τα δοκίμια με γεωπολυμερή μήτρα ανέπτυξαν σημαντικά υψηλότερες ορθές τάσεις σε σύγκριση με τα αντίστοιχα με τσιμεντοειδή μήτρα, ανεξαρτήτως μήκους επικόλλησης. Πιο συγκεκριμένα:

- Για μήκος επικόλλησης 50 mm, η αύξηση στην ορθή τάση ανέρχεται σε 74%.
- Για μήκος 100 mm, καταγράφεται η μεγαλύτερη αύξηση, της τάξης του 83%.
- Τέλος, για μήκος 200 mm, η αντίστοιχη αύξηση φτάνει το 76%.

Τα αποτελέσματα αυτά ενισχύουν το συμπέρασμα ότι η γεωπολυμερής μήτρα προσφέρει αυξημένη μηχανική απόδοση, καθώς επιτρέπει την ανάπτυξη υψηλότερων τάσεων πριν από την αστοχία, γεγονός που αποδίδεται στην καλύτερη πρόσφυση τόσο με το πλέγμα όσο και με το υπόστρωμα σκυροδέματος.

Μήκος επικόλλησης [mm]	$\sigma_{\max}$		GP/CM
	GP	CM	
50	1075,72	618,41	1,74
100	1178,479	645,40	1,83
200	1391,535	790,83	1,76

Πίνακας 10 : Σύγκριση μέγιστων τάσεων μεταξύ δοκιμών με IAM γεωπολυμερούς και IAM τσιμεντοειδούς μήτρας.

Όσον αφορά τις μορφές αστοχίας που παρατηρήθηκαν, διαπιστώνεται ότι και στις δύο σειρές δοκιμών (με γεωπολυμερή και με τσιμεντοειδή μήτρα) εκδηλώθηκαν οι ίδιες δύο χαρακτηριστικές μορφές αστοχίας, δηλαδή:

- Τύπου I: Αποκόλληση στη διεπιφάνεια μήτρας–πλέγματος (interlaminar shearing),
- Τύπου II: Αποκόλληση από την επιφάνεια του σκυροδέματος, συνοδευόμενη από αποκόλληση μέρους του υποστρώματος.

Οι συγκεκριμένες μορφές αστοχίας θεωρούνται τυπικές για συστήματα ενίσχυσης με Ινοπλισμένα Ανόργανα Μητρώα (IAM) και απαντώνται συστηματικά στη σχετική διεθνή βιβλιογραφία. Επομένως, τα αποτελέσματα της παρούσας πειραματικής μελέτης είναι σε συμφωνία με προϋπάρχοντα ερευνητικά δεδομένα, επιβεβαιώνοντας τη συμπεριφορά των IAM υπό φορτίο και τη συνάφεια του πειραματικού σχεδιασμού με τις διεθνώς αναγνωρισμένες προσεγγίσεις.

Κεφάλαιο 5. Σύνοψη και Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, διερευνήθηκε η συμπεριφορά του δεσμού μεταξύ σκυροδέματος και Ινοπλισμένων Ανόργανων Μητρών (IAM) με πλέγμα άνθρακα, με στόχο την αξιολόγηση της γεωπολυμερούς μήτρας ως πιθανής εναλλακτικής λύσης έναντι του εμπορικά διαθέσιμου τσιμεντοειδούς κονιάματος. Τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την πειραματική μελέτη συνοψίζονται παρακάτω:

- Η γεωπολυμερής μήτρα που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη επέδειξε ικανοποιητική μηχανική απόδοση και μπορεί να αποτελέσει βιώσιμη εναλλακτική της τσιμεντοειδούς μήτρας σε συστήματα ενίσχυσης τύπου C-TRM / FRCM με πλέγμα άνθρακα.
- Τα μέγιστα φορτία θραύσης που καταγράφηκαν στα δοκίμια με γεωπολυμερή μήτρα ήταν αυξημένα κατά 74%, 89% και 80% για μήκη επικόλλησης 50 mm, 100 mm και 200 mm αντίστοιχα, συγκριτικά με τα αντίστοιχα δοκίμια που φέρουν τσιμεντοειδή μήτρα.
- Αντίστοιχα, οι μέγιστες αναπτυσσόμενες ορθές τάσεις παρουσίασαν αύξηση κατά 74% (50 mm), 83% (100 mm) και 76% (200 mm) στην περίπτωση της γεωπολυμερούς μήτρας, επιβεβαιώνοντας την υψηλότερη αποδοτικότητα του υλικού υπό μηχανική φόρτιση.
- Κατά τη δοκιμή, παρατηρήθηκαν δύο χαρακτηριστικές μορφές αστοχίας:
 - Τύπου I: αποκόλληση στη διεπιφάνεια μήτρας-πλέγματος (interlaminar shearing),
 - Τύπου II: αποκόλληση από το σκυρόδεμα με μερική αποκόλληση της επιφανειακής στρώσης του υποστρώματος.

Οι μορφές αυτές είναι τυπικές για συστήματα IAM, γεγονός που ενισχύει τη συμβατότητα των πειραματικών δεδομένων με τη διεθνή βιβλιογραφία.

Βιβλιογραφία

➤ Ελληνική Βιβλιογραφία

Δρίτσος, Σ. Η. (2005), *Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα*, 5^η έκδοση, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα.

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

Μπουρνάς Δ. Α. (2008), *Ενίσχυση υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος με νέα υλικά: Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας, οπλισμοί σύνθετων υλικών ή ανοξείδωτου χάλυβα σε εγκοπές*. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.

Παπαντωνίου, Ι. (2007), *Πειραματική Διερεύνηση στοιχείων Σκυροδέματος επί / εντός Προκατασκευασμένων τύπων από Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας*. Διατριβή Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.

➤ Διεθνής Βιβλιογραφία

Abu Obaida, F., El-Maaddawy, T., & El-Hassan, H. (2021). Bond behavior of carbon fabric-reinforced matrix composites: Geopolymeric matrix versus cementitious mortar. *Buildings*, 11(5), 207.

Arboleda, D. (2014). Fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) composites for infrastructure strengthening and rehabilitation: Characterization methods. University of Miami.

Al-Majidi, M. H., Lampropoulos, A. P., Cundy, A. B., Tsioulou, O. T., & Alrekabi, S. (2019, June). Flexural performance of reinforced concrete beams strengthened with fibre reinforced geopolymer concrete under accelerated corrosion. In *Structures* (Vol. 19, pp. 394-410). Elsevier.

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.

Al-Salloum, Y. A., Elsanadedy, H. M., Alsayed, S. H., and Iqbal, R. A. (2012). "Experimental and numerical study for the shear strengthening of reinforced concrete beams using textile reinforced mortar." *J. Comp. Constr.*, 16(1), 74-90.

Azam, R., and Soudki, M. (2014). "FRCM strengthening of shear-critical RC beams." *J. Comp. Constr.*, 18(5), 04014012.

Bencardino, F., Condello, A., & Ashour, A. F. (2017). Single-lap shear bond tests on Steel Reinforced Geopolymeric Matrix-concrete joints. *Composites Part B: Engineering*, 110, 62-71.

Bencardino, F., & Condello, A. (2016). Innovative solution to retrofit RC members: Inhibiting- Repairing-Strengthening (IRS). *Construction and Building Materials*, 117, 171-181.

Bournas, D. A., Lontou, P. V., Papanicolaou, C. G., & Triantafillou, T. C. (2007). Textile-reinforced mortar versus fiber-reinforced polymer confinement in reinforced concrete columns. *ACI Structural Journal*, 104(6), 740.

Brameshuber, W. (Ed.). (2006). Report 36: textile reinforced concrete-state-of-the-art report of RILEM TC 201-TRC (Vol. 36). RILEM publications.

Bruckner, A., Ortlepp, R., and Curbach, M. (2006). "Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear." *Mater. Struct.*, 39, 741-748.

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*, 267, 113672.

Carabba, L., Santandrea, M., Carloni, C., Manzi, S., & Bignozzi, M. C. (2017). Steel fiber reinforced geopolymer matrix (S-FRGM) composites applied to reinforced concrete structures for strengthening applications: A preliminary study. *Composites Part B: Engineering*, 128, 83-90.

Carloni, C., Verre, S., Sneed, L. H., & Ombres, L. (2017). Loading rate effect on the debonding phenomenon in fiber reinforced cementitious matrix-concrete joints. *Composites Part B: Engineering*, 108, 301-314.

Curbach, M., & Jesse, F. (1999). High-performance textile-reinforced concrete. *Structural engineering international*, 9(4), 289-291.

Cerniauskas, G., Tetta, Z., Bournas, D. A., & Bisby, L. A. (2020). Concrete confinement with TRM versus FRP jackets at elevated temperatures. *Materials and structures*, 53(3), 1-14.

D'Ambrisi, A., Focacci, F., Luciano, R., Alecci, V., & De Stefano, M. (2015). Carbon-FRCM materials for structural upgrade of masonry arch road bridges. *Composites Part B: Engineering*, 75, 355-366.

D'Ambrici, A., and Focacci, F. (2011). "Flexural strengthening of RC beams with cement-based composites." *J. Comp. Constr.*, 15(1), 707-720.

D'Antino, T., Carloni, C., Sneed, L. H., & Pellegrino, C. (2014). Matrix-fiber bond behavior in PBO FRCM composites: A fracture mechanics approach. *Engineering Fracture Mechanics*, 117, 94-111.

D'Antino, T., Sneed, L. H., Carloni, C., & Pellegrino, C. (2015). Influence of the substrate characteristics on the bond behavior of PBO FRCM-concrete joints. *Construction and Building Materials*, 101, 838-850.

D'Antino, T., Sneed, L. H., Carloni, C., & Pellegrino, C. (2016). Effect of the inherent eccentricity in single-lap direct-shear tests of PBO FRCM-concrete joints. *Composite Structures*, 142, 117- 129.

Ebead, U., & Younis, A. (2019). Pull-off characterization of FRCM/Concrete interface. *Composites Part B: Engineering*, 165, 545-553.

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.

Elsanadedy, H. M., Almusallam, T. H., Alsayed, S. H., & Al-Salloum, Y. A. (2013). Flexural strengthening of RC beams using textile reinforced mortar— Experimental and numerical study. *Composite Structures*, 97, 40-55.

EN, B. (1999). 1015-11: 1999. Methods of test for mortar for masonry. Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. *British Standards Institution: London*.

Hegger, J., Will, N., Bruckermann, O., & Voss, S. (2006). Load-bearing behaviour and simulation of textile reinforced concrete. *Materials and structures*, 39(8), 765-776.

Hegger, J., & Voss, S. (2008). Investigations on the bearing behaviour and application potential of textile reinforced concrete. *Engineering structures*, 30(7), 2050-2056.

Heng, K., Areemit, N., & Chindaprasirt, P. (2017). Behavior of concrete cylinders confined by a ferro-geopolymer jacket in axial compression. *Engineering and Applied Science Research*, 44(2), 90-96.

Khair Allah, N., El-Maaddawy, T., & El-Hassan, H. (2022). Geopolymer-and Cement-Based Fabric-Reinforced Matrix Composites for Shear Strengthening of Concrete Deep Beams: Laboratory Testing and Numerical Modeling. *Buildings*, 12(4), 448.

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.

Koutas, L. N., & Papakonstantinou, C. G. (2021). Flexural strengthening of RC beams with textile-reinforced mortar composites focusing on the influence of the mortar type. *Engineering Structures*, 246, 113060.

Kurtz, S., & Balaguru, P. (2001). Comparison of inorganic and organic matrices for strengthening of RC beams with carbon sheets. *Journal of Structural Engineering*, 127(1), 35-42.

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(5), 3259-3275.

Menna, C., Asprone, D., Ferone, C., Colangelo, F., Balsamo, A., Prota, A., & Manfredi, G. (2013). Use of geopolymers for composite external reinforcement of RC members. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1667-1676.

Ombres, L. (2015). Analysis of the bond between fabric reinforced cementitious mortar (FRCM) strengthening systems and concrete. *Composites Part B: Engineering*, 69, 418-426.

Papakonstantinou, C., & Koutas, L. (2021). Textile-reinforced geopolymer mortar for strengthening reinforced concrete elements: Pilot study on mortar development.

Peng, K. D., Huang, B. T., Xu, L. Y., Hu, R. L., & Dai, J. G. (2022). Flexural strengthening of reinforced concrete beams using geopolymer-bonded small-diameter CFRP bars. *Engineering Structures*, 256, 113992.

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., & Bournas, D. A. (2017). Bond between TRM versus FRP composites and concrete at high temperatures. *Composites Part B: Engineering*, 127, 150-165.

Raoof, S. M., & Bournas, D. A. (2017). TRM versus FRP in flexural strengthening of RC beams: Behaviour at high temperatures. *Construction and building materials*, 154, 424-437.

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.

Scrivener, K. L., & Kirkpatrick, R. J. (2008). Innovation in use and research on cementitious material. *Cement and concrete research*, 38(2), 128-136.

Shrestha, K. C., Ebead, U., & Younis, A. (2017). Effect of surface roughening on concrete/trm bond. In *Proceedings of the Ninth International Structural Engineering and Construction Conference, Resilient Structures and Sustainable Construction*. ISEC Press Valencia, Spain.

Signorini, C., Nobili, A., Gonzalez, E. C., & Siligardi, C. (2018). Silica coating for interphase bond enhancement of carbon and AR-glass Textile Reinforced Mortar (TRM). *Composites Part B: Engineering*, 141, 191-202.

Sneed, L. H., D'Antino, T., & Carloni, C. (2014). Investigation of bond behavior of PBO fiber- reinforced cementitious matrix composite-concrete interface. *ACI Mater J*, 111(5), 569-580.

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.

Tetta, Z. C., & Bournas, D. A. (2016). TRM vs FRP jacketing in shear strengthening of concrete members subjected to high temperatures. *Composites Part B: Engineering*, 106, 190-205.

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., Papanicolaou, C. G., Zissimopoulos, P., & Laourdekis, T. (2006). Concrete confinement with textile-reinforced mortar jackets. *ACI structural journal*, 103(1), 28.

Triantafillou, T. C., and Papanicolaou, C. G. (2006). "Shear strengthening of reinforced concrete members with textile reinforced mortar (TRM) jackets." *Mater. Struct.*, 39(1), 93-103.

Tzoura, E., and Triantafillou, T. C. (2014). "Shear strengthening of reinforced concrete T- beams under cyclic loading TRM or FRP jackets". *Mater. Struct.*, doi: 10.671/s11527- 014-0470-9.

Vasconcelos, E., Fernandes, S., De Aguiar, J. B., & Pacheco-Torgal, F. (2011). Concrete retrofitting using metakaolin geopolymer mortars and CFRP. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3213-3221.

Wang, H., Wu, Y., Qin, X., Li, L., Chen, H., & Cheng, B. (2021, December). Behavior of cement concrete confined by fabric-reinforced geopolymer mortar under monotonic and cyclic compression. In *Structures* (Vol. 34, pp. 4731-4744). Elsevier.

Younis, A., & Ebead, U. (2018). Bond characteristics of different FRCM systems. *Construction and Building Materials*, 175, 610-620.

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., Liu, H. Y., Kodur, V., Li, M. Y., & Zhou, Y. (2022). Flexural behavior of concrete slabs strengthened with textile reinforced geopolymer mortar. *Composite Structures*, 115220.

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, H. Y., Yan, J., Kodur, V., & Cao, L. (2019). Mechanical behavior of concrete beams shear strengthened with textile reinforced geopolymer mortar. *Engineering Structures*, 196, 109348.

➤ **Ιστοσελίδες**

<https://fiec-statistical-report.eu/european-union/>

<https://www.statistics.gr>

