



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

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

ΒΑΛΙΑΚΟΥ ΕΥΤΥΧΙΑ

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

ΒΟΛΟΣ 2022

© 2022 Βαλιάκου Ευτυχία

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).

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες της διπλωματικής εργασίας μου, Επίκουρο Καθηγητή κ. Κούτα Λάμπρο και Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Παπακωνσταντίνου Χρήστο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή τους κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Γουργιώτη Πάνο, ο οποίος ως μέλος της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου και κατόπιν προσεκτικής ανάγνωσης της εργασίας μου προσέφερε πολύτιμες υποδείξεις. Οφείλω ευχαριστίες στην υποψήφια Διδάκτορα του Τμήματος Σκυριανού Ιωάννα, η συνεισφορά της οποίας ήταν ανεκτίμητη σε όλα τα στάδια της δουλειάς μου και οι συμβουλές της άκρως βοηθητικές. Ευχαριστώ τον συνάδελφο μου Δημήτρη καθώς και τα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου για την πολύτιμη βοήθειά τους στην διεξαγωγή των πειραμάτων. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Ηλία και Μαρία, και στον αδερφό μου, Γιώργο, για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτή την εργασία στην οικογένεια μου.

Βαλιάκου Ευτυχία

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Κούτας Λάμπρος
(Επιβλέπων) Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Παπακωνσταντίνου Χρήστος
(Επιβλέπων) Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Γουργιώτης Πάνος
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ ΜΕΤΑΞΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ

Ευτυχία Βαλιάκου

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2022

Επιβλέποντες Καθηγητές: Κούτας Λάμπρος, Επίκουρος Καθηγητής

Παπακωνσταντίνου Χρήστος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελούν τα Ινοπλέγματα σε Ανόργανη μήτρα (IAM) και η διερεύνηση της συνάφειας μεταξύ IAM και σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται διερεύνηση πιθανής αντικατάστασης της τσιμεντοειδούς μήτρας στα IAM με μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης. Συνολικά, δώδεκα (12) δοκιμές έμμεσης διάτμησης πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος (ΟΣ), σε πρισματικά δοκίμια ΟΣ στο κάτω πέλμα των οποίων ήταν επικολλημένα IAM άνθρακα, για τη μελέτη συνάφειας της διεπιφάνειας σκυροδέματος-σύνθετου υλικού. Παράμετροι διερεύνησης των πειραμάτων αποτέλεσαν: (α) το είδος της μήτρας (τσιμεντοειδής ή γεωπολυμερής) και (β) το μήκος επικόλλησης (50 mm έως 200 mm). Τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν συνοψίζονται ως εξής: (α) τα IAM γεωπολυμερούς μήτρας οδήγησαν σε υψηλότερες τιμές φορτίων και τάσεων, (β) οι μορφές αστοχίας των δοκιμίων ήταν τυπικές μορφές, σύμφωνες με την υπάρχουσα βιβλιογραφία και (γ) το μήκος συνάφειας (l_{eff}) στα IAM τσιμεντοειδούς μήτρας προσδιορίστηκε μεταξύ 100 mm και 200 mm, ενώ στα IAM γεωπολυμερούς μήτρας τα δεδομένα δε επαρκούσαν για τον προσδιορισμό του.

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

Eftychia Valiakou

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2022

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	1
1.1	Ανάγκη ενίσχυσης κατασκευών	1
1.2	Μέθοδοι ενίσχυσης	2
1.3	Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας	3
Κεφάλαιο 2	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	5
2.1	Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα	5
2.1.1	Γενικά για ΙΑΜ	5
2.1.2	Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα στο πεδίο των ενισχύσεων	8
2.1.3	Συνάφεια ΙΑΜ-σκυροδέματος	16
2.2	Γεωπολυμερή	27
2.2.1	Γενικά για τα γεωπολυμερή	27
2.2.2	Εφαρμογές γεωπολυμερών σε ενισχύσεις κατασκευών ΟΣ	28
2.2.3	Συνάφεια σκυροδέματος-σύνθετων υλικών με γεωπολυμερή	40
2.3	Επίλογος ανασκόπησης	46
Κεφάλαιο 3	Πειραματικό Πρόγραμμα	47
3.1	Παράμετροι διερεύνησης	47
3.2	Πειραματική διάταξη	47
3.3	Γεωμετρία δοκιμών	48
3.4	Ιδιότητες υλικών	51
3.4.1	Σκυρόδεμα	51
3.4.2	Μηχανικές ιδιότητες γεωπολυμερούς κονιάματος	51
3.4.3	Μηχανικές ιδιότητες τσιμεντοειδούς κονιάματος	52
3.4.4	Ιδιότητες πλέγματος	52
3.5	Προετοιμασία δοκιμών	53
3.5.1	Πρισματικά δοκίμια σκυροδέματος	53
3.5.2	Διαδικασία επικόλλησης	53
3.5.3	Συντήρηση δοκιμών	55

Κεφάλαιο 4	Πειραματικά Αποτελέσματα και Σχολιασμός	56
4.1	Αποτελέσματα Σειράς Α (μήτρα γεωπολυμερούς)	56
4.2	Αποτελέσματα Σειράς Β (τσιμεντοειδής μήτρα)	61
4.3	Συγκρίσεις αποτελεσμάτων	65
Κεφάλαιο 5	Σύνοψη και Συμπεράσματα	68
5.1	Σύνοψη και συμπεράσματα κεφαλαίου	68
Βιβλιογραφία		70

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1 Συγκεντρωτικός πίνακας με χαρακτηριστικά δοκιμίων.....	49
Πίνακας 3.2 Μηχανικές ιδιότητες τσιμεντοκονιάματος.	52
Πίνακας 3.3 Ιδιότητες πλέγματος άνθρακα σύμφωνα με τον κατασκευαστή.	53
Πίνακας 4.1 Πειραματικά αποτελέσματα Σειράς Α	57
Πίνακας 4.2 Πειραματικά αποτελέσματα Σειράς Β	61
Πίνακας 4.3 Σύγκριση μέγιστων φορτίων μεταξύ δοκιμίων με IAM γεωπολυμερούς και IAM τσιμεντοειδούς μήτρας.....	65
Πίνακας 4.4 Σύγκριση μέγιστων τάσεων μεταξύ δοκιμίων με IAM γεωπολυμερούς και IAM τσιμεντοειδούς μήτρας.....	66

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Εποπτική περιγραφή του υλικού ενίσχυσης IAM. (Κούτας,2015)	4
Σχήμα 2.1 Διάφορα πλέγματα ινών με τις ιδιότητες τους (α) Πλέγμα άνθρακα, (β) Πλέγμα βασάλτη, (γ) Πλέγμα υάλου (Raouf and Bournas, 2017)	6
Σχήμα 2.2 (α),(β) Εικόνες αστοχίας δοκιμίων με IAM, 2 στρώσεις PBO (D’ Ambrisi and Focacci 2011)	10
Σχήμα 2.3 Στάδια ενίσχυσης δοκού ΟΣ (α) Τοποθέτηση 1 ^{ου} στρώματος κονιάματος, (β) Τοποθέτηση πλέγματος, (γ) Τοποθέτηση τελικού στρώματος κονιάματος (Raouf and Bournas, 2017)	11
Σχήμα 2.4 Εικόνες αστοχίας (α) δοκιμίου αναφοράς, (β) δοκιμίου με IAM-2 στρώσεις πλέγματος, (γ) δοκιμίου με ΙΟΠ-2 στρώσεις πλέγματος (Tzoura and Triantafyllou, 2014)	14
Σχήμα 2.5 Μορφές αστοχίας δοκιμίων (α) δοκίμιο αναφοράς-20°C, (β) δοκίμιο αναφοράς- 400°C, (γ) 1 στρώση ΙΟΠ-20°C, (δ) 3 στρώσεις ΙΟΠ-20°C, (ε) 3 στρώσεις ΙΟΠ-400°C, (ζ) 1 στρώση IAM-20°C, (στ) 3 στρώσεις ΙΟΠ-400°C, (η) 1 στρώση IAM-400°C, (θ) 3 στρώσεις IAM-400°C, (ι) 3 στρώσεις IAM-400°C (Cerniauskas et al. 2020)	15
Σχήμα 2.6 (α) Αστοχία δοκιμίου αναφοράς, (β) Αστοχία δοκιμίου με IAM, (γ) Πειραματική διάταξη πειράματος (Al- Salloum et al. 2011).....	16
Σχήμα 2.7 Μορφές αστοχίας (α) Μορφή I, (β) Μορφή II, (γ) Μορφή III, (δ) Μορφή IV, (ε) Μορφή V (Elsanadedy et al. 2019).....	17
Σχήμα 2.8 Πειραματικές διατάξεις (α) Single-lap test, (β) Double-lap test (Elsanadedy et al. 2019)	17
Σχήμα 2.9 (α) Καμπύλες δύναμης-ολίσθησης, (β) Καμπύλες τάσης-ολίσθησης (Sneed et al. 2015)	18
Σχήμα 2.10 Μέγιστη τάση δοκιμών απλής διάτμησης και διπλής διάτμησης (D’Antino et al. 2016)	19
Σχήμα 2.11 (α) Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης MB test, (β) Πειραματική διάταξη απλής διάτμησης, (γ) Πειραματική διάταξη MB test (Calabrese et al. 2021).....	20
Σχήμα 2.12 Μορφές αστοχίας δοκιμίων (α), (γ), (ε) Αποκόλληση στη διεπιφάνεια IAM-σκυροδέματος με εκτίναξη της επιφάνειας -Μορφή IV, (β), (δ) Σχηματισμός ρωγμής και ολίσθηση ινών μέσα στο IAM-Μορφή I (Raouf et al. 2016).....	21
Σχήμα 2.13 Μορφές αστοχίας δοκιμίων (α) Αστοχία στη διεπιφάνεια μήτρας-πλέγματος (β) Αστοχία στη διεπιφάνεια μήτρας-σκυροδέματος (Ombres, 2015).....	22

Σχήμα 2.14 Κατάσταση επιφάνειας σκυροδέματος (α) λεία επιφάνεια, (β) χαμηλό επίπεδο τραχύτητας (γ) υψηλό επίπεδο τραχύτητας (Shrestha et al. 2017)	23
Σχήμα 2.15 Κατάσταση ινών μετά από την αστοχία του IAM (α) ίνες χωρίς επικάλυψη, (β) ίνες με επικάλυψη πυριτίου (γ) ίνες με επικάλυψη ρητίνης (Signorini et al. 2018).....	24
Σχήμα 2.16 (α) Καμπύλες μεταβολής τάσης-μήκους επικόλλησης, (β) Καμπύλες μεταβολής φορτίου-μήκους επικόλλησης (Raooof et al. 2016)	25
Σχήμα 2.17 Αστοχίες λόγω αποκόλλησης στη διεπιφάνεια σκυροδέματος-IAM, με εκτίναξη της επικάλυψης (α) δοκίμιο με 3 στρώσεις πλέγματος-100°C, (β) δοκίμιο με 4 στρώσεις πλέγματος-75°C (γ) δοκίμιο με 4 στρώσεις πλέγματος-400°C (Raooof and Bournas, 2017).....	26
Σχήμα 2.18 Είδη στερεών πρόδρομων ουσιών (α) μετακαολίνη, (β) αδρανές < 0.5 mm, (γ) αδρανές 0.5-1 mm (Parakonstantinou and Koutas, 2021)	28
Σχήμα 2.19 Καμπύλες φορτίου-παραμόρφωσης (Menna et al. 2013).....	30
Σχήμα 2.20 Δοκίμια (α) με γεωπολυμερές κονίαμα και ράβδους χάλυβα, (β) με τρίπλευρους μανδύες γεωπολυμερούς κονιάματος (Al-Majidi et al. 2019)	32
Σχήμα 2.21 Καμπύλες φορτίου-παραμόρφωσης διαβρωμένων και μη δοκιμίων ενισχυμένων (α) με σκυρόδεμα, (β) με γεωπολυμερές (3% ίνες χάλυβα), (γ) με γεωπολυμερές (2% ίνες PVA) (Al-Majidi et al. 2019)	32
Σχήμα 2.22 Ίνες (α) χάλυβα, (β) πολυβινυλικής αλκοόλης-PVA (Peng et al. 2022).....	33
Σχήμα 2.23 Καμπύλες φορτίου-μετακίνησης με παραμέτρους σύγκρισης (α) της στρώσεις πλέγματος (β) το είδος της μήτρας (Zhang et al. 2022)	34
Σχήμα 2.24 Καμπύλες παραμόρφωσης-χρόνου (Zhang et al. 2018)	35
Σχήμα 2.25 Εικόνες αστοχίας (α) διατμητική αστοχία, (β) διατμητική αστοχία και θραύση ινών, (γ) αποκόλληση μανδύα (Zhang et al. 2019)	36
Σχήμα 2.26 Διάγραμμα διατμητικού φορτίου-παραμόρφωσης (Khir Allah et al. 2022).....	37
Σχήμα 2.27 Εικόνες ενισχυμένων κυλινδρικών δοκιμίων (α) τοποθέτηση πρώτης στρώσης γεωπολυμερούς κονιάματος, (β) δοκίμιο με πλέγμα μεταλλικών ινών, (γ) τοποθέτηση πρώτης στρώσης πλέγματος βασάλτη (Heng et al. 2019, Wang et al. 2021)	38
Σχήμα 2.28 (α), (β), (γ) Αστοχία περισφιγμένων δοκιμίων (Heng et al. 2019, Wang et al. 2021)....	39
Σχήμα 2.29 Αστοχία περισφιγμένων δοκιμίων (α) της 100°C, (β) της 200°C, (γ) της 300°C (Zhang et al. 2018).....	40
Σχήμα 2.30 Σύγκριση καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης για θερμοκρασίες 100°C, 200°C και 300°C (Zhang et al. 2018)	40

Σχήμα 2.31 (α) Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης, (β) Πειραματική διάταξη απλής διάτμησης (Carabba et al. 2017).....	41
Σχήμα 2.32 Αστοχίες δοκιμίων (α) με $l_b=100\text{mm}$, (β) με $l_b=300\text{mm}$, (γ) με $l_b=250\text{mm}$, (δ) με $l_b=250\text{mm}$ (Bencardino et al. 2017)	42
Σχήμα 2.33 Μορφές αστοχίας (α) αποκόλληση στη διεπιφάνεια ΙΑΜ-υποστρώματος, (β) αποκόλληση στη διεπιφάνεια μήτρας-πλέγματος, (γ) θραύση ινών (Thermou et al. 2021) ...	43
Σχήμα 2.34 Αστοχίες δοκιμίων (α) τσιμεντοειδής μήτρα και $l_b=150\text{mm}$, (β) γεωπολυμερής μήτρα και $l_b=150\text{mm}$, (γ) τσιμεντοειδής μήτρα και $l_b=100\text{mm}$, (δ) γεωπολυμερής μήτρα και $l_b=100\text{mm}$ (ε) τσιμεντοειδής μήτρα και $l_b=300\text{mm}$ (στ) γεωπολυμερής μήτρα και $l_b=300\text{mm}$ (Obaida et al. 2021).....	44
Σχήμα 2.35 Μοντέλα αντοχής συνάφειας-ολίσθησης (Obaida et al. 2021)	44
Σχήμα 2.36 (α) Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης, (β) Πειραματική διάταξη διπλής διάτμησης (Liu et al. 2022)	45
Σχήμα 2.37 Μορφές αστοχίας δοκιμίων (α) με γεωπολυμερές κονίαμα, (β) με ρητινούχο κονίαμα (Liu et al. 2022).....	46
Σχήμα 3.1 Πειραματική διάταξη.....	48
Σχήμα 3.2 Σχηματική απεικόνιση πρισματικού δοκιμίου ΟΣ.	49
Σχήμα 3.3 Απεικόνιση καλουπιού με σπλισμό δοκιμίου.	50
Σχήμα 3.4 (α) Καλούπια δοκιμίων πριν την σκυροδέτηση, (β) καλούπια δοκιμίων μετά την σκυροδέτηση.	50
Σχήμα 3.5 Πρισματικό δοκίμιο γεωπολυμερούς κονιάματος.....	51
Σχήμα 3.6 Πλέγμα άνθρακα.	52
Σχήμα 3.7 Διαδικασία επικόλλησης με ΙΑΜ τσιμεντοειδούς μήτρας (α) διαβροχή υποστρώματος, (β) Στάδιο Ι, (γ) Στάδιο ΙΙ, (δ) Στάδιο ΙΙΙ και (ε) Στάδιο VII	54
Σχήμα 3.8 Διαδικασία επικόλλησης με ΙΑΜ γεωπολυμερούς μήτρας (α) Στάδιο Ι, (β) Στάδιο ΙΙ, (γ) Στάδιο ΙΙΙ, (δ) Στάδιο ΙV και (ε) Στάδιο VII	55
Σχήμα 4.1 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος έμμεσης διάτμησης. (Calabrese et al, 2020)	56
Σχήμα 4.2 Εικόνες αστοχίας δοκιμίων Σειράς Α (α) GP_3C_50_1, (β) GP_3C_50_1, (γ) GP_3C_50_1, (δ) GP_3C_50_1, (ε) GP_3C_50_1 και (ζ) GP_3C_50_1	59
Σχήμα 4.3 Καμπύλες φορτίου-βύθισης δοκιμίων (α) GP_3C_50_1 και GP_3C_50_2, (β) GP_3C_100_1 και GP_3C_100_2 και (γ) GP_3C_200_1 και GP_3C_200_2	61

Σχήμα 4.4 Εικόνες αστοχίας δοκιμών Σειράς Β (α) CM_3C_50_1, (β) CM_3C_50_1, (γ) CM_3C_50_1, (δ) CM_3C_50_1, (ε) CM_3C_50_1 και (ζ) CM_3C_50_1	63
Σχήμα 4.5 Καμπύλες φορτίου-βύθισης δοκιμών (α) CM_3C_50_1 και CM_3C_50_2, (β) CM_3C_100_1 και CM_3C_100_2 και (γ) CM_3C_200_1 και CM_3C_200_2	64
Σχήμα 4.6 Διάγραμμα $P_{max}-I_b$ δοκιμών Σειράς Β	65

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1 Ανάγκη ενίσχυσης κατασκευών

Τις τελευταίες δεκαετίες, η επιστημονική κοινότητα των τεχνικών έργων βρέθηκε αντιμέτωπη με μία αυξανόμενη ανάγκη για συντήρηση, ενίσχυση και ανασχεδιασμό των υφιστάμενων κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος (ΟΣ). Χαρακτηριστικό αποτελεί ότι το 1/3 των συνολικών κατασκευαστικών έργων του έτους 2021 στην Ευρωπαϊκή Ένωση, αφορούσαν ανακαινίσεις και αποκαταστάσεις κτιρίων, όπως σημειώνει στην πρόσφατη στατιστική της αναφορά η Ευρωπαϊκή Ομοσπονδία Κατασκευαστικής Βιομηχανίας (2022).

Όσον αφορά την Ελλάδα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της Απογραφής Πληθυσμού–Κατοικιών 2011, περίπου το 72% του συνόλου των κτιρίων έχει κατασκευαστεί πριν τη δεκαετία του 1990. Είναι σαφές ότι, με το πέρασμα των χρόνων η γήρανση και η φθορά των υλικών, σε συνδυασμό με παράγοντες όπως ο ανεπαρκής αρχικός σχεδιασμός, η έλλειψη συντήρησης κατά τη λειτουργία των κτιρίων, και οι δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες οδηγούν στη μείωση της αντοχής των κατασκευών. Κρίνεται επομένως απαραίτητη η δομική αναβάθμιση των κατασκευών ΟΣ προκειμένου να συμβαδίσουν με τους σύγχρονους κανονισμούς που βρίσκονται σε ισχύ και να μπορέσουν να αναλάβουν με ασφάλεια πιθανόν πρόσθετα φορτία που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια ζωής του έργου. Για την υλοποίηση αυτού του στόχου, ενδεχόμενες αντικαταστάσεις υφιστάμενων μελών με νέα στοιχεία δεν συνιστούν εφικτή λύση καθώς το κόστος προβλέπεται απαγορευτικό. Αντ' αυτού, προσφορότερη μέθοδο αποτελεί η ενίσχυση των δομικών στοιχείων των κατασκευών, η οποία αποδεδειγμένα οδηγεί στην ασφαλή ανάληψη των φορτίων λειτουργίας του κτιρίου καθώς και στην καλύτερη σεισμική απόκριση του. Με αυτόν τον τρόπο οι μηχανικοί είναι σε θέση να εξασφαλίσουν τόσο την προστασία της ανθρώπινης ζωής και της περιουσίας όσο και τη λειτουργικότητα της κατασκευής, αποφεύγοντας την κατεδάφιση υφιστάμενων δομικών στοιχείων.

1.2 Μέθοδοι ενίσχυσης

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι πιθανοί τρόποι ενίσχυσης κατηγοριοποιούνται σε δύο βασικές κατηγορίες, τις συμβατικές και τις νέες μεθόδους ανάλογα με τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε κάθε περίπτωση. Στην πρώτη μέθοδο δημιουργούνται μανδύες με χρήση οπλισμένου σκυροδέματος ή εναλλακτικά μανδύες κονιαμάτων ενισχυμένων με πλέγματα χαλύβδινου οπλισμού, ενώ στη δεύτερη μέθοδο χρησιμοποιούνται προηγμένα υλικά, γνωστά ως Ινοπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ), για την εξωτερική τους επικόλληση στα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος.

Τα ΙΟΠ (ή με βάση την αγγλική ορολογία Fiber Reinforced Polymers-FRP) αποτελούνται από υφάσματα ινών υψηλής αντοχής (π.χ. άνθρακα, βασάλτη, αραμιδίου, υάλου) σε συνδυασμό με πολυμερή υλικά (συνήθως εποξική ρητίνη). Αποτελούν τη συνηθέστερη μέθοδο ενίσχυσης τα τελευταία χρόνια, καθώς αριθμούν μία σειρά ευνοϊκών ιδιοτήτων, που κάνει την εφαρμογή τους ελκυστική στην κοινότητα των μηχανικών. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζουν υψηλή εφελκυστική αντοχή, ανθεκτικότητα έναντι διάβρωσης καθώς και μικρό πάχος και βάρος με αποτέλεσμα να μη μεταβάλλεται σημαντικά η γεωμετρία των ενισχυμένων μελών και η συνολική μάζα του κτιρίου. Γεγονός αποτελεί η γρήγορη και εύκολη τοποθέτηση τους ακόμη και σε μη τυπικής διατομής στοιχεία. Ωστόσο, τα ΙΟΠ παρουσιάζουν και ορισμένα μειονεκτήματα, τα οποία βασίζονται κυρίως στις ιδιότητες του πολυμερούς υλικού. Ειδικότερα, παρατηρείται υψηλό κόστος των ρητινών, σημαντική πτώση της απόδοσης της σε υψηλές θερμοκρασίες, αδυναμία εφαρμογής της σε υγρές επιφάνειες καθώς και κίνδυνος στο εργατικό προσωπικό από πιθανή επαφή της ρητίνης με το δέρμα κατά τη διαδικασία εφαρμογής των ΙΟΠ.

Λόγω των προβλημάτων αυτών υπήρξε η ανάγκη εύρεσης μιας εναλλακτικής λύσης. Εφόσον το πολυμερές υλικό είναι αυτό που εμφάνιζε τις αρνητικές ιδιότητες, εύλογη προσέγγιση ήταν η αντικατάσταση του από ένα υλικό διαφορετικής σύστασης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν ως μήτρες των σύνθετων υλικών τσιμεντοκονιάματα ή υδραυλικά ασβεστοκονιάματα, που έχουν ως βάση τους ανόργανα υλικά και εμφανίζουν χαρακτηριστικά όπως το χαμηλό κόστος, η καλή συμπεριφορά έναντι υψηλών θερμοκρασιών, η ευκολία εφαρμογής ακόμη και σε νωπές επιφάνειες και τέλος η αποφυγή τραυματισμών του εργατικού δυναμικού κατά την τοποθέτηση τους. Η λύση αυτή δε βρήκε

εφαρμογή καθώς λόγω της κοκκομετρίας των κονιαμάτων δε επιτεύχθηκε η απαραίτητη συνάφεια μεταξύ οπλισμού και μήτρας, με αποτέλεσμα το ύφασμα να μην μπορεί να εμποτιστεί πλήρως από το κονίαμα.

Οι παραπάνω λόγοι οδήγησαν στην ανάπτυξη νέων υλικών, των Ινοπλεγμάτων σε Ανόργανη Μήτρα (IAM). Τα IAM (αγγλικός όρος Textile Reinforced Mortars-TRMs) αποτελούνται από κλώνους ινών υψηλής αντοχής διατεταγμένους σε πλέγματα 1 ή 2 διευθύνσεων και από κονιάματα ανόργανης μήτρας. Με αυτόν τον τρόπο το ύφασμα ινών αντικαθίσταται από πλέγματα ινών για να δημιουργηθούν κενά, με αποτέλεσμα να βελτιώνονται σημαντικά οι συνθήκες διείσδυσης του οπλισμού στη μήτρα και έτσι συνολικά το σύνθετο υλικό να συνδυάζει επιτυχώς την αντοχή που του προσδίδουν οι ίνες άνθρακα, υάλου, αραμιδίου ή βασάλτη, με τα πλεονεκτήματα των κονιαμάτων.

Έτσι, η επιστημονική κοινότητα έχει εστιάσει τα τελευταία χρόνια στην έρευνα του αντικειμένου των IAM, τα οποία αποτελούν μία καινοτόμο μέθοδο στον τομέα των κατασκευών του Πολιτικού Μηχανικού. Αξίζει να σημειωθεί ωστόσο ότι, υπάρχει ακόμη περιθώριο βελτίωσης αυτού του υλικού. Συγκεκριμένα, η διαδικασία παραγωγής του τσιμεντοκονιάματος, που όπως αναφέρθηκε προηγουμένως λειτουργεί ως μήτρα του IAM, συμβάλλει στην αύξηση των εκπομπών CO₂ και άρα έχει δυσμενές περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Περιορισμένες μελέτες, διαθέσιμες στη βιβλιογραφία, ερευνούν την αντικατάσταση του τσιμεντοειδούς υλικού από ανόργανα κονιάματα με σαφώς μικρότερο οικολογικό αποτύπωμα: τα αποκαλούμενα «γεωπολυμερή» τα οποία συνιστούν μία βιώσιμη λύση στο πεδίο των ενισχύσεων.

1.3 Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και IAM με μήτρα γεωπολυμερούς. Συγκεκριμένα, διερευνάται πειραματικά η επιρροή παραμέτρων, όπως οι ιδιότητες της μήτρας και το μήκος επικόλλησης, στη συνάφεια της διεπιφάνειας σκυροδέματος και σύνθετου υλικού.

Στα πλαίσια της εργασίας γίνεται προσπάθεια αναλυτικού σχολιασμού των πειραματικών αποτελεσμάτων και εξαγωγή συμπερασμάτων για τις μηχανικές ιδιότητες των IAM. Χαρακτηριστικό για την περιγραφή του σύνθετου αυτού υλικού είναι το Σχήμα 1.1.



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

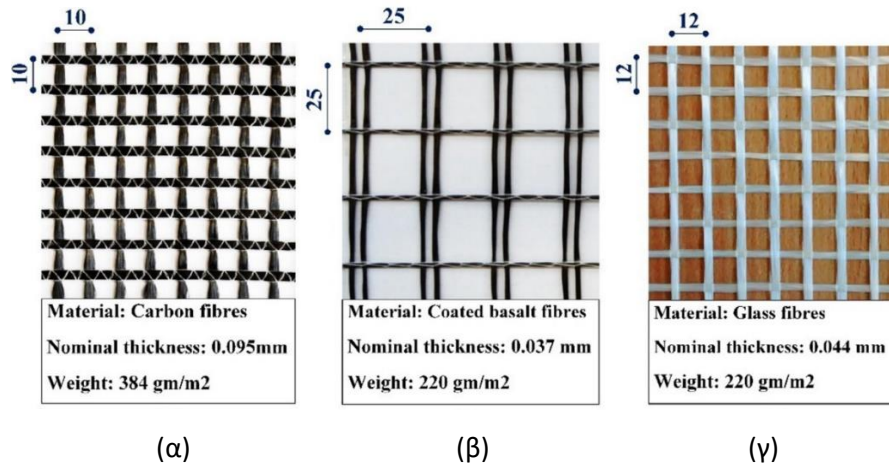
Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα

2.1.1 Γενικά για IAM

Αρχικά στην Ευρώπη, τα νέα σύνθετα υλικά που είχαν ως βάση τα πλέγματα ινών, ονομάστηκαν Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (αγγλικός όρος Textile Reinforced Mortar-TRM) ή Ινοπλισμένα Σκυροδέματα (αγγλικός όρος Textile Reinforced Concrete-TRC). Ο δεύτερος όρος εισήχθη σε δύο ερευνητικά κέντρα της Γερμανίας (RWTH Aachen University και Dresden University of Technology) και αναφέρεται, μεταξύ άλλων, σε μελέτες των Curbach and Jesse (1999), Brameshuber (2006), Hegger et al. (2006), Hegger and Voss (2008). Τυπικά όμως, η ανόργανη μήτρα δε μπορεί να κατηγοριοποιηθεί στα σκυροδέματα λόγω του πολύ μικρού μεγέθους των αδρανών της. Στη συνέχεια, στις Ηνωμένες Πολιτείες αυτά τα υλικά ονομάστηκαν Ινοπλέγματα σε Τσιμεντοειδή Μήτρα (αγγλικός όρος Fabric Reinforced Cementitious Matrix-FRCM), με μία πληθώρα ερευνητών να υιοθετούν τον όρο, όπως οι Arboleda (2014), D'Ambrici et al. (2015) κ.α.. Ένα πρόβλημα σε αυτή την ονομασία αποτελεί το γεγονός ότι η μήτρα δεν είναι πάντα τσιμεντοειδούς σύστασης (π.χ. υδραυλική σύσταση). Στην παρούσα εργασία υιοθετείται ο όρος Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM).

Τα IAM αποτελούνται από δύο επιμέρους υλικά: (α) τα πλέγματα ινών (Σχήμα 2.1), που αποτελούν τον οπλισμό του σύνθετου υλικού και (β) το κονίαμα ανόργανης σύστασης, που αποτελεί τη μητρική ουσία.



Σχήμα 2.1 Διάφορα πλέγματα ινών με τις ιδιότητες τους (α) Πλέγμα άνθρακα, (β) Πλέγμα βασάλτη, (γ) Πλέγμα υάλου (Raouf and Bournas, 2017)

Τα πλέγματα ινών αποτελούνται από τη σύνθεση ευθύγραμμων κλώνων ινών, σε δύο ή περισσότερες διευθύνσεις, με αποστάσεις μεταξύ των κλώνων με σκοπό τη δημιουργία κενών. Η ύπαρξη των κενών στα πλέγματα του IAM συνδέεται άμεσα με τη διείσδυση του κονιάματος στο πλέγμα και κατ' επέκταση τη δημιουργία μηχανικής αλληλοσύνδεσης μεταξύ πλέγματος-μήτρας, ενώ παράλληλα το μέγεθος των κενών καθορίζεται ανά περίπτωση και από τις εκάστοτε απαιτήσεις της εφαρμογής του IAM. Όπως προαναφέρθηκε, τα ινοπλέγματα αποτελούν τον οπλισμό του σύνθετου υλικού, με τις ίνες υψηλής αντοχής (άνθρακα, υάλου, αραμιδίου ή βασάλτη) να είναι αυτές που δύνανται να παραλάβουν τις εφελκυστικές δυνάμεις. Ο τρόπος κατασκευής τους ποικίλει, καθώς χρησιμοποιούνται διάφοροι μέθοδοι παραγωγής που εφαρμόζονται στην κλωστοϋφαντουργία, με συνηθέστερους την απλή συγκράτηση των οριζόντιων με τους κατακόρυφους κλώνους με πρόσθετα νήματα που υφαίνονται με ειδικό τρόπο ή την ύφανση των οριζόντιων και των κατακόρυφων κλώνων (πιο σταθερή δομή). Σημαντική απαίτηση για τα πλέγματα είναι η ύπαρξη γεωμετρικής σταθερότητας, γεγονός που επιτυγχάνεται με την επικάλυψη των ινών. Αναλυτικότερα, τα πλέγματα που έχουν εμποτιστεί με κάποιο πρόσθετο υλικό (συνήθως ρητίνη), έχουν τη δυνατότητα κατά τη διάρκεια της επικόλλησης να διατηρούν ευθύγραμμους τους κλώνους σε όλες τις διευθύνσεις και ταυτόχρονα προσφέρουν αυξημένη μηχανική εμπλοκή μεταξύ μήτρας και πλέγματος. Σημειώνεται ωστόσο ότι αυτή η μέθοδος εμφανίζει και μειονεκτήματα, καθώς η επικάλυψη των ινών οδηγεί στην σκλήρυνση του

πλέγματος με αποτέλεσμα να δημιουργείται δυσκολία στην προσαρμογή του πλέγματος σε πολύπλοκες γεωμετρίες.

Ο ρόλος του κονιάματος στο σύνθετο υλικό είναι διττός, καθώς εκτός από μήτρα του σύνθετου υλικού (η οποία μεταφέρει τις εφελκυστικές δυνάμεις στις ίνες υψηλής αντοχής), λειτουργεί και ως συγκολλητικό υλικό του IAM με το υπόστρωμα (π.χ. σκυρόδεμα). Στα IAM χρησιμοποιούνται αποκλειστικά κονιάματα ανόργανης σύστασης (τσιμεντοκονιάματα ή ασβεστοκονιάματα), με τη σύνθεση του κονιάματος να επηρεάζει σημαντικά την απόκριση του σύνθετου υλικού όσον αφορά τη δυνατότητα ανάληψης φορτίων και την ανθεκτικότητα σε διάρκεια. Ορισμένες από τις προϋποθέσεις που πρέπει να ικανοποιεί η μήτρα στα σύνθετα υλικά μεταξύ άλλων είναι: (α) υψηλή εργασιμότητα, (β) λεπτόκοκκη σύνθεση (για διασφάλιση της διείδυσης των μορίων της ανάμεσα από τα κενά του πλέγματος), (γ) υψηλό ιξώδες (για εύκολη τοποθέτηση σε κάθετες επιφάνειες), (δ) ανθεκτικότητα έναντι δυσμενών περιβαλλοντικών συνθηκών και (ε) υψηλή διατμητική αντοχή (για αποφυγή αστοχίας του σύνθετου υλικού λόγω αποκόλλησης στη διεπιφάνεια IAM-υποστρώματος). Τέλος, έχει αποδειχθεί ότι οι μηχανικές ιδιότητες της μήτρας, και συγκεκριμένα η καμπτική αντοχή και η συνάφεια μεταξύ κονιάματος και ινών, μπορούν να βελτιωθούν σημαντικά με την προσθήκη πολυμερών.

Τα IAM έχουν βρεθεί στο επίκεντρο των ερευνητικών μελετών τις τελευταίες δύο δεκαετίες καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή προκατασκευασμένων δομικών στοιχείων ή για την ενίσχυση των ήδη υπαρχουσών μελών. Είναι γεγονός ότι, το νέο αυτό σύνθετο υλικό εμφανίζει μία σειρά πλεονεκτημάτων έναντι των συμβατικών μεθόδων ενίσχυσης (εύκολη και γρήγορη τοποθέτηση, υψηλός λόγος εφελκυστικής αντοχής ως προς το βάρος, διατήρηση της γεωμετρίας των στοιχείων, μείωση της χρήσης τσιμέντου και ανθεκτικότητα σε διάβρωση). Σε σύγκριση με τα ΙΟΠ, τα οποία τυγχάνουν ευρείας χρήσης στο πεδίο των ενισχύσεων κατασκευών, αξιοσημείωτα είναι τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα IAM και τα οποία οφείλονται κυρίως στην απουσία της ρητίνης. Συγκεκριμένα τα ΙΟΠ εμφανίζουν μια σειρά προβλημάτων, τα οποία πρόκειται να εκλείψουν με τη χρήση των IAM, και συνοψίζονται ως εξής:

- Απώλεια αντοχής των ρητινών σε υψηλές θερμοκρασίες που ξεπερνούν τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (70°C – 80°C).

- Υψηλό κόστος ρητινών.
- Κίνδυνος τραυματισμού του εργατικού προσωπικού μέσω πιθανής επαφής της ρητίνης με το ανθρώπινο δέρμα και μέσω των αναθυμιάσεων.
- Αδυναμία εφαρμογής του ΙΟΠ σε υγρές επιφάνειες.
- Μη αναστρεψιμότητα της ενίσχυσης.
- Δυσκολία εντοπισμού βλαβών “μέσα” από τους μανδύες ΙΟΠ.
- Ασυμβατότητα των ρητινών με τα υλικά του υποστρώματος (τοιχοποιίες, στοιχεία ΟΣ, υλικά ιστορικών κτιρίων).

2.1.2 Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα στο πεδίο των ενισχύσεων

Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες ερευνών για τη διερεύνηση της χρήσης των ΙΑΜ στην ενίσχυση των υφιστάμενων κατασκευών. Συγκεκριμένα έχει μελετηθεί πειραματικά η συμπεριφορά των μανδύων ΙΑΜ έναντι κάμψης και διάτμησης δοκών, η χρήση τους ως περίσφιγξη υποστυλωμάτων αλλά και η περίπτωση ενίσχυσης κόμβων δοκού-υποστυλώματος. Οι πειραματικές έρευνες που έχουν δημοσιευτεί στη διεθνή βιβλιογραφία (σε αγγλική γλώσσα) και αφορούν ενισχύσεις στοιχείων ΟΣ με ΙΑΜ κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Καμπτική ενίσχυση δοκών ΟΣ (π.χ. D’ Ambrisi and Focacci 2011, Elsanadedy et al. 2013, Raouf et al. 2017, Raouf and Bournas 2017, Koutas and Papakonstantinou 2021)
- Ενίσχυση σε τέμνουσα δοκών ΟΣ (π.χ. Bruckner et al. 2006, Triantafillou and Papanicolaou 2006, Al-Salloum et al. 2012, Azam and Soudki 2014, Tzoura and Triantafillou 2014, Tetta and Bournas 2016)
- Περίσφιγξη υποστυλωμάτων ΟΣ (π.χ. Triantafillou et al. 2006, Bournas et al. 2007, Cerniauskas et al. 2020)
- Ενίσχυση κόμβων δοκού-υποστυλώματος ΟΣ (π.χ. Al-Salloum et al. 2011)

Οι Raouf et al. (2017), διερεύνησαν πειραματικά τη συμπεριφορά συστημάτων ενίσχυσης ΙΑΜ έναντι κάμψης. Αναλυτικότερα διεξήγαγαν 13 δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων σε δοκούς ΟΣ μεσαίας κλίμακας, εξετάζοντας τους εξής παράγοντες: (α) το υλικό της ενίσχυσης (ΙΑΜ ή ΙΟΠ), (β) τον αριθμό των στρώσεων, (γ) την κατάσταση της επιφάνειας του υλικού, (δ)

το υλικό του υφάσματος/πλέγματος και (ε) το σύστημα αγκύρωσης. Μελετώντας τα αποτελέσματα των πειραμάτων προέκυψε ότι και τα δύο ειδών συστήματα ενίσχυσης βελτίωσαν τη συμπεριφορά των στοιχείων έναντι κάμψης, με αυτό του IAM όμως να συνεισφέρει λιγότερο. Ωστόσο, παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση των στρώσεων του πλέγματος ινών από 1 σε 3, αυξάνεται ο βαθμός αποτελεσματικότητας της καμπτικής ενίσχυσης από 0.47 σε 0.80 (μη αναλογική μεταβολή). Διαπιστώθηκε επίσης βελτίωση της αποδοτικότητας του μανδύα IAM κατά 55% στην περίπτωση όπου οι ίνες του σύνθετου υλικού διέθεταν επικάλυψη. Αξίζει να αναφερθεί ότι η αγκύρωση με τρίπλευρο μανδύα λειτούργησε εξαιρετικά στην περίπτωση των ΙΟΠ, αφού παρουσίασε 90% υψηλότερη αντοχή, σε αντίθεση με τα IAM όπου η επιρροή του συστήματος αγκύρωσης ήταν περιορισμένη (μόλις 9%).

Αντίστοιχες πειραματικές δοκιμές για τη μελέτη της καμπτικής ενίσχυσης στοιχείων ΟΣ πραγματοποιήθηκαν από τους D' Ambrisi and Focacci (2011) και συγκεκριμένα δοκιμές κάμψης τριών και τεσσάρων σημείων σε συνολικά 24 ορθογωνικά στοιχεία δοκών ΟΣ με μανδύες IAM με κυρίαρχες παραμέτρους: (α) τον αριθμό των στρώσεων της ενίσχυσης, (β) τις ιδιότητες της μήτρας και (γ) τις ιδιότητες του πλέγματος (ίνες άνθρακα ή πολυπαραφαινυλενο βενζοβισοξαζόλης-PBO, διάταξη ινών). Εκ των αποτελεσμάτων, συμπεραίνεται ότι η καμπτική αντοχή του συστήματος ενίσχυσης αυξάνεται μη αναλογικά με την αύξηση των στρώσεων του πλέγματος ινών και υπογραμμίζεται η σημαντική επιρροή των ιδιοτήτων της μήτρας στην αποδοτικότητα της ενίσχυσης, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις η αστοχία επήλθε από αποκόλληση στη διεπιφάνεια ινών-μήτρας και όχι σε αυτήν του σκυροδέματος-σύνθετου υλικού, (Σχήμα 2.2). Αντίστοιχη μελέτη διεξήγαγαν οι Elsanadey et al. (2013), σε έξι μικρής κλίμακας ορθογωνικές δοκούς υποβαλλόμενες σε κάμψη τεσσάρων σημείων, με τις 3 εξ' αυτών να είναι ενισχυμένες εξωτερικά με πλέγματα ινών από βασάλτη και μία με ύφασμα άνθρακα (CFRP). Με τις παραμέτρους διερεύνησης να παραμένουν ίδιοι με τους προαναφερθέντες (αριθμός στρώσεων, ιδιότητες μήτρας, ιδιότητες πλέγματος), προέκυψε ότι το σύστημα ενίσχυσης ΙΟΠ είναι ελαφρώς αποδοτικότερο από αυτό του IAM και ότι η ύπαρξη τρίπλευρων μανδύων ως μέσα αγκύρωσης βελτιώνει την αποδοτικότητα των συστημάτων ενίσχυσης IAM. Τέλος, αναφέρεται ότι η χρήση διαφορετικού κονιάματος ως μήτρα οδηγεί σε διαφορετικά

αποτελέσματα, καθιστώντας έτσι τις ιδιότητες της μήτρας σημαντικό παράγοντα στα συστήματα ενίσχυσης. Εξειδικευμένη μελέτη στο ζήτημα της επιρροής των ιδιοτήτων της μήτρας στην καμπτική ενίσχυση έχουν πραγματοποιήσει οι Koutas and Parakonstantinou (2021), υποβάλλοντας 9 μεσαίας κλίμακας δοκούς σε κάμψη τεσσάρων σημείων, με παραμέτρους διερεύνησης εκτός της σύστασης της μήτρας, το είδος και τον αριθμό των στρώσεων του πλέγματος (3 ή 6). Εκ των αποτελεσμάτων συμπεραίνεται ότι το είδος της μήτρας σε κάθε περίπτωση επηρεάζει σημαντικά την καμπτική αντοχή του IAM καθώς και το είδος της αστοχίας, όταν αυτή δεν προέρχεται από θραύση ινών του πλέγματος.



(α)

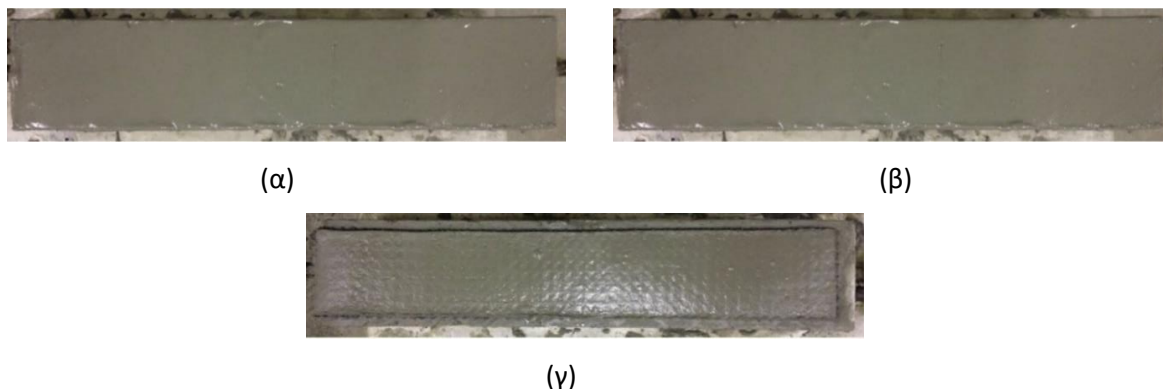


(β)

Σχήμα 2.2 (α),(β) Εικόνες αστοχίας δοκιμών με IAM, 2 στρώσεις PBO (D' Ambrisi and Focacci 2011)

Στην περίπτωση ύπαρξης υψηλών θερμοκρασιών, εστίασαν οι Raouf and Bournas (2017), οι οποίοι διερεύνησαν πειραματικά την καμπτική συμπεριφορά δοκών με IAM όταν υποβάλλονται σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα στάδια ενίσχυσης παρουσιάζονται εν συντομία στο Σχήμα 2.3. Αναλυτικότερα διεξήγαγαν συνολικά 23 δοκιμές κάμψης σε μεσαίας κλίμακας δοκούς και παραμέτρους: (α) το υλικό της ενίσχυσης (IAM ή ΙΟΠ), (β) τον αριθμό των στρώσεων, (γ) την επιφάνεια του υφάσματος (με επικάλυψη ή χωρίς), (δ) το υλικό (ίνες άνθρακα, βασάλτη, υάλου) και (ε) την αγκύρωση. Το σύστημα ενίσχυσης με IAM αποδείχθηκε συντριπτικά αποδοτικότερο από αυτό των ΙΟΠ καθώς έναντι υψηλών θερμοκρασιών (150°C, 200°C) διατήρησε κατά μέσο όρο το 55% της συνολικής απόδοσης που εμφάνιζε υπό θερμοκρασία περιβάλλοντος (20°C), σε αντίθεση με το σύστημα ΙΟΠ που έχασε πλήρως την αποδοτικότητα του. Ακόμη προέκυψε ότι θετικά συνεισφέρουν στην καμπτική αντοχή του IAM η αύξηση των στρώσεων ενίσχυσης και η επικάλυψη των ινών, ενώ φαίνεται να μην

αποφέρει κάποια βελτίωση στην καμπτική συμπεριφορά του στοιχείου η αγκύρωση της ενίσχυσης, όταν αυτό υποβάλλεται σε υψηλές θερμοκρασίες.



Σχήμα 2.3 Στάδια ενίσχυσης δοκού ΟΣ (α) Τοποθέτηση 1^{ου} στρώματος κονιάματος, (β) Τοποθέτηση πλέγματος, (γ) Τοποθέτηση τελικού στρώματος κονιάματος (Raouf and Bougnas, 2017)

Ακολουθεί η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με την ενίσχυση σε τέμνουσα δοκών ΟΣ με μανδύες ΙΑΜ, η οποία τυγχάνει μεγάλου ερευνητικού ενδιαφέροντος από την επιστημονική κοινότητα. Αρχικά οι Triantafillou and Parapicolaou (2006), υπέβαλαν έξι ορθογωνικής διατομής δοκούς με κλειστούς μανδύες ΙΑΜ, υπό κάμψη τεσσάρων σημείων, τόσο μονοτονικά όσο και σε συνθήκες κυκλικής φόρτισης και συνέκριναν τα αποτελέσματα, με συμβατικό στοιχείο (δοκίμιο αναφοράς) και με στοιχείο με μανδύα ΙΟΠ. Το σημαντικότερο αποτέλεσμα της συγκεκριμένης μελέτης είναι ότι συγκριτικά με το δοκίμιο αναφοράς παρατηρήθηκε αύξηση αποδοτικότητας έναντι διάτμησης σχεδόν 100%, ενώ το σύστημα ενίσχυσης ΙΟΠ αποδείχθηκε αποτελεσματικότερο από το αντίστοιχο ΙΑΜ κατά 45%. Σημειώνεται ότι οι μανδύες ΙΑΜ αποτελούνταν από συνεχές ύφασμα άνθρακα και ανόργανη τσιμεντοειδή μήτρα. Ακολούθησαν πειραματικές δοκιμές μονοτονικής φόρτισης από τους Al-Salloum et al. (2012) και Azam and Soudki (2014) σε συνολικά δεκαεπτά ορθογωνικές δοκούς ΟΣ με μανδύες ΙΑΜ, με παραμέτρους διερεύνησης τον αριθμό των στρώσεων του πλέγματος, τη διάταξη των ινών (0°/90° ή -45°/+45°) και τέλος τη τεχνική επικόλλησης (δίπλευροι ή τρίπλευροι μανδύες). Από τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει ότι το στοιχείο με 4 στρώσεις μανδύα ΙΑΜ παρουσιάζει αυξημένη διατμητική αντοχή σε σχέση με αυτό των 2 στρώσεων (μη αναλογική αύξηση αντοχής). Προκύπτει επίσης ότι, οι τρίπλευροι μανδύες αποτελούν αποδοτικότερο σύστημα απ' ότι οι δίπλευροι και τέλος, όσον αφορά τη διάταξη

των ινών του πλέγματος, διαφοροποιείται η απόκριση του συστήματος μόνο όταν η μήτρα αποτελείται από τροποποιημένο τσιμεντοκονίαμα και συγκεκριμένα η διάταξη $-45^{\circ}/+45^{\circ}$ οδηγεί σε αυξημένο ποσοστό ανάληψης τέμνουσας. Αξίζει να αναφερθεί ότι για τις συγκεκριμένες μελέτες χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικής σύστασης εμπορικά διαθέσιμα κονιάματα σε συνδυασμό με πλέγματα από βασάλτη, άνθρακα και ύαλο.

Στο πεδίο διερεύνησης της διατμητικής συμπεριφοράς των μανδύων IAM έναντι υψηλών θερμοκρασιών, αξιοσημείωτη είναι η συμβολή των Tetta and Bournas (2016), οι οποίοι μελέτησαν συστήματα IAM και ΙΟΠ υπό υψηλές θερμοκρασίες, με παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένου (α) τη μήτρα (ρητίνη ή κονίαμα) και (β) τη θερμοκρασία, (γ) την τεχνική επικόλλησης (side bonding, U-wrapping, full-wrapping), (δ) τον αριθμό στρώσεων μανδύα και (ε) τις ιδιότητες του σύνθετου υλικού (γεωμετρία και υλικό υφάσματος/πλέγματος). Τα πειράματα ομαδοποιήθηκαν σε 2 γενικές κατηγορίες, με την πρώτη να αριθμεί 28 δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε μεσαίας κλίμακας ορθογωνικές δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος, 16 εξ αυτών σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών (100°C , 150°C , 250°C) και 12 υπό φυσιολογική θερμοκρασία (20°C). Το υλικό επικολλήθηκε σε κρίσιμο διατμητικό άνοιγμα για να ενισχυθεί το στοιχείο έναντι διάτμησης. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών, προέκυψε ότι τα συστήματα IAM συμπεριφέρθηκαν εξαιρετικά έναντι υψηλών θερμοκρασιών σε αντίθεση με τα συστήματα ΙΟΠ, των οποίων η συνεισφορά στην ανάληψη τέμνουσας μειώθηκε κατά 60% και 88% όταν η θερμοκρασία αυξήθηκε από 20°C σε 100°C και 150°C αντίστοιχα. Επίσης παρατηρήθηκε ότι στα συστήματα IAM η μορφή αστοχίας αλλάζει με τη μεταβολή των στρώσεων του πλέγματος από 2 σε 3, ενώ τα στοιχεία με μανδύες ΙΟΠ δεν επηρεάζονται από την εν λόγω μεταβολή. Ακόμη, προέκυψε ότι η ενίσχυση με πλέγματα άνθρακα που εμφάνιζαν πιο πυκνή γεωμετρία, αποδείχθηκε αποτελεσματικότερη. Τέλος, όπως αναμενόταν, σημειώθηκε αύξηση της συνεισφοράς και των δύο συστημάτων στη διατμητική ικανότητα του στοιχείου όταν άλλαξε η τεχνική επικόλλησης του υλικού από απλώς επικολλώμενο πλευρικά (side-bonding) σε τρίπλευρους μανδύες ανοιχτού τύπου (U-wrapping), με πιο αποτελεσματικοί όλων να αποδεικνύονται οι κλειστοί μανδύες (fully-wrapping). Η δεύτερη σειρά πειραμάτων αποσκοπούσε στη διερεύνηση της επιρροής των αγκυρίων στη διατμητική αντοχή του συστήματος. Γι' αυτό τον λόγο, διεξήχθησαν 5 δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε κανονικής κλίμακας δοκούς

γεωμετρίας T ένες με τρίπλευρους μανδύες TRM, τόσο υπό υψηλή (150°C) όσο και υπό θερμοκρασία περιβάλλοντος (20°C). Προέκυψε ότι όλα τα στοιχεία παρέμειναν αποτελεσματικά υπό υψηλές θερμοκρασίες, και αξίζει να σημειωθεί ότι, τα στοιχεία που ενισχύθηκαν χωρίς αγκύρια εμφάνισαν πτώση της συνεισφοράς του μανδύα κατά 30.5% λόγω υψηλής θερμοκρασίας, ενώ η χρήση των αγκυρίων αύξησε την αποτελεσματικότητα του μανδύα IAM κατά 80%.

Παρόμοια αποτελέσματα προέκυψαν και από τις υπόλοιπες ερευνητικές εργασίες που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς των IAM έναντι τέμνουσας υπό θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αναλυτικότερα, οι Bruckner et al. (2006) διεξήγαγαν δοκιμές μονοτονικής φόρτισης σε στοιχεία πλακοδοκών, ορθογωνικής και T διατομής, με τρίπλευρους μανδύες IAM υάλου υπό την παρουσία και μη μηχανικής αγκύρωσης χαλύβδινων κοχλιών. Εκ των αποτελεσμάτων προέκυψε βελτίωση στην αποδοτικότητα του συστήματος ενίσχυσης στις ορθογωνικές δοκούς κατά ποσοστό περίπου ίσο με 75% και στις δοκούς διατομής T 33% αντίστοιχα. Ακολούθως, οι Tzoura and Triantafyllou (2014), οι οποίοι μέσω 13 δοκιμών κυκλικής φόρτισης μελέτησαν την επιρροή της αγκύρωσης σε τρίπλευρους μανδύες IAM επί πλακοδοκών με στατική λειτουργία προβόλου, οδηγήθηκαν επίσης στο συμπέρασμα ότι η αγκύρωση του μανδύα IAM μπορεί να αυξήσει σημαντικά την αποδοτικότητα του. Τέλος, μέσω σύγκρισης συστημάτων ενίσχυσης ΙΟΠ και IAM, παρατήρησαν ότι με την ύπαρξη αγκύρωσης οι μανδύες IAM εμφανίζουν περίπου την ίδια αποδοτικότητα με της μανδύες ΙΟΠ, ενώ στην περίπτωση απουσίας αγκύρωσης το σύστημα ενίσχυσης με χρήση IAM παρουσιάζει σημαντική μείωση αποτελεσματικότητας σε σύγκριση με το ανάλογο σύστημα με ΙΟΠ (πτώση κατά 50%). Στο Σχήμα 2.4, παρουσιάζονται τυπικές μορφές αστοχίες που παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια των δοκιμών.



(α)



(β)



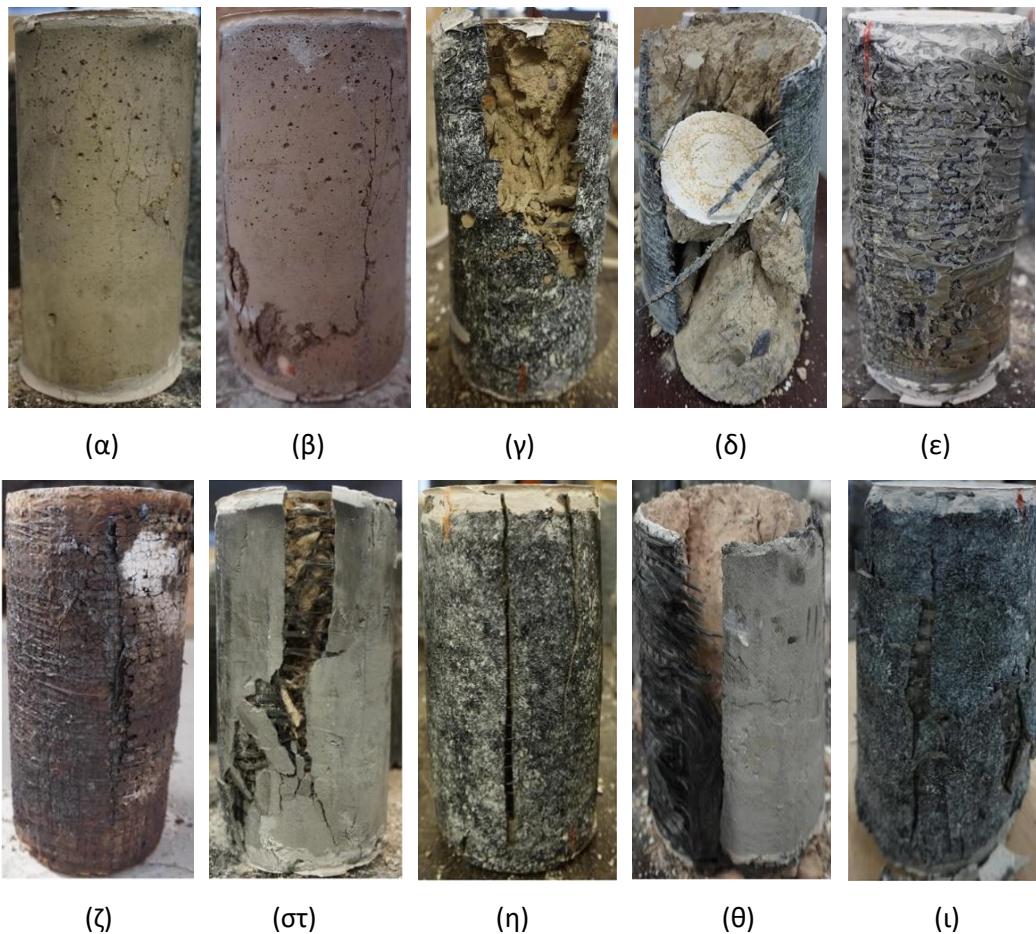
(γ)

Σχήμα 2.4 Εικόνες αστοχίας (α) δοκιμίου αναφοράς, (β) δοκιμίου με IAM-2 στρώσεις πλέγματος, (γ) δοκιμίου με ΙΟΠ-2 στρώσεις πλέγματος (Tzoura and Triantafillou, 2014)

Στη συνέχεια παρατίθενται εν συντομία αποτελέσματα εργασιών που αφορούν την περίσφιξη υποστρωμάτων με μανδύες IAM. Αρχικά οι Triantafillou et al. (2006) διερεύνησαν πειραματικά την εφαρμογή των IAM σε κυλινδρικά και ορθογωνικά υποστρώματα ΟΣ ως τρόπο αύξησης της αξονικής ικανότητας του σκυροδέματος μέσω περίσφιξης. Συγκεκριμένα πραγματοποίησαν 44 θλιπτικές δοκιμές μονοτονικής φύσεως με παραμέτρους: (α) το υλικό της μήτρας (ανόργανη έναντι ρητίνης), (β) την αντοχή της ανόργανης μήτρας (2 διαφορετικά μίγματα), (γ) τον αριθμό των στρώσεων του υφάσματος (2 ή 4 στρώσεις άνθρακα) και (δ) την ύπαρξη αγκύρωσης. Αντίστοιχα και οι Bournas et al. (2007) διεξήγαγαν 15 δοκιμές ομόκεντρης θλίψης σε μικρής κλίμακας ορθογωνικά υποστρώματα με τις κύριες παραμέτρους του πειράματος να παραμένουν ίδιοι με αυτούς των Triantafillou et al. (2006), οι οποίοι αναπτύχθηκαν προηγουμένως. Τα αποτελέσματα των δύο αυτών ερευνητικών εργασιών υποδεικνύουν ότι οι μανδύες IAM, αν και παρουσιάζουν μειωμένη αντοχή συγκριτικά με τους μανδύες ΙΟΠ, συνιστούν μία ικανοποιητική εναλλακτική λύση ενίσχυσης καθώς οδηγούν σε σημαντική αύξηση της θλιπτικής αντοχής και παραμορφωσιμότητας του στοιχείου, έως δύο και περίπου έως τέσσερις φορές αντίστοιχα. Στα πρίσματα κυλινδρικής διατομής με IAM παρατηρείται πτώση αντοχής περίπου 80% σε όρους θλιπτικής αντοχής και κατά 50% σε όρους παραμόρφωσης αστοχίας έναντι των δοκιμών με ΙΟΠ, ενώ στα ορθογωνικά υποστρώματα συμπεριφέρεται καλύτερα ο μανδύας IAM, καθώς υστερεί έναντι του μανδύα ΙΟΠ κατά ποσοστό περίπου 10%. Συμπεραίνεται επίσης ότι, με την αύξηση του ογκομετρικού ποσοστού του μανδύα (αύξηση των στρώσεων του υφάσματος) παρατηρείται αποδοτικότερη συμπεριφορά του IAM όσον αφορά τη βελτίωση της θλιπτικής ικανότητας του υποστρώματος καθώς και την καθυστέρηση του λυγισμού του διαμήκους σπλισμού, με μη αναλογικό ρυθμό. Τέλος, προκύπτει ότι η αστοχία του μανδύα IAM είναι λιγότερο εκρηκτική από αυτή του μανδύα ΙΟΠ, γεγονός που αποδίδεται από τους συγγραφείς στη μεγαλύτερη κατανομή της βλάβης μέσω της πολλαπλής ρηγμάτωσης του κονιάματος.

Η συμπεριφορά και η αποτελεσματικότητα της περίσφιξης υποστρωμάτων με IAM έναντι υψηλών θερμοκρασιών μελετήθηκε από τους Cerniauskas et al. (2020). Συγκεκριμένα

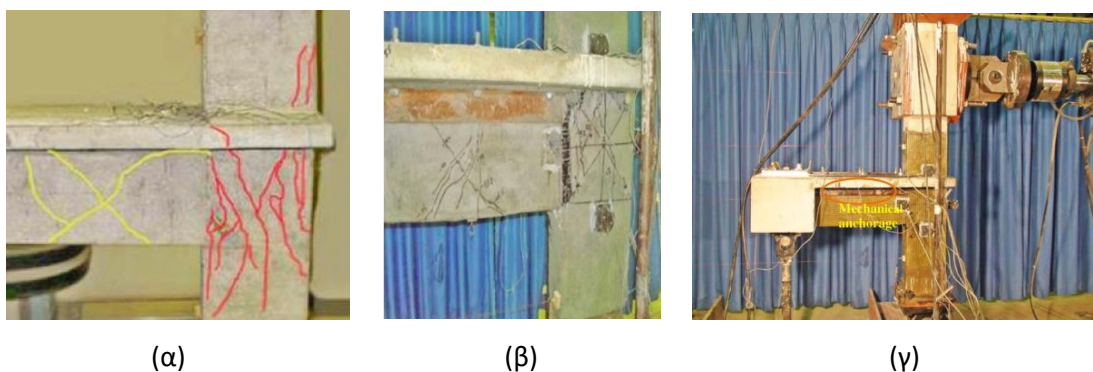
24 κυλινδρικά δοκίμια ΟΣ ενισχύθηκαν εξωτερικά με διάφορες στρώσεις ΙΑΜ ή ΙΟΠ, εκτέθηκαν σε θερμοκρασίες μεταξύ 20°C-400°C και οδηγήθηκαν στην αστοχία μέσω ομόκεντρης θλίψης υπό σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας. Τα αποτελέσματα των δοκιμών υπέδειξαν ότι η αποδοτικότητα των συστημάτων ΙΟΠ μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της θερμοκρασίας σε αντίθεση με το σύστημα ενίσχυσης ΙΑΜ το οποίο βρέθηκε έως και 1.5 φορές πιο αποτελεσματικό από αυτό του ΙΟΠ, σε όρους αύξησης της αντοχής των κυλίνδρων. Διάφορες μορφές αστοχίας που παρατηρήθηκαν στα πειράματα των Cerniauskas et al. (2020) απεικονίζονται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5 Μορφές αστοχίας δοκιμών (α) δοκίμιο αναφοράς-20°C, (β) δοκίμιο αναφοράς- 400°C, (γ) 1 στρώση ΙΟΠ-20°C, (δ) 3 στρώσεις ΙΟΠ-20°C, (ε) 3 στρώσεις ΙΟΠ-400°C, (ζ) 1 στρώση ΙΑΜ-20°C, (στ) 3 στρώσεις ΙΟΠ-400°C, (η) 1 στρώση ΙΑΜ-400°C, (θ) 3 στρώσεις ΙΑΜ-400°C, (ι) 3 στρώσεις ΙΑΜ-400°C (Cerniauskas et al. 2020)

Όσον αφορά την ενίσχυση κόμβων δοκού-υποστυλώματος έχει μελετηθεί πειραματικά μόνο από τους Al- Salloum et al. (2011). Αναλυτικότερα διεξήχθησαν πέντε δοκιμές κυκλικής φόρτισης σε δύο δοκίμια με ΙΟΠ (άνθρακα-CFRP και υάλου-GFRP

αντίστοιχα), σε ένα δοκίμιο με τρίπλευρους μανδύες IAM (ίνες άνθρακα σε συνδυασμό με εμπορικά διαθέσιμη τσιμεντοειδή μήτρα, τροποποιημένη με προσθήκη πολυμερούς) και τέλος σε δύο δοκίμια αναφοράς. Η πειραματική διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών, προέκυψε ότι οι μανδύες IAM βελτίωσαν την ικανότητα παραμόρφωσης κατά 50% ενώ αύξησαν την αντοχή του συστήματος μόνο κατά 15%, ποσοστό χαμηλό σε σύγκριση με την αντίστοιχη βελτίωση των μανδύων ΙΟΠ που ήταν αυξημένη (50%). Με την περιορισμένη έκταση πειραματικών δεδομένων, οι συγγραφείς σημειώνουν ότι η χρήση ικανοποιητικού αριθμού στρώσεων μανδύων IAM, μπορεί να επιφέρει αποτελεσματική βελτίωση, τόσο της διατμητικής αντοχής όσο και της παραμορφωσιμότητας του συστήματος κόμβου δοκού-υποστυλώματος, εφάμιλλη της που παρουσιάζουν τα αναβαθμισμένα με μανδύες ΙΟΠ συστήματα. Ακολουθούν οι χαρακτηριστικές εικόνες αστοχίας ενισχυμένου και συμβατικού στοιχείου (Σχήμα 2.6).

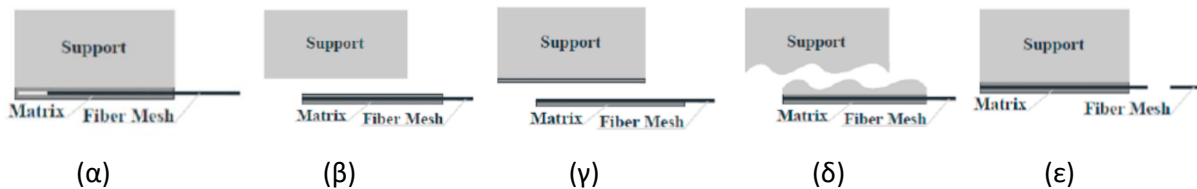


Σχήμα 2.6 (α) Αστοχία δοκίμιου αναφοράς, (β) Αστοχία δοκίμιου με IAM, (γ) Πειραματική διάταξη πειράματος (Al- Salloum et al. 2011)

2.1.3 Συνάφεια IAM-σκυροδέματος

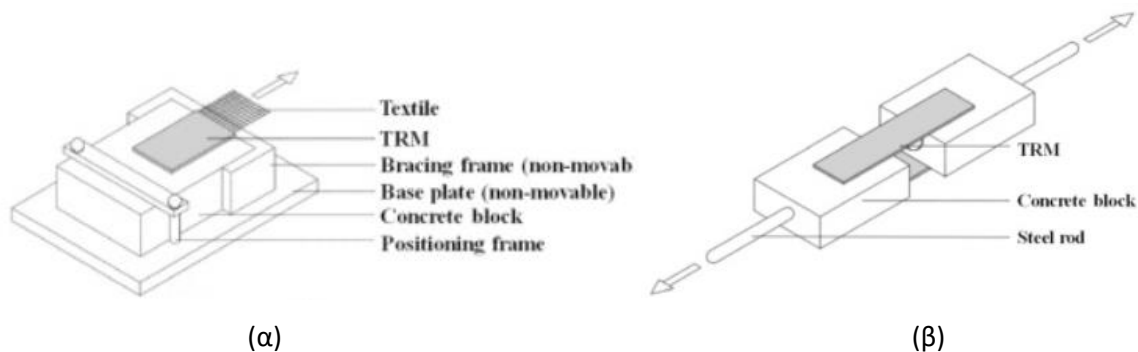
Κατόπιν της σύντομης ανασκόπησης του ερευνητικού έργου στο γενικότερο πεδίο της εφαρμογής των IAM στις ενισχύσεις κατασκευών, παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που αφορά το ειδικότερο ζήτημα της συνάφειας μεταξύ του σκυροδέματος και του σύνθετου υλικού. Υπογραμμίζεται η σπουδαιότητα της μελέτης και κατανόησης της μηχανικής συμπεριφοράς της διεπιφάνειας IAM-υποστρώματος στον καθορισμό της αποτελεσματικότητας του IAM συνολικά ως υλικό ενίσχυσης. Κρίνεται απαραίτητο σε αυτό το σημείο, να κατηγοριοποιηθούν οι μορφές αστοχίας που μπορούν να εμφανιστούν σε ένα σύστημα ενίσχυσης IAM ως εξής: (α) Μορφή I (ολίσθηση ινών εντός της μήτρας), (β) Μορφή II

(αποκόλληση στη διεπιφάνεια σκυροδέματος-μήτρας), (γ) Μορφή III (αποκόλληση στη διεπιφάνεια μήτρας-πλέγματος), (δ) Μορφή IV (αποκόλληση στην επιφάνεια σκυροδέματος-εκτίναξη της επικάλυψης) και (ε) Μορφή V (θραύση ινών). Εποπτική απεικόνιση των μορφών αστοχίας παρατίθεται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7 Μορφές αστοχίας (α) Μορφή I, (β) Μορφή II, (γ) Μορφή III, (δ) Μορφή IV, (ε) Μορφή V (Elsanadedy et al. 2019)

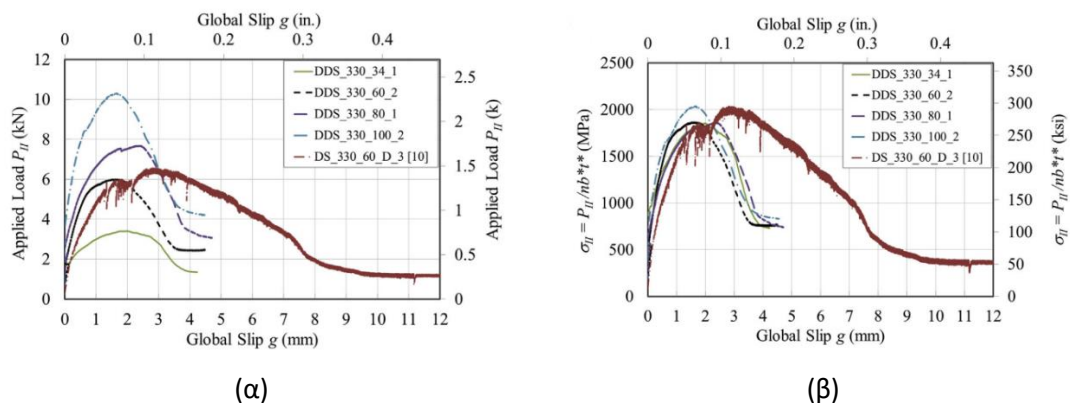
Η συνάφεια IAM-σκυροδέματος έχει κυρίως μελετηθεί μέσω δοκιμών απλής ή διπλής διάτμησης. Στις δοκιμές απλής διάτμησης μία λωρίδα IAM επικολλάται εξωτερικά στη μία πλευρά του δοκιμίου ΟΣ και στη συνέχεια ασκείται εφελκυστική δύναμη στο IAM, ενώ το πρίσμα σκυροδέματος παραμένει ακίνητο. Αντίστοιχα στις δοκιμές διπλής διάτμησης, λωρίδες IAM επικολλώνται εξωτερικά σε δύο δοκίμια ΟΣ, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μόνο μέσω των λωρίδων αυτών (και από τις δύο πλευρές), και στη συνέχεια τα δοκίμια υποβάλλονται σε εφελκυσμό έως ότου επέλθει αστοχία του σύνθετου υλικού. Οι διαφορετικές αυτές πειραματικές διατάξεις, αναπαρίστανται στο Σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8 Πειραματικές διατάξεις (α) Single-lap test, (β) Double-lap test (Elsanadedy et al. 2019)

Στο πλαίσιο μελέτης των δύο αυτών πειραματικών διατάξεων, οι Sneed et al. (2015), υπέβαλαν 16 δοκίμια ΟΣ με IAM από PBO, με διάφορα μήκη και πλάτη επικόλλησης, σε δοκιμές διπλής διάτμησης και συνέκριναν τα αποτελέσματα των πειραμάτων με προηγούμενη μελέτη τους, κατά την οποία ίδιας γεωμετρίας στοιχεία υποβλήθηκαν σε

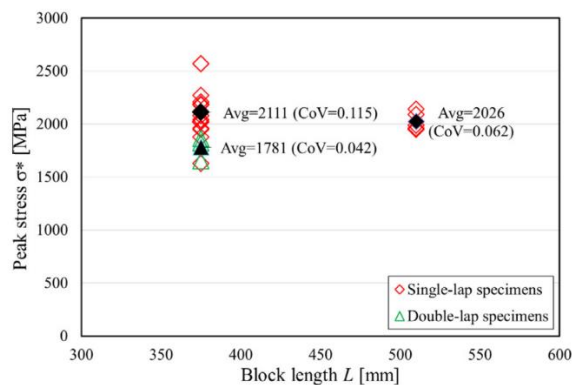
δοκιμές απλής διάτμησης. Προέκυψε ότι, οι καμπύλες φορτίου-μετακίνησης είναι παρόμοιες και στις δύο περιπτώσεις, μέχρι και το σημείο του μέγιστου φορτίου. Συγκεκριμένα, αν κατά τη δοκιμή διπλής διάτμησης η αποκόλληση του σύνθετου υλικού πραγματοποιηθεί ταυτόχρονα και στις δύο λωρίδες, η συμπεριφορά του συστήματος είναι παρόμοια με αυτή της απλής διάτμησης. Αντίθετα, αν παρατηρηθεί αποκόλληση αρχικά σε μία εκ των δύο λωρίδων, η τιμή του φορτίου που θα καταγραφεί στο τέλος της δοκιμής είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή που καταγράφεται στο πείραμα απλής διάτμησης. Επίσης παρατηρήθηκε ότι, η μέγιστη τάση που εμφάνισαν τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε διπλή διάτμηση ήταν ελαφρώς μικρότερη από την αντίστοιχη τάση που εκδηλώθηκε κατά την απλή διάτμηση. Τέλος, οι συγγραφείς αναφέρουν ότι στην περίπτωση της απλής διάτμησης παρατηρήθηκε λιγότερη διασπορά στο τελικό φορτίο. Στο Σχήμα 2.9, παρατίθενται τα χαρακτηριστικά διαγράμματα δύναμης-μετακίνησης και τάσης-μετακίνησης για δοκίμια με μήκος επικόλλησης 330mm, που δοκιμάστηκαν τόσο υπό διπλή διάτμηση όσο και υπό απλή διάτμηση (δοκίμιο DS_330_60_D_3).



Σχήμα 2.9 (α) Καμπύλες δύναμης-ολίσθησης, (β) Καμπύλες τάσης-ολίσθησης (Sneed et al. 2015)

Είναι γεγονός ότι, ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα της απλής διάτμησης είναι η απλότητα της, καθώς κατά τη διάρκεια της δοκιμής η δύναμη ασκείται απ' ευθείας στο σύνθετο υλικό. Με αυτόν τον τρόπο, η δύναμη που δημιουργείται στο IAM μπορεί να προκύψει ως πειραματικό αποτέλεσμα, χωρίς την ανάγκη διενέργειας επιπλέον υπολογισμών. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι η πειραματική διάταξη πρέπει να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε το εφελκυστικό φορτίο να εφαρμόζεται ομοιόμορφα στο IAM, για να ελαχιστοποιείται στο ελάχιστο η εκκεντρότητα του φορτίου ως της τη στήριξη. Όμως, η εν λόγω εκκεντρότητα δε μπορεί να εξαλειφθεί εντελώς. Για αυτό τον λόγο, οι D'Antino et al.

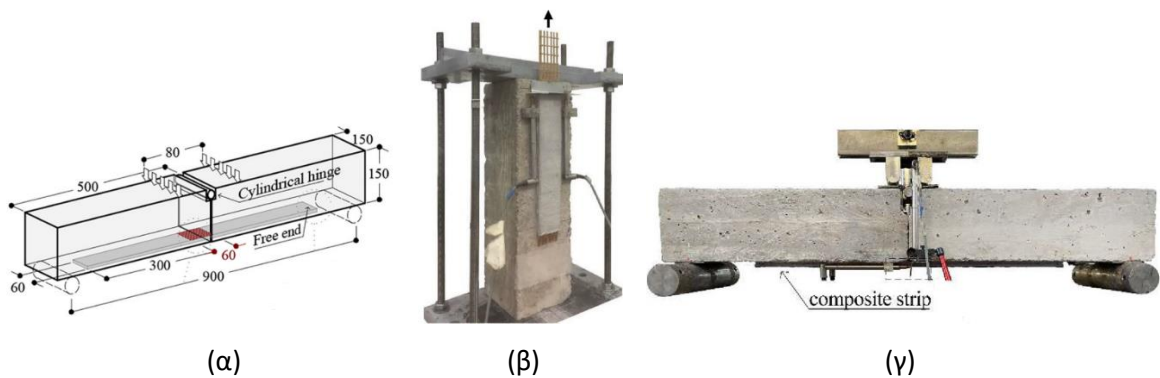
(2016) διεξήγαγαν μία μελέτη, όπου μέσω 20 δοκιμών απλής διάτμησης (single-lap tests) σε με ΙΑΜ ΡΒΟ στοιχεία ΟΣ, προσπάθησαν να μελετήσουν την επιρροή της έμφυτης αυτής εκκεντρότητας, στη συνάφεια ΙΑΜ-υποστρώματος. Συγκεκριμένα, χρησιμοποίησαν πρίσματα σκυροδέματος διαφορετικού συνολικού μήκους ($L_1=375$ mm και $L_2=510$ mm) και συνέκριναν τα αποτελέσματα που προέκυψαν, με αντίστοιχα αποτελέσματα δοκιμών διπλής διάτμησης (double-lap tests), που είχαν πραγματοποιήσει στο παρελθόν σε πανομοιότυπα δοκίμια ΟΣ. Τελικά, προέκυψε ότι η εκκεντρότητα δεν επηρέασε σημαντικά την απόκριση φορτίου στις δοκιμές απλής διάτμησης σε κανένα από τα δύο μήκη δοκιμών. Όσον αφορά τη μέγιστη τάση που αναπτύχθηκε στις δοκιμές απλής διάτμησης, συμπεραίνεται ότι: (α) είναι παρόμοια στις δοκιμές με τα διαφορετικά μήκη δοκιμών, με διαφορά κατά μέσο όρο μόνο 4%, και (β) συγκριτικά με την αντίστοιχη τάση που δημιουργήθηκε στα πειράματα διπλής διάτμησης, είναι αυξημένη κατά 16% στα δοκίμια μήκους $L_1=375$ mm και 12% στα δοκίμια μήκους $L_2=510$ mm, όπως υποδεικνύει και το γράφημα του Σχήματος 2.10.



Σχήμα 2.10 Μέγιστη τάση δοκιμών απλής διάτμησης και διπλής διάτμησης (D'Antino et al. 2016)

Μία εναλλακτική πειραματική διάταξη μελέτησαν οι Calabrese et al. (2021). Αναλυτικότερα, πραγματοποίησαν 6 δοκιμές έμμεσης διάτμησης (Modified Beam tests) σε στοιχεία ΟΣ με ΙΑΜ ΡΒΟ, σε συνδυασμό με 8 δοκιμές άμεσης διάτμησης (single-lap tests), για να συγκρίνουν την επιρροή της κάθε διάταξης στη συνάφεια του σύνθετου υλικού. Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται στα πειράματα έμμεσης διάτμησης αποτελούνται από δύο πρίσματα ΟΣ τα οποία συνδέονται μεταξύ τους στο άνω μέρος με κυλινδρική άρθρωση και στο κάτω μέρος με λωρίδα ΙΑΜ, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.11, και υποβάλλονται σε κάμψη τεσσάρων σημείων. Σημειώνεται ότι εξετάστηκαν δύο διαφορετικές διατάξεις

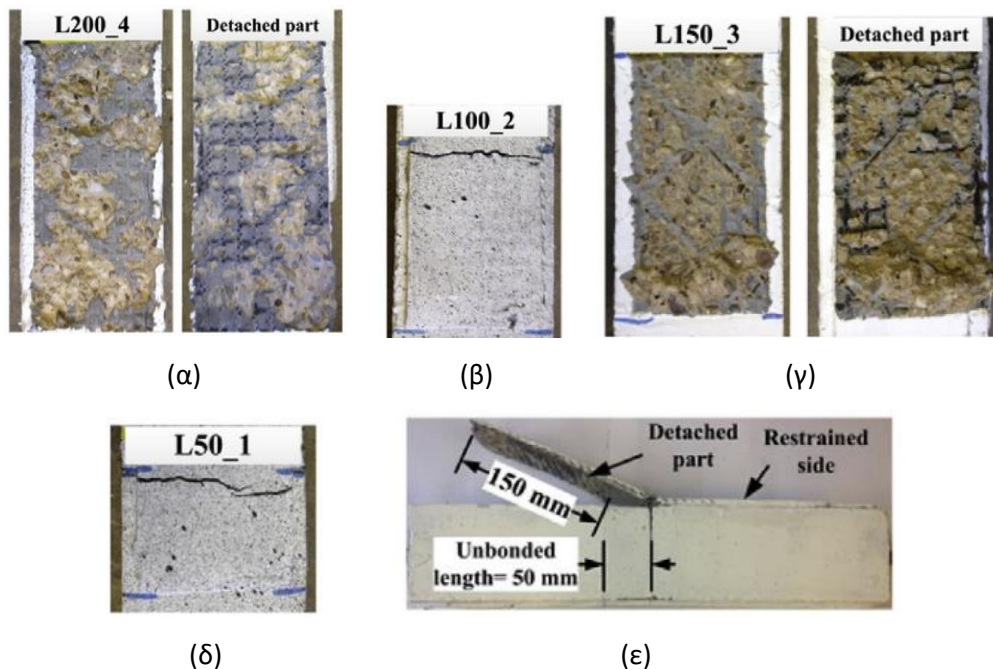
λωρίδων, οι οποίες διέφεραν στην παρουσία, ή όχι, μήτρας στο μεσαίο άνοιγμα του δοκιμίου. Σε γενικές γραμμές, οι αποκρίσεις φορτίου ήταν παρόμοιες. Ωστόσο, παρατηρήθηκε ότι οι δοκιμές έμμεσης διάτμησης παρουσίασαν αυξημένη αντοχή συνάφειας, σε σχέση με αυτές της άμεσης διάτμησης, κατά 24.8% και κατά 5.9%, στις περιπτώσεις ύπαρξης μήτρας στο κεντρικό άνοιγμα των δοκιμίων και στην παρουσία μόνο ινών αντίστοιχα. Η αύξηση αυτή αποδίδεται στην ανάπτυξη τάσης σ κάθετα στη διεπιφάνεια μήτρας-ινών. Η σ αυτή, όπως σημειώνουν οι συγγραφείς, προκαλεί βλάβη στις ίνες του πλέγματος, η οποία γίνεται πιο εμφανής στην περίπτωση απουσίας μήτρας στο κεντρικό άνοιγμα του δοκιμίου, καθώς με τη συγκεκριμένη διάταξη η μέγιστη τάση ινών είναι μειωμένη κατά 15.1%. Τέλος, σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα η διασπορά των αποτελεσμάτων παραμένει περιορισμένη τόσο στις δοκιμές απλής διάτμησης, όσο και στις δοκιμές MB.



Σχήμα 2.11 (α) Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης MB test, (β) Πειραματική διάταξη απλής διάτμησης, (γ) Πειραματική διάταξη MB test (Calabrese et al. 2021)

Στα πλαίσια της μελέτης της συνάφειας, εκτενή πειραματική έρευνα διεξήγαγαν οι Raoof et al. (2016) και οι Younis and Ebead (2018), οι οποίοι διενήργησαν συνολικά 98 δοκιμές άμεσης διάτμησης (double-lab tests) σε ορθογωνικά πρίσματα με παραμέτρους: (α) το μήκος επικόλλησης (από 50 mm έως 450 mm), (β) τον αριθμό στρώσεων του IAM (από 1 έως 4), (γ) το υλικό των ινών (άνθρακα, PBO, ύαλο), (δ) την προετοιμασία της επιφάνειας του υποστρώματος, (ε) την επικάλυψη του πλέγματος, (στ) τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος και (ζ) την αγκύρωση μέσω μανδυών IAM. Τα κυριότερα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τις δοκιμές είναι τα ακόλουθα. Αυξάνοντας το μήκος επικόλλησης αυξάνεται μη αναλογικά η αντοχή συνάφειας, έως το ενεργό μήκος επικόλλησης, από το οποίο και έπειτα οποιαδήποτε περαιτέρω αύξηση δε συνεισφέρει στην αντοχή της συνάφειας. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι

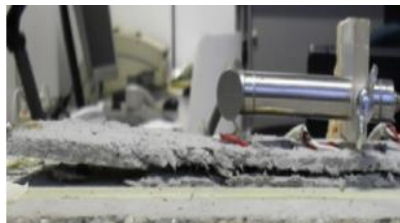
με την αύξηση των στρώματων η αντοχή συνάφειας αυξάνεται με μη αναλογικό τρόπο και ο αριθμός των στρώσεων μεταβάλλει τον τρόπο αστοχίας του IAM, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.12 (1-2 στρώσεις οδηγούν σε μορφή αστοχίας I, ενώ 3-4 στρώσεις σε μορφή αστοχίας IV). Η μορφή αστοχίας επηρεάστηκε και από το υλικό της ενίσχυσης, και συγκεκριμένα εμφανίστηκαν οι μορφές αστοχίας I, II και V στις δοκιμές που γίναν με άνθρακα, με PBO και με ύαλο αντίστοιχα. Τέλος, η μεταβολή της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος αποδείχθηκε ότι δεν επηρεάζει σημαντικά τη συνάφεια IAM-σκυροδέματος σε αντίθεση με την αγκύρωση του συστήματος που οδήγησε σε αύξηση της αντοχής συνάφειας έως και 45%, αποφεύγοντας την πρόωρη αστοχία λόγω αποκόλλησης του σύνθετου υλικού από το στοιχείο ΟΣ.



Σχήμα 2.12 Μορφές αστοχίας δοκιμίων (α), (γ), (ε) Αποκόλληση στη διεπιφάνεια IAM-σκυροδέματος με εκτίναξη της επιφάνειας -Μορφή IV, (β), (δ) Σχηματισμός ρωγμής και ολίσθηση ινών μέσα στο IAM-Μορφή I (Raoof et al. 2016)

Μία ακόμη πολυπαραμετρική μελέτη, πραγματοποίησε ο Ombres (2015) σε 24 δοκίμια ΟΣ με IAM PBO. Ειδικότερα, μεταβάλλοντας (α) το μήκος επικόλλησης, (β) το πλάτος επικόλλησης και (γ) την ποσότητα του συστήματος ενίσχυσης, προσπάθησε να μελετήσει τη συνάφεια μεταξύ IAM-υποστρώματος και να διακρίνει της μορφές αστοχίας των δοκιμίων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η απώλεια συνάφειας εμφανίστηκε στη διεπιφάνεια μήτρας-πλέγματος (Μορφή III), ενώ με την αύξηση των στρώσεων του σύνθετου υλικού, η αστοχία

εμφανίστηκε στη διεπιφάνεια ΙΑΜ-σκυροδέματος (Μορφή II). Χαρακτηριστικές εικόνες αστοχίας φαίνονται στο Σχήμα 2.13. Σημειώνεται ότι, παρατηρήθηκε ολίσθηση ινών εντός της μήτρας πριν επέλθει η αστοχία.



(α)



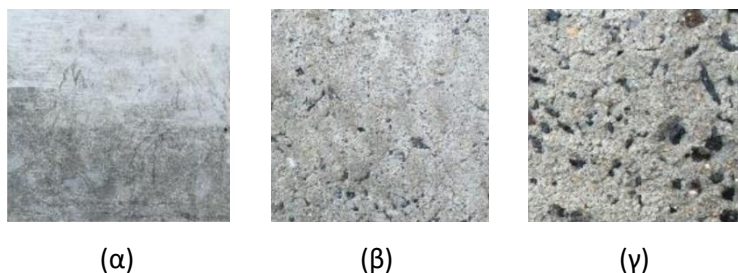
(β)

Σχήμα 2.13 Μορφές αστοχίας δοκιμών (α) Αστοχία στη διεπιφάνεια μήτρας-πλέγματος (β) Αστοχία στη διεπιφάνεια μήτρας-σκυροδέματος (Ombres, 2015)

Την επιρροή της προετοιμασίας της επιφάνειας του σκυροδέματος στην αντοχή συνάφειας μελέτησαν πειραματικά οι D'Antino et al. (2015), μέσω 21 δοκιμών άμεσης διάτμησης (single-lap tests) σε στοιχεία σκυροδέματος με διαφορετικές συνθήκες προετοιμασίας επιφάνειας. Συγκεκριμένα, χρησιμοποίησαν ΙΑΜ αποτελούμενα από ΡΒΟ, με διαφορετικά μήκη και πλάτη επικόλλησης (330 mm/450 mm και 60 mm/80 mm αντίστοιχα) και με παράμετρο την κατάσταση του υποστρώματος, κατασκεύασαν 18 δοκίμια με μη επεξεργασμένη επιφάνεια (απλή απομάκρυνση της σκόνης) και 3 δοκίμια με επεξεργασμένη επιφάνεια (χρήση αμμοβολής) και χαμηλότερη θλιπτική αντοχή σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι η μορφή αστοχίας επηρεάζεται από την προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος. Αναλυτικότερα, σε τέσσερα δοκίμια με μη επεξεργασμένη επιφάνεια παρατηρήθηκε ολική αποκόλληση του σύνθετου υλικού από το υπόστρωμα (Μορφή II), στα υπόλοιπα δεκατέσσερα δοκίμια εμφανίστηκε ολίσθηση στη διεπιφάνεια μήτρας-ινών (Μορφή III), ενώ στην περίπτωση της επεξεργασμένης επιφάνειας σκυροδέματος παρουσιάστηκαν δύο περιπτώσεις αποκόλλησης μέρος του σύνθετου υλικού μεταξύ μήτρας και ινών (Μορφή II) και τέλος μία περίπτωση θραύσης ινών (Μορφή V), εκτός του μήκους επικόλλησης. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των πειραμάτων με δοκίμια παρόμοιας γεωμετρίας που είχαν δοκιμαστεί σε προηγούμενες εργασίες στη βιβλιογραφία, οι συγγραφείς κατέληξαν ότι η αστοχία των μη επεξεργασμένων δοκιμών μπορεί να αποδοθεί στη χαμηλή ποιότητα συνάφειας μεταξύ ΙΑΜ και σκυροδέματος σε συνδυασμό με εμφάνιση ρωγμών συρρίκνωσης στο κονίαμα της μήτρας. Αναφέρουν ότι, αν και η

προετοιμασία της επιφάνειας δεν αποτελεί τόσο καθοριστικό παράγοντα σε σύγκριση με της ρωγμές συρρίκνωσης, συνίσταται η χρήση στοιχείων με επεξεργασμένη επιφάνεια για την αποφυγή πιθανής αποκόλλησης του σύνθετου υλικού από το υπόστρωμα.

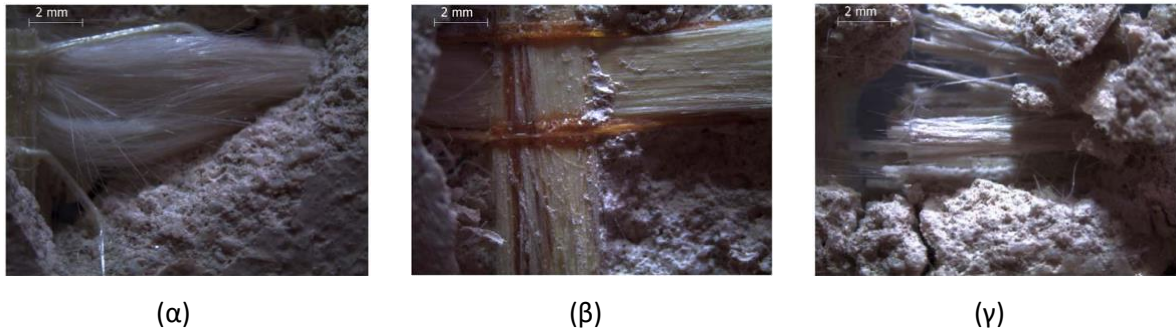
Στη συνέχεια, οι Shrestha et al. (2017) μελέτησαν επίσης την προετοιμασία της επιφάνειας και την επιρροή της στην αντοχή συνάφειας του IAM, μέσω 72 δοκιμών pull-off σε στοιχεία πλακών οπλισμένου σκυροδέματος μεγέθους 500 mm × 500 mm × 100 mm με πλέγμα IAM πάχους 10 mm. Έγινε χρήση δύο διαφορετικών πλεγμάτων (άνθρακα και PBO) και εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές συνθήκες του υποστρώματος πριν την ενίσχυση του, (α) λεία επιφάνεια, (β) χαμηλό επίπεδο τραχύτητας και (γ) υψηλό επίπεδο τραχύτητας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.14. Τα αποτελέσματα υπέδειξαν ότι όσο αυξάνεται το επίπεδο τραχύτητας της επιφάνειας, ο δεσμός του IAM με το σκυρόδεμα γίνεται πιο ισχυρός. Συγκεκριμένα με τη μετάβαση από τη λεία επιφάνεια στην τραχιά (υψηλό επίπεδο), βελτιώθηκε η αντοχή του δοκιμίου από 0.7 MPa σε 1.24 MPa στην περίπτωση χρήσης IAM άνθρακα, και από 1 MPa σε 1.4 MPa στην περίπτωση χρήσης IAM-PBO. Σε παρόμοια αποτελέσματα κατέληξαν και οι Ebead and Younis (2019), οι οποίοι διεξήγαγαν δοκιμές pull-off σε ίδιας γεωμετρίας πλάκες ΟΣ. Οι συγγραφείς συμπέραναν ότι: (α) η μορφή αστοχίας επηρεάστηκε από την προετοιμασία της επιφάνειας και (β) η μέγιστη δύναμη αυξήθηκε κατά 74% στην περίπτωση που το δοκίμιο είχε υποστεί επεξεργασία επιφάνειας, και συγκεκριμένα παρουσίαζε υψηλό επίπεδο τραχύτητας.



Σχήμα 2.14 Κατάσταση επιφάνειας σκυροδέματος (α) λεία επιφάνεια, (β) χαμηλό επίπεδο τραχύτητας (γ) υψηλό επίπεδο τραχύτητας (Shrestha et al. 2017)

Ακολούθως, μία παράμετρος που απασχόλησε ερευνητικά τους Signorini et al. (2018) είναι η επικάλυψη των ινών του πλέγματος. Μέσω δοκιμών κάμψης τριών σημείων σε μικρής κλίμακας δοκούς ένες με IAM, με πλέγματα (α) χωρίς επικάλυψη ή (β) με επικάλυψη ρητίνης ή πυριτίου, προέκυψε ότι η επικάλυψη στις ίνες του πλέγματος προσδίδει αξιοσημείωτα

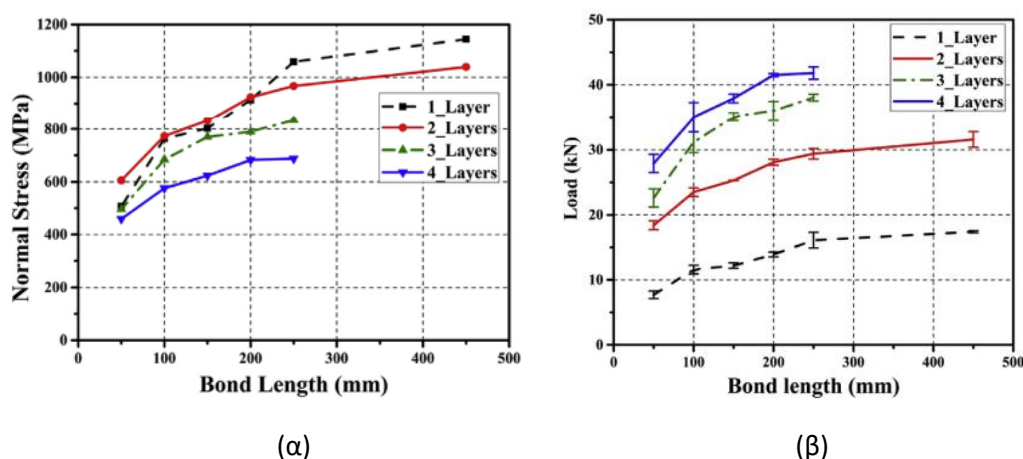
οφέλη στη μηχανική συμπεριφορά του σύνθετου υλικού. Στο Σχήμα 2.15 παρουσιάζεται η εικόνα των ινών, μετά την αστοχία του IAM. Επίσης, οι Raoof et al. (2016) συμπέραναν ότι η επικάλυψη των ινών του πλέγματος με ρητίνη έχει διπλή επιρροή στα αποτελέσματα, καθώς: (α) μεταβάλλει τον τρόπο αστοχίας των δοκιμίων από ολίσθηση ινών εντός της μήτρας (Μορφή I) σε αποκόλληση στη διεπιφάνεια υφάσματος-μήτρας (Μορφή III) και (β) αυξάνει σημαντικά την αντοχή συνάφειας.



Σχήμα 2.15 Κατάσταση ινών μετά από την αστοχία του IAM (α) ίνες χωρίς επικάλυψη, (β) ίνες με επικάλυψη πυριτίου (γ) ίνες με επικάλυψη ρητίνης (Signorini et al. 2018)

Ακόμη μία παράμετρος που μελετήθηκε από ερευνητές ως προς την επιρροή της στη συνάφεια IAM-σκυροδέματος είναι ο ρυθμός φόρτισης. Ειδικότερα οι Carloni et al. (2017), διεξήγαγαν μία πειραματική μελέτη με 73 δοκιμές άμεσης διάτμησης (single-lap tests) σε ορθογωνικά πρίσματα ΟΣ, για να εξετάσουν την επιρροή του ρυθμού φόρτισης (από 0.00042 mm/s έως 0.01260 mm/s) στην απόκριση του δεσμού IAM-σκυροδέματος. Η αστοχία που παρατηρήθηκε σε όλα τα δοκίμια ήταν αποκόλληση στη διεπιφάνεια μήτρας-πλέγματος με σημαντική ολίσθηση των ινών στο ελεύθερο άκρο του σύνθετου υλικού. Κατόπιν συγκρίσεως των αποτελεσμάτων της συγκεκριμένης εργασίας με προηγούμενη πειραματική έρευνα που διεξήγαγαν οι συγγραφείς, προκύπτει ότι ο ρυθμός φόρτισης επηρεάζει το μέγιστο φορτίο που παρουσιάζεται κατά τις δοκιμές, χωρίς να μπορεί να προσδιοριστεί συγκεκριμένη σχέση μεταξύ των δύο αυτών παραμέτρων. Συγκεκριμένα, το μέγιστο φορτίο αυξάνεται όταν αυξάνεται ο ρυθμός φόρτισης από 0.5 V σε 3 V, με το μέγιστο φορτίο όλων των πειραμάτων κατά μέσο όρο να επιτυγχάνεται με ρυθμούς φόρτισης από 3 V έως 5V (1V= 0.00084 mm/s). Αντίθετα, όταν ο ρυθμός φόρτισης ανέλθει πάνω από 5 V παρατηρείται πτώση του μέγιστου φορτίου.

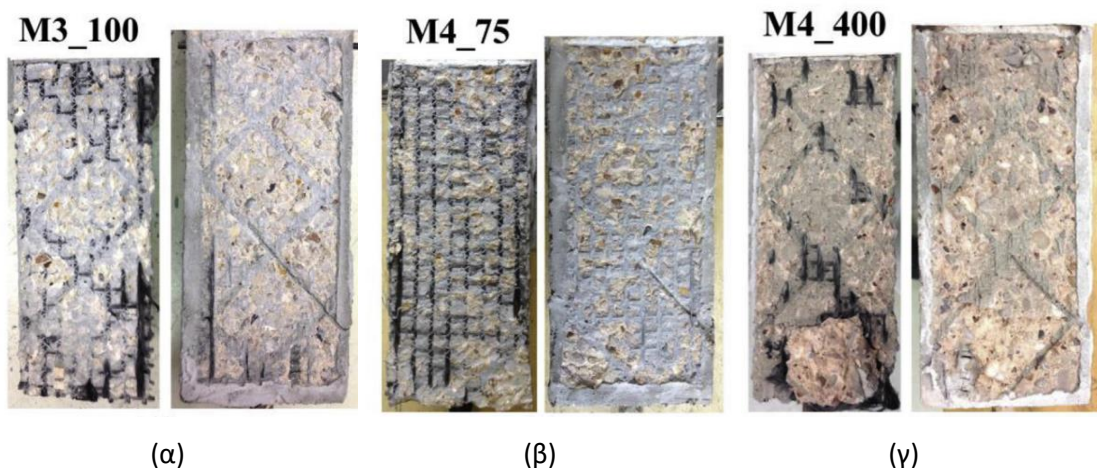
Αξίζει να σημειωθεί ότι, στις περισσότερες μελέτες συνάφειας IAM-σκυροδέματος που αναφέρθηκαν στην παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση, το μήκος επικόλλησης έχει εξετασθεί ως παράμετρος και προέκυψε ότι είναι ένας από τους καθοριστικούς παράγοντες που επηρεάζει σημαντικά την απόκριση του συστήματος. Συγκεκριμένα, με την αύξηση του μήκους επικόλλησης παρατηρήθηκε μη γραμμική αύξηση της αντοχής συνάφειας και του μέγιστου φορτίου. Η μεταβολή αυτή αποτυπώνεται στην εργασία των Raouf et al. (2016), μέσω των καμπύλων του Σχήματος 2.16. Αντιθέτως, σχετικές εργασίες έδειξαν ότι το πλάτος της επικόλλησης δεν επηρεάζει την αντοχή συνάφειας. Ειδικότερα, σύμφωνα με τους Sneed et al. (2014) και D'Antino et al. (2014), στα συστήματα IAM-σκυροδέματος δεν παρατηρείται καθολική επιρροή του πλάτους της επικόλλησης στη μέγιστη τάση, γεγονός που αποδίδεται από τους συγγραφείς στην ανεξάρτητη δράση των διαμηκών δεσμίδων ινών. Ωστόσο, παρατηρείται μικρή επίδραση του πλάτους επικόλλησης στην περίπτωση της ενιαίας δέσμης ινών, λόγω διαφορετικού εμποτισμού των ινών στη μήτρα.



Σχήμα 2.16 (α) Καμπύλες μεταβολής τάσης-μήκους επικόλλησης, (β) Καμπύλες μεταβολής φορτίου-μήκους επικόλλησης (Raouf et al. 2016)

Με τη μελέτη της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας IAM-σκυροδέματος υπό υψηλές θερμοκρασίες ασχολήθηκαν πειραματικά οι Raouf and Bougnas (2017). Αναλυτικότερα διεξήγαγαν 68 δοκιμές άμεσης διάτμησης (double-lap tests) με παραμέτρους: (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) και (δ) τις συνθήκες φόρτισης (σταθερές και μεταβαλλόμενες). Τα αποτελέσματα απέδειξαν ότι τα IAM συμπεριφέρονται εξαιρετικά έναντι υψηλών θερμοκρασιών, αφού σε θερμοκρασία 400°C διατήρησαν το 85% της αντοχής

συνάφειας που παρουσίασαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, σε αντίθεση με τα ΙΟΠ τα οποία έχασαν περίπου το 83% της αντίστοιχης της αντοχής σε θερμοκρασία μόλις 150°C. Σχετικά με την αστοχία των δοκιμίων, στα ΙΟΠ παρατηρήθηκαν δύο διαφορετικές μορφές αστοχίας, σε θερμοκρασία 50°C αποκόλληση στην επιφάνεια σκυροδέματος με μέρος της επικάλυψης να παραμένει στο σύνθετο υλικό και σε υψηλότερες θερμοκρασίες (75°C, 100°C και 150°C) αποκόλληση στη διεπιφάνεια υποστρώματος-ρητίνης, ενώ τα ΙΑΜ (για θερμοκρασίες έως και 500°C) αστόχησαν λόγω αποκόλλησης στη διεπιφάνεια σκυροδέματος-ΙΑΜ με εκτίναξη της επικάλυψης (Μορφή ΙV), της φαίνεται και στο Σχήμα 2.17. Διαπιστώθηκε επίσης ότι, η αντοχή συνάφειας των ΙΑΜ εξαρτάται από τις συνθήκες φόρτισης και συγκεκριμένα είναι αισθητά αυξημένη στην περίπτωση του σταθερού ρυθμού φόρτισης εν αντιθέσει με τα ΙΟΠ τα οποία επέδειξαν παρόμοια συμπεριφορά και στις δύο διαφορετικές συνθήκες φόρτισης. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η επιρροή του αριθμού των στρώσεων στην αντοχή συνάφειας δεν ήταν εντελώς ξεκάθαρη, με τα δοκίμια που είχαν ενισχυθεί με 4 στρώσεις πλέγματος να εμφανίζουν υψηλότερη ικανότητα όσον αφορά τη συνάφεια τους στις εξεταζόμενες θερμοκρασίες. Η επιρροή της θερμοκρασίας στη συνάφεια του συστήματος ΙΑΜ-σκυροδέματος μελετάται επίσης από τον Ombres (2015), ο οποίος παρατήρησε σημαντική αλλαγή σε θερμοκρασίες άνω από 50°C. Ειδικότερα, υπό θερμοκρασία 100°C το σύστημα εμφάνισε αισθητή μείωση του φορτίου αστοχίας, με χαρακτηριστικό ποσοστό 36% για τα δοκίμια με 1 στρώση πλέγματος ινών PBO.



Σχήμα 2.17 Αστοχίες λόγω αποκόλλησης στη διεπιφάνεια σκυροδέματος-ΙΑΜ, με εκτίναξη της επικάλυψης (α) δοκίμιο με 3 στρώσεις πλέγματος-100°C, (β) δοκίμιο με 4 στρώσεις πλέγματος-75°C (γ) δοκίμιο με 4 στρώσεις πλέγματος-400°C (Raouf and Bournas, 2017)

2.2 Γεωπολυμερή

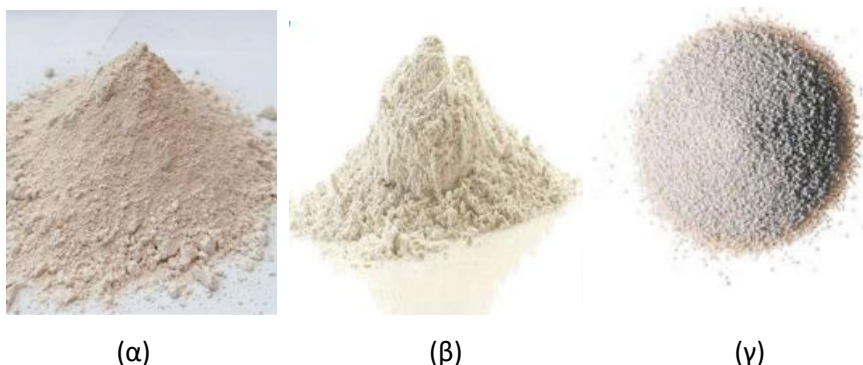
2.2.1 Γενικά για τα γεωπολυμερή

Τα γεωπολυμερή είναι ανόργανα πολυμερή υλικά που προκύπτουν από τη διαδικασία της γεωσύνθεσης. Ιστορικά, ο πρώτος ερευνητής που αναφέρεται στην αντίδραση μιας πηγής αλκαλίου με στερεές πρόδρομες ουσίες (αποτελούμενες από αλουμίνιο και πυρίτιο) για τον σχηματισμό ενός στερεού υλικού, συγκρίσιμου με το τσιμέντο Portland, είναι ο Kuhl (1908), Γερμανός μηχανικός και χημικός με εξειδίκευση στο τσιμέντο. Ακολούθησαν σημαντικά ερευνητικά έργα, όπως του Purdon (1940) που αφορούσε σκωρίες υψικαμίνου, καθώς και του Glukhovsky (1959) σχετικά με αξιοποίηση των σκωριών που παραγόταν από μεταλλουργία. Έως τη δεκαετία του 1980, περιορισμένες ήταν οι μελέτες σχετικές με αυτά τα υλικά. Ακολούθως, ο Davidovits (1982) κατοχύρωσε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας αρκετά αργιλοπυριτικά σκευάσματα και ήταν αυτός που αργότερα, το 2008, καθιέρωσε τον όρο «γεωπολυμερές».

Τα τελευταία χρόνια, το γεωπολυμερές έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον των ερευνητών και εξετάζεται ως εναλλακτική λύση έναντι της χρήσης των συμβατικών τσιμεντοκονιάματων στις κατασκευές του Πολιτικού Μηχανικού. Σύμφωνα με τους Provis and Van Deventer (2013), η παραγωγή των γεωπολυμερών κονιαμάτων προκαλεί μειωμένη εκπομπή CO₂ έως και 80%, έναντι της παραγωγής του συμβατικού τσιμέντου. Η σπουδαιότητα αυτής της ενέργειας γίνεται αντιληπτή, εάν αναλογιστεί κανείς ότι το CO₂ είναι το αέριο που ευθύνεται κατά 65% για το φαινόμενο του θερμοκηπίου, με τους Scrivener and Kirkpatrick (2008) να υπογραμμίζουν ότι, οι τσιμεντοβιομηχανίες συμβάλουν στη συνολική εκπομπή CO₂ σε σημαντικό ποσοστό (περίπου 5-8%), κυρίως λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που απαιτείται να αναπτυχθεί κατά τη διαδικασία παραγωγής του τσιμέντου.

Κατά τη διαδικασία του γεωπολυμερισμού, πραγματοποιείται μία χημική αντίδραση όπου στερεές αργιλοπυριτικές ενώσεις (precursors) συνδυάζονται σε αλκαλικό περιβάλλον, με τον λεγόμενο ενεργοποιητή (alkali activator), για να παράγουν σκληρυμένες συγκολλητικές ουσίες (σχηματισμός πολυμερικών δεσμών -Si-O-Al-O-). Συνηθέστερα, ως στερεές πρώτες ύλες χρησιμοποιούνται αργιλοπυριτικά υλικά με: σκωρίες υψικαμίνου, ιπτάμενη τέφρα άνθρακα, ασβεστόχο άργιλο και φυσικές ποζολάνες. Άλλα υλικά, που

χρησιμοποιούνται σπανιότερα είναι: άργιλοι πλούσιοι σε σίδηρο, διάφορες σκωρίες από σιδηρούχα και μη μεταλλουργία, λάσπες πλούσιες σε άργιλο, κόκκινη λάσπη, καολίνη, αλεσμένη τέφρα και τέφρες γεωργικών αποβλήτων. Εικόνες στερεών πρώτων υλών, παρατίθενται στο Σχήμα 2.18. Όσον αφορά τους ενεργοποιητές, οι ευρέως χρησιμοποιούμενες ενώσεις είναι KOH, NaOH, K₂O ή Na₂O, ενώ σε περιπτώσεις ενεργοποίησης πρόδρομων ουσιών με υψηλή περιεκτικότητα σε ασβέστιο, π.χ. σκωρίες υψικαμίνου, αποτελεσματικές μπορεί να αποδειχθούν οι ενώσεις Na₂SO₄ και Na₂CO₃.



Σχήμα 2.18 Είδη στερεών πρόδρομων ουσιών (α) μετακαολίνη, (β) αδρανές < 0.5 mm, (γ) αδρανές 0.5-1 mm (Parakonstantinou and Koutas, 2021)

Από οικονομικής απόψεως, τα γεωπολυμερή υλικά ενδέχεται να εμφανίσουν υψηλό κόστος σε ορισμένες περιπτώσεις όπου οι πρώτες ύλες δε μπορούν να προμηθευτούν από κοντινές αποστάσεις και πρέπει να αγοραστούν από παραγωγούς. Ωστόσο, αριθμούν μία σειρά σημαντικών πλεονεκτημάτων έναντι του συνηθισμένου τσιμέντου Portland, και ειδικότερα εμφανίζουν:

- υψηλές μηχανικές ιδιότητες
- εξαιρετική αντίσταση σε διάβρωση
- υψηλή θερμοκρασία μετάπτωσης
- εξαιρετική αντοχή σε δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες και
- μηδενική εκπομπή τοξικών αερίων κατά την καύση της.

2.2.2 Εφαρμογές γεωπολυμερών σε ενισχύσεις κατασκευών ΟΣ

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, περιορισμένες είναι οι προσπάθειες ερευνών για τη διερεύνηση της χρήσης των γεωπολυμερών σε IAM, για την ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών. Συγκεκριμένα, έχει μελετηθεί πειραματικά η συμπεριφορά των μανδυών IAM

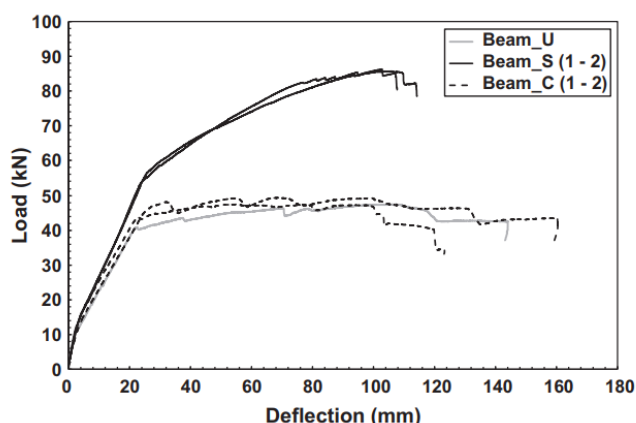
με ανόργανη μήτρα γεωπολυμερούς έναντι κάμψης και διάτμησης δοκών καθώς και η χρήση τους ως περίσφιγξη υποστυλωμάτων. Οι πειραματικές έρευνες που έχουν δημοσιευτεί στη διεθνή βιβλιογραφία (σε αγγλική γλώσσα) και αφορούν το συγκεκριμένο πεδίο μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- Καμπτική ενίσχυση δοκών ΟΣ (π.χ. Kurtz and Balaguru 2001, Menna et al. 2013, Bencardino and Condello 2016, Zhang et al. 2018, Al-Majidi et al. 2019, Peng et al. 2022, Zhang et al. 2022)
- Ενίσχυση σε τέμνουσα δοκών ΟΣ (π.χ. Zhang et al. 2019, Khir Allah 2022)
- Περίσφιγξη υποστυλωμάτων ΟΣ (π.χ. Zhang et al. 2016, Heng et al. 2017, Wang et al. 2021)

Η πειραματική μελέτη των Kurtz and Balaguru (2001), ανήκει στις αρχικές προσπάθειες των ερευνητών να μελετήσουν την απόκριση των ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης στην καμπτική ενίσχυση των κατασκευών ΟΣ. Αναλυτικότερα, στα πλαίσια της εργασίας διεξήχθησαν 6 δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων σε δοκούς ΟΣ γεωμετρίας 3000mm×200mm×300mm, 2 εκ των οποίων χρησιμοποιήθηκαν ως δοκίμια αναφοράς, 1 ενισχύθηκε με ύφασμα άνθρακα και εποξική ρητίνη και 3 ενισχύθηκαν με ύφασμα άνθρακα και ανόργανη μήτρα, η οποία προέκυψε από ανάμειξη ενός ενεργοποιητή με αργιλοπυριτική πούδρα. Μελετώντας τα αποτελέσματα, οι συγγραφείς συμπέραναν ότι: (α) τα δύο συστήματα ενίσχυσης (οργανικής και ανόργανης μήτρας) βελτίωσαν την αντοχή και τη δυσκαμψία του στοιχείου περίπου στον ίδιο βαθμό, (β) η παραμόρφωση αστοχίας που καταγράφηκε στην περίπτωση της χρήσης μήτρας γεωπολυμερούς σύστασης ήταν μειωμένη κατά 25% σε σύγκριση με την αντίστοιχη παραμόρφωση που εμφάνισε το δοκίμιο όταν έγινε χρήση οργανικής μήτρας και (γ) η μορφή αστοχίας διέφερε σε κάθε περίπτωση, με την ανόργανη μήτρα να οδηγεί σε αστοχία ινών ενώ η εποξική ρητίνη να προκαλεί αποκόλληση.

Στη συνέχεια οι Menna et al. (2013), προσπάθησαν επίσης να καθορίσουν την καμπτική ικανότητα δοκών ένων με ΙΑΜ με μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης, υποβάλλοντας 5 δοκίμια ΟΣ κανονικής κλίμακας σε μονοτονική κάμψη τεσσάρων σημείων. Η ανόργανη μήτρα αποτελούταν από πούδρα μετακαολίνης, πούδρα καθαρού χαλαζία ως αδρανές και έναν ενεργοποιητή (συνδυασμό υδροξειδίου του νατρίου και διαλύματος πυριτικού

νατρίου). Βασική παράμετρος του πειράματος ήταν το υλικό των ινών του πλέγματος (άνθρακας ή χάλυβας). Όπως γίνεται αντιληπτό και στο Σχήμα 2.19, στην περίπτωση της χρήσης ινών χάλυβα (Beam_U), το γεωπολυμερές κονίαμα παρείχε πολύ καλό εμπότισμό των ινών με αποτέλεσμα να μην παρουσιαστούν φαινόμενα αποκόλλησης και το σύνθετο υλικό να φτάσει σε μεγάλα εφελκυστικά φορτία. Αντίθετα, το σύστημα με τις ίνες άνθρακα (Beam_C) δεν αποδείχθηκε αποτελεσματικό καθώς οδήγησε σε ελάχιστη αύξηση του μέγιστου φορτίου σε σύγκριση με το δοκίμιο αναφοράς (Beam_U), γεγονός που αποδίδεται από τους συγγραφείς στο μέγεθος των χρησιμοποιούμενων ινών. Τέλος, τα αριθμητικά αποτελέσματα των πειραμάτων συγκρίθηκαν με προγενέστερες μελέτες, οι οποίες αφορούσαν ενισχύσεις όμοιων στοιχείων ΟΣ, με τσιμεντοκονίαμα ή ρητίνη ως μήτρα του σύνθετου υλικού. Έτσι προέκυψε ότι, το ΙΑΜ χάλυβα με μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης συμπεριφέρεται ισοδύναμα, αν όχι καλύτερα από τα συστήματα ενίσχυσης με μήτρα ρητίνης ή τσιμεντοκονιάματος, στα οποία παρατηρήθηκαν φαινόμενα αποκόλλησης στη ζώνη αγκύρωσης.



Σχήμα 2.19 Καμπύλες φορτίου-παραμόρφωσης (Menna et al. 2013)

Με τη συνεισφορά των ΙΑΜ γεωπολυμερούς μήτρας στην καμπτική ενίσχυση στοιχείων ΟΣ, στα οποία παρουσιάζεται πρόβλημα διάβρωσης, ασχολήθηκαν οι Bencardino and Condello (2016) και Al-Majidi et al. (2019). Αναλυτικότερα, οι Bencardino and Condello (2016) πραγματοποίησαν 6 δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων σε δοκούς ΟΣ μεγάλης κλίμακας, στις οποίες είχε ήδη εμφανιστεί πρόβλημα διάβρωσης οπλισμού και καταστροφή της επικάλυψης του σκυροδέματος. Διατηρώντας δύο εξ αυτών ως δοκίμια αναφοράς, οι ερευνητές προέβησαν σε ενίσχυση των υπολοίπων δοκιμών ΟΣ με ίνες χάλυβα και ανόργανη

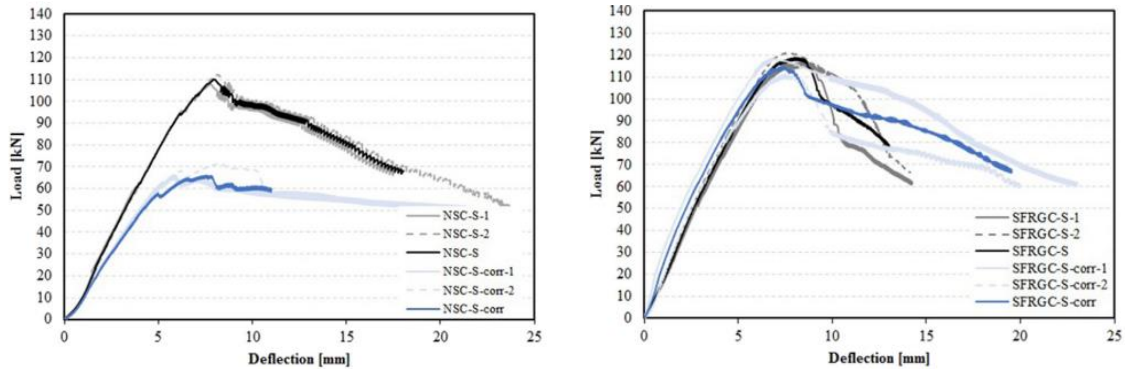
μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης και διαπίστωσαν το σύστημα ενίσχυσης αποδίδει καθώς εμφανίζεται αύξηση του μέγιστου φορτίου από 16% έως 30%. Οι Al-Majidi et al. (2019) διαφοροποίησαν τη διαδικασία του πειράματος, και συγκεκριμένα υπέβαλλαν τα δοκίμια σε συνθήκες αυξανόμενης διάβρωσης αφού προηγουμένως αυτά είχαν ενισχυθεί. Έπειτα, πραγματοποίησαν συνολικά 16 δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων, στα ενισχυμένα και μη ενισχυμένα στοιχεία (2 δοκίμια αναφοράς). Οι τρόποι ενίσχυσης που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία κατηγοριοποιούνται ως εξής: (α) μία στρώση κονιάματος, (β) στρώση κονιάματος σε συνδυασμό με ράβδους χάλυβα, (γ) τρίπλευροι μανδύες κονιάματος και (δ) μία στρώση σκυροδέματος. Χαρακτηριστικές εικόνες δοκιμών παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.20. Τα κονιάματα γεωπολυμερούς σύστασης εμπειρείχαν ίνες χάλυβα ή ίνες πολυβινυλικής αλκοόλης (PVA) και αποτελούταν από άμμο, ιπτάμενη τέφρα, κοκκοποιημένη σκωρία υφικάμινου, καπνό πυρίτιου και από έναν αλκαλικό ενεργοποιητή με υδροξείδιο του καλίου και διάλυμα πυριτικού καλίου. Τα αποτελέσματα σχετικά με τη χρήση IAM με γεωπολυμερές κονίαμα ήταν ενθαρρυντικά, καθώς καταγράφηκε βελτίωση του μέγιστου φορτίου και της ολκιμότητας των ενισχυμένων στοιχείων. Αναλυτικότερα, το μέγιστο φορτίο που καταγράφηκε σε αυτές τις περιπτώσεις ήταν 2 φορές περίπου υψηλότερο από αυτό του δοκιμίου αναφοράς, ενώ ταυτόχρονα οι τιμές ολίσθησης (0.34mm-0.82mm), ήταν μικρότερες από τις αντίστοιχες των ενισχυμένων με σκυρόδεμα δοκιμίων, γεγονός που υποδεικνύει βελτιωμένες συνθήκες συνάφειας. Στην περίπτωση των τρίπλευρων μανδύων γεωπολυμερούς υλικού, παρατηρήθηκε επίσης αύξηση στην ικανότητα ανάληψης φορτίου (50% σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς). Τέλος, όσον αφορά τα διαβρωμένα στοιχεία, πτώση κατά 37% και μόλις 3% στην ανάληψη φορτίου σημείωσαν τα δοκίμια ενισχυμένα με συμβατικό σκυρόδεμα και με γεωπολυμερές κονίαμα (ίνες χάλυβα) αντίστοιχα, ενώ αξιόλογη ήταν η συμπεριφορά των δοκιμών ενισχυμένων με κονίαμα ινών PVA, όπου δεν παρατηρήθηκε καμία επιρροή της διάβρωσης στην καμπτική της συμπεριφορά (Σχήμα 2.21).



(α)

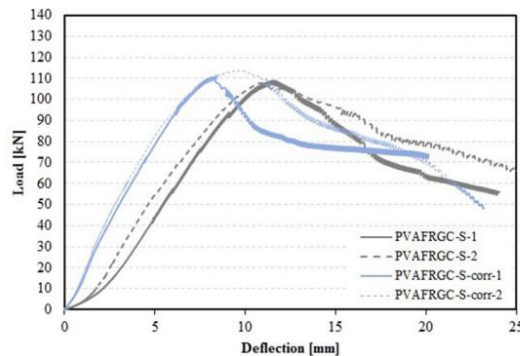
(β)

Σχήμα 2.20 Δοκίμια (α) με γεωπολυμερές κονίαμα και ράβδους χάλυβα, (β) με τρί πλευρους μανδύες γεωπολυμερούς κονιάματος (Al-Majidi et al. 2019)



(α)

(β)

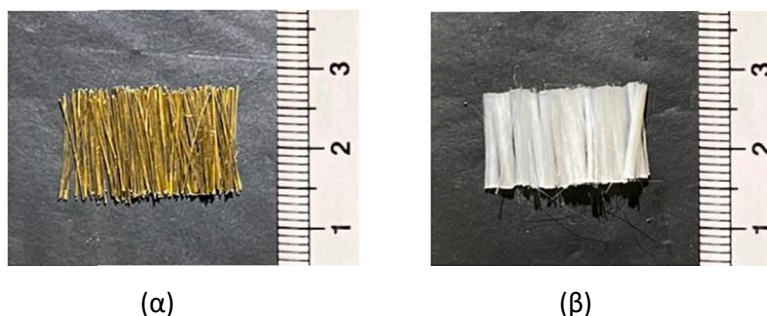


(γ)

Σχήμα 2.21 Καμπύλες φορτίου-παραμόρφωσης διαβρωμένων και μη δοκιμίων ενισχυμένων (α) με σκυρόδεμα, (β) με γεωπολυμερές (3% ίνες χάλυβα), (γ) με γεωπολυμερές (2% ίνες PVA) (Al-Majidi et al. 2019)

Σε μεγαλύτερο βάθος, οι Peng et al. (2022) διερεύνησαν την καμπτική απόκριση δοκών ΟΣ ενισχυμένων με γεωπολυμερή, τα οποία έχουν ενισχυθεί με ίνες. Συνολικά, διενήργησαν 11 δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων σε στοιχεία ενισχυμένα με χαλύβδινες ράβδους μικρής διαμέτρου, και με παραμέτρους: (α) το υλικό της μήτρας (γεωπολυμερές ή ρητίνη), (β) τον σπλισμό της μήτρας (απλή ή με ίνες PVA/χάλυβα) και (γ) τον αριθμό και τη διάμετρο των χαλύβδινων ράβδων. Για την κατασκευή των ανόργανων κονιαμάτων χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές αναλογίες ιπτάμενης τέφρας και σκωρίας, πυριτικό νάτριο και ανθρακούχο νάτριο ως αλκαλικοί ενεργοποιητές και οι ίνες PVA και χάλυβα διαφορετικών μηκών και διαμετρών, οι οποίες απεικονίζονται στο Σχήμα 2.22. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των πειραμάτων προέκυψε ότι, όλα τα δοκίμια εμφάνισαν σημαντικά

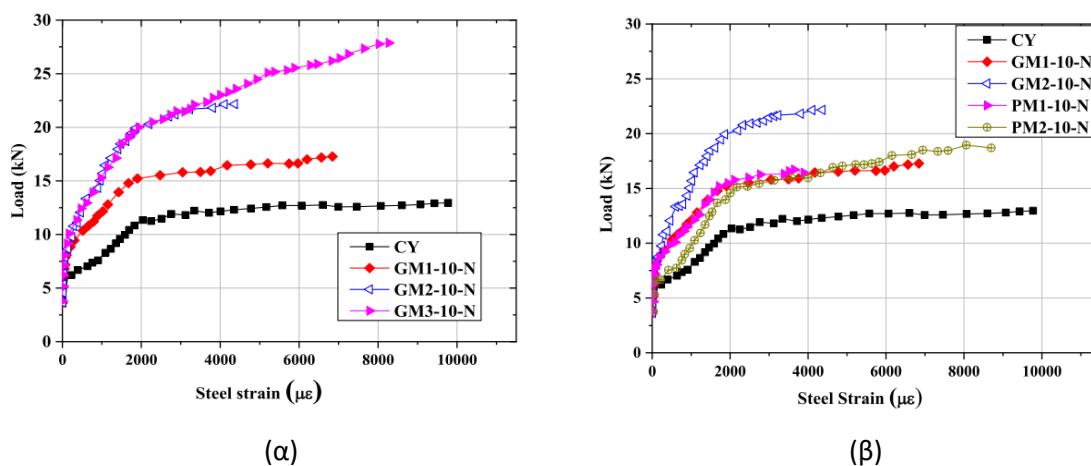
υψηλότερα φορτία (μέγιστα και διαρροής) καθώς και αυξημένη δυσκαμψία σε σύγκριση με το δοκίμιο αναφοράς, με το γεωπολυμερές και τη ρητίνη να οδηγούν σε παρόμοια συμπεριφορά του στοιχείου. Ειδικότερα, τα συστήματα ενίσχυσης με χρήση γεωπολυμερούς οδήγησαν σε αύξηση του μέγιστου φορτίου κατά 73% έως και 98%, ενώ η αύξηση του φορτίου διαρροής κυμάνθηκε σε ποσοστά 26%-85%. Τέλος, η προσθήκη ινών στο γεωπολυμερές κονίαμα αποδεικνύεται ευεργετική για το σύνθετο υλικό καθώς οδηγεί σε αύξηση του φορτίου που αντιστοιχεί στη διαρροή και ταυτόχρονη μείωση εμφάνισης ρωγμών. Σημειώνεται ότι, μικρή ήταν η επιρροή των ινών στην αύξηση του μέγιστου φορτίου.



Σχήμα 2.22 Ίνες (α) χάλυβα, (β) πολυβινυλικής αλκοόλης-PVA (Peng et al. 2022)

Στην πρόσφατη μελέτη τους οι Zhang et al. (2022), διερεύνησαν πειραματικά τη καμπτική συμπεριφορά συστημάτων ενίσχυσης IAM γεωπολυμερούς μήτρας σε πλάκες ΟΣ μίας διεύθυνσης. Μέσω κάμψης τεσσάρων σημείων, δοκιμάστηκαν 8 πλάκες ΟΣ γεωμετρίας 100mm×600mm×4200mm, με παραμέτρους: (α) τον αριθμό των στρώσεων του πλέγματος, (β) τη γεωμετρία του πλέγματος, (γ) την ύπαρξη αγκύρωσης και (δ) το είδος της μήτρας. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκαν 2 διαφορετικά πλέγματα άνθρακα και 2 διαφορετικά κονιάματα (τσιμεντοειδές ή γεωπολυμερές). Το γεωπολυμερές κονίαμα προέκυψε από ανάμειξη μείγματος ιπτάμενης τέφρας (χαμηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο) και μετακαολίνης (50%-50%), με άμμο ποταμού και διάλυμα πυριτικού καλίου ως ενεργοποιητή. Από τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει ότι, το IAM με μήτρα γεωπολυμερούς συνιστά μία αποτελεσματική μέθοδο καμπτικής ενίσχυσης για πλάκες ΟΣ μίας διεύθυνσης, και συγκεκριμένα με τη χρήση δύο και τριών στρώσεων IAM, αυξάνεται η αντοχή της πλάκας κατά 26%, 53% και 92% αντίστοιχα, σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς. Σημειώνεται ότι, η καμπτική αντοχή που αναπτύσσουν οι πλάκες που ενισχύθηκαν με IAM γεωπολυμερούς μήτρας, είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη αντοχή των ενισχυμένων στοιχείων με IAM

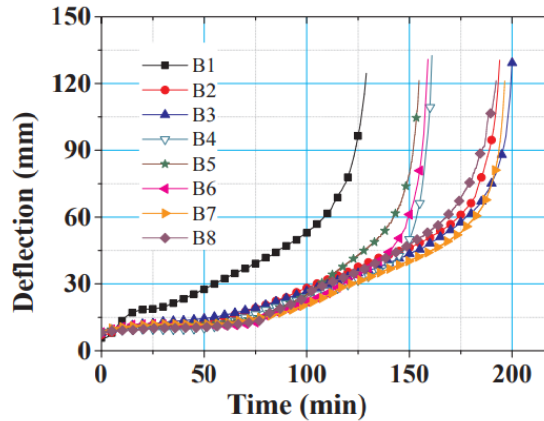
τσιμεντοειδούς μήτρας. Η επιρροή των στρώσεων του IAM και του είδους της μήτρας, γίνεται αντιληπτική και εποπτικά στα διαγράμματα του Σχήματος 2.23. Επίσης οι συγγραφείς επισημαίνουν ότι, σημαντικός παράγοντας είναι η γεωμετρία του πλέγματος ινών, καθώς οι πλάκες με ομοιόμορφη πλευρική κατανομή του πλέγματος εμφανίζουν υψηλότερη αντοχή, ενώ τέλος αναφέρουν ότι, τα IAM γεωπολυμερούς μήτρας με την ίδια ποσότητα πλέγματος αποδεικνύονται πιο αποτελεσματικά από τα αντίστοιχα IAM τσιμεντοειδούς μήτρας.



Σχήμα 2.23 Καμπύλες φορτίου-μετακίνησης με παραμέτρους σύγκρισης (α) της στρώσεις πλέγματος (β) το είδος της μήτρας (Zhang et al. 2022)

Στη σύγκριση της αποτελεσματικότητας των συστημάτων καμπτικής ενίσχυσης IAM με γεωπολυμερή μήτρα και ΙΟΠ, υπό συνθήκες φωτιάς, εστίασαν οι Zhang et al. (2018). Το πειραματικό τους πρόγραμμα αποτελούταν από πειράματα αντίστασης σε φωτιά, σε δοκούς ΟΣ γεωμετρίας 250mm×400mm×5300mm και επιγραμματικά οι παράμετροι ήταν: (α) το είδος του υφάσματος (ίνες βασάλτη ή άνθρακα), (β) ο αριθμός των στρώσεων (1 ή 2), (γ) ο τύπος της μήτρας (ρητίνη ή γεωπολυμερές), και (δ) η ύπαρξη ή όχι ασταριού μεταξύ πυρομόνωσης και σύνθετου υλικού. Το γεωπολυμερές κονίαμα που χρησιμοποιήθηκε, παρασκευάστηκε από ανάμειξη μετακαολίνης και ιπτάμενης τέφρας με ενεργοποιητή πυριτικού καλίου. Κατόπιν πειραμάτων σε ένα δοκίμιο αναφοράς και σε επτά δοκίμια με εξωτερική ενίσχυση, προέκυψε ότι το σύστημα ΙΟΠ είναι ικανό να προσφέρει την επιθυμητή θερμική αντίσταση στη δοκό ΟΣ για πάνω από 3 ώρες, παρόλο που η εποξική ρητίνη χάνει την αντοχή συνάφειας σε υψηλές θερμοκρασίες. Λειτουργικό θεωρείται επίσης και το σύστημα IAM γεωπολυμερούς μήτρας, το οποίο μάλιστα συγκριτικά με το ΙΟΠ παρουσιάζει χαμηλότερη παραμόρφωση έναντι της φόρτισης. Ωστόσο, όπως παρουσιάζεται και στο

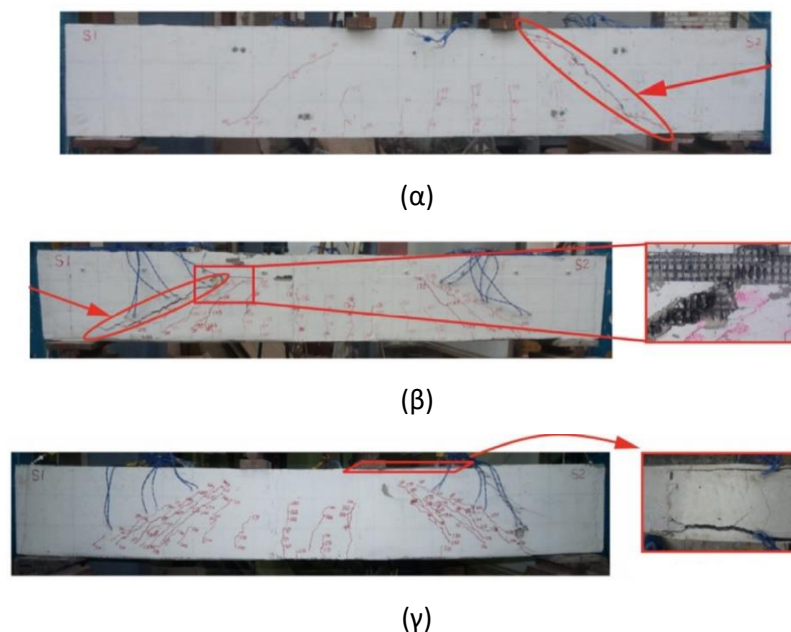
διάγραμμα του Σχήματος 2.24, οι ενισχυμένες με IAM δοκοί B4, B5, και B6 δεν ανέπτυξαν καλύτερη θερμική αντίσταση σε σχέση με τα στοιχεία με ΙΟΠ, γεγονός που οφείλεται στην πρόωρη απώλεια της πυρομόνωσης.



Σχήμα 2.24 Καμπύλες παραμόρφωσης-χρόνου (Zhang et al. 2018)

Τη χρήση γεωπολυμερούς μήτρας σε IAM για ενίσχυση δοκών ΟΣ έναντι τέμνουσας, μελέτησαν αρχικά οι Zhang et al. (2019). Συγκεκριμένα, πραγματοποίησαν δέκα δοκιμές μονοτονικής φόρτισης σε ίδιας γεωμετρίας δοκούς (150 mm × 300 mm × 2000 mm), 8 εκ των οποίων είχαν ενισχυθεί με τρίπλευρο μανδύα IAM άνθρακα, 1 με μανδύα ΙΟΠ και τέλος η μη ενισχυμένη λειτούργησε ως δοκίμιο αναφοράς. Στα IAM έγινε χρήση γεωπολυμερούς μήτρας, η οποία αποτελούσε μίγμα διαλύματος πυριτικού καλίου, μετακαολίνης, ιπτάμενης τέφρας και άμμου. Οι παράμετροι της μελέτης, συμπεριλαμβανομένου την ύπαρξη ή όχι ενίσχυσης, ήταν: (α) ο αριθμός των στρώσεων του σύνθετου υλικού, (β) η γεωμετρία του υφάσματος, (γ) η μήτρα της ενίσχυσης (ανόργανη ή οργανική) και (δ) η αγκύρωση μέσω χαλύβδινων λωρίδων (πάχους 3mm). Για καλύτερη κατανόηση της απόκρισης του σύνθετου υλικού με χρήση γεωπολυμερούς μήτρας, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτής της εργασίας με προηγούμενες μελέτες, στις οποίες είχαν χρησιμοποιηθεί συμβατικά IAM, δηλαδή η μήτρα ήταν τσιμεντοειδούς σύστασης. Τελικά προέκυψε ότι, τα ινοπλέγματα με γεωπολυμερή μήτρα βελτιώνουν αποτελεσματικά τη διατμητική αντοχή των δοκιμών ΟΣ, καθώς παρατηρήθηκε αύξηση της διατμητικής ικανότητας σε σύγκριση με το δοκίμιο αναφοράς κατά 47.1% και 105.9% με χρήση 1 ή 2 στρώσεων IAM αντίστοιχα, ενώ περαιτέρω αύξηση από 14.7% έως 20.6% παρουσιάστηκε στα 3 δοκίμια όπου υπήρχε αγκύρωση των μανδύων με χαλύβδινες λωρίδες. Συγκριτικά με τον μανδύα ΙΟΠ (1 στρώση υφάσματος και

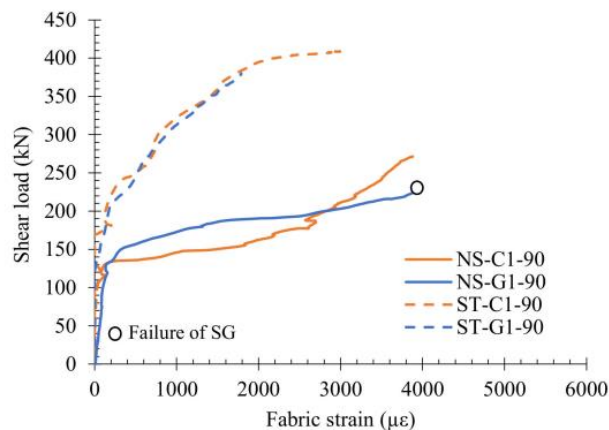
μήτρα ρητίνης), το σύστημα IAM δε παρουσιάζει καλύτερη απόκριση, αφού εμφανίζει τη μισή συγκριτικά διατμητική αντοχή. Ωστόσο οι συγγραφείς αναφέρουν ότι το IAM με γεωπολυμερή μήτρα αποτελεί μια καλή προοπτική στην ενίσχυση στοιχείων ΟΣ λόγω των πλεονεκτημάτων του (απόκριση σε φωτιά, αντίσταση σε διάβρωση και σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες. Τέλος, συγκριτικά με τα συμβατικά IAM (TRM) που έχουν μελετηθεί προηγουμένως, το υπό διερεύνηση IAM (TRGM) εμφανίζει παρόμοια συμπεριφορά όταν δε χρησιμοποιείται σύστημα αγκύρωσης, ενώ οι αντίστοιχοι αγκυρωμένοι τρίπλευροι μανδύες φτάνουν σε υψηλότερες ενεργές τάσεις, προσεγγίζοντας μάλιστα τις τάσεις των πλήρως αγκυρωμένων (fully-wrapped) συμβατικών IAM. Σημειώνεται ότι στη συγκεκριμένη μελέτη παρατηρήθηκαν 3 συνολικά μορφές αστοχίας : (α) διατμητική αστοχία, (β) συνδυασμός διατμητικής αστοχίας με θραύση ινών και (γ) αποκόλληση του μανδύα ενίσχυσης (με ταυτόχρονη αποκόλληση της επικάλυψης του σκυροδέματος), όπως παρουσιάζονται και στο Σχήμα 2.25.



Σχήμα 2.25 Εικόνες αστοχίας (α) διατμητική αστοχία, (β) διατμητική αστοχία και θραύση ινών, (γ) αποκόλληση μανδύα (Zhang et al. 2019)

Στη συνέχεια οι Khir Allah et al. (2022), μελέτησαν επίσης την αποτελεσματικότητα συστημάτων ενίσχυσης IAM με μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης στη βελτίωση την διατμητικής απόκρισης δοκών ΟΣ. Ειδικότερα, 10 μεγάλης κλίμακας δοκοί (3300 mm × 150 mm × 500 mm) υπεβλήθησαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων με παραμέτρους: (α) την ύπαρξη

συνδετήρων (β) τον αριθμό των στρώσεων του IAM, (γ) τον προσανατολισμό των ινών και (δ) το είδος της μήτρας (τσιμεντοειδές ή γεωπολυμερές υλικό). Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε για την ενίσχυση αποτελούταν από ίνες άνθρακα, ενώ η μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης περιείχε σκωρία καμίνου υπό μορφή αλεσμένων κόκκων και ιπτάμενη τέφρα ως συνδετικά υλικά, άμμο ως λεπτό αδρανές και ένα αλκαλικό διάλυμα, αποτελούμενο από πυριτικό νάτριο και πυριτικό υδροξείδιο. Το σημαντικότερο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από τα αποτελέσματα των πειραμάτων είναι ότι, το μείγμα γεωπολυμερούς σύστασης είναι εφικτό να αντικαταστήσει αποτελεσματικά την τσιμεντοειδή μήτρα των συμβατικών IAM στις ενισχύσεις έναντι τέμνουσας, καθώς το IAM με το γεωπολυμερές υλικό οδήγησε σε αύξηση της διατμητικής αντοχής κατά 77% στην περίπτωση απουσίας συνδετήρων και κατά 9% στην ύπαρξη συνδετήρων αντίστοιχα. Σε σύγκριση με το συμβατικό IAM, παρατηρήθηκε μειωμένη διατμητική ικανότητα από 7%-9%. Ένα τυπικό διάγραμμα διατμητικής δύναμης-παραμόρφωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.26, τόσο για τα δοκίμια με μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης όσο και για τα αντίστοιχα με γεωπολυμερή μήτρα. Τέλος, οι μορφές αστοχίας ποίκιλαν καθώς εμφανίστηκε διατμητική-θλιπτική αστοχία και αστοχία διαγώνιας θλίψης (σύνθλιψη του σκυροδέματος), ενώ σε κανένα από τα δοκίμια δεν παρατηρήθηκε εφελκυστική μορφή αστοχίας.



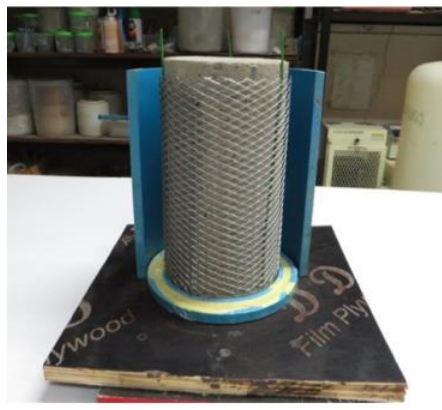
Σχήμα 2.26 Διάγραμμα διατμητικού φορτίου-παραμόρφωσης (Khair Allah et al. 2022)

Με τη χρήση IAM γεωπολυμερούς μήτρας για περίσφιξη κυλίνδρων ΟΣ, ασχολήθηκαν οι Heng et al. (2017) και οι Wang et al. (2021). Συνολικά, υπέβαλλαν 48 κυλινδρικά δοκίμια ΟΣ (100 mm/ 200 mm και 150 mm/ 300 mm) υπό αξονική θλίψη. Τα

δοκίμια είχαν περισφιγθεί χρησιμοποιώντας μανδύες από πλέγματα ινών βασάλτη ή μεταλλικά πλέγματα και ανόργανες μήτρες με ιπτάμενη τέφρα, υψηλής συγκέντρωσης σε κάλιο, και ενεργοποιητή από υδροξείδιο του νατρίου (NaOH) και υδροξείδιο του πυριτίου (Na_2SiO_3) στη μία περίπτωση, και ιπτάμενη τέφρα, σκόνη υψικαμίνου, χαλαζιακή άμμο, αλκαλικό ενεργοποιητή, υπερρευστοποιητή και ίνες PVA στην άλλη περίπτωση. Χαρακτηριστικές εικόνες ενισχυμένων δοκιμίων απεικονίζονται στο Σχήμα 2.27. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δύο αυτών πολυπαραμετρικών μελετών, τα IAM γεωπολυμερούς μήτρας αποτελούν αποτελεσματική εναλλακτική πρόταση για την περισφιγξη στοιχείων ΟΣ, καθώς παρατηρήθηκε βελτίωση στη μέγιστη θλιπτική αντοχή των στοιχείων και ταυτόχρονη αύξηση της αξονικής δυσκαμψίας τους και της απορρόφησης ενέργειας. Χαρακτηριστικά, με την αύξηση των στρώσεων του IAM αυξάνονται αντίστοιχα και η θλιπτική αντοχή, η δυσκαμψία και η απορρόφηση ενέργειας του στοιχείου, ενώ η αντοχή της μήτρας δεν επηρεάζει καθόλου τη μέγιστη αντοχή και τάση, παρά μόνο την ολκιμότητα και την απορρόφηση ενέργειας του στοιχείου. Επισημαίνεται ότι, η συνάφεια μεταξύ πυρήνα σκυροδέματος και σύνθετου υλικού είναι αρκετά ισχυρή, γεγονός που οδηγεί σε μονολιθική μορφή αστοχίας με χαρακτηριστικές κατακόρυφες ρωγμές, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.28.



(α)

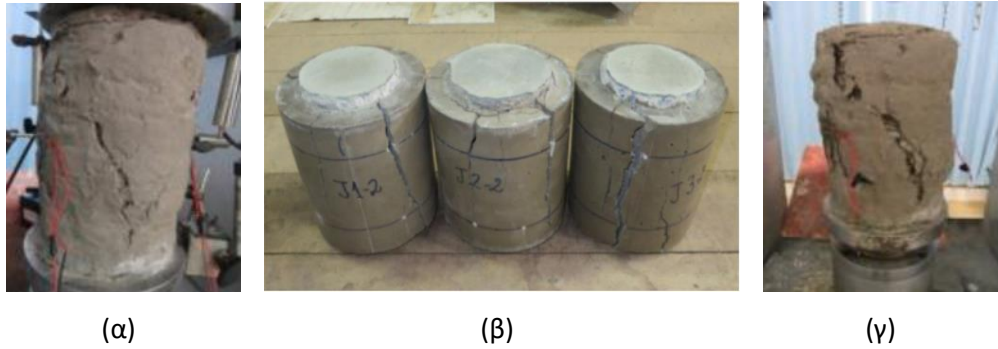


(β)



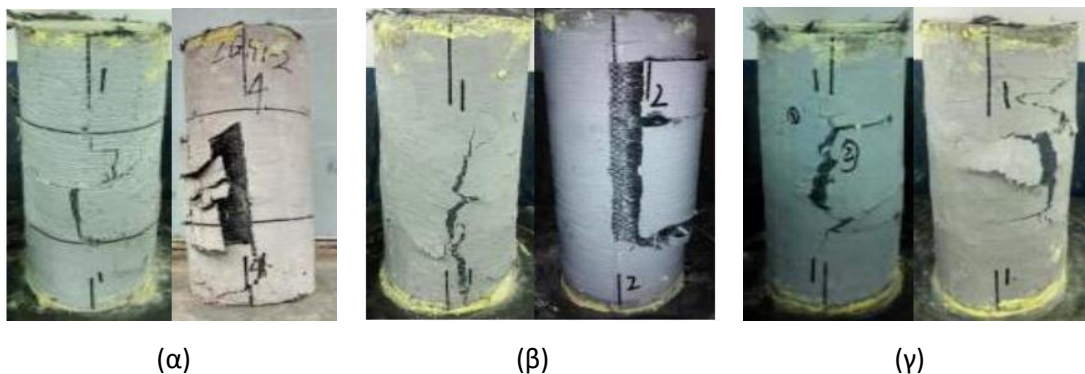
(γ)

Σχήμα 2.27 Εικόνες ενισχυμένων κυλινδρικών δοκιμίων (α) τοποθέτηση πρώτης στρώσης γεωπολυμερούς κονιάματος, (β) δοκίμιο με πλέγμα μεταλλικών ινών, (γ) τοποθέτηση πρώτης στρώσης πλέγματος βασάλτη (Heng et al. 2019, Wang et al. 2021)

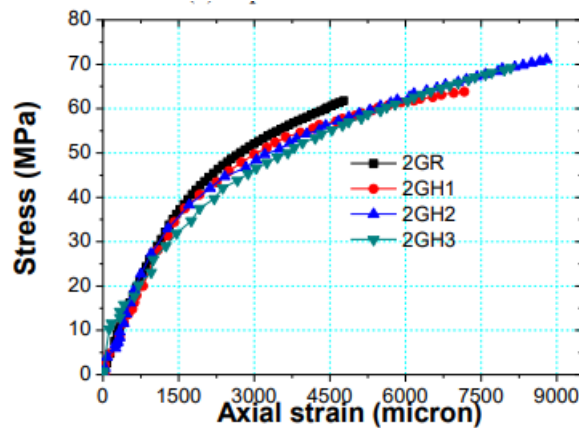


Σχήμα 2.28 (α), (β), (γ) Αστοχία περισφιγμένων δοκιμίων (Heng et al. 2019, Wang et al. 2021)

Την επιρροή της αυξανόμενης θερμοκρασίας στη συμπεριφορά δοκιμίων ΟΣ ενισχυμένων με ΙΑΜ γεωπολυμερούς μήτρας, μελέτησαν με λεπτομέρεια οι Zhang et al. (2016). Συνολικά 20 κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων $\Phi 150 \times 300$ mm, ενισχυμένα και μη, υποβλήθηκαν σε δοκιμές θλίψης με παραμέτρους: (α) τις στρώσεις του υφάσματος άνθρακα (1, 2 ή 3) και (β) τη θερμοκρασία (25°C , 100°C , 200°C και 300°C). Σημειώνεται ότι η μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης είχε παραχθεί από ανάμειξη ιπτάμενης τέφρας και μείγματος μετακαολίνης (1:1) με ενεργοποιητή πυριτικού αλκαλίου. Από τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει ότι, η περισφιγξη με σύνθετο υλικό γεωπολυμερούς μήτρας είναι αποδοτική στην περίπτωση υψηλών θερμοκρασιών, καθώς βελτιώνει σημαντικά τη θλιπτική αντοχή του στοιχείου, χωρίς να ισχύει το ίδιο και για την ολκιμότητα, η οποία μειώνεται. Η μεταβολή θερμοκρασίας από 100°C σε 300°C επηρεάζει άμεσα και τη μορφή αστοχίας, και συγκεκριμένα από αστοχία του σύνθετου υλικού μεταβάλλεται σε θραύση του υφάσματος άνθρακα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.29. Καταλήγοντας, οι συγγραφείς υπογραμμίζουν ότι το γεωπολυμερές κονίαμα εμφανίζει πολύ καλή αντίσταση έναντι υψηλών θερμοκρασιών (έως και 300°C), γεγονός που απορρέει από τη συμφωνία των καμπυλών τάσης-αξονικής παραμόρφωσης για θερμοκρασίες 25°C , 100°C , 200°C και 300°C (Σχήμα 2.30).



Σχήμα 2.29 Αστοχία περισφιγμένων δοκιμών (α) της 100°C, (β) της 200°C, (γ) της 300°C (Zhang et al. 2018)



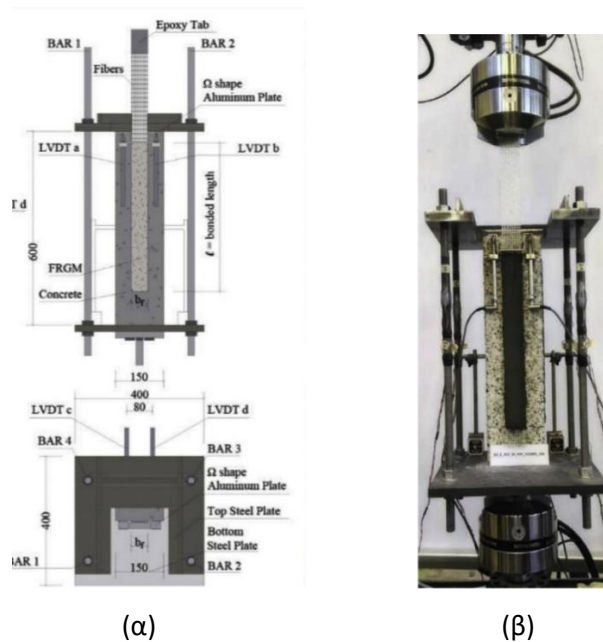
Σχήμα 2.30 Σύγκριση καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης για θερμοκρασίες 100°C, 200°C και 300°C (Zhang et al. 2018)

2.2.3 Συνάφεια σκυροδέματος-σύνθετων υλικών με γεωπολυμερή

Κατόπιν της σύντομης ανασκόπησης του ερευνητικού έργου στο γενικότερο πεδίο της εφαρμογής των ΙΑΜ γεωπολυμερούς μήτρας στις ενισχύσεις κατασκευών, παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που αφορά το ειδικότερο ζήτημα της συνάφειας μεταξύ του σκυροδέματος και του σύνθετου υλικού. Σημειώνεται ότι, οι εργασίες που αναλύουν το συγκεκριμένο ζήτημα είναι περιορισμένες και ως επί το πλείστον αφορούν δοκιμές απλής διάτμησης σε δοκίμια ΟΣ με πλέγματα ινών χάλυβα ή άνθρακα.

Οι Carabba et al. (2017) μελέτησαν την επιρροή της σύστασης του γεωπολυμερούς κονιάματος στη συνάφεια του σύνθετου υλικού. Συγκεκριμένα, διεξήγαγαν 8 δοκιμές απλής διάτμησης σε πρίσματα σκυροδέματος (150 mm × 150 mm × 600 mm), με ΙΑΜ γαλβανισμένου χάλυβα υψηλής αντοχής. Η πειραματική διάταξη των δοκιμών (single-lap shear tests), παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.31. Τρία διαφορετικά γεωπολυμερή κονιάματα χρησιμοποιήθηκαν ως μήτρες των σύνθετων υλικών, παρασκευασμένα από ιπτάμενη τέφρα άνθρακα, πυριτική άμμο για αδρανές και τρία διαφορετικά διαλύματα υδροξειδίου του νατρίου με διαφορετικές μοριακές συγκεντρώσεις (8M, 6M και 4M). Μέσω των αποτελεσμάτων φαίνεται ότι, η μείωση στη μοριακή συγκέντρωση του NaOH στο διάλυμα

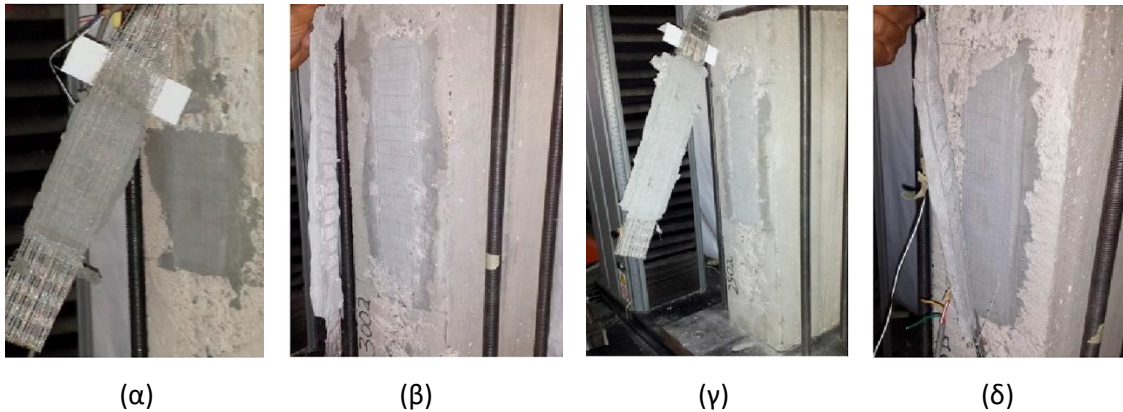
ενεργοποίησης οδηγεί σε αύξηση της αντοχής συνάφειας στη διεπιφάνεια επαφής μήτρας-ινών, με αποτέλεσμα να βελτιώνεται συνολικά η αποτελεσματικότητα του συστήματος ενίσχυσης. Επισημαίνεται ότι, στα σύνθετα υλικά που περιέχουν γαλβανισμένες ίνες χάλυβα είναι σημαντικό να περιοριστεί η αντίδραση μεταξύ του αλκαλικού περιβάλλοντος της μήτρας με την επικάλυψη ψευδαργύρου των ινών. Όσον αφορά τη μορφή αστοχίας των δοκιμών, παρουσιάστηκε αποκόλληση του εξωτερικού στρώματος μήτρας από το εσωτερικό και όχι αποκόλληση στη διεπιφάνεια μήτρας-σκυροδέματος, γεγονός που υποδεικνύει επαρκή συμβατότητα και συνάφεια μεταξύ σύνθετου υλικού και υποστρώματος.



Σχήμα 2.31 (α) Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης, (β) Πειραματική διάταξη απλής διάτμησης (Carabba et al. 2017)

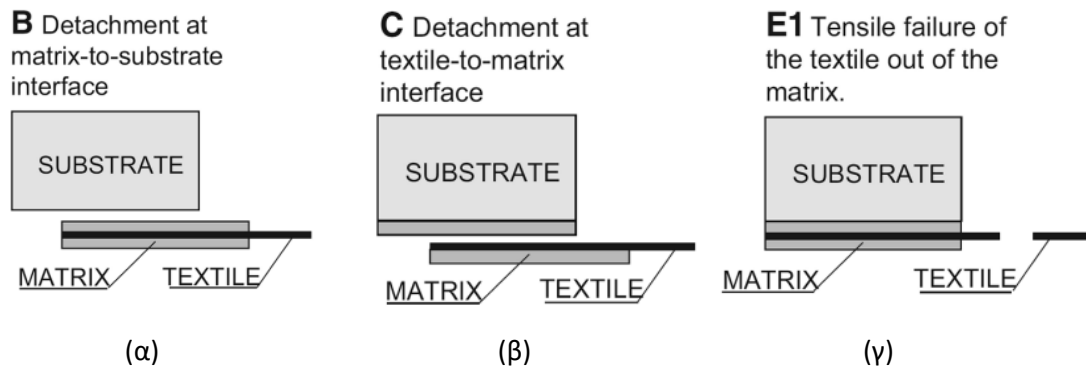
Το μήκος συνάφειας για IAM γεωπολυμερούς μήτρας αποτέλεσε παράμετρο μελέτης για τους Bencardino et al. (2017). Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 12 δοκιμές απλής διάτμησης σε δοκούς ΟΣ κανονικής κλίμακας. Το σύστημα ενίσχυσης που χρησιμοποιήθηκε, ήταν συνδυασμός ενός πλέγματος ινών από ανοξείδωτο χάλυβα με πυράντοχη μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης (έτοιμη προς χρήση, με προσθήκη συνθετικών ινών). Αξίζει να αναφερθεί ότι, το πλάτος επικόλλησης ήταν σταθερό για όλα τα δοκίμια ($b=50\text{mm}$), ενώ το μήκος επικόλλησης διέφερε (από 100 mm έως 400 mm). Με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών, οι συγγραφείς συμπέραναν ότι: (α) το ενεργό μήκος επικόλλησης (effective bond length) για το σύστημα ενίσχυσης καθορίζεται στα

200mm, (β) η απόκριση του συνολικού συστήματος σκυροδέματος-σύνθετου υλικού, και συγκεκριμένα οι καμπύλες φορτίου-ολίσθησης, είναι παρόμοια με την αντίστοιχη απόκριση των συστημάτων ΙΟΠ-σκυροδέματος και (γ) η αστοχία εμφανίστηκε στη διεπιφάνεια πλέγματος ινών-μήτρας (Σχήμα 2.32), γεγονός που αποδεικνύει ότι οι μηχανικές ιδιότητες του υποστρώματος δεν επηρεάζουν την αντοχή συνάφειας του συστήματος.



Σχήμα 2.32 Αστοχίες δοκιμών (α) με $l_b=100\text{mm}$, (β) με $l_b=300\text{mm}$, (γ) με $l_b=250\text{mm}$, (δ) με $l_b=250\text{mm}$ (Bencardino et al. 2017)

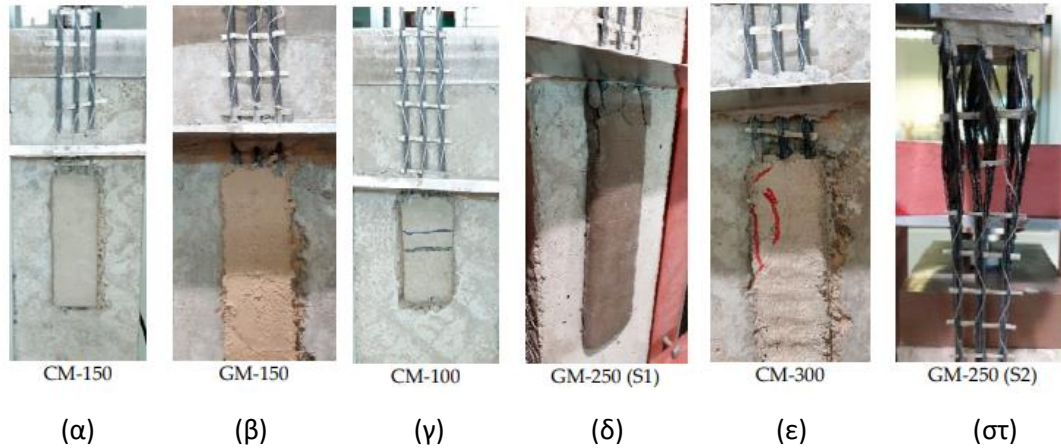
Στη συνέχεια, οι Thermou et al. (2021) διεξήγαγαν μία πολυπαραμετρική μελέτη σε στοιχεία με ΙΑΜ ινών χάλυβα και γεωπολυμερούς μήτρας. Αναλυτικά, οι παράμετροι των πειραμάτων ήταν: (α) ο αριθμός των στρώσεων του πλέγματος, (β) η πυκνότητα των ινών και (γ) η θλιπτική αντοχή του υποστρώματος. Η μήτρα που χρησιμοποιήθηκε για την ενίσχυση ήταν γεωπολυμερούς σύστασης βασισμένη σε κρυσταλλική αντίδραση γεωσυνδεδετικών. Κατόπιν πειραμάτων απλής διάτμησης, οι συγγραφείς συμπέραναν για την αντοχή συνάφειας των δοκιμών ότι: (α) η αύξηση του αριθμού των στρώσεων οδηγεί σε μη γραμμική αύξηση της αντοχής, υποδεικνύοντας χαμηλότερη απόδοση των πολυστρωματικών ΙΑΜ σε σχέση με τα μονοστρωματικά, (β) η χρήση υφασμάτων χαμηλής πυκνότητας ινών είναι αναποτελεσματική και (γ) δεν καθορίστηκε σαφής επίδραση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος. Χαρακτηριστικές μορφές αστοχίας που εμφανίστηκαν στα δοκίμια απεικονίζονται στο Σχήμα 2.33.



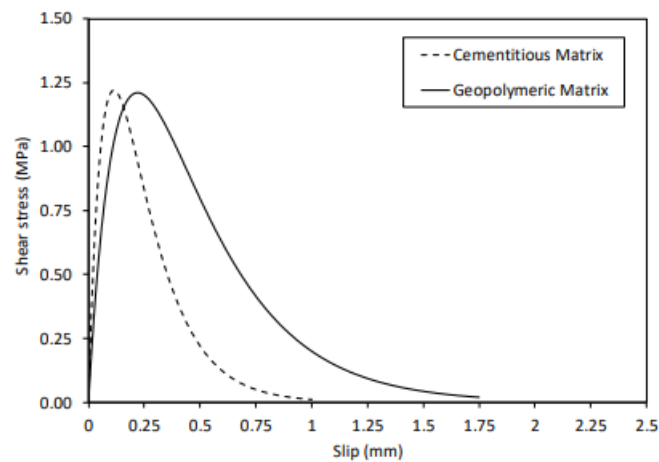
Σχήμα 2.33 Μορφές αστοχίας (α) αποκόλληση στη διεπιφάνεια ΙΑΜ-υποστρώματος, (β) αποκόλληση στη διεπιφάνεια μήτρας-πλέγματος, (γ) θραύση ινών (Thermou et al. 2021)

Τη συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και συστημάτων ενίσχυσης, με ΙΑΜ άνθρακα και μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης, μελέτησαν οι Obaida et al. (2021). Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν 18 δοκιμές απλής διάτμησης σε δοκούς ΟΣ, μήκους 550 mm και διατομής 150 mm × 150 mm, με παραμέτρους: (α) το είδος τη μήτρας (τσιμεντοειδή ή γεωπολυμερή) και (β) το μήκος επικόλλησης (50mm-300mm). Για την παρασκευή της μήτρας γεωπολυμερούς σύστασης χρησιμοποιήθηκαν: (α) ιπτάμενη τέφρα ως συνδετικά υλικά, (β) άμμος ερήμου ως λεπτό αδρανές, (γ) αλκαλικό διάλυμα ενεργοποιητή με βάση το πυριτικό νάτριο (SS) και το υδροξείδιο του νατρίου (SH) και (δ) υπερρευστοποιητής για ενίσχυση της εργασιμότητας. Με βάση τα αποτελέσματα, οι συγγραφείς κατηγοριοποίησαν τις μορφές αστοχίας σε 3 κατηγορίες: Μορφή I (ολίσθηση των ινών χωρίς ρηγμάτωση της μήτρας), Μορφή II (ρηγματώσεις στη μήτρα με ταυτόχρονη ολίσθηση των ινών και αποκόλλησης τη διεπιφάνεια ινών-μήτρας) και Μορφή III (θραύση ινών έξω από τη μήτρα). Χαρακτηριστικές εικόνες αστοχίας των δοκιμών παρατίθεται στο Σχήμα 2.34. Επίσης, προσδιορίστηκε το ενεργό μήκος επικόλλησης για τα δοκίμια με τσιμεντοειδή και γεωπολυμερή μήτρα στα 170mm και 150mm αντίστοιχα. Συνολικά, η μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης αποδείχθηκε αποδοτική, καθώς τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με αυτήν εμφάνισαν περίπου 71% υψηλότερα φορτία από τα αντίστοιχα δοκίμια με τσιμεντοειδή μήτρα, ενώ στην περίπτωση με μήκος επικόλλησης τα 250mm, η εν λόγω αύξηση πλησίασε το 84%. Τέλος, αναπτύχθηκαν μοντέλα αντοχής συνάφειας-ολίσθησης για τη διεπιφάνεια ινών-μήτρας. Όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 2.35, η ολίσθηση που αντιστοιχεί στη μέγιστη διατμητική τάση καθώς και η ενέργεια παραμόρφωσης είναι υψηλότερες στην περίπτωση γεωπολυμερούς

μήτρας έναντι της τσιμεντοειδούς, παρόλο που και τα δύο μοντέλα φτάνουν στην ίδια μέγιστη διατμητική τάση (1.2MPa).



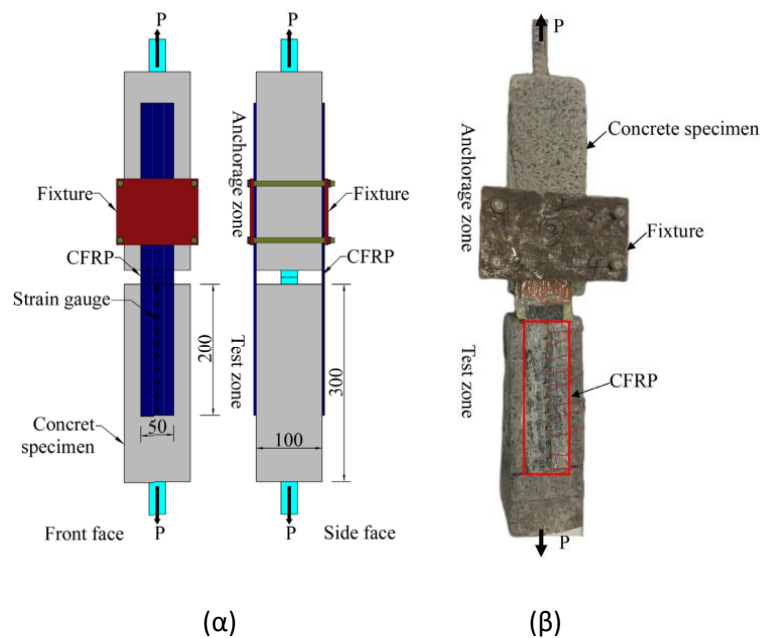
Σχήμα 2.34 Αστοχίες δοκιμών (α) τσιμεντοειδής μήτρα και $l_b=150\text{mm}$, (β) γεωπολυμερής μήτρα και $l_b=150\text{mm}$, (γ) τσιμεντοειδής μήτρα και $l_b=100\text{mm}$, (δ) γεωπολυμερής μήτρα και $l_b=100\text{mm}$ (ε) τσιμεντοειδής μήτρα και $l_b=300\text{mm}$ (στ) γεωπολυμερής μήτρα και $l_b=300\text{mm}$ (Obaida et al. 2021)



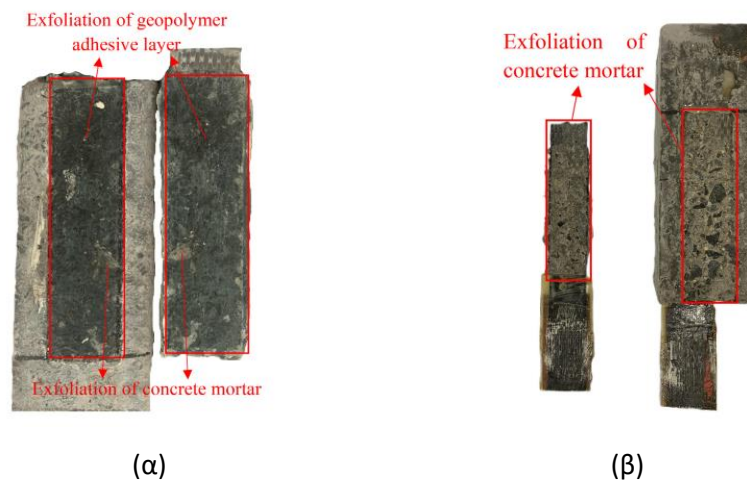
Σχήμα 2.35 Μοντέλα αντοχής συνάφειας-ολίσθησης (Obaida et al. 2021)

Εναλλακτική πειραματική διάταξη χρησιμοποίησαν σε πρόσφατη μελέτη τους οι Liu et al. (2022), οι οποίοι ερεύνησαν τη συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και ΙΑΜ γεωπολυμερούς μήτρας μέσω δοκιμών διπλής διάτμησης (double-lap shear tests). Σύμφωνα με τους συγγραφείς, η μέθοδος διπλής διάτμησης υπερτερεί της μεθόδου απλής διάτμησης, καθώς η ύπαρξη συμμετρίας την καθιστά πιο ελεγχόμενη και με ελαχιστοποιημένη την εκκεντρότητα φόρτισης. Έτσι οι Liu et al. (2022), διεξήγαγαν συνολικά 15 δοκιμές διπλής διάτμησης, σε δοκούς που περιλάμβαναν μία ζώνη $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 300\text{mm}$ για τη δοκιμή

και μία επιπλέον ζώνη για την αγκύρωση του ΙΑΜ. Εποπτική περιγραφή της πειραματικής διάταξης του πειράματος παρατίθεται στο Σχήμα 2.36. Οι παράμετροι των δοκιμών ήταν: (α) το είδος της μήτρας (γεωπολυμερές ή ρητίνη), (β) ο αριθμός των στρώσεων του σύνθετου υλικού (1 ή 2), και (γ) η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε για τη διείδυση των ινών στο κονίαμα. Το ύφασμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν από άνθρακα, ενώ το γεωπολυμερές κονίαμα παρασκευάστηκε με ανάμειξη ιπτάμενης τέφρας και σκόνης σκωρίας με αλκαλικό ενεργοποιητή (υδριάλος). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, η μορφή αστοχίας διαφέρει, αφού στην περίπτωση χρήσης γεωπολυμερούς κονιάματος εμφανίζεται αστοχία του σύνθετου υλικού, ενώ όταν γίνεται χρήση ρητίνης παρουσιάζεται αστοχία του υποστρώματος, της φαίνεται και στο Σχήμα 2.37. Συνολικά, το σύστημα ενίσχυσης με γεωπολυμερή μήτρα συμπεριφέρθηκε ικανοποιητικά. Αυτό γίνεται αντιληπτό από την αντοχή συνάφειας που εμφάνισε, η οποία κυμάνθηκε στο 93.6%-97.6% της αντίστοιχης αντοχής συνάφειας του συστήματος με ρητινούχο κονίαμα. Ομοίως, η μέγιστη διατμητική τάση και η δυσκαμψία έφτασαν σε ποσοστά 91%-94% και 95.7%-132.9% αντίστοιχα, ενώ η διατμητική τάση έναντι τιμών ολίσθησης πλησίασε σε ποσοστά 68.5%-98.2%.



Σχήμα 2.36 (α) Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης, (β) Πειραματική διάταξη διπλής διάτμησης (Liu et al. 2022)



Σχήμα 2.37 Μορφές αστοχίας δοκιμών (α) με γεωπολυμερές κονίαμα, (β) με ρητινούχο κονίαμα (Liu et al. 2022)

2.3 Επίλογος ανασκόπησης

Ολοκληρώνοντας το κεφάλαιο της ανασκόπησης και σύμφωνα με τις ερευνητικές εργασίες που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη υποενότητα, συμπεραίνεται η ευεργετική λειτουργία των IAM στην ενίσχυση των στοιχείων ΟΣ. Παράλληλα, τονίζεται η αναγκαιότητα αξιοποίησης νέων πόρων και μορφών υλικών, λόγω της έντονης ανησυχίας για την καταστροφή του περιβάλλοντος. Το γεγονός αυτό, καθιστά τα IAM γεωπολυμερούς μήτρας μία εξαιρετική εναλλακτική λύση έναντι των ΙΟΠ στις εφαρμογές του Πολιτικού Μηχανικού που σχετίζονται με ενισχύσεις υφιστάμενων κατασκευών. Υπογραμμίζεται ωστόσο ότι, ο αριθμός των υπαρχουσών μελετών είναι περιορισμένος και απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση της συμπεριφοράς του νέου βιώσιμου αυτού υλικού, πριν την ευρεία χρήση του.

Κεφάλαιο 3 Πειραματικό Πρόγραμμα

3.1 Παράμετροι διερεύνησης

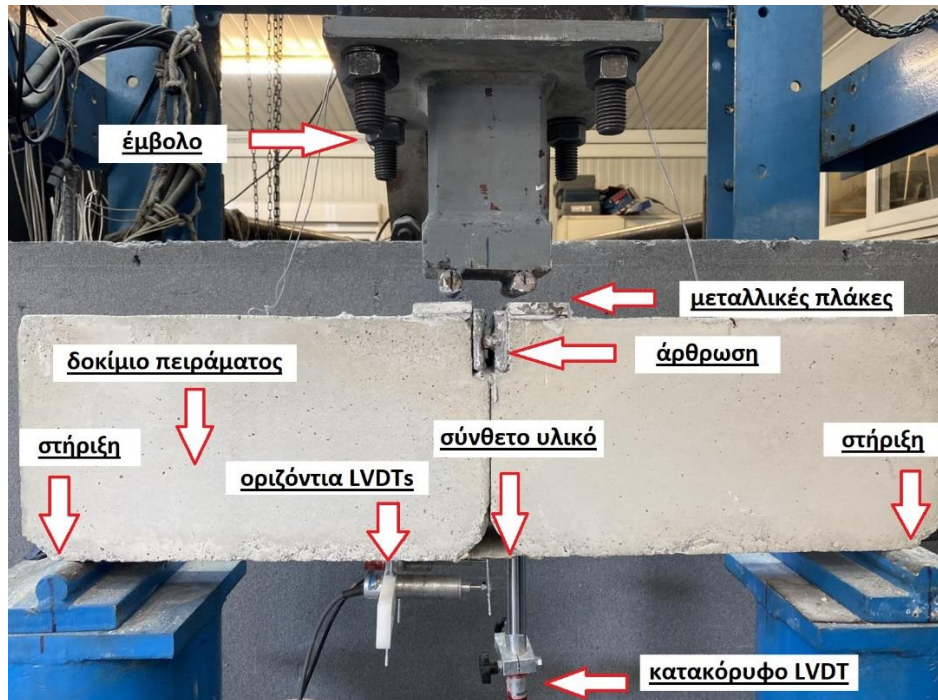
Παράμετροι διερεύνησης στην παρούσα διπλωματική εργασία αποτελούν: (α) το υλικό της μήτρας στο σύνθετο υλικό και (β) το μήκος επικόλλησης. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται δύο διαφορετικές σειρές πειραμάτων:

- η Σειρά Α, με δοκίμια ΟΣ με ΙΑΜ μήτρας γεωπολυμερούς και
- η Σειρά Β, με δοκίμια ΟΣ με ΙΑΜ τσιμεντοειδούς μήτρα.

Σε κάθε σειρά πειραμάτων τα μήκη επικόλλησης είναι τα εξής: (α) 50 mm, (β) 100 mm και (γ) 200 mm.

3.2 Πειραματική διάταξη

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας διενεργήθηκαν συνολικά 12 δοκιμές έμμεσης διάτμησης (ή με βάση την αγγλική ορολογία “modified beam tests”). Σε κάθε δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν 2 πρισματικά δοκίμια ΟΣ που συνδέονταν μεταξύ τους με άρθρωση στο άνω μέρος και με το σύνθετο υλικό στο κάτω μέρος. Το μήκος επικόλλησης του ΙΑΜ στο ένα μπλοκ σκυροδέματος ήταν σταθερό και ίσο με 300 mm, ενώ στο δεύτερο μπλοκ διέφερε (50 mm, 100 mm ή 200 mm). Συνολικά το δοκίμιο του κάθε πειράματος στηριζόταν σε δύο αρθρώσεις με καθαρή απόσταση μεταξύ αυτών 700 mm. Το ΙΑΜ δεν ερχόταν σε επαφή με τις αρθρώσεις, έτσι ώστε οι μεταλλικές πλάκες των αρθρώσεων να μην του ασκούν απ’ ευθείας πίεση. Εποπτική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1

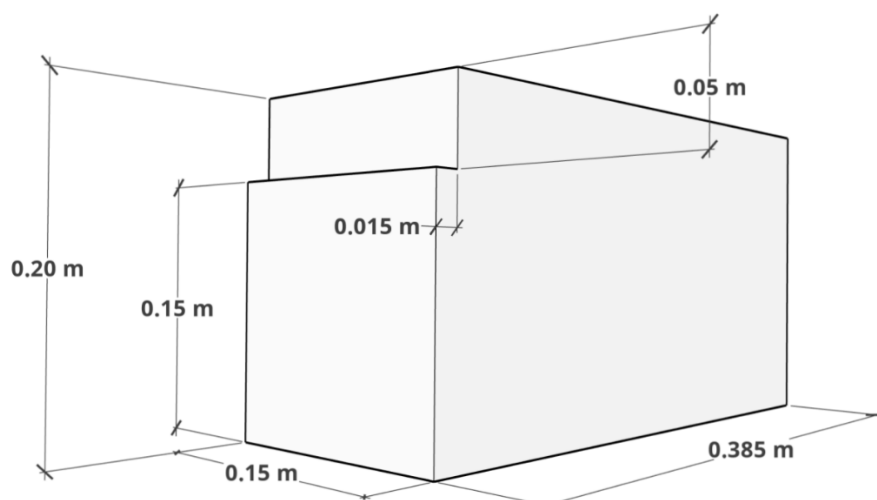


Σχήμα 3.1 Πειραματική διάταξη

Το φορτίο υποβλήθηκε μονοτονικά μέσω σερβό-υδραυλικού συστήματος με σταθερό ρυθμό επιβολής μετακινήσεων ίσο με 0.01 mm/sec. Στο άκρο του εμβόλου προσαρμόστηκε άκαμπτο μεταλλικό εξάρτημα για να μεταφέρει το φορτίο σε δύο σημεία, με αποτέλεσμα τα δοκίμια να υποβάλλονται σε κάμψη τεσσάρων σημείων. Μεταλλικές πλάκες πλάτους 50 mm χρησιμοποιήθηκαν στα δύο σημεία όπου μεταφερόταν το φορτίο, για να αποφευχθεί η αστοχία λόγω συγκέντρωσης τάσης σημειακά. Για την καταγραφή των μετακινήσεων έγινε χρήση οριζόντιων και κατακόρυφων αισθητήρων (LVDTs), με ρυθμό καταγραφής δεδομένων 2 Hz.

3.3 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. Η γεωμετρία των δοκιμών παρουσιάζεται αναλυτικά στο Σχήμα 3.2 και τα επιμέρους χαρακτηριστικά αυτών στον Πίνακα 3.1.



Σχήμα 3.2 Σχηματική απεικόνιση πρισματικού δοκιμίου ΟΣ.

Πίνακας 3.1 Συγκεντρωτικός πίνακας με χαρακτηριστικά δοκιμών

Δοκίμιο	lb [mm]	Αριθμός στρώσεων	Τύπος μήτρας	Ιδιότητες Μήτρας	
				Έμμεση εφελκυστική αντοχή υπό κάμψη [MPa]	Θλιπτική αντοχή [MPa]
GP_3C_50-1	50	3	Γεωπολυμερής	7.9	47.0
GP_3C_50-2					
GP_3C_100-1	100	3	Γεωπολυμερής	5.8	37.7
GP_3C_100-2					
GP_3C_200-1	200	3	Γεωπολυμερής	5.8	37.7
GP_3C_200-2					
CM_3C_50-1	50	3	Τσιμεντοειδής	6.3	30.2
CM_3C_50-2					
CM_3C_100-1	100	3	Τσιμεντοειδής	6.3	30.2
CM_3C_100-2					
CM_3C_200-1	200	3	Τσιμεντοειδής	6.3	30.2
CM_3C_200-2					

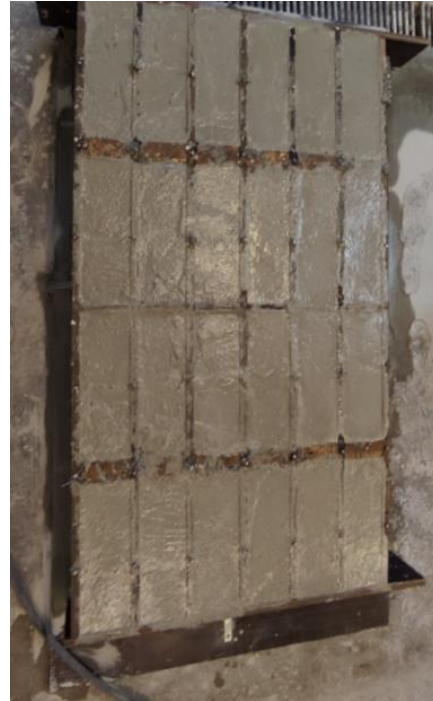
Ο οπλισμός των δοκιμών αποτελούταν από 2 ράβδους Φ8 με νευρώσεις στην κάτω παρειά και λείες ράβδους Φ6, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3. Χαρακτηριστικά στάδια από τη διαδικασία της σκυροδέτησης παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.3 Απεικόνιση καλουπιού με σπλισμό δοκιμίου.



(α)



(β)

Σχήμα 3.4 (α) Καλούπια δοκιμίων πριν την σκυροδέτηση, (β) καλούπια δοκιμίων μετά την σκυροδέτηση.

3.4 Ιδιότητες υλικών

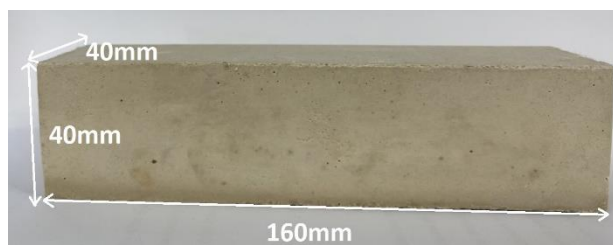
3.4.1 Σκυρόδεμα

Για την κατασκευή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε έτοιμο εργοταξιακό γαρμπιλοσκυρόδεμα κατηγορίας αντοχής C12/15. Τρία κυβικά δοκίμια πλευράς 150 mm υποβλήθηκαν σε δοκιμές θλίψης και κατά μέσο όρο προέκυψε ότι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος είναι 20.6 MPa και τυπική απόκλιση 0.52 MPa.

3.4.2 Μηχανικές ιδιότητες γεωπολυμερούς κονιάματος

Για την παρασκευή της μήτρας γεωπολυμερούς σύστασης χρησιμοποιήθηκαν ως πρώτες ύλες: μετακαολίνη και ασβεστολιθική θραυστή άμμος σε διαβαθμίσεις 0 mm - 0.5 mm και 0.5 mm – 1 mm, σε συνδυασμό με διάλυμα ενεργοποίησης πυριτικού καλίου και νερό (απιονισμένο). Το κονίαμα περιείχε επίσης ίνες πολυπροπυλενίου (PP), με μήκος ίνας 6 mm.

Σημειώνεται ότι παρασκευάστηκαν δύο κονιάματα, καθώς η επικόλληση των δοκιμών πραγματοποιήθηκε τμηματικά. Για τον ακριβή προσδιορισμό της αντοχής του κονιάματος και με βάση το πρότυπο BS EN 1015-11:1999, λήφθηκαν τρία ορθογωνικά πρισματικά δοκίμια ανά μίγμα, διαστάσεων 40 mm × 40 mm × 160 mm όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Κατόπιν δοκιμών, αρχικά κάμψης τριών σημείων και εν συνεχεία θλίψης, προέκυψαν για τα δύο μείγματα κατά μέσο όρο τα εξής: (α) έμμεση εφελκυστική αντοχή από κάμψη 7.9 MPa, θλιπτική αντοχή 47.0 MPa και τυπικές αποκλίσεις 0.31 MPa και 3.46 MPa αντίστοιχα και (β) έμμεση εφελκυστική αντοχή από κάμψη 5.8 MPa, θλιπτική αντοχή 37.7 MPa και τυπικές αποκλίσεις 0.45 MPa και 5.6 MPa αντίστοιχα.



Σχήμα 3.5 Πρισματικό δοκίμιο γεωπολυμερούς κονιάματος.

3.4.3 Μηχανικές ιδιότητες τσιμεντοειδούς κονιάματος

Το τσιμεντοκονίαμα που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα εμπορικά διαθέσιμο τσιμεντοειδές κονίαμα γενικής χρήσης, με ενεργά ποζολανικά συστατικά, σχεδιασμένο για εξωτερική χρήση σε δομικά στοιχεία. Οι μηχανικές του ιδιότητες, όπως αυτές δίνονται από τον κατασκευαστή, σημειώνονται στον Πίνακα 3.2. Ο λόγος νερού/κονιάματος που χρησιμοποιήθηκε είναι 0.2.

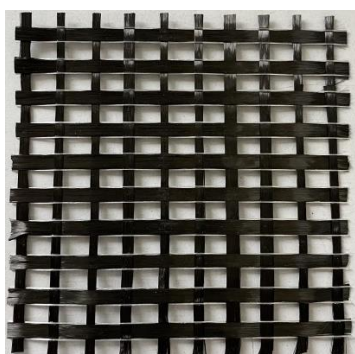
Πίνακας 3.2 Μηχανικές ιδιότητες τσιμεντοκονιάματος.

Αντοχή σε θλίψη	Τάξεως M20
Αντοχή σε κάμψη	0.15 N/mm ²

Για τον ακριβή προσδιορισμό της αντοχής του κονιάματος, κατά τη διαδικασία παρασκευής λήφθηκαν έξι πρισματικά δοκίμια, με βάση το πρότυπο BS EN 1015-11:1999, διαστάσεων 40 mm × 40 mm × 160 mm και κατόπιν δοκιμών προέκυψαν κατά μέσο όρο: α) έμμεση εφελκυστική αντοχή από κάμψη 6.3 MPa, θλιπτική αντοχή 30.2 MPa και τυπικές αποκλίσεις 0.56 MPa και 2.25 MPa αντίστοιχα.

3.4.4 Ιδιότητες πλέγματος

Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι πλέγμα άνθρακα υψηλής αντοχής και απεικονίζεται στο Σχήμα 3.6. Οι ιδιότητες του πλέγματος παρατίθενται αναλυτικά στον Πίνακα 3.3. Σημειώνεται ότι, σε κάθε δοκίμιο χρησιμοποιήθηκαν συνολικά τρεις στρώσεις πλέγματος.



Σχήμα 3.6 Πλέγμα άνθρακα.

Πίνακας 3.3 Ιδιότητες πλέγματος άνθρακα σύμφωνα με τον κατασκευαστή.

Υλικό	Άνθρακας
Επικάλυψη κλώνων ινών	Όχι
Μέτρο ελαστικότητας E (GPa)	252
Βάρος (g/m ²)	170
Εφελκυστική αντοχή (kN/m)	240
Μέγεθος πλέγματος (mm×mm)	10×10
Ονομαστικό πάχος t _f (mm)	0,048

3.5 Προετοιμασία δοκιμών

3.5.1 Πρισματικά δοκίμια σκυροδέματος

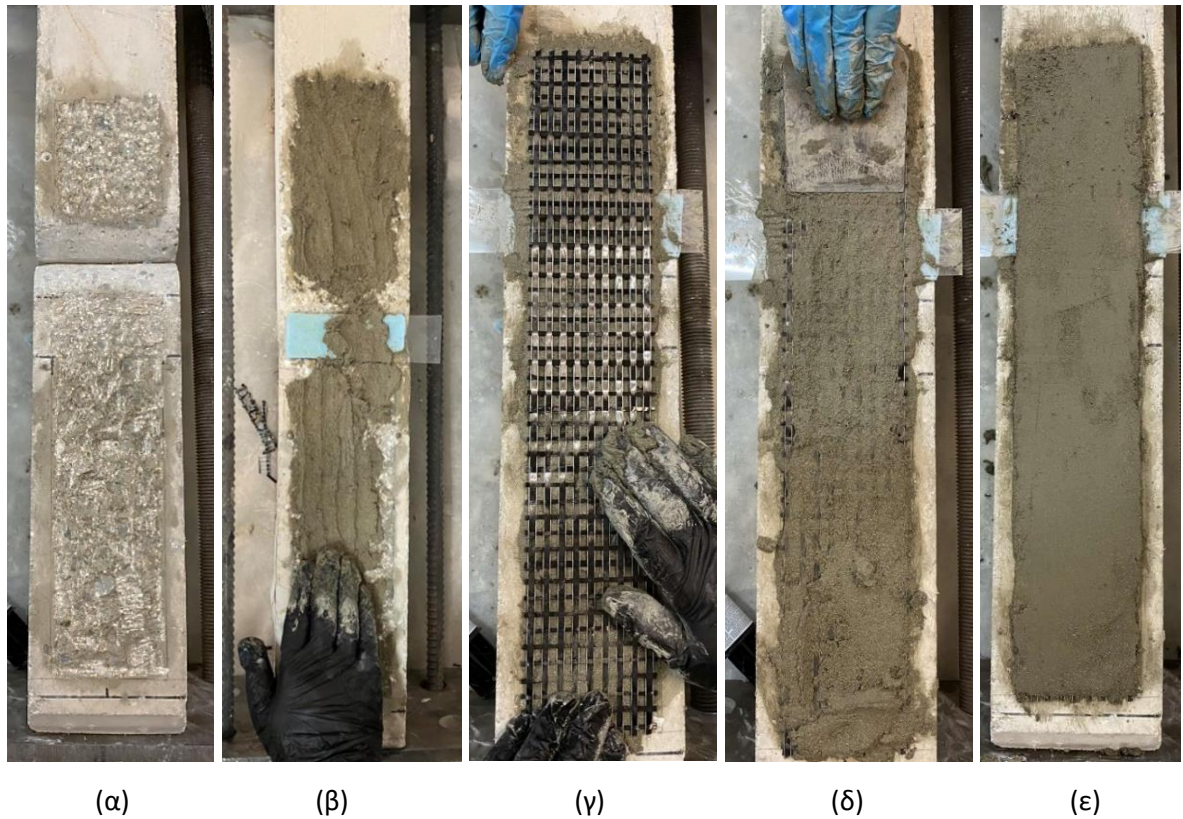
Αρχικά, τα δοκίμια ΟΣ υποβλήθηκαν σε εκτράχυνση της επιφάνειας τοπικά, στην περιοχή όπου θα βρίσκονται σε επαφή με το σύνθετο υλικό. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε στρογγύλεμα των γωνιών των δοκιμών, με σκοπό την αποφυγή συγκέντρωσης τάσεων. Τέλος σημειώνεται ότι, έγινε προσεκτικός καθαρισμός του υποστρώματος από σκόνη, κομμάτια αδρανών κ.α..

3.5.2 Διαδικασία επικόλλησης

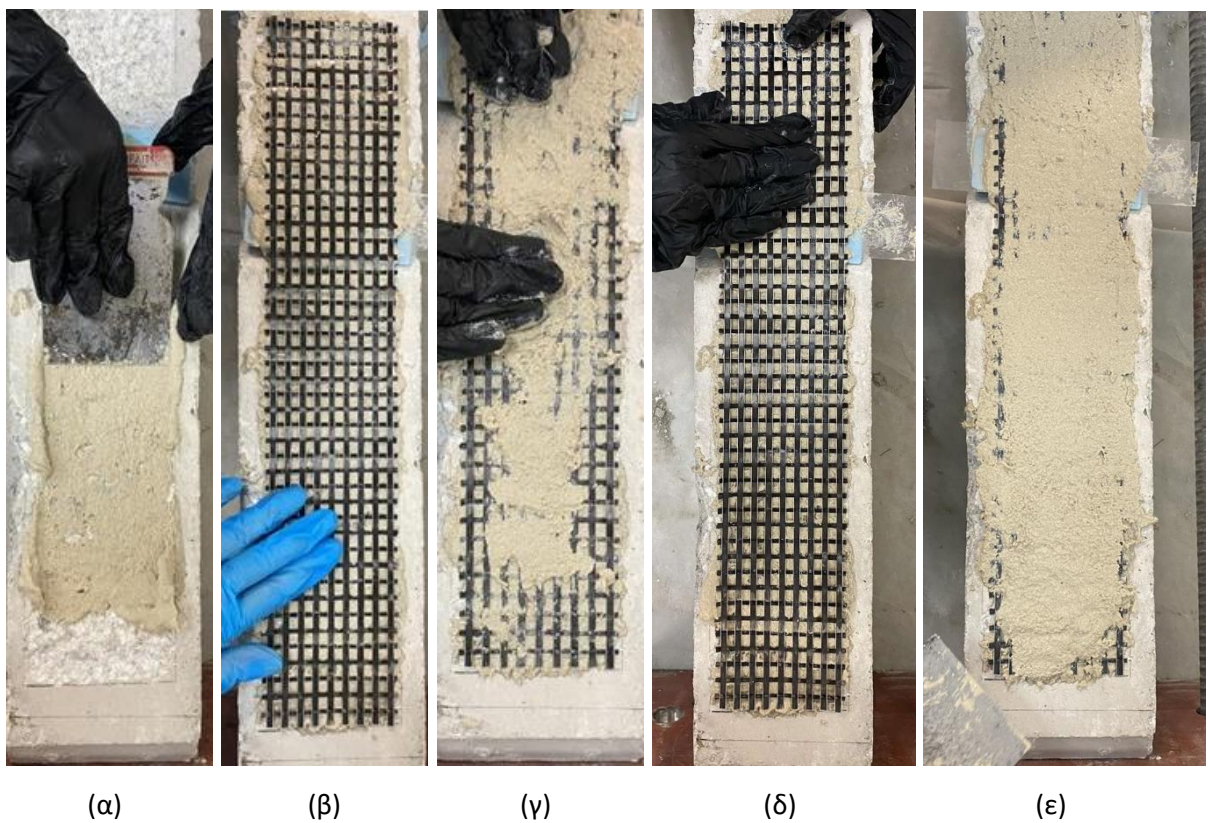
Η διαδικασία επικόλλησης είναι κοινή και στις δύο σειρές δοκιμών, και αποτελείται από 7 βασικά στάδια:

- Στάδιο I: Εφαρμογή 1^{ης} στρώσης κονιάματος πάχους 2 mm-3 mm
- Στάδιο II: Τοποθέτηση 1^{ης} στρώσης πλέγματος- Εμποτισμός στο κονίαμα μέσω ήπιας πίεσης
- Στάδιο III: Εφαρμογή 2^{ης} στρώσης κονιάματος πάχους 2 mm-3 mm
- Στάδιο IV: Τοποθέτηση 2^{ης} στρώσης πλέγματος
- Στάδιο V: Εφαρμογή 3^{ης} στρώσης κονιάματος πάχους 2 mm-3 mm
- Στάδιο VI: Τοποθέτηση 3^{ης} στρώσης πλέγματος
- Στάδιο VII: Εφαρμογή τελικής στρώσης κονιάματος πάχους 2 mm-3 mm – Φινίρισμα

Χαρακτηριστικές εικόνες από τα παραπάνω στάδια παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.7 και 3.8.



Σχήμα 3.7 Διαδικασία επικόλλησης με IAM τσιμεντοειδούς μήτρας (α) διαβροχή υποστρώματος, (β) Στάδιο I, (γ) Στάδιο II, (δ) Στάδιο III και (ε) Στάδιο VII



Σχήμα 3.8 Διαδικασία επικόλλησης με IAM γεωπολυμερούς μήτρας (α) Στάδιο I, (β) Στάδιο II, (γ) Στάδιο III, (δ) Στάδιο IV και (ε) Στάδιο VII

Όπως φαίνεται και στα Σχήματα 3.7 και 3.8, ένα λεπτό πλαστικό φιλμ στερεωμένο σε κομμάτι εξηλασμένης πολυστερίνης χρησιμοποιήθηκε για να επιτευχθεί ταυτόχρονη ενίσχυση των 2 πρισματικών δοκιμίων ΟΣ, χωρίς να υπάρξει κενό μεταξύ αυτών, το οποίο αφαιρέθηκε 48 ώρες μετά την επικόλληση του IAM. Σημειώνεται επίσης ότι, στην περίπτωση της τσιμεντοειδούς μήτρας, χρειάστηκε διαβροχή του σκυροδέματος με νερό πριν την εφαρμογή της 1^{ης} στρώσης, για να μην απορροφήσει το υπόστρωμα υγρασία από το κονίαμα.

3.5.3 Συντήρηση δοκιμίων

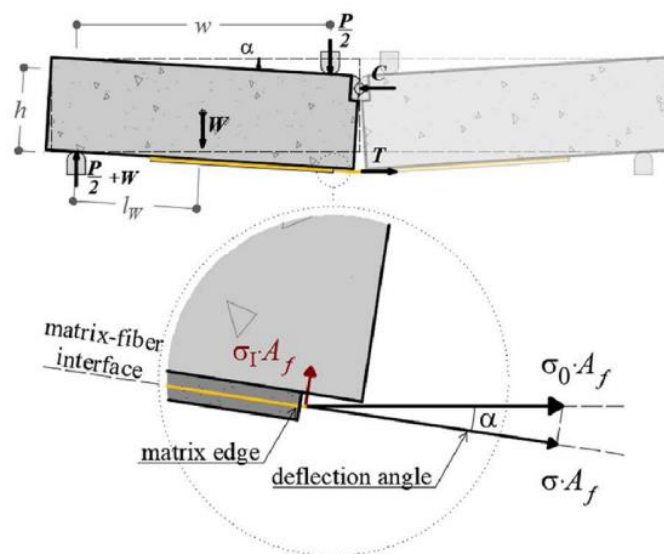
Τα δοκίμια μετά την επικόλληση, διατηρήθηκαν στο χώρο του εργαστηρίου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Σημειώνεται ότι, τα δοκίμια της Σειράς Α δεν χρειάστηκαν ειδική μεταχείριση, σε αντίθεση με τα αντίστοιχα δοκίμια της Σειράς Β, στα οποία πραγματοποιήθηκε διαβροχή με νερό του IAM τσιμεντοειδούς μήτρας, 2 φορές την ημέρα για χρονικό διάστημα τριών ημερών.

Κεφάλαιο 4 Πειραματικά Αποτελέσματα και Σχολιασμός

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών. Σημειώνεται ότι η επεξεργασία των δεδομένων έγινε με τη χρήση υπολογιστικού φύλλου excel. Για τον υπολογισμό της ορθής τάσης σ στο σύνθετο υλικό χρησιμοποιήθηκε η Εξ.(4.1):

$$\sigma = \frac{P \times w}{2 \times h} \quad (4.1)$$

όπου P είναι το φορτίο του εμβόλου, w η απόσταση μεταξύ της στήριξης και του σημείου άσκησης του φορτίου και h η απόσταση από το μέσο της άρθρωσης έως το μέσο του σύνθετου υλικού. Η Εξ.(4.1) προκύπτει από ισορροπία του συστήματος, όπως ακριβώς φαίνεται και στο διάγραμμα ελευθέρου σώματος του Σχήματος 4.1.



Σχήμα 4.1 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος έμμεσης διάτμησης. (Calabrese et al, 2021)

4.1 Αποτελέσματα Σειράς Α (μήτρα γεωπολυμερούς)

Ακολουθεί ο Πίνακας 4.1 με τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών της Σειράς Α. Η ονομασία των δοκιμών προκύπτει με βάση την ακόλουθη σημειογραφία GP_3C_X_Y, όπου

το GP υποδεικνύει τη μήτρα γεωπολυμερούς σύστασης (Geopolymer), το 3C τις τρεις στρώσεις άνθρακα (Carbon), το X = 50 ή 100 ή 200 είναι το μήκος της επικόλλησης και τέλος το Y παίρνει τις τιμές 1 ή 2, καθώς για κάθε μήκος επικόλλησης έχουν κατασκευαστεί δύο όμοια δοκίμια.

Πίνακας 4.1 Πειραματικά αποτελέσματα Σειράς A

Δοκίμιο	Μήκος επικόλλησης [mm]	z [mm]	w [mm]	P _{max} [kN]	σ _{max} [MPa]	Μορφή αστοχίας
GP_3C_50-1	50	178	316	11.34	784.63	Τύπου I*
GP_3C_50-2		177	325	10.58	757.02	Τύπου I, Τύπου II**
GP_3C_100-1	100	181	318	8.89	608.46	Τύπου I
GP_3C_100-2		179	313	8.20	559.00	
GP_3C_200-1	200	182	314	13.71	922.01	Τύπου I, Τύπου II
GP_3C_200-2		183	313	13.91	926.96	Τύπου I

*Τύπου I = αποκόλληση στη διεπιφάνεια μήτρας-πλέγματος, **Τύπου II = αποκόλληση από το υπόστρωμα σκυροδέματος με μερική αποκόλληση σκυροδέματος.

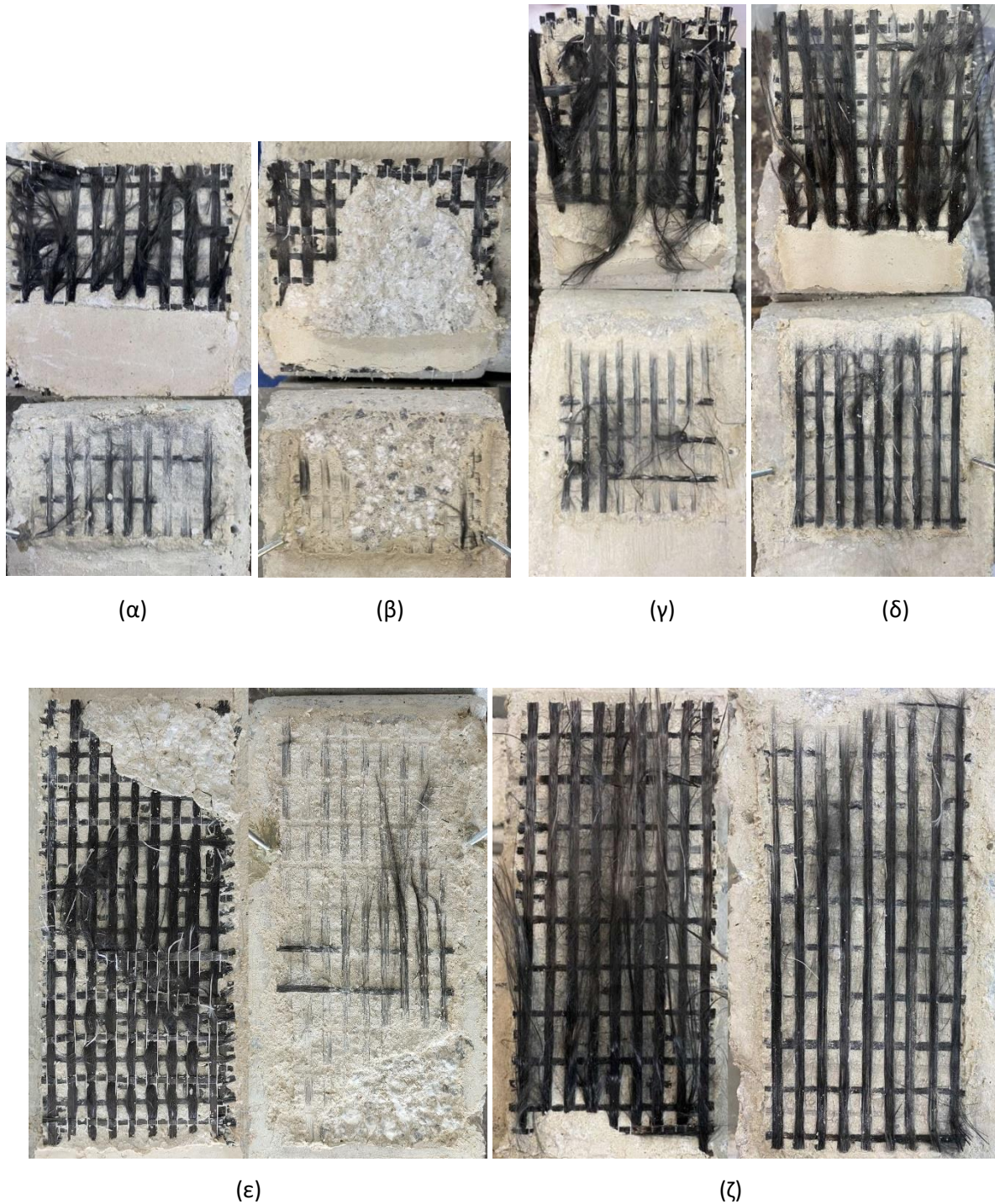
Συγκριτικά με το φορτίο που καταγράφηκε στα δοκίμια GP_3C_50_1 και GP_3C_50_2, τα δοκίμια GP_3C_100_1 και GP_3C_100_2 εμφάνισαν χαμηλότερο φορτίο κατά περίπου 2 kN. Αυτό δεν ήταν αναμενόμενο, καθώς σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, αυξάνοντας το μήκος επικόλλησης από 50 mm σε 100 mm θα έπρεπε να παρατηρηθεί μη γραμμική αύξηση του φορτίου. Ωστόσο, υπογραμμίζεται ότι για την επικόλληση των δοκιμών, όπως ήδη αναφέρθηκε και στην υποενότητα 3.3.2, παρασκευάστηκαν 2 κονιάματα, τα οποία κατόπιν δοκιμών προέκυψε ότι είχαν διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Το κονίαμα που χρησιμοποιήθηκε για την επικόλληση των δοκιμών με $l_b=50\text{mm}$ είχε καμπτική αντοχή 7.9 MPa και θλιπτική αντοχή 47.0 MPa, ενώ για τα μήκη επικόλλησης των 100 mm και των 200 mm χρησιμοποιήθηκε κονίαμα με καμπτική αντοχή 5.7 MPa και θλιπτική αντοχή 48.9 MPa. Επομένως, οι μειωμένες τιμές φορτίου που εμφάνισαν τα δοκίμια με μήκη επικόλλησης 100 mm και 200 mm, μπορούν να αποδοθούν στην χρήση κονιάματος χαμηλότερης αντοχής. Οι διαφορετικές αντοχές στα κονιάματα της σύστασης, πιθανόν να προέκυψαν λόγω διαφορετικών περιβαλλοντικών συνθηκών, καλύτερης ανάμειξης των

υλικών μεταξύ τους στο πρώτο κονίαμα ή καλύτερου εμποτισμού των ινών εντός του απιονισμένου νερού κ.α..

Όπως ήδη αναφέρθηκε στον Πίνακα 4.1, οι μορφές αστοχίας που εμφανίστηκαν στα δοκίμια, κατηγοριοποιήθηκαν ως εξής:

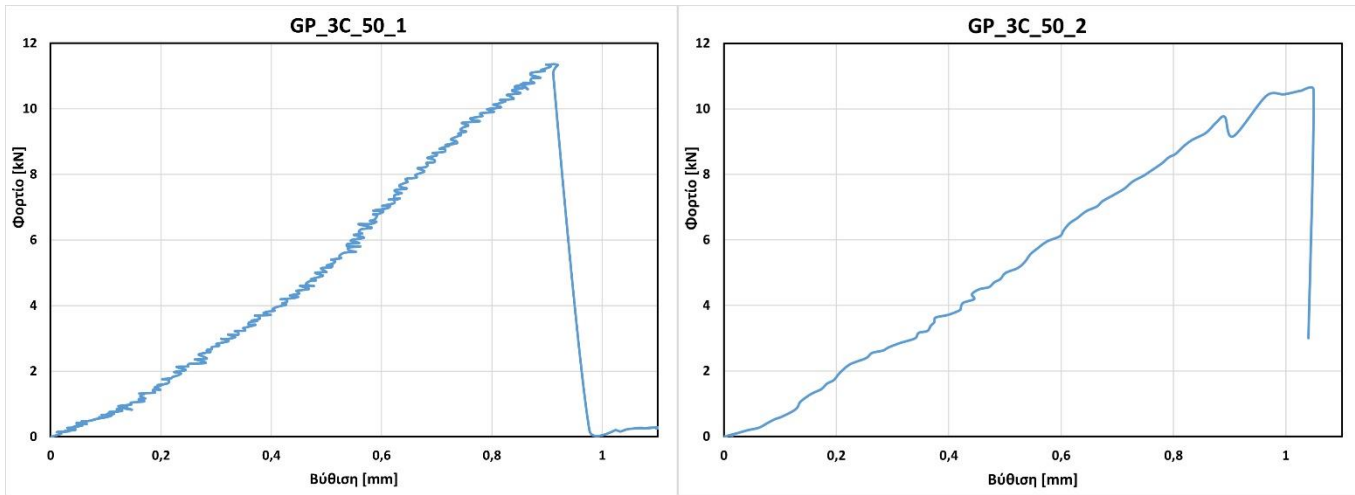
- Τύπου I: Αποκόλληση στη διεπιφάνεια μήτρας-πλέγματος (ή με βάση την αγγλική ορολογία Debonding at the matrix–textile interface or interlaminar shearing)
- Τύπου II: Αποκόλληση από το υπόστρωμα σκυροδέματος με μερική αποκόλληση σκυροδέματος (ή με βάση την αγγλική ορολογία Debonding from the concrete surface accompanied with peeling off of the concrete cover)

Σε όλα τα δοκίμια, εκτός των GP_3C_50_2 και GP_3C_200-1, εμφανίστηκε αποκλειστικά η μορφή αστοχίας Τύπου I, γεγονός που σημαίνει ότι ο δεσμός στην διεπιφάνεια σκυροδέματος-κονιάματος είναι ισχυρότερος από τον δεσμό στο εσωτερικό του σύνθετου υλικού, το οποίο και αστοχεί. Έτσι, μέρος του σύνθετου υλικού παραμένει προσκολλημένο στο υπόστρωμα. Συγκεκριμένα, η αποκόλληση πραγματοποιήθηκε μεταξύ 1^{ης} στρώσης πλέγματος και κονιάματος, με αποτέλεσμα το κομμάτι του σύνθετου υλικού με τις 2 στρώσεις πλέγματος να αποκολλάται από το υπόλοιπο δοκίμιο. Τα δοκίμια GP_3C_50_2 και GP_3C_200-1 εμφάνισαν σε τμήμα τους και την μορφή αστοχίας Τύπου II, με μέρος της επικάλυψης του σκυροδέματος να αποκολλάται μαζί με το σύνθετο υλικό, υποδεικνύοντας έτσι ισχυρή συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και κονιάματος. Αναλυτικά οι εικόνες αστοχίας των δοκιμίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.2.

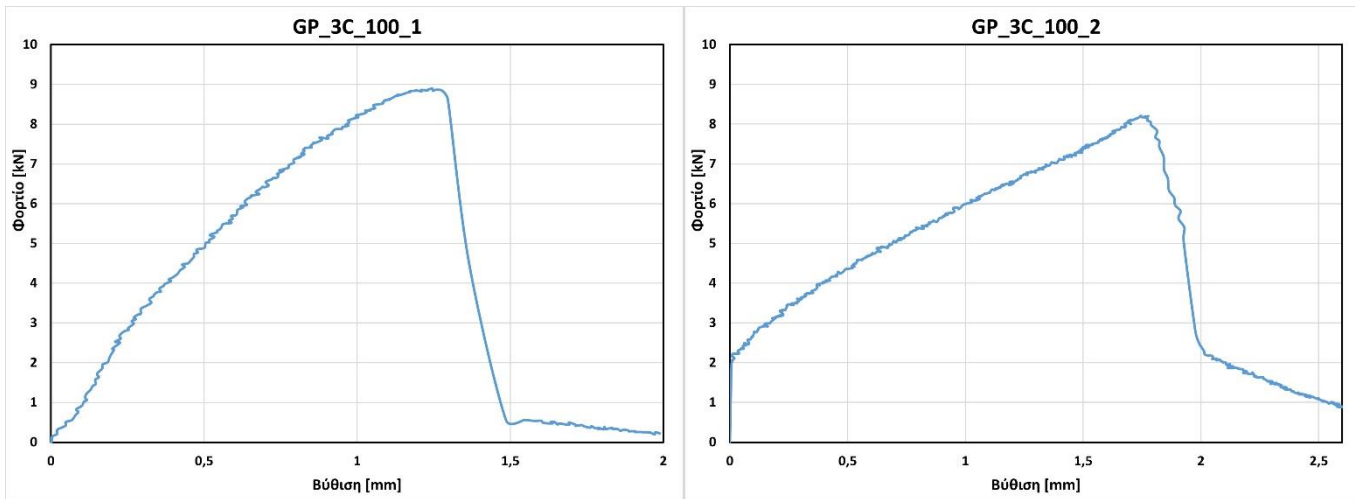


Σχήμα 4.2 Εικόνες αστοχίας δοκιμών Σειράς Α (α) GP_3C_50_1, (β) GP_3C_50_1, (γ) GP_3C_50_1, (δ) GP_3C_50_1, (ε) GP_3C_50_1 και (ζ) GP_3C_50_1

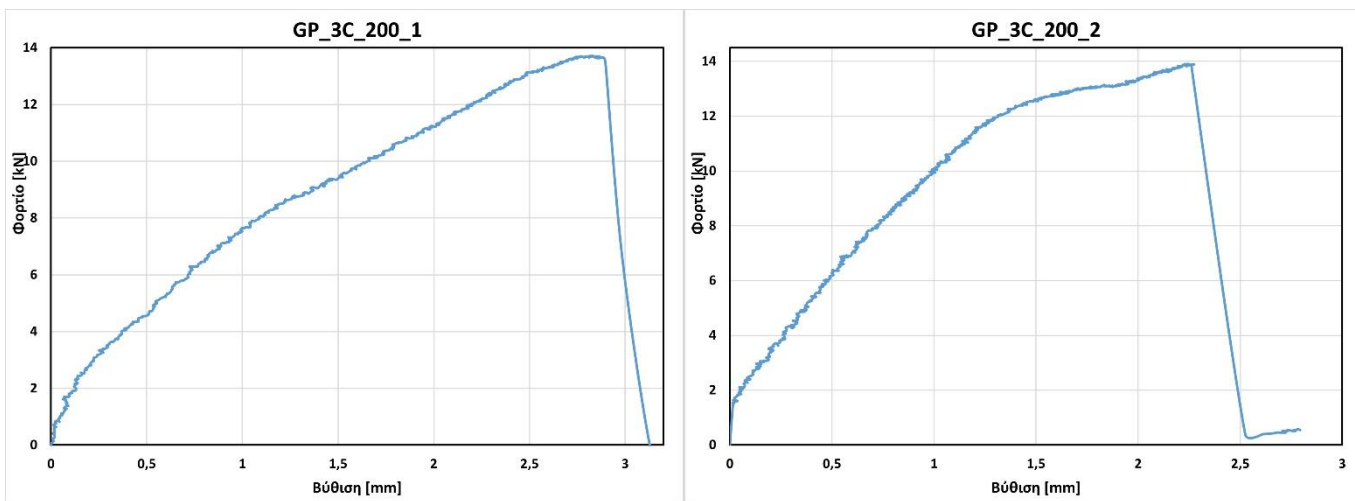
Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου-βύθισης των δοκιμών της Σειράς Α. Σημειώνεται ότι το φορτίο είναι το φορτίου του εμβόλου μετρημένο σε μονάδες [kN] και η βύθιση είναι η κατακόρυφη μετακίνηση που καταγράφεται από το LVDT σε μονάδες [mm].



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 4.3 Καμπύλες φορτίου-βύθισης δοκιμών (α) GP_3C_50_1 και GP_3C_50_2, (β) GP_3C_100_1 και GP_3C_100_2 και (γ) GP_3C_200_1 και GP_3C_200_2

Σύμφωνα με τις καμπύλες του Σχήματος 4.3, με την αύξηση του μήκους επικόλλησης από 50 mm σε 100 mm παρουσιάζεται μείωση στο μέγιστο φορτίο, η οποία ανέρχεται περίπου στα 2.5 kN. Ακολούθως, με την περαιτέρω αύξηση του μήκους επικόλλησης στα 200 mm σημειώνεται σημαντική αύξηση του μέγιστου φορτίου κατά περίπου 5.5 kN, σε σχέση με το αντίστοιχο μέγιστο φορτίο που καταγράφηκε στα δοκίμια με $l_b=100$ mm. Όπως ήδη έχει αναφερθεί, το γεγονός αυτό αποδίδεται στις διαφορετικές αντοχές των κονιαμάτων. Επομένως, με βάση τα συγκεκριμένα δεδομένα δε μπορεί να προσδιοριστεί το ζητούμενο ενεργό μήκος επικόλλησης. Ωστόσο, η αύξηση των 5.5 kN στην μετάβαση από τα 100mm στα 200 mm, η οποία αντιστοιχεί σε ποσοστό 64%, πιθανώς αποτελεί ένδειξη ότι το ενεργό μήκος επικόλλησης είναι μεγαλύτερο από 200 mm.

4.2 Αποτελέσματα Σειράς Β (τσιμεντοειδής μήτρα)

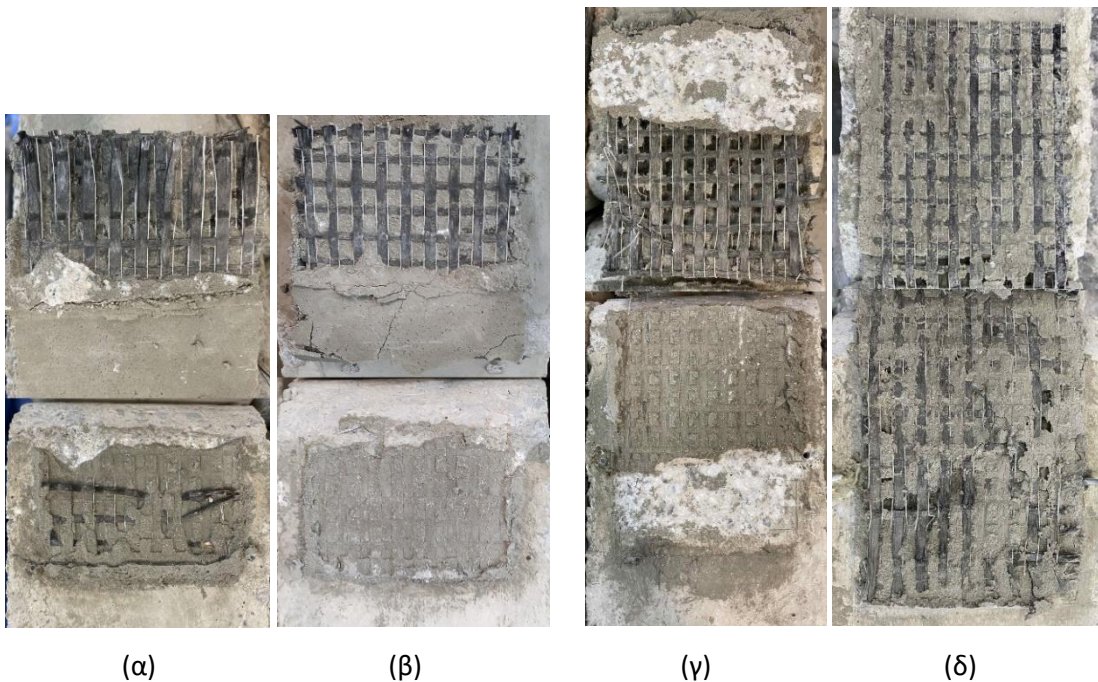
Ακολουθεί ο Πίνακας 4.2 με τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών της Σειράς Β. Κατ' αντιστοιχία με τα δοκίμια της Σειράς Α, η ονομασία των δοκιμών της Σειράς Β προκύπτει με βάση την ακόλουθη σημειογραφία CM_3C_X_Y, όπου το CM υποδεικνύει τη μήτρα τσιμεντοειδούς σύστασης (Cementitious), το 3C τις τρεις στρώσεις άνθρακα (Carbon), το X = 50 ή 100 ή 200 είναι το μήκος της επικόλλησης και τέλος το Y παίρνει τις τιμές 1 ή 2, καθώς για κάθε μήκος επικόλλησης έχουν κατασκευαστεί δύο όμοια δοκίμια.

Πίνακας 4.2 Πειραματικά αποτελέσματα Σειράς Β

Δοκίμιο	Μήκος επικόλλησης	z	w	P _{max}	σ _{max}	Μορφή αστοχίας
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[Mpa]	
CM_3C_50-1	50	181	314	6.75	456.32	Τύπου Ι
CM_3C_50-2		183	315	6.14	412.16	
CM_3C_100-1	100	186	313	7.89	517.44	Τύπου Ι, Τύπου ΙΙ
CM_3C_100-2		181	315	7.65	518.93	
CM_3C_200-1	200	176	313	7.56	523.76	Τύπου Ι

CM_3C_200-2		184	312	7.4	489.01	
-------------	--	-----	-----	-----	--------	--

Στο Σχήμα 4.2 που ακολουθεί, παρατίθενται οι εικόνες αστοχίας των δοκιμών της Σειράς Β. Σημειώνεται ότι σε όλα τα δοκίμια, εκτός του CM_3C_100_1, εμφανίστηκε αποκλειστικά η μορφή αστοχίας Τύπου Ι, υποδεικνύοντας ότι ο δεσμός στην διεπιφάνεια σκυροδέματος-κονιάματος είναι ισχυρότερος από τον δεσμό στο εσωτερικό του σύνθετου υλικού, το οποίο αστοχεί και μέρος του παραμένει προσκολλημένο στο υπόστρωμα. Συγκεκριμένα, για όλα τα δοκίμια, εκτός του CM_3C_100-2, η αποκόλληση πραγματοποιήθηκε μεταξύ 1^{ης} στρώσης πλέγματος και κονιάματος, με αποτέλεσμα το κομμάτι του σύνθετου υλικού με τις 2 στρώσεις πλέγματος να αποκολλάται από το υπόλοιπο δοκίμιο. Στο δοκίμιο CM_3C_100_2 η αποκόλληση πραγματοποιήθηκε μεταξύ 2^{ης} στρώσης πλέγματος και κονιάματος και έτσι το κομμάτι του σύνθετου υλικού που αποκολλήθηκε περιλάμβανε μόνο μία στρώση πλέγματος. Το δοκίμιο CM_3C_100_1, εμφάνισε συνδυαστικά και τις δύο μορφές αστοχίας, με τμήμα αυτού να παρουσιάζει αποκόλληση από το υπόστρωμα σκυροδέματος με μερική αποκόλληση σκυροδέματος. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι στα δοκίμια CM_3C_200_1 και CM_3C_200_2 η αποκόλληση παρουσιάστηκε στην μεγάλη πλευρά (300 mm) και όχι στο εξεταζόμενο μήκος επικόλλησης (200 mm).





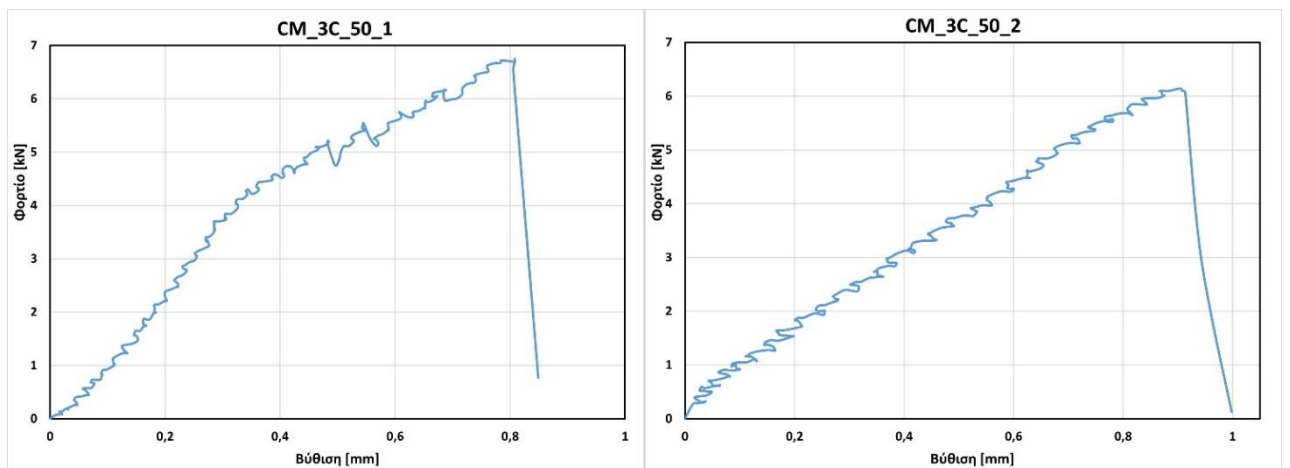
(ε)

(ζ)

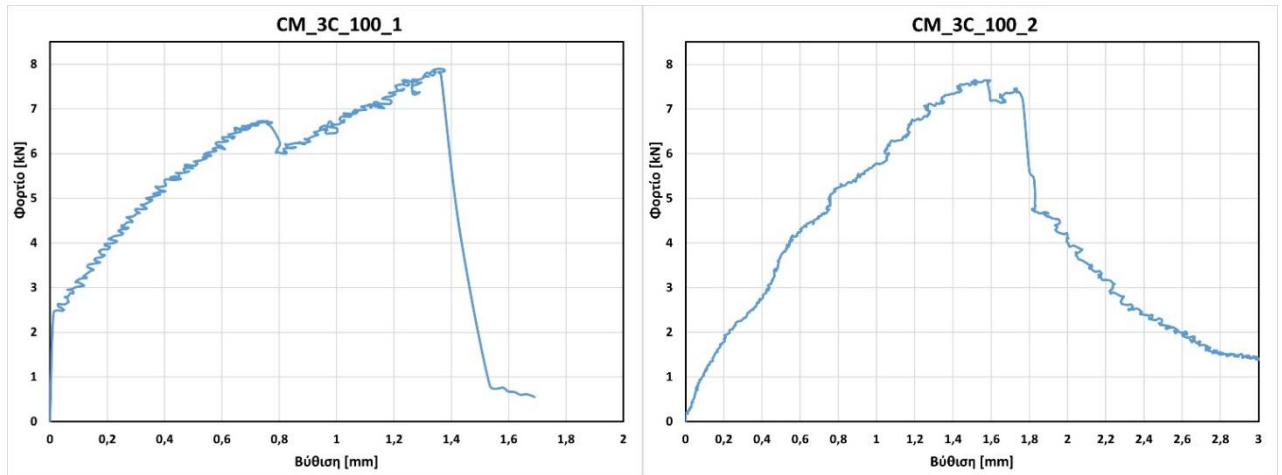
Σχήμα 4.4 Εικόνες αστοχίας δοκιμών Σειράς Β (α) CM_3C_50_1, (β) CM_3C_50_1, (γ) CM_3C_50_1, (δ) CM_3C_50_1, (ε) CM_3C_50_1 και (ζ) CM_3C_50_1

Στο Σχήμα 4.5 παρατίθενται οι καμπύλες φορτίου-βύθισης των δοκιμών της Σειράς

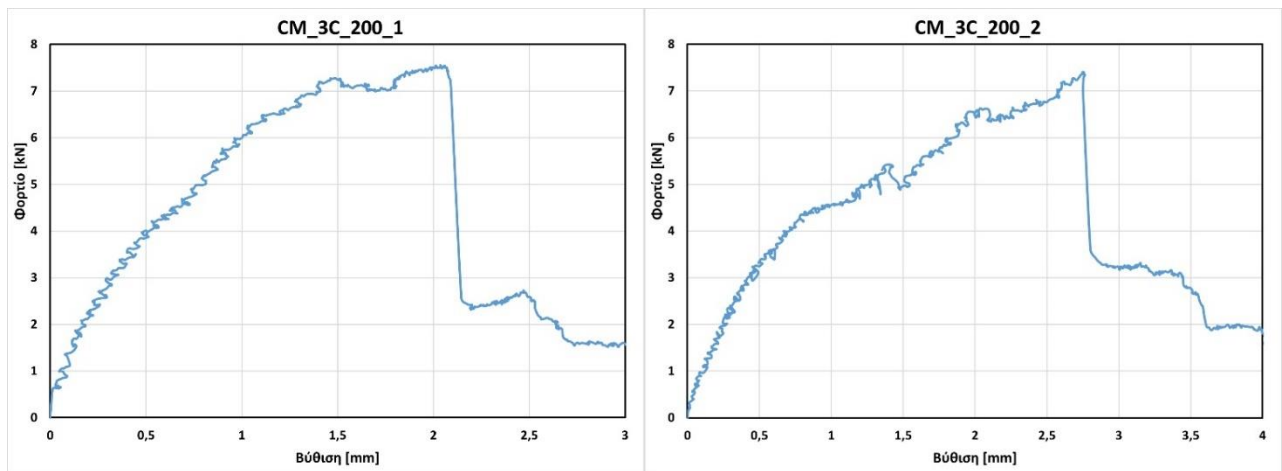
Β.



(α)



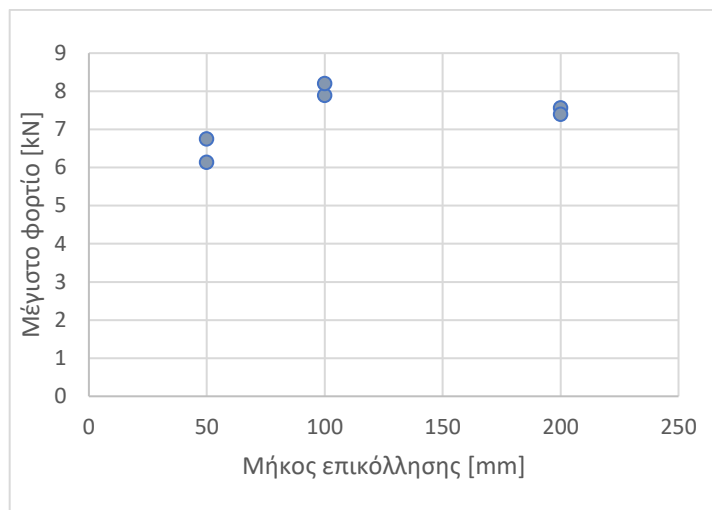
(β)



(γ)

Σχήμα 4.5 Καμπύλες φορτίου-βύθισης δοκιμών (α) CM_3C_50_1 και CM_3C_50_2, (β) CM_3C_100_1 και CM_3C_100_2 και (γ) CM_3C_200_1 και CM_3C_200_2

Στο Σχήμα 4.6 που ακολουθεί παρατίθενται συγκεντρωτικά τα μέγιστα φορτία όλων των δοκιμών της Σειράς Β, συναρτήσει των αντίστοιχων μηκών επικόλλησης. Παρατηρείται αύξηση του φορτίου όταν το μήκος επικόλλησης (l_b) μεταβληθεί από τα 50 mm στα 100 mm κατά περίπου 1.6 kN. Αντιθέτως όταν $l_b=200$ mm, το μέγιστο φορτίο παρουσιάζει μείωση περίπου 0.5 kN, σε σχέση με το αντίστοιχο μέγιστο φορτίο στην περίπτωση με $l_b=100$ mm. Επομένως συμπεραίνεται ότι, το ενεργό μήκος επικόλλησης για το ΙΑΜ τσιμεντοειδούς μήτρας βρίσκεται μεταξύ 100 mm και 200 mm. Το γεγονός αυτό, επιβεβαιώνεται και με την μορφή αστοχίας των δοκιμών CM_3C_200_1 και CM_3C_200_2, στα οποία η αποκόλληση δε ξεκίνησε από την μεριά του εξεταζόμενου μήκους επικόλλησης και έτσι τα δοκίμια αστόχησαν στην μεγάλη πλευρά (300 mm).



Σχήμα 4.6 Διάγραμμα $P_{max}-l_b$ δοκιμίων Σειράς Β

4.3 Συγκρίσεις αποτελεσμάτων

Για την κατανόηση εις βάθος των αποτελεσμάτων, στον Πίνακα 4.3 συνοψίζονται οι μέσοι όροι των μέγιστων φορτίων για κάθε μήκος επικόλλησης για τις δύο σειρές πειραμάτων (Σειρά Α και Σειρά Β). Συνολικά, τα μέγιστα φορτία που καταγράφηκαν στην περίπτωση των δοκιμίων με IAM γεωπολυμερούς μήτρας ήταν μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα φορτία των δοκιμίων με IAM τσιμεντοειδούς μήτρας. Συγκεκριμένα, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 50 mm παρουσίασαν 70.1% αύξηση, τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 100 mm παρουσίασαν αύξηση 10% και τέλος τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 200 mm παρουσίασαν την μεγαλύτερη αύξηση (84.6%). Τα αυξημένα αυτά φορτία που καταγράφηκαν στην περίπτωση των γεωπολυμερών υποδεικνύουν καλύτερη συνάφεια της μήτρας με το πλέγμα καθώς και με το υπόστρωμα.

Πίνακας 4.3 Σύγκριση μέγιστων φορτίων μεταξύ δοκιμίων με IAM γεωπολυμερούς και IAM τσιμεντοειδούς μήτρας.

Μήκος επικόλλησης [mm]	P_{max} [kN]		Αναλογία GP/CM
	GP	CM	
50	10.96	6.445	1.701
100	8.545	7.77	1.100
200	13.81	7.48	1.846

GP=Geopolymer/Γεωπολυμερές ; CM=Cementitious/ Τσιμεντοειδές

Αντίστοιχη σύγκριση μπορεί να γίνει και για τις ορθές τάσεις που αναπτύχθηκαν σε κάθε δοκίμιο. Συνοπτικά, στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται οι ορθές τάσεις των δοκιμίων με IAM γεωπολυμερούς μήτρας και των δοκιμίων με IAM τσιμεντοειδούς μήτρας. Όπως είναι εμφανές, τα δοκίμια με IAM γεωπολυμερούς μήτρας ανέπτυξαν υψηλότερες ορθές τάσεις από τα αντίστοιχα δοκίμια με IAM τσιμεντοειδούς μήτρας. Αναλυτικότερα, παρουσιάστηκε αύξηση 77.5%, 12.6% και 82.6% στα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 50 mm, 100 mm και 200 mm αντίστοιχα. Στην περίπτωση των τάσεων παρουσιάζει επίσης ενδιαφέρον η σύγκριση τους με την τάση θραύσης ινών, η οποία προκύπτει από τις κατασκευαστικές ιδιότητες ίση με 5,000 MPa. Όπως αποτυπώνεται και στον Πίνακα 4.4, στην περίπτωση IAM γεωπολυμερούς με lb 50 mm, 100 mm και 200 mm το δοκίμιο έφτασε τα 15.4%, 11.7% και 18.5% της συνολικής αντοχής των ινών. Αντίθετα, στην περίπτωση των IAM τσιμεντοειδούς παρατηρήθηκαν μειωμένα ποσοστά και συγκεκριμένα 8.7%, 10.4% και 10.1% αντίστοιχα.

Πίνακας 4.4 Σύγκριση μέγιστων τάσεων μεταξύ δοκιμίων με IAM γεωπολυμερούς και IAM τσιμεντοειδούς μήτρας.

Μήκος επικόλλησης	σ_{max} [MPa]		$\sigma_{max_ινών}$ [MPa]	GP/CM	$\sigma_{max} / \sigma_{max_ινών}$	
	GP	CM	Άνθρακα		GP	CM
50	770.825	434.24	5,000	1.775	0.154	0.087
100	583.73	518.185	5,000	1.126	0.117	0.104
200	924.485	506.385	5,000	1.826	0.185	0.101

Όσον αφορά την αστοχία των δοκιμίων, και στις δύο σειρές πειραμάτων εμφανίστηκαν οι ίδιες μορφές αστοχίας (Τύπου I και Τύπου II). Οι συγκεκριμένες μορφές αστοχίας που παρατηρήθηκαν στα δοκίμια του πειράματος αποτελούν τυπικές μορφές αστοχίας για συστήματα ενίσχυσης με χρήση IAM και επομένως τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης επιβεβαιώνουν την ήδη υπάρχουσα βιβλιογραφία.

Αξίζει να αναφερθεί ότι, ένα βασικό πλεονέκτημα που εμφάνισε το τσιμεντοειδές κόνιαμα έναντι του γεωπολυμερούς, ήταν ο εύκολος προσδιορισμός του ενεργού μήκους επικόλλησης (προσδιορίστηκε μεταξύ 100 mm και 200 mm). Το τσιμεντοκόνιαμα που

χρησιμοποιήθηκε ως μήτρα του σύνθετου υλικού στα δοκίμια της Σειράς πειραμάτων Β, είναι ένα εμπορικά διαθέσιμο κονίαμα το οποίο είναι έτοιμο από τον κατασκευαστή και η μόνη επέμβαση από τον χρήστη είναι η προσθήκη νερού. Επομένως οι αντοχές που ενδέχεται να εμφανίσει ποικίλουν με βάση μόνο τον λόγο νερού/κονιάματος που θα επιλεγεί, ενώ προφανώς η χρήση σταθερού λόγου οδηγεί σε παρασκευή κονιαμάτων ίδιας αντοχής. Αντιθέτως, το γεωπολυμερές κονίαμα πρέπει να παρασκευαστεί εξ ολοκλήρου από τον χρήστη, διαδικασία στην οποία υπεισέρχονται περισσότεροι παράμετροι με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η επίτευξη συστηματικότητας. Έτσι, δε ήταν δυνατή η εύρεση του ενεργού μήκους επικόλλησης στα δοκίμια με ΙΑΜ γεωπολυμερούς μήτρας.

Κεφάλαιο 5 Σύνοψη και Συμπεράσματα

5.1 Σύνοψη και συμπεράσματα κεφαλαίου

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, διερευνήθηκε η συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και IAM άνθρακα και εξετάστηκε η πιθανή αντικατάσταση της τσιμεντοειδούς μήτρας του σύνθετου υλικού από κονίαμα γεωπολυμερούς σύστασης. Τα κύρια συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν, συνοψίζονται ως εξής:

- Η μήτρα γεωπολυμερούς που εξετάσθηκε στην παρούσα μελέτη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική λύση έναντι του εμπορικά διαθέσιμου τσιμεντοκονιάματος, όσον αφορά την χρήση του σε συστήματα ενίσχυσης με πλέγματα άνθρακα (C-TRM ή FRCM).
- Τα μέγιστα φορτία στην περίπτωση χρήσης του IAM γεωπολυμερούς μήτρας, σημείωσαν αύξηση κατά 70.1%, 10% και 84.6% στα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 50 mm, 100 mm και 200 mm αντίστοιχα, έναντι των μεγίστων φορτίων στην αντίστοιχη περίπτωση χρήσης IAM τσιμεντοειδούς μήτρας.
- Οι μέγιστες τάσεις που ανέπτυξαν τα δοκίμια με μήκος επικόλλησης 50 mm, 100 mm και 200 mm, παρουσίασαν αύξηση στην περίπτωση IAM γεωπολυμερούς μήτρας κατά 77.5%, 12.6% και 82.6% αντίστοιχα.
- Δύο διακριτές μορφές αστοχίας παρατηρήθηκαν στα δοκίμια των πειραμάτων: (α) Μορφή Τύπου I-αποκόλληση στη διεπιφάνεια μήτρας-πλέγματος και (β) Μορφή Τύπου II- αποκόλληση από το υπόστρωμα σκυροδέματος με μερική αποκόλληση σκυροδέματος.
- Το ενεργό μήκος επικόλλησης προέκυψε μεταξύ 100 mm και 200 mm στην περίπτωση του IAM τσιμεντοειδούς, ενώ στο IAM γεωπολυμερούς υπήρξε ένδειξη ότι

είναι μεγαλύτερο των 200 mm, χωρίς να θεωρούνται επαρκή τα δεδομένα για τον ακριβή προσδιορισμό του.

Βιβλιογραφία

➤ Ελληνική Βιβλιογραφία

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 ανοξειδωτου χάλυβα σε εγκοπές*. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 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.
- Raouf, S. M., & Bournas, D. A. (2017). Bond between TRM versus FRP composites and concrete at high temperatures. *Composites Part B: Engineering*, 127, 150-165.
- Raouf, 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.
- Raouf, 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.
- Raouf, 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>