

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Διπλωματική Εργασία

**ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΣΕ ΑΝΟΡΓΑΝΗ ΜΗΤΡΑ: ΜΗΧΑΝΙΚΗ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΚΑΙ ΣΕ ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΜΕ ΤΟ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ**

ΔΕΡΟΥΚΑΚΗ ΜΑΡΙΑ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

2020

© 2020 Δερουκάκη Μαρία

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

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Κούτας Λάμπρος

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

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Παπακωνσταντίνου Χρήστος

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Ζωγραφοπούλου Καλλιόπη

Διδάσκουσα Π.Δ. 407/80, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου κ. Κούτα Λάμπρο, επίκουρο καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την εμπιστοσύνη καθώς και για την πολύτιμη καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της οικογένειας μου, και ιδιαιτέρως τους γονείς μου, Βασίλη και Χριστίνα, για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους μου τους φίλους μου για την υποστήριξη κατά την διάρκεια αυτής της διπλωματικής εργασίας.

ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΣΕ ΑΝΟΡΓΑΝΗ ΜΗΤΡΑ: ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΚΑΙ ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΜΕ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Δερουκάκη Μαρία

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2020

Επιβλέπων Καθηγητής: Κούτας Λάμπρος, Επίκουρος Καθηγητής Π.Θ.

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη μιας νέας εφαρμογής ενίσχυσης μέσω μιας νέας τεχνικής που κάνει χρήση προηγμένων συνθέτων υλικών, τα γνωστά και ως *Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM)* ή *Textile Reinforced Mortars (TRM)*. Η τεχνική αυτή αποτελεί εναλλακτική πρόταση ενίσχυσης έναντι άλλων, συμβατικών και μη, τεχνικών και σκοπεύει στην αναβάθμιση των δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος και τοιχοποιίας. Αρχικά, γίνεται μία σύντομη παρουσίαση του νέου αυτού σύνθετου υλικού IAM και των συστατικών του. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μια σύντομη περιγραφή των έως τώρα εφαρμογών των στοιχείων IAM, τόσο στο πεδίο ενίσχυσης των προκατασκευών, όσο και στο πεδίο ενίσχυσης των υφιστάμενων κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα ή και φέρουσα τοιχοποιία. Έπειτα, πραγματοποιείται διερεύνηση των κύριων μηχανικών χαρακτηριστικών των IAM σε εφελκυσμό και σε συνάφεια με το σκυρόδεμα, που αποτελεί και τον βασικό σκοπό της εργασίας, και παρατίθενται πειραματικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν από την Tetra Z.(2017) και τον Raouf S.(2016). Γίνεται προσπάθεια εκτενούς σχολιασμού των αποτελεσμάτων που λήφθηκαν από τα πειράματα αυτά.

Περιεχόμενα

Περίληψη

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων

Κατάλογος Σχημάτων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΣΕ ΑΝΟΡΓΑΝΗ ΜΗΤΡΑ	- 1 -
1.1 Περιγραφή της ανάγκης ενίσχυσης των κατασκευών.....	- 1 -
1.2 Προηγμένα σύνθετα υλικά στις ενισχύσεις κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος	- 2 -
1.2.1 Τα ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα.....	- 3 -
1.3 Αντικείμενο της παρούσας εργασίας.....	- 4 -
2. ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ (IAM)	- 5 -
2.1 Ενισχύσεις με σύνθετα υλικά: Γενικά.....	- 5 -
2.1.1 Ινοπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ).....	- 6 -
2.1.2 Το νέο σύνθετο υλικό ενίσχυσης κατασκευών: Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα....	- 7 -
2.1.3 Τα οφέλη της χρήσης των IAM έναντι των ΙΟΠ.....	- 8 -
2.2 Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM) - Εισαγωγή.....	- 10 -
2.2.1 Περιγραφή του σύνθετου υλικού IAM.....	- 11 -
2.2.2 Διαδικασία Εφαρμογής IAM.....	- 16 -
3. ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΩΝ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΩΝ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ	- 18 -
3.1 Προκατασκευασμένα στοιχεία από IAM: Γενικά.....	- 18 -
3.1.1 Στοιχεία κάλυψης επιφανειών.....	- 18 -
3.1.2 Στοιχεία τύπου σάντουιτς από IAM.....	- 20 -
3.1.3 Παραπετάσματα από IAM.....	21
3.1.4 Συστήματα εξωτερικής θερμομόνωσης από IAM.....	22
3.1.5 Σωλήνες από ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα.....	22
3.1.6 Γέφυρες.....	23
3.1.9 Πλαίσια από προκατασκευασμένα στοιχεία IAM πολυγωνικής μορφής.....	24
3.2 Τα IAM στο πεδίο ενισχύσεων των υφιστάμενων κατασκευών: Γενικά.....	25
3.2.1 Περίσφιξη στοιχείων ΟΣ.....	26
3.2.2 Περίσφιξη υποστλωμάτων ΟΣ στις κρίσιμες περιοχές.....	28
3.2.3 Καμπτική ενίσχυση δοκών και πλακών (μίας διεύθυνσης) ΟΣ.....	29
3.2.4 Καμπτική ενίσχυση πλακών ΟΣ δύο διευθύνσεων.....	30
3.2.5 Διατμητική ενίσχυση δοκών ΟΣ.....	30
3.2.6 Ενίσχυση κόμβων δοκού-υποστυλώματος ΟΣ.....	32

3.2.7 Ενίσχυση τοιχίσκων για την αύξηση της εντός επιπέδου ικανότητας ανάληψης τέμνουσας δύναμης.....	32
3.2.8 Ενίσχυση τοιχίσκων για εκτός επιπέδου ικανότητα ανάληψης φορτίου	33
3.2.9 Ενίσχυση σε διαγώνια θλίψη.....	34
3.2.10 Περίσφιγξη υποστλωμάτων από φέρουσα τοιχοποιία	35
3.2.11 Ενίσχυση τοιχοπληρωμένων πλαισίων ΟΣ	36
3.2.12 Ενίσχυση τοξωτών κατασκευών από τοιχοποιία.....	37
3.3 Επίλογος για τα ΙΑΜ στις ενισχύσεις κατασκευών	38
4.ΔΟΚΙΜΕΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΙΝΩΝ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΚΑΙ ΔΙΑΤΜΗΣΗ	39
4.1 Εισαγωγή.....	39
4.2 Περιγραφή διαθέσιμων πειραμάτων: Εφελκυσμός και διάτμηση πλεγμάτων ινών	40
4.2.1 Ονοματολογία και τύποι Ινοπλεγμάτων.....	40
4.2.2 Δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού σε δοκίμια ινοπλεγμάτων.....	42
4.2.3 Πειραματικά αποτελέσματα μονοαξονικού εφελκυσμού	43
4.2.4 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων του μονοαξονικού εφελκυσμού	45
4.2.5 Δοκιμή διάτμησης σε ινοπλέγματα.....	47
4.2.6 Πειραματικά αποτελέσματα και σχολιασμός	49
5. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΜΗΤΡΑ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ	51
5.1 Σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	51
5.2 Περιγραφή διαθέσιμου πειράματος : Εφελκυσμός σύνθετου υλικού ΙΑΜ.....	56
5.2.1 Μηχανικές ιδιότητες του κονιάματος	56
5.2.2 Περιγραφή δοκιμίων και πειραματικής διάταξης.....	56
5.2.3 Πειραματικά αποτελέσματα	57
5.2.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	62
5.3 Χρήση οπτικών ινών σε δοκίμια εφελκυσμού ΙΑΜ.....	64
6. ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΜΕΤΑΞΥ ΙΑΜ ΚΑΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	67
6.1 Σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	67
6.1 Περιλήψη διαθέσιμου πειράματος	72
6.2 Περιγραφή πειραματικού προγράμματος	73
6.3.1.Δοκίμια και παράμετροι υπό διερεύνηση	73
6.3.2 Υλικά και διαδικασία ενίσχυσης	76
6.3.3 Πειραματική διάταξη και διαδικασία	78

6.3.4 Πειραματικά αποτελέσματα	80
6.3.5 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων.....	90
6.3.5.1 Επιρροή του μήκους συνάφειας και του αριθμού των στρώσεων.....	90
6.3.5.2 Επιρροή της προετοιμασίας της επιφάνειας.....	93
6.3.5.3 Επιρροή της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος	94
6.3.5.4 Επιρροή της επικάλυψης του πλέγματος ινών με ρητίνη.....	95
6.3.5.5 Επιρροή της αγκύρωσης μέσω περιτύλιξης με κλειστούς μανδύες IAM	96
6.3.6 Σύνοψη.....	97
7. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	100
7.1 Συμπεράσματα	100
7.2 Προτάσεις μελλοντική έρευνα.....	103
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	105

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4.1: Σύνοψη των αποτελεσμάτων των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων ινοπλέγματος. (Tetta, 2017).....	44
Πίνακας 4.2: Σύγκριση τιμών εφελκυστικής αντοχής και μέτρου ελαστικότητας του Κατασκευαστή (για μία μονή ίνα) με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν σε ινοπλέγματα.....	45
Πίνακας 4.3: Ποσοστό επί τοι εκατό μείωσης των τιμών του που λήφθηκαν από τα πειραματικά αποτελέσματα σε σχέση με αυτές που παρείχε ο κατασκευαστής	45
Πίνακας 4.4: Οι του μέτρου διάτμησης G (GPa) για κάθε ινόπλεγμα. (Tetta, et al.,2017)	50
Πίνακας 5.1: Σύνοψη των αποτελεσμάτων δοκιμίων IAM. (Tetta, 2017).....	61
Πίνακας 5.2: Επί τοις εκατό διαφορά πειραματικών αποτελεσμάτων μονοαξονικού εφελκυσμού μεταξύ αυτούσιων πλεγμάτων ινών και σύνθετων στοιχείων IAM.....	63
Πίνακας 6.1: Λεπτομέρειες των δοκιμίων, θλιπτική αντοχή σκυροδέματος και ιδιότητες του κονιάματος την ημέρα της πειραματικής δοκιμής (Raooof, 2017).....	76
Πίνακας 6.2: Σύνοψη των πειραματικών αποτελεσμάτων. (Raooof, 2017).....	82
Πίνακας 6.3: Ποσοστό του υπολειπόμενου φορτίου σε σχέση με το μέγιστο καταγεγραμμένο φορτίο για δοκίμια που ενισχύθηκαν με μία και δύο στρώσεις IAM (Raooof, 2017)	92

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Εποπτική περιγραφή του σύνθετου υλικού ενίσχυσης που φέρει την ονομασία Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM). (Κούτας,2015).....	4
Σχήμα 2.1 Υφάσματα ΙΟΠ συνεχών ινών από (α) υάλου, (β) άνθρακα και (γ) αραμιδίου.....	6
Σχήμα 2.2 Ενίσχυση δομικών μελών με ελάσματα από σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή.....	7
Σχήμα 2.3 (α), (β) ινοπλέγματα και (γ) Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας.....	11
Σχήμα 2.4 Πλέγματα ινών (α) άνθρακα δύο διευθύνσεων, (β) υάλου 4 τεσσάρων διευθύνσεων, (γ) ΡΒΟ (πολυφαινυλενικό χωρίς ισοισοξάζολιο) 2 διευθύνσεων, και (δ) τριών διαστάσεων (ΚΟΥΤΑΣ, 2015), (Μπουρνάς, 2008).....	12
Σχήμα 2.5 Διάφορα ινοπλέγματα δύο διαστάσεων με κλώνους ινών σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις: (α) πλέγμα ινών άνθρακα χωρίς επικάλυψη, (β) πλέγμα ινών υάλου χωρίς επικάλυψη, (γ) πλέγμα ινών βασάλτη χωρίς επικάλυψη, (δ) επικαλυμμένο πλέγμα ινών άνθρακα, (ε) επικαλυμμένο πλέγμα ινών υάλου και (ζ) επικαλυμμένο πλέγμα ινών βασάλτη.(Κούτας (2015)	13
Σχήμα 2.6 Κλώνος ινών με μερικός εμποτισμένες ίνες (Bartos, 1987)	16
Σχήμα 3.1 Κάλυψη επιφανειών με στοιχεία IAM σε στο Άαχεν (Δαμίγου, 2011)	19
Σχήμα 3.2 Εφαρμογή στοιχείων κάλυψης από IAM στο κτίριο επέκτασης του Πολυτεχνείου του Aachen [RWTH Aachen University]. (Μπουρνάς, 2008)	19
Σχήμα 3.3 Κάλυψη επιφανειών με στοιχεία IAM σε σχολείο στο Ντίσελντορφ (Μπουρνάς, 2008)	20
Σχήμα 3.4 Στοιχεία τύπου σάντουιτς από IAM : (α) Μορφή πλέγματος τριών διαστάσεων,(β) στοιχείο τύπου σάντουιτς [ITA, IMB RWTH Aachen University].....	21
Σχήμα 3.5 Ολοκληρωμένο σύστημα στέγασης με δομικά στοιχεία τύπο σάντουιτς από IAM (Μπουρνάς,2008)	21
Σχήμα 3.6 Παραπέτασμα από ινοπλέγμα σε ανόργανη μήτρα. (Μπουρνάς, 2008).....	22

Σχήμα 3.7 Τομή συστήματος εξωτερικής θερμομόνωσης από IAM.(ΣΑΡΔΕΛΗ, 2013).....	22
Σχήμα 3.8 Αγωγοί παρασκευασμένος από IAM. (Δαμίγου, 2011).....	23
Σχήμα 3.9 Πεξογέφυρα από IAM (C.Kouylas,2015).....	23
Σχήμα 3.10 Ένωση προεντεταμένων τμημάτων για την κατασκευή πεξογέφυρας με την χρήση στοιχείων IAM (Δαμίγου, 2011).....	24
Σχήμα 3.11 Αριστερά: Δομικό στοιχείο δικτύματος & Δεξιά: 3D απεικόνιση (Μπουρνάς, 2008)	24
Σχήμα 3.12 (α) Αστοχία μανδύα IAM σε κυλινδρικό δοκίμιο (Triantafillou, 2006), (β), (γ) ενίσχυση δοκιμίων τύπου υποστυλώματος τετραγωνικής διατομής με μανδύα IAM (Triantafillou et al. 2006, Bournas et al. 2007).....	27
Σχήμα 3.13 (α) Ενίσχυση με κλειστούς μανδύες IAM της κρίσιμης περιοχής στη βάση υποστυλώματος του, (β) ικανότητα μεγάλης πλευρικής μετακίνησης υποστυλώματος του οποίου η βάση έχει περισφιχτεί με μανδύα IAM, και (γ) αστοχία στην περιοχή της μάτισης των διαμήκων ράβδων οπλισμού στη βάση μη ενισχυμένου υποστυλώματος. (Bournas, 2009)	28
Σχήμα 3.14 Διάφορες μορφές αστοχίας στην περίπτωση ενίσχυσης έναντι κάμψης δοκών-πλακών μίας διεύθυνσης με IAM (α) μερική απόσχιση ινών και ολίσθηση ινών από το κονίαμα (μήτρα) (D' Ambrisi and Focacci, 2011), (β) αποκόλληση IAM από το υπόστρωμα που ξεκινά από καμπτική ρωγμή στο μέσον του καμπτικού ανοίγματος (D' Ambrisi and Focacci, 2011), και (γ) διαστρωματική απόσχιση IAM στο άκρο τους κοντά στη στήριξη (Triantafillou et al., 2005).....	29
Σχήμα 3.15 (α) Γεωμετρία πλακών δύο διευθύνσεων, και (β) πειραματική διάταξη έναντι κάμψης σε πλάκα (δύο διευθύνσεων) με συγκεντρωμένο φορτίο στο κέντρο. (Papanicolaou et al., 2009).....	30
Σχήμα 3.16 Αστοχία δοκών ενισχυμένων σε τέμνουσα με μανδύες IAM: (α) ορθογωνική δοκός ενισχυμένη με κλειστό μανδύα IAM υπό κυκλική φόρτιση (Triantafillou and Papanicolaou, 2006) και (β) πλακοδοκός ενισχυμένη με τρίπλευρο μανδύα IAM σε συνδυασμό με μηχανική αγκύρωση στην πλάκα (Tzoura and Triantafillou, 2014).....	31

Σχήμα 3.17 (α) Μορφή αστοχίας στον κόμβο δοκού-υποστυλώματος μη ενισχυμένου δοκιμίου, (β) πειραματική διάταξη για τη δοκιμή κυκλικής φόρτισης σε κόμβους δοκού-υποστυλώματος, (γ) Μορφή αστοχίας στον κόμβο δοκού-υποστυλώματος δοκιμίου ενισχυμένου με IAM (Al-Salloum et al., 2011).....	32
Σχήμα 3.18 Πειραματική διάταξη για την εντός επιπέδου δοκιμή κυκλικής φόρτισης τοιχοσωμάτων: (α) Paranicolaou et al. (2007), και (β) Paranicolaou et al.(2011).....	33
Σχήμα 3.19 Διαδικασία ενίσχυσης τοιχίσκων με IAM (Παπανικολάου και Τριανταφύλλου, 2009).....	34
Σχήμα 3.20 (α) Πειραματική διάταξη (κάμψη τριών σημείων) για τη κυκλική δοκιμή εκτός επιπέδου φόρτισης τοιχοσωμάτων (κάμψη με αξονική δύναμη) (Paranicolaou et al., 2008), (β) αστοχία λόγω βλάβης της τοιχοποιίας σε δοκίμιο ενισχυμένο με μανδύες IAM άνθρακα (Paranicolaou et al., 2008), (γ) εκτός επιπέδου αστοχία μη ενισχυμένης τοιχοποιίας (Babaeidarabad et al., 2014a)	34
Σχήμα 3.21 Τυπικές μορφές αστοχίας τοιχοσωμάτων υπό διαγώνια θλίψη: (α) μη ενισχυμένο δοκίμιο και (β) ενισχυμένο δοκίμιο με μία στρώση IAM υάλου (Parisi et al., 2013).....	35
Σχήμα 3.22 (α) Περίσφιγξη δοκιμίου με μανδύα IAM, (β) εικόνα βλάβης μανδύα IAM κατά την αστοχία. (Κρεβάϊκα 2005).....	36
Σχήμα 3.23 Διαδικασία ενίσχυσης υποστυλώματος τοιχοποιίας με IAM (Maddaloni et al., 2015).....	36
Σχήμα 3.24 Τριώροφο τοιχοπληρωμένο πλαίσιο μεγάλης κλίμακας (Koutas, et al. 2015)....	37
Σχήμα 3.25 Τόξο ενισχυμένο στο εξωράχιο (αριστερά), στο εσωράχιο (δεξιά), και στις δυο πλευρές (μέση) (Leire Garmendia et al., 2014).....	37
Σχήμα 4.1 Τυπικές καμπύλες εφελκυστικής τάσης – παραμόρφωσης για διάφορους τύπους ινών και σύγκριση με απλοποιημένες καμπύλες χάλυβα [Τριανταφύλλου 2006].....	39
Σχήμα 4.2 Τα ινοπλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη διατεταγμένα σε ίση κατανομή της συνολικής ποσότητας ινών ανά ορθογώνια διεύθυνση από: α) ίνες ελαφρύτερου άνθρακα (CL) , β) ίνες βαρύτερου άνθρακα CH, γ) ίνες υάλου (G) και δ) ίνες βασάλτη (B) (διαστάσεις σε mm). (Tetta, 2017).....	41

Σχήμα 4.3. Τα νοπλέγματα FORMAX που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη: (α) F10x20 , (β) F10x40, (γ) F20x20, δ) F20x40 (διαστάσεις σε mm). (Tetta, 2017).....	41
Σχήμα 4.4 α) Διάταξη δοκιμής εφελκυσμού β) θραύση νοπλεγμάτων [Tetta, 2017].....	43
Σχήμα 4.5 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων μονοαξονικού εφελκυσμού σε νοπλέγματα από (α) ίνες ελαφρύ άνθρακα (CL), ίνες βαρέως άνθρακα (CH), ίνες υάλου (G) και ίνες βασάλτη (B) , (β) όλα τα νοπλέγματα FORMAX, δηλαδή: F10x20, F10x40, F20x20 και F20x40. (Tetta, 2017).....	44
Σχήμα 4.6 (α) γεωμετρία του δοκιμίου προς διατμητική καταπόνηση · β) κατασκευή διατμητικής καταπόνησης (μορφή πλαισίου)· γ) κατάσταση εκκίνησης δοκιμίου· (δ) παραμορφωμένη κατάσταση δοκιμίου. (Tetta, 2017).....	49
Σχήμα 4.7 (α) Καμπύλες διατμητικής δύναμης – διατμητικής παραμόρφωσης και για τα οκτώ διαφορετικά δοκίμια νοπλέγματος, (β) καμπύλες μέτρου διάτμησης G – διατμητικής παραμόρφωσης και για τα οκτώ νοπλέγματα, (γ) καμπύλες συντελεστή διάτμησης G – διατμητικής παραμόρφωσης για τα νοπλέγματα FORMAX. (Tetta, et al., 2017)	50
Σχήμα 5.1 (α) Δοκίμιο IAM με γεωμετρία τύπου αλτήρα, β) πειραματική διάταξη δοκιμίων εφελκυσμού· (γ) θραύση των ινών στην κεντρική περιοχή του δοκιμίου IAM· (δ) απλοποιημένη καμπύλη τάσης έναντι παραμόρφωσης δοκιμίων IAM που υποβλήθηκαν σε μονοαξονική εφελκυστική φόρτιση.....	52
Σχήμα 5.2 : Στάδια συμπεριφοράς του σύνθετου στοιχείο IAM σε εντατική κατάσταση μονοαξονικού εφελκυσμού. [Hegger et al.2006], [Jesse et al.2008].....	53
Σχήμα 5.3 (α) Γεωμετρία δοκιμίου IAM τα οποία εξετάστηκαν σε μονοαξονικό εφελκυσμό, (β) Διάταξη δοκιμής εφελκυσμού των δοκιμίων IAM. (Tetta, 2017).....	57
Σχήμα 5.4 Ενδεικτική καμπύλη τάσης -παραμόρφωσης των πειραματικών δοκιμίων IAM σε εφελκυσμό. (Tetta, 2017).....	58
Σχήμα 5.5. Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για (α) νοπλέγματα από ίνες ελαφρύ άνθρακα (CL)· β) νοπλέγματα από ίνες βαρύ άνθρακα (CH)· γ) νοπλέγματα από ίνες υάλου· δ) νοπλέγματα από ίνες βασάλτη. (Tetta, 2017).....	59

Σχήμα 5.6 Καμπύλες τάσης έναντι παραμόρφωσης για ινοπλέγματα FORMAX : (α) F10x20 ·(b) F10x40 · (γ) F20x20· δ) F20x40· (Tetta, 2017).....	59
Σχήμα 5.7 Τρόποι αστοχίας των δοκιμών IAM (Tetta, 2017).....	60
Σχήμα 5.8 Αποτελέσματα των δοκιμών IAM σε μορφή γραφημάτων: (α) εφελκυστική αντοχή, f_{fu} , (β) αξονική παραμόρφωση, ϵ_{fu} (%), (γ) μέτρο ελαστικότητας ρηγματωμένου δοκιμίου, E_{f_IAM} . (Tetta, 2017).....	62
Σχήμα 5.9. (α) Διαμόρφωση αισθητήρων FBG, (β) προετοιμασία κουπονιού IAM· (γ) καμπύλες τάσης έναντι παραμόρφωσης. (Tetta, 2017).....	66
Σχήμα 6.1 Διάταξη δοκιμών άμεσης συνάφειας (α) Single-lap και (β) Double-lap για τη μελέτη της συνάφειας μεταξύ IAM και υποστρώματος από σκυρόδεμα. (Lampros N. Koutas1; Zoi Tetta2; e.a.P.E., M.ASCE4).....	67
Σχήμα 6.2 Τρόποι αστοχίας που έχουν παρατηρηθεί σε δοκιμές συνάφειας μεταξύ IAM και σκυροδέματος.....	68
Σχήμα 6.3 Εποπτική κατανόηση της έννοιας του μήκος συνάφειας (L_b). (Raooof, 2017).....	69
Σχήμα 6.4 Λεπτομέρειες δοκιμίου: α) Κατασκευή του δοκιμίου· β) λεπτομέρειες της ακρυλικής πλάκας· γ) λεπτομέρειες της εσωτερικής ενίσχυσης, δ) λεπτομέρειες της ευθυγράμμισης των πρισμάτων· ε) συνολικές λεπτομέρειες σχεδιασμού του δοκιμίου· και στ) τρισδιάστατη απεικόνιση (Διαστάσεις σε mm). (Raooof, 2017)	74
Σχήμα 6.5 Τρόποι προετοιμασίας της επιφάνειας σκυροδέματος: (α) ήπια εκτράχυνση και δημιουργία πλέγματος αυλακώσεων, και (β) αμμοβολή. (Raooof, 2017).....	78
Σχήμα 6.6 (α) Εφαρμογή της πρώτης στρώση κονιάματος· (β) εφαρμογή της πρώτης στρώσης ινοπλέγματος μέσα στο κονίαμα· (γ) εφαρμογή της τελικής στρώση κονιάματος και (δ) περιτύλιξη με μανδύα IAM στην πλευρά του υπό εξέταση δοκιμίου της ομάδας LN_X_W. (Raooof, 2017).....	78
Σχήμα 6.7 Λεπτομέρειες πειραματικής διάταξης. (Raooof, 2017).....	79
Σχήμα 6.8 Σχηματικό Διάγραμμα Ελεύθερου Σώματος της εξεταζόμενης πλευράς του δοκιμίου. (Raooof, 2017)	80

Σχήμα 6.9 Καμπύλες φορτίου - μετατόπισης των δοκιμίων της ομάδας LX_N. (Raouf, 2017).....	83
Σχήμα 6.10 Τρόποι αστοχίας δοκιμίων ενισχυμένων με μία και δύο στρώσεις IAM και με διαφορετικό μήκος συνάφειας. (Raouf, 2017).....	84
Σχήμα 6.11 Τρόποι αστοχίας δοκιμίων ενισχυμένων με τρεις και τέσσερις στρώσεις IAM και με διαφορετικό μήκος συνάφειας. (Raouf, 2017).....	85
Σχήμα 6.12 Ανάπτυξη εγκάρσιων ρωγμών περιστροφή του δοκιμίου σε σχέση με την αρχική ευθυγράμμιση μετά το τελικό φορτίο. (Raouf, 2017).....	86
Σχήμα 6.13 Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για δοκίμια που είχαν ως παράμετρο: (α) την προετοιμασία της επιφάνειας σκυροδέματος, (β) την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος και (γ) τα ινοπλέγματα επικαλυμμένα με ρητίνη. (Raouf, 2017).....	87
Σχήμα 6.14 Χαρακτηριστικοί τρόποι αστοχίας των δοκιμίων με: (α) προετοιμασία επιφάνειας σκυροδέματος με αμμοβολή, (β) χαμηλή θλιπτική αντοχή σκυροδέματος και (γ) ινοπλέγματα επικαλυμμένα με ρητίνη. (Raouf, 2017).....	88
Σχήμα 6.15 α) Σύγκριση των καμπυλών φορτίου-μετατόπισης των δοκιμίων με αγκύρωση μέσω περιτύλιξης με κλειστούς μανδύες IAM, με τα αντίστοιχα δοκίμια χωρίς αγκύρωση και (β) γενικός τρόπος αστοχίας των δοκιμίων με αγκύρωση μέσω περιτύλιξης με κλειστούς μανδύες IAM (TRM jackets). (Raouf, 2017).....	89
Σχήμα 6.16 Μεταβολή του φορτίου αστοχίας τόσο με το μήκος του συνάφειας όσο και με τον αριθμό των στρώσεων. (Raouf, 2017).....	90
Σχήμα 6.17 Μεταβολή της αντοχής συνάφειας που αναπτύχθηκε στη διεπιφάνεια σκυροδέματος-κονιάματος, τόσο με το μήκος συνάφειας όσο και με τον αριθμό των στρώσεων. (Raouf, 2017).....	92
Σχήμα 6.18 Μεταβολή της τάσης εφελκυσμού του ινοπλέγματος με τον αριθμό των στρώσεων και το μήκος συνάφειας. (Raouf, 2017).....	93
Σχήμα 6.19 Επιρροή της προετοιμασίας της επιφάνειας σκυροδέματος στο φορτίο αστοχίας των δοκιμίων που ενισχύθηκαν με: (α) τρεις στρώσεις IAM και (β) τέσσερις στρώσεις IAM. (Raouf, 2017).....	94

Σχήμα 6.20 Επίδραση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος στο τελικό φορτίο των δοκιμίων που ενισχύεται με: (α) τρεις στρώσεις IAM, και (β) τέσσερα στρώσεις IAM. (Raouf, 2017).....	95
Σχήμα 6.21 Επιρροή των ινοπλεγμάτων επικαλυμμένων με ρητίνη στο τελικό φορτίο των δοκιμίων που ενισχύθηκαν με: (α) μία στρώση IAM και (β) δύο στρώσεις IAM. (Raouf, 2017).....	96
Σχήμα 6.22 Επιρροή της αγκύρωσης μέσω περιτύλιξης με κλειστούς μανδύες IAM στο φορτίο αστοχίας των δοκιμίων που ενισχύθηκαν με μια και δύο στρώσεις IAM και μήκος συνάφειας 100mm. (Raouf,2017).....	97

Κεφάλαιο 1

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΣΕ ΑΝΟΡΓΑΝΗ ΜΗΤΡΑ

1.1 Περιγραφή της ανάγκης ενίσχυσης των κατασκευών

Τις τελευταίες δεκαετίες το ζήτημα της συντήρησης και αναβάθμισης/ενίσχυσης των κατασκευών (κτιρίων και υποδομών) οπλισμένου σκυροδέματος (ΟΣ) απασχολεί ιδιαίτερα την επιστήμη των τεχνικών έργων. Η ασφάλεια των κτιρίων και γενικότερα των κατασκευών, αποτελεί κύριο παράγοντα για την προστασία του βίου και της περιουσίας των πολιτών. Η γήρανση-φθορά των δομικών υλικών, η έλλειψη συντήρησης, ο μη-επαρκής αρχικός σχεδιασμός, οι απαιτήσεις των νέων κανονισμών και η αύξηση των απαιτήσεων φόρτισης καθιστούν έντονη την ανάγκη ενίσχυσης και αποκατάστασης των κατασκευών από ΟΣ.

Αρχικά, υφίσταται το ζήτημα της φθοράς. Ως φθορά μιας κατασκευής στο χρόνο ορίζεται κάθε απώλεια επιτελεστικότητας και είναι αποτέλεσμα διαφόρων μηχανικών, φυσικών, χημικών – βιομηχανικών διεργασιών. Στην κατηγορία των μηχανικών διεργασιών ανήκουν οι συστολές, οι καθιζήσεις, οι φορτίσεις και οι επιβαλλόμενες παραμορφώσεις (σεισμός). Στις φυσικές διεργασίες περιλαμβάνονται οι θερμοκρασιακές διαφορές, η συστολή ξήρανσης και η επίδραση παγετού. Στην τελευταία κατηγορία, η επίδραση οξέων και η ανάπτυξη μικροοργανισμών οδηγούν σε σταδιακή διάβρωση των υλικών (π.χ. ενανθράκωση).

Υπάρχει έντονη ανάγκη για αντισεισμική ενίσχυση των κτηριακών κατασκευών ΟΣ. Έπειτα από συσσωρευμένη εμπειρία από βλάβες/αστοχίες των δομικών μελών των κτιρίων ή ακόμα και καταρρεύσεις αυτών κατά τη διάρκεια μεγάλων σεισμικών γεγονότων, έχει αποφανθεί ότι ένα πολύ μεγάλο ποσοστό των υφιστάμενων κατασκευών ΟΣ είναι ευάλωτες έναντι έντονων σεισμικών διεγέρσεων. Κάτι που οφείλεται αφενός περισσότερο στον ανεπαρκή αρχικό σχεδιασμό τους και αφετέρου στη γήρανση των υλικών. Είναι άλλωστε γνωστό στην επιστημονική κοινότητα και την κοινότητα των μηχανικών στις περισσότερες σεισμογενείς χώρες του κόσμου, ότι η μελέτη και ο σχεδιασμός των κατασκευών έως και δύο δεκαετίες πριν, γινόταν βάση παλαιότερων κανονισμών ή ακόμα χωρίς αντισεισμικές απαιτήσεις. Η φιλοσοφία βασιζόταν περισσότερο στη γνώση και εμπειρία παλαιότερων δεκαετιών με αποτέλεσμα να διαφέρει πολύ από τις σύγχρονες κατασκευαστικές αντιλήψεις. Οπότε οι υφιστάμενες κατασκευές ΟΣ, που ο σχεδιασμός τους δεν έχει γίνει σύμφωνα με τους σύγχρονους αντισεισμικούς κανονισμούς και τις νέες απαιτήσεις φόρτισης, θεωρούνται τρωτές σε σεισμικές διεγέρσεις. Παραπάνω έχουν αναφερθεί και αναλυθεί σε γενικό πλαίσιο ορισμένα

από τα βασικά αίτια που υποβαθμίζουν τις κτιριακές κατασκευές ΟΣ, απορρέοντας στο ζήτημα των ενισχύσεων.

1.2 Προηγμένα σύνθετα υλικά στις ενισχύσεις κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος

Η ανάγκη για τεχνικές που θα καλύπτουν τις απαιτήσεις για ασφαλείς κατασκευές δίνοντας λύση σε διάφορες δυσκολίες που αντιμετωπίζει ένας πολιτικός μηχανικός, έχουν οδηγήσει στη δημιουργία και εφαρμογή νέων τεχνικών και μεθόδων.

Στο πλαίσιο αντιμετώπισης του ζητήματος που ετέθη στην παραπάνω υποενότητα, η επιστημονική κοινότητα έχει πραγματοποιήσει διάφορες έρευνες για την αναζήτηση λύσεων και έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές. Η ραγδαία ανάπτυξη που έχει σημειωθεί στον τομέα της τεχνολογίας των υλικών τα τελευταία χρόνια, συνήθως από άλλους βιομηχανικούς τομείς, δημιούργησε νέα υλικά, έχοντας ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη νέων προϊόντων και κατ' επέκταση μεθόδων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές της επιστήμης του Πολιτικού Μηχανικού, όπου η αποκλειστική χρήση συμβατικών υλικών αποτυγχάνει να παρέχει μία ικανοποιητική λύση.

Γενικά μπορούμε να διακρίνουμε τις τεχνικές ενίσχυσης σε δύο κατηγορίες: (α) τις συμβατικές τεχνικές που κάνουν χρήση συμβατικών υλικών και (β) τις νέες τεχνικές που κάνουν χρήση προηγμένων υλικών. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι τεχνικές ενίσχυσης με πλέγμα χαλύβδινου οπλισμού, είτε με μανδύες ΟΣ είτε με μανδύες κονιάματος. Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι τεχνικές ενίσχυσης με χρήση κονιαμάτων οπλισμένων με ίνες χάλυβα ή ίνες πολυβινυλίου ή υάλου και με χρήση εξωτερικά επικολλημένων σύνθετων υλικών Ινοπλισμένων Πολυμερών (ΙΟΠ ή αγγλικός όρος FRP – fiber reinforced polymers). Καθώς η χρήση των σύνθετων υλικών ΙΟΠ στο πεδίο ενισχύσεων των κατασκευών είναι πλέον αρκετά διαδεδομένη, μεγάλο μέρος της επιστημονικής κοινότητας εξακολουθεί να διερευνά είτε τρόπους για τη βελτίωση των ήδη αναπτυγμένων τεχνικών, είτε ακόμα και τη βελτίωση του ίδιου του σύνθετου υλικού.

Τα ΙΟΠ ως σύνθετα-προηγμένα υλικά αποτελούνται από υφάσματα ινών υψηλής αντοχής (π.χ. άνθρακα, υάλου, αραμιδίου και βασάλτη) σε συνδυασμό με πολυμερή υλικά (συνήθως εποξειδικές ρητίνες). Τα ΙΟΠ έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως τις τελευταίες τρεις δεκαετίες ως εξωτερικά εφαρμοζόμενα για την ενίσχυση υφιστάμενων δομών ΟΣ, λόγω των ευνοϊκών τους ιδιοτήτων, δηλαδή την υψηλή εφελκυστική τους αντοχή, την αντοχή στη διάβρωση, την ευκολία και ταχύτητα εφαρμογής τους με ελάχιστη αλλαγή της γεωμετρίας.

Ωστόσο, η τεχνική ενίσχυσης των ΙΟΠ παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα, τα οποία οφείλονται κατά κύριο ρόλο στην ρητίνη, δηλαδή τη "μήτρα" του συνθετικού υλικού. Ορισμένα από αυτά είναι: το υψηλό τους κόστος, η πτωχή τους απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες, η αδυναμία εφαρμογής τους σε υγρές επιφάνειες, η ασυμβατότητα με υλικά του υποστρώματος (σκυρόδεμα ή τοιχοποιία), καθώς και οι κίνδυνοι που επιφυλάσσονται κατά την χρήση των ρητινών στο εργατικό προσωπικό, μέσω της επαφής με το ανθρώπινο δέρμα και μέσω των αναθυμιάσεων (ακόμα και αν παράγονται νέου τύπου ρητίνες λιγότερο επικίνδυνες). Έτσι, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη εύρεσης μιας εναλλακτικής λύσης.

Προκειμένου να ξεπεραστούν τα παραπάνω προβλήματα, μια λογικοφανής λύση θα μπορούσε να είναι η αντικατάσταση της ρητίνης, η οποία αποτελεί το συνδετικό υλικό μεταξύ των συνεχών ινών, δηλαδή τη μήτρα, με πολύ λεπτόκοκκα υλικά ανόργανης σύστασης π.χ. τύπου κονιάματος με βάση το τσιμέντο. Τέτοιες λύσεις έχουν δοκιμασθεί τα τελευταία χρόνια χωρίς ιδιαίτερη επιτυχία, εξαιτίας της κοκκομετρίας των κονιαμάτων, ακόμα και των εξαιρετικά λεπτόκοκκων, η οποία δεν επιτρέπει την διείσδυση και τον εμποτισμό των φύλλων ινών (των υφασμάτων), με αποτέλεσμα την εμφάνιση πτωχών χαρακτηριστικών συνάφειας μεταξύ των ινών και του μητρικού υλικού (κονίαμα).

Βελτιωμένες συνθήκες σύνδεσης μεταξύ ινών και ανόργανης μήτρας επιτεύχθηκαν όταν τα φύλλα συνεχόμενων ινών αντικαταστάθηκαν από πλέγματα ινών (ινοπλέγματα). Έτσι, αναπτύχθηκε ένα νέο είδος σύνθετου υλικού: τα Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (Textile Reinforced Mortar - TRM στη διεθνή ορολογία).

1.2.1 Τα ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα

Το νέο σύνθετο υλικό ενίσχυσης συνδυάζει πλέγματα ινών υψηλής αντοχής (π.χ. ανθρακας, γυαλί, βασάλτης) με κονιάματα ανόργανης σύστασης (συνήθως τσιμεντο - κονιάματα). Στην αρχή, το νέο αυτό υλικό διαδόθηκε (στην Ευρώπη) με την ονομασία *Textile Reinforced Mortar (TRM)*. Στις ΗΠΑ το σύνθετο αυτό υλικό έλαβε την ονομασία *Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM)*, που ένα πιθανό πρόβλημα σε αυτόν τον όρο είναι ότι η μήτρα μπορεί να μην είναι τσιμεντοειδούς σύστασης (π.χ. υδραυλική άσβεστος).

Τα Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα έχουν μελετηθεί εκτενώς κατά τη διάρκεια των τελευταίων δύο δεκαετιών. Αυτό δεδομένου ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή νέων προκατασκευασμένων δομικών στοιχείων (π.χ. Curbach και Jesse 1999; Bramshuber et al. 2001) ή για την ενίσχυση υφιστάμενων δομικών στοιχείων (π.χ., Triantafyllou et al., 2006, Triantafyllou και Παπανικολάου 2006. Bournas et al. 2007).

Έτσι, τα τελευταία χρόνια η κοινότητα των ερευνητών έχει εστιάσει στα Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας. Τα TRM αποτελούν μια πρωτοποριακή λύση που εφαρμόζεται σε διάφορα έργα του Πολιτικού Μηχανικού, τόσο για την ενίσχυση υφιστάμενων δομικών στοιχείων όσο και για την προκατασκευή νέων. Τα ινοπλισμένα πολυμερή αποτελούν πλέον πρόδρομο των Ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα. Η πρωτοπόρα αυτή τεχνική εισήχθη στο τέλος της δεκαετίας του 1990 και είναι το σύνθετο υλικό που διερευνάται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

1.3 Αντικείμενο της παρούσας εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των Ινοπλεγμάτων σε Ανόργανη Μήτρα. Τα Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα, αποτελούν ένα νέο προηγμένο σύνθετο υλικό ενίσχυσης δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος και τοιχοποιίας. Η τεχνική ενίσχυσης των IAM συνίσταται στην εφαρμογή εξωτερικά επικολλημένων στρώσεων. Εποπτική περιγραφή του σύνθετου αυτού υλικού αποτελεί το Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1 Εποπτική περιγραφή του σύνθετου υλικού ενίσχυσης που φέρει την ονομασία Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM). (Κούτας, 2015)

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εις βάθος περιγραφή και ο σχολιασμός της μηχανικής συμπεριφοράς των Ινοπλεγμάτων σε Ανόργανη Μήτρα σε εφελκυσμό και σε συνάφεια με υπόστρωμα σκυροδέματος, βάση πειραματικών εφαρμογών.

Κεφάλαιο 2

2. ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ (ΙΑΜ)

2.1 Ενισχύσεις με σύνθετα υλικά: Γενικά

Η πρόοδος που έχει σημειωθεί στον τομέα της τεχνολογίας των δομικών υλικών τα τελευταία χρόνια, είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη νέων προϊόντων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές της επιστήμης του Πολιτικού Μηχανικού. Μεταξύ των προϊόντων αυτών σημαντική θέση κατέχουν τα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή.

Τα σύνθετα αυτά υλικά έχουν δοκιμαστεί για δεκαετίες σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς και είναι πλέον ευρείας χρήσης χάρις των εξαιρετικών τους ιδιοτήτων. Κάνοντας μια σύντομη ιστορική αναφορά, τα πρώτα σύνθετα υλικά χρονολογούνται από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα και είχαν ως συστατικά φυσικές ρητίνες και ίνες, όπως πίσσα και ίνες ξύλου. Η μαζική τους παραγωγή όμως, ξεκίνησε στο τέλος της δεκαετίας του 1930 όπου αρχικά η χρήση τους περιορίστηκε στην αεροναυπηγική, τη χημική βιομηχανία και τη ναυπηγική εξαιτίας του υπερβολικού τους κόστους και των περιορισμένων πειραματικών αποτελεσμάτων, ενώ τα σύγχρονα σύνθετα υλικά βρίσκουν εφαρμογή και σε υπόγειες δεξαμενές καυσίμων, έως ύφαλα πλοίων και πολεμικά αεροσκάφη. Γενικά η χρήση τους έχει εξαπλωθεί σε εφαρμογές που απαιτούν χαμηλό ίδιο βάρος, υψηλές τάσεις και μη διαβρωτικές δομικές ιδιότητες. Η επικόλληση στρώσεων ινοπλισμένων πολυμερών από ανθρακονήματα σε δομικά στοιχεία κατασκευών με σκοπό την επισκευή και ενίσχυσή, πρωτοεφαρμόστηκε στην Ελβετία το 1984, ενώ τα τελευταία τριάντα χρόνια βρίσκει πολλές εφαρμογές με επιτυχία σε χώρες με δυσμενείς κλιματολογικές συνθήκες ή με ιδιαίτερα υψηλή σεισμική επικινδυνότητα, όπως οι Η.Π.Α., ο Καναδάς, η Ιαπωνία, η Ελβετία, η Αυστραλία, κ.ά.. Αποτελεί χαρακτηριστικό γεγονός ότι στην Ιαπωνία, χώρα με ιδιαίτερα υψηλή σεισμική επικινδυνότητα, η χρήση σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή αυξήθηκε την περίοδο 1992-1995 και κυρίως μετά το σεισμό του Hyogoken-Nangu το 1995 κατά 500%. Στην Ελλάδα οι πρώτες εφαρμογές πραγματοποιούνται στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και εξαπλώνονται ιδιαίτερα μετά τον σεισμό της Πάρνηθας το 1999.

Στο πλαίσιο ερευνητικών προγραμμάτων και δραστηριοτήτων, ερευνητές από διάφορα μέρη του κόσμου έχουν αναπτύξει πολλές εφαρμογές των σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή. Αυτές αφορούν την όπλιση και την προένταση των κατασκευών από ΟΣ, τη σεισμική ενίσχυση των κατασκευών από ΟΣ, την ενίσχυση γεφυρών και κτιριακών

κατασκευών, κτλ. Οι προσπάθειες των ερευνητών αυτών είχαν ως αποτέλεσμα μία εντυπωσιακή ανάπτυξη της μεθόδου ενίσχυσης κατασκευών με σύνθετα υλικά.

2.1.1 Ινοπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ)

Τα ινοπλισμένα πολυμερή (αγγλικός όρος Fibre Reinforced Polymers - FRP) είναι σύνθετα υλικά τα οποία αποτελούνται από πλεγμένες συνεχόμενες ίνες (“υφάσματα”) υψηλής εφελκυστικής αντοχής (συνήθως ίνες υάλου, αραμιδίου ή άνθρακα) εμποτισμένες με ρητίνη (συνήθως εποξική) η οποία αποτελεί την “μήτρα”, δηλαδή το συνδετικό υλικό μεταξύ των συνεχών ινών. Τα ΙΟΠ διατίθενται σε μορφή σχετικά δύσκαμπτων ελασμάτων (πάχους της τάξης του 1 mm) ή εύκαμπτων “υφασμάτων” (πάχους της τάξης των 0.1-0.8 mm) με ίνες σε μία ή περισσότερες διευθύνσεις. Στο επόμενο σχήμα απεικονίζονται υφάσματα ΙΟΠ από ίνες (α) υάλου, (β) άνθρακα και (γ) αραμιδίου.



(α)

(β)

(γ)

Σχήμα 2.1 Υφάσματα ΙΟΠ συνεχών ινών από (α) υάλου, (β) άνθρακα και (γ) αραμιδίου

<https://www.castrocompositesshop.com/gb/fibre-reinforcements/1198-biaxial-glass-fabric-600-g-m2.html>

<https://www.kruss-scientific.com/applications/fiber-reinforced-polymers/>

<https://www.cristex.co.uk/products/woven-fabrics/aramid-fabric/>

Η εφαρμογή των ΙΟΠ ως οπλισμός ενίσχυσης υφισταμένων κτηριακών κατασκευών, συνίσταται στην εξωτερική τους επικόλληση σε επιφάνειες δομικών στοιχείων (δοκοί, υποστυλώματα, τοιχεία, κόμβοι κλπ), με χρήση συγκολλητικών ουσιών (π.χ. εποξικής κόλλας). (Σχήμα 2.2)

Η χρήση των ΙΟΠ ως τεχνική ενίσχυσης παρουσιάζει πολλά οφέλη. Τα βασικά χαρακτηριστικά των συνθέτων αυτών υλικών είναι η εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή (5-6 φορές μεγαλύτερη από αυτή του χάλυβα), το χαμηλό βάρος (περίπου 1/4 του χάλυβα), η ανθεκτικότητάς τους σε ηλεκτροχημική διάβρωση και η ανθεκτικότητα στο χρόνο. Τα κύρια πλεονεκτήματα που οδήγησαν την τεχνική των επεμβάσεων στην επιλογή των ΙΟΠ ως μία πολύ καλή εναλλακτική για την επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών, ήταν η ευκολία, η ευελιξία και η ταχύτητα εφαρμογής τους, καθώς

είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της φέρουσας ικανότητας των στοιχείων, χωρίς να μεταβάλλεται η γεωμετρία τους (ή να αυξάνεται η δυσκαμψία τους). Έτσι, η τεχνική των συνθέτων αυτών υλικών είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστική σε σχέση με τις συμβατικές τεχνικές επεμβάσεων (π.χ. μεταλλικοί μανδύες, επικόλληση χαλυβοελασμάτων) παρά το υψηλότερο κόστος.



Σχήμα 2.2 Ενίσχυση δομικών μελών με ελάσματα από σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή
(<https://www.roadsbridges.com/fundamentals-fiber-reinforced-polymer-frp-strengthening>),
(<https://www.osborninc.com/carbon-fiber-column-wrap>) (<http://onevg.com/structural-repair/carbon-fiber-001-2/>)

Ωστόσο, τα ινοπλισμένα πολυμερή παρουσιάζουν ορισμένες εγγενείς αδυναμίες. Οι αδυναμίες αυτές οφείλονται κατά κύριο λόγο στην χρήση των ρητινών (εποξικών), που αποτελούν και το βασικό συστατικό των σύνθετων υλικών ΙΟΠ. Δηλαδή, το βασικό μειονέκτημα της χρήσης των ΙΟΠ έγκειται στη «μήτρα» του σύνθετου υλικού, τη ρητίνη, η οποία αποτελεί το συνδετικό υλικό μεταξύ των συνεχών ινών. Συγκεκριμένα, ορισμένα από τα μειονεκτήματα που προκαλούνται λόγω της ρητίνης είναι: η πτωχή απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες, το υψηλό κόστος, η αδυναμία εφαρμογής σε υγρές επιφάνειες και η πτωχή φυσικοχημική συμβατότητα κατά την εφαρμογή του με υλικά υποστρώματος (σκυρόδεμα ή τοιχοποιία).

2.1.2 Το νέο σύνθετο υλικό ενίσχυσης κατασκευών: Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα

Στοχεύοντας στην εξάλειψη των παραπάνω προβλημάτων της τεχνικής ΙΟΠ, μία εντελώς λογική λύση είναι η αντικατάσταση της ρητίνης (ως οργανική μήτρα) από ένα πολύ λεπτό-κοκκο υλικό ανόργανης σύστασης και συγκεκριμένα με υλικά τύπου κονιάματος με βάση το τσιμέντο. Τέτοιες λύσεις έχουν δοκιμαστεί τα τελευταία χρόνια χωρίς ιδιαίτερη επιτυχία, γεγονός που οφείλεται στην κοκκομετρία της ανόργανης μήτρας των κονιαμάτων, ακόμα και των εξαιρετικά λεπτόκοκκων, η οποία δεν επιτρέπει τον πλήρη εμποτισμό των ινών στο μητρικό υλικό. Δηλαδή, η ανόργανη μήτρα δεν μπορεί να διεισδύσει και να εμποτίσει

ικανοποιητικά τα διάκενα των υφασμάτων, όπως η ρητίνη, με αποτέλεσμα την πτωχή συνάφεια μεταξύ των ινών και της μήτρας (κονίαμα).

Παρατηρώντας αυτήν την αδυναμία σύνδεσης, μία ενδιαφέρουσα και καινοτόμα πρόταση που αναπτύσσεται και μελετάται είναι η αντικατάσταση των «συμβατικών υφασμάτων» συνεχόμενων ινών μίας, συνήθως, διεύθυνσης από υφάσματα ινών τα οποία έχουν την μορφή πλέγματος (textile) με βροχίδες. Η ιδέα της νέας τεχνικής αυτής βασίζεται στο γεγονός ότι τα πλέγματα μπορούν να κατασκευάζονται από δέσμες ινών ανά αποστάσεις σε δύο ή περισσότερες διευθύνσεις, όπως φαίνονται και στην Σχήμα 2.3 (α), με αποτέλεσμα την πολύ καλή συνεργασία μεταξύ των ινών και του μητρικού υλικού (κονιάματος). Αυτή η συνάφεια επιτυγχάνεται, κυρίως, μέσω της μηχανικής εμπλοκής του κονιάματος στα κενά μεταξύ των κλώνων ινών (Σχήμα 2.3 γ). Κατ' αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η καλή συνεργασία του πλέγματος ινών με την ανόργανη μήτρα (κονίαμα).

Έτσι, εισάγεται η καινοτομία ενός νέου σύνθετου ενισχυτικού υλικού. Στην Ελλάδα το νέο αυτό υλικό διαδόθηκε από τους Τριανταφύλλου Χ. Αθ. και Παπανικολάου Γ. Κ. με την ορολογία: «Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα» ή ως συντομογραφία «IAM».

2.1.3 Τα οφέλη της χρήσης των IAM έναντι των IOΠ

Η χρήση των IAM παρουσιάζει πολλαπλά οφέλη. Τα IAM είναι συμβατά με τα υλικά του υποστρώματος (όπως σκυρόδεμα και τοιχοποιία), πυράντοχα, φιλικά προς στο περιβάλλον και μπορούν να εφαρμοστούν σε επιφάνειες με υγρασία καθώς και σε χαμηλές θερμοκρασίες. Απόρροια των παραπάνω, είναι το συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας στην χρήση των IAM ως νέα τεχνική ενίσχυσης.

Σε σύγκριση με τη χρήση συμβατικών υλικών και τεχνικών, πλεονεκτήματα της χρήσης γενικά σύνθετων υλικών, όπως τα IOΠ ή τα IAM αποτελούν η ταχύτητα και η ευκολία εφαρμογής, η μείωση της ποσότητας τσιμέντου, η διατήρηση της γεωμετρίας της κατασκευής, ο υψηλός λόγος της εφελκυστικής αντοχής προς το βάρος, η αντίσταση σε διάβρωση και η ανθεκτικότητα σε διάρκεια.

Ωστόσο, προκύπτουν διάφορα πλεονεκτήματα από τη χρήση IAM έναντι της χρήσης IOΠ, ή για να διατυπωθεί πιο ορθά, η χρήση των IAM απαλείφει κάποια προβλήματα που σχετίζονται με τη χρήση των IOΠ. Τα προβλήματα αυτά οφείλονται κυρίως, όπως αναφέρθηκε, στη χρήση ρητινών και συνοψίζονται στα εξής:

- Πτωχή συμπεριφορά (απώλεια αντοχής) των ρητινών σε θερμοκρασίες που ξεπερνούν τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (περίπου 70° – 80° C), γεγονός που συχνά οδηγεί σε ειδικά και ακριβά μέτρα πυροπροστασίας.
- Υψηλό κόστος των ρητινών.
- Κίνδυνοι που επιφυλάσσει η χρήση των ρητινών στο εργατικό προσωπικό μέσω της επαφής με το ανθρώπινο δέρμα και μέσω των αναθυμιάσεων.
- Αδυναμία εφαρμογής της τεχνικής σε υγρές επιφάνειες. Για την κάλυψη της αδυναμίας αυτής μπορεί να γίνει χρήση ρητινών ειδικού τύπου.
- Περιορισμός της ικανότητας διαπνοής των δομικών στοιχείων που καλύπτονται από μανδύες ΙΟΠ.
- Χημική ασυμβατότητα των ρητινών με τοιχοποιίες ή με υλικά ιστορικών κατασκευών.
- Δυσκολία εντοπισμού πιθανών βλαβών “πίσω” από μανδύες ΙΟΠ, μετά από σεισμούς.
- Μη αναστρεψιμότητα της ενίσχυσης

Επομένως, η χρήση των IAM στο πεδίο των ενισχύσεων των κατασκευών αποτελεί μια εναλλακτική τεχνική ενίσχυσης κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, με την πιο συγγενική της να είναι η χρήση ΙΟΠ. Τα τελευταία είκοσι χρόνια έχει πραγματοποιηθεί συστηματική έρευνα για τη διερεύνηση της αποδοτικότητας των IAM σε περιπτώσεις ενίσχυσης μελών ΟΣ ή τοιχοποιίας. Σε ορισμένες περιπτώσεις έχει συγκριθεί άμεσα η αποτελεσματικότητα μεταξύ των IAM και των ΙΟΠ, και έχει διαπιστωθεί ότι η χρήση IAM είναι πολλά υποσχόμενη, μιας και δεν υστερεί πολύ έναντι της χρήσης ΙΟΠ, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις τα δύο υλικά έχουν την ίδια αποδοτικότητα.

Σημειώνεται ότι μεγάλο κομμάτι της έρευνας σχετικά με την ενίσχυση μελών κατασκευών ΟΣ ή τοιχοποιίας με IAM, έχει διεξαχθεί στο Εργαστήριο Μηχανικής και Τεχνολογίας Υλικών του Πανεπιστημίου Πατρών (Triantafillou et al. 2006, Triantafillou and Papanicolaou 2006, Papanicolaou et al. 2007, Papanicolaou et al. 2008, Bournas et al. 2007, Papanicolaou et al. 2009, Bournas et al. 2009, Bournas and Triantafillou 2011, Papanicolaou et al. 2011, Tzoura and Triantafillou 2014).

Η ενίσχυση στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα με σύνθετα υλικά ανόργανης σύστασης μπορεί να αποτελέσει την εναλλακτική πρόταση απέναντι σε ενισχύσεις από ινοπλισμένα πολυμερή, καθώς εξαλείφει ουσιαστικά τα μειονεκτήματα που προκύπτουν από την χρήση των ΙΟΠ, οι οποίες οφείλονται κατά κύριο λόγο στην ρητίνη. Τα παραπάνω αποτελούν ένδειξη ότι τα IAM αποτελούν ένα ανταγωνιστικό σύστημα ενίσχυσης—και όχι

μόνο –που ελκύει συνεχώς το ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας, ενώ πλέον και ο κλάδος της βιομηχανίας και του εμπορίου εμπλέκονται ολοένα και πιο ενεργά στην παραγωγή και την προώθηση αυτού του συστήματος.

2.2 Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM) - Εισαγωγή

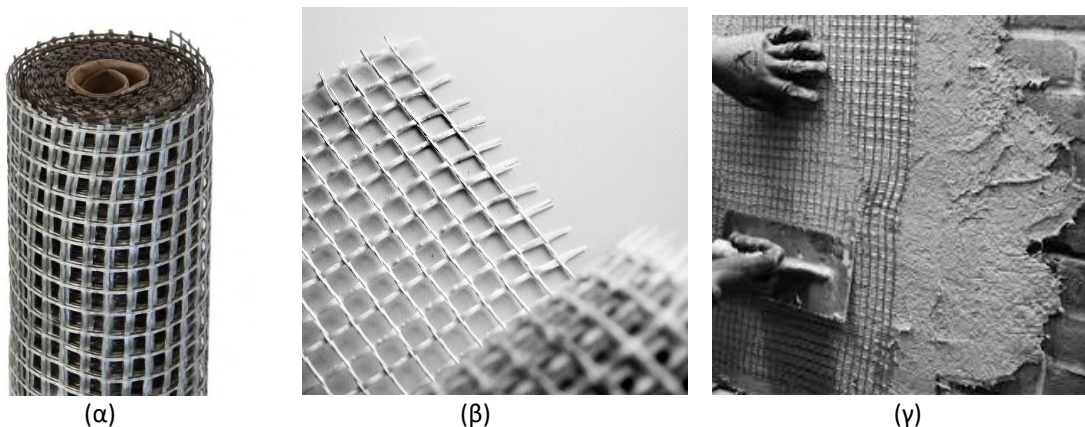
Τα ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα (IAM) αποτελούν ένα σύνθετο υλικό το οποίο άρχισε να μελετάται πειραματικά τόσο σε νέες κατασκευές (συμπεριλαμβανομένης της προκατασκευής), όσο και σε ενισχύσεις υφιστάμενων κατασκευών.

Ο κύριος λόγος για τη μελέτη και τη συστηματική ανάπτυξη του σύνθετου αυτού υλικού στον τομέα ενισχύσεων των νέων κατασκευών συνδέεται άμεσα με ευμενή επίδρασή του στο περιβάλλον και τη συμβολή στην αειφορία των κατασκευών. Η παραπάνω επίδραση προκύπτει από το γεγονός ότι με τη χρήση των IAM μπορούν να επιτευχθούν λεπτά πάχη διατομών στα φέροντα μέλη μιας κατασκευής, έχοντας έτσι ως συνέπεια τη μείωση της χρήσης σκυροδέματος που παρασκευάζεται από τσιμέντο τύπου Portland. Δεδομένου ότι η παραγωγή τσιμέντου τύπου Portland αποτελεί μία από τις πιο ρυπογόνες και ενεργειακά απαιτητικές διαδικασίες, η μείωση της χρήσης του συνδέεται άμεσα με την μείωση των ρυπογόνων εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Γενικά, η χρήση λεπτότερων στοιχείων σκυροδέματος για τη δημιουργία προκατασκευών είναι ωφέλιμη στο περιβάλλον. Επιπλέον, τα IAM είναι σύνθετα υλικά με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Στον άξονα αυτό κινούνται συστηματικά δύο ερευνητικά κέντρα στη Γερμανία: το 532 και 528 στο RWTH Aachen University και στο Dresden University of Technology, αντίστοιχα (Curbach and Jesse 1999, Reinhardt et al. 2003, Brameshuber 2006, Hegger et al. 2006, Hegger et al. 2008a, Hegger et al. 2008b, Hegger et al. 2010, Hegger et al. 2011). Στα συγκεκριμένα ερευνητικά κέντρα το υλικό αναφέρεται με τον αγγλικό όρο “Textile-reinforced concrete (TRC)”.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το 2006 συντάχθηκε από την τεχνική επιτροπή της RILEM: 201-TRC (Brameshuber et al., 2006) μία τεχνική έκθεση σχετικά με τη χρήση IAM τόσο σε επίπεδο νέων κατασκευών όσο και σε επίπεδο ενισχύσεων υφιστάμενων κατασκευών, η οποία παρείχε μια συνολική πρώτη εικόνα για πιθανές εφαρμογές με αντίστοιχες βασικές οδηγίες σχεδιασμού. Πολύ πρόσφατα (2013) εκδόθηκαν οδηγίες για το σχεδιασμό συστημάτων ενίσχυσης αποτελούμενων από IAM (για μη επικαλυμμένα πλέγματα ιών), από την τεχνική επιτροπή 549 του Αμερικανικού ινστιτούτου σκυροδέματος (ACI 549.4R-13, 2013).

2.2.1 Περιγραφή του σύνθετου υλικού IAM

Τα IAM είναι ένα σύνθετο υλικό αποτελούμενο από δύο επιμέρους υλικά. Το πρώτο είναι τα πλέγματα ιών (ινοπλέγματα) (Σχήμα 2.3α, β), τα οποία συνιστούν τον οπλισμό του σύνθετου αυτού υλικού, και το δεύτερο είναι το κονίαμα ανόργανης σύστασης (συνήθως με βάση το τσιμέντο ή υδραυλικά ασβεστοκονιάματα), που αποτελεί το μητρικό υλικό του σύνθετου υλικού. (Σχήμα 2.3 γ)



Σχήμα 2.3 (α), (β) ινοπλέγματα και (γ) Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας

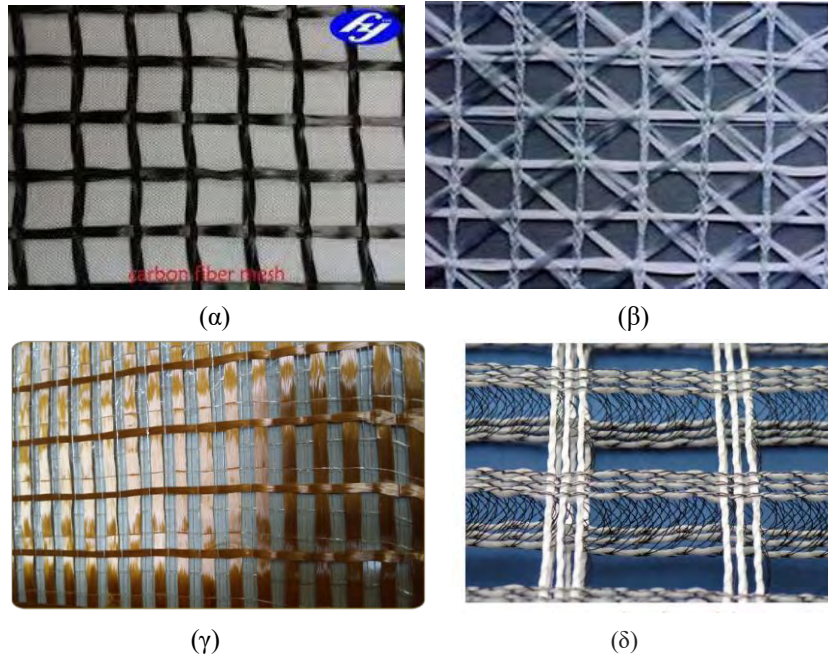
(<https://www.vakalopoulos.com/showprod.php?id=3657>)

(https://www.archiproducts.com/en/products/kimia/glass-fibre-reinforcing-mesh-kimitech-550_408172)

Παρακάτω αναλύονται κάποια στοιχεία για τα επιμέρους αυτά υλικά.

❖ Ινοπλέγματα

Τα ινοπλέγματα, ή πλέγματα ιών, όπως αναφέραμε συνιστούν τον οπλισμό των IAM. Είναι στην ουσία «μανδύες» ιών υψηλής αντοχής σε μορφή πλέγματος (textile) με βροχίδες. Τα πλέγματα αυτά αποτελούνται από ευθύγραμμους κλώνους ιών διατεταγμένους σε δύο ή περισσότερες διευθύνσεις (Σχήμα 2.4). Ένας κλώνος αποτελείται από πολλά νήματα ιών. Ο τρόπος κατασκευής τους είναι τέτοιος ώστε οι κλώνοι ιών να διατάσσονται ανά αποστάσεις μεταξύ τους (βροχίδες), αποβλέποντας στην δημιουργία κενών. Τα κενά που δημιουργούνται αποσκοπούν στην διείσδυση του μητρικού υλικού (του κονιάματος) ανάμεσά τους εξασφαλίζοντας κατά συνέπεια την ανάπτυξη της μηχανικής εμπλοκής μεταξύ του οπλισμού και της οργανικής μήτρας.



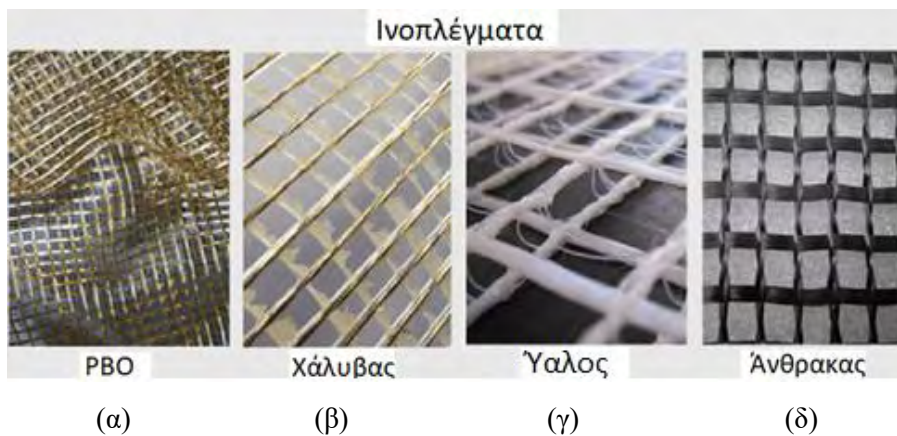
Σχήμα 2.4 Πλέγματα ινών (α) άνθρακα δύο διευθύνσεων, (β) υάλου 4 τεσσάρων διευθύνσεων, (γ) PBO (πολυφαινυλενικό χωρίς ισοισοξαζόλιο) 2 διευθύνσεων, και (δ) τριών διαστάσεων (ΚΟΥΤΑΣ, 2015), (Μπουρνάς, 2008)

Οι τεχνικές ύφανσης - πλέξης για την κατασκευή των ινοπλεγμάτων ποικίλουν. Ορισμένοι τρόποι παρασκευής των πλεγμάτων είναι είτε μέσω ύφανσης των οριζόντιων και των κατακόρυφων κλώνων ινών (woven textiles), είτε απλώς μέσω συγκράτησης των οριζόντιων με τους κατακόρυφους κλώνους με πρόσθετα νήματα που υφαίνονται με ειδικό τρόπο (non woven ή stitched textiles). Στην πρώτη περίπτωση η δομή του πλέγματος καθίσταται συνήθως πιο σταθερή, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η σταθερότητα της δομής εξαρτάται αποκλειστικά από την ποιότητα των πρόσθετων νημάτων ύφανσης.

Σε κάθε περίπτωση η επικάλυψη των ινών του πλέγματος με κάποιο πρόσθετο πολυμερές (π.χ. ρητίνη) βελτιώνει ακόμη περισσότερο τη δομική ακεραιότητα του πλέγματος. Η επικάλυψη του πλέγματος ινών με ρητίνη συμβάλλει στην αύξηση της μηχανικής αλληλοσύνδεσης μεταξύ του πλέγματος και της μήτρας, παρά το γεγονός ότι καθίσταται αδύνατος ο εμποτισμός των ινών με το μητρικό υλικό και χάνεται ο όποιος χημικός δεσμός που θα μπορούσε να αναπτυχθεί μεταξύ τους. Ωστόσο, το μειονέκτημα που επιφέρει η επικάλυψη των ινών με κάποιο πολυμερές είναι η δυσκολία της προσαρμογής του πλέγματος σε πολύπλοκες γεωμετρίες, εξαιτίας της μείωσης της ευκαμψίας του (τα επικαλυμμένα πλέγματα είναι πιο σκληρά). Ο βαθμός μείωσης της ευκαμψίας του εξαρτάται από το βαθμό εμποτισμού των ινών από το υλικό της επικάλυψης.

Το υλικό των ινών από τα οποία αποτελούνται τα ινοπλέγματα είναι από συνήθεις ίνες άνθρακα, υάλου ή βασάλτη υψηλής εφελκυστικής αντοχής (>1500 MPa). Οι ίνες άνθρακα έχουν τη μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή (>3000 MPa) καθώς και το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας σε σύγκριση με τις ίνες υάλου και βασάλτη (περίπου 230 GPa έναντι 70 και 80 GPa αντίστοιχα). Κατά συνέπεια, οι ίνες άνθρακα υπερτερούν έναντι των υπολοίπων από άποψη μηχανικών χαρακτηριστικών. Όμως, εξαιτίας του υψηλού κόστους των ινών άνθρακα, κυρίως λόγω της διαδικασίας παραγωγής του, πολλές φορές καθίσταται προτιμότερη η επιλογή της χρήσης ινών υάλου ή βασάλτη.

Επισημαίνεται, ότι για τις ίνες υάλου, λόγω της ευαισθησίας τους σε αλκαλικό περιβάλλον (όπως αυτό του κονιάματος με τσιμεντοειδή σύσταση) είναι απαραίτητη η ειδική προεπεξεργασία τους ώστε να αποκτήσουν υψηλή ανθεκτικότητα σε αλκαλικό περιβάλλον, κάτι που επιφέρει αύξηση του κόστους τους. Επομένως, η επικάλυψη των ινών με κάποιο πολυμερές αποτελεί ταυτόχρονα και μέτρο προστασίας έναντι του αλκαλικού περιβάλλοντος και ως εκ τούτου στην περίπτωση επικαλυμμένων ινών δεν είναι απαραίτητη η ειδική αυτή επεξεργασία. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται εικόνες από πλέγματα ινών PBO, χάλυβα, υάλου και άνθρακα, κατά σειρά, τα οποία χρησιμοποιούνται ως οπλισμός των ΙΑΜ.



Σχήμα 2.5 Διάφορα ινοπλέγματα δύο διαστάσεων με κλώνους ινών σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις: (α) πλέγμα ινών PBO (πολυφαινυλενικό χωρίς ισοσοξαζόλιο), (β) πλέγμα ινών χάλυβα, (γ) πλέγμα ινών υάλου και (δ) πλέγμα ινών άνθρακα.

https://www.researchgate.net/figure/Main-typologies-of-fiber-used-in-FRCM-composites_fig1_338279897

- Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός πλέγματος ινών συνοψίζονται στα εξής:

(α) Η ποσότητα των ινών σε κάθε ευθύγραμμο κλώνο, η οποία εκφράζεται ως το βάρος του κλώνου σε g ανά χιλιόμετρο μήκους (tex: g/km).

(β) Η απόσταση μεταξύ δύο ευθύγραμμων κλώνων ινών ανά διεύθυνση, η οποία καθορίζει το μέγεθος των κενών.

(γ) Η κατανομή της συνολικής ποσότητας ινών ανά διεύθυνση (π.χ. κατανομή 50-50% σημαίνει ίση ποσότητα ινών στις δύο διευθύνσεις).

(δ) Το επιφανειακό βάρος του πλέγματος ινών που εκφράζεται σε g/m^2 και πρακτικά καθορίζει, βάσει της κατανομής της ποσότητας των ινών ανά διεύθυνση, τη συνολική ποσότητα ινών ανά διεύθυνση και ανά μέτρο πλάτους του πλέγματος.

Επίσης, ένα συνήθως πρακτικά βασικό γεωμετρικό μέγεθος του πλέγματος ινών είναι το ονομαστικό πάχος ανά διεύθυνση, το οποίο όμως μπορεί να υπολογιστεί με δεδομένα τα (γ) και (δ) και την πυκνότητα μίας ίνας (η οποία είναι μοναδική για κάθε υλικό από το οποίο αποτελείται η ίνα). Λαμβάνοντας ένα μέτρο πλάτους του πλέγματος, ο υπολογισμός του ισοδύναμου πάχους σε μία διεύθυνση προκύπτει ως το πηλίκο της επιφανειακής μάζας του πλέγματος που αντιστοιχεί στη διεύθυνση κάθετα στο πλάτος προς την πυκνότητα της ίνας.

❖ **Ανόργανη μήτρα**

Η μήτρα αποτελεί το συνδετικό υλικό μεταξύ του ινοπλέγματος και της επιφάνειας του στοιχείου που προορίζεται να ενισχυθεί. Μέσω της μήτρας μεταβιβάζονται οι εφελκυστικές δυνάμεις στις ίνες ενώ παράλληλα αυξάνεται η διατμητική και η θλιπτική αντοχή της στρώσης ενίσχυσης (οι ίνες παραλαμβάνουν μόνο εφελκυστικές τάσεις). Ακόμα, προσφέρει προστασία στο ινόπλεγμα, αφού έτσι δεν είναι εκτεθειμένο.

Η σύσταση της ανόργανης μήτρας καθορίζει σε σημαντικό βαθμό την απόκριση του IAM ως σύνθετο υλικό, κυρίως όσον αφορά τη δυνατότητα ανάληψης φορτίων και την ανθεκτικότητα στο χρόνο. Το υλικό το οποίο θα χρησιμοποιηθεί ως μήτρα για τα IAM είναι αναγκαίο να πληροί ορισμένες προϋποθέσεις οι οποίες σχετίζονται με τη διαδικασία παραγωγής, τις μηχανικές ιδιότητες και την ανθεκτικότητα των IAM. Η βασικότερη όμως λειτουργία που πρέπει να πληροί η ανόργανη μήτρα είναι η ικανότητα διείσδυσής της στο πλέγμα ινών, ώστε να επιτευχθούν οι κατά το δυνατόν βέλτιστες συνθήκες συνάφειας μεταξύ του ινοπλέγματος και της μήτρας. Για τον λόγο αυτό, το κονίαμα πρέπει να είναι λεπτόκοκκης σύστασης (μέγιστος κόκκος αδρανών $< 2mm$) και με ικανοποιητικά ρεολογικά χαρακτηριστικά.

Συνοπτικά, οι υπόλοιπες απαιτήσεις που οφείλει να πληροί το ανόργανο μητρικό υλικό είναι τα εξής:

- ανθεκτικότητα έναντι των δυσμενών περιβαλλοντικών συνθηκών

- υψηλή εργασιμότητα
- υψηλό ιξώδες (για εύκολη εφαρμογή σε κατακόρυφες ή ανάποδες επιφάνειες)
- χαμηλό ρυθμό απώλειας της εργασιμότητας (η εφαρμογή κάθε στρώσης κονιάματος να είναι δυνατή ενώ η προηγούμενη στρώση βρίσκεται ακόμα σε νωπή κατάσταση)
- επαρκής διατμητική αντοχή, για την αποτροπή μορφών αστοχίας που σχετίζονται με την πρόωρη αποκόλληση του σύνθετου υλικού από το υπόστρωμα (σκυρόδεμα ή τοιχοποιία).
- συμβατή χημική δομή με τη χημική δομή του πλέγματος των ινών

Ο πιο διαδεδομένος τύπος μήτρας που χρησιμοποιείται στην περίπτωση των ενισχύσεων κατασκευών ΟΣ ή τοιχοποιίας, είναι τα κονιάματα με βάση το τσιμέντο τύπου Portland (το κοινό τσιμέντο δηλαδή που χρησιμοποιείται και για την παρασκευή σκυροδέματος). Επιπρόσθετα, η προσθήκη κλάσματος πολυμερών στο κονίαμα βελτιώνει τις μηχανικές του ιδιότητες του κονιάματος και συγκεκριμένα εκείνες που συνδέονται με τη διατμητική τάση συνάφειας που μπορεί να αναπτυχθεί ανάμεσα στο κονίαμα και στο υπόστρωμα. Το αποτέλεσμα αυτής της προσθήκης κλάσματος πολυμερών είναι η αύξηση της εφελκυστικής αντοχής του κονιάματος, καθώς και η βελτίωση της συνάφειας μεταξύ των κλώνων ινών (όταν δεν είναι επικαλυμμένοι με ρητίνη) με το μητρικό υλικό. Το τελευταίο οφείλεται στην ικανότητα διείσδυσης των πολυμερών ανάμεσα στις ίνες από τις οποίες αποτελούνται οι κλώνοι.

Με βάση τα παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι ο ρόλος της μήτρας είναι διττός. Λειτουργεί αφενός μεν ως μήτρα των IAM, εξασφαλίζοντας τη συνεργασία ινοπλέγματος- μήτρας όχι μόνο μέσω χημικής συνάφειας αλλά και μέσω μηχανικής εμπλοκής, αφετέρου δε ως συγκολλητικό μέσο μεταξύ του IAM και του υποστρώματος.

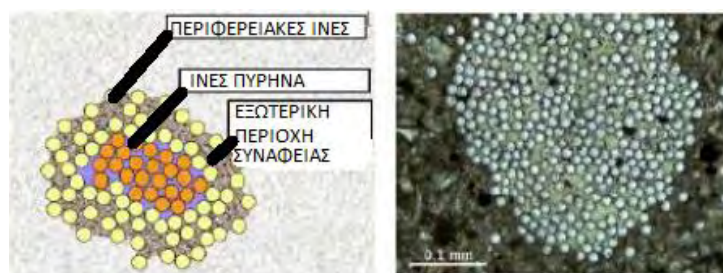
❖ **Συνάφεια μεταξύ Πλεγμάτων – Ανόργανης Μήτρας**

Η μηχανική συμπεριφορά των IAM, όπως και σε όλα τα σύνθετα υλικά, δεν εξαρτάται μόνο από τις μηχανικές ιδιότητες των επιμέρους συστατικών τους, αλλά και από τη μεταξύ τους συνάφεια. Στην περίπτωση καλών συνθηκών συνάφειας, το σύνθετο υλικό που προκύπτει χαρακτηρίζεται από υψηλή αντοχή και ψαθυρότητα, ενώ στην αντίθετη περίπτωση προκύπτει ένα υλικό με χαμηλή αντοχή και χαρακτηριστικά ψεύδο-πλαστιμότητας.

Στα IAM κάθε κλώνος αποτελείται από ένα πλήθος ινών οι οποίες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τις περιφερειακές ίνες (sleeve filaments) και τις ίνες του πυρήνα (core filaments). Οι περιφερειακές ίνες έρχονται σε άμεση επαφή με το μητρικό υλικό σχηματίζοντας έτσι μια

καλή συνάφεια. Κατ' αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η ολίσθηση τους και επιτυγχάνεται η συμμετοχή τους σε μεγάλο βαθμό στην ανάληψη φορτίων. Σε αντίθεση με τις περιφερειακές ίνες, οι ίνες του πυρήνα έχουν μειωμένη συνάφεια με το μητρικό υλικό, καθώς η ποσότητα του υλικού της μήτρας που δύναται να διεισδύσει σε αυτές είναι μικρή, με αποτέλεσμα να ολισθαίνουν σημαντικά. Είναι φανερό, ότι ο χημικός δεσμός μεταξύ των ινών παίζει σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά του σύνθετου αυτού υλικού. Οι δυνάμεις που ασκούνται, μεταφέρονται από τη μήτρα στο δεσμό μεταξύ μητρικού υλικού και ινών, και αντίστοιχα στο δεσμό περιφερειακών ινών και ινών πυρήνα. Προκειμένου να πετύχουμε όσο το δυνατόν καλύτερη συνάφεια μεταξύ των ινών του πυρήνα και της μήτρας, οι κλώνοι θα πρέπει να είναι προ εμποτισμένοι με πολυμερή. Η ρητίνη έχει τη δυνατότητα να εισχωρεί σε όλο το βάθος του πυρήνα του κλώνου εξασφαλίζοντας τη σύνδεση ινών με τη ρητίνη, αποφεύγοντας την ολίσθηση των εσωτερικών ινών, με αποτέλεσμα ο κλώνος να λειτουργεί σαν ένα απόλυτα ομοιογενές υλικό.

Ο Bartos το 1987 με στόχο να περιγράψει τον τρόπο αστοχίας των μερικώς εμποτισμένων κλώνων πρότεινε ένα σύνθετο μηχανισμό συνάφειας μεταξύ των κλώνων ινών και μητρικού υλικού. Ο μηχανισμός αυτός περιλαμβάνει «τηλεσκοπικού» τύπου ολίσθηση μεταξύ των ινών του κλώνου κατά την αστοχία. Με βάση αυτόν οι περιφερειακές ίνες που είναι επαρκώς εμποτισμένες με το μητρικό υλικό μπορούν να αστοχήσουν, ενώ οι εσωτερικές ίνες ολισθαίνουν, συμβάλλοντας όμως στην απορρόφηση ενέργειας καθώς η ολίσθηση είναι ελεγχόμενη.



Σχήμα 2.6 Κλώνος ινών με μερικώς εμποτισμένες ίνες (Bartos, 1987)

2.2.2 Διαδικασία Εφαρμογής IAM

Παρουσιάζονται εν συντομία τα στάδια της διαδικασίας εφαρμογής σύνθετων υλικών :

1. Προετοιμασία της επιφάνειας (εξομάλυνση της επιφάνειας, λάξευση γωνιών, κτλ.).
2. Επάλειψη μίας πρώτης στρώσης κονιάματος στην επιφάνεια του διαβρεγμένου σκυροδέματος (μήτρα).

3. Τοποθέτηση της πρώτης στρώσης του ινοπλέγματος όπου συνιστάται ο πλήρης εμποτισμός των πλεγμάτων ινών με κονίαμα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου εφαρμοστούν όλες οι απαιτούμενες στρώσεις ινοπλεγμάτων και επικαλυφθούν όλα τα ινοπλέγματα από την εκάστοτε επιφάνεια
4. Επικάλυψη (εφαρμογή τελικού στρώματος κονιάματος).



Σχήμα 2.7 Εφαρμογή των ΙΑΜ σε διάφορα δομικά μέλη ΟΣ και άοπλης τοιχοποιία. <http://www.impresedilines.it/da-ruredil-le-soluzioni-antisismiche-certificate-aci549/>
<https://www.ildispariquotidiano.it/it/consolidamento-antisismico-oggi-giornata-di-studi-ruregold-a-ischia/>
<https://www.ingegneri.cc/consolidamento-statico-frcm-le-istruzioni.html> https://www.researchgate.net/figure/Application-of-a-PBO-FRCM-strengthening-to-a-masonry-substrate_fig2_338279897

Κεφάλαιο 3

3. ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΩΝ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΩΝ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ

3.1 Προκατασκευασμένα στοιχεία από IAM: Γενικά

Το πεδίο εφαρμογής των ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα, διευρύνεται ολοένα και περισσότερο στον τομέα των κατασκευών, καθώς παρουσιάζουν ένα ευρύ φάσμα πλεονεκτημάτων. Το γεγονός ότι υπάρχει δυνατότητα να κατασκευαστούν στοιχεία με πολύ μικρό πάχος (από 10 έως 30 χιλιοστά) και με μεγάλη ικανότητα παραλαβής φορτίων και υψηλή ανθεκτικότητα έναντι διάβρωσης προσφέρει στα στοιχεία IAM μεγάλο πλεονέκτημα σε σχέση με το οπλισμένο σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα στις περισσότερες περιπτώσεις κατασκευών (νέων και υφιστάμενων). Το μικρό πάχος-βάρος που προκύπτει στα στοιχεία IAM αιτιολογείται από την υψηλή ανθεκτικότητα των IAM έναντι διάβρωσης, σε αντίθεση με τα δομικά στοιχεία ΟΣ με συμβατικό χαλύβδινο οπλισμό, στις οποίες το μικρότερο δυνατό πάχος που μπορεί να επιτευχθεί είναι 70 έως 100 χιλιοστά, εξαιτίας της απαίτησης ελάχιστου πάχους επικάλυψης για την προστασία του χαλύβδινου οπλισμού έναντι διάβρωσης του λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών. Επίσης, επειδή υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας λείων επιφανειών με τη χρήση λεπτόκοκκων κονιαμάτων και λόγω της ευκολίας του σχεδιασμού καμπύλων επιφανειακών στοιχείων, τα στοιχεία IAM προτιμώνται ώστε να κατασκευαστούν προκατασκευασμένα δομικά στοιχεία και άλλα στοιχεία με αυστηρές περιβαλλοντικές και αισθητικές απαιτήσεις.

Στη συνέχεια της ενότητας αυτής θα παρουσιαστούν εν συντομία ορισμένα χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογών IAM σε νέες κατασκευές και τεχνικά έργα σε στοιχεία που δύναται να συναντώνται στην καθημερινή ζωή καθώς και σε ειδικές περιπτώσεις απαιτήσεων.

3.1.1 Στοιχεία κάλυψης επιφανειών

Στοιχεία από IAM χρησιμοποιούνται σε κτήρια με σκοπό την κάλυψη προσόψεων, για αρχιτεκτονικούς σκοπούς. Σε αρκετές περιπτώσεις υφιστάμενων κτιρίων υπάρχει η ανάγκη κάλυψης των εξωτερικών ή εσωτερικών επιφανειών για διάφορους λόγους. Τα στοιχεία IAM θεωρούνται άκρως κατάλληλα στην προκειμένη περίπτωση εξαιτίας των προαναφερθέντων πλεονεκτημάτων, δηλαδή το μικρό πάχος και γενικότερα το μικρό βάρος ανά τετραγωνικό

μέτρο, τη δυνατότητα ανάληψης εφελκυστικών τάσεων και κατ' επέκταση των τάσεων του ανέμου, καθώς επίσης και λόγω της ευκολία εφαρμογής τους. Επίσης, στα πλεονεκτήματα που συμβάλλουν στην επιλογή των στοιχείων IAM συγκαταλέγεται η ικανότητα δημιουργίας λείων επιφανειών με τη χρήση καλά διαβαθμισμένου αυτοσυμπυκνούμενου λεπτόκοκκου σκυροδέματος, που προσεγγίζει το κονίαμα. Το αποτέλεσμα που προκύπτει να είναι μια καλαίσθητη επιφάνεια, η οποία ταυτοχρόνα χαρακτηρίζεται από μεγάλη αντοχή σε εφελκυστικές δυνάμεις και ανεμοπιέσεις και σε ανθεκτικότητα έναντι διάβρωσης.

Στην Βόρεια και Δυτική Ευρώπη καθώς και σε άλλες χώρες χρησιμοποιούνται ευρέως στοιχεία κάλυψης από IAM. Χαρακτηριστική είναι η πρώτη εφαρμογή των IAM όπου έγινε σε κτίριο επέκτασης του Πολυτεχνείου του Aachen (RWTH Aachen), η οποία είχε σκοπό την κάλυψη εξωτερικών επιφανειών. Με την πάροδο του χρόνου στοιχεία IAM χρησιμοποιήθηκαν επίσης για την κάλυψη επιφανειών στο Ντίσελντορφ και στο Ντόρτμουντ της Γερμανίας, καθώς επίσης και σε άλλα μέρη της Βόρειας και Δυτικής Ευρώπης. Παρακάτω, παρουσιάζονται εικόνες από περιπτώσεις κάλυψης όψεων με IAM σε κτίρια διαφορετικών χρήσεων.



Σχήμα 3.1 Κάλυψη επιφανειών με στοιχεία IAM σε στο Άαχεν
[www.heringinternational.com]



Σχήμα 3.2 Εφαρμογή στοιχείων κάλυψης από IAM στο κτίριο επέκτασης του Πολυτεχνείου του Aachen [RWTH Aachen University]. (Μπουρνάς, 2008)



Σχήμα 3.3 Κάλυψη επιφανειών με στοιχεία IAM σε σχολείο στο Ντίσελντορφ
[<http://materia.nl/>]

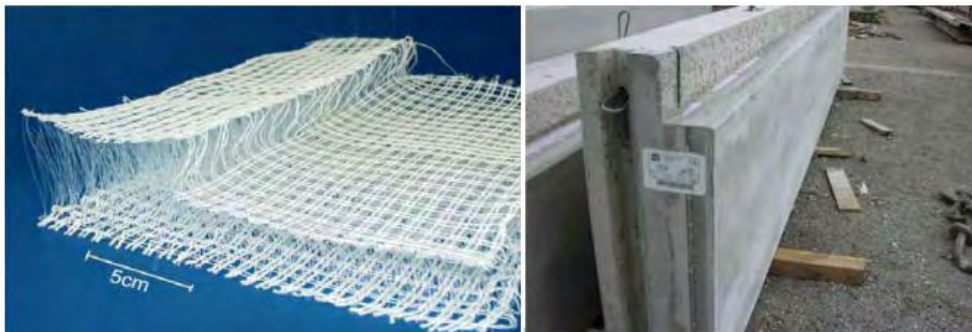
Συνεπώς, τα IAM, ως στοιχεία κάλυψης αποτελούν μία εναλλακτική λύση με ιδιαίτερο αρχιτεκτονικό αποτέλεσμα και χαμηλότερο κόστος σε σύγκριση με άλλες επιλογές κάλυψης (πχ πέτρα). (Μπουρνάς, 2008)

3.1.2 Στοιχεία τύπου σάντουιτς από IAM

Τα στοιχεία τύπου σάντουιτς από IAM αποτελούν έναν άλλο τύπο στοιχείων για την κάλυψη των επιφανειών, στην οποία όμως το πάχος είναι μεγαλύτερο και φεύγει από τα πλαίσια του επιφανειακού στοιχείου και εισέρχεται στο τρισδιάστατο πεδίο. Στα στοιχεία τύπου σάντουιτς έχουν νόημα τα τρισδιάστατα ινοπλέγματα, τα οποία έχουν ινόπλεγμα δύο διευθύνσεων σε δύο παράλληλα επίπεδα και συνδέονται μεταξύ τους με αποστατήρες του ίδιου υλικού ινών, οι οποίοι προσδιορίζουν και την απόσταση που θα έχουν μεταξύ τους τα δύο επίπεδα. Αποτελούνται από δύο κελύφη, το ένα κέλυφος είναι το στοιχείο IAM ενώ το άλλο είναι ένα στοιχείο από σύνηθες σκυρόδεμα. Μεταξύ των δύο αυτών κελυφών παρεμβάλλεται και το υλικό θερμομόνωσης του στοιχείου.

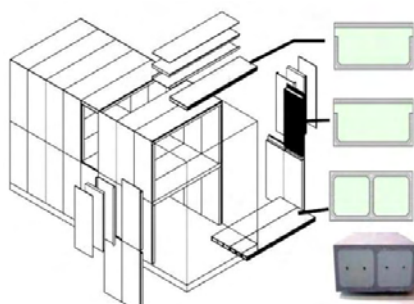
Η σκυροδέτηση τους είναι ανάλογη με αυτή των συμβατικών οπλισμών σκυροδέματος. Αναλυτικά η διαδικασία παρασκευής του στοιχείου τύπου σάντουιτς έχει ως εξής: αρχικά παρασκευάζεται το στοιχείο από IAM και τοποθετείται λεπτόκοκκο σκυρόδεμα ανάμεσα στα δύο επίπεδα οπλισμού. Αφότου σκληρυνθεί το σκυρόδεμα του στοιχείου IAM πραγματοποιείται και η σκυροδέτηση του κελύφους με το συμβατικό σκυρόδεμα. Τα δύο αυτά

κελύφη συνδέονται μέσω αγκυρίων που έχουν στηριχθεί στο στοιχείο από IAM πριν την έναρξη της διαδικασίας παρασκευής του στοιχείου τύπου σάντουιτς.



Σχήμα 3.4 Στοιχεία τύπου σάντουιτς από IAM : (α) Μορφή πλέγματος τριών διαστάσεων, (β) στοιχείο τύπου σάντουιτς [ITA, IMB RWTH Aachen University]

Τα στοιχεία τύπου σάντουιτς έχουν επίσης εφαρμογή και σαν δομικά στοιχεία σε όλα τα μέρη της κατασκευής σε διάφορες μορφές ανάλογα με το που θέλουμε να τα χρησιμοποιήσουμε, για παράδειγμα σαν κάθετα ή οριζόντια στοιχεία. Χαρακτηριστικό είναι το επόμενο σχήμα.



Σχήμα 3.5 Ολοκληρωμένο σύστημα στέγασης με δομικά στοιχεία τύπο σάντουιτς από IAM (Μπουρνάς, 2008)

3.1.3 Παραπετάσματα από IAM

Πριν κάποια χρόνια το Πολυτεχνείο της Δρέσδης (TU Dresden) παρουσίασε μια πρότυπη εφαρμογή στοιχείων IAM σε παραπετάσματα. Το στοιχείο ήταν διαστάσεων 2.50 x 1.50 m² και πάχους 20 mm. Χρησιμοποιήθηκε πλέγμα οπλισμού από ίνες υάλου με επικάλυψη ζirkονίου, το οποίο προσδίδει ανθεκτικότητα σε αλκαλικό περιβάλλον (AR Glass). Περιμετρικά του στοιχείου επιλέχθηκε να τοποθετηθούν ράβδοι ινών υάλου για μεγαλύτερη δυσκαμψία των άκρων του στοιχείου. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να μειωθεί το ελάχιστο βάρος που μπορεί να έχει ένα παραπέτασμα.



Σχήμα 3.6 Παραπέτασμα από ινόπλεγμα σε ανόργανη μήτρα. (Μπουρνάς, 2008)

3.1.4 Συστήματα εξωτερικής θερμομόνωσης από IAM

Το σύστημα εξωτερικής θερμομόνωσης από IAM αποτελεί μία σχετικά οικονομική λύση. Εάν αναλογιστεί κανείς τα οφέλη που προσφέρει κρίνεται αποδοτικότερη σε σχέση με την παραδοσιακή ενδιάμεση μόνωση και δικέλυφη κατασκευή. Με το σύστημα εξωτερικής θερμομόνωσης υπάρχει καλύτερη εκμετάλλευση της θερμοχωρητικότητας της τοιχοποιίας, ενώ τα στοιχεία αυτού του τύπου είναι πιο ελαφρά ώστε να μην επιβαρύνουν την κατασκευή με πρόσθετα μόνιμα φορτία. Τέλος, πρόκειται για μία εναλλακτική κατασκευή θερμομόνωσης χαμηλού κόστους με ικανοποιητική ευελιξία και στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό όπως προαναφέραμε παραπάνω.

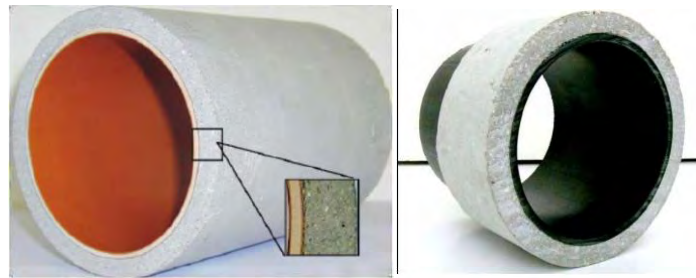


Σχήμα 3.7 Τομή συστήματος εξωτερικής θερμομόνωσης από IAM. (ΣΑΡΔΕΛΗ, 2013)

3.1.5 Σωλήνες από ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα

Στο Πολυτεχνείο της Δρέσδης με στόχο την πειραματική διερεύνηση κατασκευάστηκαν σωλήνες από IAM με διαμήκη διάσταση έως και ένα μέτρο. Στο εσωτερικό αυτών είχε τοποθετηθεί λεπτός σωλήνας από PVC, ώστε να επιτευχθεί η ομαλή και χωρίς τριβές ροή των υγρών. Εξωτερικά από τον πλαστικό σωλήνα έχει τοποθετηθεί το πλέγμα οπλισμού και η ανόργανη μήτρα. Ύστερα από την πειραματική διερεύνηση των κατασκευών αυτών

παρατηρήθηκε ότι η συμπεριφορά των σωλήνων βελτιώνεται, αφού αυξάνεται η τιμή του φορτίου της πρώτης ρωγμής και παράλληλα επιβραδύνεται η ανάπτυξη των ρωγμών.



Σχήμα 3.8 Αγωγοί παρασκευασμένος από IAM. (Δαμίγου, 2011)

3.1.6 Γέφυρες

Το Πολυτεχνείο της Δρέσδης σε συνεργασία με την κατασκευαστική εταιρεία Betonwerk Oschatz κατασκεύασε την πρώτη πεζογέφυρα από IAM, για ερευνητικούς καθώς και εκθεσιακούς σκοπούς. Η συγκεκριμένη γέφυρα είχε άνοιγμα 9m και αποτελούνταν από 10 προκατασκευασμένα τμήματα με μήκος 0,90 m, ενώ το κατάστρωμα της είχε πάχος 30 mm. Επίσης, δεν παραλείφθηκε να ανοιχθούν οπές στα άκρα της κατασκευής, από τις οποίες θα διέρχονταν τένοντες προέντασης από χάλυβα με σκοπό την ένωση των επιμέρους τμημάτων.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της κατασκευής αυτής ήταν ότι το βάρος του συνόλου της μειώθηκε μόλις στο ένα πέμπτο (1/5) σε σχέση με την αντίστοιχη κατασκευή αν χρησιμοποιούταν σύνηθες οπλισμένο σκυρόδεμα.



Σχήμα 3.9 Πεζογέφυρα από IAM (C.Koylas, 2015)

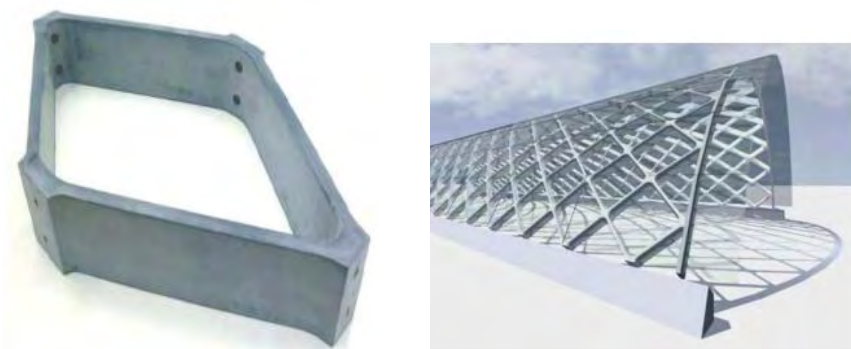


Σχήμα 3.10 Ένωση προεντεταμένων τμημάτων για την κατασκευή πεζογέφυρας με την χρήση στοιχείων IAM (Δαμίγου, 2011).

3.1.9 Πλαίσια από προκατασκευασμένα στοιχεία IAM πολυγωνικής μορφής

Η παρακάτω κατασκευή (Σχήμα 3.11) πραγματοποιήθηκε στο Πολυτεχνείο του Άαχεν (RWTH Aachen University) με σκοπό την παρουσίαση των δυνατοτήτων του νέου αυτού συνθέτου υλικού IAM στο ευρύτερο κοινό. Η αισθητική αυτής της κατασκευής είναι υψηλή γεγονός που ενθαρρύνει τους αρχιτέκτονες στην υιοθέτηση των IAM.

Η κατασκευή αυτή είναι ένα πλαίσιο το οποίο αποτελείται από προκατασκευασμένα στοιχεία IAM πολυγωνικής μορφής, και λειτουργεί στατικά ως δικτύωμα με σημαντικό πλεονέκτημα ότι έχει τη δυνατότητα παραλαβής καμπτικών ροπών, οι οποίες δημιουργούνται από τις ανεμοπιέσεις.



Σχήμα 3.11 Αριστερά: Δομικό στοιχείο δικτύωματος & Δεξιά: 3D απεικόνιση (Μπουρνάς, 2008)

3.2 Τα IAM στο πεδίο ενισχύσεων των υφιστάμενων κατασκευών: Γενικά

Τα Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM) παρουσιάζουν ένα πακέτο πλεονεκτημάτων και ολοένα και περισσότερο χρησιμοποιούνται για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών. Ορισμένα από τα κύρια χαρακτηριστικά που κάνουν αυτή τη νέα γενιά υλικών αρκετά υποσχόμενη είναι η εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή, το χαμηλό ειδικό βάρος, η υψηλή αντίσταση στην διάβρωση, η ανθεκτικότητα σε διάρκεια και η εύκολη εφαρμογή τους σε υφιστάμενες κατασκευές με μη αλλαγή της γεωμετρίας. Γενικότερα, τα IAM καλύπτουν ένα σημαντικό πεδίο εφαρμογών καθώς υπάρχει η δυνατότητα της γρήγορης και εύκολης τοποθέτησης τους σε οποιαδήποτε διεύθυνση, αναλαμβάνοντας τις αντίστοιχες τάσεις. Οι εφαρμογές των IAM επεκτείνονται και στο πεδίο ενίσχυσης υφιστάμενων κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα ή/και φέρουσα τοιχοποιία.

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται ορισμένες πειραματικές εφαρμογές της ενίσχυσης των δομικών στοιχείων ΟΣ και τοιχοποιίας με ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα. Αν και από τη διεθνή βιβλιογραφία προκύπτει ότι μέχρι σήμερα η έρευνα είναι σχετικά περιορισμένη, το εύρος των πειραματικών εφαρμογών είναι μεγάλο. Σε όλες τις περιπτώσεις έχει αποδειχθεί ότι η αποδοτικότητα των ενισχύσεων με IAM είναι καλή έως εξαιρετική.

Κατηγοριοποιώντας τις εφαρμογές των IAM στις ενισχύσεις στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος (ΟΣ) και στις ενισχύσεις από φέρουσα τοιχοποιία, όπως θα παρουσιαστούν στην ενότητα αυτή, έχουμε τα εξής:

❖ Ενίσχυση στοιχείων ΟΣ

Οι πειραματικές μελέτες σχετικά με ενισχύσεις στοιχείων ΟΣ που έχουν δημοσιευτεί στη διεθνή βιβλιογραφία μέσα από πειραματικές έρευνες κατηγοριοποιούνται επιγραμματικά ως εξής:

- Περίσφιξη στοιχείων ΟΣ για την αύξηση της αντοχής και της πλαστιμότητας (ικανότητας παραμόρφωσης) (Triantafillou et al. 2006, Bournas et al. 2007, Ortlepp et al. 2009, Ombres 2014).
- Περίσφιξη υποστυλωμάτων ΟΣ στις κρίσιμες περιοχές για την αύξηση της μειωμένης πλαστιμότητας τους που οφείλεται είτε σε λυγισμό των διαμήκων ράβδων οπλισμού (ανεπαρκείς λεπτομέρειες όπλισης) είτε σε ανεπαρκή μήκη μάτισης των διαμήκων ράβδων οπλισμών (Bournas et al., 2009).

- Καμπτική ενίσχυση είτε δοκών είτε πλακών ΟΣ (Triantafillou et al. 2005, Bruckner et al. 2006, Papanicolaou et al. 2009, D' Ambrisi and Focacci 2011, Elsanadedy et al. 2013, Loreto et al. 2014).
- Διατμητική ενίσχυση δοκών ΟΣ (Triantafillou and Papanicolaou 2006, Bruckner et al. 2006, Al-Salloum et al. 2012, Azam and Soudki 2014, Tzoura and Triantafillou 2014).
- Ενίσχυση κόμβων δοκού-υποστυλώματος ΟΣ (Al-Salloum et al., 2011).

❖ Ενίσχυση στοιχείων από φέρουσα τοιχοποιία

Οι ερευνητικές εργασίες ενίσχυσης στοιχείων φέρουσας τοιχοποιίας με IAM, κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Ενίσχυση με στόχο την αύξηση της εντός επιπέδου ικανότητας ανάληψης τέμνουσας δύναμης (Papanicolaou et al. 2007, Papanicolaou et al. 2011).
- Ενίσχυση με σκοπό την εκτός επιπέδου ικανότητα ανάληψης φορτίου (Papanicolaou et al. 2008, Harajli et al. 2010, Papanicolaou et al. 2011, Babaeidarabad et al. 2014a).
- Ενίσχυση σε διαγώνια θλίψη (Prota et al. 2006, Parisi et al. 2013, Babaeidarabad 2014b).
- Περίσφιξη στοιχείων τοιχοποιίας τύπου υποστυλώματος (Ombres, 2015).
- Ενίσχυση για αύξηση της εντός επιπέδου ικανότητας ανάληψης τέμνουσας
- Ενίσχυση τοιχοπληρωμένων πλαισίων ΟΣ [(Κούτσας et al.(2015)].
- Ενίσχυση τοξωτών κατασκευών από τοιχοποιία

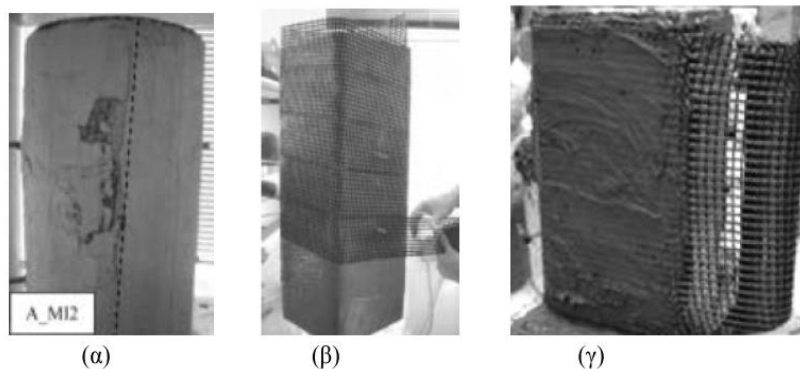
3.2.1 Περίσφιξη στοιχείων ΟΣ

Μια νέα τεχνική ενίσχυσης δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος είναι η χρήση μανδύων IAM ως μέσο περίσφιξης. Η αποδοτικότητα της χρήσης μανδύων IAM ως μέσο περίσφιξης στοιχείων ΟΣ μελετήθηκε για πρώτη φορά από τους Triantafillou et al. (2006) και Bournas et al. (2007) μέσω δοκιμών κεντρικής θλίψης, ενώ παράλληλα συγκρίθηκε και με την αποδοτικότητα της περίσφιξης μέσω ΙΟΠ. Παράμετροι διερεύνησης ήταν η γεωμετρία του στοιχείου ΟΣ (κύλινδροι διατομής 150 mm και ύψους 300 mm Σχ.3.12α, τετραγωνικά υποστυλώματα πλευράς 250 mm και ύψους 750 mm - Σχ.3.12β, και τετραγωνικά υποστυλώματα πλευράς 200 mm και ύψους 380 mm - Σχ.3.12γ), ο αριθμός των στρώσεων

ενίσχυσης και η παρουσία οπλισμού. Από τα αποτελέσματα των παραπάνω εργασιών προέκυψε ότι: (α) η περίσφιγξη με IAM αυξάνει σημαντικά τη θλιπτική αντοχή (έως και δύο φορές) καθώς και την πλαστιμότητα των στοιχείων ΟΣ (έως περίπου τέσσερις φορές), (β) με την αύξηση των στρώσεων ενίσχυσης επέρχεται αύξηση της αντοχής με τρόπο μη αναλογικό, (γ) στην περίπτωση των κυλινδρικών δοκιμίων η αποδοτικότητα των IAM έναντι των ΙΟΠ είναι περίπου 80% σε όρους θλιπτικής αντοχής και κατά 50% σε όρους παραμορφωσιμότητας (δ) στην περίπτωση των άοπλων τετραγωνικών υποστυλωμάτων η αποδοτικότητα των IAM έναντι των ΙΟΠ είναι σχεδόν ίδια σε όρους θλιπτικής αντοχής και ελαφρώς μειωμένη σε όρους παραμορφωσιμότητας, (ε) στην περίπτωση των οπλισμένων τετραγωνικών υποστυλωμάτων, η αποδοτικότητα των IAM έναντι των ΙΟΠ είναι περίπου 85%-90% σε όρους θλιπτικής αντοχής και περίπου 90% σε όρους παραμορφωσιμότητας, (ζ) οι μανδύες IAM επιβραδύνουν σημαντικά το λυγισμό των διαμήκων ράβδων οπλισμού, ενώ η πυκνότητα των εγκάρσιων συνδετήρων δεν επιδρά σημαντικά στη θλιπτική αντοχή, (η) η αστοχία των μανδύων IAM είναι πιο διαδихική σε σχέση με τους μανδύες ΙΟΠ και όχι τόσο εκρηκτική, χάρη της μεγαλύτερης κατανομής της βλάβης μέσω της πολλαπλής ρηγμάτωσης του κονιάματος.

Σε όμοια συμπεράσματα κατέληξαν οι Ortlepp et al. (2009) σχετικά με την αύξηση της αντοχής που επιτυγχάνεται μέσω της περίσφιγξης με IAM, ενώ μελέτησαν και την επίδραση της γεωμετρίας των ακμών τετραγωνικών υποστυλωμάτων. Συγκεκριμένα, συμπέραναν ότι όσο μια διατομή από τετραγωνική προσεγγίζει την κυκλική, αυξάνεται γεωμετρικά η αποδοτικότητα των μανδύων IAM σε όρους αύξησης της θλιπτικής αντοχής.

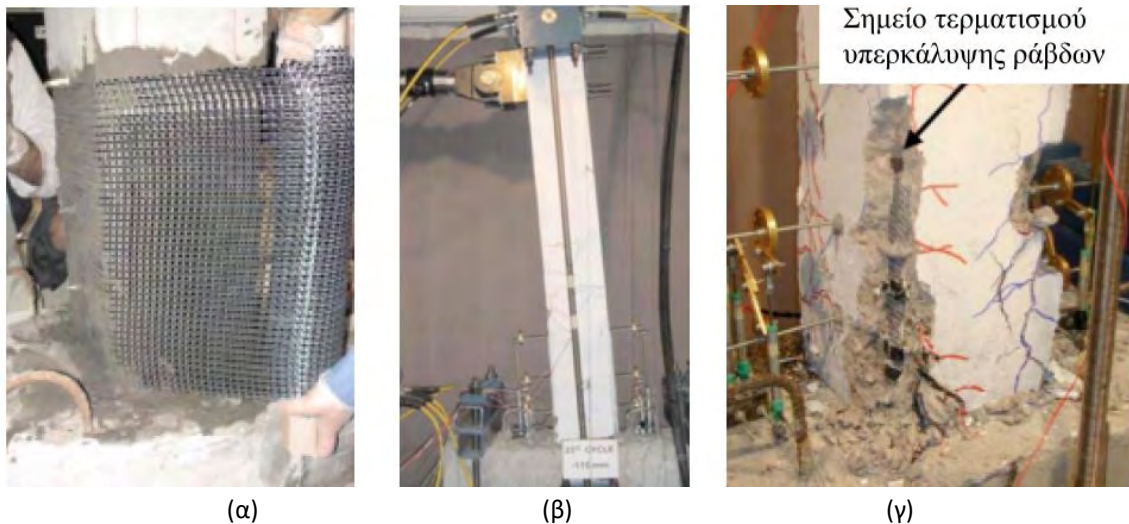
Τέλος, ο Ombres (2014) μελέτησε την επίδραση της γωνίας που σχηματίζουν οι κύριες διευθύνσεις ενός πλέγματος ινών δύο διευθύνσεων ως προς τον άξονα των κυλινδρικών στοιχείων που περισφίχθηκαν, και κατέληξε στο ότι το ποσοστό αύξησης της αντοχής επηρεάζεται σημαντικά από την εν λόγω παράμετρο.



Σχήμα 3.12 (α) Αστοχία μανδύα IAM σε κυλινδρικό δοκίμιο (Triantafillou, 2006) , (β), (γ) ενίσχυση δοκιμίων τύπου υποστυλώματος τετραγωνικής διατομής με μανδύα IAM (Triantafillou et al. 2006, Bournas et al. 2007).

3.2.2 Περίσφιγξη υποστυλωμάτων ΟΣ στις κρίσιμες περιοχές

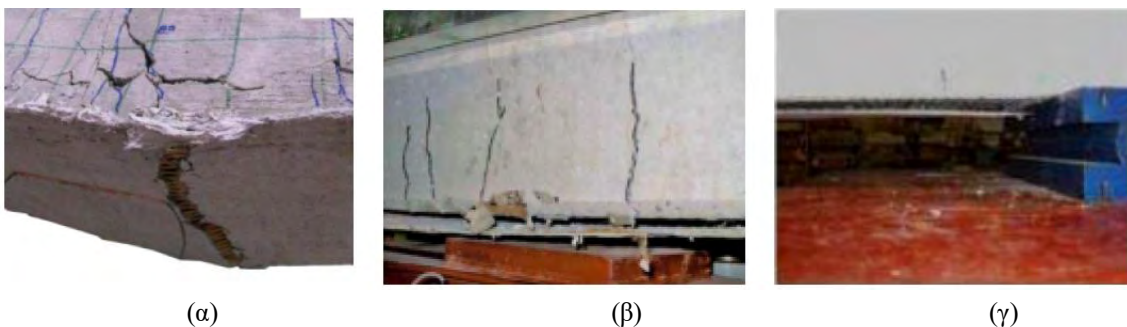
Την επίδραση της περίσφιγξης της κρίσιμης περιοχής στη βάση υποστυλωμάτων με μανδύες IAM (Σχήμα 3.13 α) και ΙΟΠ μελέτησαν και οι Bournas et al. (2009), μέσω δοκιμών πλευρικής κυκλικής φόρτισης σε δοκίμια τύπου υποστυλώματος. Το συμπέρασμα ήταν ότι επιτυγχάνεται αύξηση της πλαστιμότητας των υποστυλωμάτων (έως και 2.5 περίπου φορές) τόσο με μανδύες IAM όσο και με μανδύες ΙΟΠ. Η αύξηση της πλαστιμότητας στην κρίσιμη περιοχή είναι αποτέλεσμα εξαιρετικά επιθυμητό, αφού έτσι βελτιώνεται η συμπεριφορά της πλαστικής άρθρωσης που δημιουργείται στη βάση των υποστυλωμάτων σε περίπτωση σεισμικής φόρτισης (Σχήμα 3.13β). Επίσης, μελέτησαν την επίδραση της περίσφιγξης στη βάση υποστυλωμάτων με ανεπαρκή μήκη μάτισης των διαμήκων ράβδων οπλισμού. Η περίσφιγξη πραγματοποιήθηκε με μανδύες IAM και ισοδύναμους μανδύες ΙΟΠ. Βάσει των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι οι μανδύες IAM προσφέρουν ικανοποιητική αύξηση της αντοχής (της τάξης του 15%) μέσω της παρεμπόδισης της πρόωρης αστοχίας των ματίσεων (Σχήμα 3.13), και σημαντική αύξηση της πλευρικής παραμόρφωσης. Τέλος, συγκριτικά με τους μανδύες ΙΟΠ, οι μανδύες IAM παρουσιάζουν ελαφρώς μειωμένη αποδοτικότητα για μικρό μήκος μάτισης, αλλά ίση αποδοτικότητα για μεγαλύτερο μήκος.



Σχήμα 3.13 (α) Ενίσχυση με κλειστούς μανδύες IAM της κρίσιμης περιοχής στη βάση υποστυλώματος του, (β) ικανότητα μεγάλης πλευρικής μετακίνησης υποστυλώματος του οποίου η βάση έχει περισφιχτεί με μανδύα IAM, και (γ) αστοχία στην περιοχή της μάτισης των διαμήκων ράβδων οπλισμού στη βάση μη ενισχυμένου υποστυλώματος. (Bournas, 2009)

3.2.3 Καμπτική ενίσχυση δοκών και πλακών (μίας διεύθυνσης) ΟΣ

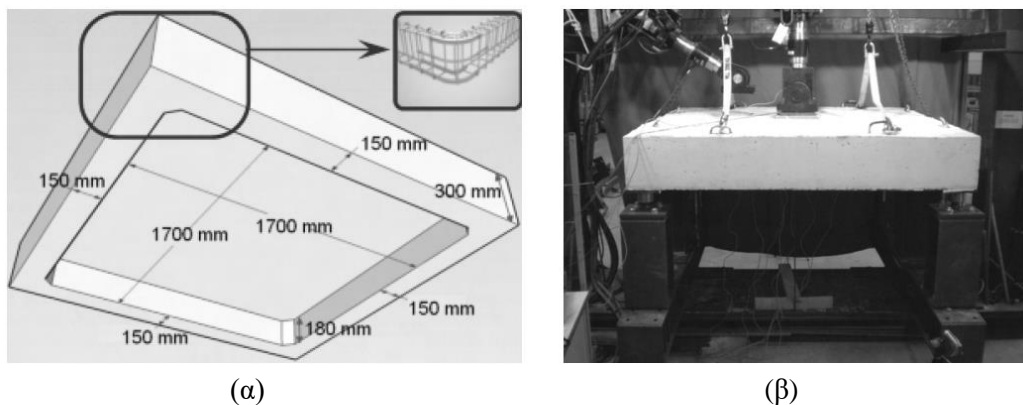
Η χρήση μανδύων IAM ως μέσω καμπτικής ενίσχυσης σε στοιχεία ΟΣ τύπου δοκού έχει μελετηθεί πειραματικά τους Triantafillou et al. (2005), D' Ambrisi and Focacci (2011) και Elsanadedy et al. (2013), ενώ η ενίσχυση στοιχείων τύπου πλάκας ΟΣ μίας έχει μελετηθεί πειραματικά τους από τους Bruckner et al. (2006) και Loreto et al. (2014). Επί της ουσίας, είτε πρόκειται για στοιχεία τύπου δοκού είτε πλάκας μίας διεύθυνσης, οι μηχανισμοί αστοχίας που παρατηρούνται είναι παρόμοιοι και ως εκ τούτου μπορούν να ομαδοποιηθούν. Μια εις βάθος περιγραφή των δοκιμών και των παραμέτρων των παραπάνω εργασιών ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής. Έτσι περιγράφονται συνοπτικά τα κοινά συμπεράσματα που προκύπτουν από το σύνολο των παραπάνω εργασιών. Σε όλες τις περιπτώσεις σημειώνεται αύξηση της καμπτικής αντοχής των στοιχείων ΟΣ, το οποίο ποικίλει ανάλογα με το ποσοστό του οπλισμού της ενίσχυσης. Γενικά αύξηση του αριθμού των στρώσεων ενίσχυσης οδηγεί σε αύξηση της αντοχής με τρόπο μη αναλογικό, ενώ σημαντικό ρόλο έχει η αντοχή του κονιάματος που χρησιμοποιείται ως μήτρα του σύνθετου υλικού. Παρουσιάζονται οι εξής μορφές αστοχίας: (α) συγκέντρωση της βλάβης σε μία μόνο θέση, σε συνέχεια καμπτικής ρωγμής του στοιχείου ΟΣ με εκτενή ρηγμάτωση των IAM, η οποία συνοδεύεται από μερική θραύση των ινών και ολίσθησή τους μέσα από τη μήτρα κονιάματος, (β) αποκόλληση των IAM από το υπόστρωμα (σκυρόδεμα), όπου ξεκινά από το άκρο καμπτικής ρωγμής στο μέσο του καμπτικού ανοίγματος, και (γ) διαστρωματική απόσχιση των IAM στο άκρο τους (κοντά στη στήριξη).



Σχήμα 3.14 Διάφορες μορφές αστοχίας στην περίπτωση ενίσχυσης έναντι κάμψης δοκών- πλακών μίας διεύθυνσης με IAM (α) μερική απόσχιση ινών και ολίσθηση ινών από το κονίαμα (μήτρα) (D' Ambrisi and Focacci, 2011), (β) αποκόλληση IAM από το υπόστρωμα που ξεκινά από καμπτική ρωγμή στο μέσον του καμπτικού ανοίγματος (D' Ambrisi and Focacci, 2011), και (γ) διαστρωματική απόσχιση IAM στο άκρο τους κοντά στη στήριξη (Triantafillou et al., 2005).

3.2.4 Καμπτική ενίσχυση πλακών ΟΣ δύο διευθύνσεων

Οι Papanicolaou et al. (2009) μελέτησαν την αποδοτικότητα των ΙΑΜ ως μέσο καμπτικής ενίσχυσης πλακών ΟΣ δύο διευθύνσεων. Τέσσερις πλάκες υποβλήθηκαν σε δοκιμή μονοτονικής φόρτισης με συγκεντρωμένο φορτίο στο κέντρο (Σχήμα 3.15). Βασικοί παράμετροι διερεύνησης ήταν ο αριθμός των στρώσεων ΙΑΜ και το υλικό του πλέγματος ινών (άνθρακας και ύαλος: τρεις στρώσεις πλέγματος ινών υάλου ήταν ισοδύναμες με μία στρώση πλέγματος ινών άνθρακα). Παρά το γεγονός ότι η αστοχία όλων των δοκιμίων (συμπεριλαμβανομένου και ενός μη ενισχυμένου δοκιμίου) επήλθε λόγω διάτρησης της πλάκας στην περιοχή επιβολής του φορτίου, η ενίσχυση με στρώσεις ΙΑΜ στο εφελκόμενο πέλμα οδήγησε σε αύξηση του φορτίου σε σημαντικό βαθμό. Διαπιστώθηκε αύξηση της φέρουσας ικανότητας των πλακών καθώς και αύξηση της δυσκαμψίας και της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας. Ακόμα, σημειώθηκε μικρή αύξηση της ελαστικής δυσκαμψίας των ενισχυμένων δοκιμίων.



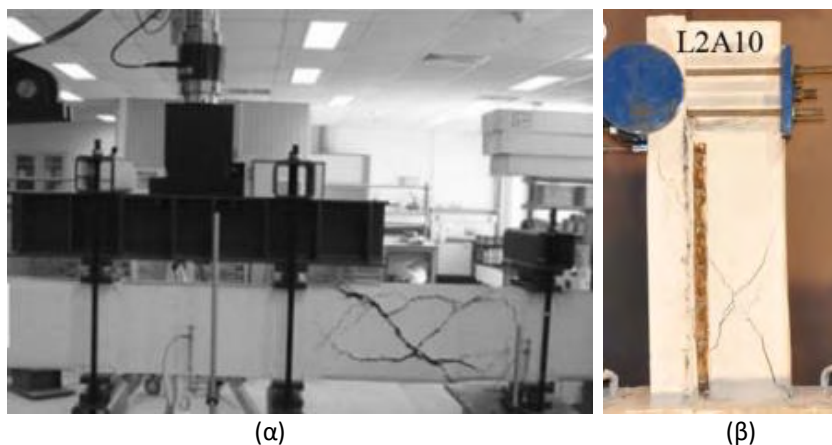
Σχήμα 3.15 (α) Γεωμετρία πλακών δύο διευθύνσεων, και (β) πειραματική διάταξη έναντι κάμψης σε πλάκα (δύο διευθύνσεων) με συγκεντρωμένο φορτίο στο κέντρο. (Papanicolaou et al., 2009).

3.2.5 Διατμητική ενίσχυση δοκών ΟΣ

Η περίπτωση της ενίσχυσης σε τέμνουσα δοκών ΟΣ με μανδύες ΙΑΜ έχει τύχει του μεγαλύτερου ερευνητικού ενδιαφέροντος. Αρχικά, διερευνήθηκε από τους Triantafyllou and Papanicolaou (2006), ενώ παράλληλα την συνέκριναν με την αποδοτικότητα μανδυών ΙΟΠ (Εικόνα 3.16α). Μέσω των δοκιμών κυκλικής φόρτισης, κύριο συμπέρασμα της έρευνας ήταν πως οι μανδύες ΙΑΜ αποτελούν εξαιρετικά ενδιαφέρουσα πρόταση διατμητικής ενίσχυσης στα στοιχεία από ΟΣ. Προέκυψε σημαντική αύξηση της αντοχής σε σχέση με ένα δοκίμιο αναφοράς (έως και 100%), ενώ η αποδοτικότητα των ΙΑΜ σε σχέση με τα ΙΟΠ ήταν μειωμένη (κατά περίπου 45%). Οι Al-Salloum et al. (2012) και Azam and Soudki (2014) πραγματοποίησαν δοκιμές μονοτονικής φόρτισης σε δοκούς ΟΣ ορθογωνικής διατομής με τις παραμέτρους να

αποτελούν: (α) ο αριθμός των στρώσεων ενίσχυσης, (β) η διάταξη των ινών του πλέγματος και (γ) η διάταξη της ενίσχυσης (δίπλευροι ή τρίπλευροι μανδύες). Τα βασικά συμπεράσματα των παραπάνω εργασιών, πέραν της αύξησης της αντοχής σε τέμνουσα σε σχέση με μη-ενισχυμένα δοκίμια, ήταν τα εξής: (α) η αύξηση του αριθμού των στρώσεων (από δύο σε τέσσερις) οδηγεί σε μη-αναλογική αύξηση της αντοχής σε τέμνουσα, (β) η διαφορετική διάταξη των ινών του πλέγματος (διεύθυνση 0-90° και -45°/+45°) δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα όταν ως μητρικό υλικό χρησιμοποιείται σύνθητες τσιμενοκονίαμα, ενώ όταν χρησιμοποιείται τσιμεντοκονίαμα τροποποιημένο με πολυμερή, η διάταξη ινών -45°/+45° είναι πιο αποδοτική σε σύγκριση με τη διάταξη 0-90° και (γ) οι τρίπλευροι μανδύες IAM έχουν κατά περίπτωση (ανάλογα με το υλικό των ινών του πλέγματος) μεγαλύτερη ικανότητα ανάληψης τέμνουσας δύναμης συγκριτικά με τους δίπλευρους μανδύες IAM.

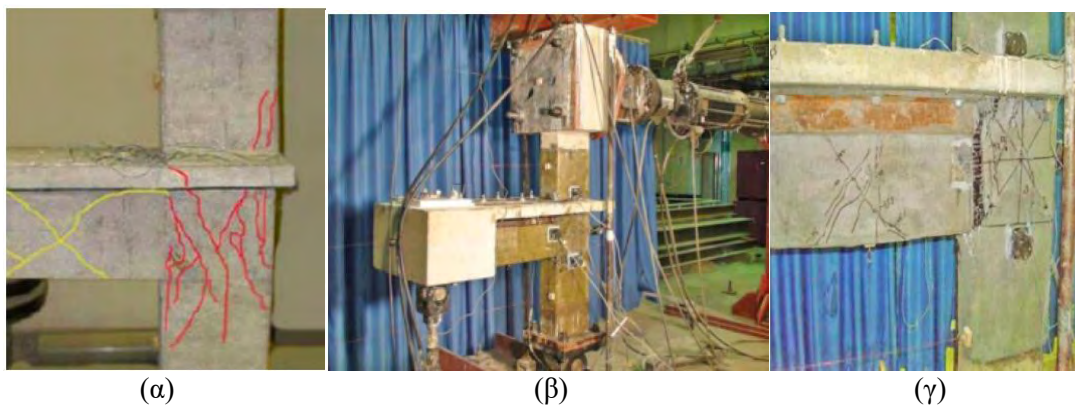
Επίσης, την αποδοτικότητα ενίσχυσης έναντι τέμνουσας σε πλακοδοκούς ΟΣ με τρίπλευρους μανδύες IAM αγκυρωμένους και μη στην πλάκα ΟΣ διερεύνησαν οι Bruckner et al. (2006). Η αγκύρωση ανήκε στην κατηγορία της μηχανικής αγκύρωσης με χρήση χαλύβδινων κοχλιών. Τα αποτελέσματα της παραπάνω εργασίας έδειξαν ότι η μηχανική αγκύρωση βελτίωσε την αποδοτικότητα της ενίσχυσης κατά περίπου 100%. Τέλος, οι Tzoura and Triantafillou (2014) πραγματοποίησαν συστηματική διερεύνηση της μηχανικής αγκύρωσης τρίπλευρων μανδύων IAM στην περίπτωση πλακοδοκών ΟΣ, μέσω δοκιμών κυκλικής φόρτισης (Σχήμα 3.16β). Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η αγκύρωση του τρίπλευρου μανδύα IAM μπορεί να αυξήσει πάρα πολύ την αποδοτικότητά του.



Σχήμα 3.16 Αστοχία δοκών ενισχυμένων σε τέμνουσα με μανδύες IAM: (α) ορθογωνική δοκός ενισχυμένη με κλειστό μανδύα IAM υπό κυκλική φόρτιση (Triantafillou and Papanicolaou, 2006) και (β) πλακοδοκός ενισχυμένη με τρίπλευρο μανδύα IAM σε συνδυασμό με μηχανική αγκύρωση στην πλάκα (Tzoura and Triantafillou, 2014).

3.2.6 Ενίσχυση κόμβων δοκού-υποστυλώματος ΟΣ

Η ενίσχυση κόμβων (δοκού-υποστυλώματος) με χρήση IAM έχει μελετηθεί μόνο από τους Al-Salloum et al. (2011). Το πειραματικό τους πρόγραμμα περιελάμβανε ένα δοκίμιο αναφοράς (Σχήμα 3.17) και ένα δοκίμιο ενισχυμένο με IAM υάλου, τα οποία υποβλήθηκαν σε δοκιμές κυκλικής φόρτισης. Βάσει της περιορισμένης έκτασης του πειραματικού τους προγράμματος, οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι μανδύες IAM αυξάνουν ελαφρώς την αντοχή του συστήματος δοκού υποστυλώματος σε κόμβους χαμηλής διατμητικής αντοχής (αύξηση της τάξης του 15%), αλλά αυξάνουν σημαντικά την πλαστιμότητα (κατά περίπου 50%).

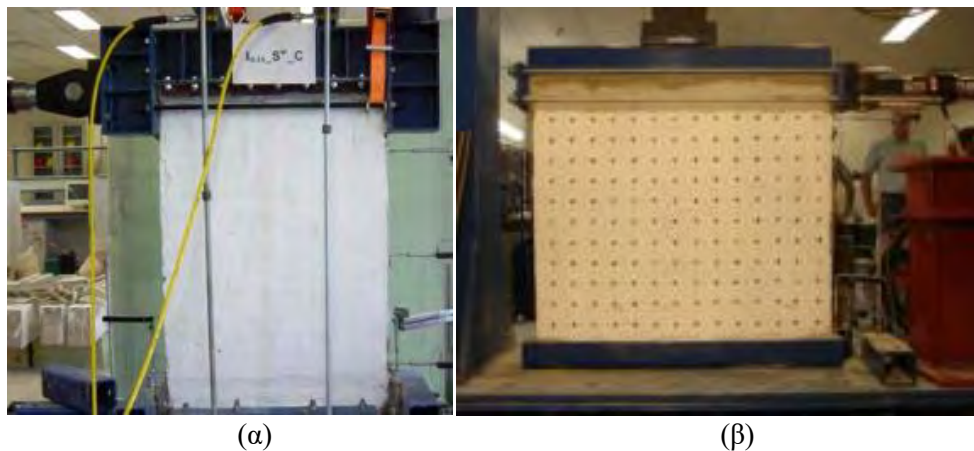


Σχήμα 3.17 (α) Μορφή αστοχίας στον κόμβο δοκού-υποστυλώματος μη ενισχυμένου δοκιμίου, (β) πειραματική διάταξη για τη δοκιμή κυκλικής φόρτισης σε κόμβους δοκού-υποστυλώματος, (γ) Μορφή αστοχίας στον κόμβο δοκού-υποστυλώματος δοκιμίου ενισχυμένου με IAM(Al-Salloum et al., 2011).

3.2.7 Ενίσχυση τοιχίσκων για την αύξηση της εντός επιπέδου ικανότητας ανάληψης τέμνουσας δύναμης

Για την εντός επιπέδου ενίσχυση σε τέμνουσα, οι Paranicolaou et al. (2007) ενίσχυσαν αμφίπλευρα με μία και δύο στρώσεις IAM άνθρακα τοιχοσώματα (1300x800 mm), τα οποία αποτελούνταν από αργιλικούς οπτόπλινθους. Επιπλέον παράμετρο συνιστούσε το επίπεδο του αξονικού φορτίου (2.5% και 10% της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας). Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κυκλική φόρτιση (Σχήμα 3.18). Βάσει των αποτελεσμάτων των παραπάνω εργασιών προέκυψε ότι τα IAM αύξησαν την αντοχή των δοκιμίων περίπου έξι φορές (σε σχέση με ένα μη ενισχυμένο δοκίμιο) για επίπεδο αξονικού φορτίου 10% , ενώ 19 και 25 φορές για μία και δύο στρώσεις, αντίστοιχα, σε χαμηλότερο επίπεδο αξονικού φορτίου (2.5%). Επίσης, σημειώθηκε σημαντική αύξηση της ικανότητας πλευρικής παραμόρφωσης (περίπου

13 φορές μεγαλύτερη του μη ενισχυμένου δοκιμίου), σχεδόν ανεξάρτητα του αριθμού των στρώσεων και του επιπέδου του αξονικού φορτίου.



Σχήμα 3.18 Πειραματική διάταξη για την εντός επιπέδου δοκιμή κυκλικής φόρτισης τοιχοσωμάτων: (α) Papanicolaou et al. (2007), και (β) Papanicolaou et al. (2011).

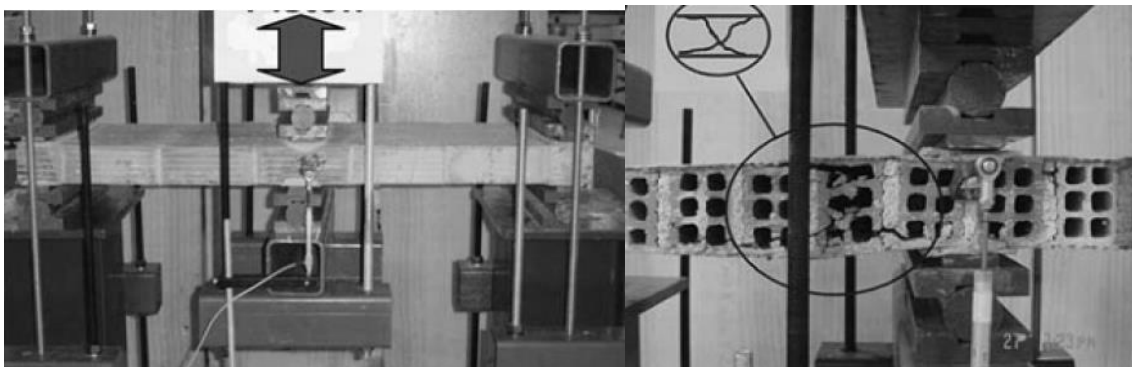
3.2.8 Ενίσχυση τοιχίσκων για εκτός επιπέδου ικανότητα ανάληψης φορτίου

Η εκτός επιπέδου ενίσχυση στοιχείων τοιχοποιίας μελετήθηκε αρχικά από τους Papanicolaou et al (2008). Τοιχοσώματα (διαστάσεων 400x1300 mm και 1300x400 mm) αποτελούμενα από αργιλικούς οπτόπλινθους υποβλήθηκαν σε δοκιμές κυκλικής φόρτισης ((κάμψη τριών σημείων - Σχήμα 3.20). Το αποτέλεσμα ήταν ότι υπήρξε θεαματική αύξηση της αντοχής σε όλες τις περιπτώσεις ενίσχυσης αλλά και της πλαστιμότητας σε σύγκριση με της αρχικά πολύ μικρής αντοχής (πρακτικά μηδενικής) των μη ενισχυμένων δοκιμίων.

Οι Harazli et al. (2010) και Papanicolaou et al. (2011) πραγματοποίησαν εργασίες παρόμοιες με αυτήν των Papanicolaou et al. (2008), με τη διαφορά της διερεύνησης επιπρόσθετων παραμέτρων, όπως ο τύπος του πλέγματος ινών και ο τύπος του κονιάματος. Σε όλες τις περιπτώσεις σημειώθηκε σημαντική αύξηση της αντοχής και της πλαστιμότητας των τοιχίσκων, με τις υπόλοιπες παραμέτρους να διαφοροποιούν ελαφρώς τα αποτελέσματα. Τέλος, οι Babaeidarabad et al. (2014a) διερεύνησαν την εκτός επιπέδου ενίσχυση στοιχείων τοιχοποιίας με μία και τέσσερις στρώσεις ΙΑΜ άνθρακα. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κάμψη μίας διεύθυνσης υπό ομοιόμορφα κατανομημένο φορτίο. Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την εν λόγω έρευνα ήταν η αύξηση της καμπτικής αντοχής και η αύξηση της δυστένειας. Επιπλέον σημειώθηκε αύξηση της πλαστιμότητας, η οποία όμως ήταν μειωμένη στην περίπτωση ενίσχυσης με τέσσερις στρώσεις λόγω διατμητικής αντί καμπτικής αστοχίας.



Σχήμα 3.19 Διαδικασία ενίσχυσης τοιγίσκων με ΙΑΜ (Παπανικολάου και Τριανταφύλλου, 2009)



(α)

(β)



(γ)

(δ)

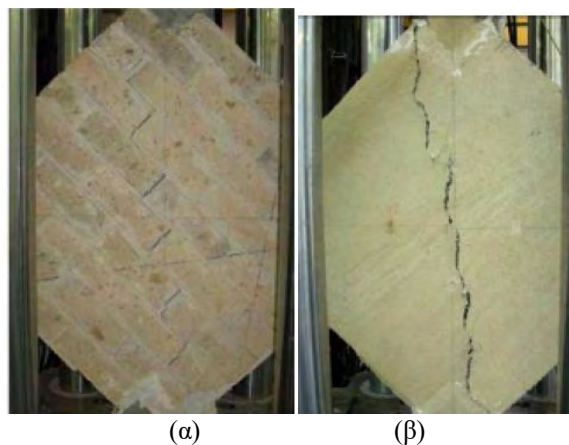
Σχήμα 3.20 (α) Πειραματική διάταξη (κάμψη τριών σημείων) για τη κυκλική δοκιμή εκτός επιπέδου φόρτισης τοιχοσωμάτων (κάμψη με αξονική δύναμη) (Papanicolaou et al., 2008), (β) αστοχία λόγω βλάβης της τοιχοποιίας σε δοκίμιο ενισχυμένο με μανδύες ΙΑΜ άνθρακα (Papanicolaou et al., 2008), (γ) εκτός επιπέδου αστοχία μη ενισχυμένης τοιχοποιίας (Babaeidarabad et al., 2014a)

3.2.9 Ενίσχυση σε διαγώνια θλίψη

Για την ενίσχυση τοιχοσωμάτων σε διαγώνια θλίψη, οι Prota et al. (2006) και Parisi et al. (2013) διεξήγαγαν πειραματικές δοκιμές σε στοιχεία τοιχοποιίας (1200x1200mm)

αποτελούμενα από αργιλικούς οπτόπλινθους, ερευνώντας την αποδοτικότητα της ενίσχυσης με IAM υάλου (Σχήμα 3.21). Βάσει των αποτελεσμάτων προέκυψε σημαντική αύξηση της μέγιστης διατμητικής αντοχής, η οποία ήταν σχεδόν αναλογική με την αύξηση του αριθμού των στρώσεων (σχεδόν 100% αύξηση για μία στρώση και 180% για δύο στρώσεις, στην περίπτωση αμφίπλευρης ενίσχυσης). Επιπλέον, παρατηρήθηκε σχεδόν διπλάσια ικανότητα διατμητικής παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο, ενώ ακόμα οι ερευνητές κατέληξαν και σε σημαντική αύξηση του μέτρου διάτμησης μέσω της ενίσχυσης.

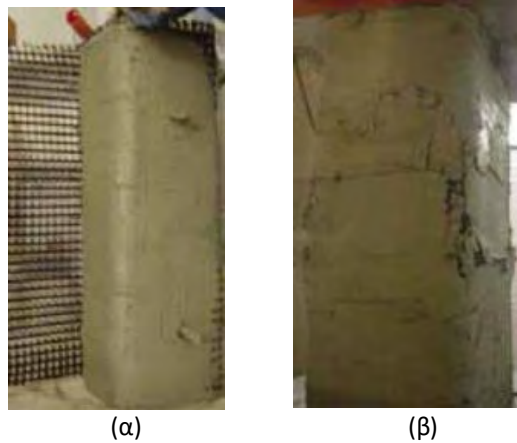
Οι Babaidarabad et al. (2014b) μελέτησαν την αποδοτικότητα της ενίσχυσης σε διαγώνια θλίψη με IAM άνθρακα σε τοιχοσώματα (1200x1200mm), αποτελούμενα από αργιλικούς οπτόπλινθους. Μέσω της αμφίπλευρης ενίσχυσης μίας και τεσσάρων στρώσεων από IAM άνθρακα συμπέραναν ότι η διατμητική τάση ρηγμάτωσης αυξήθηκε σε σύγκριση με το δοκίμιο αναφοράς, κατά 70% και 230% για μία και τέσσερις στρώσεις, αντίστοιχα. Επίσης, αυξήθηκε το μέτρο διάτμησης κατά 85% και 220%, για μία και τέσσερις στρώσεις, αντίστοιχα.



Σχήμα 3.21 Τυπικές μορφές αστοχίας τοιχοσωμάτων υπό διαγώνια θλίψη: (α) μη ενισχυμένο δοκίμιο και (β) ενισχυμένο δοκίμιο με μία στρώση IAM υάλου (Parisi et al., 2013).

3.2.10 Περίσφιξη υποστυλωμάτων από φέρουσα τοιχοποιία

Ο Κρεβάϊκα (2005) πρώτος μελέτησε την περίσφιξη τοιχοποιίας με IAM σε τοιχοσώματα τύπου υποστυλώματος τα οποία δοκιμάστηκαν σε κεντρική θλίψη. Βασική παράμετρος της συγκεκριμένης μελέτης ήταν ο λόγος των πλευρών της ορθογωνικής διατομής των στοιχείων. Βάσει των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι με τους μανδύες IAM επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση της θλιπτικής αντοχής καθώς και πολύ μεγάλη αύξηση της πλαστιμότητας των στοιχείων.



Σχήμα 3.22 (α) Περίσφιγξη δοκιμίου με μανδύα IAM, (β) εικόνα βλάβης μανδύα IAM κατά την αστοχία. (Κρεβάϊκα 2005).

Επίσης, οι Maddaloni et al. (2015) μελέτησαν τη συμπεριφορά υποστυλωμάτων τοιχοποιίας σε κανονική κλίμακα ενισχυμένα με μανδύες IAM (Εικόνα 3.24). Στα δοκίμια διεξήχθησαν δοκιμές θλίψης για να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα των μανδυνών IAM ως συστήματα ενίσχυσης. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν πως η εφαρμογή μανδυνών από IAM είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος ενίσχυσης αυξάνοντας τη φέρουσα ικανότητα των υποστυλωμάτων.



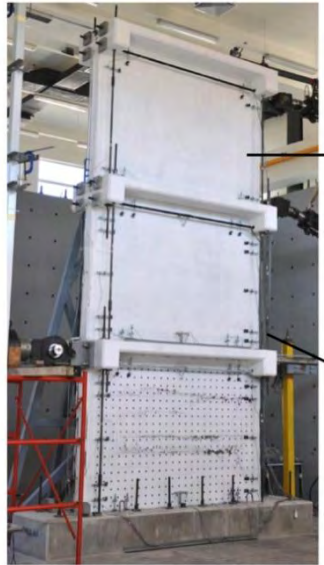
3.23 Διαδικασία ενίσχυσης υποστυλώματος τοιχοποιίας με IAM (Maddaloni et al., 2015)

Σχήμα

3.2.11 Ενίσχυση τοιχοπληρωμένων πλαισίων ΟΣ

Ο Κούτας e.t a.l (2015) υπέβαλε τριώροφα πλαίσια μεγάλης κλίμακας, τα οποία είχαν ενισχυθεί με μανδύα από IAM, σε κυκλική φόρτιση. Η παρούσα τεχνική ενίσχυσης είχε ως σκοπό την μετατροπή των τοιχοπληρωμένων πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος σε πιο αξιόπιστα μέλη ανάληψης εντός-επιπέδου δυνάμεων και στην αύξηση της πλευρικής αντοχής ή/και της δυσκαμψίας τους. Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν, η εφαρμογή των μανδυνών IAM οδήγησε στην βελτίωση της καθολικής απόκρισης του τοιχοπληρωμένου πλαισίου, τόσο σε όρους πλευρικής αντίστασης όσο και σε όρους ικανότητας παραμόρφωσης.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι το ενισχυμένο δοκίμιο κατανάλωσε 22.5% περισσότερη ενέργεια σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς, για την ίδια περίπτωση φόρτισης.



Σχήμα 3.24 Τριώροφο τοιχοπληρωμένο πλαίσιο μεγάλης κλίμακας (Koutas, et al. 2015)

3.2.12 Ενίσχυση τόξωτών κατασκευών από τοιχοποιία

Τα ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα βρίσκουν εφαρμογή και στην ενίσχυση των τόξων. Συγκεκριμένα, οι Leire Garmendia et al. (2014) μελέτησαν την ενίσχυση των τόξων από φέρουσα τοιχοποιία με χρήση IAM. Η πειραματική δοκιμή περιλάμβανε την κατασκευή δώδεκα τόξων από τα οποία τα τρία δεν ήταν ενισχυμένα, τα τρία ήταν ενισχυμένα στο εσωράχιο, τρία στο εξωράχιο και τρία και στις δύο πλευρές. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε μονοτονική κατακόρυφη καταπόνηση. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν την σημαντική συνεισφορά που είχαν τα IAM. Συγκεκριμένα, τα εννέα ενισχυμένα τόξα παρέλαμβαν δυνάμεις οκτώ, δέκα και δεκαεννιά φορές μεγαλύτερες από τα μη ενισχυμένα. Τέλος, η εφαρμογή των IAM αύξησε και την παραμορφωσιμότητα των τόξων.



3.3 Επίλογος για τα IAM στις ενισχύσεις κατασκευών

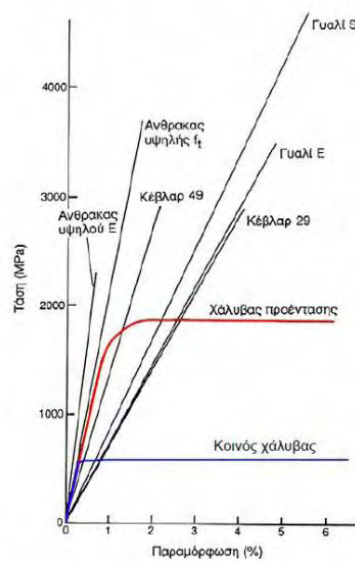
Από τις σχετικά περιορισμένες σε αριθμό εργασίες που περιγράφηκαν συνοπτικά παραπάνω, καταδεικνύεται η θετική συνεισφορά των IAM στην ενίσχυση στοιχείων ΟΣ και τοιχοποιίας. Το κοινό συμπέρασμα είναι ότι εν τέλει επιτυγχάνεται ο στόχος κατά περίπτωση, είτε αυτός είναι η αύξηση της αντοχής είτε η αύξηση της παραμορφωσιμότητας των υπό ενίσχυση στοιχείων. Βέβαια, σε κάθε περίπτωση απαιτείται περισσότερο συστηματική έρευνα σε όλες τις περιπτώσεις εφαρμογών, ώστε να γίνουν καλύτερα κατανοητοί οι μηχανισμοί ανάληψης δυνάμεων από τα IAM.

4.ΔΟΚΙΜΕΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΙΝΩΝ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΚΑΙ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

4.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 2, τα ινοπλέγματα αποτελούνται από ευθύγραμμους κλώνους νημάτων ινών διατεταγμένων σε διάφορες διευθύνσεις. Ένας κλώνος αποτελείται από χιλιάδες νήματα ινών (Σχήμα 4.1). Η σύνθεση των κλώνων ινών σε ινοπλέγματα επιτρέπει την καλύτερη εκμετάλλευση των ιδιοτήτων των ινών.

Όπως είναι κατανοητό, η αποδοτικότητα του σύνθετου υλικού ΙΑΜ σχετικά με την δυνατότητα ανάληψης φορτίων επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από τις μηχανικές ιδιότητες των ινών. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η υψηλή εφελκυστική αντοχή, καθώς και η γραμμικά ελαστική συμπεριφορά τους μέχρι το σημείο θραύσης τους, σε αντίθεση με τον χάλυβα. Στο παρακάτω σχήμα δίνονται οι τυπικές καμπύλες εφελκυστικής τάσης - παραμόρφωσης για διάφορους τύπους ινών και γίνεται σύγκριση με απλοποιημένες καμπύλες χάλυβα (Σχήμα 4.1). Ο χάλυβας αρχικά συμπεριφέρεται γραμμικά ελαστικά, ενώ διαρρέει αρκετά πριν την θραύση, έχοντας ως αποτέλεσμα να αναπτύσσει μεγάλες παραμορφώσεις. Αντίθεση, οι ίνες παρουσιάζουν γραμμική συμπεριφορά και αυξημένη πλαστιμότητα μέχρι την αστοχία τους, η οποία σε αρκετές περιπτώσεις εμφανίζεται σε πολύ υψηλές τάσεις.



Σχήμα 4.1 Τυπικές καμπύλες εφελκυστικής τάσης – παραμόρφωσης για διάφορους τύπους ινών και σύγκριση με απλοποιημένες καμπύλες χάλυβα [Τριανταφύλλου 2006].

4.2 Περιγραφή διαθέσιμων πειραμάτων: Εφελκυσμός και διάτμηση πλεγμάτων ινών

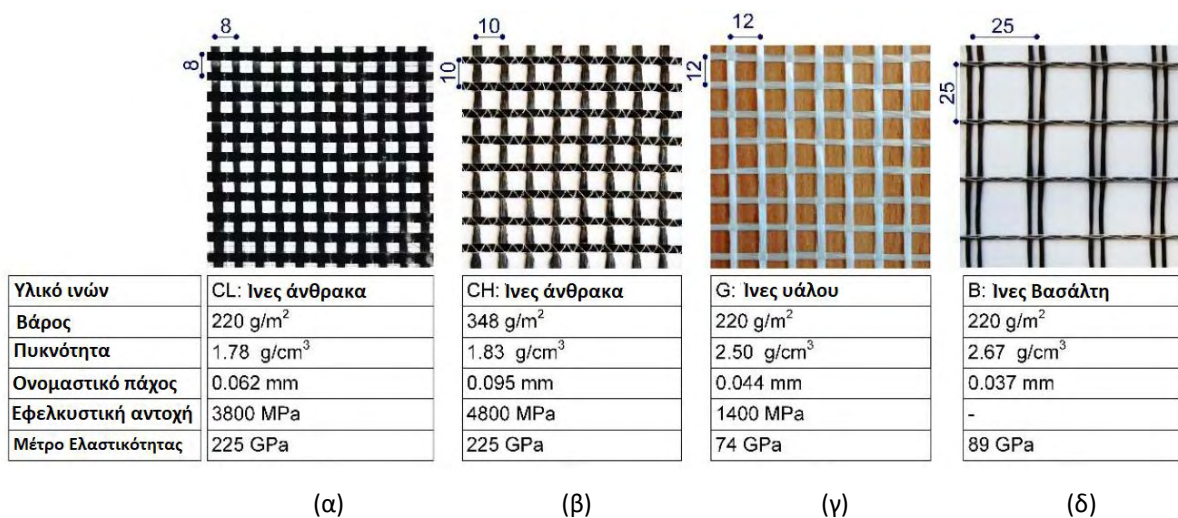
Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική εργασία που πραγματοποιήθηκε από την Tetta Z. (2017), *Shear strengthening of concrete members with Textile Reinforced Mortar (TRM)*, Διατριβή Διδακτορικού Διπλώματος, University of Nottingham, με σκοπό τον προσδιορισμό των βασικών μηχανικών χαρακτηριστικών του υλικού που χρησιμοποιείται για την ενίσχυση των IAM: τα ινοπλέγματα. Οι ιδιότητες των ινοπλεγμάτων, δηλαδή η εφελκυστική αντοχή, η εφελκυστική παραμόρφωση και το μέτρο ελαστικότητας ελήφθησαν μέσω διεξαγωγής πειραματικών δοκιμών μονοαξονικού εφελκυσμού σε δοκίμια ινοπλέγματος, ενώ η απόκριση διάτμησης των ινοπλεγμάτων προσδιορίστηκε με πειραματικές δοκιμές τύπου πλαισίου (διάτμηση), όπως θα αναλυθεί παρακάτω.

4.2.1 Ονοματολογία και τύποι Ινοπλεγμάτων

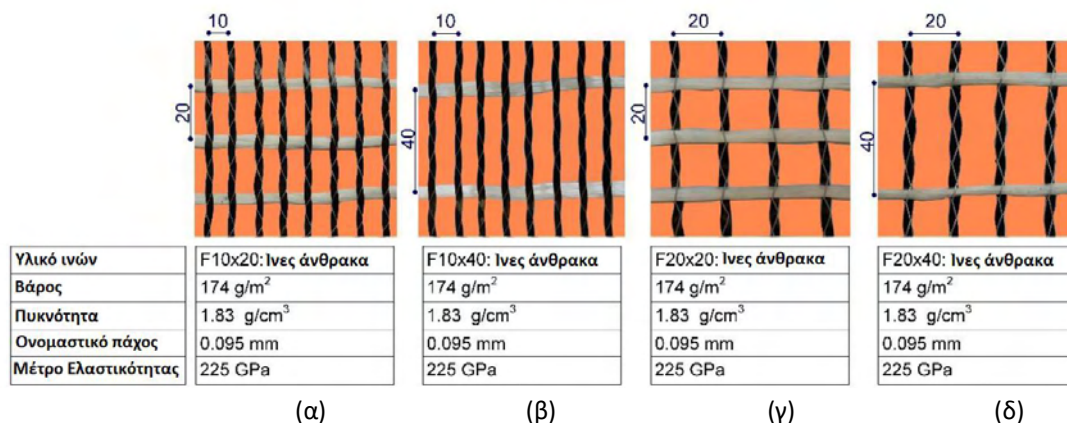
Στην μελέτη της Tetta (2017) χρησιμοποιήθηκαν οκτώ διαφορετικοί τύποι πλέγματος ινών. Τα ινοπλέγματα αυτά αποτελούνταν από ευθύγραμμους κλώνους ινών διατεταγμένα σε δύο ορθογώνιες διευθύνσεις. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα είδη ινοπλεγμάτων (Σχήμα 4.2) που η κατανομή της ποσότητας των ινών ανά τετραγωνικό μέτρο ήταν ισομερής στις δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις. Από τα τέσσερα αυτά ινοπλέγματα τα δύο αποτελούνταν από ίνες άνθρακα, εκ των οποίων το ένα ήταν ελαφρύτερο (**CL**) και το άλλο βαρύτερο (**CH**). Όσον αφορά τα υπόλοιπα δύο, το ένα αποτελούνταν από ίνες υάλου (**G**) και το άλλο από ίνες βασάλτη επικαλυμμένο με ρητίνη (**B**). Το επιφανειακό βάρος, η πυκνότητα, η εφελκυστική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας για κάθε ινοπλέγμα, σύμφωνα με τα δελτία των τεχνικών προδιαγραφών του κατασκευαστή, δίνονται στο σχήμα 4.2. Το ονομαστικό πάχος t_f του πλέγματος ανά διεύθυνση υπολογίστηκε με βάση την ισοδύναμη κατανομή των ινών και είναι στην πραγματικότητα ο λόγος του βάρους του πλέγματος παράλληλα στη διεύθυνση εφαρμογής του φορτίου προς την πυκνότητα των ινών, και παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2.

Τα υπόλοιπα τέσσερα ινοπλέγματα ήταν υβριδικά (Σχήμα 4.3). Κατασκευάστηκαν από μια βρετανική εταιρεία, ονομαζόμενη FORMAX, και αποτελούνταν από δύο διαφορετικά υλικά ινών μεταξύ των δύο ορθογώνιων διευθύνσεων. Συγκεκριμένα, στην διεύθυνση φόρτισης αποτελούνταν από ίνες άνθρακα και στην εγκάρσια διεύθυνση από ίνες υάλου (Σχήμα 4.3). Και τα τέσσερα ινοπλέγματα FORMAX είχαν την ίδια συνολική ποσότητα (δηλαδή επιφανειακό βάρος) ινών άνθρακα CH. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.3, τα δύο ινοπλέγματα

της FORMAX είχαν το ίδιο TEX και ίδιο μέγεθος πλέγματος στην κατακόρυφη διεύθυνση με τις ίνες άνθρακα CH (βαρέως βάρους), ενώ η απόσταση των ευθύγραμμων κλώνων ινών υάλου στην οριζόντια διεύθυνση ήταν 20 mm (F10x20) και 40 mm (F10x40), αντίστοιχα (Σχήμα 4.3 (α),(β)). Τα υπόλοιπα δύο ινοπλέγματα FORMAX είχαν διπλά TEX του πλέγματος ινών άνθρακα CH, ενώ η απόσταση των ευθύγραμμων κλώνων ινών υάλου στην οριζόντια διεύθυνση ήταν πάλι 20 mm (F20x20) και 40 mm (F20x40), αντίστοιχα. (Σχήμα 4.3 (γ),(δ)). Το βάρος των ινών άνθρακα, η πυκνότητα, το ονομαστικό πάχος (στην κατακόρυφη διεύθυνση ενός κλώνου ινών) και το μέτρο ελαστικότητας (από κάθε ινοπλέγμα) σύμφωνα με τα δελτία τεχνικών προδιαγραφών του κατασκευαστή δίδονται στο σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.2 Τα ινοπλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη διατεταγμένα σε ίση κατανομή της συνολικής ποσότητας ινών ανά ορθογώνια διεύθυνση από: α) ίνες ελαφρύτερου άνθρακα (CL), β) ίνες βαρύτερου άνθρακα CH, γ) ίνες υάλου (G) και δ) ίνες βασάλτη (B) (διαστάσεις σε mm). (Tetta, 2017)



Σχήμα 4.3 Τα ινοπλέγματα FORMAX που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη: (α) F10x20, (β) F10x40, (γ) F20x20, (δ) F20x40 (διαστάσεις σε mm). (Tetta, 2017)

Περαιτέρω

Συνοψίζοντας για τα ινοπλέγματα Formax:

- F10x20: Το υβριδικό ινόπλεγμα είχε απόσταση 10 mm μεταξύ των διαμήκων κλώνων ινών άνθρακα και απόσταση 20 mm μεταξύ των εγκάρσιων κλώνων ινών υάλου (Σχήμα 4.3α).
- F10x40: Το υβριδικό ινόπλεγμα είχε απόσταση 10 mm μεταξύ των διαμήκων κλώνων ινών άνθρακα και 40 mm απόσταση μεταξύ των εγκάρσιων κλώνων ινών υάλου (Σχήμα 4.3β).
- F20x20: Το υβριδικό ινόπλεγμα είχε απόσταση 20 mm μεταξύ των διαμήκων κλώνων ινών άνθρακα και 20 mm απόσταση μεταξύ των εγκάρσιων κλώνων ινών υάλου (Σχήμα 4.3c).
- F40x40: Το υβριδικό ινόπλεγμα είχε 20 χιλιοστά απόσταση μεταξύ των διαμήκων κλώνων ινών άνθρακα και 40 χιλιοστά απόσταση μεταξύ των εγκάρσιων κλώνων ινών υάλου (Σχήμα 4.3d)

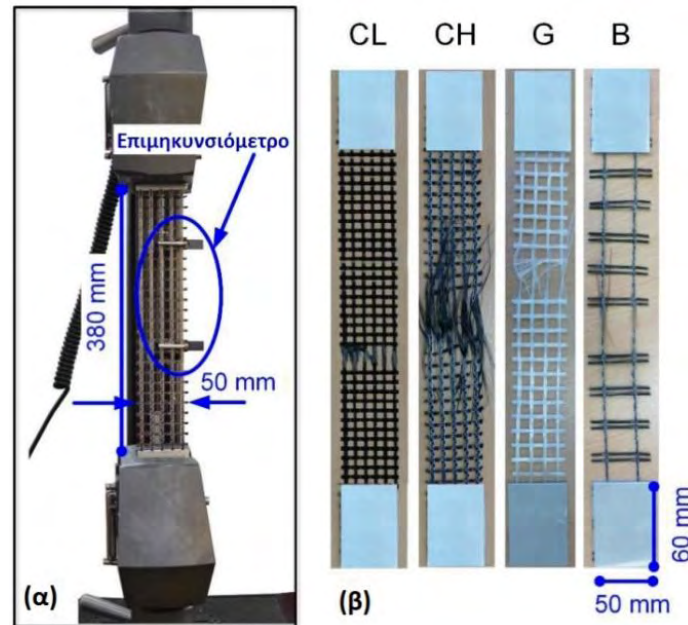
Όλα τα ινοπλέγματα εκτός από τον βασάλτη ήταν μη επικαλυμμένα. Τα ινοπλέγματα από ίνες βασάλτη είχαν βάρος 220 g/m², συμπεριλαμβανομένης της επικάλυψης 10%.

Σημειώνεται, ότι η διαδικασία για την εφαρμογή της επικάλυψης των ινοπλεγμάτων με ρητίνη, συνιστούσε τον εμποτισμό του ινοπλέγματος με εποξειδική ρητίνη χαμηλού ιξώδους. Σύμφωνα με τα δελτία δεδομένων του κατασκευαστή, η εφελκυστική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας της ρητίνης που χρησιμοποιήθηκε για την επικάλυψη ήταν ίσα με 72.4 MPa και 3.18 GPa, αντίστοιχα.

4.2.2 Δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού σε δοκίμια ινοπλεγμάτων

Διεξήχθησαν δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού επί των παραπάνω ινοπλεγμάτων με σκοπό να χαρακτηριστεί η συμπεριφορά τους σε εφελκυσμό. Συγκεκριμένα, δοκιμάστηκαν τρία δοκίμια διαστάσεων 50 x 500 (mm) για κάθε ένα τύπο ινοπλέγματος που περιγράφηκε παραπάνω. Η δοκιμή του μονοαξονικού εφελκυσμού διεξήχθη χρησιμοποιώντας μια μηχανή εφελκυσμού δυναμικότητας 50 kN και ρυθμό μονοτονικής φόρτισης 0.02 mm/sec. Τα δοκίμια προσαρμόστηκαν στη μηχανή εφελκυσμού με την χρήση δύο πλακών αλουμινίου (με διαστάσεις μήκους 60 mm και πλάτους 50 mm), οι οποίες είχαν κολληθεί στα άκρα των δοκιμίων με την χρήση εποξειδικής ρητίνης χαμηλού ιξώδους. Η επιμήκυνση του δοκιμίου (380 mm) μετρήθηκε μέσω ενός μετρητή παραμόρφωσης (επιμηκυνσιόμετρο), ο οποίος ήταν τοποθετημένος στο κέντρο των δοκιμίων στη διαμήκη διεύθυνση, όπως φαίνεται στο σχήμα

4.4α. Όλα τα δοκίμια ινοπλεγμάτων αστόχησαν λόγω θραύσης των ινών στην κεντρική περιοχή του δοκιμίου εντός του μήκους του αισθητήρα. Στο σχήμα 4.4β απεικονίζονται παραδείγματα δοκιμίων κατά την αστοχία.



Σχήμα 4.4 α) Διάταξη δοκιμής εφελκυσμού β) θραύση ινοπλεγμάτων (Tetta, 2017).

4.2.3 Πειραματικά αποτελέσματα μονοαξονικού εφελκυσμού

Παρατηρήθηκε ότι όλα τα δοκίμια αστόχησαν λόγω θραύσης των ινών στην κεντρική περιοχή του δοκιμίου. Το σχήμα 4.4 (β) περιλαμβάνει φωτογραφίες από την αστοχία δοκιμίων ινοπλεγμάτων ελαφρύτερου άνθρακα (CL), βαρύτερου άνθρακα (CH), υάλιου (B) και βασάλτη (B), αντίστοιχα.

Οι ιδιότητες εφελκυσμού, δηλαδή η εφελκυστική αντοχή (f_{fu}), η τελική παραμόρφωση (ϵ_{fu}) και το μέτρο ελαστικότητας (E_f) για καθένα από τα αντίστοιχα ινοπλέγματα, συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1. Για τον υπολογισμό της εφελκυστικής αντοχής θεωρήθηκε ο λόγος του μέγιστου μετρούμενου φορτίου προς την ισοδύναμη διατομή των ινών (κάθετα στη διεύθυνση εφαρμογής του φορτίου). Η ισοδύναμη διατομή των κλώνων ινών προσδιορίστηκε σύμφωνα με τον τύπο:

$$A_f = b_f * t_f \quad (\text{Σχέση 4.1})$$

όπου

t_f : το ονομαστικό πάχος του πλέγματος προς την διεύθυνση της φόρτισης

b_f : το πλάτος του πλέγματος (50 mm)

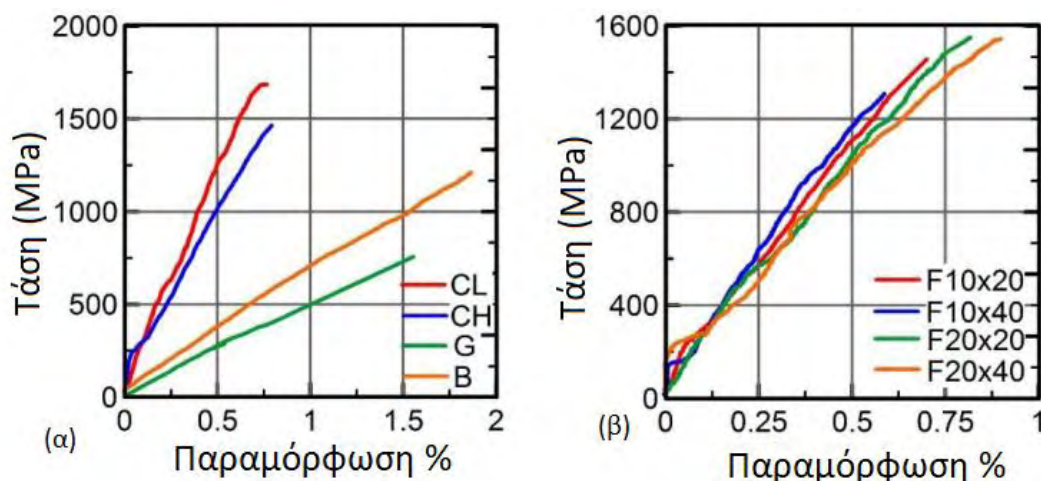
Το μέτρο ελαστικότητας (E_f) υπολογίστηκε διαιρώντας την εφελκυστική αντοχή (f_{fu}) προς την αντίστοιχη εφελκυστική παραμόρφωση (ε_{fu}), αφού η συμπεριφορά του ινοπλέγματος ήταν γραμμικά ελαστική μέχρι το σημείο θραύσης τους (βλ. Σχήμα 4.5α και β).

Τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.5α και β σε μορφή καμπυλών τάσης - παραμόρφωσης. Συγκεκριμένα, το σχήμα 4.5α περιλαμβάνει τις καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης των ινοπλεγμάτων ελαφρού άνθρακα (CL), βαρύτερου άνθρακα(CH), υάλου (G) και επικαλυμμένου βασάλτη (B), ενώ το σχήμα 4.4β απεικονίζει τις αντίστοιχες καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης και των τεσσάρων υβριδικών ινοπλεγμάτων FORMAX. Όπως φαίνεται και στα δύο σχήματα, η συμπεριφορά των καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης για όλα τα ινοπλέγματα είναι γραμμική μέχρι την αστοχία.

Πίνακας 4.1. Σύνοψη των αποτελεσμάτων των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμών ινοπλέγματος. (Tetta, 2017)

	CL	CH	G	B	F10x20	F10x40	F20x20	F20x40
f_{fu} (MPa)*	1531.7 (102)	1465.1 (95)	756.3 (45)	1209.9 (53)	1456.0 (111)	1340.1 (95)	1549.3 (120)	1562.1 (123)
ε_{fu} (%)*	0.765 (0.06)	0.792 (0.05)	1.553 (0.08)	1.866 (0.07)	0.700 (0.04)	0.652 (0.06)	0.817 (0.05)	0.934 (0.07)
$E_{f_ινοπλέγματος}$ (GPa)*	200.2 (17)	175.7 (21)	48.7 (11)	64.8 (14)	208.0 (18)	205.5 (20)	189.6 (19)	167.2 (13)

*τυπική απόκλιση στις παρενθέσεις



Σχήμα 4.5 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων μονοαξονικού εφελκυσμού σε ινοπλέγματα από (α) ίνες ελαφρού άνθρακα (CL), ίνες βαρύτερου άνθρακα(CH), ίνες υάλου (G) και ίνες βασάλτη (B) , (β) όλα τα ινοπλέγματα FORMAX, δηλαδή: F10x20, F10x40, F20x20 και F20x40. (Tetta, 2017)

4.2.4 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων του μονοαξονικού εφελκυσμού

Συγκρίνοντας τις τιμές που παρείχαν οι κατασκευαστές, όσον αφορά την εφελκυστική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας των ινών του ινοπλέγματος (Σχήμα 4.2), παρατηρούμε ότι αυτές διαφέρουν από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές εφελκυσμού που πραγματοποιήθηκαν στα αντίστοιχα πλέγματα ινών (Πίνακας 4.1). Συγκεκριμένα, οι τιμές που προέκυψαν για τα κύρια μηχανικά χαρακτηριστικά (εφελκυστική αντοχή, μέτρο ελαστικότητας) από τις δοκιμές εφελκυσμού είναι μικρότερες σε σχέση με αυτές που αντλήθηκαν από το τεχνικό φυλλάδιο του προϊόντος. Μία σύγκριση των τιμών αυτών συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.2: Σύγκριση τιμών εφελκυστικής αντοχής και μέτρου ελαστικότητας του Κατασκευαστή (για μία μονή ίνα) με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν σε ινοπλέγματα

Υλικό ινών	CL	CH	G	B
Εφελκυστική Αντοχή f_{fu} (MPa) (τιμές κατασκευαστή)	3800	4800	1400	-
Εφελκυστική Αντοχή f_{fu} (MPa) (τιμές πειραματικού αποτελέσματος)	1531,7	1465,1	756,3	1209,9
E_f ινοπλέγματος Gra (τιμές κατασκευαστής)	225	225	74	89
E_{fi} ινοπλέγματος Gra (τιμές πειραματικού αποτελέσματος)	200,2	175,7	48,7	64,5

Με βάση τον πίνακα 4.2, πραγματοποιήθηκε υπολογισμός για την εύρεση του ποσοστού μείωσης (επί τις εκατό διαφορά), όπου και παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.3: Ποσοστό επί τοις εκατό μείωσης των τιμών που λήφθηκαν από τα πειραματικά αποτελέσματα σε σχέση με αυτές που παρείχε ο κατασκευαστής

Υλικό ινών	CL	CH	G	B
Εφελκυστική Αντοχή f_{fu} (MPa) Επί τοις εκατό μείωση %	59,69%	69,48%	45,98%	-
E_{fi} ινοπλέγματος Gra Επί τοις εκατό μείωση %	11,02%	21,91%	34,19%	-

Ο πίνακας 4.3 περιέχει το ποσοστό μείωσης των τιμών της εφελκυστικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας που παρείχε ο κατασκευαστής σε σχέση με αυτές που προέκυψαν από τα πειραματικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, τα ποσοστά μείωσης εφελκυστική αντοχής ήταν 59.69%, 69.48%, 45.98% για τα ινοπλέγματα ελαφρύτερου άνθρακα (CL), βαρύτερου άνθρακα (CH) και υάλου (G), αντίστοιχα. Όσον αφορά τα ποσοστά μείωσης του μέτρου ελαστικότητας ήταν 11.02%, 21.91%, 34.19%, για τα ινοπλέγματα ελαφρύτερου άνθρακα (CL), βαρύτερου άνθρακα (CH), υάλου (G) και βασάλτη (B), αντίστοιχα. Αυτή η μείωση οφείλεται στο γεγονός ότι, τα μηχανικά χαρακτηριστικά που δίνονται απ' τους κατασκευαστές αφορούν την ίνα καθαυτή, και όχι τον κλώνο ινών, πόσο μάλλον το πλέγμα ινών. Η εφελκυστική αντοχή μιας μονής ίνας είναι αυτή που μας παρέχουν οι κατασκευαστές και είναι επί της ουσίας μεγαλύτερη από αυτή των κλώνων ινών, και ο κλώνος ινών με την σειρά του έχει μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή από το πλέγμα ινών. Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν και για το μέτρο ελαστικότητας. Αυτή η διαφορά πιθανόν να οφείλεται στην ανομοιόμορφη κατανομή των δυνάμεων που αναπτύσσονται στο πλέγμα ινών κατά την επιβολή του εφελκυστικού φορτίου. Εν ολίγοις, τα μηχανικά χαρακτηριστικά των μεμονωμένων ινών διαφέρουν από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του πλέγματος ινών. Αυτό συμφωνεί με τις μελέτες των Hegger (1998), Hegger (2001), Curbach (2003), οι οποίοι έδειξαν ότι η εφελκυστική αντοχή των ινών είναι μεγαλύτερη από αυτή των κλώνων ινών, και επίσης, η εφελκυστική αντοχή των κλώνων ινών είναι μεγαλύτερη από αυτή των ινοπλεγμάτων. Συνεπώς, αυτό θα ήταν συνετό να λαμβάνεται υπόψη στον σχεδιασμό, παρέχοντας αυτά στοιχεία στο τεχνικό φυλλάδιο του προϊόντος.

Επίσης, από τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων τάσεων – παραμορφώσεων που προέκυψαν από τις δοκιμές εφελκυσμού των ινοπλεγμάτων, φαίνεται ότι η συμπεριφορά του πλέγματος ινών είναι γραμμικά ελαστική μέχρι το σημείο θραύσης του (Σχήμα 4.5).

Βάσει των αποτελεσμάτων, προέκυψε ότι η εφελκυστική αντοχή των ινοπλεγμάτων ελαφρύτερου άνθρακα (CL) ήταν μεγαλύτερη από αυτές των ινοπλεγμάτων υάλου (G) και βασάλτη (B), όπως ήταν αναμενόμενο, καθώς επίσης ήταν και ελαφρώς μεγαλύτερη από των ινοπλεγμάτων βαρύτερου άνθρακα (CH). Είναι αξιοπαρατήρητο ότι, ενώ στα ινοπλέγματα βαρύτερου άνθρακα (CH) οι ίνες τους έχουν μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή, σε σύγκριση με τα ινοπλέγματα ελαφρύτερου άνθρακα (CL), εν τούτοις τα ινοπλέγματα ελαφρύτερου άνθρακα (CL) παρουσιάζουν ελαφρώς καλύτερη συμπεριφορά στα αποτελέσματα εφελκυσμού (Σχήμα 4.5). Σύμφωνα με τα δελτία των τεχνικών προδιαγραφών του κατασκευαστή (Σχήμα 4.2), οι ίνες του ινοπλέγματος βαρύτερου άνθρακα (CH), έχουν μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή και ίση με 4800 MPa, σε σύγκριση με τις ίνες του ινοπλέγματος ελαφρύτερου άνθρακα (CL) που

έχουν εφελκυστική αντοχή ίση με 38000 MPa, δηλαδή 1000 MPa διαφορά. Δηλαδή, ενώ οι ίνες του ινοπλέγματος βαρύτερου άνθρακα (CH) έχουν κατά 20% μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή από τις ίνες του ελαφρύτερου άνθρακα (CL), στα πειραματικά αποτελέσματα προέκυψε ότι το ινόπλεγμα βαρύτερου άνθρακα (CH) έχει ελαφρώς μικρότερη εφελκυστική αντοχή, περίπου κατά 4.5% σε σύγκριση με το ινόπλεγμα ελαφρύτερου άνθρακα (CL). Επίσης, ενώ και οι δύο τύποι άνθρακα έχουν την ίδια τιμή μέτρου ελαστικότητας, πάλι προκύπτει ότι την αξιοποιεί ελαφρώς καλύτερα το ινόπλεγμα ελαφρύτερου άνθρακα (CL). Το γεγονός ότι, το ινόπλεγμα ελαφρού άνθρακα (CL) αξιοποιεί καλύτερα τις ιδιότητες των ινών του σε σχέση με το ινόπλεγμα βαρύτερου άνθρακα (CH), πιθανόν να οφείλεται στην διαφορετική διάταξη της γεωμετρίας που έχουν τα πλέγματα ινών. Παρατηρώντας κανείς τα δύο αυτά ινοπλέγματα (Σχήμα 4.2), διαπιστώνει ότι τα κενά των βρόγχων διαφέρουν. Στο ινόπλεγμα CL οι αποστάσεις μεταξύ των βρόγχων είναι 8mm, ενώ στο ινόπλεγμα CH οι αποστάσεις των μεταξύ των βρόγχων είναι 10mm. Αυτή η διαφορά στο άνοιγμα των βρόγχων πιθανόν να σχετίζεται με την ανομοιόμορφη κατανομή των τάσεων που λαμβάνει χώρα κατά την αξονική καταπόνηση. Το ζήτημα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

Επιπρόσθετα, τόσο τα ινοπλέγματα από ίνες υάλου όσο και από βασάλτη είχαν, όπως αναμενόταν, χαμηλότερη εφελκυστική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας σε σύγκριση με τα ινοπλέγματα από ίνες άνθρακα, ενώ είχαν σχεδόν διπλάσια αξονική παραμόρφωση από τα ινοπλέγματα άνθρακα (Πίνακας 4.1).

Επιπλέον, όσον αφορά τις εφελκυστικές ιδιότητες των υβριδικών ινοπλεγμάτων FORMAX (δηλαδή την εφελκυστική τους αντοχή, την εφελκυστική τους παραμόρφωση και το μέτρο ελαστικότητας), είχαν όλα τα ίδια περίπου αποτελέσματα με εκείνες των ινοπλεγμάτων βαρύτερου άνθρακα (CH), από τις οποίες και αποτελούνταν στην διαμήκη διεύθυνση (διεύθυνση εφελκυστικής καταπόνησης). Μια τέτοια συμπεριφορά έδειξε ότι η επίδραση των ινών στην εγκάρσια διεύθυνση δεν ήταν σημαντική στις ιδιότητες εφελκυσμού. Αυτή η παρατήρηση θα μπορούσε ενδεχομένως να οδηγήσει σε μείωση του κόστους του πλέγματος, ειδικά αν χρησιμοποιούνται χαμηλού κόστους ίνες στην εγκάρσια διεύθυνση.

4.2.5 Δοκιμή διάτμησης σε ινοπλέγματα

Η διατμητική συμπεριφορά των ινοπλεγμάτων προσδιορίστηκε μέσα από δοκιμές διάτμησης. Συγκεκριμένα διεξήχθησαν δοκιμές διάτμησης και για τα οκτώ διαφορετικά ινοπλέγματα που περιεγράφηκαν παραπάνω (υποενότητα 4.2.1). Παρασκευάστηκαν πέντε δοκίμια για κάθε ένα ινόπλεγμα, με τη γεωμετρία που φαίνεται στο σχήμα 4.6α. Το σχήμα 4.6β

απεικονίζει την κατασκευή που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές διάτμησης (μορφή πλαισίου). Η συγκεκριμένη διάταξη σχεδιάστηκε από το Πανεπιστήμιο του Nottingham. Χαρακτηριστικό του πλαισίου αυτού είναι ότι οι γωνίες του είναι αρθρωτές. Η αποφυγή της ολίσθησης του ινοπλέγματος εμποδίστηκε με τη σύσφιξη του μέσα στο πλαίσιο σε όλες του τις πλευρές.

Για την έναρξη της πειραματικής δοκιμής, το πλέγμα ινών έπρεπε να είναι σωστά ευθυγραμμισμένο και σφιχτά στερεωμένο στο πλαίσιο, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5γ. Κατά τη διάρκεια της πειραματικής δοκιμής, οι δέσμες ινών των ινοπλεγμάτων άρχισαν να αναπροσανατολίζονται καθώς υφίστανται διατμητική καταπόνηση. Τελικά το πλέγμα ινών προσαρμόστηκε στην τελική του γεωμετρία, κυρίως με την περιστροφή της δέσμης ινών (σχήμα 4.6δ). Η γωνία μεταξύ των δεσμών των ινών ονομάζεται γωνία διάτμησης, γ_f . Όταν οι δέσμες ινών δύο διευθύνσεων είναι κάθετες μεταξύ τους, τότε η γωνία διάτμησης, γ_f είναι μηδέν. Ειδικότερα:

- Η γωνία του πλαισίου, θ_f υπολογίστηκε από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\cos \theta_f = \frac{\sqrt{2}L_{frame} + d_A}{2L_{frame}} \quad (\text{Σχέση 4.2}) \text{ (Tetta, 2017)}$$

όπου

L_{frame} : το μήκος πλαισίου όπως υποδεικνύεται στο σχήμα 4.6β

d_A : η κατακόρυφη μετατόπιση του σημείου A (σχήμα 4.6β).

- Η γωνία διάτμησης γ_f , υπολογίστηκε με βάση τη γεωμετρία του πλαισίου από την ακόλουθη σχέση:

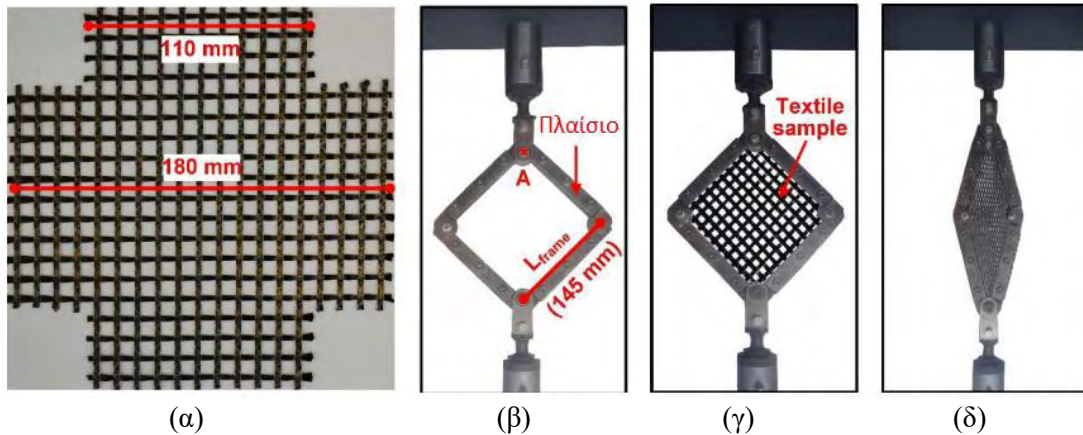
$$\gamma_f = 90^\circ - 2\theta_f \quad (\text{Σχέση 4.3}) \text{ (Tetta, 2017)}$$

- Η διατμητική δύναμη, F_s , υπολογίστηκε με βάση τη δύναμη που εφαρμόστηκε από την μηχανή εφελκυσμού χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$F_s = \frac{F'' - F'}{2 \cos \theta_f} \quad (\text{Σχέση 4.4}) \text{ (Tetta, 2017)}$$

όπου, ο όρος $F''-F'$ αντιστοιχεί στο καθαρό φορτίο. Συγκεκριμένα, το F'' αντιστοιχεί στο φορτίο που εφαρμόστηκε από την μηχανή όταν παραμορφώθηκε το υλικό του ινοπλέγματος

που βρίσκονταν στο πλαίσιο (σχήμα 4.6γ και δ), ενώ το F' αντιστοιχεί στο φορτίο που εφαρμόστηκε από τη μηχανή όταν το ίδιο το πλαίσιο παραμορφώθηκε χωρίς να συμπεριληφθεί υπόψη το δοκίμιο ινοπλέγματος (σχήμα 4.6β).



Σχήμα 4.6 (α) γεωμετρία του δοκιμίου προς διατμητική καταπόνηση · β) κατασκευή διατμητικής καταπόνησης (μορφή πλαισίου) · γ) κατάσταση εκκίνησης δοκιμίου · (δ) παραμορφωμένη κατάσταση δοκιμίου. (Tetta, 2017)

- Το μέτρο διατμήσεως G , υπολογίστηκε με βάση την ακόλουθη εξίσωση:

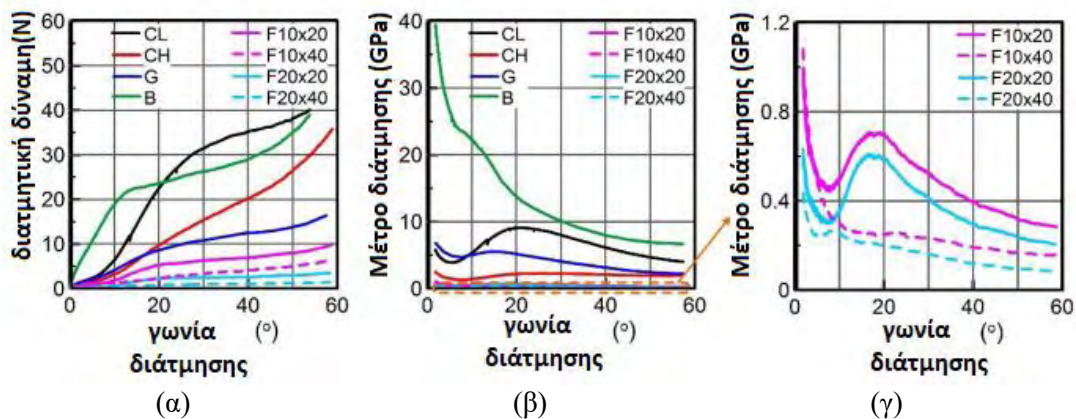
$$G = \frac{F_s}{\tan \gamma_f \cdot t_f \cdot L_{sample}} \quad (\text{Σχέση 4.5}) \quad (\text{Tetta, 2017})$$

όπου

L_{sample} (110 mm) : το μήκος των δοκιμίων ινοπλέγματος χωρίς να έχουν ληφθεί υπόψη τα πέλματα (σχήμα 4.6α) στην ουσία αυτό είναι το τμήμα του δοκιμίου που παραμορφώνεται κατά τη διάρκεια της δοκιμής διάτμησης.

4.2.6 Πειραματικά αποτελέσματα και σχολιασμός

Το σχήμα 4.7α απεικονίζει τις καμπύλες διατμητικής δύναμης (F_s) έναντι διατμητικής παραμορφώσεως (γ_f). Οι καμπύλες αυτές προέκυψαν από τη μέση απόκριση και των πέντε δοκιμίων που δοκιμάστηκαν για κάθε ένα ινόπλεγμα. Επίσης, στο σχήμα 4.6β και γ, απεικονίζονται οι καμπύλες του μέτρου διάτμησης G έναντι διατμητικής παραμορφώσεως (γ_f) (μέση απόκριση πέντε δοκιμίων).



Σχήμα 4.7 (α) Καμπύλες διατμητικής δύναμης – διατμητικής παραμόρφωσης και για τα οκτώ διαφορετικά δοκίμια ινοπλέγματος, (β) καμπύλες μέτρου διάτμησης G – διατμητικής παραμόρφωσης και για τα οκτώ ινοπλέγματα, (γ) καμπύλες συντελεστή διάτμησης G – διατμητικής παραμόρφωσης για τα ινοπλέγματα FORMAX. (Tetta, et al., 2017)

Οι καμπύλες διατμητικής δύναμης (F_s) έναντι διατμητικής παραμόρφωσης (γ_f) απεικονίζονται στο σχήμα 4.7β και γ. Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 4.2, τα ινοπλέγματα από ίνες βασάλτη είναι επικαλυμμένα και ως εκ τούτου είναι πιο σταθερά και πιο άκαμπτα σε σχέση με τα υπόλοιπα ινοπλέγματα. Επομένως, το πλέγμα από ίνες βασάλτη είχε την καλύτερη απόκριση διάτμησης σε σύγκριση με τα υπόλοιπα ινοπλέγματα (Σχήμα 4.7β και γ), κυρίως για χαμηλές τιμές διατμητικής παραμορφώσεως.

Επίσης, παρατηρήθηκε ότι και τα τέσσερα ινοπλέγματα FORMAX είχαν πολύ χαμηλή τιμή του μέτρου διάτμησης σε σύγκριση με τα υπόλοιπα ινοπλέγματα (Σχήμα 4.7γ). Κάτι που πιθανόν οφείλεται στην πολύ χαλαρή σύνδεση μεταξύ των κλώνων ινών άνθρακα (κατά τη διαμήκη διεύθυνση) με τους κλώνους ινών υάλου (κατά την εγκάρσια διεύθυνση).

Ο Πίνακας 4.4 παρουσιάζει τις τιμές του μέτρου διάτμησης κατά το αρχικό στάδιο της δοκιμής διάτμησης ($\gamma_f=0^\circ$ ή $\theta_f=0^\circ$). Οι τιμές του μέτρου διάτμησης και γενικά η απόκριση διάτμησης των υλικών των υφασμάτων ινών θα μπορούσε να είναι πολύ χρήσιμη σε αριθμητικές προσομοιώσεις.

Πίνακας 4.4 Οι του μέτρου διάτμησης G (GPa) για κάθε ινοπλέγμα. (Tetta, et al., 2017)

	CL	CH	G	B	F10x20	F10x40	F20x20	F20x40
G (GPa)*	5.796 (0.7)	2.492 (0.2)	6.797 (0.5)	39.357 (4.2)	0.997 (0.09)	1.079 (0.11)	0.634 (0.07)	0.437 (0.03)

*τυπική απόκλιση στις παρενθέσεις

5. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΜΗΤΡΑ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

5.1 Σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση

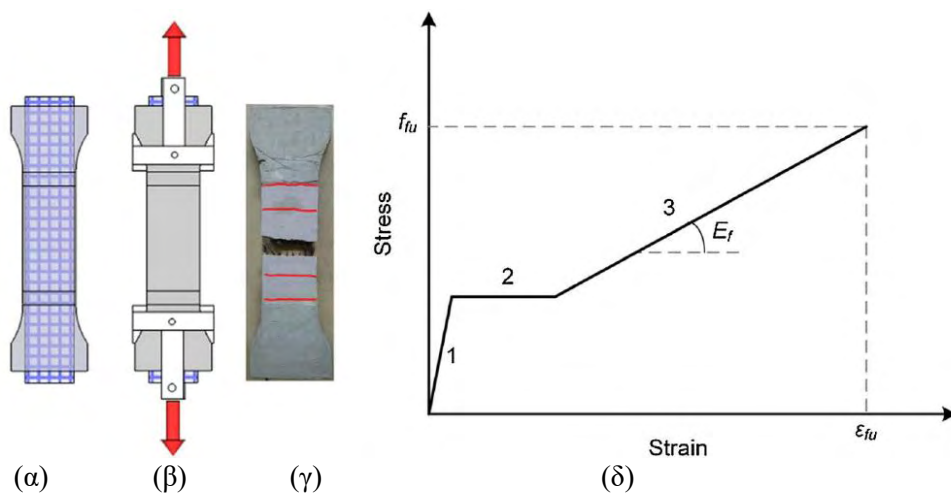
Αρκετοί ερευνητές έχουν διερευνήσει την συμπεριφορά των σύνθετων υλικών ΙΑΜ σε εφελκυσμού (*Colombo et al., 2011, Contamine et al. 2011; Hartig et al. 2012; Zhu et al. 2011; Ascione et al. 2015; Malena και De Felice 2014. Arboleda et al. 2016; De Santis et al. 2017; D'Antino και Papanicolaou 2018*). Οι ιδιότητες εφελκυσμού των σύνθετων στοιχείων ΙΑΜ, δηλαδή ο τρόπος μεταβολής των τάσεων και των αντίστοιχων παραμορφώσεων, και κατ' επέκταση το μέτρο ελαστικότητας, μπορούν να προσδιοριστούν με δοκιμές εφελκυσμού στις οποίες επέρχεται θραύση των ινών (ιδανικά στην κεντρική περιοχή των δοκιμίων ΙΑΜ). Στις περισσότερες μελέτες, έχουν διεξαχθεί πειραματικές δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού. Ωστόσο, οι Zhu κ.ά. (2011) διερεύνησαν την επίδραση του ρυθμού καταπόνησης στις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων ΙΑΜ, διεξάγοντας δοκιμές εφελκυσμού δυναμικής φόρτισης.

Μια ποικιλία από διαφορετικές γεωμετρίες δοκιμίων ΙΑΜ έχει δοκιμαστεί και έχουν χρησιμοποιηθεί διαφορετικοί μέθοδοι λαβής των άκρων στην μηχανή εφελκυσμού. Δοκίμια ΙΑΜ με γεωμετρία ορθογωνικού πρίσματος έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως, αλλά και με σχήμα dumbbell [Σχήμα 5.1(α-γ)] (*Colombo et al., 2011, Hartig et al., 2012, Ascione et al. 2015*) έχουν επίσης δοκιμαστεί με σκοπό να επιτύχουν την αστοχία στην κεντρική περιοχή του δοκιμίου [Σχήμα 5.1γ]. Σύμφωνα με τους De Santis et al. (2017), η μέθοδος αγκύρωσης των άκρων επηρεάζει έντονα το τρόπο αστοχίας των δοκιμίων ΙΑΜ. Συγκεκριμένα, η ολίσθηση των ινών μέσα από το κονίαμα πριν από τη θραύση παρατηρήθηκε συνήθως στην περίπτωση της μεθόδου λαβής των άκρων στην μηχανή εφελκυσμού (*Arboleda et al., 2016, D'Antino and Papanicolaou 2017, De Santis et al. 2017*), όμως αυτός ο τρόπος αστοχίας παρεμποδίστηκε όταν σφίχτηκε η λαβή (παρέχοντας επαρκή πίεση συγκράτησης) (*Arboleda et al. 2016; De Santis et al. 2017*). Μια εις βάθος συζήτηση σχετικά με τις συγκρίσεις μεταξύ διαφορετικών πειραματικών διατάξεων δοκιμής, διαθέσιμων στη βιβλιογραφία, μπορεί να βρεθεί στην πρόσφατη μελέτη των D'Antino και Papanicolaou (2018), η οποία επιβεβαίωσε την ισχυρή επίδραση που έχει η πειραματική διάταξη δοκιμής στα αποτελέσματα εφελκυσμού.

Ο Colombo et al. (2011) μελέτησε τη συμπεριφορά των ινών σε υψηλές θερμοκρασίες, διεξάγοντας δοκιμές εφελκυσμού σε δοκίμια IAM. Αρχικά, τα δοκίμια εκτέθηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες, και μετά από μια φάση σταθεροποίησης δύο ωρών ψύχθηκαν πριν από τη δοκιμή. Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι μετά την έκθεση των δοκιμίων IAM στους 200 ° C, μπορούν και διατηρούν την αντοχή τους, ενώ η τάση και η παραμόρφωση τους μειώνονται σημαντικά μετά την έκθεση των δοκιμίων στους 400 ° C και στους 600 ° C λόγω της υποβάθμισης της επικάλυψης του ινοπλέγματος.

Το 2004 οι Hegger et al έδειξαν ότι η τυπική συμπεριφορά των ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα υπό μονοαξονικό εφελκυσμό είναι παρόμοια με αυτή του οπλισμένου σκυροδέματος εκτός από το στάδιο III, καθώς το πλέγμα δεν έχει ικανότητα πλαστικής παραμόρφωσης.

Η απόσταση και το πλάτος των ρωγμών εξαρτώνται από την ποσότητα και τον τύπο του ενισχυτικού πλέγματος ινών, καθώς και από τη συνάφεια μεταξύ του πλέγματος ινών με τη μήτρα (κονίαμα) (De Felice et al., 2014). Με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν από τους D'Antino και Papanicolaou (2017), η χρήση της ρητίνης ως επικάλυψη των ινοπλεγμάτων επιτρέπει την ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου με αποτέλεσμα την βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών των ινοπλεγμάτων επικαλυμμένων με ρητίνη.

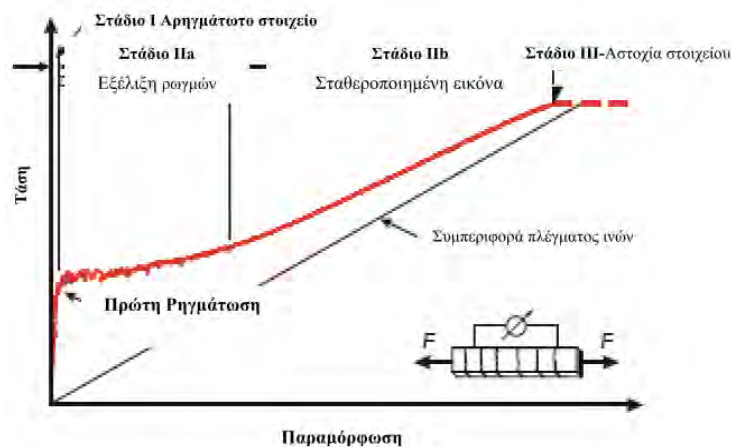


Σχήμα 5.1 (α) Δοκίμιο IAM με γεωμετρία τύπου dumbbell, β) πειραματική διάταξη δοκιμίων εφελκυσμού· (γ) θραύση των ινών στην κεντρική περιοχή του δοκιμίου IAM· (δ) απλοποιημένη καμπύλη τάσης έναντι παραμόρφωσης δοκιμίων IAM που υποβλήθηκαν σε μονοαξονική εφελκυστική φόρτιση.

Η τυπική απόκριση εφελκυσμού ενός σύνθετου στοιχείου IAM σε όρους τάσης – παραμόρφωσης περιλαμβάνει τρεις διακριτούς κλάδους, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.1

(δ) : (1) το δοκίμιο IAM παραμένει αρηγμάτωτο, (2) ανάπτυξη πολλαπλών ρωγμών και (3) οι ρωγμές έχουν αναπτυχθεί πλήρως και η αντίσταση οφείλεται αποκλειστικά στο ινόπλεγμα έως να συμβεί θράυση των ινών.

Αναλυτικότερα, η χαρακτηριστική συμπεριφορά των IAM σε δοκιμή μονοαξονικού εφελκυσμού, παρουσιάζεται στην καμπύλη που ακολουθεί. [Σχήμα5.2]



Σχήμα 5.2 : Στάδια συμπεριφοράς του σύνθετου στοιχείου IAM σε εντατική κατάσταση μονοαξονικού εφελκυσμού. [Hegger et al.2006], [Jesse et al.2008]

Όπως αναφέραμε παραπάνω, η καμπύλη τάσεων έναντι παραμορφώσεων μπορεί να διαχωριστεί σε τρία βασικά στάδια:

- Στάδιο I

Στη φάση έναρξης της δοκιμής, το φορτίο αυξάνεται και η αρχική δυστένεια του στοιχείου είναι ίση με το μέτρο ελαστικότητας της ανόργανης μήτρας (η κλίση του διαγράμματος σ - ϵ ισούται με το μέτρο ελαστικότητας της ανόργανης μήτρας). Στο στάδιο αυτό το στοιχείο παραμένει αρηγμάτωτο. Όταν η τάση του στοιχείου γίνει ίση με την εφελκυστική αντοχή της ανόργανης μήτρας, δημιουργείται η πρώτη ρωγμή. Το σημείο αυτό αποτελεί το τέλος του σταδίου I.

Το στάδιο II αποτελείται από τα εξής δύο μέρη:

- Στάδιο IIa

Με την δημιουργία της πρώτης ρωγμής του στοιχείου αρχίζει το στάδιο IIa. Πλέον το σύνολο της εφελκυστικής δύναμης παραλαμβάνεται από το πλέγμα ινών. Επίσης, μέσω των τάσεων

συνάφειας ινών-μήτρας, τμήμα της τάσης παραλαμβάνεται στη συνέχεια και από την ανόργανη μήτρα, μέχρι τη στιγμή που η τάση αυτή θα γίνει ίση με την εφελκυστική αντοχή της μήτρας. Τόσο το εύρος όσο και η απόσταση των ρωγμών εξαρτώνται από τη συνάφεια ινών-μήτρας, καθώς και από το ποσοστό του οπλισμού. Αυτό ήταν το στάδιο πολλαπλών ρηγματώσεων (Στάδιο IIa). Καθώς η δοκιμή συνεχίζεται παρατηρείται μια σταθεροποίηση του αριθμού των ρωγμών, και εδώ είναι που ορίζεται η αρχή του Σταδίου IIb.

- Στάδιο IIb

Στο συγκεκριμένο στάδιο παρατηρείται αύξηση του φορτίου χωρίς ωστόσο να δημιουργούνται νέες ρωγμές. Πλέον, έχουν σταθεροποιηθεί οι θέσεις και ο αριθμός των ρωγμών και με την αύξηση του φορτίου οι ίνες εφελκύνονται ως την αστοχία τους. Η ανάληψη των εφελκυστικών δυνάμεων γίνεται αποκλειστικά από το πλέγμα ινών. Η απόκλιση του διαγράμματος η οποία παρατηρείται στη καμπύλη του δοκιμίου από το στάδιο IIa στο στάδιο IIb, είναι αποτέλεσμα της θραύσης ποσοστού των ινών πριν την είσοδο στο στάδιο IIb.

- Στάδιο III

Το στάδιο αυτό δεν εμφανίζεται στα πειράματα μονοαξονικού εφελκυσμού των IAM καθώς οι ίνες δεν έχουν τη δυνατότητα πλαστικής παραμόρφωσης. Όμως εάν παρατηρηθεί θα οφείλεται στην ολίσθηση ινών διαμέσου της μήτρας. Στην πραγματικότητα το στάδιο III αποτελεί ένα σημείο, το οποίο αντιστοιχεί στην αστοχία του στοιχείου λόγω θραύσης των ινών. Οι ίνες, όπως περιγράψαμε στην ενότητα 4.2, λειτουργούν γραμμικώς ελαστικά μέχρι την ψαθυρή μορφή αστοχίας τους.

Παράγοντες που επηρεάζουν την καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης

Διάφορα πανεπιστήμια [Aachen University, Germany], [Dresden University, Germany] και ερευνητικά κέντρα έχουν πραγματοποιήσει προσπάθειες για να βρεθούν πιο αναλυτικά οι παράγοντες που την συμπεριφορά των σύνθετων στοιχείων IAM, όσον αφορά την καμπύλη της τάσης – παραμόρφωσης που αναφέραμε παραπάνω. Μετά από διάφορες πειραματικές μελέτες οι Hegger et al.(2006), κατέληξαν στους παρακάτω παράγοντες επηρεασμού, οι οποίοι αποτελούν μόνο ορισμένους από αυτούς που έχουν βρεθεί μέχρι στιγμής.

- **Το υλικό των ινών**

Το στάδιο I δεν υφίσταται καμία αλλαγή λόγω του υλικού των ινών. Όμως, μετά την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής αρχίζει να επηρεάζεται η καμπύλη και συγκεκριμένα εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας των ινών.

- **Η διάμετρος των κλώνων ινών**

Η διαφορετική διάμετρος των κλώνων ινών μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα της καμπύλης. Συγκεκριμένα, η αύξηση της διαμέτρου των κλώνων ινών οδηγεί σε μείωση του φορτίου αστοχίας. Αυτό οφείλεται στην δυσκολία του κονιάματος να εισχωρήσει στο εσωτερικό των ινών, μειώνοντας έτσι την συνάφεια που αναπτύσσεται μεταξύ μήτρας και κονιάματος.

- **Ο εμποτισμός των ινών**

Ο εμποτισμός των ινών επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό το φορτίο αστοχίας του στοιχείου IAM. Όσο πιο επαρκής είναι ο εμποτισμός των κλώνων, τόσο καλύτερος είναι και ο δεσμός που δημιουργείται μεταξύ των εσωτερικών και των εξωτερικών νημάτων. Αυτό οδηγεί σε ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων, άρα και σε καλύτερη εκμετάλλευση των ιδιοτήτων του ινοπλέγματος.

Τέλος, οι μελέτες των Hegger (1998), Hegger (2001), Curbach (2003) έδειξαν ότι η εφελκυστική αντοχή των ινών είναι μεγαλύτερη από αυτή των κλώνων ινών. Επίσης, η εφελκυστική αντοχή των κλώνων ινών είναι μεγαλύτερη από αυτή των ινοπλεγμάτων. Όλα αυτά τα χρόνια μέσα από σειρά ερευνών και δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν προτάθηκαν πολλές μεθοδολογίες και διατάξεις για την πραγματοποίηση των δοκιμών εφελκυσμού.

5.2 Περιγραφή διαθέσιμου πειράματος : Εφελκυσμός σύνθετου υλικού IAM

Εισαγωγή

Αυτό το κεφάλαιο περιγράφει το διαθέσιμο πείραμα που διεξήχθη από την Tetta Z. (2017) *Shear strengthening of concrete members with Textile Reinforced Mortar (TRM)*, στα πλαίσια Διατριβής Διδακτορικού Διπλώματος, University of Nottingham, με σκοπό την διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων των σύνθετων στοιχείων IAM. Οι ιδιότητες εφελκυσμού του συστήματος IAM ως σύνθετου υλικού, δηλαδή η εφελκυστική αντοχή, η εφελκυστική παραμόρφωση και το μέτρο ελαστικότητας, λήφθηκαν πειραματικά με δοκιμές εφελκυσμού σε δοκίμια IAM, όπως θα περιγράψει παρακάτω.

5.2.1 Μηχανικές ιδιότητες του κονιάματος

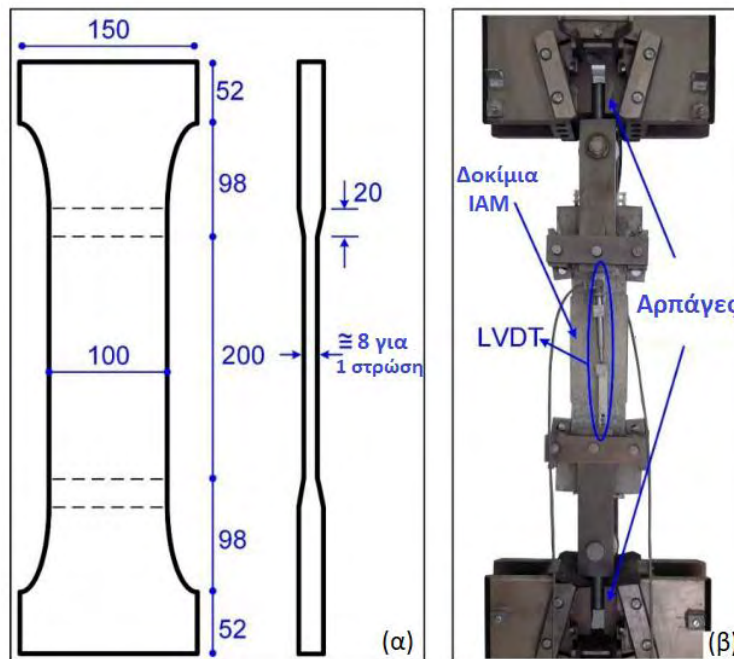
Το συνδετικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την ενίσχυση των συστημάτων IAM σε αυτήν την πειραματική δοκιμή ήταν ένα ανόργανο συνδετικό υλικό, το οποίο αποτελούταν από τσιμέντο και πολυμερή σε αναλογία 8:1 κατά βάρος. Ο λόγος νερού-συνδετικού υλικού στο κονιάμα ήταν 0,23:1 κατά βάρος, καταλήγοντας σε πλαστική συνοχή και καλή εργασιμότητα. Η καμπτική και θλιπτική αντοχή του κονιάματος λήφθηκε πειραματικά την ημέρα της δοκιμής χρησιμοποιώντας πρίσματα διαστάσεων 40x40x160mm, σύμφωνα με το EN 1015-11. Σημειώνεται ότι η αντοχή εφελκυσμού του κονιάματος λήφθηκε πειραματικά με τη διεξαγωγή πρότυπων δοκιμών σε κυλίνδρους διαμέτρου 100 mm και ύψους 200 mm.

5.2.2 Περιγραφή δοκιμών και πειραματικής διάταξης

Κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν δοκίμια IAM με τη γεωμετρία που φαίνεται στο σχήμα 5.3α, με σκοπό τον χαρακτηρισμό της συμπεριφοράς του σύνθετου αυτού υλικού σε εφελκυσμό. Οι παράμετροι της δοκιμής ήταν το υλικό και ο αριθμός των στρώσεων του ινοπλέγματος. Συγκεκριμένα, για τους οκτώ τύπος ινοπλεγμάτων που περιεγράφηκαν στην ενότητα 4.2, κατασκευάστηκαν τρία δοκίμια IAM με μία και δύο στρώσεις ινοπλέγματος, αντίστοιχα. Επιπλέον, μόνο για τα ινοπλέγματα από ίνες υάλου και βασάλτη κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν τρία δοκίμια IAM με τέσσερις στρώσεις ινοπλεγμάτων. Η μέση τιμή τριών δοκιμών, εφελκυσμού και θλίψης του κονιάματος την ημέρα της πειραματικής δοκιμής των δοκιμών ήταν 8.6, 3.4 και 28.4 MPa, αντίστοιχα.

Η δοκιμή του μονοαξονικού εφελκυσμού διεξήχθη με τη χρήση μιας μηχανής δυναμικότητας 200 kN με έλεγχο μετακίνησης και ρυθμό μονοτονικής φόρτισης 0.02 mm/sec. Για την σωστή εφαρμογή της δύναμης εφελκυσμού χρησιμοποιήθηκαν ειδικά σχεδιασμένα

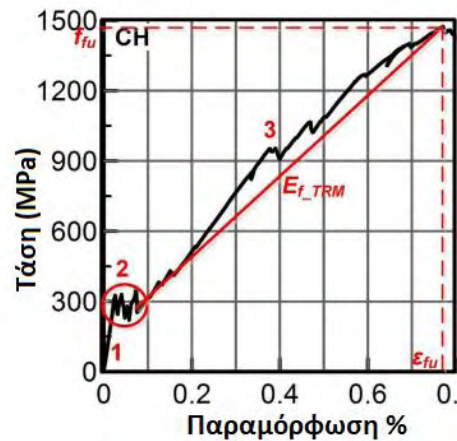
χαλύβδινα εξαρτήματα, όπου τα καμπύλα μέρη των δοκιμίων IAM μπορούσαν να εφαρμοστούν με ακρίβεια. Η επιμήκυνση του δοκιμίου μετρούνταν χρησιμοποιώντας δύο LVDTs (Linear Variable Differential Transformer) (αισθητήρες μετακίνησης), ένα σε κάθε όψη του δοκιμίου (Εικόνα 5.3β). Τα LVDTs έχουν τη δυνατότητα καταγραφής αξονικής μετατόπισης και για το λόγο αυτό απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή ώστε να τοποθετούνται όσο το δυνατόν κατακόρυφα για να μην προκύψουν πλασματικές καταγραφές.



Σχήμα 5.3 (α) Γεωμετρία δοκιμίου IAM τα οποία εξετάστηκαν σε μονοαξονικό εφελκυσμό, (β) Διάταξη δοκιμής εφελκυσμού των δοκιμίων IAM. (Tetta, 2017)

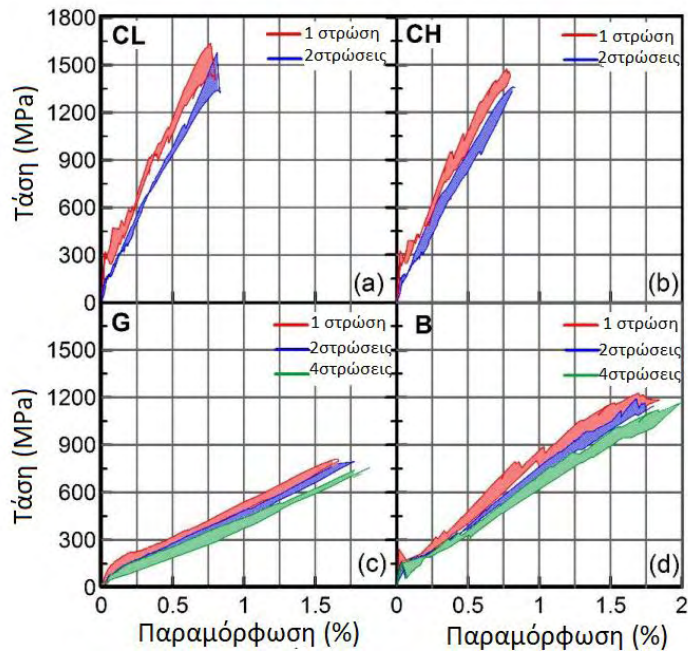
5.2.3 Πειραματικά αποτελέσματα

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν, η απόκριση όλων των δοκιμίων περιλαμβάνει τρεις ξεχωριστούς κλάδους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4: (1) το δοκίμιο να παραμένει αρηγμάτωτο, (2) την εμφάνιση πολλαπλών ρωγμών μετά την πρώτη ρωγμή και (3) οι ρωγμές έχουν αναπτυχθεί πλήρως και η αύξηση της αντίστασης οφείλεται ουσιαστικά στο ίδιο το ινόπλεγμα, μέχρις ότου να πραγματοποιηθεί η θραύση των ινών. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην βιβλιογραφική ανασκόπηση (ενότητα 5.1).

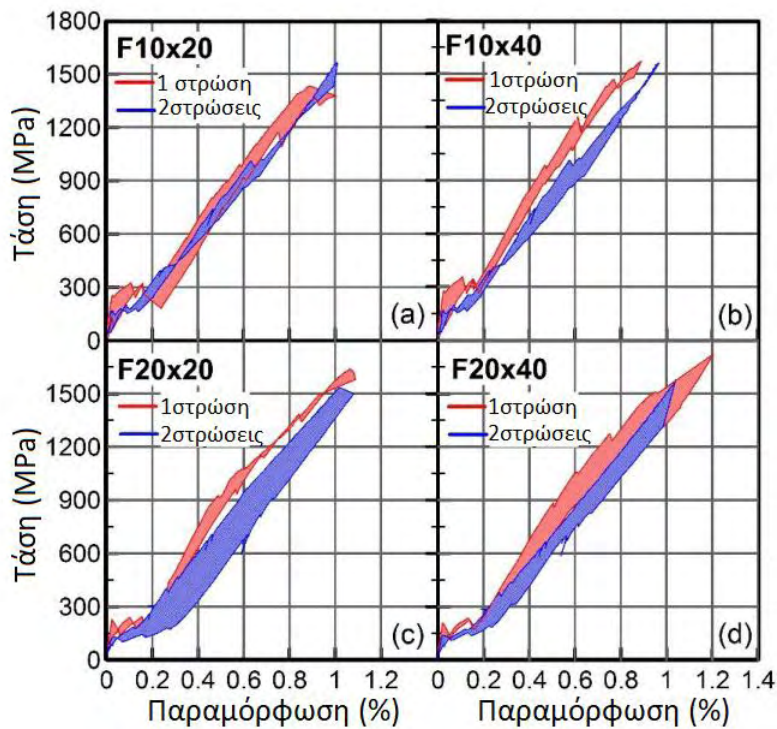


Σχήμα 5.4 Ενδεικτική καμπύλη τάσης -παραμόρφωσης των πειραματικών δοκιμών IAM σε εφελκυσμό. (Tetta, 2017)

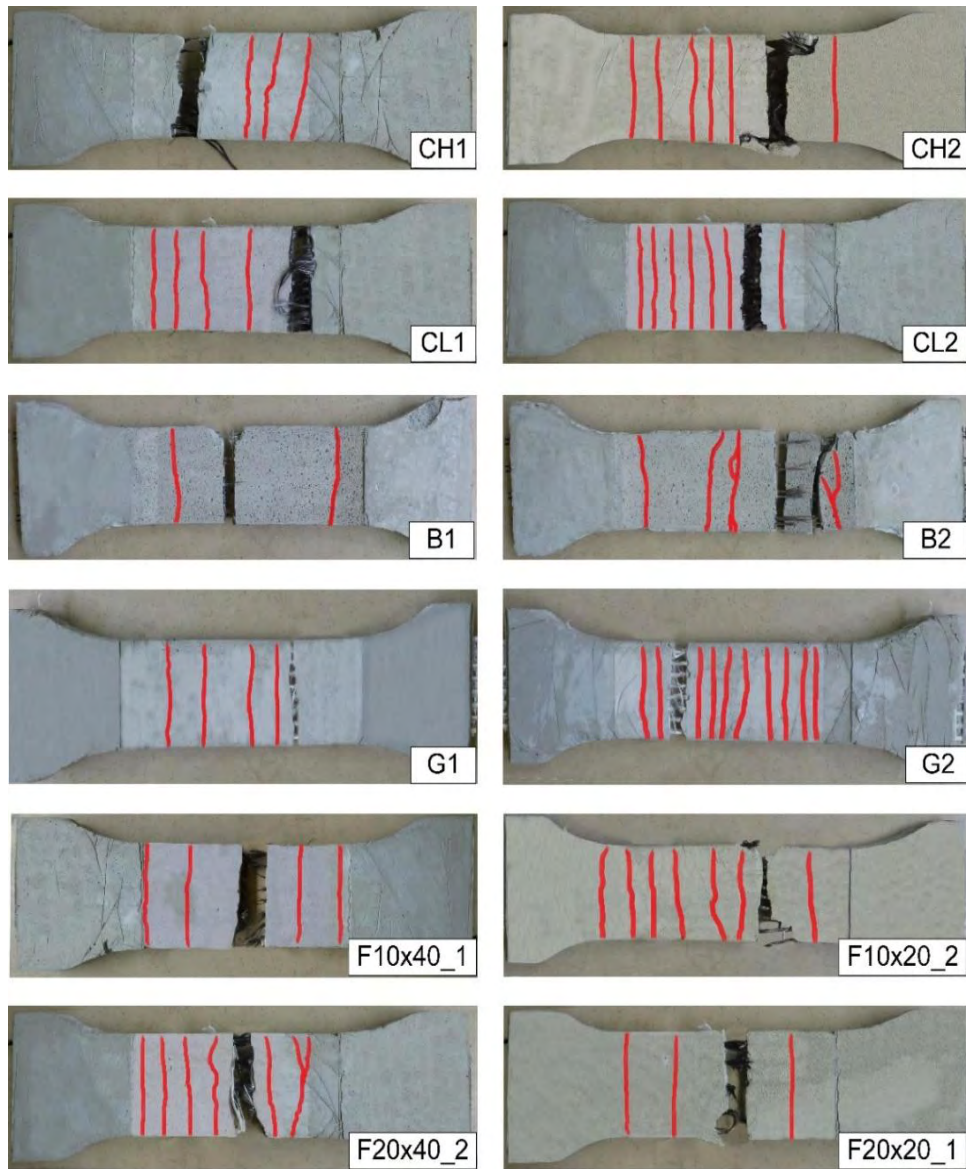
Το σχήμα 5.5 απεικονίζει τις καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων των δοκιμών IAM που κατασκευάστηκαν με τα τέσσερα ινοπλέγματα, τα οποία είχαν ίση ποσότητα ινών στις δύο ορθογώνιες διευθύνσεις (CH, CL, G και B), όπως αυτά περιεγράφηκαν στην ενότητα 4.2. Στο σχήμα 5.6 απεικονίζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα των δοκιμών IAM που κατασκευάστηκαν με τα τέσσερα ινοπλέγματα της FORMAX. Οι τιμές των τάσεων αστοχίας υπολογίστηκαν διαιρώντας το φορτίο με το εμβαδόν του ινοπλέγματος. Κάθε σκιασμένη περιοχή των σθημάτων 5.5 και 5.6 περιβάλλει όλες τις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης κάθε ομάδας δοκιμών IAM. Ακολουθώντας, το σχήμα 5.7 απεικονίζει φωτογραφικό υλικό των δοκιμών IAM κατά την αστοχία τους. Η ένδειξη των δοκιμών IAM στις φωτογραφίες αυτές είναι XN, με το X να δηλώνει τον τύπο του ινοπλέγματος (CL, CH, G, B, F10x20, F10x40, F20x20 και F20x40) και το N τον αριθμό των στρώσεων (1, 2 ή 4). Σε όλα τα δοκίμια IAM δημιουργήθηκαν πολλαπλές ρωγμές εντός του μήκους του αισθητήρα. Γενικά, η αύξηση του αριθμού των στρώσεων επέτρεπε την καλύτερη κατανομή των τάσεων εφελκυσμού και συνεπώς την δημιουργία περισσότερων ρωγμών.



Σχήμα 5.5. Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για (α) ινοπλέγματα από ίνες ελαφρύ άνθρακα (CL) · β) ινοπλέγματα από ίνες βαρύ άνθρακα (CH) · γ) ινοπλέγματα από ίνες υάλου · δ) ινοπλέγματα από ίνες βασάλτη. (Tetta, 2017)



Σχήμα 5.6 Καμπύλες τάσης έναντι παραμόρφωσης για ινοπλέγματα FORMAX : (α) F10x20 · (β) F10x40 · (γ) F20x20 · δ) F20x40 · (Tetta, 2017)



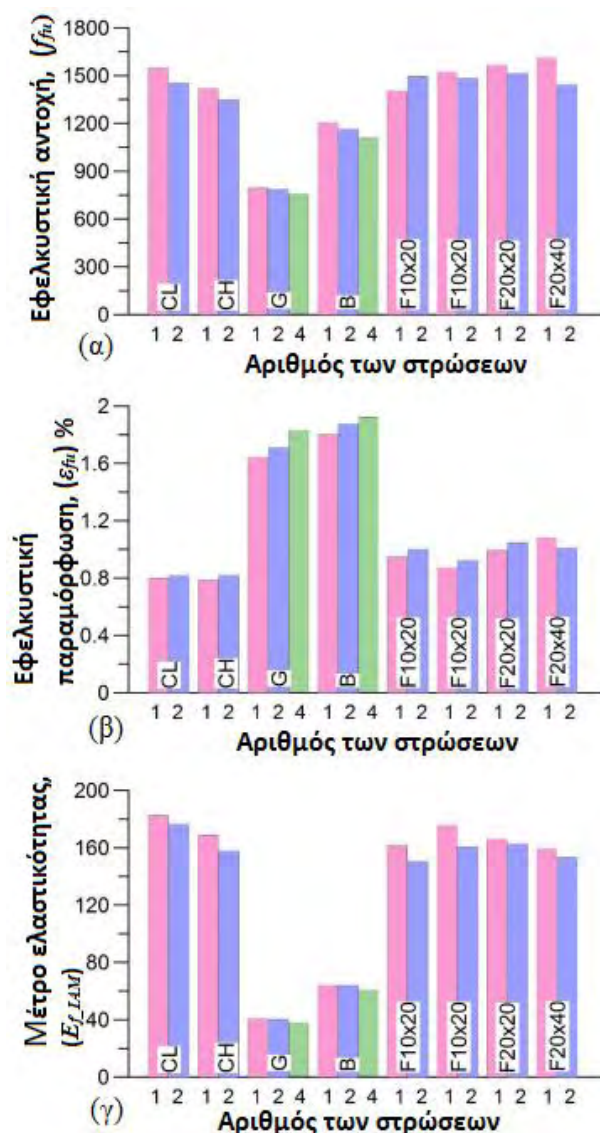
Σχήμα 5.7 Τρόποι αστοχίας των δοκιμίων IAM (Tetta, 2017)

Η εφελκυστική αντοχή (f_{fu}), η εφελκυστική παραμόρφωση (ϵ_{fu}) και το μέτρο ελαστικότητας (E_{f_IAM}) που προέκυψαν από τα πειραματικά αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 5.3. Επίσης, παρουσιάζονται και στο Σχήμα 5.12 σε μορφή γραφημάτων. Σημειώνεται ότι το μέτρο ελαστικότητας (E_{f_IAM}) που περιλαμβάνεται στον Πίνακα 5.3, είναι το τέμνον μέτρο ελαστικότητας του τρίτου κλάδου της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης και αντιπροσωπεύει τη ρηγματωμένη συμπεριφορά των δοκιμίων (Σχήμα 5.8). Παρατηρήθηκε, ότι η αύξηση του αριθμού των στρώσεων είχε ως αποτέλεσμα μια μικρή μείωση της εφελκυστικής αντοχής (f_{fu}), καθώς και του μέτρου ελαστικότητας του ρηγματωμένου δοκιμίου (E_{f_IAM}), ενώ είχε μια μικρή αύξηση της εφελκυστικής παραμόρφωσης (ϵ_{fu}).

Πίνακας 5.1. Σύνοψη των αποτελεσμάτων δοκιμών IAM. (Tetta, 2017)

Τύπος Ινών	Αριθμός των στρώσεων	Εφελκυστική αντοχή, f_{fu} (MPa)*	Εφελκυστική παραμόρφωση, ε_{fu} (%)*	Μέτρο Ελαστικότητας των ρηγματωμένων δοκιμών, E_{f_IAM} (GPa)*
Ίνες Ελαφρύτερο άνθρακαβάρους (CL)	1	1544.6 (132)	0.798 (0.09)	182.6 (21)
	2	1456.3 (115)	0.820 (0.07)	176.6 (16)
Ίνες Άνθρακα Βαρέως βάρους (CL) (CH)	1	1417.9 (86)	0.784 (0.13)	168.7 (5)
	2	1349.9 (127)	0.821 (0.11)	157.9 (8)
Ίνες Υάλου (G)	1	794.1 (102)	1.644 (0.09)	41.1 (6)
	2	787.4 (93)	1.710 (0.08)	40.3 (8)
	4	754.1 (110)	1.826 (0.14)	37.7 (10)
Ίνες Βασάλτη (B)	1	1206.1 (113)	1.800 (0.10)	63.8 (9)
	2	1168.2 (130)	1.876 (0.07)	63.7 (4)
	4	1104.8 (94)	1.916 (0.08)	60.3 (9)
F10x20	1	1404.7 (126)	0.946 (0.12)	161.6 (10)
	2	1496.8 (143)	1.002 (0.11)	150.7 (13)
F10x40	1	1523.7 (149)	0.873 (0.08)	175.7 (10)
	2	1485.4 (151)	0.926 (0.10)	160.61 (8)
F20x20	1	1564.5 (139)	0.996 (0.07)	165.9 (7)
	2	1516.6 (128)	1.048 (0.10)	162.8 (11)
F20x40	1	1610.7 (155)	1.082 (0.13)	159.0 (12)
	2	1444.3 (143)	1.012 (0.09)	153.4 (14)

* τυπική απόκλιση στις παρενθέσεις



Σχήμα 5.8 Αποτελέσματα των δοκιμών IAM σε μορφή γραφημάτων: (α) εφελκυστική αντοχή, f_{tu} , (β) αξονική παραμόρφωση, ϵ_{tu} (%), (γ) μέτρο ελαστικότητας ρηγματωμένου δοκιμίου, E_{f_IAM} . (Tetta, 2017)

5.2.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Αρχικά, συνάγεται το συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών που λήφθηκαν από τα στοιχεία IAM συμφωνούν πολύ καλά με τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού που πραγματοποιήθηκαν σε αυτούσια ινοπλέγματα, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στην υποενότητα 4.2 (όπου εξετάστηκαν πλέγματα ινών μεμονωμένα, χωρίς κονίαμα). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές των σύνθετων στοιχείων IAM, αφορούν τα αποτελέσματα του τρίτου κλάδου της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης (Σχήμα 5.4) και αντιπροσωπεύουν τη ρηγματωμένη συμπεριφορά των δοκι-

μίων. Τα αποτελέσματα, δηλαδή, αφορούν το στάδιο που η ανάληψη των εφελκυστικών δυνάμεων έγινε αποκλειστικά από το πλέγμα ινών (αφού το κονίαμα έχει ρηγματωθεί).

Ο πίνακας 5.2 συνοψίζει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές εφελκυσμού σε αυτούσια πλέγματα ινών και σε σύνθετα στοιχεία IAM μίας στρώση. Η διαφορά των δύο πειραματικών αποτελεσμάτων, όπως φαίνεται και στον πίνακα 5.1 είναι πολύ μικρή.

Πίνακας 5.2 Επί τοις εκατό διαφορά πειραματικών αποτελεσμάτων μονοαξονικού εφελκυσμού μεταξύ αυτούσιων πλεγμάτων ινών και σύνθετων στοιχείων IAM.

Υλικό ινών	CL	CH	G	B	F10x20	F10x40	F20x20	F20x40
Εφελκυστική Αντοχή f_{fu} (MPa) (πειραματικά αποτελέσματα σε στοιχεία IAM 1 στρώσης)	1544,6	1417,9	794,1	1206,1	1404,7	1523,7	1564,5	1610,7
Εφελκυστική Αντοχή f_{fu} (MPa) (πειραματικά αποτελέσματα σε αυτούσια πλέγματα ινών)	1531,7	1465,1	756,3	1209,9	1456	1340,1	1549,3	1562,1
Επί τοις εκατό διαφορά(%)	0,8351677	3,32887	4,760106	0,3151	3,65203	12,04962	0,97156	3,017322

Επομένως, και οι δύο δοκιμές θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων εφελκυσμού του IAM ως σύνθετου υλικού. Βέβαια, συνίσταται περαιτέρω διερεύνηση επί του θέματος αυτού.

Επιπλέον, είναι αξιοσημείωτο ότι τα κύρια χαρακτηριστικά εφελκυσμού του συστήματος IAM, δηλαδή η εφελκυστική αντοχή, η εφελκυστική παραμόρφωση και το μέτρο ελαστικότητας (του ρηγματωμένου δοκιμίου), επηρεάστηκαν ελαφρώς από την αύξηση του αριθμού των στρώσεων ινοπλέγματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.8α-γ. Συγκεκριμένα η αύξηση του αριθμού των στρώσεων IAM από μία σε δύο, μείωσε ελαφρώς την εφελκυστική αντοχή (μέσος όρος 4%) και αυξήστε οριακά την εφελκυστική παραμόρφωση (μέσος όρος 4%).

Επίσης, βάσει των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις δοκιμές εφελκυσμού σε σύνθετα στοιχεία IAM (Πίνακας 5.1) παρατηρείται, ότι όπως είχε προκύψει και στα μεμονωμένα πλέγματα ινών, η εφελκυστική αντοχή του ινοπλέγματος CL είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτή του CH, παρόλο που το ινόπλεγμα CH αποτελείται από ίνες υψηλότερης εφελκυστικής αντοχής κατά 1000 MPa. Στο σημείο αυτό φαίνεται πάλι ότι και οι δύο δοκιμές

εφελκυσμού θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων εφελκυσμού του IAM ως σύνθετου υλικού. Και αυτό διότι έχουμε τις ίδιες παρατηρήσεις, ότι δηλαδή η απόκριση του IAM στις δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού πιθανόν να επηρεάζεται από τις αποστάσεις μεταξύ των βρόχων που έχουν τα πλέγματα και την ανακατανομή των τάσεων. (Σημειωτέων ότι σε όλα τα σύνθετα στοιχεία IAM χρησιμοποιήθηκε η ίδια μήτρα). Το ζήτημα αυτό είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

Επίσης, τόσο τα ινοπλέγματα από ίνες υάλου όσο και από βασάλτη είχαν, όπως προβλεπόταν, χαμηλότερη εφελκυστική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας σε σύγκριση με τα ινοπλέγματα από ίνες άνθρακα, ενώ είχαν σχεδόν διπλάσια αξονική παραμόρφωση από τα ινοπλέγματα άνθρακα. Όμοια συμπεράσματα προέκυψαν και από τις δοκιμές εφελκυσμού που πραγματοποιήθηκαν σε μεμονωμένα ινοπλέγματα (Ενότητα 4.2)

Επιπρόσθετα, όλα τα υβριδικά ινοπλέγματα FORMAX παρουσίασαν περίπου την ίδια συμπεριφορά εφελκυσμού (δηλαδή η εφελκυστική αντοχή, εφελκυστική παραμόρφωση και το μέτρο ελαστικότητας) με εκείνες του βαρύτερου άνθρακα (CH) από τις οποίες αποτελούνταν οι κλώνοι στην διαμήκη διεύθυνση (διεύθυνση αξονικής καταπόνησης). Μια τέτοια συμπεριφορά έδειξε ότι η επίδραση των υλικών της ίνας (ύαλος) και η απόσταση μεταξύ των βρόγχων στην εγκάρσια διεύθυνση δεν είναι σημαντική. Αυτή η παρατήρηση, θα μπορούσε ενδεχομένως να οδηγήσει σε μείωση του κόστους του πλέγματος, ειδικά αν χρησιμοποιούνται χαμηλού κόστους ίνες στην εγκάρσια διεύθυνση.

5.3 Χρήση οπτικών ινών σε δοκίμια εφελκυσμού IAM

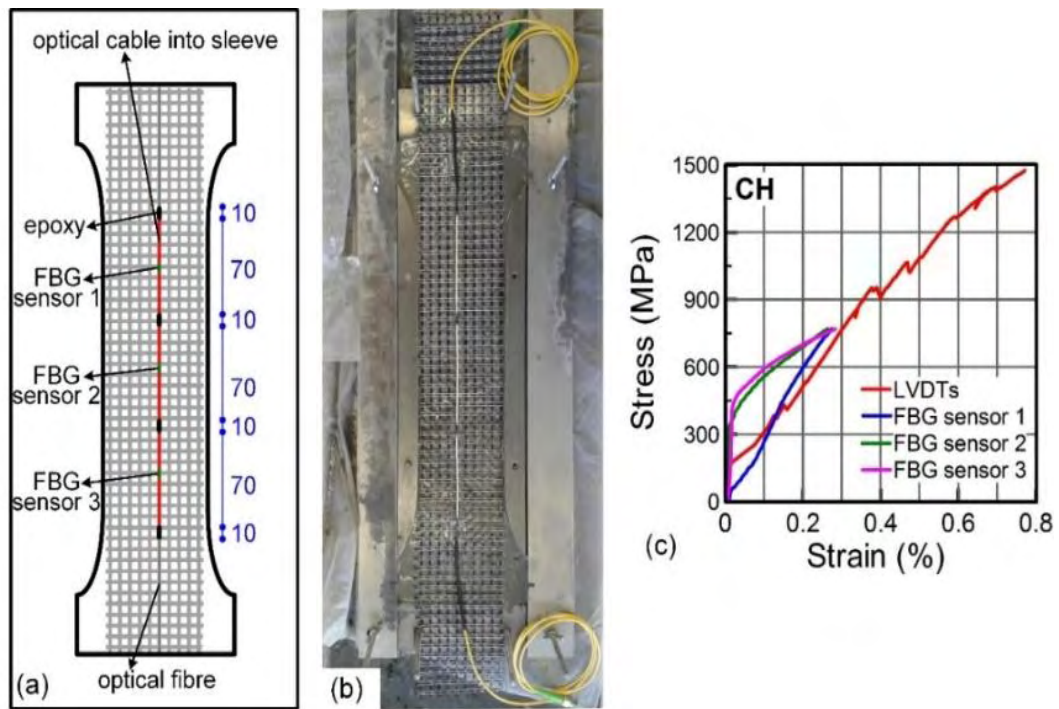
Το SHM (SHM = Structural Health Monitoring, δηλαδή παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας) αποτελεί ένα σχετικά νέο επιστημονικό πεδίο που στοχεύει στην παροχή αξιόπιστων δεδομένων σχετικά με τη στατική και δυναμική απόκριση μιας δομής. Μια ποικιλία διαφορετικών οπτικών αισθητήρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την συστηματική παρακολούθηση πειραματικών δοκιμών, παρέχοντας δεδομένα σχετικά με τη στατική ή δυναμική απόκριση κατά την εφαρμογή διαφόρων φορτίων. Το SHM προσφέρει τη δυνατότητα «συνεχούς διάγνωσης» μιας δομής καθώς και τον προσδιορισμό των πιθανών τρόπων αστοχίας. Τα FGP (Optical Fibre Bragg Grating _FBG, δηλαδή αισθητήρες οπτικών ινών) έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε ολόκληρο τον κόσμο, στο πεδίο οργάνωσης και παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τη χρήση

αισθητήρων οπτικών ινών FBG μπορούν να βρεθούν στο Tsamasphyros et al. 2003 και Majumder et al. 2008.

Το SHM πάνω σε εφαρμογές των IAM αποτελεί ένα ενδιαφέρον επιστημονικό πεδίο. Χρήσιμες πληροφορίες και αξιόπιστα δεδομένα σχετικά με το προφίλ τάσεων - παραμορφώσεων των δομών ΟΣ με IAM μπορούν να συγκεντρωθούν χρησιμοποιώντας οπτικούς αισθητήρες FBG.

Σε αυτό το σημείο, διερευνήθηκε η χρήση οπτικών αισθητήρων FBG σε ένα δοκίμιο IAM, το οποίο είχε μία μονό στρώση ινοπλέγματος από ίνες ελαφρύ άνθρακα CL. Συγκεκριμένα, τρεις οπτικοί αισθητήρες FBG προσαρτήθηκαν στους κεντρικούς κλώνους ινών του ινοπλέγματος κατά μήκος του δοκιμίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.13α. Η παρασκευή του δοκιμίου IAM πραγματοποιήθηκε προσέχτηκα (Σχήμα 5.13β), καθώς οι οπτικές ίνες είναι πολύ ευαίσθητες και είναι εύκολο να υποστούν βλάβη, εκ λάθους, κατά τη διάρκεια της σκυροδέτησης του δοκιμίου IAM. Οι αισθητήρες FBG συνδέονταν με σύστημα interrogator CEM-5000. Η εταιρεία CEM ανέλαβε την εφαρμογή, τη λειτουργία και την καταγραφή δεδομένων των αισθητήρων FBG. Επίσης, η επιμήκυνση του μήκους του δοκιμίου μετρήθηκε χρησιμοποιώντας δύο LVDTs, όπως και σε όλα τα δοκίμια IAM που εξετάστηκαν μέχρι τώρα και παρουσιάζονται στις παραπάνω παραγράφους (βλ. Σχήμα 5.3α).

Στο σχήμα 5.9γ παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης και των τριών οπτικών αισθητήρων FBG και συγκρίνονται με την αντίστοιχη μέση απόκριση που λήφθηκε από τα δύο LVDTs. Με βάση τα αποτελέσματα του Σχήματος 5.13γ, πρώτα παραμορφώνεται το κεντρικό τμήμα του ινοπλέγματος (αισθητήρας FBG 2), ενώ τα δύο άκρα του ινοπλέγματος (αισθητήρες FBG 1 και 3) κατά μήκος του μετρητή δεν παραμορφώνονται στην αρχή. Γενικά, τα δύο άκρα του ινοπλέγματος παραμορφώνονται συμμετρικά με βάση τα αποτελέσματα των αισθητήρων FBG 1 και 3. Η απόκριση του αισθητήρα FBG 2, ο οποίος ήταν συνδεδεμένος στο κέντρο του δοκιμίου (Σχήμα 5.13α), ήταν αρκετά σύμφωνη με την μέση απόκριση των δύο LVDTs και κυρίως μετά την ανάπτυξη ρηγμάτωσης του δοκιμίου IAM (μετά από 300 kN). Η θραύση των οπτικών ινών επήλθε σε τιμή παραμόρφωσης ίση με 0,3% και επομένως οι αισθητήρες FBG σταμάτησαν την καταγραφή μετά από αυτήν την τιμή της παραμόρφωσης. Η τελική παραμόρφωση των οπτικών ινών (0,3%) είναι μικρότερη από την τελική παραμόρφωση του ινοπλέγματος (0,8%). Ωστόσο, αυτές οι τιμές παραμόρφωσης αναμένονται στα συστήματα IAM όταν εφαρμόζονται για την ενίσχυση υφιστάμενων κτιρίων σε συνθήκες φόρτισης με βάση τη λειτουργικότητά τους. Έτσι, η χρήση των οπτικών ινών φαίνεται αρκετά ενδιαφέρουσα και θα μπορούσε να διερευνηθεί περαιτέρω σε μελλοντικές έρευνες.



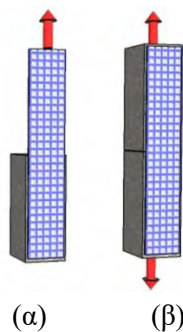
Σχήμα 5.9. (α) Διαμόρφωση αισθητήρων FBG, (β) προετοιμασία δοκιμίου IAM· (γ) καμπύλες τάσης έναντι παραμόρφωσης. (Tetta, 2017)

6. ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΜΕΤΑΞΥ ΙΑΜ ΚΑΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

6.1 Σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η μελέτη της συνάφειας μεταξύ του ΙΑΜ και του υποστρώματος από σκυρόδεμα είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς έτσι καθορίζεται η αποτελεσματικότητα των ΙΑΜ ως σύνθετο υλικό ενίσχυσης. Η επικάλυψη ή μη του ινοπλέγματος με ρητίνη, η γεωμετρία των κλώνων ινών του ινοπλέγματος, ο βαθμός εμποτισμού των ινών με κονίαμα και η ποιότητα προετοιμασίας της επιφάνειας του υποστρώματος σκυροδέματος, είναι οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν τη συνάφεια μεταξύ του ΙΑΜ και του υποστρώματος από σκυρόδεμα.

Η συνάφεια του ΙΑΜ με το σκυρόδεμα έχει ερευνηθεί, κυρίως των μέσω δοκιμών Single-lap [Σχήμα 6.1α] και Double-lap [Σχήμα 6.1β], όπως αναγράφονται στη διεθνή ορολογία, και η ενδεικτική διάταξή τους παρουσιάζεται στο σχήμα 6.1. Στις δοκιμές διάτμησης



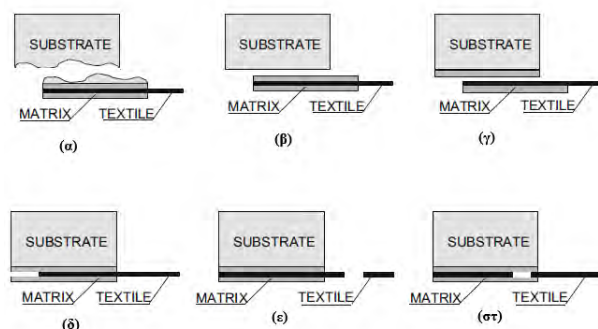
Σχήμα 6.1 Διάταξη δοκιμών άμεσης συνάφειας (α) Single-lap και (β) Double-lap για τη μελέτη της συνάφειας μεταξύ ΙΑΜ και υποστρώματος από σκυρόδεμα. (Lampros N. Koutas¹; Zoi Tetta²; e.a.P.E., M.ASCE⁴)

της διάταξης Single-lap, μια λωρίδα ενός σύνθετου στοιχείου ΙΑΜ είναι εξωτερικά συνδεδεμένη στη μια πλευρά ενός τμήματος σκυροδέματος, και στη συνέχεια ένα εφελκυστικό φορτίο εφαρμόζεται απευθείας στην λωρίδα του στοιχείου ΙΑΜ, ενώ το τμήμα του σκυροδέματος παραμένει σταθερό (Sneed κ.ά., 2014, Carloni et al., 2015, D'Antino et al., 2015, Sneed et al., 2015, D'Antino et al., 2016a, c, Carloni et al., 2017, Sabau κ.ά., 2017). Στις δοκιμές διάτμησης Double-lap, μια λωρίδα ενός σύνθετου ΙΑΜ είναι ολόκληρη εξωτερικά συνδεδεμένη σε δύο απέναντι πλευρές δύο πρισμάτων σκυροδέματος, τα οποία συνδέονται μόνο με τις λωρίδες ΙΑΜ, και στη συνέχεια τα μέρη του σκυροδέματος υποβάλλονται σε εφελκυστική καταπόνηση (διαχωρισμό) μέχρι την αστοχία του ΙΑΜ, όπως φαίνεται στο σχήμα

6.1 β (Ortlepp et al., 2006, D'Ambrisi et al., 2012, Awani et al. 2015; Οι Raoof κ.ά. 2016; Raoof και Bournas 2017c).

Ο Sneed et al. (2015) σύγκρινε τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές άμεσης διάτμησης Single-lap και Double-lap. Με βάση τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης, οι καμπύλες φορτίου - μετατόπισης καθώς και οι τρόποι αστοχίας που λήφθηκαν και από τις δύο διατάξεις δοκιμών ήταν πανομοιότυποι. Ωστόσο, οι δοκιμές διάτμησης Single-lap παρουσίασαν κάποια μειονεκτήματα σε σύγκριση με τις δοκιμές διάτμησης Double-lap. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από τις δοκιμές διάτμησης Double-lap ήταν λιγότερο διάσπαρτα σε σύγκριση με αυτές που προέκυψαν από δοκιμές διάτμησης Single-lap, ενώ σε μερικές δοκιμές διάτμησης Single-lap παρατηρήθηκε θραύση του IAM εκτός του μήκους συνάφειας (δεσμευμένου μήκους).

Η πλειονότητα των μελετών έχουν διερευνήσει τη συνάφεια μεταξύ του PBO IAM και του υποστρώματος από σκυροδέμα. Η συνάφεια μεταξύ των IAM από ίνες άνθρακα και του σκυροδέματος έχει επίσης μελετηθεί από αρκετούς ερευνητές, αλλά οι μελέτες σχετικά με τη συνάφεια μεταξύ των IAM από ίνες υάλου ή χάλυβα και σκυροδέματος είναι αρκετά περιορισμένες. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.2, οι τρόποι αστοχίας που έχουν παρατηρηθεί σε δοκιμές συνάφειας είναι: (α) αποκόλληση του IAM με τμήμα σκυροδέματος, (β) αποκόλληση του IAM στη διεπιφάνεια σκυροδέματος-κονιάματος, (γ) αποκόλληση του IAM στη διεπιφάνεια πλέγματος ιών-κονιάματος, (δ) ολίσθηση των ιών μέσα από το κονίαμα, (ε) θραύση του πλέγματος των IAM εκτός του δεσμευμένου μήκους και (στ) θραύση του του πλέγματος των IAM εντός του δεσμευμένου μήκους. (Σχήμα 6.2 α-στ).



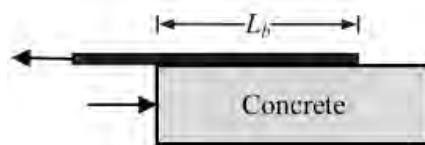
Σχήμα 6.2 Τρόποι αστοχίας που έχουν παρατηρηθεί σε δοκιμές συνάφειας μεταξύ IAM και σκυροδέματος.

Σημειώνεται, ότι στις περισσότερες μελέτες, τα δοκίμια αστόχησαν λόγω ολίσθησης των ιών μέσα από το κονίαμα, ενώ η θραύση των λωρίδων IAM παρατηρήθηκε κυρίως στην περίπτωση IAM από ίνες υάλινων.

Οι κύριες παράμετροι που έχουν εξετασθεί για τη μελέτη της συνάφειας μεταξύ του IAM και του σκυροδέματος είναι: (α) το μήκος συνάφειας του IAM, (β) το πλάτος των στοιχείων IAM, (γ) ο αριθμός των στρώσεων του IAM, (δ) η προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος, (ε) ρυθμός φόρτισης και μέθοδος ελέγχου μετατόπισης και (στ) η επιρροή της θερμοκρασίας. Μια αναλυτικότερη περιγραφή των παραμέτρων δίνεται στη συνέχεια.

α. Μήκος συνάφειας των IAM

Η επίδραση του μήκος συνάφειας ήταν μια παράμετρος που ερευνήθηκε στις περισσότερες μελέτες (D'Ambrisi et al., 2012, D'Antino et al., 2013, 2014, Sneed et al. 2014; Tran et al. 2014; Οι Awani et al. 2015; D'Antino et al. 2015; Ombres 2015a; Sneed et al. 2015; D'Antino et al. 2016a; Raoof et al. 2016; Sabau et al. 2017). Το τελικό συμπέρασμα ήταν ότι αυξάνοντας το μήκος συνάφειας, το φορτίο αστοχίας και η αντοχή συνάφειας αυξάνονται με μη αναλογικό τρόπο. Όμως, μετά από ένα ορισμένο μήκος συνάφειας (για οποιονδήποτε αριθμό στρώσεων), παρατηρήθηκε ότι η αντοχή συνάφειας αυξάνεται οριακά. Μάλιστα, αυτή η συμπεριφορά ήταν παρόμοια με τη συμπεριφορά συνάφειας των λωρίδων FRP (ΙΟΠ), που μετά από ένα ορισμένο μήκος συνάφειας, η αντοχή συνάφειας έτεινε να φθάσει σε μια σταθερή τιμή, η οποία θεωρήθηκε ως η μέγιστη αντοχή συνάφειας. Αυτό το μήκος ονομάζεται "ενεργό μήκος συνάφειας" (L_{eff}). Με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στις προαναφερθείσες μελέτες, το ενεργό μήκος συνάφειας για το IAM από ίνες PBO με μέγεθος πλέγματος 10×15 mm, και ονομαστικό πάχος και 0.045 mm, βρίσκεται μεταξύ 250 και 350 mm, ενώ η αντίστοιχη τιμή του IAM από ίνες άνθρακα, μέγεθος πλέγματος 10×10 mm και ονομαστικό πάχος 0.095 mm, αντίστοιχα, ήταν μεταξύ 200 και 300 mm.



Σχήμα 6.3 Εποπτική κατανόηση της έννοιας του μήκος συνάφειας (L_b). (Raoof, 2017)

β. Πλάτος στοιχείων IAM

Η επίδραση του πλάτους των λωρίδων PBO TRM έχει επίσης διερευνηθεί από διάφορους ερευνητές (D'Antino et al., 2013, 2014, Sneed et al. 2014; D'Antino et al. 2015; Sneed et al. 2015), οι οποίοι έφτασαν το συμπέρασμα ότι το πλάτος των λωρίδων IAM δεν επιφέρει καμία επίδραση στις πτυχές συνάφειας μεταξύ IAM και υποστρώματος σκυροδέματος.

γ. Αριθμός των στρώσεων IAM

Οι D'Ambrisi et al. (2012), Ombres (2015) και Raoof et al. (2016) διερεύνησαν την επίδραση του αριθμού των στρώσεων, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η αύξηση του αριθμού των στρώσεων των IAM έχει ως αποτέλεσμα τη μη αναλογική αύξηση της ικανότητας συνάφειας. Επιπλέον, η αύξηση του αριθμού των στρώσεων IAM έχει ως συνέπεια τη μεταβολή του τρόπου αστοχίας από ολίσθηση των ινών μέσα από το κονίαμα σε αποκόλληση των στρωμάτων IAM με μέρος του σκυροδέματος. Αυτή η αλλαγή στον τρόπο αστοχίας εμφανίστηκε όταν ο αριθμός των στρώσεων PBO αυξήθηκε από έναν σε δύο (D'Ambrisi et al., 2012; Ombres 2015a) καθώς επίσης, παρατηρήθηκε σε λωρίδες IAM από ίνες άνθρακα όταν εφαρμόστηκαν τρία στρώματα αντί για δύο.

δ. Προετοιμασία της επιφάνειας του υποστρώματος σκυροδέματος

Η προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος ήταν επίσης μια παράμετρος υπό έρευνα. Ο D'Antino et al. (2015) σύγκρινε επιφάνειες από σκυροδέμα που δεν έχουν υποστεί επεξεργασία με επιφάνειες σκυροδέματος που προετοιμάστηκαν με αμμοβολή, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η προετοιμασία της επιφάνειας υποστρώματος έχει περιορισμένο ρόλο στην αποτελεσματικότητα συνάφειας μεταξύ IAM- σκυροδέματος, καθώς τα αντίστοιχα δοκίμια στη μελέτη αυτή αστόχησαν λόγω της ολίσθησης των ινών μέσα από το κονίαμα.

ε. Ρυθμός φόρτισης και μέθοδος ελέγχου μετατόπισης

Ο Carloni et al. (2017) μελέτησε την επιρροή του ρυθμού φόρτισης (η οποία κυμαινόταν από 0.00042 έως 0.0126 mm/s) και τη μέθοδο ελέγχου μετατόπισης [Γραμμικός Μεταβλητός Διαφορικός Μετασχηματιστής (LVDT)]. Με βάση τα αποτελέσματά, ο ρυθμός φόρτισης επηρέασε το τελικό φορτίο των δοκιμίων, ενώ ο τύπος ελέγχου μετατόπισης επηρέασε την αρχική δυσκαμψία και το φορτίο αιχμής για ορισμένους ρυθμούς φόρτισης.

Επιπλέον, οι Ortlepp et al. (2006), D'Ambrisi et al. (2012) και ο Focacci et al. (2017) χρησιμοποίησαν τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές συνάφειας για τη βαθμονόμηση της τοπικής σχέσης συνάφειας -ολίσθησης, η οποία είναι σημαντική για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των ενισχυμένων δομικών στοιχείων RC. Το προτεινόμενο μοντέλο παρείχε αξιόπιστα αποτελέσματα. Ωστόσο, θα έπρεπε να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα που λαμβάνονται ισχύουν μόνο για τους συγκεκριμένους τύπους κονιάματος και ινών που ελέγχθηκαν.

στ. Επιρροή της θερμοκρασία

Οι Raoof και Bournas (2017) διερεύνησαν τη συνάφεια μεταξύ IAM ή ΙΟΠ και του υποστρώματος σκυρόδεματος σε υψηλές θερμοκρασίες με τη διεξαγωγή άμεσων δοκιμών διάτμησης διάταξης Double-lap. Τόσο τα δοκίμια ΙΟΠ όσο και IAM δοκιμάστηκαν στους 20 ° C, 50 ° C, 75 ° C, 100 ° C και 150 ° C, και επιπλέον τα δοκίμια IAM δοκιμάστηκαν στους 200 ° C, 300 ° C, 400 ° C, και στους 500 ° C. Βάση των αποτελεσμάτων των παραπάνω εργασιών, η ικανότητα συνάφειας του IAM είναι αρκετά ισχυρή σε υψηλές θερμοκρασίες. Συγκρίνοντας τα, η ικανότητα συνάφειας του ΙΟΠ μειώθηκε δραματικά μετά την έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες, αλλά η ικανότητα συνάφειας του IAM επηρεάστηκε ελάχιστα από τις υψηλές θερμοκρασίες.

6.1 Περίληψη διαθέσιμου πειράματος

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζεται το διαθέσιμο πείραμα το οποίο διεξήχθη από τον Raouf S. Mahmood (2017), *Bond between Textile Reinforced Mortar (TRM) and Concrete Substrate*, στα πλαίσια της Διατριβής Διδακτορικού Διπλώματος, University of Nottingham, με σκοπό την διερεύνηση της συμπεριφοράς της συνάφειας μεταξύ IAM και υποστρώματος από σκυρόδεμα. Οι επιμέρους παράμετροι που ερευνήθηκαν ήταν: (α) το μήκος της συνάφειας (από 50 mm έως 450 mm) · (β) ο αριθμός των στρώσεων IAM (από 1 έως 4) · (γ) η προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος (ήπια εκτράχυνση ή αμμοβολή) · (δ) η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος (15 ή 30 MPa) · (ε) η επικάλυψη ή μη του ινοπλέγματος και (στ) η αγκύρωση μέσω περιτύλιξης με κλειστό μανδύα IAM (TRM jackets). Κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν συνολικά 80 δοκίμια σε δοκιμή διάτμησης της διάταξης Double-lap. Τα κύρια συμπεράσματα που συνήχθησαν ήταν ότι :α) μετά από ένα ορισμένο μήκος συνάφειας (μεταξύ 200 mm και 300 mm) για οποιοδήποτε αριθμό στρώσεων, η αντοχή της συνάφειας αυξάνεται οριακά, (β) αυξάνοντας τον αριθμό των στρώσεων, η ικανότητα συνάφειας αυξάνεται με τρόπο μη αναλογικό, ενώ ο τρόπος αστοχίας μεταβάλλεται, γ) η αμμοβολή του σκυροδέματος είναι ισοδύναμη με την ήπια εκτράχυνσή, όσον αφορά την ικανότητα συνάφειας και τον τρόπο αστοχίας, δ) η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος έχει πολύ μικρή επίδραση στην αντοχή συνάφειας · (ε) η χρήση ινοπλεγμάτων επικαλυμμένων με ρητίνη μεταβάλλει τον τρόπο αστοχίας και αυξάνει σημαντικά την δύναμη συνάφειας και (στ) η αγκύρωση μέσω περιτύλιξης με κλειστούς μανδύες IAM , αυξάνει ουσιαστικά το φορτίο αστοχίας.

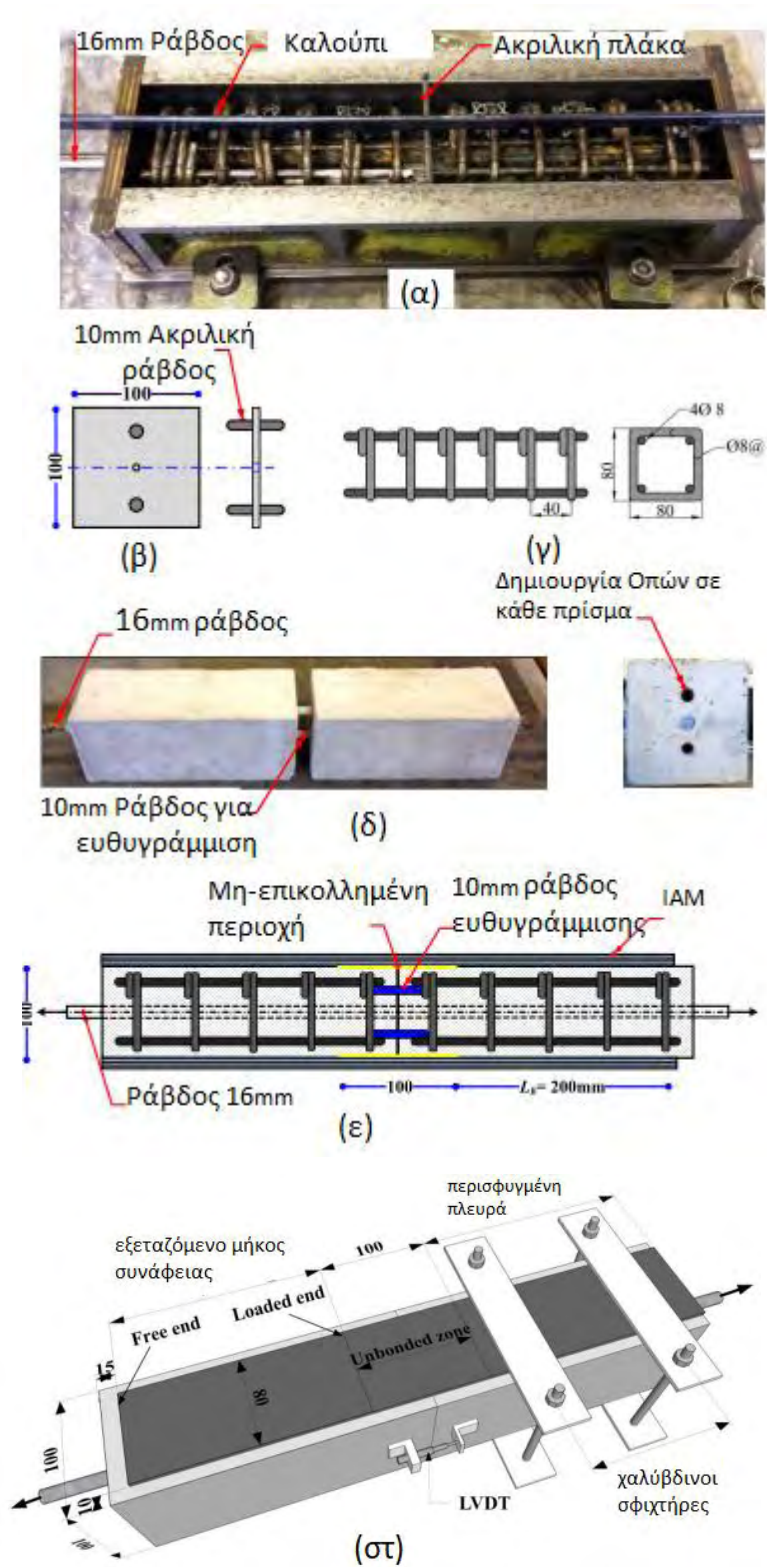
** Το περιεχόμενο αυτού του έργου έχει δημοσιευθεί σε περιοδικό ως : “Bond between textile- reinforced mortar (TRM) and concrete substrates: Experimental investigation”, Composites Part B: Engineering. 2016, 1;98:350-361;DOI:10. 1016/j. Compositesb .2016.05.041. (“Συνάφεια μεταξύ Ινοπλεγμάτων σε Ανόργανη Μήτρα (IAM) και υποστρώματος από σκυρόδεμα : Πειραματική έρευνα”)*

6.2 Περιγραφή πειραματικού προγράμματος

6.3.1. Δοκίμια και παράμετροι υπό διερεύνηση

Ο κύριος στόχος αυτού του πειράματος ήταν η διερεύνηση της συνάφειας μεταξύ του IAM και του υποστρώματος από σκυρόδεμα, λαμβάνοντας υπόψη διάφορες παραμέτρους. Το επιστημονικό πρότυπο με βάση το οποίο πραγματοποιήθηκε η δοκιμή συνάφειας εξωτερικά επικολλημένων λωρίδων IAM με υπόστρωμα σκυροδέματος ήταν το Double-lap. Συνολικά 80 δοκίμια κατασκευάστηκαν, ενισχύθηκαν και υποβλήθηκαν σε δοκιμή διάτμησης συνάφειας της διάταξης Double-lap. Οι λεπτομέρειες των δοκιμίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.4α-στ. Κάθε δοκίμιο αποτελούνταν από δύο πρίσματα ΟΣ, με εμβαδόν διατομής 100x100mm και μήκος 265, ή 515, ανάλογα με το εξεταζόμενο μήκος συνάφειας.

Η διαδικασία για την κατασκευή του δοκιμίου είχε ως εξής: μια ακρυλική πλάκα (acrylic plate) με διαστάσεις διατομής 100x100mm, στερεώθηκε στη μέση ενός μεταλλικού καλουπιού (Σχήμα 6.4α), προκειμένου να απομονωθούν τα δύο πρίσματα κατά τη διάρκεια του σταδίου σκυροδέτησης. Η ακρυλική πλάκα εφοδιάστηκε με δύο ακρυλικές ράβδους (acrylic rods) διαμέτρου 10mm, σταθερές στη θέση που φαίνεται στο σχήμα 6.4β, προκειμένου να δημιουργηθούν οπές στη μάζα σκυροδέματος του κάθε πρίσματος. Στη συνέχεια, κάθε πρίσμα ενισχύθηκε με ένα χαλύβδινο οπλισμό, με τις λεπτομέρειες που φαίνονται στο Σχήμα 6.3γ, για την αποτροπή της αστοχίας των πρισμάτων λόγω θραύσης του σκυροδέματος κατά τη διάρκεια της πειραματικής δοκιμής. Ακολούθως, μία ράβδος των 16 mm τοποθετήθηκε στο κέντρο του κάθε πρίσματος, με σκοπό την εφαρμογή του φορτίου κατά τη διάρκεια της πειραματικής δοκιμής (Σχήμα 6.3 δ). Μετά από 24 ώρες, το δοκίμιο (τα δύο πρίσματα) αφαιρέθηκε από το καλούπι, η ακρυλική πλάκα αφαιρέθηκε από την κεντρική ζώνη, και τα δύο πρίσματα επανασυνδέθηκαν το ένα με το άλλο με τις ακρυλικές ράβδους διαμέτρου 10mm που εισήχθησαν στις οπές, οι οποίες είχαν δημιουργηθεί κατά το αρχικό στάδιο της κατασκευής (βλ. Σχήμα 6.3δ). Ο σκοπός των δύο αυτών ακρυλικών ράβδων ήταν να εξασφαλιστεί η πλήρης ευθυγράμμιση μεταξύ των δύο πρισμάτων ώστε να αποφευχθεί το σφάλμα στις μετρήσεις κατά τη διάρκεια του πειράματος, που θα προέκυπτε από την πιθανή κάμψη του δοκιμίου εξαιτίας της κακής ευθυγράμμισης μεταξύ των δύο πρισμάτων. Τέλος, περισσότερες λεπτομέρειες σχεδιασμού των δοκιμίων και της τρισδιάστατης επισκόπησης, απεικονίζονται στο σχήμα 6.3ε και στ, αντίστοιχα.



Σχήμα 6.4 Λεπτομέρειες δοκιμίου: α) Κατασκευή του δοκιμίου· β) λεπτομέρειες της ακρυλικής πλάκας· γ) λεπτομέρειες της εσωτερικής ενίσχυσης, δ) λεπτομέρειες της ευθυγράμμισης των πρισμάτων· ε) συνολικές λεπτομέρειες σχεδιασμού του δοκιμίου· και στ) τρισδιάστατη απεικόνιση (Διαστάσεις σε mm). (Raouf, 2017)

Οι κύριες ερευνηθείσες παράμετροι ήταν: (α) το μήκος συνάφειας, (β) ο αριθμός των στρώσεων IAM, (γ) η προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος, (δ) η θλιπτική αντοχή σκυροδέματος, (ε) η επικάλυψη ή μη του ινοπλέγματος με ρητίνη, και (στ) η αγκύρωση μέσω περιτύλιξης με κλειστούς μανδύες IAM (TRM jackets).

Τα 80 δοκίμια που εξετάστηκαν σε αυτή την πειραματική μελέτη αποτελούνταν από 40 πανομοιότυπα (δίδυμα) δοκίμια. Από τα 40 αυτά δίδυμα δοκίμια, τα 22 δίδυμα δοκίμια (δηλαδή 44 δοκίμια συνολικά) χρησιμοποιήθηκαν για να εξεταστούν οι παράμετροι (α) και (β), με το μήκος συνάφειας να κυμαίνεται από 50 έως 450 mm και ο αριθμός των στρώσεων από ένα έως τέσσερα. Έξι δίδυμα δοκίμια εξετάστηκαν για να ερευνηθεί η παράμετρος (γ), δηλαδή η επίδραση της προετοιμασίας της επιφάνειας του σκυροδέματος (ήπια εκτράχυνση ή αμμοβολή), ενώ άλλα έξι δίδυμα δοκίμια εξετάστηκαν για να εκτιμηθεί η επίδραση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος (15 ή 30 MPa) στην απόκριση της συνάφειας και του τρόπου αστοχίας [παράμετρος (δ)]. Τέσσερα δίδυμα δοκίμια δοκιμάστηκαν για να εξετασθεί η επίδραση του ινοπλέγματος επικαλυμμένου με ρητίνη στο φορτίο αστοχίας και στον τρόπο αστοχίας [παράμετρος (ε)], και δύο πανομοιότυπα δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν για να ερευνηθεί η επίδραση της αγκύρωσης μέσω περιτύλιξης με κλειστούς μανδύες IAM (TRM jackets) [παράμετρος (στ)]. Ο συμβολισμός LX_N που αναγράφεται στα δοκίμια αναφέρεται στις παραμέτρους (α) και (β), με το X να δηλώνει το μήκος συνάφειας (Bond length) και το N τον αριθμό των στρώσεων των IAM (No of layers). Όσον αφορά τα υπόλοιπα δοκίμια, ο συμβολισμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν LX_N_Y, με το Y να υποδηλώνει μία από τις εξής εξεταζόμενες παράμετρος:

- S : την προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος
- L_s : την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος
- CCo : τα ινοπλέγματα επικαλυμμένα με ρητίνη και
- W : την περιτύλιξη IAM.

Λεπτομέρειες για τις διάφορες διαμορφώσεις ενίσχυσης και του αριθμού των εξεταζόμενων δοκιμίων για κάθε παράμετρο παρατίθενται στον πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1. Λεπτομέρειες των δοκιμών, θλιπτική αντοχή σκυροδέματος και ιδιότητες του κονιάματος την ημέρα της πειραματικής δοκιμής. (Raouf, 2017)

Συμβολισμός Δοκιμών	Όνομα δοκιμίου	Μήκος Συνάφειας	Αριθμός Στρώσ.	Πρόσθετοι Παράμετροι	Αντοχή Σκυροδέματος (MPa)	Κονίαμα (MPa)	
						Εφελκυστική αντοχή	Θλιπτική αντοχή
LX_N	L50_1	50	1	-	31.2	9,17	38.8
	L50_2		2				
	L50_3		3				
	L50_4		4				
	L100_1	100	1	-	30.4	8.24	33.8
	L100_2		2				
	L100_3		3				
	L100_4		4				
	L150_1	150	1	-	31.2	9,23	39.7
	L150_2		2				
	L150_3		3				
	L150_4		4				
	L200_1	200	1	-	32.8	8,54	35,9
	L200_2		2				
	L200_3		3				
	L200_4		4				
	L250_1	250	1	-	32.5	8,95	37,6
	L250_2		2				
	L250_3		3				
	L250_4		4				
L450_1	450	1	-	29.5	9,4	40,1	
L450_2		2					
LX_N_S	L100_3_S	100,	3	S= Προετοιμασία Επιφάνειας	29,3	8,68	36,8
	L100_4_S		4				
	L150_3_S		3				
	L150_4_S		4				
	L200_3_S		3				
	L200_4_S		4				
LX_N_Ls	L100_3_Ls	100,	3	Ls= Αντοχή Σκυροδέματος	14,7	8,98	35,2
	L100_4_Ls		4				
	L150_3_Ls		3				
	L150_4_Ls		4				
	L200_3_Ls		3				
	L200_4_Ls		4				
LX_N_CCo	L150_1_CCo	150,	1	CCo= Επικάλυψη ινοπλέγματος	30,4	8,35	32,7
	L150_2_CCo		2				
	L200_1_CCo		1				
	L200_2_CCo		2				
LX_N_W	L100_3_W	100	3	W= Αγκύρωση μέσω περιτύλιξης με		8,35	32,7
	L100_4_W		4				

6.3.2 Υλικά και διαδικασία ενίσχυσης

Τα πρίσματα ΟΣ σκυροδετήθηκαν σε διαφορετικές ομάδες και ημερομηνίες. Για όλα τα εξεταζόμενα δοκίμια, η στοχευμένη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ήταν 30 MPa, εκτός από την ομάδα LN_X_Ls (δώδεκα δοκίμια), που η στοχευμένη θλιπτική αντοχή ήταν χαμηλότερη και ίση με 15 MPa. Η θλιπτική αντοχή όλων των δοκιμών μετρήθηκε την ημέρα της πειραματικής δοκιμής (μέση τιμή τριών κύβων διαστάσεων: 150x150x150 mm) και δίνεται στον Πίνακα 6.1.

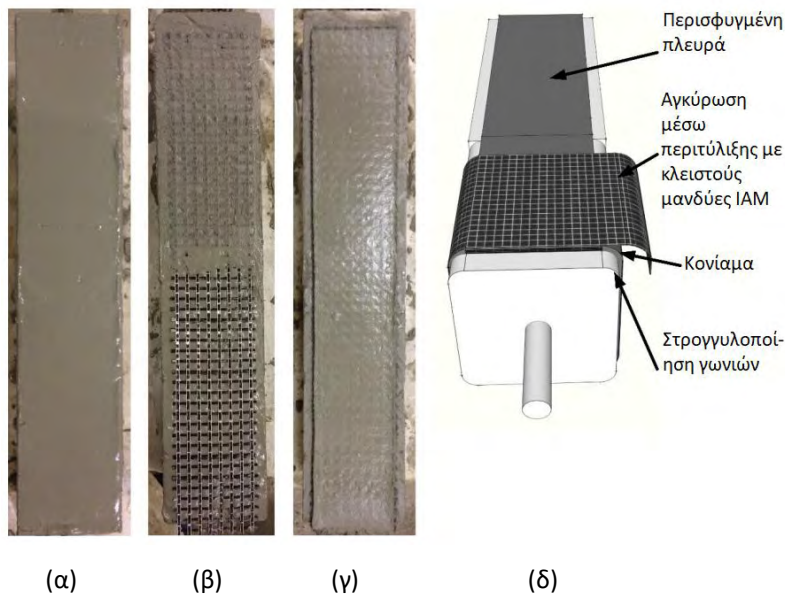
Το πλέγμα ινών που χρησιμοποιήθηκε στην ενίσχυση αποτελούνταν από ίνες βαρύτερου άνθρακα (CH), όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 4.2. Το συνδετικό υλικό (μήτρα) από το οποίο αποτελούνταν το ανόργανο τσιμεντοκονίαμα περιγράφηκε στην Ενότητα 5.2. Η θλιπτική και καμπτική αντοχή του κονιάματος (μέση τιμή 3 πρισμάτων) λήφθηκε πειραματικά την ημέρα της δοκιμής χρησιμοποιώντας πρίσματα διαστάσεων 40x40x160 mm, σύμφωνα με το BS EN 1015-11 (1999) και αναγράφονται στον Πίνακα 6.1.

Πρώτου αρχίσει η διαδικασία της ενίσχυσης, η επιφάνεια του υποστρώματος προετοιμάστηκε χρησιμοποιώντας τροχό, δημιουργώντας έναν κάναβο αυλακώσεων (με βάθος περίπου 3mm) όπως φαίνεται στο σχήμα 6.5. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιήθηκε για όλα τα δοκίμια, εκτός από εκείνα της ομάδας LX_N_S, που η επιφάνεια του σκυροδέματος προετοιμάστηκε με αμμοβολή (Σχήμα 6.5β). Μετά τον καθαρισμό και την διαβροχή (διαδικασία υγροποίησης) της επιφάνειας του σκυροδέματος, τοποθετήθηκε η πρώτη στρώση κονιάματος, πάχους περίπου 2 mm, χρησιμοποιώντας μια μεταλλική σπάτουλα (Σχήμα 6.6α). Ακολούθως, εφαρμόστηκε η πρώτη στρώση ινοπλέγματος, η οποία πιέστηκε ελαφρά μέσα στο κονίαμα, προκειμένου να επιτευχθεί η μηχανική εμπλοκή κονιάματος-πλέγματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.6β. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε μέχρις ότου εφαρμόστηκε ο απαιτούμενος αριθμός των στρώσεων IAM. Τέλος, εφαρμόστηκε μια εξωτερική στρώση κονιάματος, πάχους περίπου 3mm και απλώθηκε με μία σπάτουλα (Σχήμα 6.6γ). Βασική σημασία της μεθόδου αυτής ήταν η εφαρμογή κάθε στρώσης κονιάματος, όταν η προηγούμενη βρισκόταν ακόμα σε νωπή κατάσταση.

Τα δοκίμια της ομάδας LX_N_CCo ενισχύθηκαν επίσης με ινόπλεγμα από ίνες βαρύτερου άνθρακα (CH), όπως περιγράφηκε στην ενότητα 4.2, το οποίο όμως ήταν επικαλυμμένο με ρητίνη. Όσον αφορά τα δοκίμια που έλαβαν περιτύλιξη, δηλαδή ο κύριος οπλισμός IAM αγκυρώθηκε μέσω περιτύλιξης με κλειστούς μανδύες IAM (TRM jackets) περιτυλιγμένους γύρω από το πρίσμα σκυροδέματος (ομάδα LX_N_W), πραγματοποιήθηκε επιπρόσθετη προετοιμασία της επιφάνειας πριν από την ενίσχυση, η οποία συμπεριλάμβανε την στρογγυλοποίηση των γωνιών του πρίσματος σε ακτίνα 10 mm. Μετά την εφαρμογή του απαιτούμενου αριθμού των κύριων στρώσεων IAM, η εξεταζόμενη πλευρά του πρίσματος περιτυλίχθηκε με δύο στρώσεις IAM, ακολουθώντας την διαδικασία ενίσχυσης που περιγράφηκε προηγουμένως. Το πλάτος του ινοπλέγματος που χρησιμοποιήθηκε για την περιτύλιξη ήταν 100 mm, το οποίο ήταν ίσο με το μήκος συνάφειας του κύριου οπλισμού IAM (Σχήμα 6.6δ). Αξίζει να σημειωθεί ότι το πλάτος συνάφειας του οπλισμού IAM για όλα τα εξεταζόμενα δοκίμια ήταν το ίδιο και ίσο με 80 mm.



Σχήμα 6.5 Τρόποι προετοιμασίας της επιφάνειας σκυροδέματος: (α) ήπια εκτράχυνση και δημιουργία πλέγματος αυλακώσεων, και (β) αμμοβολή. (Raouf, 2017)

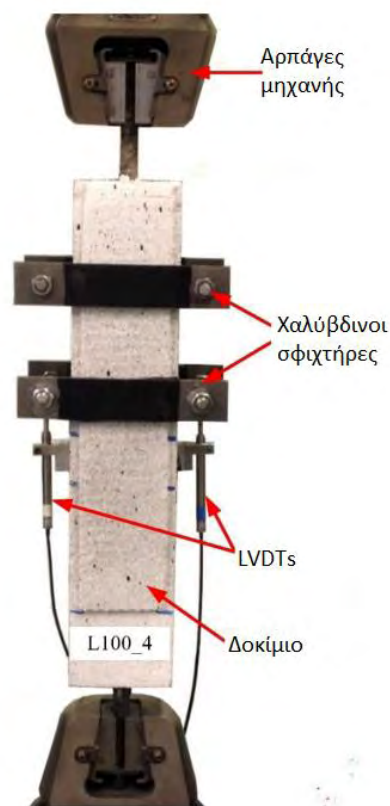


Σχήμα 6.6 (α) Εφαρμογή της πρώτης στρώση κονιάματος· (β) εφαρμογή της πρώτης στρώσης ινοπλέγματος μέσα στο κονίαμα· (γ) εφαρμογή της τελικής στρώση κονιάματος και (δ) περιτύλιξη με μανδύα IAM στην πλευρά του υπό εξέταση δοκιμίου της ομάδας LN_X_W. (Raouf, 2017)

6.3.3 Πειραματική διάταξη και διαδικασία

Όλα τα δοκίμια εξετάστηκαν μετά από μια περίοδο σκλήρυνσης έξι εβδομάδων (οι ίδιες συνθήκες σκλήρυνσης εφαρμόστηκαν σε όλα τα δοκίμια). Στην παρούσα μελέτη υιοθετήθηκε η δοκιμή διάτμησης διάταξης Double-lap. Η πειραματική διάταξη περιελάμβανε δύο χαλύβδινους σφιγκτήρες, οι οποίοι ήταν στερεωμένοι στη μία πλευρά (ονομαζόμενη *περισφυγμένη πλευρά*) του δοκιμίου, ώστε να εξασφαλιστεί ότι η αστοχία θα επέλθει στην επιθυμητή πλευρά (Σχήμα 6.7). Ακόμα, το σύνθετο υλικό IAM ήταν μη επικολημένο σε μία κεντρική ζώνη

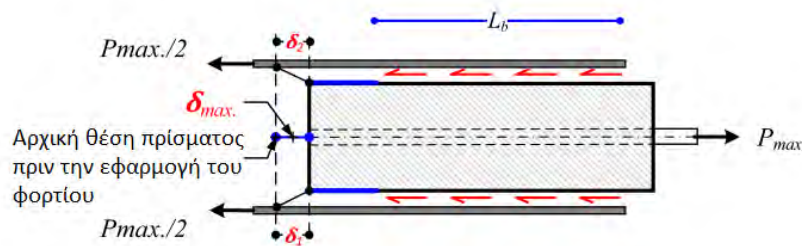
μήκους 100 mm (50 mm σε κάθε πρίσμα) του δοκιμίου (σχήμα 6.4στ), ώστε να αποφευχθεί η βλάβη στο άκρο του σκυροδέματος, η οποία θα μπορούσε να έχει δυσμενείς επιπτώσεις στα αποτελέσματα. Αυτό επιτεύχθηκε με την περιτύλιξη της κεντρικής ζώνης (πριν από την ενίσχυση) με μια πλαστική λωρίδα, προκειμένου να απομονωθεί το ινόπλεγμα από τα πρίσματα σκυροδέματος στη περιοχή αυτή και να αποφευχθεί τυχόν σύνδεση με την επιφάνεια του σκυροδέματος. Όλες οι πειραματικές δοκιμές διεξήχθησαν με χρήση μηχανής δυναμικότητας 250 kN. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν εντός της μηχανής εφελκυσμού με τη χρήση χαλύβδινων ράβδων διαμέτρου 16 mm, οι οποίες είχαν τοποθετηθεί στο κέντρο κάθε του πρίσματος κατά τη διάρκεια της σκυροδέτησης (αυτές οι ράβδοι τερματίζονταν στη διεπιφάνεια μεταξύ των δύο πρισμάτων). Ο ρυθμός επιβολής της μονοτονική φόρτισης ήταν 0.2mm/sec (displacement control test). Δύο LVDTs (*Linear Variable Differential Transformer*) τοποθετήθηκαν στις μη ενισχυμένες πλευρές των δοκιμίων για τη μέτρηση της σχετικής μετατόπισης μεταξύ των δύο πρισμάτων (Σχήμα 6.7). Τα LVDT έχουν τη δυνατότητα καταγραφής αξονικής μετατόπισης και για το λόγο αυτό απαιτούνταν ιδιαίτερη προσοχή ώστε να τοποθετούνται όσο το δυνατόν κατακόρυφα ώστε να μην έχουμε πλασματικές καταγραφές. Η πειραματική διάταξη φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 6.7 Λεπτομέρειες πειραματικής διάταξης. (Raouf, 2017)

6.3.4 Πειραματικά αποτελέσματα

Το σχήμα 6.8 απεικονίζει το Διάγραμμα Ελεύθερου Σώματος της εξεταζόμενης πλευράς του δοκιμίου. Υποθέτοντας τέλεια συμμετρία (έως το μέγιστο φορτίο) μεταξύ των δύο λωρίδων IAM, κάθε πλευρά μεταφέρει το μισό από το μετρούμενο φορτίο αστοχίας (P_u), ενώ η σχετική μετατόπιση δ_{max} μεταξύ των δύο πρισμάτων σκυροδέματος που υπολογίστηκε στο φορτίο αστοχίας ήταν ο μέσος όρος των δύο μετρήσεων LVDTs (δηλαδή $\delta_{max} = (\delta_1 + \delta_2)/2$).



Σχήμα 6.8 Σχηματικό Διάγραμμα Ελεύθερου Σώματος της εξεταζόμενης πλευράς του δοκιμίου. (Raof, 2017)

Τα βασικά αποτελέσματα όλων των εξεταζόμενων δοκιμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2 με αυτά να περιλαμβάνουν:

1. το μέγιστο φορτίο (P_u) που εφαρμόστηκε από τις λωρίδες IAM και για τα δύο πανομοιότυπα (δίδυμα) δοκίμια S1 και S2.
2. τη μετατόπιση (μέσος όρος των δύο μετρήσεων LVDTs) που αντιστοιχεί στο μέγιστο φορτίο (δ_{max}).
3. το μέσο όρο του φορτίου αστοχίας (P_{av}) των δύο πανομοιότυπων δοκιμών.
4. το μέσο όρο της μετατόπισης (δ_{av}) των δύο πανομοιότυπων δοκιμών.
5. το μέσο όρο της αντοχής συνάφειας που αναπτύχθηκε στη διεπιφάνεια σκυροδέματος-μήτρας (f_b).
6. το μέσο όρο της τάσης εφελκυσμού του πλέγματος ιών (σ_{eff}).
7. τον τρόπο αστοχίας.

Ο μέσος όρος της αντοχής συνάφειας (f_b) και ο μέσος όρος της τάσης εφελκυσμού του ινοπλέγματος (σ_{eff}) υπολογίστηκαν από τις εξισώσεις 6.1 και Εξ. 6.2, αντίστοιχα:

$$f_b = \frac{(P_{av}/2)}{L_b b_f}$$

Εξίσωση 6.1 (Raof, 2017)

$$\sigma_{eff} = \frac{(P_{av}/2)}{n * t_f * b_f}$$

Εξίσωση 6.2 (Raof, 2017)

όπου

P_{av} : ο μέσος όρος του φορτίου αστοχίας

L_b : το μήκος συνάφειας

b_f : το πλάτος συνάφειας ($b_f = 80 \text{ mm}$)

n : ο αριθμός των στρώσεων IAM

t_f : το ονομαστικό πάχος του ινοπλέγματος στην διεύθυνση φόρτισης
($t_f = 0,095 \text{ mm}$).

Η εξ. 6.2 χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ενεργής τάσης των ινών, εξαιρουμένης της συμβολής του κονιάματος. Αυτό είναι χαρακτηριστικό στην περίπτωση των συστημάτων IAM, και είναι καθοριστικής σημασίας για την τελική αντοχή συνάφειας, αφού η μήτρα έχει ήδη ρηγματωθεί. Σε αυτό το επίπεδο φόρτισης το σύνολο της δύναμης εφελκυσμού μεταφέρεται μέσω του ινοπλέγματος.

Ξεκινώντας από τα δοκίμια LX_N που ενισχύθηκαν με μία έως τέσσερις στρώσεις IAM, με μήκη συνάφειας: 50, 100, 150, 200 και 250 mm, το μέγιστο φορτίο που καταγράφηκε (μέσος όρος από δίδυμα δοκίμια) ήταν (βλέπε επίσης πίνακα 6.2) : (α) 7.7, 11.6, 12.2, 13.9 και 16.1, kN, αντίστοιχα, για τα δοκίμια με μία στρώση IAM, (β) 18.4, 23.5, 25.3, 28.1 και 29.4 kN, αντίστοιχα, για τα δοκίμια με δύο στρώσεις IAM, (γ) 22.6, 31.2, 35.1, 36.0 και 38.03 kN αντίστοιχα για τα δοκίμια με τρεις στρώσεις IAM και (δ) 27.9, 35.0, 37.9, 41.5 και 41.8 kN, αντίστοιχα, για τα δοκίμια με τέσσερα στρώσεις IAM. Το μήκος συνάφειας των 450 mm εξετάστηκε μόνο για ένα και δύο στρώσεις IAM, με το αντίστοιχο μέγιστο φορτίο να είναι ίσο με 17.4 και 31.6 kN, αντίστοιχα.

Πίνακας 6.2 Σύνοψη των πειραματικών αποτελεσμάτων. (Raouf, 2017)

Δοκίμιο	(1) Μέγιστο φορτίο P_{max} (kN)		(2) Μετατόπιση μέγιστου φορτίου δ_{max} (mm)		(3) Μέσος όρος φορτίου αστοχίας (P_m) kN	(4) Μέσος όρος μετατόπισης δ_{av} (mm)	(5) Μέσος όρος αντοχής συνάφειας (f_b) (MPa)	(6) Τάση εφελκυσμού (σ_{eff}) (MPa)	(7) Τρόπος αστοχίας**
	S_1^*	S_2^*	S_1^*	S_2^*					
L50_1	7.15	8.29	0.2s5	0.23	7.7	0.24	-	507	
L50_2	19.12	17.76	0.79	0.70	18.4	0.75	-	605	S
L50_3	23.95	21.16	0.72	0.66	22.6	0.69	2.83	496	
L50_4	26.46	29.31	0.46	0.62	27.9	0.54	3.49	459	D
L100_1	12.28	10.96	0.53	0.50	11.6	0.52	-	763	
L100_2	22.82	24.14	1.01	1.00	23.5	1.01	-	773	S
L100_3	29.62	32.82	0.85	1.04	31.2	0.95	1.95	684	
L100_4	32.77	37.27	0.83	0.92	35.0	0.88	2.19	576	D
L150_1	11.74	12.58	1.32	1.21	12.2	1.27	-	803	
L150_2	25.25	25.34	1.10	1.11	25.3	1.11	-	832	S
L150_3	34.49	35.62	1.05	1.07	35.1	1.06	1.46	770	
L150_4	38.55	37.2	1.4	1.51	37.9	1.46	1.58	623	D
L200_1	13.51	14.25	1.23	1.24	13.9	1.24	-	915	
L200_2	27.65	28.59	1.35	0.81	28.1	1.08	-	924	S
L200_3	37.44	34.55	1.56	1.9	36.0	1.73	1.13	790	
L200_4	41.26	41.74	1.31	1.57	41.5	1.44	1.30	683	D
L250_1	14.92	17.32	2.29	2.55	16.1	2.42	-	1059	
L250_2	30.25	28.63	1.2	1.6	29.4	1.40	-	967	S
L250_3	38.55	37.51	1.56	1.55	38.03	1.56	0.95	834	
L250_4	42.79	40.89	1.22	1.35	41.8	1.29	1.05	688	D
L450-1	17.54	17.2	2.51	2.15	17.4	2.33	-	1145	
L450-2	32.8	30.4	3.51	3.62	31.6	3.57	-	1040	S
L100_3_S	30.64	31.77	1.27	1.46	31.2	1.37	1.95	684	
L150_3_S	34.99	32.74	0.99	1.05	33.9	1.02	1.41	743	
L200_3_S	40.18	40.57	1.85	1.19	40.4	1.52	1.26	886	
L100_4_S	35.63	36.58	1.24	0.75	36.1	1.00	2.26	594	D
L150_4_S	37.64	36.74	1.19	0.80	37.2	1.00	1.55	612	
L200_4_S	41.45	42.35	1.35	1.19	41.9	1.27	1.31	689	
L100_3_Ls	29.9	29.84	1.04	1.12	29.9	1.08	1.87	656	
L150_3_Ls	30.67	30.79	1.36	1.29	30.7	1.33	1.28	673	
L200_3_Ls	33.68	36.17	1.81	1.99	34.9	1.90	1.09	765	
L100_4_Ls	32.67	31.76	0.92	0.85	32.2	0.89	2.01	530	D
L150_4_Ls	34.7	35.54	1.13	1.45	35.1	1.29	1.46	577	
L200_4_Ls	36.81	38.63	1.48	1.39	37.7	1.44	1.18	620	
L150_1_CCo	22.7	21.08	1.45	1.64	21.9	1.55	-	1441	
L200_1_CCo	23.21	24.6	1.44	1.54	23.9	1.49	-	1572	
L150_2_CCo	29.1	29.89	0.8	0.89	29.5	0.85	-	970	ID
L200_2_CCo	32.94	30.77	0.95	1.05	31.9	1.00	-	1049	
L100_3_W	38.43	41.47	1.21	1.29	40.0	1.25	-	877	
L100_4_W	49.19	52.31	1.17	1.25	50.75	1.21	-	835	S

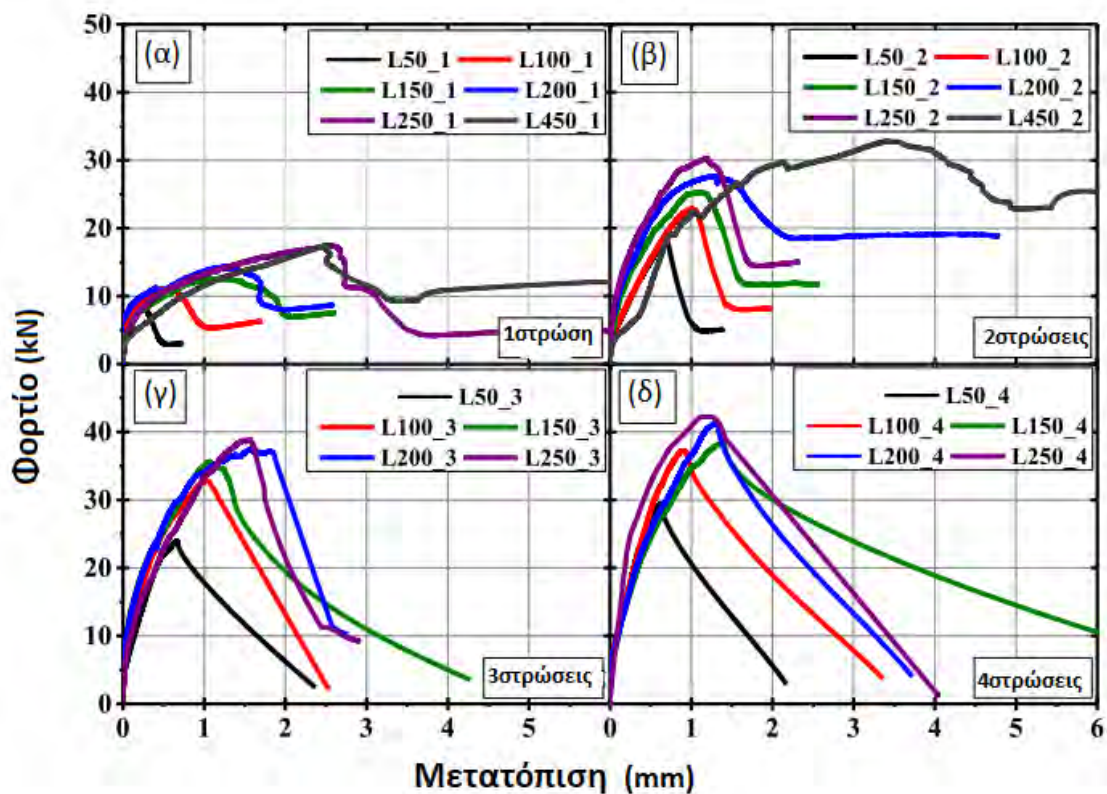
*Αριθμός δοκιμίων.

** S : Ολίσθηση και μερική ρήξη του πλέγματος ινών διαμέσω του κονιάματος

D : Αποκόλληση του IAM από το υπόστρωμα σκυροδέματος, περιλαμβάνοντας και μέρος της επικάλυψης του σκυροδέματος

ID : Αποκόλληση στην διεπιφάνεια μεταξύ πλέγματος -κονιάματος (Διαστρωματική απόσχιση).

Το σχήμα 6.9 απεικονίζει τις καμπύλες φορτίου - μετατόπισης (μέσος όρος των δύο μετρήσεων LVDTs) που καταγράφηκαν για τα δοκίμια LX_N. Για την καλύτερη κατανόηση, συμπεριλαμβάνεται μόνο μία από τις καμπύλες απόκρισης των δίδυμων δοκιμίων. Επιπλέον, οι καμπύλες έχουν ομαδοποιηθεί σύμφωνα με τον αριθμό των εφαρμοζόμενων στρώσεων IAM. Σημειώνεται, ότι η μορφή των καμπυλών των πανομοιότυπων δοκιμίων ήταν παρόμοια σε όλες τις περιπτώσεις (βλέπε στήλες "S1" και "S2" στον Πίνακα 6.2). Ένα κοινό χαρακτηριστικό όλων των καμπυλών είναι η συμπεριφορά τους μέχρι το μέγιστο φορτίο. Συγκεκριμένα, ένας αρχικά ανοδικός γραμμικός κλάδος, με υψηλή αξονική δυστένεια, ακολουθείται από ένα δεύτερο ανοδικό μη-γραμμικό κλάδο με προοδευτικά μειούμενη δυστένεια λόγω της ρηγμάτωσης του κονιάματος.

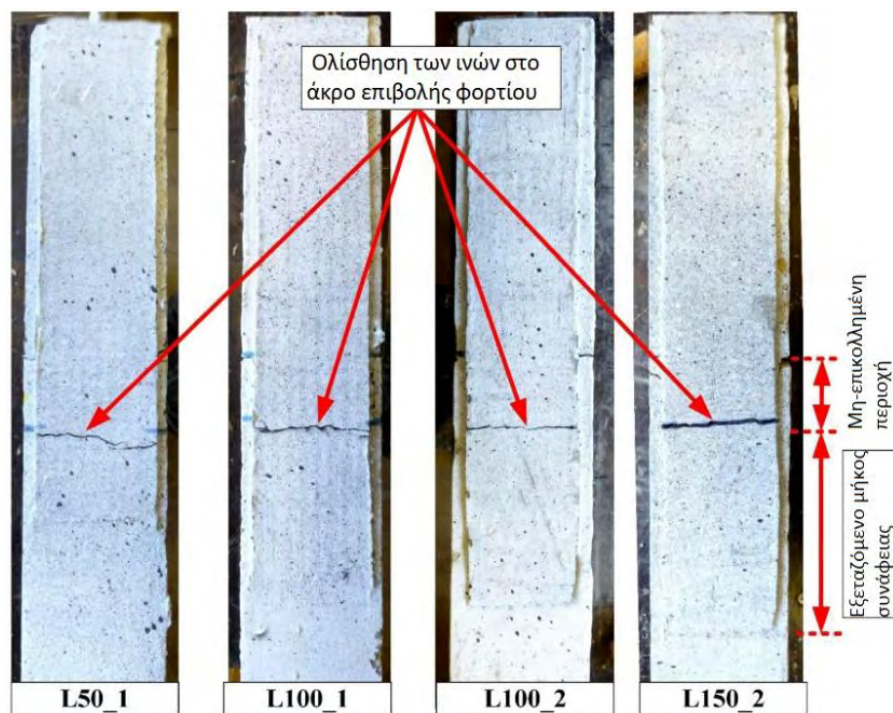


Σχήμα 6.9 Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης των δοκιμίων της ομάδας LX_N. (Raouf, 2017)

Παρατηρήθηκε, ότι η συμπεριφορά μετά το μέγιστο φορτίο ήταν διαφορετική και εξαρτώμενη του τρόπου αστοχίας, ο οποίος με τη σειρά του ήταν διαφορετικός και εξαρτώμενος από την ποσότητα ενίσχυσης IAM. Για μία και δύο στρώσεις IAM, η συμπεριφορά μετά το μέγιστο φορτίο χαρακτηρίστηκε γενικά, από μια προοδευτική πτώση φορτίου μέχρι το επίπεδο μίας παραμένουσας αντοχής (Σχήμα 6.9α και β). Αντίθετα, όταν

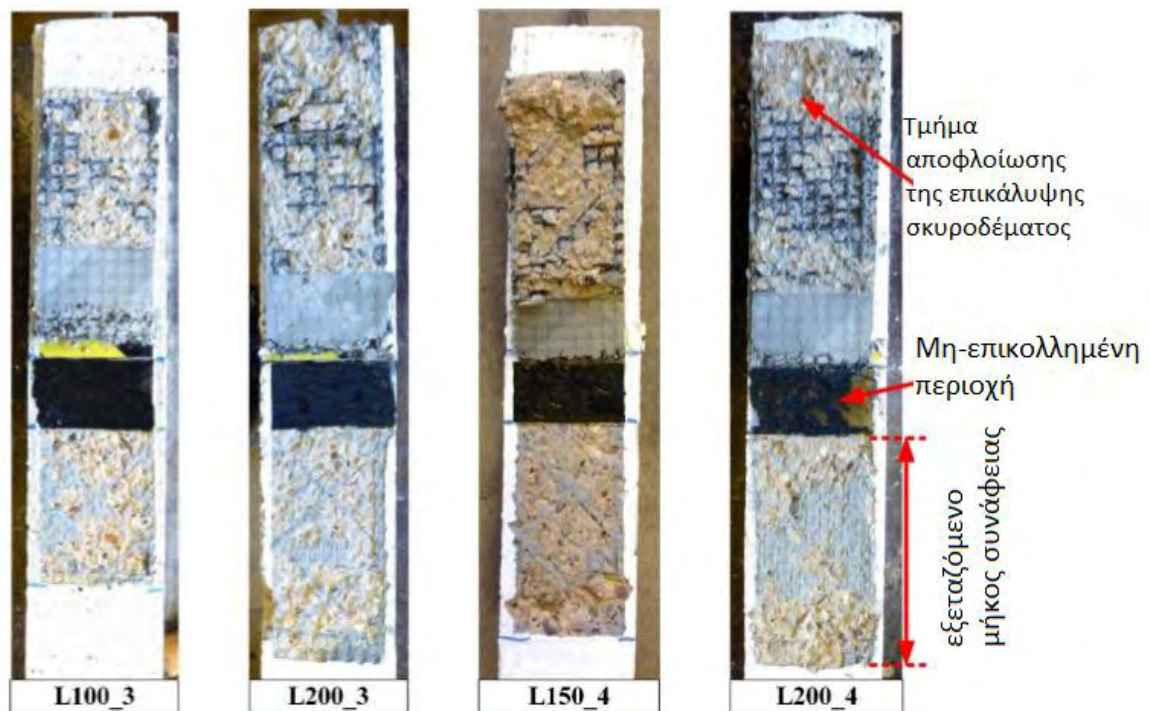
εφαρμόστηκαν τρεις και τέσσερις στρώσεις IAM, η πτώση φορτίου ήταν απότομη, χωρίς ωστόσο να παρέχεται καμία παραμένουσα αντοχή. (Εικόνα 6.9γ και δ).

Οι τρόποι αστοχίας που παρατηρήθηκαν στα δοκίμια LX_N μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο τύπους: α) ολίσθηση των ινών μέσα από το κονίαμα, παραδείγματα αυτού του τρόπου αστοχίας παρουσιάζονται στο σχήμα 6.10, και (β) αποκόλληση (αποφλοιώση) του IAM από το υπόστρωμα σκυροδέματος μαζί με αποκόλληση της επικάλυψης σκυροδέματος (Σχήμα 6.11). Ο πρώτος τρόπος αστοχίας εμφανίστηκε σε όλα τα δοκίμια που ήταν ενισχυμένα με μία ή δύο στρώσεις IAM, ενώ ο δεύτερος πραγματοποιήθηκε σε όλα τα δοκίμια που ήταν ενισχυμένα με τρεις ή τέσσερις στρώσεις.



Σχήμα 6.10 Τρόποι αστοχίας δοκιμών ενισχυμένων με μία και δύο στρώσεις IAM και με διαφορετικό μήκος συνάφειας. (Raouf, 2017)

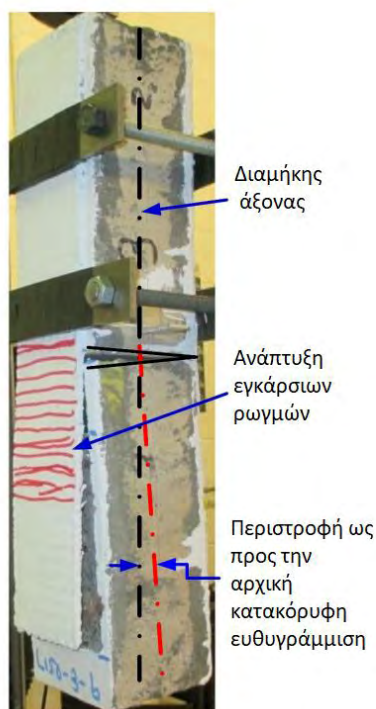
Στα δοκίμια που ενισχύθηκαν με μία ή δύο στρώσεις IAM, ο μηχανισμός αστοχίας περιορίστηκε σε ολίσθηση και μερική θραύση των ινών μέσα από το κονίαμα κοντά στο άκρο επιβολής του φορτίου (*φορτιζόμενο άκρο*), όπου αναπτύχθηκε πρόωρα μια ρωγμή σε όλο το πλάτος του IAM και άνοιξε περαιτέρω μέχρι το τέλος της δοκιμής (Εικόνα 6.3). Μετά την αστοχία, καταγράφηκε παραμένουσα αντοχή, η οποία αποδόθηκε τόσο στη συμβολή της τριβής μεταξύ των ίδιων των εσωτερικών ινών αλλά και της τριβής των εξωτερικών ινών με την περιβάλλουσα μήτρα.



Σχήμα 6.11 Τρόποι αστοχίας δοκιμίων ενισχυμένων με τρεις και τέσσερις στρώσεις IAM και με διαφορετικό μήκος συνάφειας. (Raouf, 2017)

Η αποκόλληση του IAM από το υπόστρωμα σκυροδέματος συνοδευόταν με την αποκόλληση μιας λεπτής στρώσης της επικάλυψης σκυροδέματος (Σχήμα 6.11). Η αστοχία είχε ως έναρξη το σχηματισμό μιας διαμήκου ρωγμής κοντά στο άκρο όπου εφαρμοζόταν το φορτίο. Καθώς το επιβαλλόμενο φορτίο αυξανόταν, αυτή η ρωγμή επεκτεινόταν συνεχόμενα προς το ελεύθερο άκρο. Στο σημείο επιβολής του μέγιστου φορτίου, η επέκταση της ρωγμής μέχρι το ελεύθερο άκρο προκάλεσε την πλήρη αποκόλληση του σύνθετου υλικού IAM από την επιφάνεια του σκυροδέματος. Μια αξιοσημείωτη διαφορά μεταξύ των δοκιμίων που αστόχησαν λόγω της ολίσθησης των ινών και των δοκιμίων που αστόχησαν λόγω της αποκόλλησης του IAM, είναι ότι στην τελευταία περίπτωση αναπτύχθηκαν αρκετές εγκάρσιες ρωγμές στην όψη του IAM, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.12. Ως εκ τούτου, σε αυτές τις περιπτώσεις επιτεύχθηκε καλύτερη κατανομή των τάσεων κατά μήκος του μήκους συνάφειας, λόγω της καλύτερης ενεργοποίησης του ινοπλέγματος με την αύξηση του αριθμού των στρώσεων.

Μετά την αποκόλληση, παρατηρήθηκε περιστροφή του δοκιμίου σε σχέση με τον διαμήκη άξονα (Σχήμα 6.12). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αστοχία εμφανιζόταν σε μία εκ των δύο πλευρών λόγω μη επίτευξης τέλειας συμμετρίας. Ωστόσο, αυτή η περιστροφή δεν είχε καμία επίδραση στη συμπεριφορά της συνάφειας, επειδή πραγματοποιήθηκε μετά το φορτίο αστοχίας.

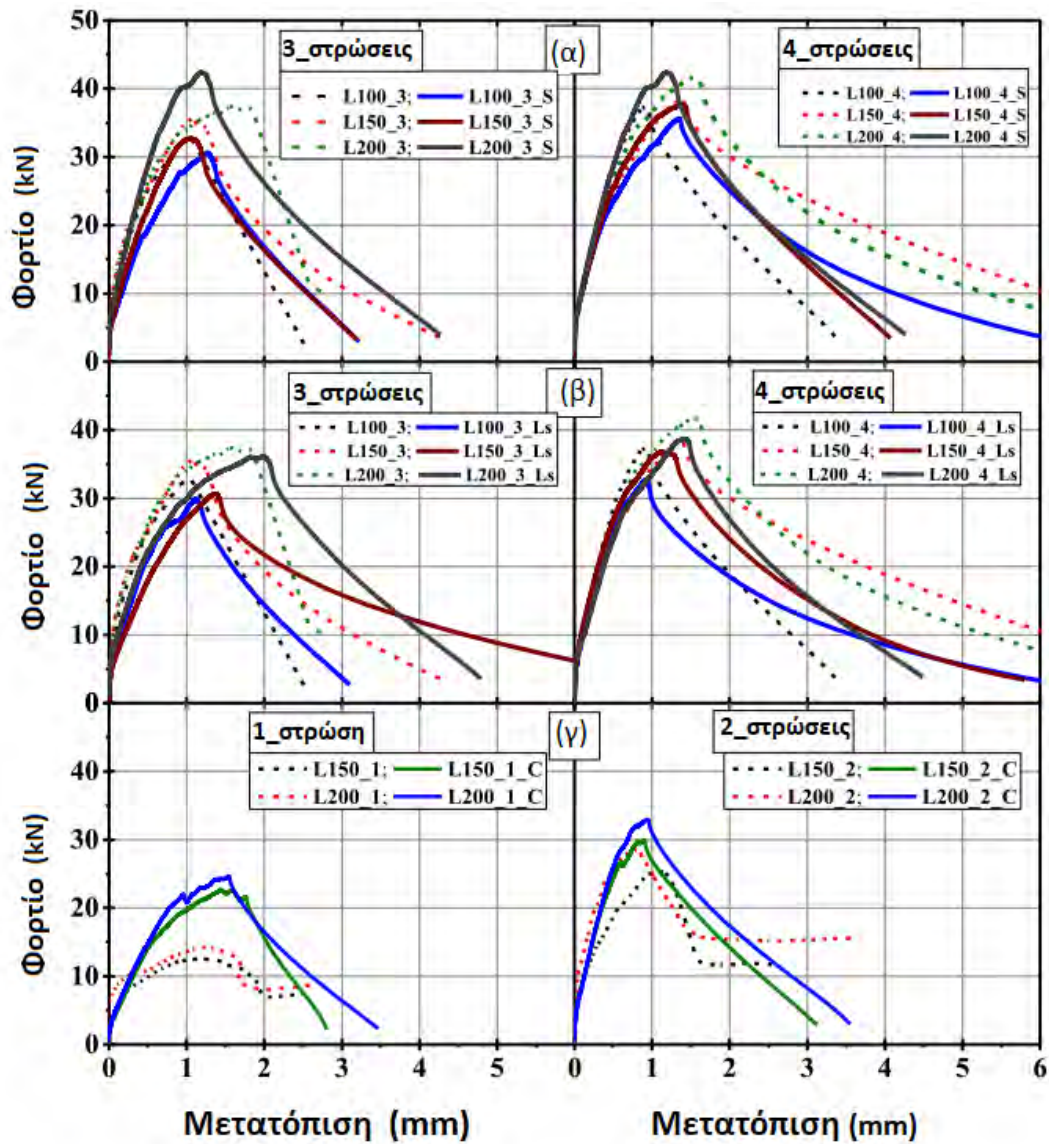


Σχήμα 6.12 Ανάπτυξη εγκάρσιων ρωγμών περιστροφή του δοκιμίου σε σχέση με την αρχική ευθυγράμμιση μετά το τελικό φορτίο. (Raouf, 2017)

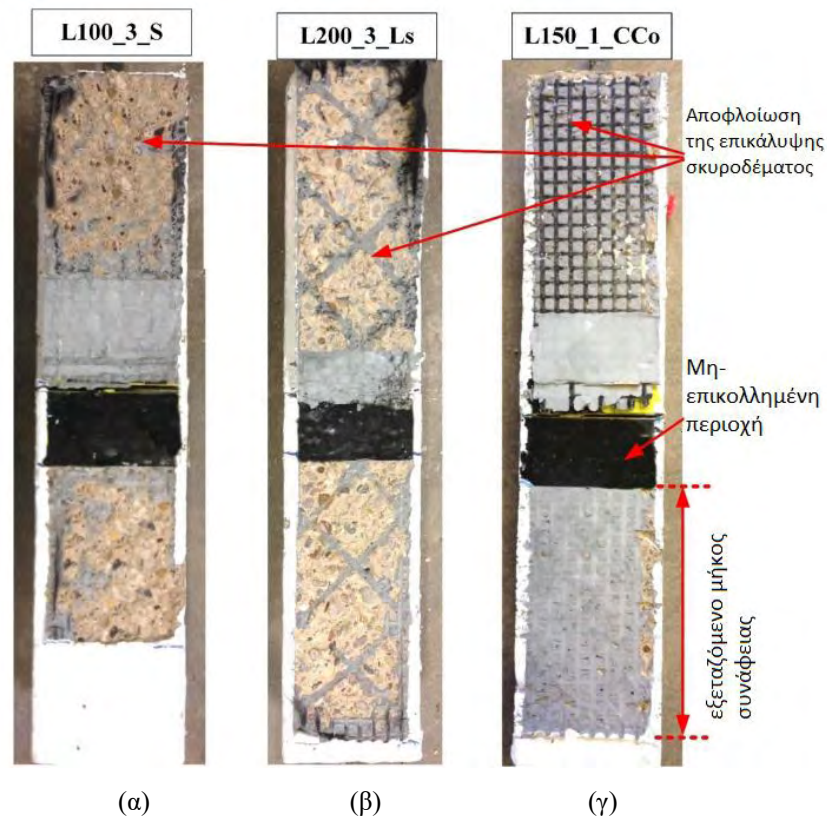
Τα δοκίμια LX_N_S, τα οποία είχαν διαφορετική προετοιμασία της επιφάνειας σκυροδέματος (αμμοβολή αντί ήπιας εκτράχυνσης), έφτασαν τα μέγιστα φορτία των 31.2, 33.9 και 40.4 kN για τρεις στρώσεις και 36.1, 37.2 και 41.9 kN για τέσσερις στρώσεις, για μήκη συνάφειας ίσα με 100, 150 και 200 mm, αντίστοιχα. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.13α, η γενική συμπεριφορά αυτών των δοκιμίων (σε όρους διαγράμματος δύναμης – μετατόπισης), είναι σχεδόν ταυτόσημη με τα αντίστοιχα ισοδύναμα δοκίμια από την ομάδα LX_N (προετοιμασία της επιφάνειας με αυλακώσεις), υποδεικνύοντας ότι η προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος δεν επηρέασε τη συμπεριφορά της συνάφειας. Επίσης, ο τρόπος αστοχίας παρέμεινε αμετάβλητος, με αυτόν να αποτελεί την αποκόλληση του IAM από το υπόστρωμα σκυροδέματος στη διεπιφάνεια σκυροδέματος-κονιάματος, μαζί με μία λεπτή στρώση της επικάλυψης σκυροδέματος (Εικόνα 6.9α).

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.2, τα δοκίμια με χαμηλή θλιπτική αντοχή σκυροδέματος (LX_N_Ls) έφτασαν σε τιμές τελικού φορτίου 29.9, 30.7 και 34.9 kN για τρεις στρώσεις και 32.2, 35.1 και 37.7 kN για τέσσερις στρώσεις, για μήκη συνάφειας 100, 150 και 200 mm, αντίστοιχα. Όπως απεικονίζεται, επίσης, στο Σχήμα 6.13β, η γενική συμπεριφορά αυτής της ομάδας δοκιμίων, αναφορικά με τις καμπύλες δύναμης-μετατόπισης, ήταν παρόμοια με τα αντίστοιχα τους δοκίμια, τα οποία είχαν υψηλότερη αντοχή σκυροδέματος (δηλ. ομάδα LX_N).

Ο τρόπος αστοχίας ήταν επίσης ίδιος με τα αντίστοιχα ισοδύναμα δοκίμια, με αυτόν να αποτελεί την αποκόλληση του ΙΑΜ από το υπόστρωμα σκυροδέματος μαζί με την αποκόλληση τμήματος επικάλυψης σκυροδέματος (Σχήμα 6.14β). Ωστόσο, παρατηρήθηκε ότι το πάχος της επικάλυψης σκυροδέματος που αποκολλήθηκε, ήταν μεγαλύτερο από εκείνο των αντίστοιχων δοκιμίων, και αυτό εξαιτίας της χαμηλότερης αντοχής του σκυροδέματος.



Σχήμα 6.13 Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για δοκίμια που είχαν ως παράμετρο: (α) την προετοιμασία της επιφάνειας σκυροδέματος, (β) την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος και (γ) τα ινοπλέγματα επικαλυμμένα με ρητίνη. (Raouf, 2017)

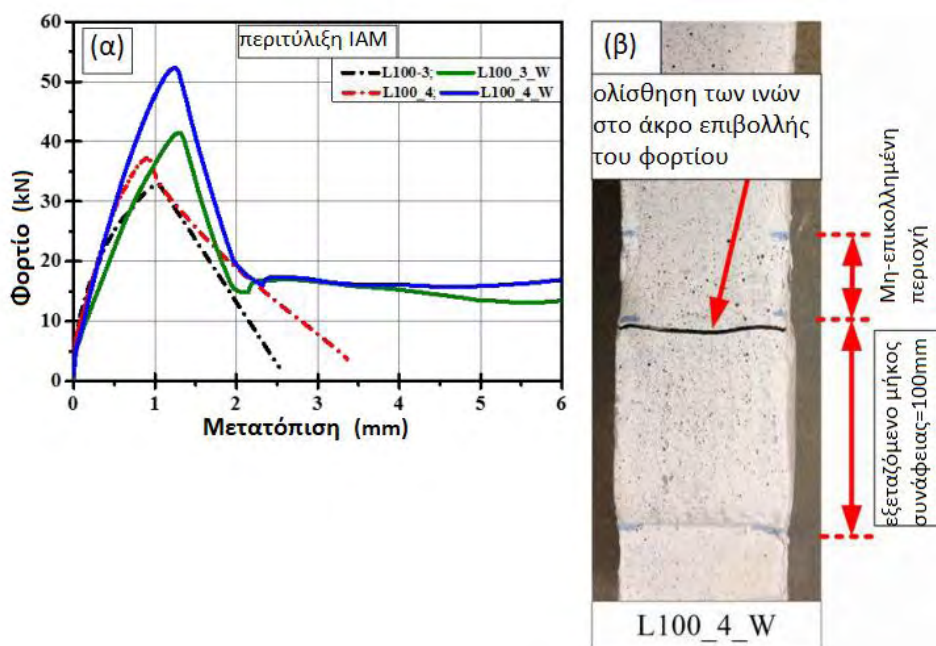


Σχήμα 6.14 Χαρακτηριστικοί τρόποι αστοχίας των δοκιμίων με: (α) προετοιμασία επιφάνειας σκυροδέματος με αμμοβολή, (β) χαμηλή θλιπτική αντοχή σκυροδέματος και (γ) ινοπλέγματα επικαλυμμένα με ρητίνη. (Raouf, 2017)

Οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης των δοκιμίων που ενισχύθηκαν με ινοπλέγματα επικαλυμμένα με ρητίνη (LX_N_CCH), παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.13 γ. Το φορτίο αστοχίας που μετρήθηκε για μία στρώση IAM ήταν 21.9 kN και 23.9 kN για μήκος συνάφειας 150 και 200 mm, αντίστοιχα, το οποίο ουσιαστικά είναι υψηλότερο σε σχέση με τα αντίστοιχα δοκίμια που ενισχύθηκαν με ινοπλέγματα άνθρακα μη επικαλυμμένα. Το αντίστοιχο φορτίο αστοχίας των δύο στρώσεων IAM ήταν 29.5 και 31.9 kN για μήκος συνάφειας 150 και 200 mm, αντίστοιχα. Όπως φαίνεται στις καμπύλες του Σχήματος 6.13γ, η συμπεριφορά των δοκιμίων LX_N_CCo μετά το μέγιστο φορτίο, ήταν διαφορετική από τις αντίστοιχες της ομάδας LX_N, λόγω του διαφορετικού τρόπου αστοχίας που παρατηρήθηκε. Συγκεκριμένα, όλα τα δοκίμια με ινοπλέγματα επικαλυμμένα αστόχησαν λόγω της αποκόλλησης του IAM, εξαιτίας της θραύσης της επιφάνειας διεπιφάνειας ινοπλέγματος-κονιάματος (Σχήμα 6.14γ). Αυτός ο τρόπος αστοχίας ήταν διαφορετικός από τα αντίστοιχα δοκίμια, τα οποία παρουσίασαν ολίσθηση του πλέγματος ινών μέσα από το κονίαμα (Σχήμα 6.10). Η επικάλυψη του ινοπλέγματος με ρητίνη βελτιώνει σημαντικά τη συνάφεια μεταξύ των εσωτερικών και των εξωτερικών νηματίων σε ένα κλώνο ινών. Συνεπώς, η αστοχία λόγω ολίσθησης των ινών μέσα στο κονίαμα εμποδίστηκε,

με την αστοχία να μετατοπίζεται στη διεπιφάνεια ινοπλέγματος - κονιάματος, η οποία φαίνεται να είναι η ασθενέστερη μεταξύ όλων των διεπαφαιών. Αυτός ο τρόπος αστοχίας μπορεί επίσης να χαρακτηριστεί ως *διαστρωματική απόσχιση (Interlaminar shearing)*. Ένα πυκνότερο δίκτυο ρωγμών παρατηρήθηκε σε όλα τα δοκίμια με τα ινοπλέγματα που ήταν επικαλυμμένα, υποδεικνύοντας την καλύτερη ενεργοποίηση του ινοπλέγματος.

Τέλος, οι καμπύλες φορτίου – μετατόπισης των δοκιμίων LX_N_W, τα οποία περιτυλίχθηκαν με δύο στρώσεις IAM, για να παρέχουν καλύτερη αγκύρωση, φαίνονται στο σχήμα 6.15α. Τα δοκίμια L100_3_W και L100_4_W, έφτασαν σε τελικό φορτίο 40 και 50.8 kN για τρεις και τέσσερις στρώσεις, αντίστοιχα (για μήκος συνάφειας 100 mm). Όσον αφορά την απόκριση του φορτίου αστοχίας, είχαν καλύτερη απόδοση από τα αντίστοιχα δοκίμια (βλ. Πίνακα 6.2) λόγω καθυστέρησης της πρόωρης αποκόλλησης, ενώ παρατηρήθηκε επίσης αλλαγή στον τρόπο αστοχίας. Η περιτύλιξη του πρίσματος δεν επέτρεψε την αποκόλληση των λωρίδων IAM και η αστοχία πραγματοποιήθηκε στο άκρο του επιβαλλόμενου φορτίου, όπου εμφανίστηκε μια ενιαία εγκάρσια ρωγμή [Σχήμα 6.15β]. Τελικά, οι ίνες του πλέγματος γλίστρησαν μέσα από το κονίαμα, με αποτέλεσμα μία παραμένουσα αντοχή, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.15α.



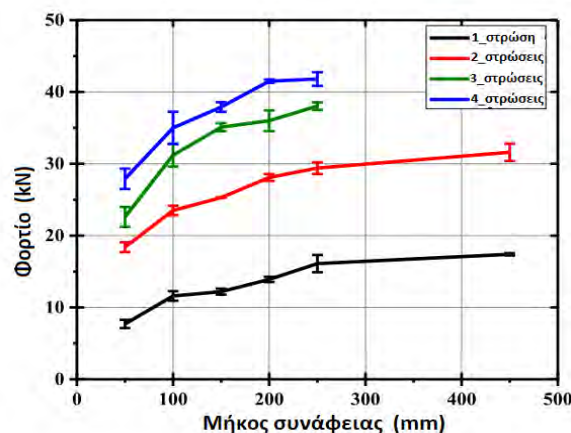
Σχήμα 6.15 α) Σύγκριση των καμπυλών φορτίου-μετατόπισης των δοκιμίων με αγκύρωση μέσω περιτύλιξης με κλειστούς μανδύες IAM, με τα αντίστοιχα δοκίμια χωρίς αγκύρωση και β) γενικός τρόπος αστοχίας των δοκιμίων με αγκύρωση μέσω περιτύλιξης με κλειστούς μανδύες IAM (TRM jackets). (Raouf, 2017)

6.3.5 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

Όσον αφορά τις διάφορες παραμέτρους που διερευνήθηκαν σε αυτό το πειραματικό πρόγραμμα, μια εξέταση των αποτελεσμάτων όσον αφορά τα τελικά φορτία και τους τρόπους αστοχίας παρουσιάζεται ακολούθως.

6.3.5.1 Επιρροή του μήκους συνάφειας και του αριθμού των στρώσεων

Η επίδραση του μήκους συνάφειας και του αριθμού των στρώσεων στην ικανότητα ανάληψης φορτίου απεικονίζεται στο Σχήμα 6.16. Οι καμπύλες στο Σχήμα 6.16 καταδεικνύουν, σαφώς, ότι αυξάνοντας είτε το μήκος συνάφειας είτε τον αριθμό των στρώσεων, αυξάνεται η αντοχή συνάφειας με έναν τρόπο μη αναλογικό. Αυτή η συμπεριφορά είναι παρόμοια με τη συμπεριφορά συνάφειας των λωρίδων FRP (Yao et al., 2005), όπου μετά από ένα ορισμένο μήκος συνάφειας, η δύναμη συνάφειας τείνει να φτάσει σε μια σταθερή τιμή η οποία θεωρείται ως η μέγιστη δύναμη συνάφειας. Αυτό το μήκος ονομάζεται "ενεργό μήκος συνάφειας" (L_{eff}) και σύμφωνα με τις καμπύλες που απεικονίζονται στο Σχήμα 6.16 βρίσκεται στην περιοχή 200 και 300 mm για τον αριθμό των στρώσεων (ένα έως τέσσερα) που ερευνήθηκαν.



Σχήμα 6.16 Μεταβολή του φορτίου αστοχίας τόσο με το μήκος του συνάφειας όσο και με τον αριθμό των στρώσεων. (Raouf, 2017)

Η προτεινόμενη τιμή του ενεργού μήκους συνάφειας είναι σύμφωνη με τα συμπεράσματα των προηγούμενων μελετών (D'Ambrisi et al., 2013, Sneed et al., 2014, Tran et al., 2014). Ακόμα και σε περιπτώσεις με μία και δύο στρώσεις IAM, που υπάρχει σημαντική τριβή μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών νημάτων όταν επέρχεται η ολίσθηση, παρέχοντας ένα μεγάλο μήκος συνάφειας (450 mm), το φορτίο αστοχίας έχει μία πολύ μικρή αύξηση.

Για το ίδιο μήκος συνάφειας, η αύξηση του αριθμού των στρώσεων είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της ικανότητας ανάληψης δύναμης. Αυτό το αποτέλεσμα ήταν πιο έντονο στη μετάβαση από μία σε δύο στρώσεις, ενώ για περισσότερες στρώσεις γινόταν σταδιακά όλο και λιγότερο σημαντικό. Σχεδόν την ίδια συμπεριφορά ακολούθησαν όλα τα εξεταζόμενα μήκη συνάφειας μεταξύ 50 και 250 mm. Όμως, το πιο σημαντικό αποτέλεσμα της αύξησης του αριθμού των στρώσεων σχετίστηκε με τη μεταβολή του τρόπου αστοχίας. Ειδικότερα, όπως εξηγείται στην ενότητα 6.2, τα δοκίμια της ομάδας LX_N, τα οποία ενισχύθηκαν με μία ή δύο στρώσεις, αστόχησαν εξαιτίας της ολίσθησης των ινών του πλέγματος μέσα από το κονίαμα (βλέπε Σχήμα 6.10), ενώ τα δοκίμια με τρεις ή τέσσερις στρώσεις αστόχησαν λόγω της αποκόλλησης του IAM από το υπόστρωμα σκυροδέματος με αποφλοιώση τμήματος της επικάλυψης σκυροδέματος (Σχήμα 6.4).

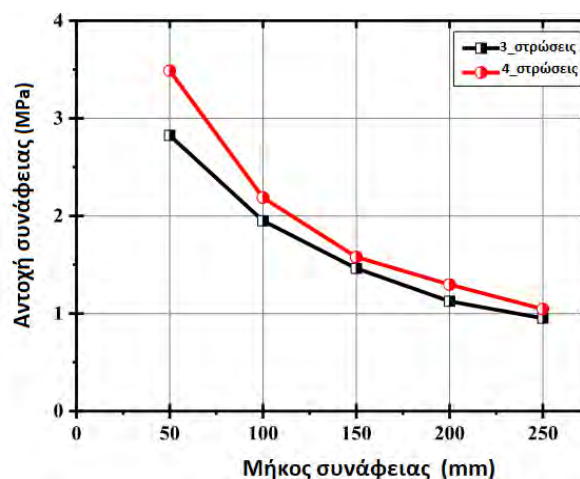
Η παραπάνω διαπίστωση προσθέτει νέες πληροφορίες στις υπάρχουσες γνώσεις. Σε όλες τις προηγούμενες μελέτες που αφορούσαν την συνάφεια μεταξύ του IAM και του σκυροδέματος (που ο μέγιστος αριθμός στρώσεων που εξετάστηκαν ήταν δύο), η αστοχία συνέβη είτε στη διεπιφάνεια μεταξύ ινών και κονιάματος, είτε στη διεπιφάνεια μεταξύ του σκυροδέματος και του κονιάματος χωρίς τη συμμετοχή της επικάλυψης σκυροδέματος. Σημειώνεται, ότι η αστοχία του IAM που περιλαμβάνει την αποφλοιώση της επικάλυψης σκυροδέματος έχει επίσης αναφερθεί στη μελέτη της Tetta et al. (2015), όπου δοκοί ΟΣ ενισχύθηκαν σε διάτμηση με IAM U- μανδύες. Αυτός ο τρόπος αστοχίας είναι πολύ συνηθισμένος στην περίπτωση που το FRP συνδέεται με σκυρόδεμα (Yao et al., 2005), υποδεικνύοντας ότι το IAM μπορεί να συμπεριφερθεί παρόμοια με το FRP με την αύξηση του αριθμού των στρώσεων.

Επίσης, το μήκος συνάφειας είχε επιρροή στην παραμένουσα αντοχή των δοκιμίων που αστόχησαν λόγω ολίσθησης των ινών, η οποία σχετίζεται με την τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ των εσωτερικών και των εξωτερικών νημάτων κάθε ατομικού κλώνου ινών. Ο Πίνακας 6.3 δείχνει το ποσοστό του υπολειπόμενου φορτίου σε σύγκριση με το μέγιστο φορτίο που καταγράφηκε για τα δοκίμια με μία και δύο στρώσεις IAM. Συνάγεται γενικά το συμπέρασμα ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος συνάφειας, τόσο μεγαλύτερες είναι οι επιφάνειες ολίσθησης, οπότε τόσο μεγαλύτερη είναι και η παραμένουσα αντοχή.

Πίνακας 6.3. Ποσοστό του υπολειπόμενου φορτίου σε σχέση με το μέγιστο καταγεγραμμένο φορτίο για δοκίμια που ενισχύθηκαν με μία και δύο στρώσεις IAM. (Raouf, 2017)

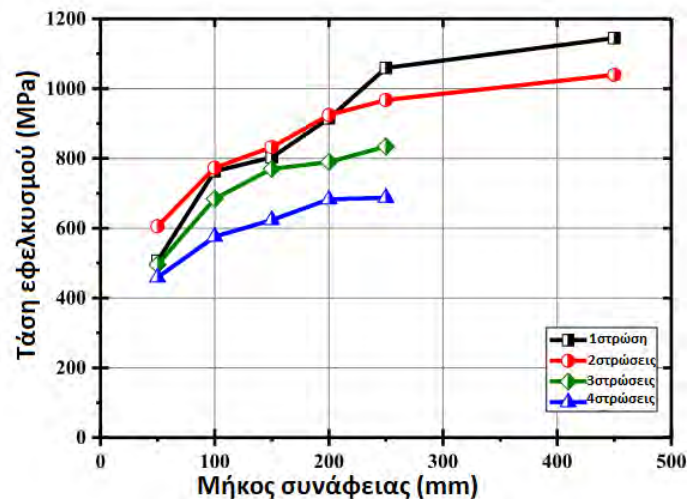
Όνομα δοκίμιου	Ποσοστό του υπολειπόμενου φορτίου %	
	S ₁ *	S ₂ *
L50_1	36.4	36.2
L50_2	33.5	28.5
L100_1	46.9	57.8
L100_2	33.3	34.0
L150_1	60.7	60.1
L150_2	46.6	43.4
L200_1	57.0	61.1
L200_2	56.8	65.8
L250_1	42.2	61.2
L250_2	52.2	52.4
L450-1	71.3	70.3
L450-2	75.0	81.6

Επιπλέον, το μήκος συνάφειας είχε επιρροή στην αντοχή συνάφειας (f_b - υπολογίστηκε από την εξίσωση 6.2) της διεπιφάνεια σκυροδέματος - μήτρας. Σημειώτέο, ότι η αντοχή συνάφειας υπολογίστηκε μόνο για εκείνα τα δοκίμια τα οποία αστόχησαν λόγω της αποκόλλησης του IAM από το υπόστρωμα του σκυροδέματος (βλ. Πίνακα 6.2). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.17, καθώς το μήκος συνάφειας αυξάνεται, η αντοχή συνάφειας στη διεπιφάνεια σκυροδέματος-κονιάματος μειώνεται (περίπου κατά αναλογικό τρόπο). Αυτή είναι και η γενική συμπεριφορά, αφού η αύξηση του μήκους συνάφειας οδήγησε στην αύξηση της περιοχής διεπιφάνειας που αντιστέκεται στο φορτίο που εφαρμόζεται. Περαιτέρω, σημειώνεται ότι η μελέτη της επιρροής του αριθμού των στρώσεων στην αντοχή συνάφειας στη διεπιφάνεια σκυροδέματος-μήτρας ήταν πολύ περιορισμένη, λόγω του ίδιου ακριβώς τρόπου αστοχίας (αποκόλληση).



Σχήμα 6.17 Μεταβολή της αντοχής συνάφειας που αναπτύχθηκε στη διεπιφάνεια σκυροδέματος-κονιάματος, τόσο με το μήκος συνάφειας όσο και με τον αριθμό των στρώσεων. (Raouf, 2017)

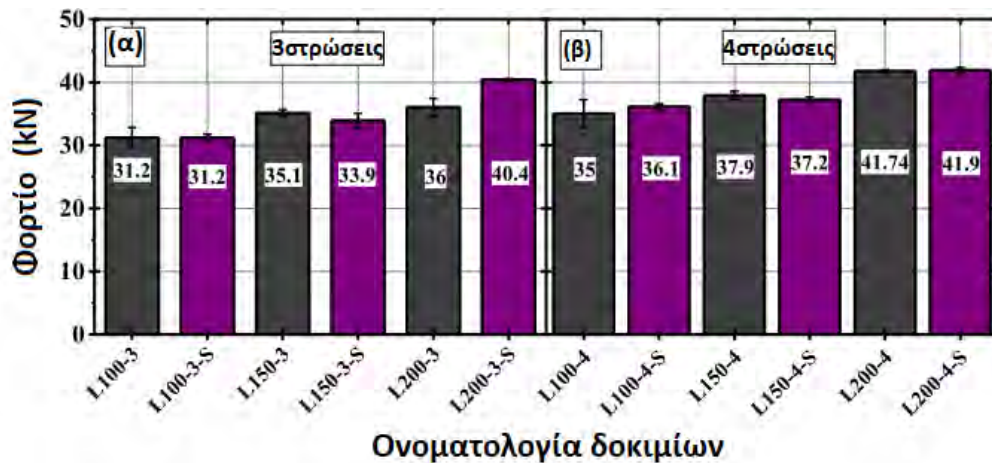
Τέλος, το σχήμα 6.18 απεικονίζει τη μεταβολή της τάσης εφελκυσμού του ινοπλέγματος (υπολογιζόμενη από την εξίσωση 6.2) ως προς το μήκος συνάφειας, για διαφορετικό αριθμό στρώσεων IAM. Παρατηρείται γενικά, ότι αυξάνοντας τον αριθμό των στρώσεων, η τάση εφελκυσμού μειώνεται, γεγονός που συμβαδίζει με τη συμπεριφορά συνάφειας των FRP στο σκυρόδεμα (Yao et al., 2005).



Σχήμα 6.18 Μεταβολή της τάσης εφελκυσμού του ινοπλέγματος με τον αριθμό των στρώσεων και το μήκος συνάφειας. (Raouf, 2017)

6.3.5.2 Επιρροή της προετοιμασίας της επιφάνειας

Το Σχήμα 6.19 α και β απεικονίζει μια σύγκριση μεταξύ των φορτίων αστοχίας των δοκιμίων που είχαν το ίδιο μήκος συνάφειας, αλλά διαφορετική προετοιμασία της επιφάνειας σκυροδέματος, για τρεις (Σχήμα 6.19α) και τέσσερις (Σχήμα 6.19β) στρώσεις IAM. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, η ήπια εκτράχυνση της επιφάνειας του σκυροδέματος και η δημιουργία ενός πλέγματος αυλάκων, ήταν εξίσου αποτελεσματική με την προετοιμασία της επιφάνειας με αμμοβολή κατά την μεταφορά διατμητικών τάσεων από IAM στο σκυρόδεμα. Επιπλέον, το σχήμα των καμπυλών δύναμης - μετατόπισης του Σχήματος 6.19α, ήταν σχεδόν το ίδιο και για τις δύο μεθόδους προετοιμασίας επιφάνειας. Ως εκ τούτου, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι και οι δύο τρόποι προετοιμασίας της επιφάνειας θεωρούνται κατάλληλοι, κάτι που χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση για άλλες γεωμετρίες ινοπλέγματος και για άλλους τύπους κονιάματος. Το τρέχον εύρημα συμφωνεί με τη μελέτη των D'Antino et al. (2015), όπου δεν παρατηρήθηκαν διαφορές μεταξύ των δοκιμίων με επιφάνειες που δεν υπέστη επεξεργασία και με επιφάνειες που επεξεργάστηκαν με αμμοβολή, ενισχυμένες με μία στρώση IAM από ίνες PBO.



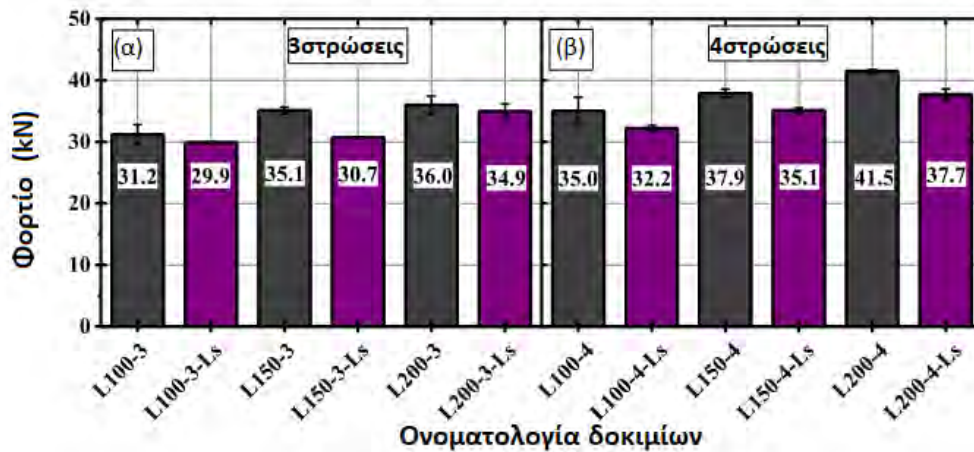
Σχήμα 6.19 Επιρροή της προετοιμασίας της επιφάνειας σκυροδέματος στο φορτίο αστοχίας των δοκιμίων που ενισχύθηκαν με: (α) τρεις στρώσεις IAM και (β) τέσσερις στρώσεις IAM. (Raouf, 2017)

6.3.5.3 Επιρροή της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος

Η παράμετρος της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος επιλέχθηκε να διερευνηθεί μόνο για τρεις και τέσσερις στρώσεις IAM. Η αιτία της παραπάνω επιλογής ήταν ο τρόπος αστοχίας που παρατηρήθηκε στα δοκίμια LX_N. Συγκεκριμένα, ο τρόπος αστοχίας του IAM που αποκολλάται από το υπόστρωμα σκυροδέματος και περιλαμβάνει μαζί και μέρος του επικάλυψης σκυροδέματος (μηχανισμός αστοχίας που συνδέεται με την αντοχή του σκυροδέματος), πραγματοποιήθηκε μόνο στην περίπτωση τριών και τεσσάρων στρώσεων IAM. Όταν χρησιμοποιήθηκαν μία ή δύο στρώσεις IAM, η αστοχία αποδόθηκε στη συγκέντρωση της βλάβης σε μία ενιαία ρωγμή. Για το λόγο αυτό, πιστεύεται από τους ερευνητές ότι η αντοχή του σκυροδέματος δεν θα επηρέαζε τα αποτελέσματα των δοκιμίων με μία ή δύο στρώσεις IAM.

Μια σύγκριση των φορτίων αστοχίας μεταξύ των δοκιμίων LX_N_Ls (χαμηλότερη θλιπτική αντοχή - περίπου 15 MPa) και των δοκιμίων LX_N (μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή - περίπου 30 MPa) πραγματοποιείται στο Σχήμα 6.20α και β. Σε όλες τις περιπτώσεις, η χρήση ενός σκυροδέματος με μικρότερη θλιπτική αντοχή είχε δυσμενείς επιπτώσεις στην ικανότητα ανάληψης δύναμης των δοκιμίων. Στα δοκίμια με χαμηλότερη θλιπτική αντοχή σκυροδέματος, η μείωση της αντοχής συνάφειας ήταν 4.1%, 12.5% και 3.1% για τρεις στρώσεις IAM και 8%, 7.4% και 9.2% για τέσσερις στρώσεις IAM και για μήκος συνάφειας ίσο με 100, 150, και 200 mm, αντίστοιχα. Όπως αναμενόταν, η χαμηλότερη (κατά 50%) θλιπτική αντοχή, είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση του φορτίου αστοχίας, η οποία κατά μέσο όρο ήταν περίπου ίση με

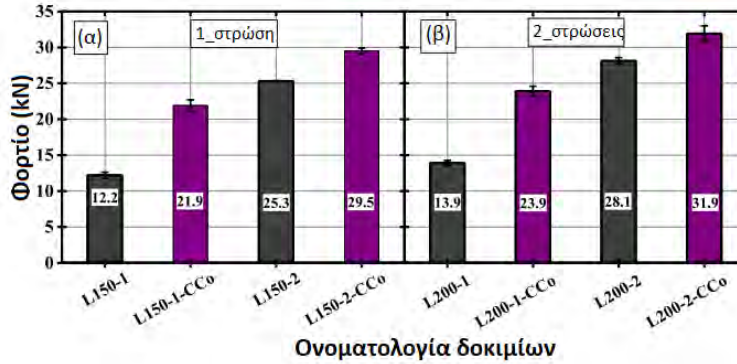
7.5%. Η μείωση αυτή, ωστόσο, δεν μπόρεσε να θεωρηθεί σημαντική, καθώς μπορεί να βρίσκεται στο εύρος του στατιστικού σφάλματος. Σημειώνεται, ότι η ασήμαντη επίδραση της αντοχής του σκυροδέματος στην αντοχή συνάφειας έχει, επίσης, αναφερθεί από τους D'Antino et al. (2015). Ωστόσο, στη μελέτη τους το σκυροδέμα δεν εμπλέκετο άμεσα στον τρόπο αστοχίας, ο οποίος ήταν στη διεπιφάνεια μεταξύ της μήτρας και των ινών.



Σχήμα 6.20 Επίδραση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος στο τελικό φορτίο των δοκιμίων που ενισχύεται με: (α) τρεις στρώσεις IAM, και (β) τέσσερα στρώσεις IAM. (Raouf, 2017)

6.3.5.4 Επιρροή της επικάλυψης του πλέγματος ινών με ρητίνη

Ινοπλέγματα επικαλυμμένα με ρητίνη διερευνήθηκαν σε δοκίμια IAM, προκειμένου να αποφευχθεί η πρόωρη αστοχία λόγω ολίσθησης των ινών μέσα από το κονιάμα που παρατηρήθηκε στα δοκίμια με ινοπλέγματα μη επικαλυμμένα. Ινοπλέγματα επικαλυμμένα με ρητίνη διερευνήθηκαν σε δοκίμια IAM με μία και δύο στρώσεις. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η επίδραση της επικάλυψης του πλέγματος ινών με ρητίνη ήταν διττή: (α) μεταβάλλει τον τρόπο αστοχίας και (β) οδηγεί σε σημαντική αύξηση της ικανότητας ανάληψης δύναμης. Ειδικότερα, ο τρόπος αστοχίας μεταβλήθηκε από ολίσθηση των ινών μέσα από τη περιβάλλουσα μήτρα, σε αποκόλληση του IAM στη διεπιφάνεια ινοπλέγματος - κονιάματος (Διαστρωματική απόσχιση). Η σύγκριση των φορτίων αστοχίας των δοκιμίων με μία και δύο στρώσεις ινοπλεγμάτων επικαλυμμένων και των δοκιμίων με ινοπλέγματα μη επικαλυμμένα, φαίνεται στο σχήμα 6.21 α και β, αντίστοιχα, για διαφορετικά μήκη συνάφειας. Το φορτίο αστοχίας αυξήθηκε κατά 79.5% και 71.9% για δοκίμια με μία στρώση και 16.6% και 13.5% για δοκίμια με δύο στρώσεις, για μήκος συνάφειας ίσο με 150 και 200 mm, αντίστοιχα.



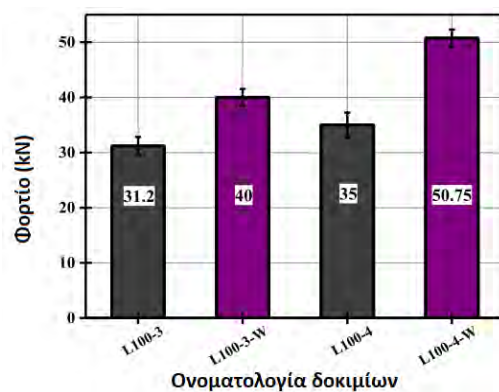
Σχήμα 6.21 Επιρροή των ινοπλεγμάτων επικαλυμμένων με ρητίνη στο τελικό φορτίο των δοκιμών που ενισχύθηκαν με: (α) μία στρώση IAM και (β) δύο στρώσεις IAM. (Raouf, 2017)

Τα ινοπλέγματα που εμποτίστηκαν με εποξειδική ρητίνη έγιναν πιο σταθερά και εύκολα κατά την εφαρμογή, ενώ ταυτόχρονα αυξήθηκε η δυστένεια τους. Η επίτευξη ενός καλού επιπέδου εμποτισμού των ινών με ρητίνη συνέβαλε στην καλύτερη διασύνδεση μεταξύ των εσωτερικών νημάτων των κλώνων ινών και των εξωτερικών νημάτων. Το παραπάνω γεγονός, δηλαδή, αποδόθηκε στην απουσία ολίσθησης μεταξύ των κεντρικών και περιφερειακών ινών του κλώνου. Επομένως, ο μηχανισμός μεταφοράς τάσεων από τις ίνες στη μήτρα βελτιώθηκε, παρέχοντας καλύτερες συνθήκες μηχανικής αλληλοσύνδεσης. Συνεπώς, τα ινοπλέγματα επικαλυμμένα με ρητίνη είναι καλύτερα για την μεταφορά εφελκυστικών δυνάμεων και επιπλέον αυξάνουν την ικανότητα ανάληψης φορτίου. Επιπλέον, επιτυγχάνεται πιο ομοιόμορφη κατανόμη των τάσεων (κάτι που υποδεικνύεται από το σχηματισμό αρκετών εγκάρσιων ρωγμών), καθώς επίσης μεταβάλλεται ο τρόπος αστοχίας από τοπική ολίσθηση των ινών σε γενική αποκόλληση των λωρίδων IAM, ενώ η επιφανειακή αστοχία είναι εντός του πάχους IAM διεπιφάνεια ινοπλέγματος-κονιάματος).

6.3.5.5 Επιρροή της αγκύρωσης μέσω περιτύλιξης με κλειστούς μανδύες IAM

Η επιρροή της αγκύρωσης μέσω περιτύλιξης με κλειστούς μανδύες IAM (πλήρης περίσφιξη) ερευνήθηκε για ένα μικρό μήκος συνάφειας (100 mm) για 3 και 4 στρώσεις IAM. Η γενική ιδέα πίσω από αυτό, ήταν να βελτιωθούν οι συνθήκες συνάφειας όταν παρέχεται ένα μικρό μήκος συνάφειας (μικρότερο από το ενεργό μήκος συνάφειας), προκειμένου να εμποδιστεί η πρόωρη αποκόλληση του IAM. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.22, η ικανότητα ανάληψη δύναμης αυξήθηκε κατά 28% και 45% όταν τρεις και τέσσερις στρώσεις IAM, αντιστοίχως, αγκυρώθηκαν μέσω περιτύλιξης με κλειστούς μανδύες IAM (TRM jackets). Σημειώνεται, ότι το μήκος συνάφειας ήταν ίσο με 100 mm, ενώ οι στρώσεις IAM που χρησιμοποιήθηκαν για περιτύλιξη ήταν δύο. Όπως ήταν προβλεπόμενο, ο τρόπος αστοχίας

μεταβλήθηκε από αποκόλληση του IAM, σε μερική θραύση και ολίσθηση των ινών μαζί με μια ενιαία ρωγμή που αναπτύχθηκε στο άκρο επιβολής του φορτίου (Σχήμα 6.15β).



Σχήμα 6.22 Επιρροή της αγκύρωσης μέσω περιτύλιξης με κλειστούς μανδύες IAM στο φορτίο αστοχίας των δοκιμίων που ενισχύθηκαν με μια και δύο στρώσεις IAM και μήκος συνάφειας 100mm. (Raouf, 2017)

Ένα συμπέρασμα που πρέπει να επισημανθεί, είναι ότι οι αγκυρωμένες λωρίδες IAM με μικρό μήκος συνάφειας (100 mm) όχι μόνο έφτασαν, αλλά υπερέβησαν την ικανότητα ανάληψης δύναμης σε σύγκριση με των μη-αγκυρωμένων δοκιμίων που είχαν πολύ μεγαλύτερο μήκος συνάφειας. Ειδικότερα, συγκρίνοντας το δοκίμιο L100_3_W με τα δοκίμια L200_3 και L250_3, παρατηρήθηκε αύξηση του φορτίου αστοχίας κατά 11.1% και 5.2%, αντίστοιχα. Ομοίως, συγκρίνοντας το δοκίμιο L100_4_W με τα δοκίμια L200_4 και L250_4, η αύξηση του φορτίου αστοχίας έφθασε στο 22.3% και στο 21.4%, αντίστοιχα. Επομένως, συνιστάται η αγκύρωση μέσω περιτύλιξης με κλειστούς μανδύες IAM με σκοπό την βελτίωση των συνθηκών συνάφειας, όταν το διαθέσιμο μήκος για την αγκύρωση της ενίσχυσης IAM είναι περιορισμένο.

6.3.6 Σύνοψη

Το παρόν κεφάλαιο βασίστηκε στα αποτελέσματα ενός ολοκληρωμένου πειραματικού προγράμματος που είχε ως σκοπό τη διερεύνηση της συνάφειας μεταξύ του IAM και του υποστρώματος σκυροδέματος. Ογδόντα δοκίμια παρασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν σε δοκιμή διάτμησης της διάταξης Double-lap. Αυτή η πολυπαραμετρική μελέτη περιλάμβανε τη διερεύνηση: (α) του μήκους συνάφειας IAM, (β) του αριθμού των στρώσεων των ινοπλεγμάτων IAM, (γ) της προετοιμασίας της επιφάνειας του σκυροδέματος, (δ) της θλιπτικής αντοχής του

σκυροδέματος, (ε) των ινοπλεγμάτων επικαλυμμένων με ρητίνη και (στ) την αγκύρωση μέσω περιτύλιξης με κλειστούς μανδύες IAM.

Τα βασικά συμπεράσματα που συνάχθηκαν συνοψίζονται παρακάτω:

- Με την αύξηση του μήκους συνάφειας, η ικανότητα συνάφειας αυξάνεται με τρόπο μη αναλογικό για κάθε αριθμό στρώσεων IAM που εξετάστηκαν (1 έως 4). Όμως, μετά από ένα ορισμένο μήκος συνάφειας (το λεγόμενο *ενεργό μήκος συνάφειας*) η ικανότητας συνάφειας δεν έχει σημαντική αύξηση. Αυτό το μήκος κυμαίνεται από 200 έως 300 mm για τον αριθμό στρώσεων που εξετάστηκαν και για τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη.
- Με την αύξηση του αριθμού των στρώσεων IAM για το ίδιο μήκος συνάφειας, η ικανότητα συνάφειας αυξάνεται με μη αναλογικό τρόπο. Η αύξηση ήταν πιο έντονη στη μετάβαση από μια σε δύο στρώσεις, ενώ για περισσότερες στρώσεις σταδιακά καθίσταται όλο και λιγότερο σημαντική (λόγω της αλλαγής του τρόπου αστοχίας).
- Ο αριθμός των στρώσεων έχει σημαντική επιρροή στον τρόπο αστοχίας. Για μία και δύο στρώσεις IAM η αστοχία οφειλόταν στην ολίσθηση των ινών μέσα από το κονίαμα και στην δημιουργία μίας μόνο ρωγμής κοντά στο άκρο επιβολής του φορτίου (επιβαλλόμενο άκρο). Για τρεις και τέσσερις στρώσεις IAM, ο τρόπος αστοχία αποδόθηκε στην αποκόλληση της διεπιφάνειας κονιάματος - σκυροδέματος, συμπεριλαμβανομένης της αποκόλλησης μιας λεπτής στρώσης του σκυροδέματος, όπως και στα συστήματα EB FRP.
- Διαφορετικές μέθοδοι προετοιμασίας των επιφανειών σκυροδέματος (ήπια εκτράχηση ή αμμοβολή) δεν είχαν επιρροή στις πτυχές συνάφειας μεταξύ IAM και σκυροδέματος, υποδηλώνοντας ότι και οι δύο μέθοδοι προετοιμασία της επιφάνειας είναι κατάλληλες.
- Η χρήση σκυροδέματος χαμηλότερης θλιπτικής αντοχής επηρέασε οριακά την δύναμη συνάφειας μεταξύ του IAM και του σκυροδέματος. Μια μείωση κατά 50% της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής συνάφειας κατά 7.5%, χωρίς να επηρεάσει τον τρόπο αστοχίας.

- Η χρήση ινοπλεγμάτων επικαλυμμένων με ρητίνη έχει διπλή επιρροή: (α) στην μεταβολή του τρόπου αστοχίας από ολίσθηση των ινών μέσα από το κονίαμα σε αποκόλληση του IAM στην διεπιφάνεια ινοπλέγματος - κονιάματος και (β) στην αύξηση του φορτίου αστοχίας κατά 75% και 15% (σε σύγκριση με τα αντίστοιχα δοκίμια με ινοπλέγματα μη επικαλυμμένα) για δοκίμια που ήταν ενισχυμένα με μία και δύο στρώσεις, αντίστοιχα.
- Η αγκύρωση μέσω περιτύλιξης με κλειστούς μανδύες IAM (TRM jackets) έχει ως αποτέλεσμα την ουσιαστική αύξηση της δύναμης συνάφειας (μέχρι 28% και 45% για 3 και 4 στρώσεις IAM, αντίστοιχα), εμποδίζοντας την πρόωρη αποκόλληση από το υπόστρωμα σκυροδέματος.

7. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

7.1 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με όσα παρουσιάστηκαν στην παρούσα εργασία, τα Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα μπορούν να θεωρηθούν ένα ελπιδοφόρο σύστημα ενίσχυσης για την δομική αναβάθμιση δομικών μελών οπλισμένου σκυροδέματος και τοιχοποιίας.

- Τα κύρια ευρήματα που διεξήχθη από τη διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς των ΙΑΜ σε εφελκυσμό συνοψίζονται παρακάτω:
 - I. Οι τιμές που προέκυψαν για τα κύρια μηχανικά χαρακτηριστικά (εφελκυστική αντοχή, μέτρο ελαστικότητας) από τις πειραματικές δοκιμές εφελκυσμού που πραγματοποιήθηκαν στα αυτούσια πλέγματα ινών, είναι μικρότερες σε σχέση με αυτές που παρέχει ο κατασκευαστής στο τεχνικό φυλλάδιο του προϊόντος. Αυτή η μείωση οφείλεται το γεγονός ότι τα μηχανικά χαρακτηριστικά που δίνονται απ' τους κατασκευαστές αφορούν την ίνα καθαυτή, και όχι τον κλώνο ινών, πόσο μάλλον το πλέγμα ινών. Αυτό συμφωνεί με τις μελέτες των Hegger (1998), Hegger (2001), Curbach (2003), οι οποίοι έδειξαν ότι η εφελκυστική αντοχή των ινών είναι μεγαλύτερη από αυτή των κλώνων ινών, και επίσης, η εφελκυστική αντοχή των κλώνων ινών είναι μεγαλύτερη από αυτή των ινοπλεγμάτων.
 - II. Βάσει των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις δοκιμές εφελκυσμού, τόσο στα αυτούσια πλέγματα ινών όσο και στα σύνθετα στοιχεία ΙΑΜ, παρατηρήθηκε, ότι η εφελκυστική αντοχή του ινοπλέγματος ελαφρύτερου άνθρακα (CL) είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτή του βαρύτερου άνθρακα (CH). Συγκεκριμένα, οι ίνες του ινοπλέγματος βαρύτερου άνθρακα (CH) έχουν κατά 20% μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή από τις ίνες του ελαφρύτερου άνθρακα (CL), σύμφωνα με το τεχνικό φυλλάδιο προϊόντος. Ωστόσο, βάση των πειραματικών αποτελεσμάτων προέκυψε η απόκριση εφελκυσμού του ινοπλέγματος ελαφρύτερου άνθρακα (CL) είναι ελαφρώς καλύτερη σε σύγκριση με το ινοπλέγμα βαρύτερου άνθρακα (CH). Επίσης, ενώ και οι δύο τύποι άνθρακα έχουν την ίδια τιμή του μέτρου ελαστικότητας, πάλι προέκυψε ότι το ινοπλέγμα ελαφρού άνθρακα (CL) την

αξιοποιεί καλύτερα. Το γεγονός ότι, το ινόπλεγμα ελαφρύτερου άνθρακα (CL) αξιοποιεί καλύτερα τις ιδιότητες των ινών του σε σχέση με το ινόπλεγμα βαρύτερου άνθρακα (CH), πιθανόν να οφείλεται στην διαφορετική διάταξη της γεωμετρίας που έχουν τα ινοπλέγματα μεταξύ των αποστάσεων των βρόγχων. Αυτό πιθανόν να σχετίζεται με την ανομοιόμορφη κατανομή των τάσεων που λαμβάνουν χώρα κατά την αξονική καταπόνηση. Επίσης, είναι πιθανό να οφείλετε σε άλλα γεωμετρικά μεγέθη που αφορούν τα χαρακτηριστικά των κλώνων ινών (π.χ επιφανειακό βάρος, πυκνότητα κτλ). Το ζήτημα αυτό είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

- III. Οι ιδιότητες εφελκυσμού των αυτούσιων ινοπλεγμάτων που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές ήταν περίπου ίδιες με εκείνες που προέκυψαν από τα πειράματα εφελκυσμού του σύνθετου στοιχείου IAM. Όπως αναφέρθηκε και την ενότητα 5.2, οι τιμές που λήφθηκαν από τις πειραματικές δοκιμές των σύνθετων στοιχείων IAM αφορούν τα αποτελέσματα του τρίτου κλάδου της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης και αντιπροσωπεύουν τη ρηγματωμένη συμπεριφορά των δοκιμίων (Σχήμα 5.4). Τα αποτελέσματα, δηλαδή, αφορούν το στάδιο που η ανάλυση των εφελκυστικών δυνάμεων γίνεται αποκλειστικά από το ινόπλεγμα (αφού το κονίαμα έχει ρηγματωθεί). Επομένως, θα μπορούσαν και οι δύο δοκιμές να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων εφελκυσμού του IAM ως σύνθετου υλικού. Βέβαια, συνίσταται περαιτέρω διερεύνηση επί του θέματος αυτού.
- IV. Η αύξηση του αριθμού των στρώσεων του σύνθετου στοιχείου IAM από μία σε δύο, είχε ως αποτέλεσμα την μείωση της εφελκυστικής αντοχής κατά 4% και την αύξηση τη εφελκυστικής παραμόρφωσης κατά 4%.
- V. Επιπρόσθετα, όλα τα υβριδικά ινοπλέγματα FORMAX παρουσίασαν περίπου την ίδια συμπεριφορά εφελκυσμού (δηλαδή εφελκυστική αντοχή, εφελκυστική παραμόρφωση και το μέτρο ελαστικότητας) με εκείνες του βαρύτερου άνθρακα(CH), από τα οποία και αποτελούνταν οι κλώνοι ινών στην διαμήκη διεύθυνση (διεύθυνση αξονικής καταπόνησης). Μια τέτοια συμπεριφορά έδειξε ότι η επίδραση των υλικών της ίνας (υάλου) και η απόσταση μεταξύ των κλώνων ινών (10, 20 ή 40 mm) στην εγκάρσια διεύθυνση στις ιδιότητες εφελκυσμού δεν ήταν σημαντική. Αυτή η παρατήρηση, θα μπορούσε ενδεχομένως να οδηγήσει σε μείωση του κόστους του πλέγματος, ειδικά αν χρησιμοποιούνται χαμηλού κόστους ίνες στην εγκάρσια διεύθυνση.

- Τα κύρια ευρήματα που διεξήχθη από τη διερεύνηση της συνάφειας μεταξύ IAM και υποστρώματος σκυροδέματος συνοψίζονται παρακάτω.
 - I. Με την αύξηση του μήκους του συνάφειας ή του αριθμού των στρώσεων, το φορτίο αστοχίας αυξάνεται με μη αναλογικό τρόπο. Ωστόσο, μετά από ένα ορισμένο μήκος συνάφειας, η αύξηση του φορτίου αστοχίας παύει να είναι σημαντική. Αυτό το μήκος συνάφειας ονομάζεται *ενεργό μήκος συνάφειας* και κυμαίνεται από 200 mm έως 300 mm για τον αριθμό των στρώσεων που εξετάστηκαν (έως και τέσσερα) και για το υλικό του ινοπλέγματος που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη (ίνες βαρύ άνθρακα (CH)).
 - II. Για το ίδιο μήκος συνάφειας, η αύξηση του αριθμού των στρώσεων IAM είχε ως αποτέλεσμα την μη αναλογική αύξηση του φορτίου αστοχίας. Η αύξηση ήταν πιο έντονη στην μετάβαση από μία σε δύο στρώσεις, ενώ για τρεις και τέσσερις στρώσεις καθίσταται σταδιακά λιγότερο σημαντική.
 - III. Ο αριθμός των στρώσεων έχει σημαντική επίπτωση στον τρόπο αστοχίας. Για μία και δύο στρώσεις IAM, ο τρόπος αστοχίας ήταν η ολίσθηση των ινών μέσα από το κονίαμα, ενώ για τρεις και τέσσερις στρώσεις IAM ο τρόπος αστοχίας ήταν η αποκόλληση του IAM στη διεπαφή σκυροδέματος - κονιάματος περιλαμβάνοντας μαζί και μία λεπτή στρώση της επικάλυψης σκυροδέματος. Αυτός ο τρόπος αστοχίας είναι πολύ συνηθισμένος στην περίπτωση που το FRP συνδέεται με σκυρόδεμα (Yao et al., 2005)
 - IV. Η επιρροή των μεθόδων προετοιμασίας επιφανειών σκυροδέματος (ήπια εκτράχυνση και σχηματισμός πλέγματος αυλάκων ή αμμοβολής) ήταν πολύ περιορισμένη στα χαρακτηριστικά συνάφειας, όσον αφορά το φορτίο αστοχίας και τον τρόπο αστοχίας, υποδηλώνοντας ότι και οι δύο μέθοδοι προετοιμασίας του υποστρώματος ήταν κατάλληλες.
 - V. Η επίδραση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος στο φορτίο αστοχίας δεν ήταν σημαντική. Μια μείωση κατά 50% της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση του φορτίου αστοχίας, η οποία κατά μέσο όρο ήταν περίπου ίση με 7.5%, καθώς και τον ίδιο τρόπο αστοχίας.

- VI. Η επικάλυψη του ινοπλέγματος με ρητίνη είχε διπλή επίδραση: (α) στη μεταβολή του τρόπου αστοχίας από ολίσθηση των ινών μέσα από το κονίαμα, σε αποκόλληση του IAM στη διεπιφάνεια ινοπλέγματος - κονιάματος (διαστρωματική απόσχιση). και (β) στην αύξηση του φορτίου αστοχίας κατά 75% και 15% (σε σύγκριση με τα ινοπλέγματα που ήταν χωρίς επικάλυψη) για τα δοκίμια που είχαν μία και δύο στρώσεις IAM, αντίστοιχα.
- VII. Η αγκύρωση μέσω περιτύλιξης με κλειστούς μανδύες IAM (TRM jackets) έχει ως αποτέλεσμα σημαντική αύξηση της αντοχής συνάφειας (έως 28% και 45% για 3 και 4 στρώσεις IAM, αντίστοιχα), εμποδίζοντας την πρόωρη αποκόλληση από το υπόστρωμα σκυροδέματος.

Σύμφωνα με τα παραπάνω ευρήματα, για να βελτιωθούν οι συνθήκες συνάφειας μεταξύ IAM και σκυροδέματος, μπορούν να ληφθούν υπόψη οι ακόλουθες προτάσεις: (α) αποτροπή της πρόωρης ολίσθησης των ινών μέσα από το κονίαμα: αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την παροχή περισσότερων από δύο στρώσεων IAM, (β) χρησιμοποιώντας ινοπλέγματα επικαλυμμένα με ρητίνη όταν αυτό είναι δυνατό, και (γ) αγκύρωση μέσω περιτύλιξης με κλειστούς μανδύες IAM, όπου αυτό είναι εφικτό.

7.2 Προτάσεις μελλοντική έρευνα

Ακολουθούν ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

- Σύμφωνα με τα πειράματα μονοαξονικού εφελκυσμού, η εφελκυστική αντοχή μιας μονής ίνας είναι μεγαλύτερη από αυτή του ινοπλέγματος. Αυτό συμφωνεί με τις μελέτες των Hegger (1998), Hegger (2001), Curbach (2003). Συνεπώς, προτείνεται περαιτέρω διερεύνηση του ποσοστού διαφοράς μεταξύ της εφελκυστικής αντοχής των ινών και του ινοπλέγματος. Αυτή η διαφορά πιθανόν να σχετίζεται και με την διαφορετική διάταξη των κλώνων ινών του ινοπλέγματος, δηλαδή την απόσταση μεταξύ των κενών των βρόχων, καθώς και με τον τρόπο πλέξης του ινοπλέγματος.
- Ένα ινόπλεγμα μπορεί να αποτελείται από ίνες οι οποίες έχουν υψηλότερη εφελκυστική αντοχή από τις ίνες κάποιου άλλου ινοπλέγματος. Ωστόσο, το πως θα αποκριθούν τα πλέγματα ινών σε εφελκυστική καταπόνηση δεν εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες των ινών

τους, αλλά επηρεάζεται ελαφρώς και από την διάταξη των κλώνων ινών τους, δηλαδή από τις αποστάσεις μεταξύ των κενών των βρόχων. Συνεπώς, προτείνεται περαιτέρω μελέτη της γεωμετρικής διάταξης των κλώνων ινών του ινοπλέγματος, δηλαδή της απόστασης μεταξύ των κενών των βρόχων, καθώς και άλλων χαρακτηριστικών του ινοπλέγματος (π.χ. πυκνότητα των κλώνων ινών, διαφορετικοί τρόποι πλέξης του ινοπλέγματος), για την βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων του.

- Στις δοκιμές συνάφειας του IAM με το υπόστρωμα σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε ένας τύπος ινοπλέγματος, το CH. Συνιστάται περαιτέρω διερεύνηση της συνάφειας IAM – σκυροδέματος για άλλα υλικά πλεγμάτων ινών καθώς και για ινοπλέγματα με διαφορετική διάταξη κλώνων ινών κλώνων.
- Στις πειραματικές δοκιμές συνάφειας μεταξύ του IAM και του υποστρώματος σκυροδέματος, το υλικό της μήτρας που χρησιμοποιήθηκε ήταν το ίδιο. Προτείνεται περαιτέρω διερεύνηση της συνάφειας του IAM με το σκυρόδεμα, έχοντας ως παράμετρο διαφορετικά είδη μήτρας
- Η αγκύρωση μέσω περιτύλιξης με κλειστούς μανδύες IAM (TRM jackets) που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές συνάφειας μεταξύ του IAM και του υποστρώματος από σκυρόδεμα ήταν πολύ αποτελεσματικές, καθώς καθυστέρησαν σημαντικά ή/και εμπόδισαν την αποκόλληση των IAM από το υπόστρωμα σκυροδέματος. Επομένως, μια ποικιλία παραμέτρων, συμπεριλαμβανομένης της γεωμετρίας των αγκυρών, του υλικού των αγκυρών ή του μήκους της ενσωματώσεως, θα μπορούσε να μελετηθεί σε μια προσπάθεια να βελτιστοποιηθούν οι αγκυρώσεις με βάση των IAM.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

➤ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ανδρεάδη, Α.-Ι. (2011), *Πειραματική Διερεύνηση Μηχανικής Συμπεριφοράς Στοιχείων από Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας σε Μονοαξονικό Εφελκυσμό: Διατριβή Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών.*

Δρίτσος Σ. Η. (2006), *Ενισχύσεις/Επισκευές Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα*, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών

Κόλλια Αικατερίνη (2015). *Ανάπτυξη Ινοπλεγμάτων σε Νανοδομημένη Ανόργανη Μήτρα*, Διπλωματική Διπλώματος Ειδίκευσης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα

Κούτας Α. Ν. (2010), *Ενίσχυση πλακοδοκών οπλισμένου σκυροδέματος σε τέμνουσα με μανδύες ινολισμένων πολυμερών και αγκύρια ινών: Διατριβή Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα*

Κούτας Ν. Α. (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 υποστλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος με νέα υλικά: Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας, οπλισμοί σύνθετων υλικών ή ανοξειδώτου χάλυβα σε εγκοπές, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.*

Παπανικολάου Αικατερίνη Γ., Τριανταφύλλου Αθανάσιος Χ., Παπαντωνίου Ι. και Μπαλιούκος Χρ. (2009). *Σύνθετα υλικά ανόργανης μήτρας (IAM) για την ενίσχυση πλακών οπλισμένου σκυροδέματος*, 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Πάφος, Κύπρος, 21-23 Οκτωβρίου, 2009.

Παπαντωνίου Ι. Χ. (2007), *Πειραματική διερεύνηση στοιχείων σκυροδέματος επί/εντός προκατασκευασμένων τύπων από Ινοπλέγματα Ανόργανης Μήτρας*, Διατριβή Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.

Τριανταφύλλου Αθανάσιος Χ. (2006). *Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος και Φέρουσας Τοιχοποιίας με Σύνθετα Υλικά*, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα

Τριανταφύλλου, Α. (2004). *Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος με Σύνθετα Υλικά (Ινοπλισμένα Πολυμερή)*. 2η έκδοση Πάτρα: [Α. Χ. Τριανταφύλλου].

Τριανταφύλλου, Α. (2013). *Δομικά Υλικά*. 10η έκδοση Πάτρα: [Α. Χ. Τριανταφύλλου].

Τριανταφύλλου Χ. Αθανάσιος (2008), *Μηχανική των υλικών*, 8η Έκδοση, Βιβλιοπωλείο Παπασωτηρίου, Προσωπική επιμέλεια έκδοσης, Πάτρα .

Τριανταφύλλου Χ. Αθανάσιος, *Νέα γενιά δομικών υλικών για την ενίσχυση κατασκευών: Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM)*, Πανεπιστήμιο Πατρών .

Τριανταφύλλου, Αθ., Χ., Παπανικολάου, Αικ., Γ., Μπουρνάς, Δ. και Λόντου, Π., (2006). *Νέα γενιά σύνθετων υλικών ανόργανης μήτρας (TRM) για την ενίσχυση κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος*, Πρακτικά Συνεδρίου 15ου Συνέδριου Σκυροδέματος, 25-27 Οκτ. 2006, Αλεξανδρούπολη.

➤ ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Bartos, P., 1981. *Bond in fibre reinforced cements and concretes. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, August, 3(3), pp. 159-177

Ombres L. (2015) *Analysis of the bond between Fabric Reinforced Cementitious Mortar (FRCM) strengthening systems and concrete*, Composites: PartB69, pp. 418-42

Ortlepp R., U. Hampel and M. Curbach (2006) *A new approach for evaluating bond capacity of TRC strengthening*, *Cement & Concrete Composites* 28, pp. 589-597

Raouf S. M. (2017). *Bond between Textile Reinforced Mortar (TRM) and Concrete Substrate*. Doctor of Philosophy in Civil and structural Engineering: The University of Nottingham

Sneed L. H., T. D'Antino and Chr. Carloni (2014), *Investigation of Bond Behavior of PBO Fiber-Reinforced Cementitious Matrix Composite-Concrete Interface*, *ACI Materials Journal*, V. 111, No. 1-6, January-December 2014

Tetta.Z (2017). *Shear strengthening of concrete members with Textile Reinforced Mortar (TRM)*. Doctor of Philosophy in Civil and structural Engineering: The University of Nottingham

Tetta Z, Koutas L, and Bournas DA, (2015). *Textile-Reinforced Mortar (TRM) versus Fiber-Reinforced Polymers (FRP) in Shear Strengthening of Concrete Beams*, 2nd Year Plenary Meeting of Cost Action TUI207 – Next Generation Design Guidelines for Composites in Construction, May 2015, Lecce, Italy

Triantafillou, T. C., Papanicolaou, C. G., Zissimopoulos, P., and Laourdekis, T., (2006), *Concrete Confinement with Textile-Reinforced Mortar Jackets*, ACI Structural Journal, V. 103, No. 1.

Triantafillou, T. C. and Papanicolaou, C. G., (2006), *Shear Strengthening of Reinforced Concrete Members with Textile Reinforced Mortar (TRM) Jackets*, RILEM Materials and Structures, V. 39, No. 1

Bournas, D. A. & Triantafillou, T. C. 2013. *Biaxial bending of reinforced concrete columns strengthened with externally applied reinforcement in combination with confinement*. ACI Structural Journal, 110 (2), 193-203.

Bournas, D. & Triantafillou, T. 2011. *Bond strength of lap-spliced bars in concrete confined with composite jackets*. *Journal of Composites for Construction*, 15 (2), 156-167.