

ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ Σ.Τ.Ε.
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΤΙΤΛΟΣ: ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ ΜΕ ΥΑΛΟΝΗΜΑΤΑ, ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΑ,
ΑΝΘΡΑΚΟΛΑΜΕΣ ΚΑΙ ΡΗΤΙΝΕΣ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΓΚΡΕΤΣΑ ΕΙΡΗΝΗ
ΦΛΑΜΙΑΤΟΣ ΜΙΧΑΗΛ

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΔΡ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΚΑΚΑΒΑΣ

ΠΑΤΡΑ 2017

ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ Σ.Τ.Ε.
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΤΙΤΛΟΣ: ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ ΜΕ ΥΑΛΟΝΗΜΑΤΑ, ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΑ,
ΑΝΘΡΑΚΟΛΑΜΕΣ ΚΑΙ ΡΗΤΙΝΕΣ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΓΚΡΕΤΣΑ ΕΙΡΗΝΗ
ΦΛΑΜΙΑΤΟΣ ΜΙΧΑΗΛ

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΔΡ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΚΑΚΑΒΑΣ

ΠΑΤΡΑ 2017

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολείται με ενισχύσεις τοιχοποιιών με σύνθετα υλικά και εφαρμογή των σύνθετων υλικών σε κατασκευές κτιρίων. Το πρώτο κεφάλαιο παραθέτει γενικά στοιχεία για τα σύνθετα υλικά-ίνες και ρητίνες. Πιο αναλυτικά περιγράφει τα διάφορα είδη σύνθετων υλικών, την σύνθεση ινών που χρησιμοποιούνται στην Παρασκευή των σύνθετων υλικών. Ιδιαίτερως, περιγράφει τις σύνθετες ίνες (π.χ. ίνες υάλου, άνθρακα, πολυμερικές, μεταλλικές, κεραμικές και ίνες από φυσικά ορυκτά. Επίσης, αναλύεται η σύνθεση ρητινών (οργανικών, μεταλλικών, κεραμικών) οι οποίες χρησιμοποιούνται για την παρασκευή των σύνθετων υλικών. Τέλος, στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφεται ο τρόπος παρασκευής σύνθετων υλικών από ίνες και ρητίνες, τα οποία χρησιμοποιούνται για επισκευή δομικών στοιχείων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παραθέτονται τα γενικά στοιχεία ενισχύσεων δομικών κατασκευών με σύνθετα υλικά. Παρουσιάζεται ο τρόπος παρασκευής ινοπλισμένων πολυμερών και οι χρήσεις των σύνθετων υλικών στις επισκευές των κτιρίων. Επίσης παρουσιάζονται έργα και κτίρια στην Ελλάδα ενισχυμένα με σύνθετα υλικά.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διαδικασίες ενίσχυσης και επισκευής των ιστορικών κτιρίων με τα FRPs. Επίσης αναλύονται οι βλάβες και οι αιτίες βλαβών των κτιρίων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται εφαρμογές ενίσχυσης κατασκευής με το πρόγραμμα FRPs.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ (COMPOSITE MATERIALS) **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**

1.1 Εισαγωγή-Ορισμός	10
1.2: Ταξινόμηση των Σύνθετων Υλικών	11
1.3: Ίνες	13
1.3.1: Ίνες Γυαλιού (GLASS FIBERS)	13
1.3.2: Ίνες Άνθρακα (CARBON FIBERS)	17
1.3.3: Ίνες Πολυμερούς (POLYMER FIBERS).....	21
1.3.4: Μεταλλικές Ίνες	23
1.3.5: Κεραμικές Ίνες	24
1.3.6: Τριχίτες (WHISKERS)	26
1.3.7: Ίνες Φυσικών Ορυκτών	27
1.3.8: Σύγκριση Ενισχυτικών Ίνων	27
1.4: Μήτρα	29
1.4.1: Οργανικές Μήτρες	30
1.4.2: Μεταλλικές Μήτρες.....	31
1.4.3: Κεραμικές Μήτρες	32
1.5: Επιλογή Ίνων και Μήτρας στην κατασκευή Ινώδων Σύνθετων.....	33
1.6: Μέθοδοι μορφοποίησης Σύνθετων Υλικών	37

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ.....

2.1 Ενίσχυση κατασκευών με ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας	45
2.2 Σύγκριση μεθόδων FRP και ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας	46
2.3 Διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου ενίσχυσης με ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα	48
2.4 Μηχανική Συμπεριφορά Στοιχείων Ενισχυμένων με Σύνθετα Υλικά	50
2.5 Ενίσχυση Έναντι Κάμψης.....	50

2.6 Ενίσχυση Τοιχοποιίας με Σύνθετα Υλικά	53
2.7 Ενίσχυση κατασκευών με προηγμένα υλικά	56
2.8 Κανόνες Εφαρμογής σύνθετων υλικών	61
2.9 Ενίσχυση Οπλισμένου Σκυροδέματος Κάμψη	61
2.10 Ενίσχυση άλλων Κατασκευών	65
2.11 Ενισχύσεις κατασκευών με σύνθετα υλικά στην Ελλάδα.....	65
2.12 Έργα υποδομής στην Ελλάδα	71
2.13 Διατηρητέα κτίρια	74
2.14 Στρατιωτικές και ευαίσθητες εγκαταστάσεις.....	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο : ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΚΤΙΡΙΑ: ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΣΚΕΥΗ ΤΟΥΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ F.R.P.	76
3.1 Εισαγωγή.....	77
3.2 Ανάλυση βλαβών	77
3.3 Παράγοντες φθοράς και αιτίες προξένησης βλαβών.....	79
3.4 Έρευνα και ανάλυση	80
3.5 Γενικά ενισχύσεις με F.R.P. σε τοιχοποιίες ιστορικών κτιρίων	82
3.6 Ιστορικά κτίρια και F.R.P.	84
3.7 Ενίσχυση ιστορικών κτιρίων με F.R.P.	85
3.8 Συμπεράσματα.....	88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο :ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ F.R.P.	89
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	110

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1: Ομάδες σύνθετων υλικών (μεταλλικά, πολυμερικά, κεραμικά)	11
Εικόνα 2: Τύποι διάταξης των ινών: (α) μονοδιευθυντικές ίνες, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με πλέξη ύφανσης και (δ) ίνες σε τρισσορθώγνια πλέξη	12
Εικόνα 3: Γενική ταξινόμηση των συνθέτων υλικών.....	12
Εικόνα 4: Τμήμα Περιοδικού Πίνακα	13
Εικόνα 5: Δομή γυαλιού.....	13
Εικόνα 6: Παραγωγή ενισχυτικών ινών γυαλιού	15
Εικόνα 7: Δράση οργανοπυριτικών ενώσεων του τύπου $X_3Si(CH_2)_nY$	17
Εικόνα 8: Γραφική δομή ατόμων άνθρακα σε μορφή εξαγωνικών επιπέδων.....	18
Εικόνα 9: Τυπική δομή ανθρακονήματος.....	18
Εικόνα 10: Παραγωγή ενισχυτικών ινών άνθρακα	19
Εικόνα 11: Δομή ίνας Kevlar	22
Εικόνα 12: Διάταξη παραγωγής ινών πολυαμιδίου	23
Εικόνα 13: Παραγωγή ινών βορίου με αναγωγή αλογονιδίου του βορίου	24
Εικόνα 14: (α) Χαρακτηριστικές καμπύλες σ-ε , (β) Συσχετισμός ειδική αντοχής και ειδικής ακαμψίας για διάφορα υλικά ενισχυτικών ινών.....	28
Εικόνα 15: Θερμοκρασιακά όρια χρήσης των υλικών	30
Εικόνα 16: Επίδραση του προσανατολισμού των ινών στην αντοχή σε εφελκυσμό συνθέτου υλικού εποξειδικής μήτρας με ίνες E-γυαλιού.....	35
Εικόνα 17: Ασυνεχής μορφοποίηση συνθέτου: (α) χειροποίητη στρώση, (β) χύτευση θαλάμου πίεσης, (γ) χύτευση σε διαιρετό καλούπι	38
Εικόνα 18: Συνεχής μορφοποίηση συνθέτου με περιέλιξη νήματος (filament winding) (α) Διάταξη μορφοποίησης, (β) Σχηματική παράσταση διαδικασίας	39
Εικόνα 19: Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheet moulding process, SMC) (α) Διάταξη μορφοποίησης, (β) Σχηματική παράσταση διαδικασίας.....	40
Εικόνα 20: Μορφοποίηση με εμβάπτιση (pultrusion) (α) Διάταξη μορφοποίησης, (β) Σχηματική παράσταση διαδικασίας	41
Εικόνα 21: Συνδιέλαση (co-extrusion)	42
Εικόνα 22: Μορφοποίηση με: (α) χύτευση με τη βοήθεια τριχοειδών φαινομένων, (β) πίεση βαρύτητας, (γ) εφαρμογή κενού και (δ) συνεχή χύτευση.....	42

Εικόνα 23: Μορφοποίηση συνθέτων μεταλλικής μήτρας με συμπίεση.....	42
Εικόνα 24: Ινόπλεγμα δύο διευθύνσεων.....	49
Εικόνα 25: Επάλειψη επιφάνειας με κονίαμα.....	49
Εικόνα 26: Περιτύλιξη πλέγματος.....	49
Εικόνα 27: Τελική Επίστρωση με Τσιμεντοκονία.....	50
Εικόνα 28: Κάμψη 2 σημείων αμφιέριστων δοκών με τοποθετημένο μανδύα σε ανόργανη μήτρα.....	51
Εικόνα 29: Θραύση και αποκόλληση ινών από το δοκίμιο.....	51
Εικόνα 30: Αστοχία δοκιμίου λόγω ανάπτυξης χιαστί ρωγμών.....	54
Εικόνα 31: Διαγράμματα Δύναμης-Μετατόπισης για:.....	54
Εικόνα 32: Αστοχία δοκιμίου λόγω θραύσης των ινών.....	55
Εικόνα 33: Διαγράμματα Δύναμης-Μετατόπισης για:.....	56
Εικόνα 34: Ίνες άνθρακα, γυαλιού και αραμιδίου.....	57
Εικόνα 35: Ενδεικτικές μορφές συνθέτων υλικών: ράβδοι οπλισμού, τένοντες προέντασης, λωρίδες ενίσχυσης, σπειροειδείς οπλισμοί.....	57
Εικόνα 36: Ενίσχυση δοκού σε κάμψη με πρόσθετο εφελκυσμένο οπλισμό και σε διάτμηση με υφάσματα ινών στα άκρα.....	58
Εικόνα 37: Ενίσχυση υποστυλωμάτων μέσω μανδύα σύνθετων υλικών με στόχο την αύξηση της περίσφιγξης και της αντοχής σε τέμνουσα.....	58
Εικόνα 38: Ενίσχυση υποστυλωμάτων, δοκών και κόμβων με υφάσματα σύνθετων υλικών.....	59
Εικόνα 39: Ενίσχυση προβόλου με υφάσματα ινών.....	59
Εικόνα 40: Ενίσχυση τοιχοποιίας για τέμνουσα εντός του επιπέδου της.....	60
Εικόνα 41: Περίσφιγξη υποστηλωμάτων από φέρουσα τοιχοποιία.....	60
Εικόνα 42: Διάταξη συνθέτων υλικών για ενίσχυση έναντι τέμνουσας: (α) κλειστός μανδύας υποστυλώματος, (β) ενίσχυση πλακοδοκού με μανδύα ανοικτού τύπου, (γ) αγκύρωση λωρίδων στη θλιβόμενη ζώνη.....	63
Εικόνα 43: Περίσφιγξη στα άκρα υποστυλώματος με στόχο την αύξηση της ικανότητας παραμόρφωσης.....	64
Εικόνα 44: Περίσφιγξη στα άκρα υποστυλώματος με στόχο την αποτροπή αστοχίας λόγω ανεπαρκούς μήκους μάτισης.....	64

Εικόνα 45: Ενίσχυση των κυκλικών υποστυλωμάτων του γενικού νοσοκομείου της Σπάρτης.....	66
Εικόνα 46: Ξενοδοχείο “Κάνιγκος 21”, Αθήνα.....	67
Εικόνα 47:Εφαρμογή πυροπροστασίας.....	68
Εικόνα 48:Κτίριο στην Διονυσίου Αεροπαγίτου.....	68
Εικόνα 49:Ενίσχυση υποστηλωμάτων.....	69
Εικόνα 50:Βλάβες λόγω σεισμού σε κτίρια γραφείων	69
Εικόνα 51: Μαρίνα Ζέας, ενίσχυση πλακοδοκών.....	70
Εικόνα 52: Γέφυρα Ρίο-Αντίρριο	72
Εικόνα 53: Γέφυρα σιδηροδρομικού σταθμού, Μαρούσι.....	72
Εικόνα 54: Γέφυρα στον Εύηνο ποταμό	73
Εικόνα 55: Εγκαταστάσεις Canoe-slalom	73
Εικόνα 56: Ενίσχυση κτιρίου νομικής σχολής Αθηνών	74
Εικόνα 57: Ενίσχυση σχολείου από φέρουσα λιθοδομή	75
Εικόνα 58:Μη ενισχυμένα(αριστερά) και ενισχυμένα (δεξιά) υποστηλώματα σε δοκιμές εκρήξεων.....	76
Εικόνα 59:Πειράματα εκρήξεων σε μη ενισχυμένο(αριστερά) και ενισχυμένο (δεξιά) τοίχο	76
Εικόνα 60:Ρηγματώσεις εφελκυσμού	78
Εικόνα 61:Ρηγματώσεις θλίψης.....	79
Εικόνα 62:Μεταβολές στην ακαμψία και πρόσθετες καθιζήσεις με ταυτόχρονη μετατόπιση τμημάτων τοιχοποιίας.....	81
Εικόνα 63:Μείωση επικίνδυνων τάσεων επαφής στην διεπιφάνεια.....	84
Εικόνα 64:Εφαρμογή των ανθρακονημάτων σε παλιά μικρή εκκλησία	85
Εικόνα 65:Ενίσχυση τοιχοποιίας ιστορικού κτιρίου με ινοπλισμένων πολυμερών....	86
Εικόνα 66:Ενίσχυση στην βάση του τρούλου με CFRP	86
Εικόνα 67:Ενίσχυση με ανθρακοϋφάσματα.....	87
Εικόνα 68:Ενίσχυση θόλου	87
Εικόνα 69:Σκαρίφημα γέφυρας σχεδιασμένο με το AUTOCAD.....	89
Εικόνα 70:Διαστασιολόγηση πεδילוδοκού με ανθρακολάμες.....	96

Εικόνα 71:Υπολογισμός στρώσεων ανθρακολαματων με το πρόγραμμα FRP.....	96
Εικόνα 72:Επίδραση της επιφανείας διατομής επί του αριθμού των λωρίδων.	97
Εικόνα 73:Υπολογισμός στρώσεων ανθρακολαμών.....	99
Εικόνα 74:Αριθμός στρώσεων σε συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας του FRP.	100
Εικόνα 75:Ανθρακούφασμα.....	101

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1:Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού	14
Πίνακας 2: Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών άνθρακα	20
Πίνακας 3: Χαρακτηριστικές ιδιότητες των ινών Kevlar.....	21
Πίνακας 4: Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων ινών SiC (μέσες τιμές)	25
Πίνακας 5: Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων και τριχιτών από SiC και Al ₂ O ₃	26
Πίνακας 6: Σύγκριση θερμικής ευστάθειας ινών	28
Πίνακας 7: Σύγκριση παραμόρφωσης θραύσης ινών	29
Πίνακας 8: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μεταλλικών μητρών (έναντι των οργανικών μητρών).....	31
Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά παραδείγματα συνθέτων υλικών οργανικής μήτρας	36
Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά παραδείγματα συνθέτων υλικών μεταλλικής μήτρας.....	36
Πίνακας 11: Χαρακτηριστικά παραδείγματα συνθέτων υλικών κεραμικής μήτρας.....	36

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ (COMPOSITE MATERIALS)¹

1.1 Εισαγωγή-Ορισμός

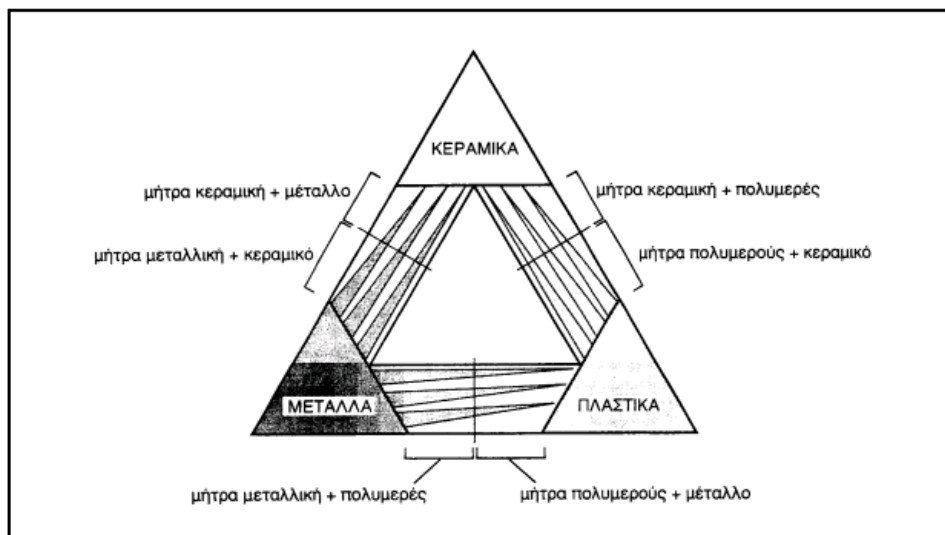
Για ένα σύστημα ο όρος “σύνθετο” σημαίνει ότι τούτο αποτελείται από δύο ή περισσότερα διακριτά μέρη. Από γενική άποψη, λοιπόν, ένα υλικό αποτελούμενο από δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά ή φάσεις, μπορεί να χαρακτηριστεί ως σύνθετο υλικό (composite material).

Πιο ειδικά, σήμερα, ως σύνθετα αναγνωρίζονται εκείνα τα υλικά, τα οποία συντίθενται από επιμέρους υλικά με σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ τους, ενώ και το ίδιο το σύνθετο υλικό έχει επίσης σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες των συστατικών του. Για να καταταχθεί ένα υλικό στην κατηγορία των σύνθετων, θα ακολουθείται ο εξής κανόνας: Το υλικό πρέπει να προκύπτει ως συνδυασμός συστατικών μερών, στα οποία οι ιδιότητες του ενός από τα μέρη αυτά να είναι σημαντικά μεγαλύτερες από του άλλου (τουλάχιστον 5πλάσιες) και η κατ’ όγκο περιεκτικότητα του ενός να μην είναι πολύ μικρή (> 10 %).

ΟΡΙΣΜΟΣ (Agarwal–1990): Σύνθετα είναι τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους. Το ένα, από τα συστατικά μέρη, χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης.

Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται ο συνδυασμός ανά δύο των βασικών οικογενειών υλικών (μεταλλικά, πολυμερικά και κεραμικά υλικά) και οι ομάδες συνθέτων που προκύπτουν.

¹ Σύνθετα Υλικά-Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π



Εικόνα 1: Ομάδες σύνθετων υλικών (μεταλλικά, πολυμερικά, κεραμικά)

1.2: Ταξινόμηση των Σύνθετων Υλικών

Ανάλογα με τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης, τα σύνθετα κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- **Ινώδη σύνθετα** (fibrous composites): Με ενίσχυση ινών εμποτισμένων σε υλικό μήτρας.
- **Στρωματικά σύνθετα** (laminated composites): Με επάλληλες στρώσεις υλικών.
- **Κοκκώδη σύνθετα** (particulate composites): Με ενίσχυση σωματιδίων διασκορπισμένων στο υλικό της μήτρας.

Τα ινώδη σύνθετα υλικά διακρίνονται περαιτέρω ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη διάταξη των ινών μέσα στη μήτρας. Σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή τα ινώδη σύνθετα διακρίνονται σε:

- **Μονοδιευθυντικά σύνθετα**, στα οποία οι ίνες έχουν όλες την ίδια διεύθυνση.
- **Πολυδιευθυντικά σύνθετα**, στα οποία, οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις.

Η ιδιότητα αυτή οδηγεί άμεσα σε ταξινόμηση των πολυδιευθυντικών συνθέτων στις ακόλουθες υπο-ομάδες, βλ. εικόνα 2:

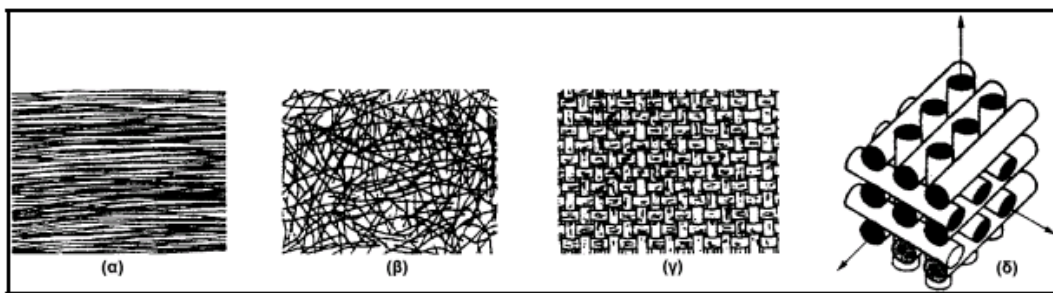
- *Σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης.*
- *Σύνθετα με ίνες σε πλέξη ύφανσης.*

- Σύνθετα με ίνες σε τρισσορθογώνια ύφανση.

Μία επιπλέον διάκριση των ινωδών συνθέτων στηρίζεται στο λόγο μήκους προς διάμετρο (A/d) των ινών, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως:

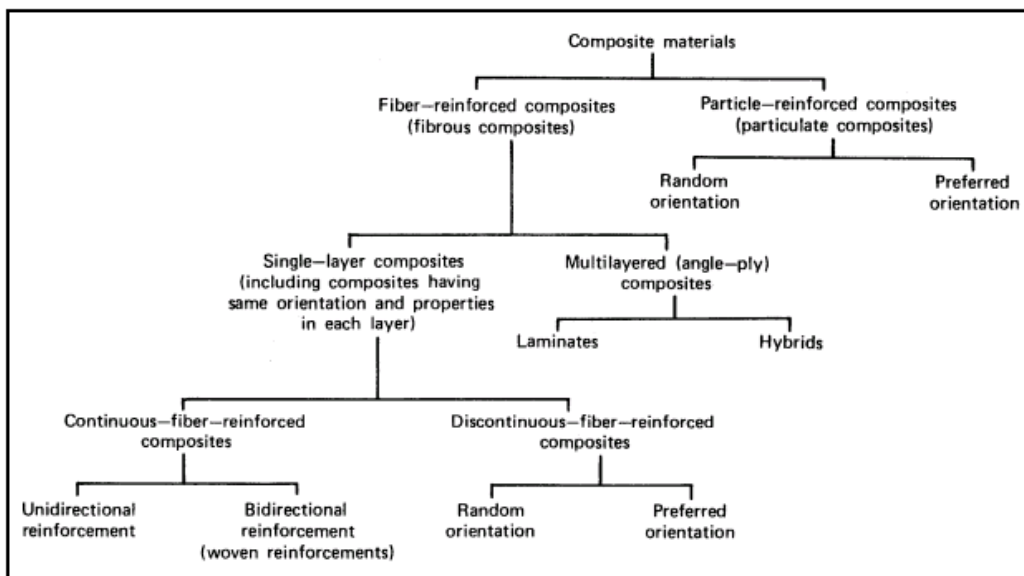
- Συνεχείς ή μεγάλου μήκους ίνες (continuous fibers), όταν είναι $A/d \geq 100$.
- Ασυνεχείς ή κοντές ίνες (discontinuous fibers), όταν είναι $A/d < 100$.
- Νηματίδια ή τριχίτες (whiskers): Με $d < 1 \mu\text{m}$ και $A \cong 100 \mu\text{m}$ (πρόκειται για λεπτούς μονοκρυστάλλους κεραμικού υλικού).

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Οι κοντές ίνες, λόγω του μικρού μήκους τους, δεν χρησιμοποιούνται ως μονοδιευθυντική ενίσχυση, αλλά εφαρμόζονται συνήθως με τη μορφή πλέγματος ινών τυχαίας διεύθυνσης.



Εικόνα 2: Τύποι διάταξης των ινών: (α) μονοδιευθυντικές ίνες, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με πλέξη ύφανσης και (δ) ίνες σε τρισσορθογώνια πλέξη

Με βάση όσα έχουν ήδη αναφερθεί για τις κατηγορίες των συνθέτων υλικών, έχει καθιερωθεί η ταξινόμηση τους, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.

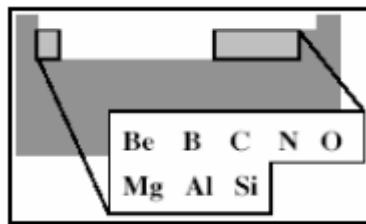


Εικόνα 3: Γενική ταξινόμηση των συνθέτων υλικών

1.3: Ίνες

Προκειμένου οι ίνες να προσφέρουν ικανοποιητική ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας, το υλικό κατασκευής τους επιλέγεται, έτσι ώστε να παρουσιάζει υψηλό μέτρο ελαστικότητας (E), υψηλή τάση θραύσης σε εφελκυσμό (UTS), μεγάλη ακαμψία (stiffness), χαμηλή δυσθραυστότητα (toughness) και επιπλέον να έχει μικρή πυκνότητα (ρ).

Τα περισσότερα ενισχυτικά υλικά βασίζονται κυρίως σε στοιχεία που βρίσκονται στη 2η και 3η περίοδο του Περιοδικού Συστήματος (εικόνα 4).

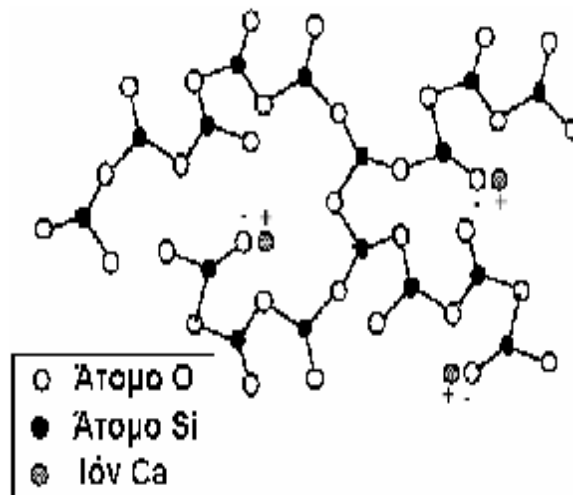


Εικόνα 4: Τμήμα Περιοδικού Πίνακα

1.3.1: Ίνες Γυαλιού (GLASS FIBERS)

Οι ίνες γυαλιού χρησιμοποιήθηκαν στα σύνθετα πρώτης γενιάς (1940) και η χρήση τους συνεχίζεται επιτυχώς μέχρι σήμερα. Είναι από τους πλέον διαδεδομένους τύπους ενισχυτικών ινών στα σύνθετα πολυμερικής μήτρας. Η δομική τους βάση είναι τα οξειδία πυριτίου, ασβεστίου, βορίου, αλουμινίου, κ.ά.. Θεωρούνται από τα πιο φθηνά ενισχυτικά υλικά.

Χαρακτηριστική δομή του γυαλιού παρουσιάζεται στο εικόνα 5.



Εικόνα 5: Δομή γυαλιού

Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση οι ίνες γυαλιού χαρακτηρίζονται ως τύπου E, C και S, των οποίων οι κύριες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες παρουσιάζονται στον Πίν.1.

Πίνακας 1: Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΥΠΟΣ			
	E	C	S	SiO ₂ καθαρή
Χημική σύσταση (%)				
SiO ₂	54	60	65	>99,5
Al ₂ O ₃	16	25	25	-
B ₂ O ₃	8	-	-	-
CaO	17	9	-	-
MgO	5	6	10	-
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	75	80	84	72
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2100-3400	2500-4400	2800-4800	3500-8800
Πυκνότητα (g/cm ³)	2,54	2,50	2,48	2,20
Θερμοκρασία τήξης (°C)	900-1200	1400-1600	1400-1600	1720
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	550	650	650	750

E-glass (E=electrical): Πρόκειται για τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα υαλονήματα με καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, αντοχή και δυσκαμψία, καθώς και πολύ καλή συμπεριφορά στην αλλαγή των καιρικών συνθηκών, αλλά με μέτρια αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια.

C-glass (C=corrosion): Υαλονήματα με υψηλή αντίσταση στη χημική διάβρωση, αλλά και με καλλίτερες μηχανικές ιδιότητες από τις ίνες τύπου E, από τις οποίες όμως είναι ακριβότερες.

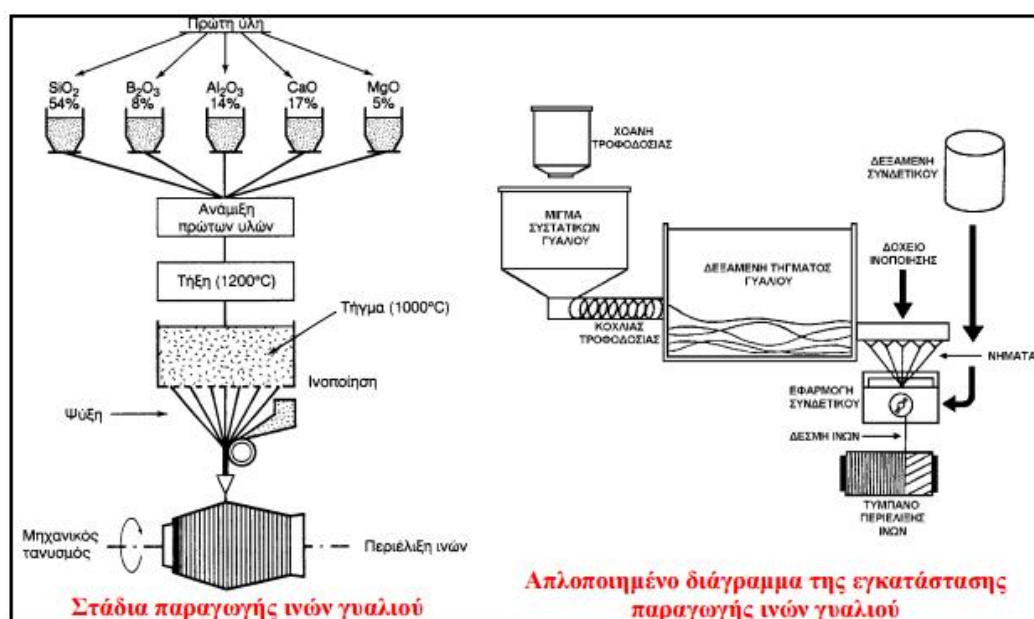
S-glass (S=stiffness): Ακριβότερο υλικό από το E-glass, αλλά με υψηλότερη δυσκαμψία και θερμική αντοχή. Χρησιμοποιείται κυρίως στην αεροπορική βιομηχανία.

Όταν περιέχονται μεγάλα ποσοστά SiO₂ (>99,5%) παρατηρούνται αυξημένες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων της ίνας και της μέγιστης θερμοκρασίας χρήσης του συνθέτου. Γι' αυτό το λόγο, σε ειδικές εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλές μηχανικές ιδιότητες κάτω από υψηλή θερμοκρασία, χρησιμοποιούνται ίνες από 100% καθαρή πυριτία.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των υαλονήματα είναι το χαμηλό κόστος και η υψηλή αντοχή, ενώ στα κύρια μειονεκτήματα τους εντάσσονται το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας και η μικρή αντοχή τους έναντι φθοράς εκτριβής (λύση της συνέχειας

της επιφάνειάς τους). Εγχαράξεις και εκδορές δημιουργούν περιοχές συγκέντρωσης τάσεων στην επιφάνεια της ίνας, με αποτέλεσμα την ταχεία υποβάθμιση των μηχανικών τους ιδιοτήτων και της ικανότητας πρόσφυσης τους στην πολυμερική μήτρα.

Η παραγωγή των ινών γυαλιού γίνεται με εκβολή τήγματος γυαλιού διαμέσου μήτρας με διάτρητο πυθμένα (εικόνα 6.) και περιλαμβάνει τις ακόλουθες φάσεις:



Εικόνα 6: Παραγωγή ενισχυτικών ινών γυαλιού

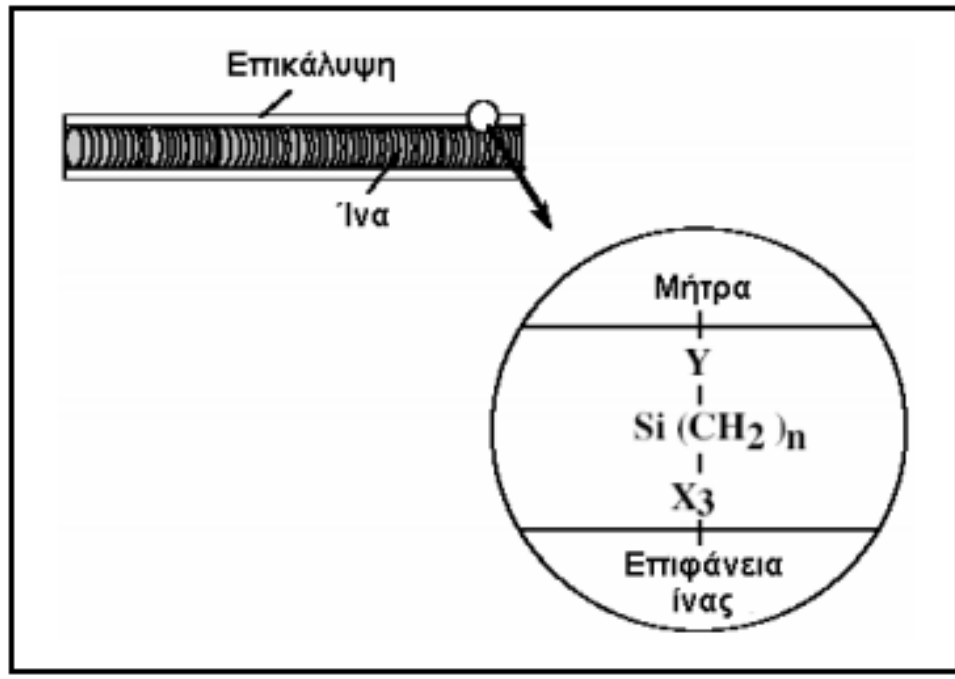
- Η πρώτη ύλη τοποθετείται σε δεξαμενή, όπου τήκεται.
- Το τήγμα τροφοδοτείται σε σειρά κυλινδρικών δοχείων με διάτρητο πυθμένα (διάμετρος οπών 1-2 mm).
- Το γυαλί ρέει μέσα από τις οπές του πυθμένα υπό την επίδραση της βαρύτητας.
- Οι παραγόμενες ίνες συγκεντρώνονται σε ένα σύνολο και τανύονται μηχανικά μέχρις ότου αποκτήσουν την κατάλληλη διάμετρο ($1 \pm 15 \mu\text{m}$) και ακολουθεί ελαφρός ψεκασμός τους με νερό (ψύξη).
- Ακολούθως οι ίνες διέρχονται από ιμάντα που επιβάλλει σ' αυτές προστατευτικό λιπαντικό συνδετικό υλικό (binder) ή ειδικά κολλοειδή πρόσθετα (sizes) που δρουν ως προστατευτικές επικαλύψεις και συνεισφέρουν στην καλλίτερη πρόσφυση ινών-μήτρας.

- Τέλος, οι ίνες περιτυλίσσονται ανά δέσμες (strand ή end) των 204 νηματίων (τυπική τιμή) γύρω από τύμπανο, που περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα (της τάξης των 50 m/s).
- Οι ρόλοι υαλονήματος υφίστανται ξήρανση πριν υποβληθούν σε οποιαδήποτε περαιτέρω διεργασία μορφής.

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

- Ο έλεγχος της διαμέτρου των ινών γίνεται με ρύθμιση της στάθμης του τήγματος μέσα στη δεξαμενή, της πυκνότητας του, της διαμέτρου των οπών και της ταχύτητας περιστροφής του τυμπάνου.
- Κατά τη διάρκεια της παραγωγής των ινών, πρέπει να αποφεύγεται η επαφή ινών μεταξύ τους, καθώς και με άλλα αντικείμενα, που μπορεί να προκαλέσουν επιφανειακές κακώσεις στην ίνα.
- Τα χημικά πρόσθετα (sizes) διακρίνονται σε προσωρινά και συμβατά. Τα προσωρινά πρόσθετα έχουν κύριο στόχο αφενός την προστασία της ίνας έναντι μείωσης της αντοχής λόγω τριβής της με τις άλλες ίνες και αφετέρου τη σύνδεση των ινών μεταξύ τους στην περίπτωση που διαμορφωθούν σε πλέξη ύφανσης και ακόμη προσδίδουν στην ίνα αντιστατικές ιδιότητες.

Συνήθως χρησιμοποιούνται αμυλέλαια, που διευκολύνουν αποτελεσματικά την πρόσφυση ίνας και ρητίνης εμποτισμού. Τα προσωρινά πρόσθετα απομακρύνονται εύκολα με θέρμανση των ινών σε κλιματιζόμενο περιβάλλον σε θερμοκρασία ≥ 340 ο C για χρονικό διάστημα 15-20 h. Τα συμβατά πρόσθετα έχουν στόχο τη βελτίωση της αρχικής πρόσφυσης ρητίνης-γυαλιού και τη μείωση των δυσάρεστων επιπτώσεων της υγρασίας ή άλλων περιβαλλοντικών επιδράσεων. Πρόκειται περί οργανοπυριτικών ενώσεων του τύπου $X_3Si(CH_2)_nY$, όπου Y ομάδα συμβατή προς την πολυμερική μήτρα, X υδρολυόμενη ομάδα στο πυρίτιο και $n=0\div 3$, η δράση των οποίων περιγράφεται στο εικόνα 7.



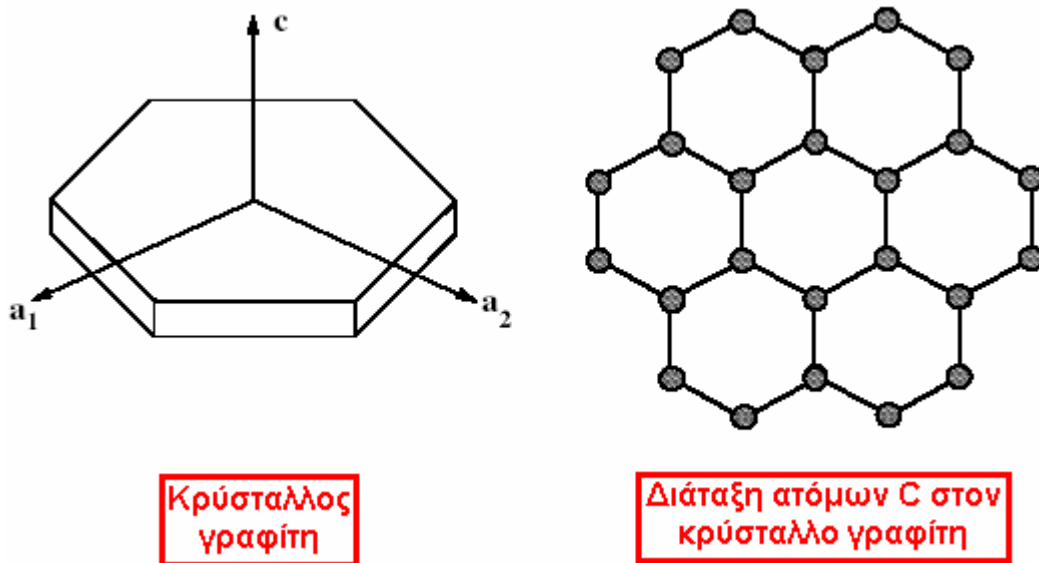
Εικόνα 7: Δράση οργανοσιλικικών ενώσεων του τύπου $X_3Si(CH_2)_nY$

- Η αντοχή και η δυσκαμψία του γυαλιού προσδιορίζεται από την τρισδιάστατη δομή και διάταξη των συστατικών οξειδίων του. Λόγω αυτής της δομής τα υαλονήματα είναι ισότροπα υλικά και παρουσιάζουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά. Η συμμετοχή και των μεταλλικών οξειδίων στη σύνθεση των ινών μπορεί να επιφέρει αλλαγές στις φυσικοχημικές τους ιδιότητες.

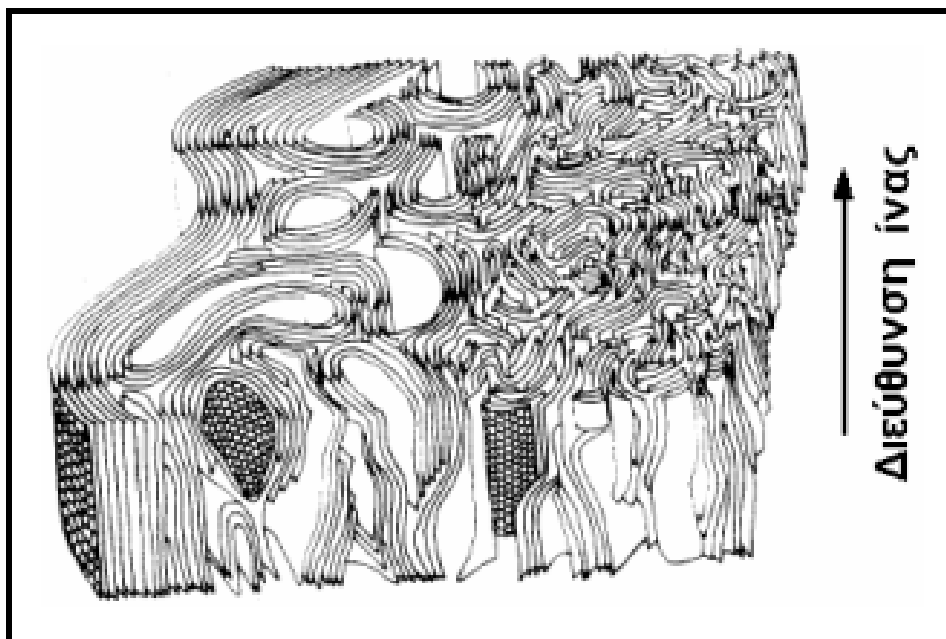
1.3.2: Ίνες Άνθρακα (CARBON FIBERS)

Οι ίνες γραφίτη είναι η επικρατέστερη ενίσχυση υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας, η οποία χρησιμοποιείται για την παρασκευή υψηλών επιδόσεων σύνθετων υλικών ρητινικής μήτρας. Γενικά, όταν απαιτείται ο βέλτιστος συνδυασμός μηχανικής συμπεριφοράς και ελάττωσης του βάρους, οι χρησιμοποιούμενες ίνες είναι, συνήθως, ίνες άνθρακα. Επίσης, οι ίνες άνθρακα προτιμούνται όταν η θερμική διαστολή ενός υλικού πρέπει να συγκρατηθεί σε χαμηλό επίπεδο ή όταν απαιτείται συμβατότητα των χαρακτηριστικών διαστολής δύο συνενωμένων διαφορετικών υλικών. Η υπεροχή αυτή των ανθρακονημάτων οφείλεται στη φύση του άνθρακα (ως στοιχείου) και τους ενδοατομικούς δεσμούς που σχηματίζει με άλλα άτομα άνθρακα. Ο γραφίτης αποτελείται από ανισότροπους πολυκρυσταλλίτες, των οποίων η ανισοτροπία εξαρτάται από τις συνθήκες παρασκευής τους. Αποτέλεσμα του ισχυρού προσανατολισμού των κρυσταλλινών παράλληλα στο διαμήκη άξονα των ανθρακονημάτων είναι η υψηλή στιβαρότητα και

αντοχή σε θραύση και ο χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής κατά τη διεύθυνση αυτή. Στη γραφική δομή τα άτομα C διατάσσονται πολύ πυκνά με τη μορφή εξαγωνικών επιπέδων, βλ. εικόνα 8. Ο ισχυρός δεσμός μεταξύ των ατόμων C στις επίπεδες αυτές εξαγωνικές στρώσεις οδηγεί σε εξαιρετικά υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Αντίθετα, ο ασθενής τύπου Van der Waals δεσμός που υφίσταται μεταξύ γειτονικών στρώσεων, έχει ως αποτέλεσμα ένα χαμηλότερης τιμής μέτρο ελαστικότητας σε αυτή τη διεύθυνση. Τυπική δομή ανθρακονήματος, όπως έχει ληφθεί από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, παρουσιάζεται στο εικόνα 9.



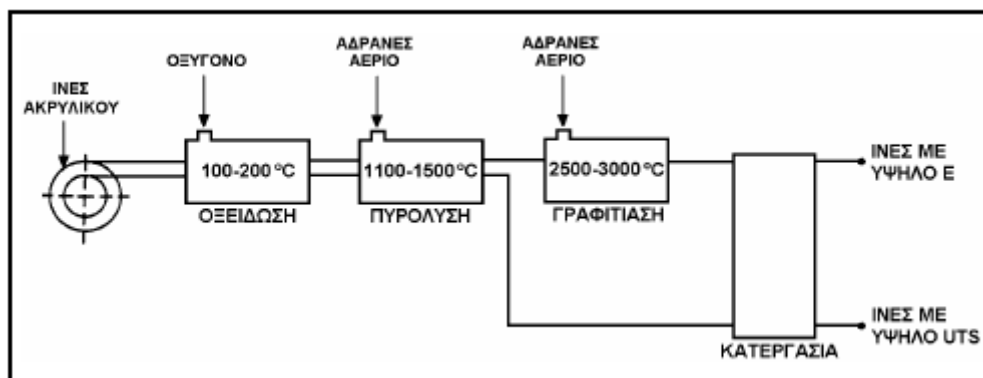
Εικόνα 8:Γραφική δομή ατόμων άνθρακα σε μορφή εξαγωνικών επιπέδων



Εικόνα 9: Τυπική δομή ανθρακονήματος

Στην παραγωγή ανθρακονημάτων, ως πρώτη ύλη χρησιμοποιούνται πολυμερικές ίνες πολυακρυλονιτρίλιου (PAN), ίνες τεχνητής μέταξας (rayon) και πίσσα.

Η παραγωγή ινών γραφίτη από ίνες (PAN) πραγματοποιείται σε τρία στάδια (εικόνα 10):



Εικόνα 10: Παραγωγή ενισχυτικών ινών άνθρακα

- Οξειδωση των ινών PAN στον αέρα και σε χαμηλή θερμοκρασία (100-200 ο C), με ταυτόχρονη εφαρμογή τάσης, η οποία είναι απαραίτητη για την ευθυγράμμιση των αλυσίδων του πολυμερούς.
- Πυρόλυση, υπό τάση, σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα και σε θερμοκρασία 1100- 1500ο C. Οι παραγόμενες ίνες στο στάδιο χαρακτηρίζονται ως ίνες άνθρακα υψηλής αντοχής (high strength carbon fibers) και η αντοχή τους φτάνει τα 3000 MPa.
- Η θέρμανση σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα συνεχίζεται σε υψηλές θερμοκρασίες (2500-3000ο C), οπότε πραγματοποιείται γραφίτωση, με ταυτόχρονη ανακρυστάλλωση, που οδηγεί σε ισχυρό προσανατολισμό των κρυσταλλιτών. Οι παραγόμενες ίνες σε αυτό το στάδιο χαρακτηρίζονται ως ίνες άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας (high module carbon fibers) και έχουν μέτρο ελαστικότητας περίπου 400 GPa, η δε διάμετρός τους είναι περίπου 10 μm

Στον Πίν. 2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά ινών άνθρακα που έχουν παραχθεί σε δύο στάδια (οξειδωση και πυρόλυση) και σε τρία στάδια (οξειδωση, πυρόλυση, θέρμανση σε υψηλή θερμοκρασία), αντίστοιχα.

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών άνθρακα

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΙΝΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	ΙΝΕΣ ΥΨΗΛΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	180-230	350-420
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2500-3400	1900-2300
% περιεκτικότητα άνθρακα	95-98	99
Πυκνότητα (g/cm ³)	1,8	1,9
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	2000	2500

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Σε οξειδωτική ατμόσφαιρα, η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης των ανθρακονημάτων περιορίζεται στους 500 ο C και για τους δύο τύπους ινών. Κατά το σχεδιασμό του συνθέτου πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνεται υπόψη και η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης της μήτρας.
- Οι ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων ανθρακονημάτων εξαρτώνται σημαντικά από την αρχιτεκτονική των ινών του PAN (μονοδιευθυντικές ίνες, δισδιάστατο πλέγμα, τρισδιάστατο πλέγμα). Ο τρόπος διευθέτησης των ινών αυτών καθορίζει και το βαθμό ανισοτροπίας των ανθρακονημάτων που προκύπτουν και μπορεί να ποικίλλει από την πλήρη ισοτροπία ως την πλήρη ανισοτροπία.
- Η δυνατότητα επιλογής, από ένα μεγάλο εύρος τιμών της θερμοκρασίας κάθε σταδίου παραγωγής ανθρακονημάτων, δίνει την ευχέρεια παραγωγής ανθρακονημάτων διαφορετικού βαθμού γραφίτισης και διαφορετικών ιδιοτήτων (οι μηχανικές και οι φυσικές ιδιότητες, όπως η θερμική και η ηλεκτρική αγωγιμότητα, εξαρτώνται από το βαθμό γραφίτισης και το βαθμό ανισοτροπίας). Γενικά, όσο καλύτερα προσανατολισμένες είναι οι ίνες και όσο υψηλότερη περιεκτικότητα σε γραφίτη διαθέτουν τόσο καλύτερες μηχανικές ιδιότητες επιδεικνύουν.
- Τέλος, το κόστος παραγωγής των ινών γραφίτη είναι δέκα φορές τουλάχιστον υψηλότερο από το κόστος παραγωγής των ινών γυαλιού.

1.3.3: Ίνες Πολυμερούς (POLYMER FIBERS)

Οι πιο διαδεδομένες ίνες πολυμερούς είναι οι ίνες από Nylon, πολυαιθυλένιο και Kevlar. Τα νήματα Nylon και πολυεστέρα παράγονται με φυγοκεντρική περιδίνηση τήγματος, ενώ ακρυλικά και κυτταρινικά νήματα παρασκευάζονται με φυγοκεντρική περιδίνηση διαλύματος και συνακόλουθες τεχνικές καθίζησης ιζήματος.

Η αντοχή τους δεν ξεπερνά τα 10 Pa, ενώ το μέτρο ελαστικότητας πλησιάζει τα 1000 Pa. Παρόλο που από μηχανικής άποψης δεν κατατάσσονται στις

ίνες υψηλής απόδοσης, εντούτοις το χαμηλό κόστος παραγωγής τους τις καθιστά δημοφιλείς στην αγορά.

Η πρώτη υψηλής απόδοσης οργανική ίνα αραμιδίου παρασκευάστηκε από την DuPont και έγινε γνωστή με την εμπορική ονομασία Kevlar και παράγεται σε τρεις τύπους:

- **Kevlar-29:** Με μέτρο ελαστικότητας 60 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 3.6 GPa.
- **Kevlar-49:** Με μέτρο ελαστικότητας 120 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 3.6 GPa.
- **Kevlar-149:** Με μέτρο ελαστικότητας 180 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 3.4 GPa.

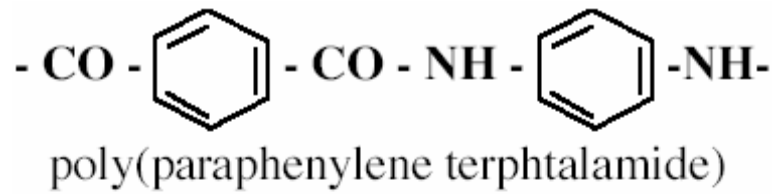
Η πυκνότητα και των τριών τύπων είναι ίδια (1.45 g/cm^3), ενώ η διαφορετική ελαστικότητα οφείλεται στο γεγονός της βελτιωμένης ευθυγράμμισης των μοριακών αλυσίδων, που αυξάνει την δυσκαμψία στη διεύθυνση του άξονα της ίνας. Στον Πίν. 3 παρατίθενται οι βασικές ιδιότητες των ινών Kevlar.

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικές ιδιότητες των ινών Kevlar

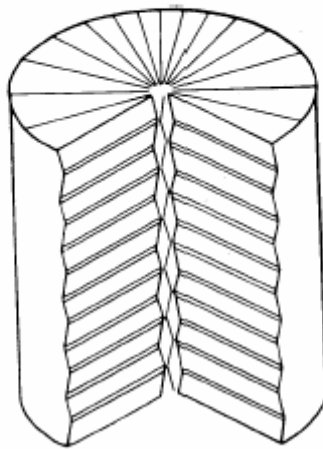
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	Kevlar 29	Kevlar 49
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	60	130
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2700	3600
Επιμήκυνση θραύσης (%)	4.5	2
Πυκνότητα (g/cm^3)	1.45	1.45
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης ($^{\circ}\text{C}$)	200	200
Θερμοκρασία αστοχίας ($^{\circ}\text{C}$)	400	425

Οι υψηλές τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων του Kevlar οφείλονται στο γεγονός ότι οι πολυμερικές δομικές αλυσίδες του υλικού είναι αυτές καθ' αυτές πιο ισχυρές και συντάσσονται έτσι, ώστε να δημιουργούν ένα σταθερότερο πλέγμα, σε μορφή επίπεδης ταινίας, βλ. εικόνα 11. Ο κυλινδρικός φλοιός της ίνας περικλείει και συγκρατεί το υλικό του πυρήνα αποδίδοντας στο προϊόν ιδιαίτερα υψηλές επιδόσεις κατά την αξονική διεύθυνση, αλλά φτωχή συμπεριφορά κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Επιπλέον, ενώ στην εφελκυστική καταπόνηση το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά με παραμόρφωση έως και 2%, η μεγάλη του αδυναμία εμφανίζεται στη θλίψη, όπου σε 0,3 % θλιπτική παραμόρφωση αναπτύσσεται πλαστικού τύπου

αστοχία. Αξιοσημείωτο, όμως, είναι ότι η αστοχία αυτή δεν είναι καταστροφική, αλλά έχει τη μορφή πτυχώσεων (kink bands).



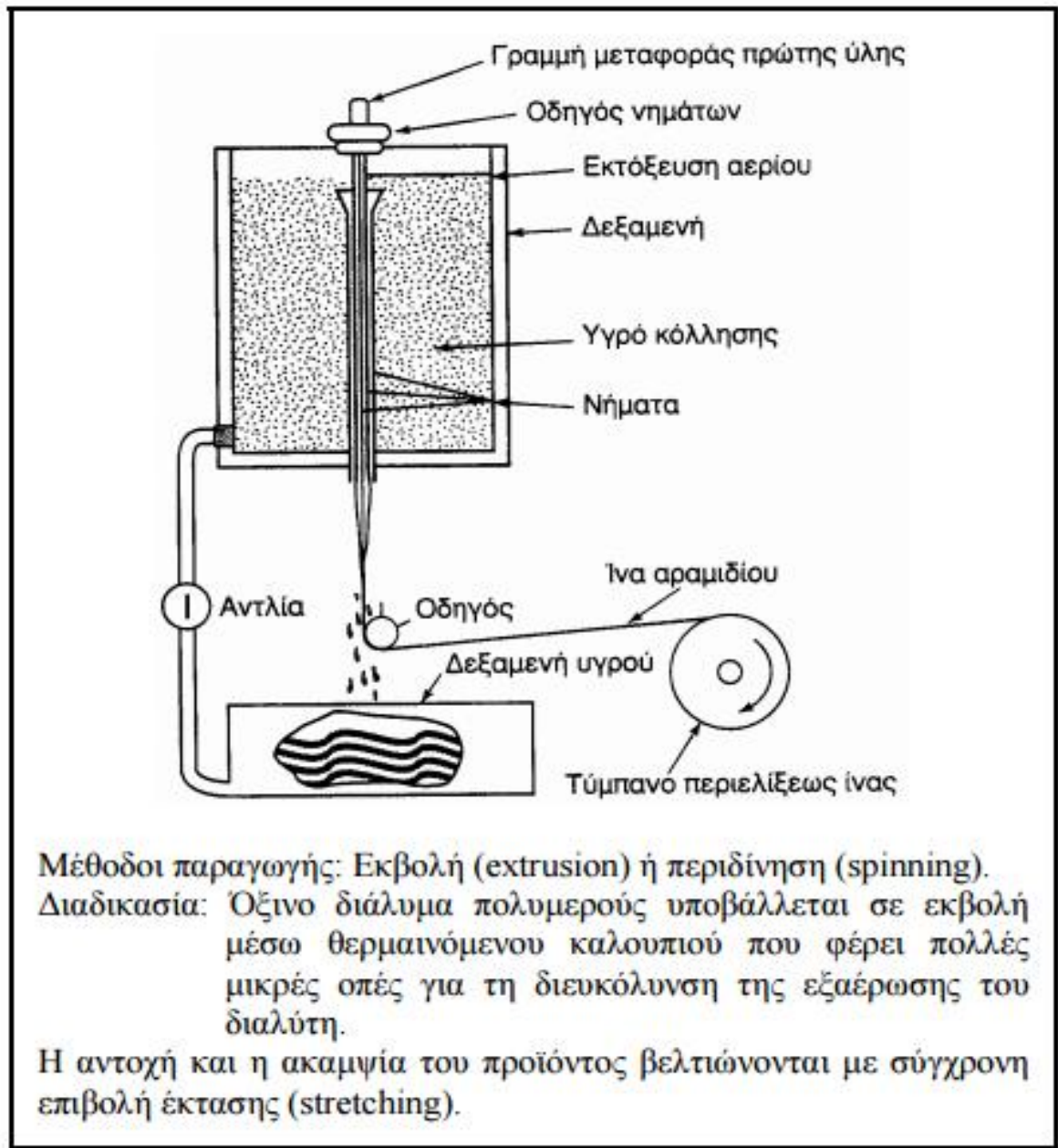
Τύπος αραμιδίου



Δομή ίνας Kevlar

Εικόνα 11: Δομή ίνας Kevlar

Στην εικόνα 12 φαίνεται η διαδικασία παραγωγής ενισχυτικών ινών πολυαμιδίου.



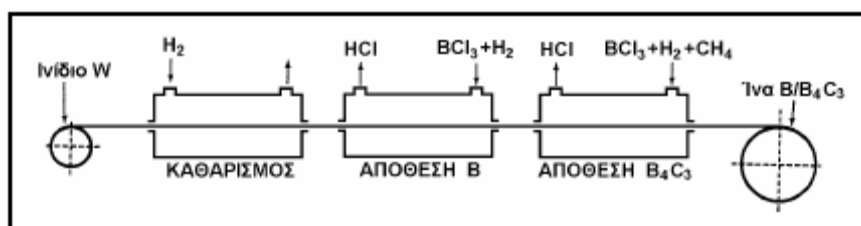
Εικόνα 12: Διάταξη παραγωγής ινών πολυαμιδίου

1.3.4: Μεταλλικές Ίνες

Διάφορα μέταλλα όπως το βόριο (B), το βηρύλλιο (Be) και το βολφράμιο (W) θα μπορούσαν να αποτελέσουν εξαιρετικά ενισχυτικά συνθέτων υλικών, αφού παρουσιάζουν υψηλή τιμή ακαμψίας σε σχέση με το ειδικό βάρος τους (ειδική ακαμψία). Το βόριο είναι το περισσότερο υποσχόμενο υλικό για την κατασκευή ινών ενίσχυσης, ωστόσο οι τεχνικές παραγωγής μεταλλικών ινών ενίσχυσης εξακολουθούν να παραμένουν πολύ δαπανηρές. Σήμερα χρησιμοποιούνται δύο τεχνικές για την παραγωγή ινών βορίου:

ΑΝΑΓΩΓΗ ΑΠΟ ΑΛΟΓΟΝΙΔΙΟ ΤΟΥ ΒΟΡΙΟΥ

Αλογονίδιο του βορίου (συνήθως BCl_3) ανάγεται από υδρογόνο σε έναν κλειστό θάλαμο υψηλής θερμοκρασίας ($1100\text{ }^\circ\text{C}$) και αποτίθεται σε πολύ λεπτό νήμα βολφραμίου, διαμέτρου $10\text{-}15\text{ }\mu\text{m}$, όπως φαίνεται στην εικόνα 13. Η διάμετρος των παραγόμενων ινών με αυτήν την τεχνική κυμαίνεται μεταξύ $100\div 200\text{ }\mu\text{m}$, ενώ οι ίνες παρουσιάζουν εξαιρετική δυσκαμψία και μηχανική αντοχή.



Εικόνα 13: Παραγωγή ινών βορίου με αναγωγή αλογονιδίου του βορίου

ΑΠΟΘΕΣΗ ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΗ CVD

Το βόριο αποτίθεται σε νήμα άνθρακα ή βολφραμίου με την τεχνική της χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD). Η τεχνική αυτή είναι οικονομικότερη από την προηγούμενη, αλλά το προϊόν έχει χαμηλότερη μηχανική αντοχή.

Οι ίνες βορίου έχουν υψηλή μηχανική αντοχή ($E = 300\div 420\text{ GPa}$, $UTS = 3000\div 3700\text{ MPa}$), ενώ οι τιμές των ιδιοτήτων τους διατηρούνται σταθερές ως τους $500\text{ }^\circ\text{C}$. Για τη χρήση τους σε υψηλότερες θερμοκρασίες, θα πρέπει να χρησιμοποιείται προστατευτικό επίστρωμα καρβιδίου του πυριτίου (ίνες Borsic) ή νιτριδίου του βορίου. Τα επιστρώματα αυτά αποτρέπουν την αντίδραση του υλικού ενίσχυσης με αυτό της μήτρας, δεδομένου ότι σε υψηλές θερμοκρασίες, κυρίως σε σύνθετα με μεταλλική μήτρα τιτανίου ή αλουμινίου, ευνοούνται η διάχυση μέσω της διεπιφάνειας ίνας-μήτρας και οι αντιδράσεις σε στερεά κατάσταση που οδηγούν στο σχηματισμό εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων και αστοχία του συνθέτου.

1.3.5: Κεραμικές Ίνες

Οι κεραμικές ίνες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή, στιβαρότητα και θερμική ευστάθεια. Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες κεραμικές ίνες είναι οι ίνες καρβιδίου του πυριτίου

(SiC) και αλουμίνας (Al₂O₃), ενώ σπανιότερα συναντώνται και ίνες Si₃N₄, BeO, B₄C και ZrO₂.

Το καρβίδιο του πυριτίου (SiC) είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ως ενισχυτικό υλικό είτε με τη μορφή ινών είτε με τη μορφή φυλλιδίων. Οι ίνες SiC παρουσιάζουν υψηλές τιμές αντοχής και ανώτερες μηχανικές ιδιότητες από τα φυλλίδια.

ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

(α) Με χημική εναπόθεση ατμών (CVD) χλωριούχου σιλανίου σε ίνες άνθρακα.

Οι παραγόμενες ίνες έχουν πυρήνα διαμέτρου 10÷25 μm και εξωτερική διάμετρο 100÷150 μm.

(β) Από πολυμερικές ίνες (Nicalon).

Θέρμανση σε κενό σε θερμοκρασία 850 ο C μετατρέπει την πολυμερική ίνα σε ανόργανο SiC, ενώ θέρμανση σε υψηλότερη θερμοκρασία (>1000 ο C) προκαλεί κρυστάλλωση σε β-SiC. Οι παραγόμενες ίνες έχουν διάμετρο 10÷15 μm.

(γ) Τριχίτες SiC από φλοιό ρυζιού.

Ο φλοιός του ρυζιού περιέχει ~15% κ.β. SiO₂.

Θέρμανση σε θερμοκρασία 700÷900 ο C οδηγεί σε υπόλειμμα SiO₂ και ελεύθερο άνθρακα.

Θέρμανση του υπολείμματος σε θερμοκρασία ~1500 ο C και σε περιβάλλον αζώτου ή αμμωνίας οδηγεί στο σχηματισμό SiC.

Οι παραγόμενοι τριχίτες έχουν διάμετρο ~0.1÷1 μm και μήκος ~50 μm.

Συγκριτικός πίνακας των ιδιοτήτων των ινών που παράγονται από κάθε μέθοδο παρουσιάζεται αμέσως παρακάτω (Πίν. 4).

Γενικά, οι μέθοδοι παρασκευής κεραμικών ινών είναι ιδιαίτερα δαπανηρές.

Πίνακας 4: Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων ινών SiC (μέσες τιμές)

Μέθοδος	CVD	Nicalon	Τριχίτες
Ιδιότητα			
Πυκνότητα, ρ (g/cm ³)	3.3	2.6	-
Αντοχή, UTS (MPa)	3500	2000	7000
Μέτρο ελαστικότητας, E (GPa)	430	180	480
Διάμετρος ίνας, d (μ m)	140	15	<1

Το SiC παρουσιάζει σταθερή μηχανική αντοχή ως τους 1400 ο C, ωστόσο η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρήσης του, περιορίζεται στους 900 ο C, λόγω της σημαντικής δραστικό

τητάς του πάνω από τη θερμοκρασία αυτή.

Οι μονοκρυσταλλικές ίνες αλούμινας (Al₂O₃) διαμέτρου 250 μ m έχουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Λόγω της ισχυρής φύσεως των χημικών δεσμών, η σταθερότητα των μηχανικών τους ιδιοτήτων διατηρείται ως τους 800 ο C. Οι μονοκρυσταλλικές ίνες αλούμινας είναι εξαιρετικά ευαίσθητες έναντι επιφανειακής φθοράς που οδηγεί ταχύτατα σε αστοχία.

1.3.6: Τριχίτες (WHISKERS)

Οι τριχίτες είναι νηματικοί μονοκρύσταλλοι που παράγονται με αποσύνθεση άλατος μετάλλου σε αναγωγική ατμόσφαιρα, κάτω από αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Η διάμετρος τους είναι της τάξης του 1 μ m, ενώ το μήκος τους μπορεί να φτάσει τα μερικά χιλιοστά και παρουσιάζουν τις μηχανικές ιδιότητες ενός τέλειου κρυστάλλου. Οι εξωτερικές τους επιφάνειες είναι λείες και δεν παρουσιάζουν ζώνες συγκέντρωσης τάσεων.

Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι τριχίτες είναι από αλούμινα, γραφίτη, καρβίδιο του πυριτίου, βηρυλλία και νιτρίδιο του πυριτίου. Η παραγωγή τριχιτών σε βιομηχανική κλίμακα είναι δύσκολη. Στον Πίνακα 5 γίνεται σύγκριση των ιδιοτήτων ινών και τριχιτών από SiC και Al₂O₃.

Πίνακας 5: Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων και τριχιτών από SiC και Al₂O₃

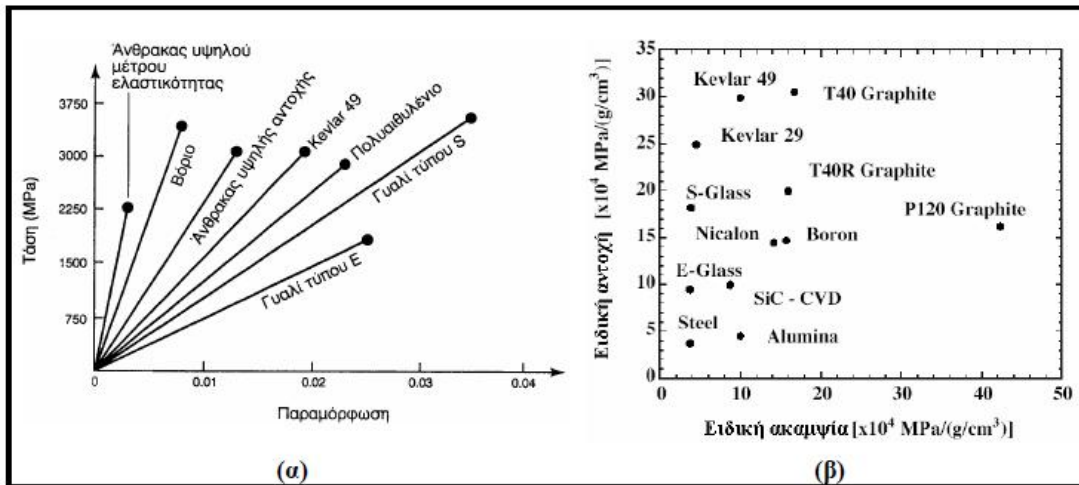
ΙΔΙΟΤΗΤΑ	SiC _{INA}	SiC _{ΤΡΕΠΙΤΗ}	Al ₂ O ₃ _{INA}	Al ₂ O ₃ _{ΤΡΕΠΙΤΗ}
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	480	840	500	755
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2300	21000	2000	19500
Πυκνότητα (g/cm ³)	3,2	3,2	4,0	4,0
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	900	1600	800	1300

1.3.7: Ίνες Φυσικών Ορυκτών

Αρκετά ορυκτά που βρίσκονται σε ινώδη ή φυλλώδη μορφή, μπορούν να αποτελέσουν φθινό ενισχυτικό υλικό, αλλά χαμηλών προδιαγραφών. Ευρύτερα χρησιμοποιούμενα τέτοια ορυκτά είναι ο αμίαντος και η μαρμαρυγία (mica). Οι ίνες αμιάντου αποτελούνται από 500 περίπου στοιχειώδη ινίδια, διαμέτρου ~20 nm, και έχουν διάμετρο ~10 μm και μήκος αρκετά cm. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέχρι θερμοκρασία 500ο C, οπότε η μηχανική αντοχή του υλικού μειώνεται σημαντικά. Το μέτρο ελαστικότητας της ίνας είναι της τάξης των 160 GPa, ενώ η μηχανική αντοχή μπορεί να φτάσει μέχρι 5500 GPa. Ο αμίαντος λόγω του χαμηλού του κόστους χρησιμοποιείται ευρύτατα. Οι μαρμαρυγίες ανήκουν στην κατηγορία των φυλλοπυριτικών ορυκτών, χαρακτηρίζονται από τέλειο σχισμό και αποχωρίζονται εύκολα από το πέτρωμα με μορφή φυλλιδίων, τα οποία χρησιμοποιούνται ως συστατικό ενίσχυσης του συνθέτου υλικού. Η αντοχή σε εφελκυσμό μπορεί να φτάσει μέχρι 2500 MPa (τέλεια φυλλίδια), ενώ, λόγω ατελειών στις άκρες των φυλλιδίων, οι συνήθεις τιμές της αντοχής κυμαίνονται στην περιοχή 700=900 MPa. Το μέτρο ελαστικότητας των μαρμαρυγιών είναι περίπου 220 GPa και η πυκνότητα τους 2.8 g/cm³.

1.3.8: Σύγκριση Ενισχυτικών Ίνων

(α) Ως προς την ειδική αντοχή και ειδική ακαμψία (εικόνα 14.)



Εικόνα 14: (α) Χαρακτηριστικές καμπύλες σ - ϵ , (β) Συσχετισμός ειδική αντοχής και ειδικής ακαμψίας για διάφορα υλικά ενισχυτικών ινών

(β) Ως προς τη θερμική ευστάθεια (Πίν. 6)

Πίνακας 6: Σύγκριση θερμικής ευστάθειας ινών

Ίνα	T_{\max} (°C)
Spectra	150
Kevlar	250
Glass	800
SiC	1000
Alumina	1370
Carbon	2000*

* Παρουσία οξυγόνου: $T_{\max}=500$ °C

(γ) Ως προς την παραμόρφωση θραύσης (Πίν. 7)

Πίνακας 7: Σύγκριση παραμόρφωσης θραύσης ινών

Ίνα	Παραμόρφωση θραύσης (%)
Kevlar	3-4
Glass	2
Carbon	1
Ceramic	<1

1.4: Μήτρα

Ο ρόλος της μήτρας συνίσταται σε:

- Συγκράτηση των ινών μεταξύ τους.
- Προστασία των ινών από περιβαλλοντικές φθορές και προσβολές.
- Μεταβίβαση των μηχανικών τάσεων που ασκούνται συνολικά στο σύνθετο υλικό προς τις ίνες.
- Ανακοπή της διάδοσης των ρωγμών, που ξεκινούν από θραύση των ινών.

Για να ικανοποιεί το ρόλο, με τον οποίο είναι επιφορτισμένη η μήτρα, πρέπει να χαρακτηρίζεται από:

- Ολκιμότητα.
- Ανθεκτικότητα.
- Σχετική ευκαμψία.
- Σημείο τήξης μεγαλύτερο από τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του συνθέτου υλικού.

Οι ιδιότητες αυτές πρέπει επίσης να παρουσιάζουν «συμβατότητα» με τις αντίστοιχες ιδιότητες των ενισχυτικών ινών.

Συνήθως, το υλικό της μήτρας έχει χαμηλότερη πυκνότητα, αντοχή και δυσκαμψία από τις ίνες.

Τέλος, για τη σωστή λειτουργία του συνθέτου υλικού, καθοριστικός παράγοντας είναι η καλή πρόσφυση ίνας – μήτρας.

Ανάλογα με το υλικό της μήτρας διακρίνουμε τις ακόλουθες ομάδες υλικών μήτρας για σύνθετα υλικά:

- Οργανικές.
- Μεταλλικές.
- Κεραμικές.

Η επιλογή κατάλληλης μήτρας εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το περιβάλλον χρήσης του συνθέτου. Μία γενική οδηγία αναφορικά με τα θερμοκρασιακά όρια για κάθε ομάδα υλικών παρουσιάζεται στην εικόνα 15.



Εικόνα 15: Θερμοκρασιακά όρια χρήσης των υλικών

Τα αντίστοιχα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται με τις ακόλουθες συντμήσεις:

PMC: Polymer Matrix Composite

MMC: Metal Matrix Composite

CMC: Ceramic Matrix Composite

1.4.1: Οργανικές Μήτρες

Οι οργανικές μήτρες διακρίνονται σε:

(α) Θερμοπλαστικές: Πρόκειται για πολυμερή με γραμμικές αλυσίδες. Παρουσιάζουν δομή, όπου οι μοριακές αλυσίδες διασυνδέονται με ασθενείς δυνάμεις Van der Waals, που λύνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας με αντιστρεπτή όμως διαδικασία, καθιστώντας το υλικό μαλακότερο σε υψηλές θερμοκρασίες.

Λόγω του χαμηλού τους κόστους, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ευρείας κατανάλωσης. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αποτελούν οι μήτρες πολυαιθυλενίου (PE) και πολυστυρενίου (PS).

Ως ενισχυτικά υλικά θερμοπλαστικών μητρώων χρησιμοποιούνται φθηνά υλικά (αμίαντος, μαρμαρυγίες, κ.α.), ώστε και το τελικό προϊόν να είναι χαμηλής τιμής.

(β) Θερμοσκληρυνόμενες: Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή παρουσιάζουν τρισδιάστατη δομή πλέγματος από πρωτογενείς ισχυρούς δεσμούς μεταξύ των μοριακών αλυσίδων. Αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει το πλήθος των διαμοριακών δεσμών καθιστώντας τα υλικά αυτά σκληρότερα και ψαθυρότερα. Τέτοιες μήτρες είναι:

- **Πολυεστερικές ρητίνες** που ενισχύονται με ίνες γυαλιού.
- **Εποξυδικές ρητίνες** με μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους 200ο C, καλλίτερες μηχανικές ιδιότητες από τις προηγούμενες και χρήση στη αεροναυπηγική.
- **Φαινολικές ρητίνες**, οι οποίες έχουν χαμηλή πλαστικότητα και μέτριες μηχανικές ιδιότητες. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους φτάνει τους 400ο C.

1.4.2: Μεταλλικές Μήτρες

Μέταλλα, όπως το αλουμίνιο, το τιτάνιο και το νικέλιο, χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο ως υλικά μήτρας προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα. Για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών επιβάλλεται η χρήση μεταλλικών ή κεραμικών μήτρωων, αφού η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρησιμοποίησης οργανικών μήτρωων είναι πολύ χαμηλή (~300 ο C), ενώ οι ανθρακούχες μήτρες οξειδώνονται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από 500 ο C. Σε σχέση με τις οργανικές μήτρες, οι μεταλλικές παρουσιάζουν πλεονεκτήματα, αλλά και μειονεκτήματα, τα σπουδαιότερα των οποίων φαίνονται στον Πίν. 8.

Πίνακας 8: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μεταλλικών μητρών (έναντι των οργανικών μητρών)

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
<ul style="list-style-type: none"> • Μεγαλύτερη ολκιμότητα και καλλίτερες μηχανικές ιδιότητες. • Βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων του συνθέτου σε καταπονήσεις ασκούμενες σε διευθύνσεις διαφορετικές από αυτές του προσανατολισμού των ινών. • Βελτίωση της ακαμψίας και αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του συνθέτου. • Μείωση της ευαισθησίας του συνθέτου στην παρουσία διαλυτών και διεύρυνση των θερμοκρασιακών ορίων χρήσης του συνθέτου. • Βελτίωση της θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας του συνθέτου για ειδικές εφαρμογές. • Ευκολότερη σύνδεση τεμαχίων του συνθέτου υλικού (συγκόλληση, κόλληση). 	<ul style="list-style-type: none"> • Δημιουργία εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων στη διεπιφάνεια μετάλλου-ίνας συμβάλλουν στην αποκόλληση ινών από τη μήτρα που οδηγεί στη μικρορωγμάτωση και τη θραύση των ινών. • Μεγαλύτερη πυκνότητα και επομένως μεγαλύτερο βάρος της συνολικής κατασκευής. • Φαινόμενα διάλυσης ινών στη μήτρα, σε υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. διάλυση ινών SiO₂ σε μήτρα Al). • Ασυνέχεια της καμπύλης εφελκυσμού των συνθέτων υλικών στο όριο διαρροής της μήτρας. • Δύσκολη παραγωγή συνθέτου υλικού και μεγαλύτερο κόστος.

1.4.3: Κεραμικές Μήτρες

Τα κεραμικά υλικά είναι σκληρά, δύστηκτα, μεγάλης στιβαρότητας και μεγάλης αντοχής στη διάβρωση και την χημική προσβολή.

Στην περίπτωση της κεραμικής μήτρας, οι ίνες αποβλέπουν αφενός στη βελτίωση της αντοχής του κεραμικού στους θερμικούς αιφνιδιασμούς και αφετέρου στην αύξηση της μηχανικής του αντοχής. Η ολκιμότητα και το ποσοστό των ινών επιδρούν ευνοϊκά στη βελτίωση της αντοχής της μήτρας.

Το σημαντικότερο πρόβλημα στη χρήση κεραμικών μητρών εντοπίζεται στη συνάφεια ινών- μήτρας και οφείλεται στη μεγάλη διαφορά μεταξύ των συντελεστών γραμμικής διαστολής της κεραμικής μήτρας και των συνήθων ενισχυτικών ινών.

Μεγάλη εφαρμογή βρίσκουν, επίσης, οι μήτρες άνθρακα, ενώ ειδική περίπτωση κεραμικής μήτρας αποτελεί το τσιμέντο. Είναι γνωστές οι οικοδομικές κατασκευές τσιμέντου με ενίσχυση χάλυβα (οπλισμένο σκυρόδεμα), ινών αμιάντου (ελενίτ), ινών γυαλιού, καθώς επίσης και οι κατασκευές από γύψο με ενίσχυση ινών γυαλιού ή αμιάντου.

1.5: Επιλογή Ινών και Μήτρας στην κατασκευή Ινώδων Σύνθετων

Κατά την επιλογή των υλικών ενίσχυσης και μήτρας, κατά το σχεδιασμό ενός σύνθετου υλικού, είναι αναγκαίο να λαμβάνονται υπόψη και άλλες παράμετροι όπως: η διάμετρος, το μήκος, η κατ' όγκο περιεκτικότητα των ινών στο σύνθετο υλικό, η ευθυγράμμιση και χωρική διάταξη των ινών εντός του υλικού της μήτρας και η συμβατότητα των υλικών ινών και μήτρας. Όλες αυτές οι ιδιότητες συντιθέμενες προσδιορίζουν και τις τελικές ιδιότητες του ινώδους σύνθετου υλικού.

ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΙΝΩΝ

Βασική παράμετρος είναι ο συντελεστής σχήματος της ίνας (s) (aspect ratio) που είναι ο λόγος του μήκους (A) προς την ακτίνα (r) των ινών και αποτελεί κριτήριο για το χαρακτηρισμό των ινών ως συνεχών ή ασυνεχών. Οι πρώτες προσδίδουν στο σύνθετο μεγαλύτερη αντοχή από τις δεύτερες. Γενικά, η αντοχή των ινών αυξάνεται με αύξηση του μήκους και μείωση της διαμέτρου τους.

Στις ασυνεχείς ίνες υπάρχει ένα κρίσιμο μήκος ($c A$), για δεδομένη διάμετρο ίνας (d), που ορίζεται από τη σχέση

$$\ell_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_i}$$

όπου: σ_f η αντοχή της ίνας σε εφελκυσμό και τ_i η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας. Αν το μήκος της ίνας είναι μικρότερο του κρίσιμου μήκους $c A$, η ενίσχυση που προσφέρει στο σύνθετο είναι πολύ μικρή, ενώ, αν είναι μεγαλύτερο $c (15) > A$, η ίνα συμπεριφέρεται ως συνεχής.

ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΝΩΝ

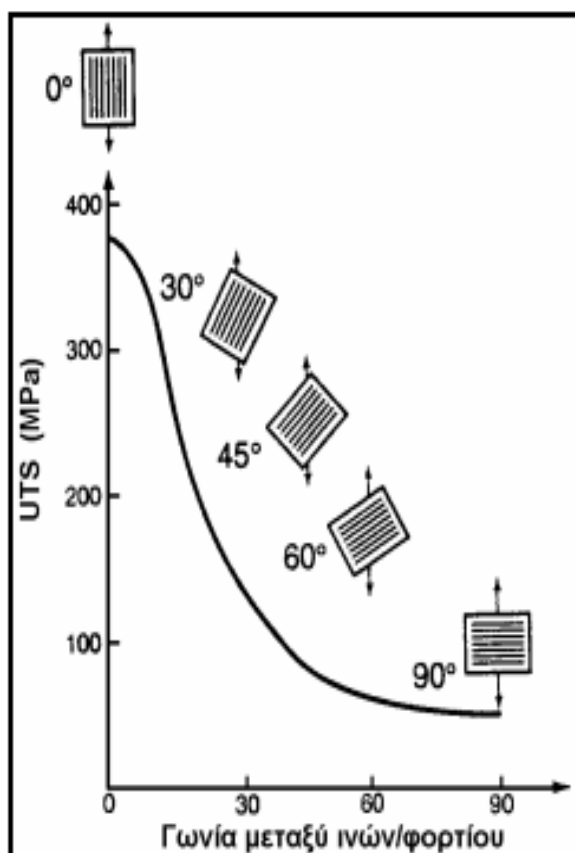
Η αντοχή και η στιβαρότητα ενός σύνθετου υλικού, αυξάνονται, με αύξηση της κατ' όγκο αναλογίας των περιεχόμενων ινών. Για ποσοστά υψηλότερα του 80%, τίθενται προβλήματα στην κατασκευή του σύνθετου, αφού οι ίνες δεν μπορούν να καλυφθούν πλήρως από το υλικό της μήτρας.

Πολλές φορές, για την καλύτερη ενίσχυση της μήτρας δεν χρησιμοποιείται ένας, μόνον, τύπος ινών, αλλά μίγμα δύο ή περισσότερων τύπων. Τα παραγόμενα ονομάζονται υβριδικά σύνθετα (hybrid composites).

ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΙΝΩΝ

Οι συνεχείς, μονοδιευθυντικές ίνες παρουσιάζουν ισχυρή ανισοτροπία και η μηχανική τους αντοχή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διεύθυνση επιβολής του φορτίου. Ίνες διαφόρων προσανατολισμών είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν, ώστε η προσφερόμενη ενίσχυση του σύνθετου να είναι όσο το δυνατόν ισότροπη.

Από την εικόνα 16 συνάγεται ότι για σύνθετο υλικό με μονοδιευθυντικές ίνες, η βέλτιστη στιβαρότητα (μέτρο της οποίας είναι το μέτρο ελαστικότητας, E) και η βέλτιστη αντοχή, UTS επιτυγχάνονται εάν η εφαρμοζόμενη τάση είναι πάντοτε παράλληλη προς τον προσανατολισμό των ινών.



Εικόνα 16: Επίδραση του προσανατολισμού των ινών στην αντοχή σε εφελκυσμό συνθέτου υλικού εποξυδικής μήτρας με ίνες E-γυαλιού

Συνήθως, όμως, ένα σύνθετο υλικό δεν είναι μονοστρωματικό, αλλά πολυστρωματικό. Όταν οι ίνες κάθε στρώσης έχουν τον ίδιο προσανατολισμό, το σύνθετο συμπεριφέρεται ως ανισότροπο, ενώ, όταν η ενίσχυση μονοδιευθυντικών ινών βρίσκεται υπό τη μορφή διαδοχικών στρώσεων διαφορετικού προσανατολισμού, το σύνθετο αποκτά ισότροπη συμπεριφορά.

✓ ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΙΝΩΝ-ΜΗΤΡΑΣ

Η καλή συνάφεια ινών-μήτρας είναι πολύ σημαντική για την καλή λειτουργία του συνθέτου. Η διεπιφάνεια ίνας-μήτρας, ορίζεται ως η κοινή επιφάνεια μεταξύ των δύο συστατικών υλικών, καθώς και η περιοχή στα σύνορα αυτής της επιφάνειας. Οι αναπτυσσόμενοι δεσμοί στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας πρέπει να είναι αρκετά ισχυροί, ώστε να εξασφαλίζεται η μεταφορά των τάσεων μεταξύ των δύο συστατικών του συνθέτου.

Η κακή συνάφεια έχει ως αποτέλεσμα την εκρίζωση (pull out) των ινών από τη μήτρα, που οδηγεί σε ταχύτερη αστοχία του υλικού. Γι' αυτό το λόγο, κατά το σχεδιασμό του συνθέτου, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι συντελεστές θερμικής διαστολής μήτρας και ίνας και η αναγκαιότητα επικάλυψης των ινών με κάποιο συνδετικό υλικό:

- Οι ίνες γυαλιού επενδύονται με ουσίες που εξασφαλίζουν τη συνάφεια με τη μήτρα και την αντίσταση του συνθέτου στην υγρασία.
- Οι ίνες άνθρακα επικαλύπτονται με οργανικές ουσίες, για αύξηση της συνάφειάς τους με τη μήτρα ή με Ni, όταν χρησιμοποιούνται με μεταλλικές μήτρες (Ag, Al).
- Οι ίνες βορίου επικαλύπτονται με BN ή SiC, όταν συνδυάζονται με μήτρα αλουμινίου. Ίνες B με επικάλυψη SiC αναφέρονται ως Borsic.

✓ ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ

Στους Πίν. 9-11 δίνονται παραδείγματα των συνηθέστερων συνθέτων υλικών οργανικής, μεταλλικής και κεραμικής μήτρας με ενίσχυση διαφόρων τύπων ινών και οι εφαρμογές τους στην κατασκευαστική βιομηχανία.

Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά παραδείγματα συνθέτων υλικών οργανικής μήτρας

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Εποξειδική	Kevlar	Αεροναυπηγική και ναυπηγική βιομηχανία. Βιομηχανία αθλητικών ειδών (ρακέτες τένις, μπατσούνια golf, είδη τοξοβολίας, καλάμια ψαρέματος)
Πολυεστερική	Γραφίτη	Αεροναυπηγική και αυτοκινητο - βιομηχανία. Μέρη αεροσκαφών, πλοιαρίων και αυτοκινήτων, μικρού βάρους και υψηλής αντοχής σε διάβρωση.
Πολυμερική	Γυαλιού	Αθλητικός εξοπλισμός

Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά παραδείγματα συνθέτων υλικών μεταλλικής μήτρας

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Al	Borsic	Πτερύγια στροβιλοκινητήρων αεροσκαφών.
	Al ₂ O ₃	Εμβολα μηχανών Diesel.
	SiC	Πτερύγια εκτόξευσης βλημάτων.
	Γραφίτη	Ιστοί κεραίων τηλεσκοπίου Hubble.
Κραμάτων Cu	SiC	Υψηλής αντοχής προπέλες σκαφών.
Κράματα Ti και W	SiC & B ₄ N	Πτερύγια και δίσκοι στροβίλων.

Πίνακας 11: Χαρακτηριστικά παραδείγματα συνθέτων υλικών κεραμικής μήτρας

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Άνθρακα	Άνθρακα	Μέρη αεροσκαφών και διαστημοπλοίων υψηλών προδιαγραφών (επιτρεπτή η λειτουργία ως τους 3000 °C). Δισκόφρενα σε αγωνιστικά αυτοκίνητα
Al ₂ O ₃ , SiC, ZrO ₂ , Si ₃ N ₄ και κεραμικά γυαλιά	Al ₂ O ₃ & SiC	Αγωγοί εναλλακτών θερμότητας, συστήματα θερμομόνωσης.

1.6: Μέθοδοι μορφοποίησης Σύνθετων Υλικών

Η μορφοποίηση ινωδών συνθέτων υλικών περιλαμβάνει συνήθως τα ακόλουθα τρία στάδια:

- Παραγωγή των ινών.
- Διάταξη-διευθέτηση των ινών σε ιστό, πλέγμα ή πακέτα (yarn, tow, roving), όπου οι μεμονωμένες ίνες ομαδοποιούνται κατάλληλα ανά 100-100.000.
- Εισαγωγή των ινών στη μήτρα.

Με βάση το υλικό της μήτρας, οι μέθοδοι μορφοποίησης ινωδών συνθέτων υλικών μπορούν να καταταγούν στις εξής κατηγορίες:

A. Μορφοποίηση συνθέτου οργανικής μήτρας

A1. Ασυνεχής μορφοποίηση συνθέτου (εικόνα 17)

- Χειροποίητη στρώση (hand lay-up)
- Χύτευση θαλάμου πίεσης (pressure bag)
- Χύτευση σε διαιρετό καλούπι (matched die-moulding)

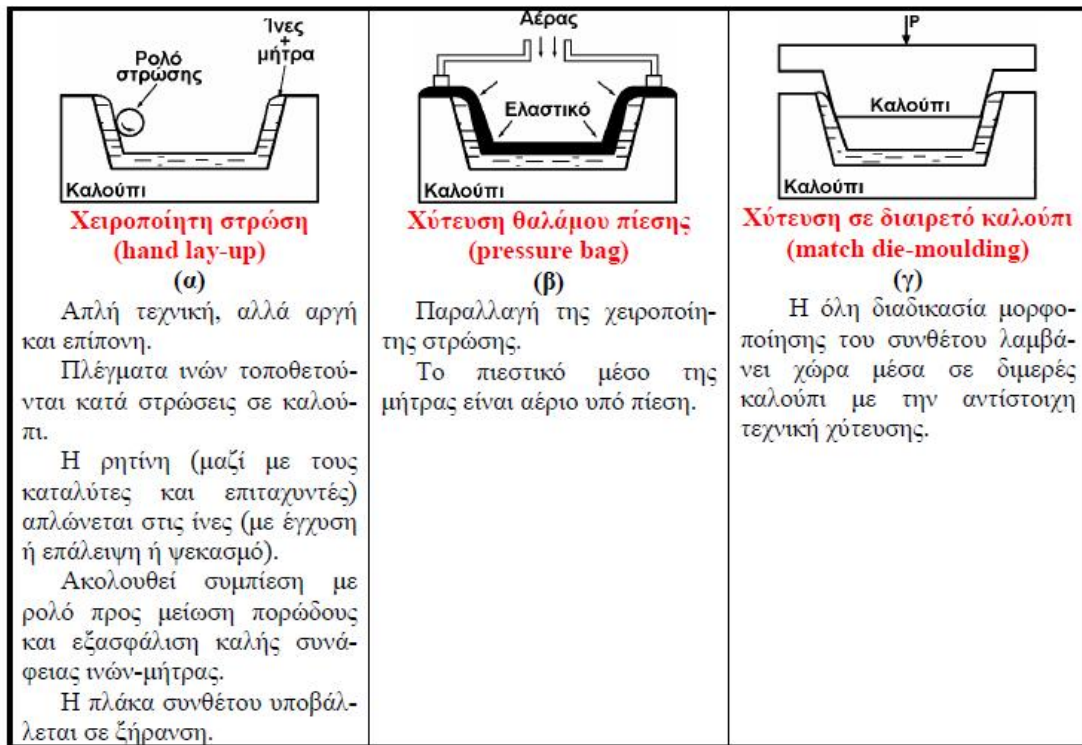
A2. Συνεχής μορφοποίηση συνθέτου (εικόνα 18-20)

- Περιέλιξη νήματος (filament winding)
- Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheet moulding process, SMC)
- Μορφοποίηση με εμβάπτιση (pultrusion)

B. Μορφοποίηση συνθέτου μεταλλικής μήτρας (εικόνα 21-23)

- Συνδιέλαση (co-extrusion)
- Μορφοποίηση με χύτευση (casting process)
- Συμπύεση σε στερεή κατάσταση
- Απόθεση υλικού μήτρας

Γ. Μορφοποίηση συνθέτου κεραμικής
μήτρας



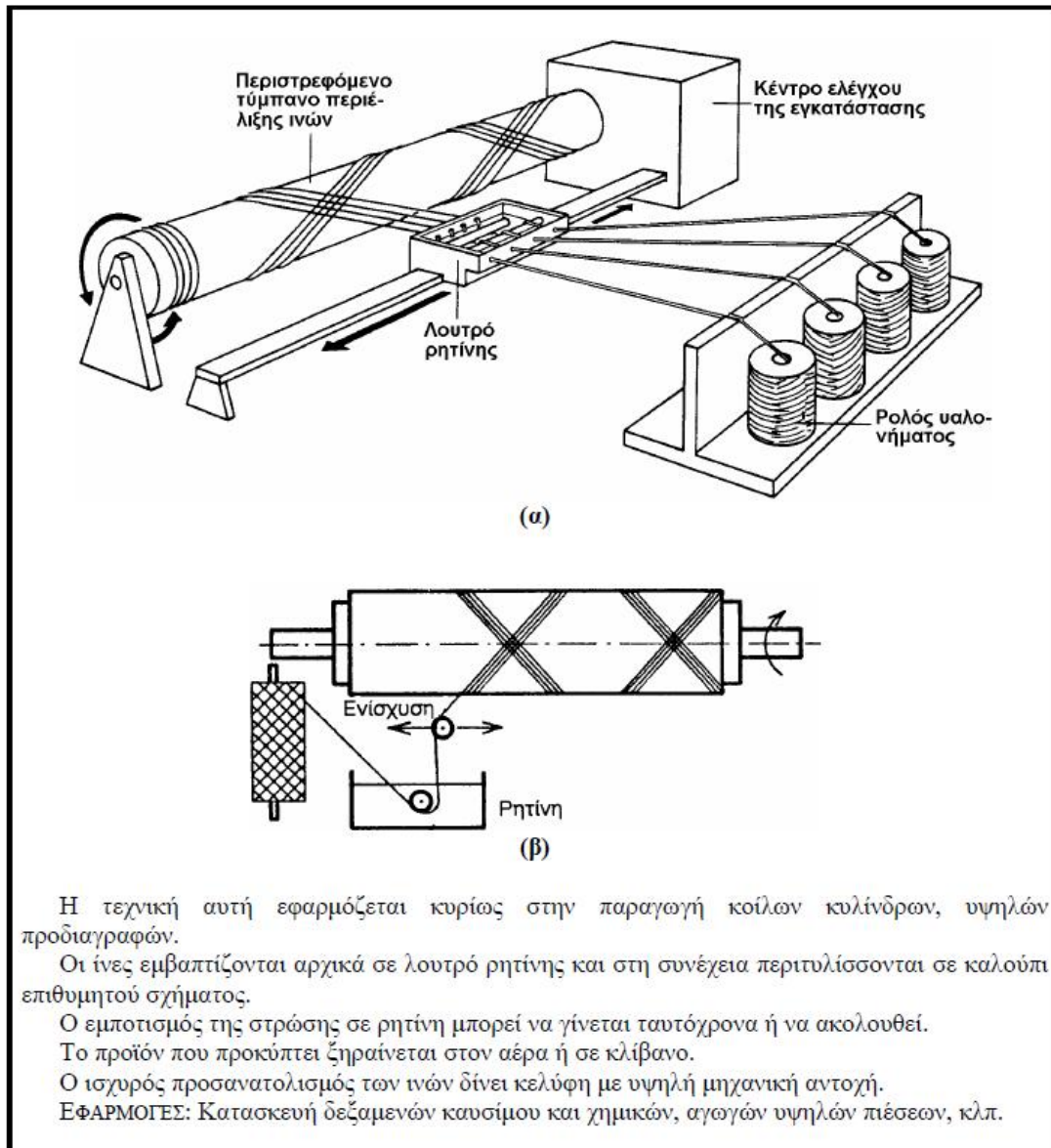
Εικόνα 17: Ασυνεχής μορφοποίηση συνθέτου: (α) χειροποίητη στρώση, (β) χύτευση θαλάμου πίεσης, (γ) χύτευση σε διαιρετό καλούπι

Οι ίνες διατίθενται στην αγορά σε δεσμίδες τυλιγμένες γύρω από ένα κυλινδρικό οδηγό.

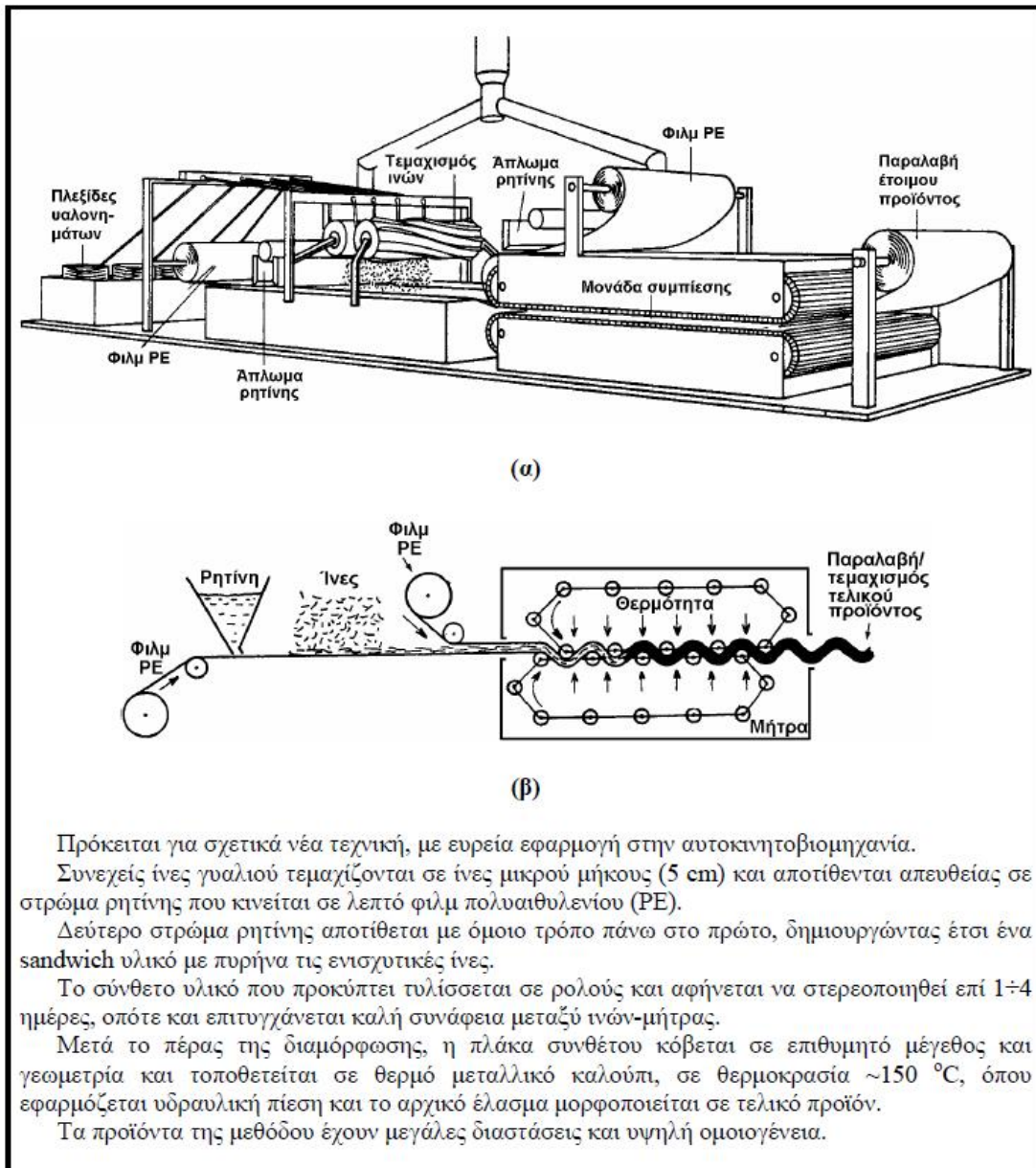
Μπορεί να είναι ευθυγραμμισμένες ή πεπλεγμένες.

Οι ασυνεχείς (μικρού μήκους) ίνες συνδυάζονται με το υλικό μήτρας είτε σε τυχαία διάταξη, είτε όσο το δυνατόν προσανατολισμένες.

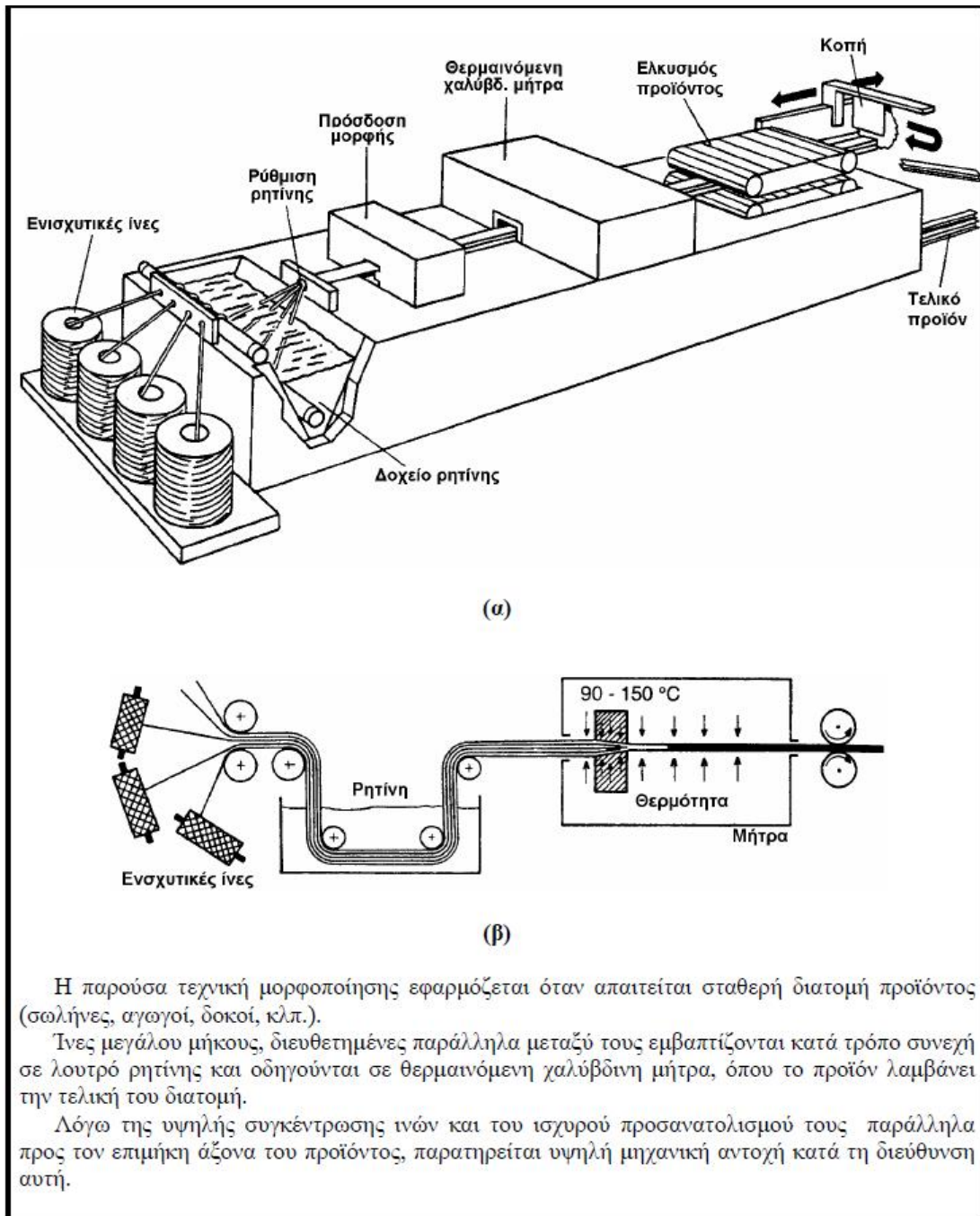
Οι συνεχείς (μεγάλους μήκους) ίνες είτε ευθυγραμμίζονται σε μία διεύθυνση σε μορφή ταινίας είτε διατάσσονται σε πλεγμένα στρώματα (υαλοϋφασμα).



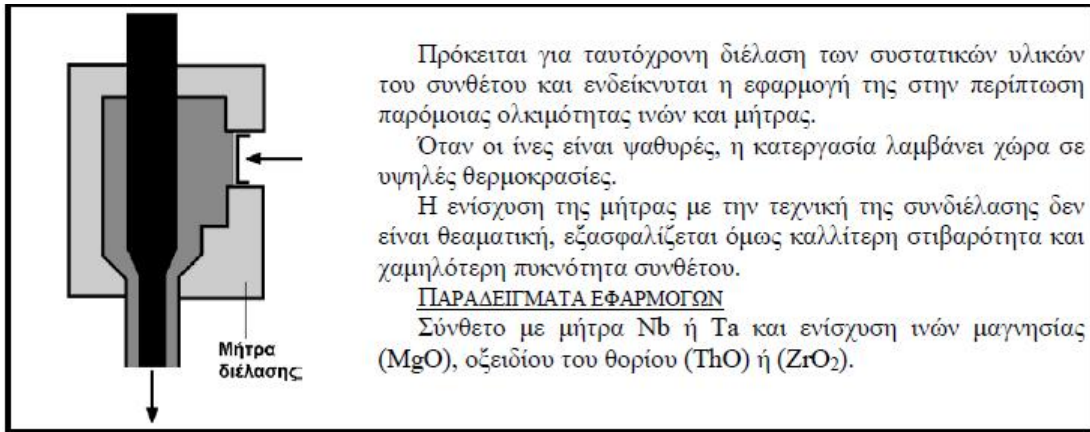
Εικόνα 18: Συνεχής μορφοποίηση συνθέτου με περιέλιξη νήματος (filament winding) (α) Διάταξη μορφοποίησης, (β) Σχηματική παράσταση διαδικασίας



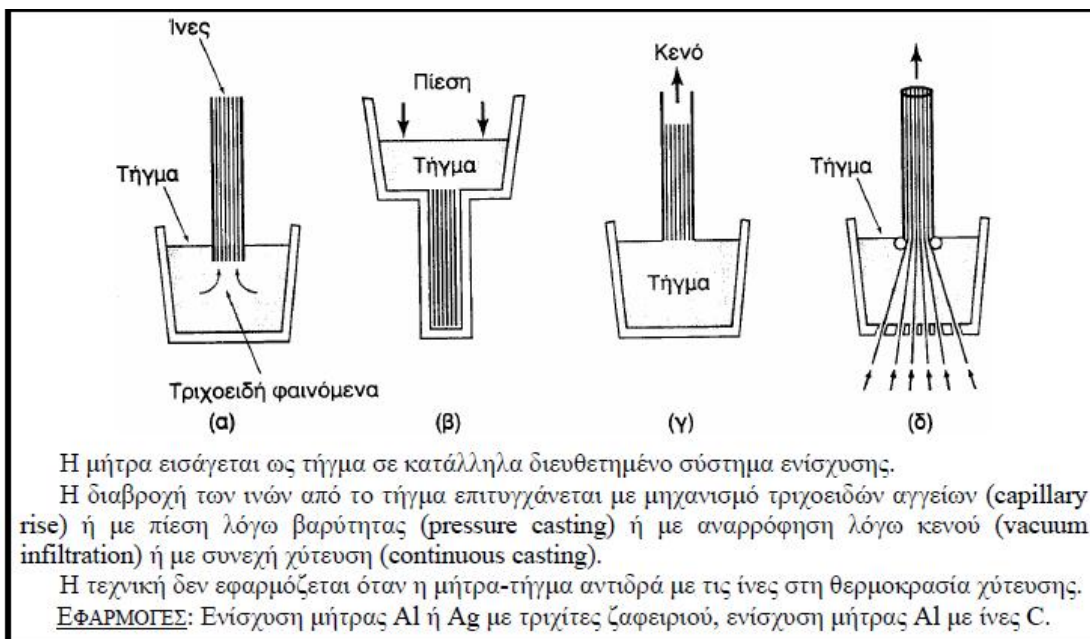
Εικόνα 19: Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheet moulding process, SMC)
(α) Διάταξη μορφοποίησης, (β) Σχηματική παράσταση διαδικασίας



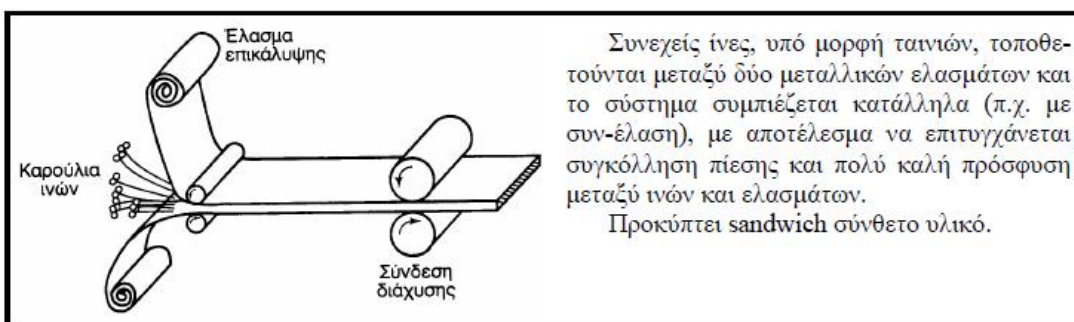
Εικόνα 20: Μορφοποίηση με εμβάπτιση (pultrusion) (α) Διάταξη μορφοποίησης, (β) Σχηματική παράσταση διαδικασίας



Εικόνα 21: Συνδιέλαση (co-extrusion)



Εικόνα 22: Μορφοποίηση με: (α) χύτευση με τη βοήθεια τριχοειδών φαινομένων, (β) πίεση βαρύτητας, (γ) εφαρμογή κενού και (δ) συνεχή χύτευση



Εικόνα 23: Μορφοποίηση συνθέτων μεταλλικής μήτρας με συμπίεση

Η απόθεση υλικού μήτρας στις ενισχυτικές ίνες γίνεται με τη μέθοδο της χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD) ή με ηλεκτραπόθεση.

Ø ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

Με CVD αποτίθενται Al και Ni σε ίνες C.

Με ηλεκτραπόθεση από διάφορα διαλύματα τους αποτίθενται Al, Cu και Ni σε ενισχυτικές ίνες κάθε τύπου.

Μετά την απόθεση υλικού οι επικαλυμμένες ίνες υποβάλλονται σε έψηση που εξασφαλίζει καλλίτερη συνάφεια μεταξύ ινών-μήτρας.

Οι τεχνικές μορφοποίησης συνθέτων κεραμικής μήτρας στηρίζονται στις τεχνικές μορφοποίησης των κεραμικών υλικών με διαδικασίες έψησης.

Η κεραμική μήτρα, υπό τη μορφή σκόνης, το συνδετικό υλικό (για εξασφάλιση καλής πρόσφυσης ινών-μήτρας) και οι ίνες υποβάλλονται σε έψηση σε υψηλή θερμοκρασία.

Στην περίπτωση υαλωδών κεραμικών, οι ενισχυτικές ίνες προστίθενται στη μήτρα, η οποία ευρίσκεται υπό μορφή τήγματος.

Ø ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

Σύνθετα κεραμικής μήτρας με ενισχυτικές ίνες SiC.

Σύνθετα με μήτρα νιτρίδιο του πυριτίου και ενίσχυση ινών W, SiC ή C.

Όταν το παραγόμενο σύνθετο υλικό πρέπει να λαμβάνει μη επίπεδη μορφή, η στρωματοποίηση επιτελείται μέσα σε καλούπια με ειδικές μεθόδους μορφοποίησης, π.χ. με έγχυση (injection moulding) ή με ψεκασμό (spray moulding).

Πιο πρόσφατα, με την ανάπτυξη 3-D (τρισδιάστατων) συνθέτων υλικών, έχουν εξελιχθεί πιο πολύπλοκες διαδικασίες, ελεγχόμενες με υπολογιστή. Αφού το

τριδιάστατο πλέγμα ινών στηθεί, το υλικό της μήτρας διαχέεται με πίεση εντός της διάταξης, όπου τελικά υφίσταται σκλήρυνση και παραδίδεται προς χρήση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΙΝΟΠΛΕΓΜΑΤΑ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΜΗΤΡΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ

2.1 Ενίσχυση κατασκευών με ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας

Πέραν της υπάρχουσας τεχνογνωσίας για χρησιμοποίηση σ' αυτή την κατεύθυνση ινοπλισμένων πολυμερών με εποξειδικές ρητίνες ως συγκολλητικό υλικό, εξετάζεται η εναλλακτική προοπτική της χρησιμοποίησης ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα (κονίαμα με βάση το τσιμέντο). Τα πλεονεκτήματα των ινοπλισμένων πολυμερών είναι πολλά και ιδιαίτερα γνωστά για τη σπουδαιότητά τους : εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή (πολλαπλάσια του κοινού χάλυβα), χαμηλό βάρος, ανθεκτικότητα σε διάβρωση, ευκολία στην εφαρμογή τους. Έτσι, σε διεθνές επίπεδο, ο αριθμός επεμβάσεων σε υφιστάμενες κατασκευές με χρήση ινοπλισμένων πολυμερών είναι ιδιαίτερα εκτεταμένος και ολοένα διευρύνεται τα τελευταία 20 χρόνια, όταν και αναπτύχθηκε για πρώτη φορά η συγκεκριμένη τεχνική. Παρ' όλα τα πλεονεκτήματά της η τεχνική των ινοπλισμένων πολυμερών έχει ορισμένες εγγενείς αδυναμίες που οφείλονται κυρίως στη χρήση ρητινών.

- Η χαμηλή τους αντίσταση σε υψηλές θερμοκρασίες. Αν και η ρητίνη καίγεται σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 250 C, προβλήματα στις μηχανικές της ιδιότητες ξεκινούν από τις θερμοκρασίες της τάξης των 70-80 C.

- Σχετικά υψηλό κόστος ρητινών.
- Αδυναμία εφαρμογής σε υγρές επιφάνειες σε κανονικές συνθήκες.
- Ο περιορισμός της ικανότητας “αναπνοής” των δομικών στοιχείων που καλύπτονται από ινοπλισμένα πολυμερή.
- Η δυσκολία διεξαγωγής μη καταστροφικής αποτίμησης πιθανών βλαβών πίσω από τους εν λόγω μανδύες μετά από σεισμούς.

Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκε και παρουσιάζεται εδώ η τεχνική της ενίσχυσης με μανδύες ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα, η οποία ξεκίνησε προ ολίγων ετών ακολουθώντας την αυξανόμενη παραγωγή δομικών κονιαμάτων υψηλών επιδόσεων. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να συγκρίνει τις δύο μεθόδους ενίσχυσης με τη χρήση σύνθετων υλικών σε οργανική μήτρα (τα γνωστά ως FRP) και σε ανόργανη όχι μόνο ως προς τη συμπεριφορά τους, αλλά και ως προς την αποτελεσματικότητά τους.

2.2 Σύγκριση μεθόδων FRP και ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας

Όπως θα αποδειχτεί παρακάτω, οι δυο αυτές μέθοδοι, αν και παρόμοιας φιλοσοφίας, έχουν σημαντικές διαφορές. Η κυριότερη διαφοροποίηση μεταξύ ινοπλισμένων πολυμερών και ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα έγκειται στο υλικό που χρησιμοποιείται ως συγκολλητική ουσία. Στην περίπτωση της μεθόδου FRP ως συγκολλητική ουσία χρησιμοποιείται εποξειδική ρητίνη, που είναι ένα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές (οργανικό υλικό), ενώ στη μέθοδο ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας χρησιμοποιείται κονίαμα τσιμεντοειδούς σύστασης (ανόργανο υλικό)². Πέρα από τις διαφορές στη χημική τους σύσταση τα δυο αυτά υλικά έχουν και διαφορές στη μορφή τους. Η εποξειδική ρητίνη είναι σε υγρή μορφή, ενώ το κονίαμα της ανόργανης μήτρας είναι παχύρρευστο μείγμα κονίας και λεπτόκοκκης άμμου που αναμειγνύεται με πολυμερή πρόσθετα. Συνεπώς η εποξειδική ρητίνη, λόγω της ρευστότητάς της παρουσιάζει κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι της ανόργανης μήτρας. Οι ρητίνες έχουν την δυνατότητα να διεισδύσουν στις ίνες, δημιουργώντας ισχυρό δεσμό μεταξύ ινών και μήτρας σε αντίθεση με το κονίαμα, το οποίο λόγω της κοκκώδους μορφής του, είναι δύσκολο να διεισδύσει σε ένα πλέγμα ινών ώστε να γίνει σωστός ο εμποτισμός των ινών. Γι' αυτό άλλωστε η μέθοδος ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας χρησιμοποιεί τα σύνθετα υλικά σε πλέγμα αντί για τα συνεχή ύφασματα που χρησιμοποιούνται στην FRP μέθοδο. Συμπερασματικά, το πλεονέκτημα των ινοπλισμένων πολυμερών έγκειται στο γεγονός ότι συνεργάζονται πιο αποτελεσματικά με τις ίνες και εξασφαλίζουν προβλέψιμη μηχανική συμπεριφορά. Αντιθέτως, τα σύνθετα υλικά ανόργανης μήτρας δεν εξασφαλίζουν τόσο καλή μονολιθική σύνδεση. Ταυτόχρονα απαιτούνται περισσότερες στρώσεις πλέγματος για να επιτευχθεί η ίδια αποδοτικότητα (αντοχή) με τα ινοπλισμένα πολυμερή, μιας και η απόσταση των ινών είναι αρκετά μεγαλύτερη. Ωστόσο έχει αποδειχθεί ότι η συνεισφορά της αντοχής του μανδύα στη συνολική αντοχή του ενισχυμένου στοιχείου, από ένα σημείο και πέρα είναι αμελητέα.

Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα της εποξειδικής ρητίνης έναντι της τσιμεντοκονίας είναι η ταχύτερη πήξη, χωρίς ωστόσο αυτό να σημαίνει και ταχύτερη εφαρμογή του συστήματος ενίσχυσης. Στον αντίποδα, το γεγονός ότι η μέθοδος ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας δεν εξασφαλίζει την ίδια μονολιθική σύνδεση με τη μέθοδο FRP στο στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος, δεν αποτελεί πάντα μειονέκτημα. Κατά τη ρηγμάτωση του σκυροδέματος του μέλους, εμφανίζονται μικρές ρωγμές στην εξωτερική επιφάνεια του κονιάματος, προειδοποιώντας για την αστοχία,

²Σιδέρης Κων/νος, Ενισχύσεις Κατασκευών, Ινοπλισμένα Πολυμερή
Μπαζαΐος Κων/νος-Παππά Σοφία, 15^ο Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών

ενώ παράλληλα μειώνεται η πιθανότητα να συμβεί αποκόλληση των συνθέτων υλικών καθώς δεν αξιοποιείται όλη η εφελκυστική αντοχή των ινών. Σε αντίθεση με τα κονιάματα, για την εφαρμογή της εποξειδικής ρητίνης απαιτείται κατάλληλη προετοιμασία της επιφάνειας ενίσχυσης. Πιο συγκεκριμένα πρέπει να εκτραχύνεται η επιφάνεια εφαρμογής, έτσι ώστε να αποκαλύπτονται τα αδρανή του δομικού στοιχείου για να είναι εφικτή η καλή συνάφεια του μανδύα με το μέλος.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα της εποξειδικής ρητίνης είναι ότι για να επιτευχθεί καλή συνάφεια με το σκυρόδεμα πρέπει η επιφάνεια που θα εφαρμοστεί να μην είναι υγρή, κάτι που δεν είναι απαραίτητο για τα τσιμεντοκονιάματα. Επίσης, η επιφάνεια εφαρμογής πρέπει να είναι καθαρή από σκόνη, για να υπάρχει μονολιθική σύνδεση μεταξύ μανδύα και υποστρώματος.

Οι μανδύες των ινοπλισμένων πολυμερών υστερούν έναντι των τσιμεντοκονιαμάτων στο γεγονός ότι είναι αδιαπέρατοι. Σαν αποτέλεσμα στο εσωτερικό του συστήματος ενίσχυσης εγκλωβίζεται υγρασία και συσσωρεύεται το οξυγόνο των πόρων προξενώντας προβλήματα απώλειας αντοχής στον πυρήνα του σκυροδέματος και στον εσωτερικό οπλισμό λόγω διάβρωσης. Αντίθετα, η μήτρα ανόργανης σύστασης προσφέροντας πλήρη, μηχανική, φυσική και χημική συμβατότητα του μανδύα με το ενισχυόμενο μέλος, εξασφαλίζει την επιθυμητή διαπερατότητα του μανδύα.

Επιπλέον οι εποξειδικές ρητίνες, όπως είναι γνωστό, έχουν πτωχή συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες, φωτιά και ακτινοβολίες. Συγκεκριμένα σε θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (που κυμαίνεται ενδεικτικά μεταξύ των 50 και 80 °C) απομειώνεται ραγδαία το μέτρο ελαστικότητάς τους, μειώνοντας έτσι την ικανότητά τους να μεταφέρουν δυνάμεις. Επίσης σε θερμοκρασίες της τάξης των 200 έως 300°C προκαλείται ανάφλεξη και η καύση τους απελευθερώνει τοξικές ουσίες που ενδέχεται να δημιουργήσουν ένα επιβλαβές περιβάλλον για το εργατικό προσωπικό. Αντιθέτως, τα τσιμεντοειδή κονιάματα δεν έχουν πρόβλημα σε υψηλές θερμοκρασίες, φωτιά και ακτινοβολίες και παράλληλα είναι φιλικά προς το εργατικό προσωπικό. Παράλληλα, εξασφαλίζουν καλύτερη προστασία των ινών από περιβαλλοντικούς παράγοντες και εξωτερικές φθορές. Γενικότερα η μέθοδος ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας υπερισχύει της μεθόδου FRP στον οικονομικό τομέα. Παρά το γεγονός ότι για την επίτευξη ίδιας αποδοτικότητας απαιτούνται περισσότερες στρώσεις σύνθετου υλικού, το υψηλό κόστος των εποξειδικών ρητινών έναντι των κονιαμάτων είναι ανασταλτικός παράγοντας στην επιλογή της μεθόδου των ινοπλισμένων πολυμερών. Τροχοπέδη στη χρήση των εποξειδικών ρητινών είναι η απαίτηση εξειδικευμένου προσωπικού και η υποχρεωτική χρήση προστατευτικού εξοπλισμού, σε αντίθεση με τα κονιάματα με τα οποία ο τεχνικός κόσμος είναι

περισσότερο εξοικειωμένος. Σοβαρό πρόβλημα της τεχνικής ενίσχυσης με FRP αποτελεί και η μεγάλη δυσκολία της αποτίμησης της σεισμικής επάρκειας της ενισχυμένης κατασκευής πίσω από τους πολυμερικά ινοπλισμένους μανδύες

Τέλος τα σύνθετα υλικά ανόργανης μήτρας εφαρμόζονται εύκολα και γρήγορα στην ενίσχυση, προκαλούν λιγότερη όχληση στο περιβάλλον, έχουν δυνατότητα ανακύκλωσης και απαιτούν λιγότερο εξοπλισμό για την εφαρμογή τους. Όλα τα στοιχεία που αναφέρθηκαν παραπάνω δείχνουν την υπεροχή των συνθέτων υλικών ανόργανης μήτρας έναντι των ινοπλισμένων πολυμερών και συνηγορούν στο γεγονός ότι η μέθοδος ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας είναι κατάλληλη να αντικαταστήσει τη μέθοδο FRP.

Παρακάτω παρατίθενται οι ενδεικτικές μηχανικές ιδιότητες των υλικών.

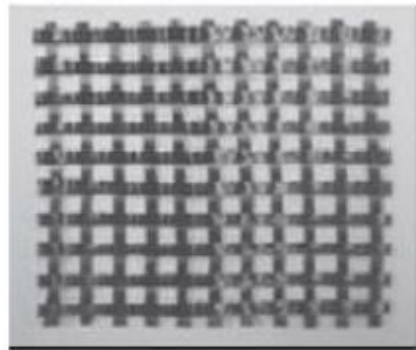
	Σκυρόδεμα	Μεταλλικός Οπλισμός	Ανθρακονήματα	Εποξειδική ρητίνη
Θλιπτική Αντοχή (MPa)	25-150	240-690	-	55-130
Εφελκυστική Αντοχή (MPa)	1-4	240-690	2200-4500	9-30
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	20-50	200-210	230-600	0.5-20
Συντ.Θερμικής Διαστολής (10 ⁻⁶ /°C)	8-16	10-15	7-12	25-30
Πυκνότητα (kg/m ³)	2350	7800	1750-1950	1100-1300

2.3 Διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου ενίσχυσης με ινοπλεγμάτα σε ανόργανη μήτρα

Παρά τις διαφορές που αναφέρθηκαν παραπάνω, η διαδικασία εφαρμογής και των δυο μεθόδων είναι παρόμοια :Αρχικά, γίνεται κατάλληλη προετοιμασία της επιφάνειας εφαρμογής της ενίσχυσης (εκτράχυνση, καμπύλωση των γωνιών, καθαρισμός από σκόνη) ώστε να είναι αποτελεσματική η περίσφιγξη. Το πλέγμα ξετυλίγεται στην προεμποτισμένη με τσιμεντοκονίαμα επιφάνεια του δομικού στοιχείου που πρόκειται να ενισχυθεί. Ταυτόχρονα γίνεται ο εμποτισμός των συνθέτων υλικών με τη συγκολλητική ουσία. Ο εμποτισμός του πλέγματος των ινών με κόνιαμα γίνεται έπειτα από κάθε στρώση σύνθετου υλικού που εφαρμόζεται στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου. Για να εξασφαλιστεί η πλήρης ενεργοποίηση του μανδύα είναι απαραίτητη η αγκύρωση του πλέγματος κατά τα 2/3 περίπου της

πλευράς του στοιχείου που ενισχύεται. Αφού τελειώσει η περιτύλιξη του στοιχείου με το μανδύα, τοποθετείται ένα εξωτερικό στρώμα τσιμεντοκονίας, ίδιας σύστασης με το υλικό της μήτρας, για προστασία του συστήματος ενίσχυσης. Το σύστημα ενίσχυσης αποκτά πλήρη αντοχή ύστερα από την πάροδο περίπου δεκαπέντε ημερών.

Παρακάτω φαίνονται εικόνες από την ενίσχυση υποστυλωμάτων με χρήση ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα :



Εικόνα 24:Ινόπλεγμα δύο διευθύνσεων



Εικόνα 25:Επάλειψη επιφάνειας με κονίαμα



Εικόνα 26: Περιτύλιξη πλέγματος



Εικόνα 27: Τελική Επίστρωση με Τσιμεντοκονία

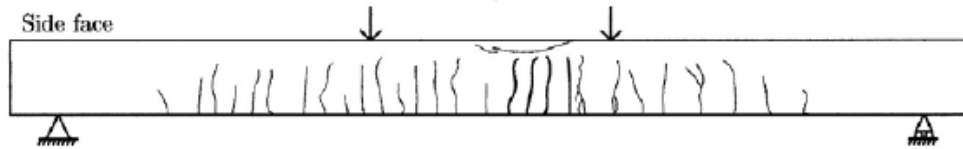
2.4 Μηχανική Συμπεριφορά Στοιχείων Ενισχυμένων με Σύνθετα Υλικά

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς στοιχείων ενισχυμένων με ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας έχουν λάβει χώρα αρκετές πειραματικές έρευνες την τελευταία οκταετία τόσο στην Ελλάδα όσο και στο εξωτερικό. Οι παράμετροι που ερευνώνται αφορούν τη συμπεριφορά των ενισχυμένων μελών σε διάφορων ειδών καταπονήσεις, τα ιδιαίτερα μηχανικά χαρακτηριστικά τους, τους τρόπους και μηχανισμούς αστοχίας τους, το βέλτιστο τρόπο εφαρμογής των μανδύων. Επίσης, επιχειρείται σύγκριση με την αντίστοιχη συμπεριφορά των μελών πριν την ενίσχυση ή μετά από ενίσχυση με ινοπλισμένα πολυμερή εποξειδικών ρητινών για καλύτερη, συγκριτική αξιολόγηση. Λόγω της σχετικά σύντομης μελέτης της εν λόγω τεχνικής πλήρης ταύτιση αποτελεσμάτων δεν είναι δυνατή. Γι' αυτό επιχειρείται μια ανασκόπηση της ερευνητικής διαδικασίας με κριτήριο την ταύτιση των συμπερασμάτων τους.

2.5 Ενίσχυση Έναντι Κάμψης

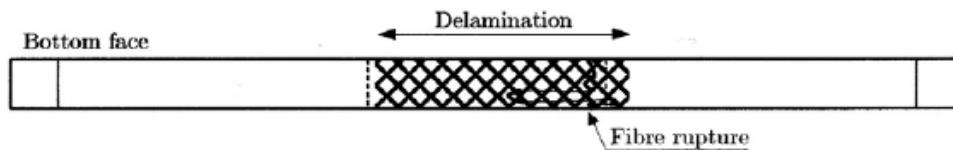
Σκοπός της ενίσχυσης μελών έναντι κάμψης είναι η ανάληψη μέρους των τάσεων του εφελκυσμένου πέλματος από τους μανδύες σύνθετων υλικών, εκμεταλλευόμενοι έτσι την εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή των υλικών αυτών. Συνήθως αυτού του είδους η ενίσχυση έχει εφαρμογή σε δοκούς και πλάκες που κρίνονται ανεπαρκείς στην κρίσιμη - μεσαία – διατομή σε κάμψη. Σ' αυτή την περίπτωση η εφαρμογή είναι σχετικά απλή, αφού συγκολλάται ο μανδύας στο εφελκυσμένο πέλμα. Υπάρχει, όμως, και η περίπτωση υποστυλωμάτων με κρίσιμες σε κάμψη τις ακραίες διατομές. Στην περίπτωση αυτή η εφαρμογή των σύνθετων υλικών είναι γενικά δύσκολη, δεδομένου ότι στις περιπτώσεις αυτές πρέπει να εξασφαλιστεί η αγκύρωση των οπλισμών εντός των κόμβων. Πειράματα που έχουν

εκπονηθεί μελετούν, ως επί των πλείστων, την κάμψη 2 σημείων αμφιέριστων δοκών στις οποίες είχε τοποθετηθεί μανδύας σε ανόργανη μήτρα στο εφελκυσμένο (κάτω) πέλμα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



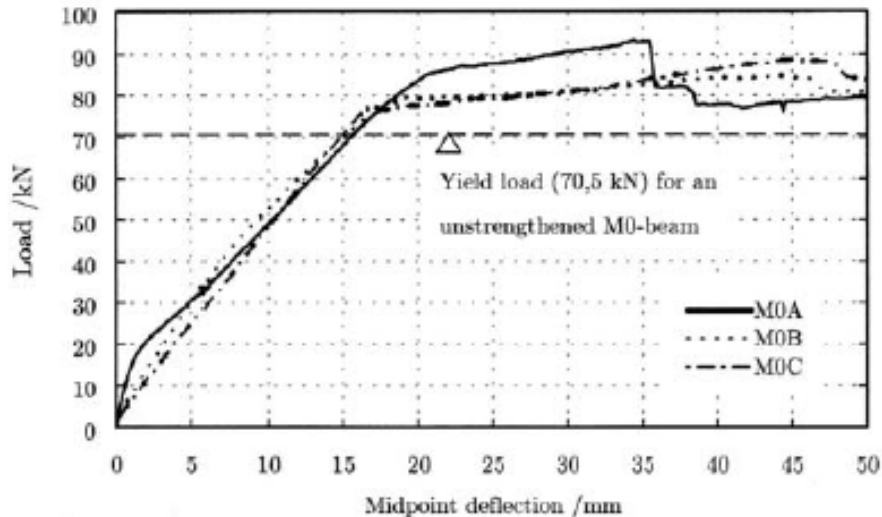
Εικόνα 28:Κάμψη 2 σημείων αμφιέριστων δοκών με τοποθετημένο μανδύα σε ανόργανη μήτρα

Η πιθανότερη μορφή αστοχίας δοκών ενισχυμένων με ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας (αν και είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων όπως της έντασης της φόρτισης, του υπάρχοντος οπλισμού κτλ) είναι η θραύση των ινών και ακολούθως η τοπική αποκόλληση των ινών από το δοκίμιο, όπως διακρίνεται στο σχήμα:



Εικόνα 29:Θραύση και αποκόλληση ινών από το δοκίμιο

Παρακάτω φαίνεται και ένα τυπικό διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης στο μέσον μιας ανάλογης δοκού:



Σε γενικές γραμμές η συμπεριφορά των οπλισμών ενίσχυσης ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα είναι εξίσου ικανοποιητική με αυτή των οπλισμών σε πολυμερική μήτρα, αν και μειονεκτεί ελαφρώς. Παρόλο που και οι δυο τεχνικές δεν οδηγούν σε σημαντική αύξηση του φορτίου αστοχίας, στοιχεία ενισχυμένα με με ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας είχαν μικρότερο φορτίο διαρροής, μικρότερη δυσκαμψία μετά τη διαρροή, αλλά και μεγαλύτερη παραμορφωσιμότητα κατά την αστοχία συγκριτικά με τα αντίστοιχα με FRP. Τα χαρακτηριστικά αυτά αποδίδονται στην ελαφρά μειωμένη διατμητική συνεργασία μεταξύ εξωτερικών οπλισμών και σκυροδέματος στην περίπτωση των με ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας συγκριτικά με τα FRP.

Συγκεκριμένα, από την πειραματική διαδικασία έχει προκύψει ότι η ενίσχυση μελών με ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας οδηγεί σε αύξηση του φορτίου αστοχίας κατά 10-20 %. Όμως, η αντίστοιχη αύξηση της αντοχής έναντι κάμψης με FRP είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με αυτή των ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα. Οι αντίστοιχες συγκριτικές έρευνες την προσδιορίζουν σε ποσοστό 35-45%. Καλό θα ήταν να επισημάνουμε εδώ τη σημασία της χρήσης κονιαμάτων υψηλής αντοχής και δυσθραυστότητας κατά την εφαρμογή των με ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας για την αποφυγή μιας ιδιαίτερης μορφής αστοχίας, της διαστρωματικής απόσχισης. Πρόκειται για την αποκόλληση του οπλισμού ενίσχυσης δια μέσου του κονιάματος στη διεπιφάνεια μεταξύ δυο στρώσεων ινοπλεγμάτων (και όχι κοντα στη διεπιφάνεια σκυροδέματος- οπλισμών ενίσχυσης, όπως συμβαίνει στην ενίσχυση με FRP), λόγω χαμηλής διατμητικής αντοχής του κονιάματος.

Η καμπτική ενίσχυση δοκών οδηγεί σε πλάσιμη συμπεριφορά του μέλους. Μάλιστα, η παραμόρφωση αστοχίας του προκύπτει της τάξης του 0.5%. Αυτή η παραμόρφωση είναι επιθυμητή γιατί η διαρροή του χάλυβα συμβαίνει σε μικρότερη τιμή (0.2-0.3%), γεγονός που επιτρέπει στις ίνες να αξιοποιήσουν όσο το δυνατόν

περισσότερο τη δυνατότητα ανάληψης εφελκυστικών τάσεων. Πάντως, αξίζει να σημειωθεί ότι η τεχνική αυτή χρίζει περαιτέρω διερεύνησης για καμπτική ενίσχυση στοιχείου τύπου πλάκας (και όχι δοκού), ώστε να γίνεται πλήρης αξιοποίηση των ινών και στις δύο διευθύνσεις των πλεγμάτων.

2.6 Ενίσχυση Τοιχοποιίας με Σύνθετα Υλικά

Οι κατασκευές φέρουσας τοιχοποιίας αποτελούν έναν από τους παλαιότερους τύπους κατασκευών στον κόσμο. Όπως έχει διαπιστωθεί λόγω της παλαιότητάς τους και της συσσωρευόμενης σεισμικής καταπόνησης οι κατασκευές αυτές είναι επιρρεπείς σε αστοχία σε περιπτώσεις σεισμών ακόμα και μέτριας έντασης και σε ισχυρούς ανέμους, αποτελώντας σημαντικό κίνδυνο για την δημόσια ασφάλεια.

Η αναγκαιότητα της ενίσχυσής τους έχει οδηγήσει σε πληθώρα μεθόδων επεμβάσεων. Η μέθοδος των ινοπλισμένων πολυμερών (FRP) έχει εφαρμοστεί κι εδώ με σημαντικά πλεονεκτήματα. Τα μειονεκτήματα όμως της χρήσης εποξειδικών ρητινών που έχουν αναφερθεί οδήγησαν στην ανάπτυξη της τεχνικής των ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας. Εδώ εξετάζονται τα αποτελέσματα της ενίσχυσής τους με την εν λόγω μέθοδο σε σύγκριση με αυτή των FRP, όπως έχουν προκύψει από πειραματική έρευνα του πανεπιστημίου της Πάτρας (Paranicolaou C. Et al.2007).

Πειραματική διαδικασία: Τοίχοι οπτοπλινθοδομής ενισχύθηκαν με αμφίπλευρους μανδύες σύνθετων υλικών (Ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας – FRP). Εν συνεχεία δοκιμάστηκαν υπό συνθήκες ανακυκλιζόμενης φόρτισης σε εκτός επιπέδου κάμψη 3 σημείων. Οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν ήταν δοκίμια με διαφορετικό αριθμό στρώσεων μανδύα και τοίχοι με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

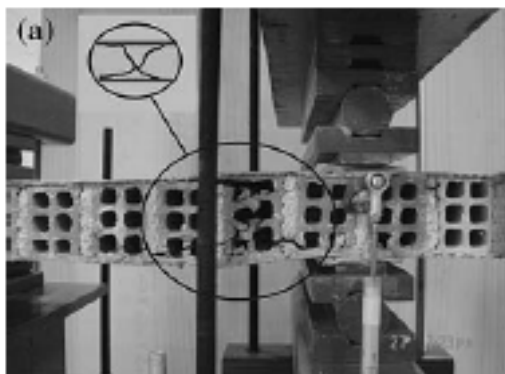
Συμπεράσματα: Η ενίσχυση φέρουσας τοιχοποιίας με τις δύο υπό εξέταση μεθόδους έδωσε εξαιρετικά αποτελέσματα τόσο στην αύξηση της αντοχής όσο και στην παραμορφωσιμότητα σε σχέση με τα αρχικά χωρίς ενίσχυση στοιχεία. Η συμπεριφορά, όμως, των ενισχυμένων τοίχων μπορεί να κατηγοριοποιηθεί βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων ως εξής :

1. Αστοχία μέλους λόγω καταστροφής της τοιχοποιίας και αποκόλλησης του μανδύα

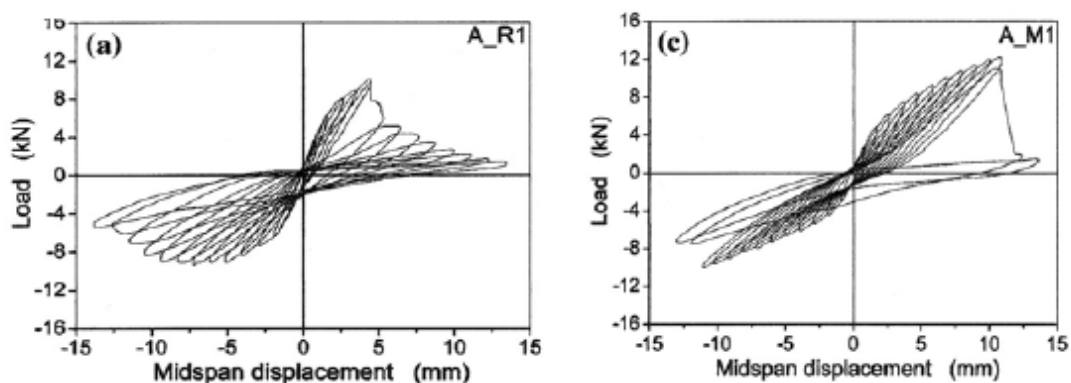
Στην περίπτωση αυτή τα ενισχυμένα στοιχεία και των δύο μεθόδων παρουσίασαν τάσεις αποκόλλησης των οπτόπλινθων μέσω σχηματισμού ρωγμών στον αρμό πλήρωσης της τοιχοποιίας. Παρ' όλα αυτά, λόγω της παρουσίας των μανδύων συγκρατήθηκαν και η τελική αστοχία επήλθε από την ανάπτυξη διαγώνιων ρωγμών

κάθετα στο επίπεδο του τοίχου Το γεγονός αυτό είχε ως αποτέλεσμα την πτώση της δύναμης και της δυσκαμψίας του στοιχείου και συνοδεύτηκε από αποκόλληση των μανδυνών. Στην ανόργανη μήτρα λόγω της χαμηλότερης αντοχής της η κατανομή των τάσεων ήταν περισσότερο ομοιόμορφη, γεγονός που οδήγησε σε ομαλότερη συμπεριφορά του στοιχείου και εν τέλει σε αύξηση της αντοχής και της παραμορφωσιμότητάς του σε σχέση με αυτές των FRP. Η αύξηση αυτή (υπέρ των ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας) κυμαίνεται μεταξύ:

- 13-22% για την αντοχή
- 39-140% για την παραμορφωσιμότητα.



Εικόνα 30: Αστοχία δοκιμίου λόγω ανάπτυξης χιαστί ρωγμών



Εικόνα 31: Διαγράμματα Δύναμης-Μετατόπισης για:

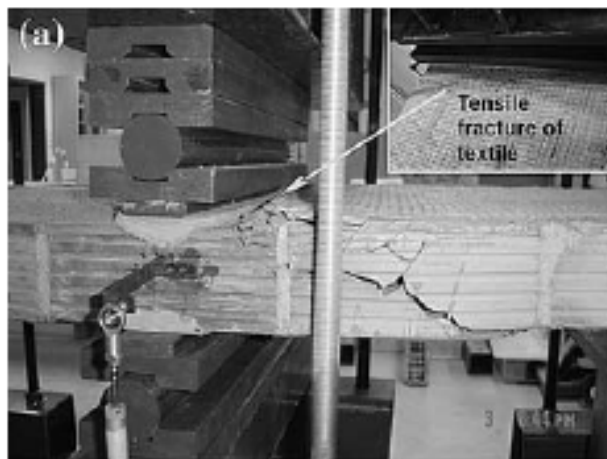
α) Στοιχείο Ενισχυμένο με FRP

β) Στοιχείο Ενισχυμένο με ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας

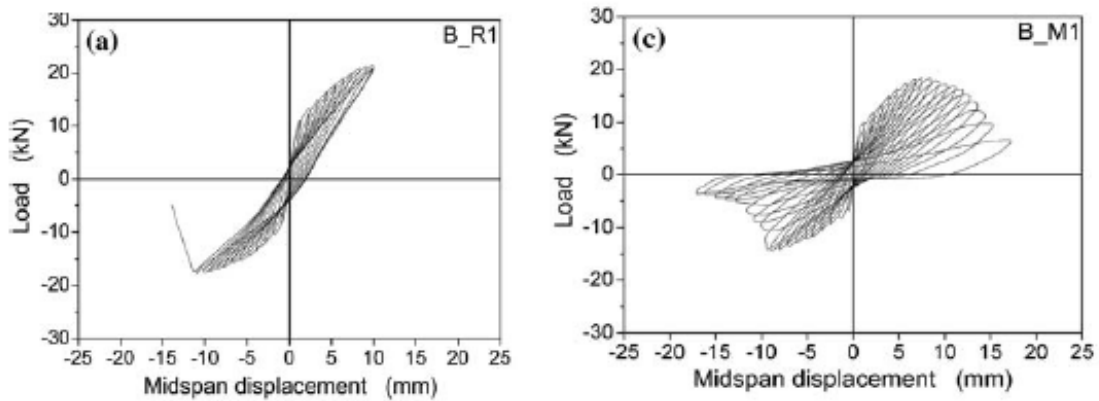
2. Αστοχία μέλους λόγω θραύσης των ινών των σύνθετων υλικών

Η εν λόγω μορφή αστοχίας είναι πιο σπάνια και εμφανίστηκε σε περιπτώσεις τοιχοποιίας που ήταν λιγότερο επιρρεπής σε κάμψη και η ενίσχυση έγινε με τον ελάχιστο αριθμό στρώσεων μανδύα. Κατά τη διάρκεια της ανακυκλιζόμενης φόρτισης άρχισαν να αναπτύσσονται οι διαγώνιες ρωγμές όπως αναμενόταν αλλά παρουσιάστηκε ξαφνική αστοχία των ινών, που οδήγησε σε απότομη πτώση της ικανότητας του στοιχείου να φέρει φορτία. Βέβαια, στην περίπτωση των στοιχείων με ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας η τελική παραμόρφωση ναι μεν ήταν μειωμένη (και μάλιστα περισσότερο σε σχέση με αυτή των FRP), αλλά διατήρησαν μια μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, όπως διακρίνεται στα διαγράμματα. Στην περίπτωση που ο τρόπος αστοχίας είναι η θραύση των ινών η μέθοδος των FRP εμφανίζεται πιο αποτελεσματική, αφού παρουσιάζει σε σύγκριση με τα ινοπλεγμάτα ανόργανης μήτρας αύξηση:

- 19% στην αντοχή
- 14% στην παραμορφωσιμότητα



Εικόνα 32: Αστοχία δοκιμίου λόγω θραύσης των ινών



Εικόνα 33: Διαγράμματα Δύναμης-Μετατόπισης για:

α) Στοιχείο Ενισχυμένο με FRP

β) Στοιχείο Ενισχυμένο με ινοπλέγματα ανόργανης μήτρας

2.7 Ενίσχυση κατασκευών με προηγμένα υλικά

Τα τελευταία 15 χρόνια περίπου έχει αναπτυχθεί διεθνώς, αλλά και στη χώρα μας, η τεχνική ενίσχυσης κατασκευών που βασίζεται στην εξωτερική επικόλληση συνθέτων υλικών (ινοπλισμένων πολυμερών – Fibre Reinforced Polymers – FRP) σε στοιχεία (υποστυλώματα, δοκοί, τοιχεία, κόμβοι, τοιχοποιίες κ.τ.λ.) τα οποία, είτε έχουν υποστεί βλάβες από σεισμό, είτε έχουν ανεπάρκεια αντοχής ή/και πλαστιμότητας. Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από συνεχείς ίνες (συνήθως άνθρακα ή γυαλιού) σε συνδυασμό με εποξειδική ρητίνη και διατίθενται σε μορφή σχετικά δύσκαμπτων “λωρίδων” (πάχους της τάξης του 1 mm, κατά κανόνα με βάση τις ίνες άνθρακα) ή εύκαμπτων “υφασμάτων” (πάχους της τάξης των 0.1-0.8 mm) με ίνες (π.χ. άνθρακα ή γυαλιού) σε μία (συνήθως) ή περισσότερες διευθύνσεις.



Εικόνα 34: Ίνες άνθρακα, γυαλιού και αραμιδίου



Εικόνα 35: Ενδεικτικές μορφές συνθέτων υλικών: ράβδοι οπλισμού, τένοντες προέντασης, λωρίδες ενίσχυσης, σπειροειδείς οπλισμοί

Βασικά χαρακτηριστικά των συνθέτων υλικών είναι η εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή (5-6 φορές μεγαλύτερη από αυτή του χάλυβα), το χαμηλό βάρος (περίπου 1/4 του χάλυβα) και η ικανοποιητική ανθεκτικότητα σε διάρκεια (ιδιαίτερα για υλικά με ίνες άνθρακα). Η αντίστοιχη τεχνική ενίσχυσης, η οποία συνίσταται στη μέσω εποξειδικών ρητινών επικόλληση των συνθέτων υλικών στις εξωτερικές επιφάνειες δομικών στοιχείων (π.χ. επικόλληση λωρίδων σε εφελκυσόμενα πέλατα, περιτύλιξη/περίσφιγξη υποστυλωμάτων με υφάσματα), χαρακτηρίζεται από εξαιρετική ευκολία, ευελιξία και ταχύτητα εφαρμογής και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής και της ικανότητας παραμόρφωσης των στοιχείων χωρίς να μεταβάλλεται η γεωμετρία ή να αυξάνεται η δυσκαμψία τους. Έτσι, η τεχνική των συνθέτων υλικών είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστική με συμβατικές τεχνικές επεμβάσεων (π.χ. επικόλληση χαλυβοελασμάτων, μεταλλικοί μανδύες) παρά το υψηλότερο κόστος υλικών, γι' αυτό και οι εφαρμογές της, οι οποίες στην Ελλάδα ήδη ξεπερνούν τις 1200, αυξάνονται με ραγδαίους ρυθμούς.



Δύσκαμπτη

Εύκαμπτο

Εικόνα 36: Ενίσχυση δοκού σε κάμψη με πρόσθετο εφελκόμενο οπλισμό και σε διάτμηση με υφάσματα ινών στα άκρα



Εικόνα 37: Ενίσχυση υποστυλωμάτων μέσω μανδύα σύνθετων υλικών με στόχο την αύξηση της περίσφιγξης και της αντοχής σε τέμνουσα



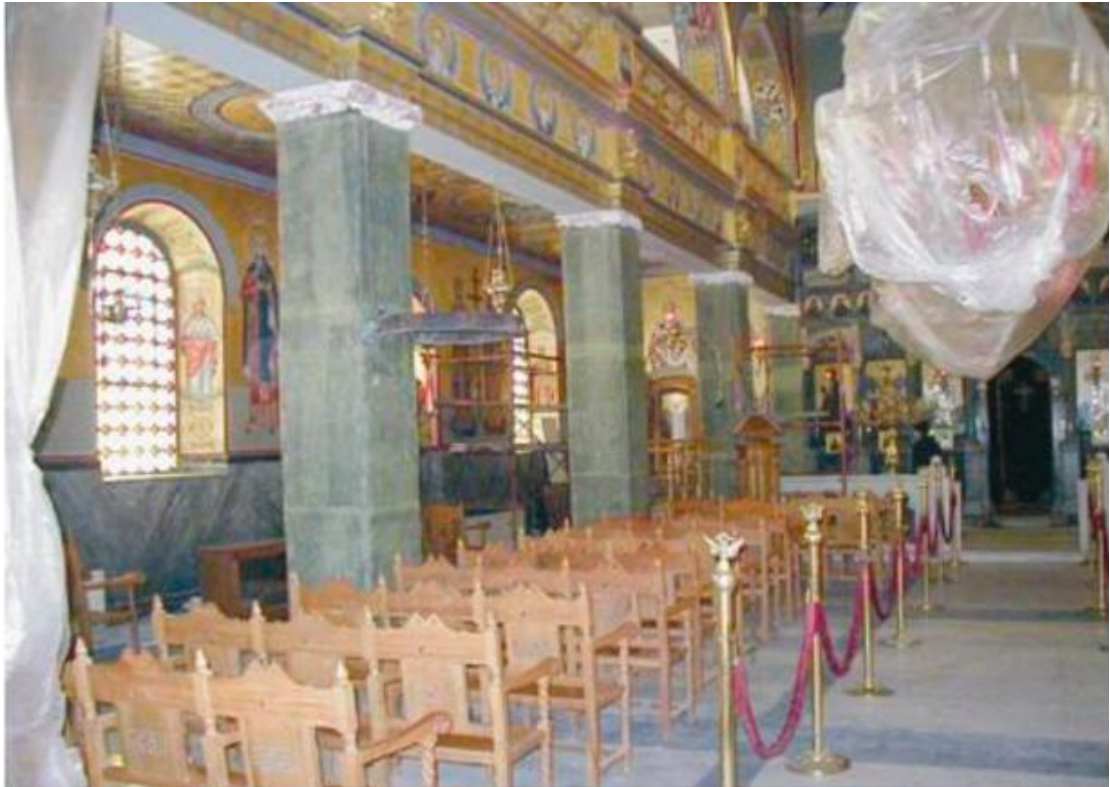
Εικόνα 38: Ενίσχυση υποστυλωμάτων, δοκών και κόμβων με υφάσματα σύνθετων υλικών



Εικόνα 39: Ενίσχυση προβόλου με υφάσματα ινών



Εικόνα 40: Ενίσχυση τοιχοποιίας για τέμνουσα εντός του επιπέδου της



Εικόνα 41: Περίσφιγξη υποστηλωμάτων από φέρουσα τοιχοποιία

2.8 Κανόνες Εφαρμογής σύνθετων υλικών

Οι γενικοί κανόνες που διέπουν την εφαρμογή των συνθέτων υλικών συνοψίζονται παρακάτω:

- Απαιτείται επιμελημένη προετοιμασία της επιφάνειας όπου πρόκειται να γίνει επικόλληση των συνθέτων υλικών (αφαίρεση χαλαρών τμημάτων, πλήρωση ρωγμών, εξασφάλιση επίπεδου και “υγιούς” υποστρώματος). Στην περίπτωση επικόλλησης εύκαμπτων υφασμάτων, η εφαρμογή των υλικών θα πρέπει να γίνεται έτσι ώστε οι ίνες να είναι απόλυτα ευθύγραμμες (με την καλύτερη δυνατή τάνυση).

- Για την ανάληψη των πρόσθετων εντατικών μεγεθών (π.χ. ροπή κάμψης, τέμνουσα, αξονική δύναμη) τα σύνθετα υλικά δρουν ως εφελκυστικός οπλισμός παραλαμβάνοντας δυνάμεις μόνο κατά τη διεύθυνση των ινών.

- Στην οριακή κατάσταση αντοχής ο οπλισμός ενίσχυσης (συνθέτων υλικών) φθάνει σε μία οριακή παραμόρφωση (μικρότερη της μέγιστης εφελκυστικής παραμόρφωσης των υλικών), η οποία εξαρτάται είτε από την ικανότητα του υποστρώματος (σκυροδέμα, τοιχοποιία) να μεταφέρει (μέσω διάτμησης) τις εφελκυστικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στα σύνθετα υλικά είτε από τον τρόπο αγκύρωσης. Σε κάθε περίπτωση, η επαρκής αγκύρωση των οπλισμών ενίσχυσης (στα άκρα τους) είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την εξασφάλιση της ικανότητας ανάληψης σημαντικών δυνάμεων.

- Η διαστασιολόγηση δομικών στοιχείων ενισχυμένων με σύνθετα υλικά βασίζεται στις αρχές που διέπουν τη μελέτη συμβατικών κατασκευών (π.χ. οπλισμένου σκυροδέματος, οπλισμένης φέρουσας τοιχοποιίας).

- Ο βαθμός ενίσχυσης (π.χ., για την περίπτωση ενίσχυσης στοιχείου σε κάμψη, ο λόγος της ροπής αντοχής μετά την ενίσχυση προς την αρχική) θα πρέπει να περιορίζεται έτσι ώστε, σε περίπτωση “αστοχίας” των οπλισμών ενίσχυσης (π.χ. πυρκαϊά), το στοιχείο να αναλαμβάνει ασφαλώς τουλάχιστον τα μόνιμα φορτία.

2.9 Ενίσχυση Οπλισμένου Σκυροδέματος Κάμψη

Η εφαρμογή συνθέτων υλικών για ενισχύσεις έναντι κάμψης γίνεται κυρίως σε στοιχεία τύπου δοκού ή πλάκας, μέσω ελασμάτων ή υφασμάτων ή ακόμα και ράβδων σε εγκοπές, τα οποία επικολλούνται στο εφελκυσμένο πέγμα με διεύθυνση των ινών τέτοια ώστε να παραλαμβάνουν τις λόγω κάμψης εφελκυστικές δυνάμεις (π.χ. παράλληλα στον άξονα του μέλους, για την περίπτωση δοκών, σε δύο κάθετες

μεταξύ τους διευθύνσεις για την περίπτωση πλακών). Στην περίπτωση υποστυλωμάτων με κρίσιμες σε κάμψη τις ακραίες διατομές, η εφαρμογή των συνθέτων υλικών σε μορφή ελασμάτων ή υφασμάτων είναι γενικά δύσκολη, δεδομένου ότι στις περιπτώσεις αυτές πρέπει να εξασφαλισθεί η συνέχεια (αγκύρωση) των οπλισμών εντός των κόμβων. Τούτο γίνεται εφικτό όταν οι δοκοί έχουν μικρότερο πλάτος από τα υποστυλώματα ή όταν χρησιμοποιούνται οπλισμοί συνθέτων υλικών μικρού πλάτους (π.χ. μορφής ράβδων) σε εγκοπές.

Οι υπολογισμοί για τους ελέγχους αντοχής και λειτουργικότητας σε εφαρμογές καμπτικών ενισχύσεων γίνονται κατ' αναλογία με αυτούς για συμβατικά οπλισμένα (με χαλύβδινες ράβδους) στοιχεία, λαμβάνοντας υπόψη όμως: (α) τις ιδιαιτερότητες της μηχανικής συμπεριφοράς των συνθέτων υλικών (γραμμική ελαστικότητα μέχρι τη θραύση) και (β) το ενδεχόμενο πρόωρης αποκόλλησής τους από το σκυρόδεμα.

Με δεδομένη τη ροπή σχεδιασμού του στοιχείου μετά την ενίσχυση, MRd, η απαιτούμενη διατομή του οπλισμού συνθέτων υλικών, Af, επιλέγεται έτσι ώστε κατά την αστοχία του ενισχυμένου στοιχείου να έχει διαρρεύσει ο (υφιστάμενος) εφελκόμενος χάλυβας. Μετά τη διαρροή αυτή μπορεί να αναπτυχθεί ο ένας από τους εξής δύο μηχανισμούς αστοχίας:

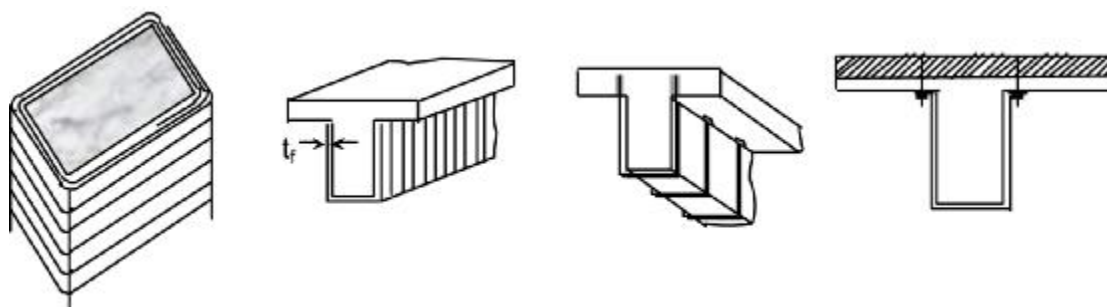
- θραύση (σύνθλιψη) του σκυροδέματος, ενώ η παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά, εf, παραμένει σε χαμηλά επίπεδα, κάτω από μία οριακή τιμή της τάξης του $\epsilon_{f,lim} 0.006$.

- ανάπτυξη της μέγιστης επιτρεπόμενης παραμόρφωσης στα σύνθετα υλικά (δηλαδή η εf φθάνει την οριακή τιμή $\epsilon_{f,lim}$), χωρίς να υποστεί θραύση το σκυρόδεμα (μεγαλύτερη παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά ενδέχεται να οδηγήσει σε αστοχία του υποστρώματος και αποκόλληση).

Διάτμηση

Η ενίσχυση στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος σε διάτμηση με σύνθετα υλικά επιτυγχάνεται μέσω της επικόλλησης υφασμάτων ή, σπανιότερα, ελασμάτων, τα οποία επικολλούνται στις εξωτερικές επιφάνειες με τις ίνες κατά το δυνατόν παράλληλες στις τροχιές των κυρίων τάσεων, δηλαδή περίπου κάθετα σε πιθανές ρωγμές. Τούτο βέβαια δεν είναι γενικά πρακτικό, γι' αυτό, όπως και στην περίπτωση της χρήσης συνδετήρων για την ανάληψη τέμνουσας, οι ίνες εφαρμόζονται στις πιο πολλές περιπτώσεις με διεύθυνση κάθετη στον άξονα των δομικών στοιχείων.. Η

διάταξη των υλικών σε μορφή κλειστού μανδύα ή επαρκώς αγκυρωμένων (στη θλιβόμενη ζώνη) λωρίδων αποτελεί τη βέλτιστη λύση από άποψης μηχανικής συμπεριφοράς και θα πρέπει να επιδιώκεται, όπου βέβαια αυτό είναι πρακτικά εφικτό. Σε κάθε άλλη περίπτωση (π.χ. ανοικτός μανδύας) η αποτελεσματικότητα των συνθέτων υλικών είναι σχετικά περιορισμένη, λόγω πρόωρης αποκόλλησης.



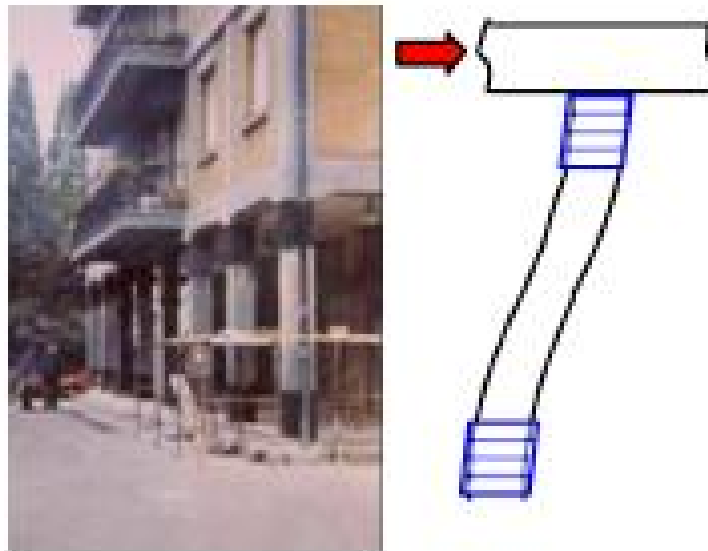
Εικόνα 42: Διάταξη συνθέτων υλικών για ενίσχυση έναντι τέμνουσας: (α) κλειστός μανδύας υποστυλώματος, (β) ενίσχυση πλακοδοκού με μανδύα ανοικτού τύπου, (γ) αγκύρωση λωρίδων στη θλιβόμενη ζώνη

Περίσφιγξη

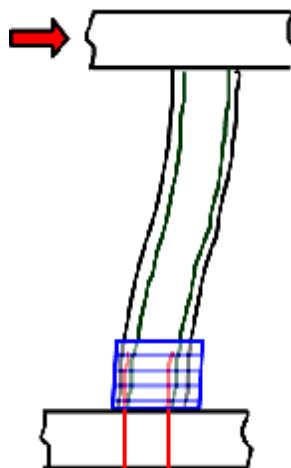
Η δράση των συνθέτων υλικών κατά την περίσφιγξη του σκυροδέματος είναι εξαιρετικά ευνοϊκή και γενικά ευνοϊκότερη σε σχέση με αυτή των μεταλλικών μανδυών ίσης δυσκαμψίας. Κατά την αξονική καταπόνηση υποστυλωμάτων (π.χ. λόγω κάμψης και/ή αξονικού φορτίου) το σκυρόδεμα διογκώνεται εγκάρσια, με αποτέλεσμα ο μανδύας συνθέτων υλικών που το περιβάλλει να ενεργοποιείται (μέσω της ανάπτυξης εφελκυστικών παραμορφώσεων στις ίνες), επιβάλλοντας έτσι εγκάρσιες θλιπτικές τάσεις περίσφιγξης. Οι τάσεις αυτές έχουν ως αποτέλεσμα:

- Αύξηση της θλιπτικής αντοχής και της οριακής παραμόρφωσης του σκυροδέματος.
- Αύξηση της γωνίας στροφής χορδής ενός μέλους στην (καμπτική) αστοχία, δηλαδή αύξηση της πλαστιμότητας.
- Καθυστέρηση της εμφάνισης λυγισμού των διαμήκων ράβδων σε περιοχές με αραιή διάταξη συνδετήρων.

- Βελτίωση των συνθηκών συνάφειας μεταξύ ράβδων οπλισμού και σκυροδέματος σε περιοχές με ματίσεις και άρα παρεμπόδιση της ολίσθησης των διαμήκων ράβδων στις περιοχές αυτές.



Εικόνα 43: Περίσφιγξη στα άκρα υποστυλώματος με στόχο την αύξηση της ικανότητας παραμόρφωσης



Εικόνα 44: Περίσφιγξη στα άκρα υποστυλώματος με στόχο την αποτροπή αστοχίας λόγω ανεπαρκούς μήκους μάτισης

2.10 Ενίσχυση άλλων Κατασκευών

Η εφαρμογή των συνθέτων υλικών στο πεδίο των ενισχύσεων δεν περιορίζεται μόνο σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος. Τα τελευταία χρόνια τα σύνθετα υλικά βρίσκουν εξαιρετικά ενδιαφέρουσες εφαρμογές και στην ενίσχυση κατασκευών από φέρουσα τοιχοποιία ή ακόμα και από ξύλο. Βασικό χαρακτηριστικό της τεχνικής ενίσχυσης τοιχοποιίας με λωρίδες συνθέτων υλικών είναι η αποφυγή εφαρμογής καθολικού μανδύα, με όλα τα πλεονεκτήματα που αυτό συνεπάγεται (αύξηση αντοχής και πλαστιμότητας χωρίς να αυξάνεται το βάρος, χωρίς να μεταβάλλονται οι διαστάσεις των τοίχων, χωρίς να απαιτείται πλήρης καθαίρεση του επιχρίσματος κ.τ.λ.). Κρίσιμη παράμετρος στο σχεδιασμό της ενίσχυσης είναι η επαρκής αγκύρωση στα άκρα των οπλισμών, έτσι ώστε να αποφεύγεται η πρόωρη αποκόλληση. Οι επεμβάσεις σε φέρουσες τοιχοποιίες με σύνθετα υλικά γίνονται κυρίως στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Εκτός επιπέδου κάμψη, π.χ. λόγω φόρτισης κάθετα στο επίπεδο ενός κατακόρυφου τοίχου ή σε περιπτώσεις θόλων, τρούλων κλπ.
- Εντός επιπέδου κάμψη, π.χ. σε πεσσούς, υπέρθυρα, τόξα.
- Εντός επιπέδου διάτμηση σε στοιχεία τύπου διατμητικού τοιχώματος.
- Εντός επιπέδου διάτμηση σε στοιχεία τύπου δοκού.
- Περίσφιγξη θλιβομένων στοιχείων.

2.11 Ενισχύσεις κατασκευών με σύνθετα υλικά στην Ελλάδα

Οι πρώτες εφαρμογές της τεχνολογίας των συνθέτων υλικών ή αλλιώς Ινοπλισμένων Πολυμερών (ΙΟΠ) ή αγγλιστί Fiber Reinforced Polymers (FRP) πραγματοποιήθηκαν στην Ελλάδα στα τέλη της δεκαετίας 1990. Σημαντική αύξηση των εφαρμογών παρατηρήθηκε μετά το σεισμό της Αθήνας το 1999. Από τότε μερικές εκατοντάδες έργα ενίσχυσης υφιστάμενων κατασκευών με τη μέθοδο των FRP έχουν πραγματοποιηθεί επιτυχώς. Τα FRP έχουν ήδη εφαρμοστεί σε διάφορους τύπους κατασκευών στην Ελλάδα όπως: κατοικίες, σχολεία, εκκλησίες, βιομηχανικά κτίρια, βιομηχανικές κατασκευές εν γένει, ξενοδοχεία, σιλό, γέφυρες, δεξαμενές, αγωγοί, κτίρια από λιθοδομή, ξύλινες κατασκευές και άλλα. Στην παρούσα εισήγηση θα παρουσιασθούν επιλεγμένα και ενδιαφέροντα έργα που έχουν πραγματοποιηθεί στην Ελλάδα αλλά και την Κύπρο. Η παρουσίαση κάθε περίπτωσης θα έχει αναφορές σε βασικά στοιχεία της μελέτης, στις εφαρμογές των FRP και σε

κοστολογικά στοιχεία όπου είναι διαθέσιμα. Κάποια από τα έργα που θα παρουσιασθούν είναι: ενίσχυση τεσσάρων σιλό στη Μήλο, ενίσχυση διατμητικών τόρμων στις γέφυρες πρόσβασης του Ρίο-Αντίριο, ενίσχυση μεγάλης διαμέτρου αγωγού πόσιμου νερού στη Θεσσαλονίκη, ενίσχυση γέφυρας στον ποταμό Εύηνο, ενίσχυση διατηρητέου κτιρίου Νομικής Σχολής Αθηνών, ενίσχυση γέφυρας ΗΣΑΠ Αμαρουσίου, ενίσχυση κτιρίων Αρχής Τηλεπικοινωνιών Κύπρου, ενίσχυση κτιρίου Παλαιού Χημείου Πανεπιστημίου Αθηνών.

Μια από τις πρώτες εφαρμογές της τεχνολογίας των συνθέτων υλικών πραγματοποιήθηκε στην Θεσσαλονίκη το 1998. Πρόκειται για την ενίσχυση ισογείου πολυώροφου κτιρίου που ανήκει στην Αγροτική Τράπεζα Ελλάδος. Έκτοτε έχουν ενισχυθεί περισσότερα από 200 παρόμοια κτίρια όπως νοσοκομεία, ξενοδοχεία, γραφεία, σχολεία, κινηματογράφοι, εστιατόρια και εμπορικά κέντρα.



Εικόνα 45: Ενίσχυση των κυκλικών υποστυλωμάτων του γενικού νοσοκομείου της Σπάρτης



Εικόνα 46: Ξενοδοχείο “Κάνιγκος 21”, Αθήνα

Μία πρόσφατη εφαρμογή είναι η ενίσχυση και ανακαίνιση του παλιού ξενοδοχείου “Ερέτρια” στο κέντρο της Αθήνας (Εικόνα 23), το οποίο κατασκευάστηκε το 1975. Με αφορμή τους Ολυμπιακούς Αγώνες 2004 ο νέος ιδιοκτήτης αποφάσισε να το μετονομάσει σε Ξενοδοχείο “Κάνιγκος 21” να το ανακαινίσει και να το αναβαθμίσει από τριών αστέρων σε τεσσάρων. Για την αναβάθμιση του ξενοδοχείου ήταν απαραίτητη η σεισμική και η στατική ενίσχυση λόγω αλλαγής χρήσης σε ορισμένους χώρους και κατά συνέπεια η αύξηση των μονίμων και ωφέλιμων φορτίων. Κρίθηκε απαραίτητη η διατμητική ενίσχυση και περίσφιξη των υποστυλωμάτων με σύνθετα υλικά (ύφασμα ινών υάλου) και η καμπτική και διατμητική ενίσχυση των πλακών και δοκών του τελευταίου ορόφου με ελάσματα από άνθρακα και ύφασμα ινών υάλου λόγω του αυξημένου κινητού και μόνιμου φορτίου από την ταράτσα (roof garden, πισίνα). Σύμφωνα με τις οδηγίες του FIB Technical Report 14, ήταν απαραίτητη η πυροπροστασία (2 ώρες fire rating) των ενισχύσεων με FRP των πλακών του τελευταίου ορόφου. Για την πυροπροστασία των FRP εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στην Ελλάδα το μοναδικό σύστημα Tyfo® AFP Advanced Fire Protection System του οίκου Fyfe (Εικόνα 24).



Εικόνα 47:Εφαρμογή πυροπροστασίας

Το κτίριο ηλικίας 30 ετών, που παρουσιάζεται στην εικόνα 25, είναι ένα κτίριο έξι ορόφων ακριβώς κάτω από τη Ακρόπολη με θέα τον Παρθενώνα. Η τιμή πώλησης κατοικιών σε αυτή την περιοχή είναι από τις υψηλότερες του λεκανοπεδίου. Ο σχεδιασμός του κτιρίου είχε γίνει βάσει των κανονισμών του 1959, ενώ απαιτήθηκε ενίσχυση με σκοπό τη συμμόρφωση με τους σύγχρονους πιο απαιτητικούς κανονισμούς. Ο κύριος του έργου έθεσε σαν βασικό κριτήριο της μελέτης ενίσχυσης την ελάχιστη δυνατή αύξηση των διατομών των υποστυλωμάτων και την ελάχιστη προσθήκη νέων στοιχείων καθώς και την ελάχιστη διάρκεια των εργασιών. Ο μελετητής απέκλεισε την ενίσχυση με τις παραδοσιακές μεθόδους όπως εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και επέλεξε την τεχνολογία σύνθετων υλικών. Ενισχύθηκαν υποστυλώματα, τοιχώματα, δοκοί και πλάκες σε όλη την έκταση του κτιρίου.



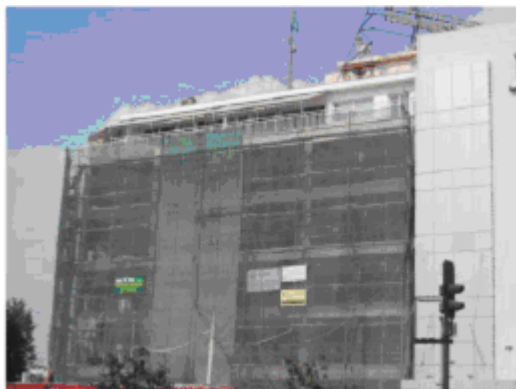
Εικόνα 48:Κτίριο στην Διονυσίου Αεροπαγίτου

Το ξενοδοχείο “Three Seas” στη Λάρνακα Κύπρου, το οποίο παρουσιάζεται στην εικόνα 26, ανακαινίσθηκε και ενισχύθηκε πλήρως με απόφαση του νέου ιδιοκτήτη (διεθνής ξενοδοχειακή εταιρεία με έδρα την Αμερική). Όλα τα υποστυλώματα ενισχύθηκαν με σύνθετα υλικά (ύφασμα ινών υάλου).



Εικόνα 49:Ενίσχυση υποστηλωμάτων

Στην εικόνα 27 παρουσιάζεται εξαόροφο κτίριο στον Πειραιά το οποίο στεγάζει κεντρικά γραφεία εμπορικής εταιρείας και παρουσίασε βλάβες στο σεισμό του 1999. Πραγματοποιήθηκε επισκευή και ενίσχυση με σύνθετα υλικά όλων των βλαμμένων δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Ενισχύθηκαν όλα τα εσωτερικά υποστυλώματα και δοκοί και προστέθηκαν περιμετρικά τοιχεία σε όλο το κτίριο. Το έργο ολοκληρώθηκε το 2001.



Εικόνα 50:Βλάβες λόγω σεισμού σε κτίρια γραφείων

Στη γραφική Μαρίνα Ζέας στον Πειραιά ενισχύθηκε ένα διώροφο τριάντα ετών κτίριο (καφετέρια-εστιατόριο). Λόγω της εκπληκτικής θέας, ο αρχιτέκτονας απέκλεισε τη πιθανότητα της προσθήκης νέων δομικών στοιχείων και τις παραδοσιακές μεθόδους ενίσχυσης και επέλεξε την ενίσχυση με σύνθετα υλικά διότι δεν επηρέαζε τη μορφολογία του κτιρίου. Η αναβάθμιση του κτιρίου σύμφωνα με τους νέους κανονισμούς επιτεύχθηκε μέσω της ενίσχυσης των υποστυλωμάτων, δοκών και τοιχίων. Προεντεταμένες πλακοδοκοί ενισχύθηκαν λόγω αυξημένου φορτίου με ελάσματα άνθρακα και αγκυρώθηκαν κατάλληλα στα άκρα με υφάσματα ινών υάλου σε μορφή 'U'. Το έργο ολοκληρώθηκε το 2005. Σε μια από τις πιο σεισμογενείς περιοχές της Ελλάδας, την Καλαμάτα, ανακαινίστηκε πλήρως ένα τετραώροφο εμπορικό κέντρο το 2006. Λόγω του ασφυκτικού χρονοδιαγράμματος του έργου αποφασίστηκε η εφαρμογή της τεχνολογίας των σύνθετων υλικών σαν μοναδική επιλογή για την ενίσχυση του κτιρίου εντός του χρονοδιαγράμματος. Συγκεκριμένα, ενισχύθηκαν οι δοκοί, οι πλάκες και τα υποστυλώματα. Η ενίσχυση του εμπορικού κέντρου (επιφάνειας 5000 m²) ολοκληρώθηκε μόνο σε 40 ημέρες το καλοκαίρι του 2006.



Εικόνα 51: Μαρίνα Ζέας, ενίσχυση πλακοδοκών

2.12 Έργα υποδομής στην Ελλάδα

Σημαντικά έργα υποδομής όπως γέφυρες, parking, υδραγωγεία, αθλητικές εγκαταστάσεις έχουν ενισχυθεί τα τελευταία χρόνια. Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα επόμενα. Στο έργο της καλωδιωτής γέφυρας του Ρίου –Αντιρρίου χρησιμοποιήθηκαν σύνθετα υλικά το 2004 για την ενίσχυση των διατμητικών τόννων που στηρίζουν τους σεισμικούς μονωτήρες των γεφυρών πρόσβασης. Το 2006 πραγματοποιήθηκε η ενίσχυση, με στόχο τη σεισμική αναβάθμιση, της γέφυρα του ΗΣΑΠ στο σιδηροδρομικό σταθμό Αμαρουσίου, ηλικίας 30 ετών. Τα μεσόβαθρα (160 τεμάχια) και οι κύριες δοκοί της ανωδομής, που αποτελούν πλαίσια προεντεταμένου σκυροδέματος κατά τη διαμήκη διεύθυνση, ενισχύθηκαν σε όλο το μήκος της γέφυρας (300 μ). Εφαρμόστηκαν ελάσματα άνθρακα κατάλληλα αγκυρομένα στα άκρα με υφάσματα ινών υάλου και ειδικά αγκύρια για την καμπτική ενίσχυση των μεσόβαθρων και των κυρίων δοκών σε αρνητικές ροπές στις στηρίξεις. Μία άλλη εφαρμογή είναι η ενίσχυση της γέφυρας οπλισμένου σκυροδέματος στον Εύηνο ποταμό το 2006 λόγω αύξησης των φορτίων κυκλοφορίας. Η γέφυρα αυτή κατασκευάστηκε το 1943 από τους Γερμανούς. Για την ενίσχυση των κυρίων δοκών σε θετικές ροπές εφαρμόστηκαν τέσσερις στρώσεις υφάσματος ινών άνθρακα στη κάτω παρειά κατάλληλα αγκυρωμένες στα άκρα με αγκύρια ινών άνθρακα ώστε να επιτευχθεί η μεγάλη απαίτηση σε παραμορφώσεις σχεδιασμού του συστήματος των συνθέτων υλικών. Το 2005 ενισχύθηκε κυλινδρικός αγωγός προεντατεμένου σκυροδέματος μεγάλης διαμέτρου στο Εξωτερικό Υδραγωγείου Αραβησσού της ΕΥΑΘ στη Θεσσαλονίκη. Αποτελεί πρωτοποριακό έργο ενίσχυσης αγωγού μεγάλης διαμέτρου, το πρώτο το οποίο ολοκληρώθηκε στην Ελλάδα και ίσως το πρώτο στη Ευρώπη. Τέλος, το 2004 ενισχύθηκαν οι εγκαταστάσεις canoe-slalom με αφορμή τους Ολυμπιακούς αγώνες του 2004.



Εικόνα 52: Γέφυρα Ρίο-Αντίρριο



Εικόνα 53: Γέφυρα σιδηροδρομικού σταθμού, Μαρούσι



Εικόνα 54: Γέφυρα στον Εύηνο ποταμό



Εικόνα 55: Εγκαταστάσεις Canoe-slalom

2.13 Διατηρητέα κτίρια

Πολλές εφαρμογές αφορούν διατηρητέα κτίρια όπως εκκλησίες, μουσεία, δημόσια κτίρια, αρχοντικά και πανεπιστήμια. Τα περισσότερα από αυτά τα κτίρια αναδεικνύουν τη χρήση διαφορετικών υλικών και τεχνικών κατασκευής όπως πέτρα, λιθοδομές ή πλινθοδομές, ξύλινα δάπεδα και στέγες, πέτρινοι θόλοι τρούλοι και τόξα. Μία τυπική εφαρμογή είναι η ενίσχυση της στέψης, του τριώροφου λιθόκτιστου κτιρίου της Νομικής Σχολής Αθηνών, περιμετρικά με σύνθετα υλικά με ύφασμα από ίνες άνθρακα το 2005, όπου παρουσιάζονταν κατακόρυφες ρωγμές λόγω του αυξημένου φορτίου της οροφής και των σεισμικών καταπονήσεων που είχε δεχθεί το κτίριο στο παρελθόν. Μια άλλη εφαρμογή είναι σχολικό κτίριο στην Αθήνα άνω των 100 ετών από φέρουσα λιθοδομή το οποίο υπέστη βλάβες μετά το σεισμό του 1999 και ενισχύθηκε με την εφαρμογή ελασμάτων άνθρακα στην εξωτερική πλευρά της λιθοδομής σε χιαστί διάταξη.



Εικόνα 56: Ενίσχυση κτιρίου νομικής σχολής Αθηνών



Εικόνα 57: Ενίσχυση σχολείου από φέρουσα λιθοδομή

2.14 Στρατιωτικές και ευαίσθητες εγκαταστάσεις

Η τεχνολογία των σύνθετων υλικών έχει εφαρμοστεί και σε στρατιωτικά κτίρια. Οι συνηθέστερες εφαρμογές αφορούν μετασεισμική ενίσχυση, σεισμική αποκατάσταση, στατική ενίσχυση και προστασία έναντι διάβρωσης. Παρόλα αυτά οι πιο ενδιαφέρουσες εφαρμογές, που όμως δεν έχουν πραγματοποιηθεί ακόμη στην Ελλάδα, αφορούν σε προστασία έναντι εκρήξεων, συμμετρικών απειλών, τρομοκρατικών ενεργειών στρατιωτικών και άλλων ευαίσθητων εγκαταστάσεων. Εκτεταμένες έρευνες και πειράματα έχουν διεξαχθεί με ειδικά συστήματα σύνθετων υλικών του οίκου Fyfe στις ΗΠΑ.



Εικόνα 58:Μη ενισχυμένα(αριστερά) και ενισχυμένα (δεξιά) υποστηλώματα σε δοκιμές εκρήξεων



Εικόνα 59:Πειράματα εκρήξεων σε μη ενισχυμένο(αριστερά) και ενισχυμένο (δεξιά) τοίχο

Συμπεράσματα

Τα σύνθετα υλικά (FRP) έχουν τύχει ευρείας εφαρμογής σε έργα στην Ελλάδα και στην Κύπρο τα τελευταία 10 έτη. Η έλλειψη εθνικών κανονισμών, κωδίκων, ολοκληρωμένων λογισμικών και κυρίως γνώσεων και εμπειρίας από τους μηχανικούς της μελέτης, της επίβλεψης και της κατασκευής είναι θέματα που πρέπει να απασχολήσουν άμεσα τον τεχνικό κόσμο και το ΤΕΕ. Συνίσταται άμεσα η σύνταξη προδιαγραφών για τα συστήματα σύνθετων υλικών που διατίθενται στο εμπόριο. Η σύνταξη προδιαγραφών ποιοτικού ελέγχου εφαρμογής των συστημάτων σύνθετων υλικών και η πιστοποίηση των τεχνιτών εφαρμογής τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΚΤΙΡΙΑ: ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΣΚΕΥΗ ΤΟΥΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ F.R.P.

3.1 Εισαγωγή

Η Ελλάδα είναι μια χώρα αμιγώς ιστορική κύριο χαρακτηριστικό της οποίας είναι ο πλούτος της σε ιστορικά μνημεία, τα οποία χρήζουν προστασίας και διατήρησης. Με τον όρο όμως ιστορικά μνημεία εννοούμε κάθε κατασκευή ιδιαίτερα σημαντική λόγω του ιστορικού, αρχαιολογικού, κοινωνικού προφίλ της. Κάθε κτίριο, δηλαδή, που έχει συνδεθεί μ' ένα ιστορικό πρόσωπο ή γεγονός, ή αποτελεί χαρακτηριστικό δείγμα λαϊκής αρχιτεκτονικής καθώς επίσης και κτίρια που δίδουν πληροφορίες για τον τρόπο ζωής κι εργασίας του παρελθόντος (βιομηχανικά κτίρια, βαμβακουργία, ελαιοτριβεία). Η ανάγκη διατήρησης των παραπάνω κρίνεται επιτακτική αν θέλουμε να προστατεύσουμε την πολιτιστική μας κληρονομιά αλλά και να την κληροδοτήσουμε ως παρακαταθήκη στις επόμενες γενεές. Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με τη χρήση FRP στον τρόπο ενίσχυσης κι επισκευής των ιστορικών μνημείων, αλλά πριν φθάσουμε εκεί πρέπει να εξετάσουμε το θέμα των επισκευών διεξοδικά³.

3.2 Ανάλυση βλαβών

Οι βλάβες εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τα υλικά τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του κτιρίου. Ειδικότερα, εφόσον ο λόγος γίνεται για ιστορικά κτίρια– μνημεία, τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την δόμηση αυτών ήταν συνήθως η πέτρα, το ξύλο, το τούβλο-πλίνθος κι επίσης το σκυρόδεμα και ο χάλυβας στα μεταγενέστερα μνημεία του 20 ου αιώνα. Τα εν λόγω υλικά (πέτρα, ξύλο, πλίνθος) είναι πολύ αδύνατα σε εφελκυσμό. Παράλληλα η πλειονότητα των ιστορικών κτιρίων είναι φέροντες οργανισμοί οι οποίοι αποτελούνται από φέροντες τοίχους. Αναλυτικότερα από: Πεσσούς (κατακόρυφα τμήματα μεταξύ των ανοιγμάτων όταν η απόσταση είναι μικρή)

- Τοίχους (κατακόρυφα τμήματα χωρίς ανοίγματα)
- Συνδετικές δοκοί (οριζόντια τμήματα μεταξύ των ανοιγμάτων)

³ Θεοδωράτος Ανδρέας-Παπαδόπουλος Θανάσης , 8^ο Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών-02

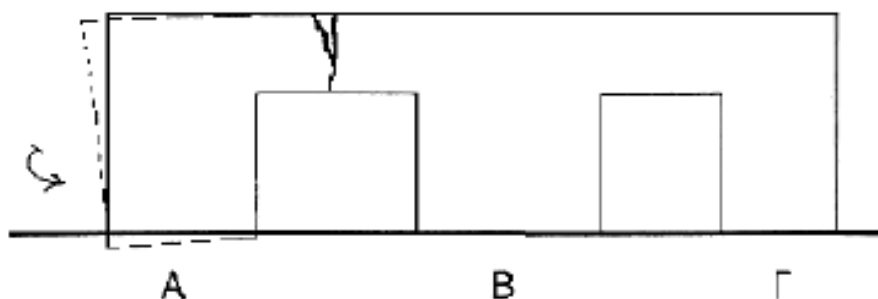
Εν συνεχεία οι βλάβες μπορούν να ταξινομηθούν σε δυο κατηγορίες:

- Έμμεσες: βλάβες δευτερευόντων κατασκευαστικών στοιχείων όπως εσωτερικοί διαχωριστικοί τοίχοι, σκαλοπάτια και οι οποίες δεν επηρεάζουν τη γενικότερη στατική λειτουργία του κτιρίου.
- Άμεσες: βλάβες της φέρουσας τοιχοποιίας οι οποίες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη στατική συμπεριφορά του κτιρίου και δημιουργούνται από μετακινήσεις, παραμορφώσεις ή ρηγματώσεις του κτιρίου. Ειδικότερα μετακίνηση της φέρουσας τοιχοποιίας έχουμε όταν μετακινηθεί από την αρχική της θέση χωρίς να αλλάξει μορφή. Παραμόρφωση έχουμε όταν κάτω από την δράση ισχυρών τάσεων (διατμητικές ,εφελκυστικές) παρατηρούνται αλλαγές στην μορφή της τοιχοποιίας π.χ από καθιζήσεις θεμελίων.

Ρηγματώσεις των τοίχων παρουσιάζονται όταν σημειωθεί μετατόπιση διαφόρων

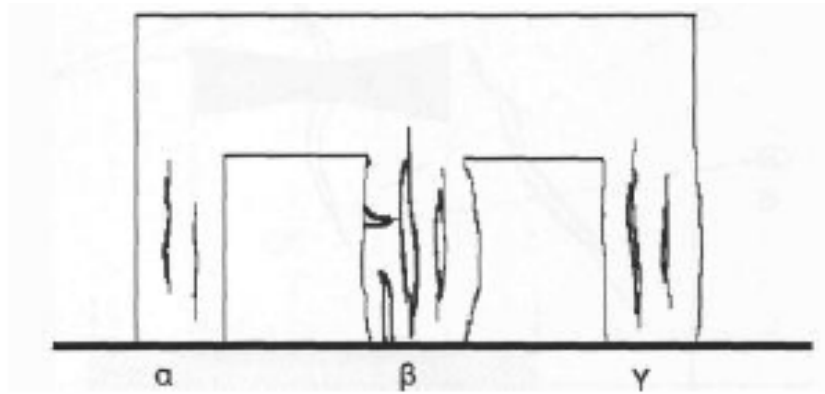
σημείων του υλικού. Τις ρηγματώσεις μπορούμε να τις διακρίνουμε σε:

- Ρηγματώσεις εφελκυσμού οι οποίες προκαλούνται είτε από μια σχετική μετατόπιση μεταξύ δυο τοίχων είτε από καθίζηση του θεμελίου και στρέψη του κτιρίου (Εικόνα 61 ,Ορφανουδάκης 1992).



Εικόνα 60:Ρηγματώσεις εφελκυσμού

- Ρηγματώσεις θλίψης οι οποίες παρουσιάζονται όπου υπάρχει υπέρβαση της αντοχής σε θλίψη από κάμψη και συνοδεύονται από φουσκώματα και σε πιο προχωρημένο στάδιο σε συνδυασμό με οριζόντιες ρωγμές (Εικόνα 62,Ορφανουδάκης 1992).Όταν διαπιστώνουμε ρωγμές θλίψης υπάρχει σοβαρός κίνδυνος κατάρρευσης.



Εικόνα 61:Ρηγματώσεις θλίψης

3.3 Παράγοντες φθοράς και αιτίες προξένησης βλαβών

Οι παράγοντες που συντελούν στην φθορά ενός κτιρίου μπορούν να διακριθούν σε:

Κλιματολογικούς παράγοντες. Τέτοιοι είναι:

A) Θερμοκρασία: Τα υλικά δόμησης (πέτρα, ξύλο, τούβλο) των ιστορικών κτιρίων όπως και όλα τα σώματα , όταν θερμαίνονται διαστέλλονται και όταν ψύχονται συστέλλονται. Αυτές οι κινήσεις και ειδικά όταν έχουμε απότομες μεταβολές θερμοκρασίας- αυξομειώσεις και λαμβάνοντας υπόψη την ηλικία των κτιρίων , έχουν σαν αποτέλεσμα την χαλάρωση της σύνδεσης των υλικών και την δημιουργία ρηγματώσεων.

B) Νερό: προέρχεται από τις βροχοπτώσεις ή χιονοπτώσεις, πολλές φορές εισέρχεται λόγω της παλαιότητας ή της έλλειψης σωστού σχεδιασμού στεγών, στους πόρους των υλικών. Αν σκεφτούμε ότι το βρόχινο νερό παρασύρει άλατα τα οποία στην πάροδο του χρόνου κρυσταλλώνονται ή όταν παγώσει διαστέλλεται καταλαβαίνουμε ότι η εμφάνιση των ρηγματώσεων έρχεται σα φυσικό επακόλουθο. Πρέπει επίσης να αναφέρουμε και τον παράγοντα ατμοσφαιρική ρύπανση ο οποίος, εκτός ότι από μόνος του συντελεί στην φθορά

των κτιρίων άμεσα, έμμεσα εμπλουτίζει το βρόχινο νερό σε οργανικές βαριές ενώσεις όπου σύμφωνα με τον παραπάνω μηχανισμό βοήθα στην διάβρωση των υλικών εκ των έσω αλλά και στο επιφανειακό ξέφτισμά τους.

Γεωλογικούς παράγοντες. Τέτοιοι είναι:

A) Σεισμός: αποτελεί ίσως την πιο καταστροφική αιτία προξένησης βλαβών ικανών να οδηγήσουν έως και την κατάρρευση του ιστορικού κτιρίου. Η Ελλάδα σαν χώρα σεισμογενής δοκιμάζεται συνεχώς από σεισμούς και μαζί της δοκιμάζονται και οι αντοχές των ιστορικών κτιρίων όπου λόγω των υλικών τους που είναι αδύνατα σε εφελκυστικές τάσεις, πλήττονται σημαντικά.

B) Καθιζήσεις: είναι σημαντικές αιτίες προξένησης ρηγματώσεων στα κτίρια. Λόγω των καθιζήσεων του εδάφους και άρα των θεμελίων, έχουμε ως αποτέλεσμα την σχετική μετατόπιση δυο τοίχων η πεσσών . Επίσης το γκρέμισμα παράπλευρων κτιρίων ή το κτίσιμο νέων επηρεάζουν σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους με άμεσο αντίκτυπο στην στατική λειτουργία του γειτονικού ιστορικού μνημείου.

Γ) Δονήσεις του εδάφους: οι δονήσεις λόγω της κυκλοφορίας βαρέων οχημάτων μεταφέρονται μέσω του εδάφους στα θεμέλια των κτιρίων με αποτέλεσμα την απώλεια της αντοχής θεμελίωσης.

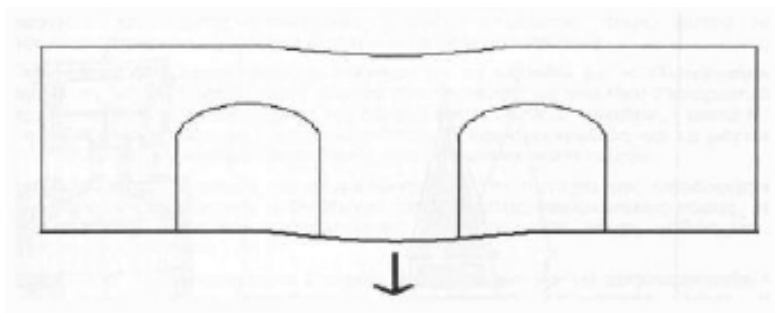
Άλλοι παράγοντες φθοράς είναι επίσης η κακή ποιότητα των υλικών αλλά και του τρόπου κτισίματος καθώς και οι προσθήκες καθ ύψος η κατ επέκταση, αυθαίρετα η νόμιμα ,στην πάροδο των χρόνων.

3.4 Έρευνα και ανάλυση

Πριν πάμε στην αποκατάσταση των βλαβών απαιτείται προηγουμένως ένα σύνολο ερευνητικών εργασιών που θα μας καθιστήσουν βέβαιους και ικανούς στον τρόπο δράσης και επέμβασης. Καταρχήν πρέπει να γίνει γεωμετρική και μορφολογική αποτύπωση του κτιρίου. Με αλλά λόγια να καταγράφουν τα υλικά, ο τρόπος δόμησης καθώς επίσης το ιστορικό του κτιρίου. Δηλαδή την παρακολούθηση της εξέλιξης του κτιρίου (φάσεις κατασκευής, μεταγενέστερες επεμβάσεις). Ακολουθεί η ανάλυση των φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών των υλικών (ειδικό βάρος, φυσική υγρασία, πυκνότητα, περιεκτικότητα σε χημικά συστατικά) κι οπροσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών τους (θλιπτική αντοχή, αντοχή σ' εφελκυσμό, κάμψη, συνάφεια, μέτρο ελαστικότητας).

Πολύ σημαντική είναι η γεωτεχνική έρευνα καθώς η συμπεριφορά του εδάφους αποτελεί ίσως τον κύριο παράγοντα της συνολικής ευστάθειας του μνημείου. Ειδικότερα εξετάζεται η φέρουσα ικανότητα του εδάφους, αν και το πρόβλημα συνήθως δεν είναι εκεί διότι το μνημείο με την ύπαρξη του αποδεικνύει ότι

η φέρουσα ικανότητα του εδάφους είναι ικανοποιητική. Κυρίως ελέγχουμε αν μεταγενέστερες επεμβάσεις έχουν δημιουργήσει νέα δεδομένα. Επεμβάσεις όπως επιχωματώσεις ή εκσκαφές, νεότερα κτίσματα πολύ κοντά στο μνημείο καθώς επίσης και μεταγενέστερες προσθήκες σε αυτό οι οποίες οδηγούν σε αύξηση του φορτίου και προκαλούν μεταβολές στην ακαμψία του αλλά και πρόσθετες καθιζήσεις με ταυτόχρονη μετατόπιση τμημάτων της τοιχοποιίας (Εικόνα 63, Ορφανουδάκης 1992).



Εικόνα 62:Μεταβολές στην ακαμψία και πρόσθετες καθιζήσεις με ταυτόχρονη μετατόπιση τμημάτων τοιχοποιίας

Το ίδιο σημαντικό είναι κι ο έλεγχος της αντισεισμικής επάρκειας του κτιρίου. Η στατική μελέτη υπάρχοντος κτίσματος έχει γενικώς διαφορετικό χαρακτήρα από ότι για μια νέα κατασκευή. Στη νέα κατασκευή ο υπολογισμός των εντατικών μεγεθών γίνεται με σκοπό την κατάλληλη επιλογή των υλικών και διαστασιολόγηση των φορέων ώστε οι αναπτυσσόμενες τάσεις να μην υπερβαίνουν τις επιτρεπόμενες και οι συντελεστές ασφάλειας να έχουν τις επιθυμητές τιμές. Στο υπάρχον κτίσμα οι διαστάσεις και τα υλικά είναι δεδομένα οπότε ο υπολογισμός των εντατικών μεγεθών οδηγεί μόνο σε διαπιστώσεις.

Η εκπόνηση μιας στατικής μελέτης προϋποθέτει τη μελέτη της συμπεριφοράς του φέροντος οργανισμού υπό φορτικές καταστάσεις που υπήρξαν ή μπορούν να υπάρξουν. Για το σκοπό αυτό μορφοποιούνται μοντέλα στατικής λειτουργίας διαφορετικά για κάθε είδος καταπόνησης λαμβάνοντας υπόψη όσο είναι εφικτό και το ιστορικό, δηλαδή τις φορτικές καταστάσεις που έχει βρεθεί στο παρελθόν το κτίριο. Η απουσία πολλές φορές πληροφοριών για την ιστορία της φόρτισης αλλά και η αβεβαιότητα των πραγματικών τιμών αντοχής υλικών και δομικών στοιχείων μειώνει σημαντικά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Γι' αυτό

το λόγο κατά τη μελέτη λαμβάνονται όσο το δυνατόν περισσότερες πιθανές τιμές αντοχών προκειμένου να περιοριστούν οι αβεβαιότητες των αποτελεσμάτων (Νομικός 1997).

Τέλος, ο τρόπος δράσης κι επέμβασης είναι στο χέρι του μηχανικού, πρέπει όμως πάντα να γίνεται με σεβασμό στην ιστορία του κτιρίου με σκοπό την προστασία και αισθητική του ανάδειξη. Στη συνέχεια της εργασίας εξετάζουμε ως λύση τη χρήση FRP.

3.5 Γενικά ενισχύσεις με F.R.P. σε τοιχοποιίες ιστορικών κτιρίων

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε κυρίως με τα F.R.P. (Fiber Reinforced Polymers, φύλλα από ινοπλισμένα πολυμερή) και ειδικότερα με τα C.F.R.P – Carbon FRP. Τα CFRP αποτελούνται από ανθρακονήματα κι εποξειδική ρητίνη η οποία έχει ως σκοπό την ανακατανομή των τάσεων που οφείλονται σε εξωτερικά φορτία. Τ' ανθρακονήματα παράγονται από ένα υποπροϊόν της βιομηχανίας πετρελαίου (πολυακρυλονιτρώλιο, PAN). Τα CFRP μπορούν να παραχθούν με δύο διαφορετικούς τρόπους. Στην πρώτη περίπτωση, ανθρακονήματα κι εποξειδική ρητίνη αναμιγνύονται στο εργοστάσιο υπό υψηλή πίεση και με εν θερμώ εξέλαση παράγονται ελάσματα οπλισμένα κατά μία διεύθυνση πάχους 1 χιλιοστού. Κατά την δεύτερη περίπτωση, χρησιμοποιούνται ξηρά ανθρακούφασμα και το σύνθετο υλικό (ανθρακούφασμα + ρητίνη) κατασκευάζεται στο εργοτάξιο. Τα σύνθετα αυτά υλικά έχουν αρχίσει να εφαρμόζονται στην αεροδυναμική βιομηχανία πάνω από 40 χρόνια, ενώ σε έργα πολιτικού μηχανικού τα τελευταία 10-15 χρόνια. Τα FRP έχουν μια ευρεία γκάμα εφαρμογών. Τα χρησιμοποιούμε για:

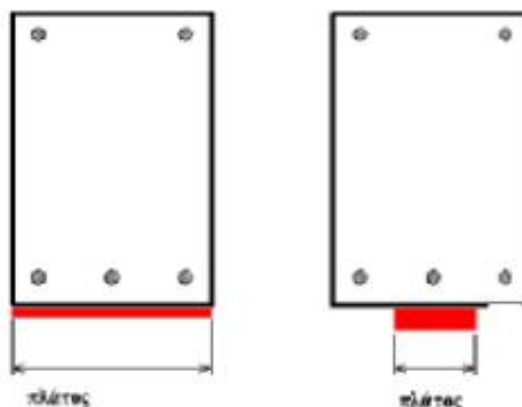
- α) αύξηση φορτίου (ωφέλιμο φορτίο αποθηκών, κυκλοφορία γεφυρών, δονούμενες κατασκευές κ.τ.λ.),
- β) αποκατάσταση καταστροφών των φορέων (γήρανση δομικών στοιχείων, διάβρωση οπλισμού φωτιά),
- γ) αλλαγή στατικού συστήματος (αφαίρεση τοιχίων ή υποστυλωμάτων ή τμήματα πλακών),
- δ) βελτίωση χρήσης (μείωση παραμόρφωσης, μείωση πλάτους ρωγμών κτλ),

ε) διόρθωση κατασκευαστικών ελλωμάτων (ανεπαρκείς οπλισμοί, ακαμψίες)
(Sika Hellas)

Τα πλεονεκτήματα που έχουν τα FRP όχι μόνο υπερέχουν σε σχέση με τα ελάχιστα μειονεκτήματα που έχουν αλλά και σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους που χρησιμοποιούνται στο χώρο των ενισχύσεων και επισκευών. Τα σημαντικότερα από τα πλεονεκτήματα που έχουν είναι τα παρακάτω:

- Ελάχιστο προστιθέμενο βάρος
- Εξαιρετικά μικρό πάχος (1-1.5 mm)
- Διαθέσιμα σε οποιοδήποτε μήκος χωρίς ενώσεις
- Δεν επηρεάζονται από την υγρασία αφού τ' ανθρακόνημα απορροφά αμελητέες ποσότητες υγρασίας και πάντα τέτοιες που δεν επηρεάζουν την ποιότητα πρόσφυσης.
- Μικρός χρόνος εφαρμογής και γρήγορη επαναχρησιμοποίηση των κτιρίων.
- Οικονομικό στην εφαρμογή. Δεν απαιτούνται βαριά μηχανήματα για την εφαρμογή.
- Πολύ καλές ιδιότητες (αντοχή σε εφελκυσμό, Μέτρο ελαστικότητας, επιμήκυνση στην θραύση, πυκνότητα κ.τ.λ.) τιμές των οποίων αναφέρονται στο βιβλίο. (Δρίτσος, 2001)⁴
- Καλύπτεται και βάφεται χωρίς πρόβλημα
- Εκμετάλλευση ολόκληρης της επιφάνειας του ενισχυόμενου στοιχείου με φυσική συνέπεια την μείωση του πάχους του ενισχυόμενου υλικού (διατηρώντας την ίδια διατομή ενίσχυσης) σε τρόπο ώστε να μειώνονται δραστικά οι επικίνδυνες τάσεις επαφής στην διεπιφάνεια (Εικόνα 64).

⁴ Δρίτσος Στέφανος , Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών



Εικόνα 63:Μείωση επικίνδυνων τάσεων επαφής στην διεπιφάνεια

Όσον αφορά το κόστος του υλικού αυτό πράγματι συγκαταλέγεται στα μειονεκτήματα του υλικού αφού κοστίζει πολύ, πράγμα το οποίο όμως δεν επηρεάζει το συνολικό προϋπολογισμό του έργου μιας και γλιτώνουμε περίπου 50% σε εργατικά και κόστος εξοπλισμού. Ένα επιπλέον μειονέκτημα είναι το γεγονός ότι δεν είναι ακριβώς καθορισμένος ο τρόπος της αγκύρωσης και η δημιουργία των θέσεων της αγκύρωσης στις εκατέρωθεν πλάκες. Η παρέμβαση αυτή στις πλάκες και ιδιαίτερα σε μια παλιά κατασκευή, πιθανόν να έχει αρνητικές συνέπειες όσον αφορά τη φέρουσα ικανότητα και τη στατική λειτουργία τους.

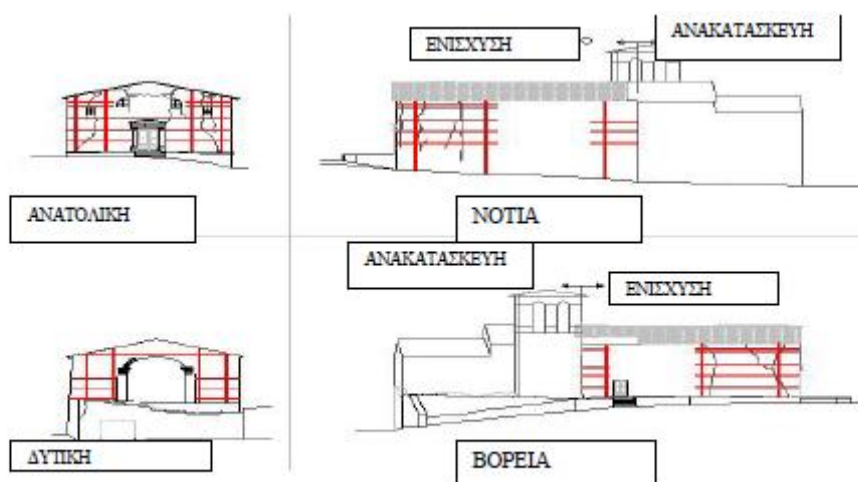
3.6 Ιστορικά κτίρια και F.R.P.

Μέχρι στιγμής πιστεύουμε ότι έχουμε κάνει κατανοητή την ανάγκη που μας επιβάλλει την όσο το δυνατόν προσεκτικότερη και καλύτερη αντιμετώπιση των ιστορικών κτιρίων. Τα FRP είναι κατά την άποψη της επιστημονικής κοινότητας (EMPA και αλλού) τα ιδανικότερα υλικά για την ενίσχυση κι επισκευή των ιστορικών κτιρίων-μνημείων. Τα τελευταία χρόνια πάρα πολλά ιστορικά κτίρια και μνημεία έχουν ενισχυθεί με τη χρήση συνθετικών υλικών. Ως μηχανικοί κατά την ενίσχυση των ιστορικών κατά βάση κτιρίων επιζητούμε την ανάληψη των φορτίων που επιφέρουν εφελκυστικές τάσεις και επιπλέον την εξασφάλιση επαρκούς διαπνοής έτσι ώστε να αποφεύγονται βλάβες σε επιζωγραφήσεις και τοιχογραφίες. Άρα χρειαζόμαστε χρήση υλικών που να εκπληρώνουν αυτές τις προϋποθέσεις όπως είναι τα CFRP. Τα εφελκυστικά φορτία μπορούν να επιφέρουν διάφορες συνέπειες όπως απόκλιση από την κατακόρυφη λόγω

καθίζηση των θεμελίων, έλλειψη αντίδρασης στις ωθήσεις της στέγης, εφελκυστικά φορτία σε θόλους, τρούλους, κτλ. Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα ανθρακονήματα θα πρέπει να είναι σε θέση να παραλαμβάνουν όλες τις τάσεις που δεν παραλαμβάνουν τα παραδοσιακά υλικά (κυρίως εφελκυστικές). Έχει διαπιστωθεί από εργαστηριακές αναλύσεις ότι ένα δομικό στοιχείο από παραδοσιακά υλικά που ενισχύεται από ινοπλισμένα πολυμερή ή από κάποιο άλλο συνθετικό υλικό, ο ουδέτερος άξονας τείνει να μετατοπισθεί προς το μέρος του ενισχύοντος συστήματος. Η μετατόπιση αυτή είναι ανάλογη με το λόγο του μέτρου ελαστικότητας του ενισχύοντος προς το μέτρο ελαστικότητας του ενισχυόμενου. Έτσι αυξάνεται η αντοχή του στοιχείου δεδομένου ότι το μέτρο ελαστικότητας των ανθρακονημάτων είναι πάρα πολύ υψηλό.

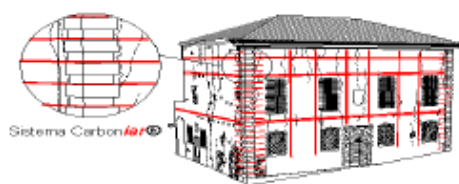
3.7 Ενίσχυση ιστορικών κτιρίων με F.R.P.

Μια τυπική διαδικασία εφαρμογής CFRP στο ιστορικό κτίριο αναφέρεται στο βιβλίο (Δρίτσος 2001). Τα φύλλα αυτά μπορούν να τοποθετηθούν είτε στη μία πλευρά είτε και στις δύο του ενισχύοντος τοίχου. Όλα τα φύλλα συνδέονται στη τοιχοποιία και αγκυρώνονται στα άκρα τους. Στα σχήματα (Εικόνα 65) που ακολουθούν παρουσιάζεται η εφαρμογή των



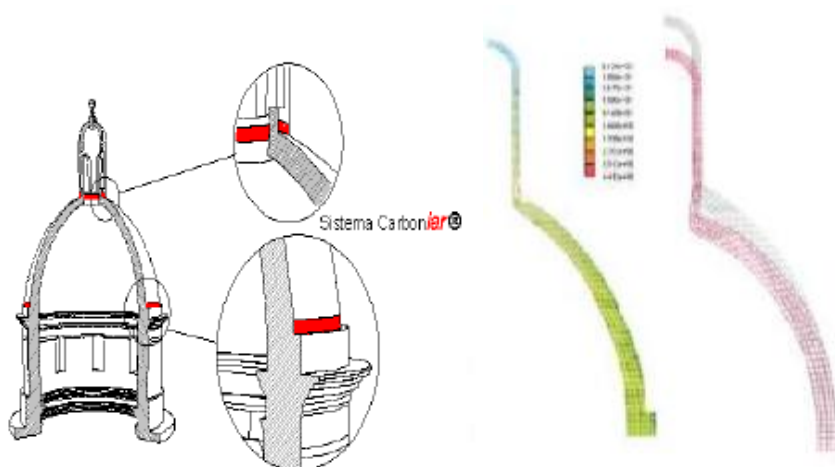
Εικόνα 64: Εφαρμογή των ανθρακονημάτων σε παλιά μικρή εκκλησία

ανθρακονημάτων σε μια παλιά μικρή εκκλησία, όπου τα ανθρακονήματα απορροφούν όλες τις οριζόντιες τάσεις. Επιπλέον για την περίδεση πεσσών, για ν' αποφευχθεί το τρύπημα των ιστορικών κτιρίων-μνημείων και την τοποθέτηση χαλύβδινων συνδετήρων εταιρίες παραγωγής ινοπλισμένων πολυμερών (IAR,1999) παράγουν ταινίες πολύ λεπτού πλάτους που τοποθετούνται κατά μήκος των αρμών. Παρακάτω παρατηρούμε ένα τέτοιο παράδειγμα σε κάποιο ιστορικό κτίριο (Εικόνα 66).



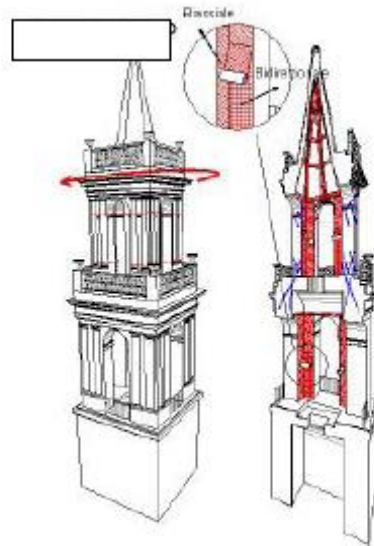
Εικόνα 65:Ενίσχυση τοιχοποιίας ιστορικού κτιρίου με ινοπλισμένων πολυμερών

Στα ιστορικά κτίρια συναντάμε πολύ συχνά τρούλους, θόλους ξύλινες δοκούς στοιχεία τα οποία επιζητούν ειδική μεταχείριση. Για την ενίσχυση τρούλων συχνά χρησιμοποιούμε την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για τον όσο το δυνατόν ακριβέστερο υπολογισμό της εντατικής τους κατάστασης. Όπως παρατηρούμε και στα κατωτέρω σχήματα (μέθοδο Carboniar) (Εικόνα 67) τοποθετούμε CFRP στην βάση του τρούλου ή και στην κορυφή εφόσον υπάρχει φεγγίτης.



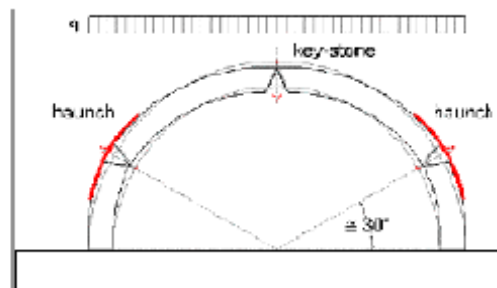
Εικόνα 66:Ενίσχυση στην βάση του τρούλου με CFRP

Στην περίπτωση των καμπαναριών, λόγω της σύνθετης εφελκυστικής καταστάσεως χρησιμοποιούμε ανθρακοϋφάσματα και εσωτερικά σε δύο επάλληλες στρώσεις, μια κατηγορίας ύφανσης κατά δύο διευθύνσεις 0-90ο και μία κατηγορίας ύφανσης 45ο (Εικόνα 68)



Εικόνα 67:Ενίσχυση με ανθρακοϋφάσματα

Όσον αφορά τους θόλους, εκεί παρατηρείται το εξής φαινόμενο: λόγω των ρηγματώσεων δημιουργούνται αυτόματα τρεις αρθρώσεις εκ των οποίων η μία στο κλειδί του θόλου και οι άλλες δύο κοντά στ' αντερίσματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μετατροπή της κατασκευής από υπερστατικής σε ισοστατική και ο θόλος μπορεί να θεωρηθεί σαν τριαρθρωτό τόξο. Χαρακτηριστικό είναι το σχήμα που ακολουθεί (Εικόνα 69) (IAR,1999).



Εικόνα 68:Ενίσχυση θόλου

Επιπλέον στα περισσότερα τόξα των ναών στο επίπεδο των γενέσεων υπάρχουν τένοντες οι οποίοι εμφανίζουν απώλειες αγκύρωσης. Εάν χρειαστούν νέοι τένοντες αυτοί αγκυρώνονται εσωτερικά στο σώμα της τοιχοποιίας με κατάλληλα αγκύρια και εποξειδικές ρητίνες, τοποθετούνται στο ύψος των γενέσεων των τόξων πάνω από τους υπάρχοντες και έχουν τις ίδιες διαστάσεις με αυτούς. Στις ξύλινες κατασκευές (ξύλινες δοκοί, πατώματα, σκεπές κτλ) η βιομηχανία έχει παράγει διάφορα ειδικά συνθετικά υλικά που διασφαλίζουν όλες τις προϋποθέσεις ενίσχυσης των κτιρίων. Συνήθως η εργασία πάνω σε ξύλινη κατασκευή προϋποθέτει την απουσία ενεργού φορτίου κατά την διάρκεια τουλάχιστον της συγκόλλησης .Αυτό επιτυγχάνεται κυρίως με την χρήση ειδικών γυύλλων.Το ξύλο λόγω προβλημάτων που δημιουργούνται εξ' αιτίας της αργής παραμόρφωσης που οφείλεται στην γήρανση παρά σε έλλειψη αντοχής, μας υποχρεώνει να χρησιμοποιούμε ειδικές ουσίες (διαλύματα) για την προστασία του από κάθε είδους αίτιο.

3.8 Συμπεράσματα

Με την ενίσχυση των κτιρίων με FRP εκτός από την αρχιτεκτονική διασφάλιση της ιστορικότητας και της μνημειακής αξίας τους, βελτιώνουμε και τη στατική τους λειτουργία. Συγκεκριμένα έχουν αύξηση της σεισμικής τους αντοχής κατά ένα συντελεστή 4.3 (στοιχεία EMPA) και μεγαλύτερη ενδοτικότητα. Επιπλέον οι εκκεντρότητες που αναπτύσσονται έχουν μικρή επιρροή στην αντοχή του φέροντος τοίχους. Τα φύλλα ξεκολλούν από την τοιχοποιία στις μεγάλες μετακινήσεις όμως μπορούν ακόμα να δεχθούν εφελκυστικές δυνάμεις που τις μεταφέρουν στα άκρα της τοιχοποιίας μέσω των σημείων αγκύρωσης. Παρατηρούμε λοιπόν ότι ο ρόλος των FRP θα είναι πρωταγωνιστικός στις ενισχύσεις κι επισκευές και γενικότερα στο χώρο του Πολιτικού Μηχανικού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο:ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ F.R.P.⁵

Εφαρμογή 1^η Ενίσχυση γέφυρας με πλακοδοκούς από οπλισμένο σκυρόδεμα σε κάμψη με σύνθετα υλικά

Σχήμα υπό ανακαίνιση Γέφυρας με το πρόγραμμα AUTOCAD



Εικόνα 69:Σκαρίφημα γέφυρας σχεδιασμένο με το AUTOCAD

⁵Τριανταφύλλου, Α.Χ. (2003). Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος με Σύνθετα Υλικά (Ινοπλισμένα Πολυμερή), Πάτρα-1^η Έκδοση
grc.sika.com

A. Λάμες ανθρακονημάτων Sika CARbodur E (E_f=180 GPa)

Υλικά

Sika CarboDur E

Ελάσματα ινών άνθρακα ως μέρος του συστήματος δομητικών ενισχύσεων Sika CarboDur

Περιγραφή του Προϊόντος

Τα ελάσματα Sika CarboDur προέρχονται από ειδική διαδικασία έλασης ινών άνθρακα (σύστημα ινοπλισμένων πολυμερών) και είναι σχεδιασμένα για ενίσχυση κατασκευών σκυροδέματος, ξύλου, μετάλλου, τοιχοποιίας και σύνθετων ινοπλισμένων πολυμερών.

Τα ελάσματα Sika CarboDur επικολλώνται στην κατασκευή ως εξωτερικός οπλισμός χρησιμοποιώντας την εποξειδική ρητίνη Sikadur -30 Normal για εφαρμογή σε κανονικές συνθήκες ή την εποξειδική ρητίνη Sikadur -30LP για εφαρμογή σε υψηλές θερμοκρασίες κατά την τοποθέτηση και / ή λειτουργία του συστήματος.

Το σύστημα δομητικών ενισχύσεων Sika CarboDur χρησιμοποιείται για βελτίωση, αύξηση ή αποκατάσταση της στατικής απόδοσης και της δομητικής ακεραιότητας κατασκευών στις εξής περιπτώσεις:

Αύξηση φέρουσας ικανότητας:

- Αύξηση φέροντος φορτίου σε πλάκες, δοκούς και τμήματα γεφυρών
- Εγκατάσταση βαρέων μηχανημάτων
- Σταθεροποίηση δονούμενων κατασκευών
- Αλλαγή χρήσης κτιρίων

Βλάβες σε δομικά μέλη λόγω:

- Υποβάθμισης της απόδοσης των αρχικών κατασκευαστικών υλικών
- Διάβρωσης χαλύβδινου οπλισμού
- Τυχηματικών φαινομένων (πρόσκρουση οχήματος, σεισμός, πυρκαγιά, κ.α.)

Βελτίωση λειτουργικότητας και ανθεκτικότητας:

- Μείωση καμπτόμενου βέλους και εύρους ρωγμών
- Μείωση τάσεων επί του χαλύβδινου οπλισμού
- Βελτίωση της αντίστασης έναντι κοπώσεως

Αλλαγή στατικού συστήματος:

- Αφαίρεση τοιχοπληρώσεων και/ ή υποστυλωμάτων
- Αφαίρεση τμημάτων δαπέδου/τοιχίων για δημιουργία πρόσβασης/ανοιγμάτων

Αντίσταση σε πιθανά καταστροφικά περιστατικά:

- Σεισμική επιτάχυνση εδάφους, σύγκρουση, έκρηξη, κ.α.

Αποκατάσταση σχεδιαστικών ή κατασκευαστικών ατελειών:

- Ανεπάρκεια / έλλειψη χαλύβδινου οπλισμού
- Ανεπάρκεια / έλλειψη πάχους σε πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος

Χαρακτηριστικά /Πλεονεκτήματα

- Δε διαβρώνονται
- Πολύ υψηλής αντοχής
- Εξαιρετική ανθεκτικότητα και αντίσταση σε κόπωση
- Ιδιαίτερα μικρού πάχους επιτρέποντας διασταύρωση ή επάλληλες εφαρμογές
- Εύκολη μεταφορά (ρολά)
- Ιδιαίτερα χαμηλού βάρους, με εύκολη διαδικασία τοποθέτησης ειδικά σε εφαρμογές οροφής (χωρίς να απαιτείται προσωρινή υποστήριξη)
- Ελάχιστη προεργασία του ελάσματος, εφαρμόσιμα σε αρκετές στρώσεις
- Καθαρές ακμές χωρίς εκτεθειμένες ίνες χάρις στη διαδικασία εξέλασης

Χαρακτηριστικά Προϊόντος

Μορφή

Εμφάνιση / Χρώμα: Ινοπλισμένα πολυμερή άνθρακα σε εποξειδική μήτρα, μαύρο

Συσκευασία: Διατίθεται σε ρολά των 5, 25 και 100 m.

Τύποι

Τύπος	Πλάτος	Πάχος	Επιφάνεια διατομής
Sika CarboDur	50 mm	1.2 mm	60 mm ²
Sika CarboDur E 514	50 mm	1.4 mm	70 mm ²
Sika CarboDur E 812	80 mm	1.2 mm	96 mm ²
Sika CarboDur E 1014	100 mm	1.4 mm	140 mm ²
Sika CarboDur E 1214	120 mm	1.4 mm	168 mm ²

Αποθήκευση

Συνθήκες Αποθήκευσης /Διάρκεια Ζωής: Απεριόριστη, με την προϋπόθεση ότι δεν εκτίθενται σε άμεσο ηλιακό φως (υπεριώδη ακτινοβολία) και είναι αποθηκευμένα σε ξηρές συνθήκες και σε μέγιστη θερμοκρασία 50 0 C.

Μεταφορά: μόνο στην αρχική συσκευασία ή διαφορετικά κατάλληλα προστατευμένα για να αποτραπεί οποιαδήποτε μηχανική φθορά τους.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Πυκνότητα: 1.55 g/cm³

Περιεχόμενος Όγκος Ινών: > 70%

Μηχανικές / Φυσικές Ιδιότητες

Μέτρο ελαστικότητας : Μέση τιμή 170'000 N/mm²

Ελάχιστη τιμή > 165'000 N/mm²

Εφελκυστική Αντοχή Τιμές στη διαμήκη διεύθυνση των ινών

Μέση τιμή 2.200 N/mm²

Ελάχιστη τιμή > 2.000 N/mm

Παραμόρφωση Αστοχίας Τιμή στη διαμήκη διεύθυνση των ινών

Ελάχιστη τιμή > 1.30%

Αντίδραση σε φωτιά

Σε περιπτώσεις απαιτήσεων τοπικών κανονισμών, τα ελάσματα Sika CarboDur E μπορούν να επικαλυφθούν με προϊόντα που προσφέρουν πυροπροστασία.

Πληροφορίες Συστήματος

Διάταξη Συστήματος Η διάταξη και η διαδικασία εφαρμογής του συστήματος θα πρέπει να ακολουθούνται ακριβώς όπως περιγράφονται στη συνέχεια και δεν επιδέχονται καμία τροποποίηση.

Ρητίνη επικόλλησης – Sikadur -30 (Normal ή LP).

Ανθρακο-ελάσματα δομητικής ενίσχυσης – Sika CarboDur E.

Λεπτομέρειες Εφαρμογής

Κατανάλωση

Πλάτος Ελάσματος CarboDur ®	Τυπική Κατανάλωση Sikadur ® -30
50mm	0.25 – 0.35 kg/m
80mm	0.40 – 0.55 kg/m
100mm	0.55 – 0.80 kg/m
120mm	0.65 – 1.00 kg/m

Ποιότητα Υποστρώματος Εξωτερικά επικολλούμενα ανθρακοελάσματα Sika CarboDur σε επιφάνειες σκυροδέματος:

Προτεινόμενες ελάχιστες τιμές αντοχών εξόλκευσης σκυροδέματος, μετά από κατάλληλη προετοιμασία:

- Μέση: 2.0 N/mm²
- Ελάχιστη: 1.5 N/mm²

Πρέπει να επιβεβαιώνεται η αντοχή εξόλκευσης σκυροδέματος μετά από την προτεινόμενη προετοιμασία.

Όταν οι τιμές της αντοχής εξόλκευσης σκυροδέματος είναι χαμηλότερη από τις οριζόμενες ως ελάχιστες απαιτούμενες, είναι δυνατή η χρήση εναλλακτικών συστημάτων της Sika.

- Ανθρακοελάσματα Sika CarboDur εφαρμοζόμενα σε εγκοπές ως σπλισμός ενσωμάτωσης πλησίον της επιφάνειας.

-Υφάσματα SikaWrap : Παρακαλούμε ανατρέξτε στα αντίστοιχα Φύλλα Ιδιοτήτων Προϊόντων των υφασμάτων SikaWrap .

Το σκυρόδεμα πρέπει να είναι ηλικίας τουλάχιστον 28 ημερών (ανάλογα με τις συνθήκες ωρίμανσης, τον τύπο του σκυροδέματος, κ.τ.λ.)

Προετοιμασία Υποστρώματος Το σκυρόδεμα πρέπει να καθαρίζεται και να προετοιμάζεται ώστε να εξασφαλιστεί επιφάνεια ανοιχτής δομής, χωρίς τσιμεντοεπιδερμίδα και ουσίες που μπορεί να δημιουργήσουν πρόβλημα στη διαδικασία επικόλλησης.

Οδηγίες Εφαρμογής

Σημειώσεις Εφαρμογής /Περιορισμοί Υπεύθυνος για το σχεδιασμό των εργασιών δομητικής ενίσχυσης θα πρέπει να είναι κατάλληλα διαπιστευμένος Πολιτικός Μηχανικός.Επιπλέον, καθώς η εφαρμογή αυτή είναι δομητική, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη μέριμνα στην επιλογή κατάλληλα έμπειρου και εκπαιδευμένου εξειδικευμένου συνεργείου εφαρμογής και εργολάβου.Τα συστήματα ενίσχυσης Sika CarboDur με τα ανθρακοελάσματα Sika CarboDur πρέπει να προστατεύονται μόνιμα από άμεση έκθεση σε ηλιακή ακτινοβολία, υγρασία και/ή νερό. Η μέγιστη επιτρεπόμενη συνεχής θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος δομητικών ενισχύσεων είναι περίπου +50 0 C.Όταν χρησιμοποιείται ο επιταχυντής ωρίμανσης ρητινών Sika CarboHeater για την εποξειδική ρητίνη Sikadur -30 LP, έχουμε αύξηση της θερμοκρασίας για συνεχή λειτουργία μέχρι και τους +80°C.

Πυροπροστασία Όταν απαιτείται πυροπροστασία σύμφωνα με τοπικούς κανονισμούς, τα ανθρακοελάσματα Sika CarboDur μπορούν να επικαλυφθούν επιπλέον με ειδικά πυράντοχα υλικά.

Βάση Μετρήσιμων Τιμών Όλα τα τεχνικά δεδομένα που δηλώνονται σε αυτό το Φύλλο Ιδιοτήτων Προϊόντος βασίζονται σε εργαστηριακές δοκιμές. Τα πραγματικά μετρήσιμα δεδομένα μπορεί να διαφοροποιούνται λόγω συνθηκών που δεν υπόκεινται στον έλεγχο μας.

Τοπικοί Περιορισμοί Παρακαλούμε να σημειώσετε ότι σαν αποτέλεσμα ειδικών τοπικών κανονισμών η απόδοση αυτού του προϊόντος μπορεί να μεταβάλλεται από χώρα σε χώρα.

ΠληροφορίεςΥγιεινής και Ασφάλειας Το παρόν προϊόν είναι ένα αντικείμενο κατά την έννοια του άρθρου 3 του κανονισμού (ΕΚ) αριθ. 1907/2006 (REACH). Δεν περιέχει ουσίες που προβλέπεται να ελευθερωθούν από το αντικείμενο υπό φυσιολογικές ή εύλογα προβλέψιμες συνθήκες χρήσεως. Δελτίο δεδομένων ασφαλείας σύμφωνα με το άρθρο 31 του ίδιου κανονισμού δεν απαιτείται για τη

διάθεση του προϊόντος στην αγορά, την μεταφορά ή τη χρήση του. Για την ασφαλή χρήση ακολουθείστε τις οδηγίες που δίδονται στο παρόν φύλλο ιδιοτήτων προϊόντος. Σύμφωνα με την τρέχουσα γνώση μας, το παρόν προϊόν δεν περιέχει SVHC (substances of very high concern / ουσίες υψηλής ανησυχίας) όπως καταχωρίζονται στο Παράρτημα XIV του κανονισμού REACH ή στον κατάλογο υποψηφίων ουσιών του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Χημικών Προϊόντων σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του 0.1% κατά βάρος (κ.β.).

Αυτοματοποιημένη Διαστασιολόγηση Στοιχείων Ο. Σ. Ενισχυμένων με Σύνθετα Υλικά (FRP)

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ | **ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΤΕΜΝΟΥΣΑ** | **ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ**

Εισαγωγή Δεδομένων

Σκυρόδεμα
 Κατηγορία ή Αντοχή σχεδιασμού
 C16/20 $f_{cd} = 0$ [N/mm²]

Σύνθετα Υλικά
 Μέτρο ελαστικότητας $E_f = 170$ [kN/mm²]
 Μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση $\epsilon_{f,lim} = 0,004$ [-]

Οπλισμοί Διατομής
 Χαρακτηριστική αντοχή χάλυβα $f_{yk} = 400$ [N/mm²]
 Πάνω $A_{s2} = 300$ [mm²] σε απόσταση $d_2 = 0,050$ [m]
 Κάτω $A_{s12} = 0$ [mm²] σε απόσταση $d_{12} = 0$ [m]
 Κάτω $A_{s11} = 900$ [mm²] σε απόσταση $d_{11} = 0,05$ [m]

Τύπος Διατομής
 Δοκός Υποστυλώμα

Γεωμετρία Διατομής
 Πλάτος $b = 0,25$ [m]
 Συνεργηνο πλάτος $b_{eff} = 1,20$ [m]
 Ύψος $h = 0,500$ [m]
 Πάχος πλάκας $h_f = 0,150$ [m]

Ενταπικά Μεγέθη
 Κατά την φάση ενίσχυσης
 $N_o = 0$ [kN] $M_o = 30$ [kNm] **Επίλυση**
 Μετά την φάση ενίσχυσης
 $N_{Rd} = 0$ [kN] $M_{Rd} = 200$ [kNm] **Νέα Δεδομένα**

Επιλογές | Σχετικά με ... | Εξοδος

Έργο: | Ονομ/μο: | Εταιρεία: | 4/4/2017 | 6:51 μμ

Αποτελέσματα υπολογισμού απαιτούμενης διατομής σύνθετων υλικών

Ενίσχυση σε Κάμψη
 Εμβαδόν διατομής FRP $A_f = 220,3$ [mm²]
 Ροπή αντοχής μετά την ενίσχυση $M_{Rd} = 200,06$ [kNm]
 Ροπή αντοχής πριν την ενίσχυση $M_{Rd,o} = 137,13$ [kNm]
 Βαθμός ενίσχυσης $\frac{M_{Rd}}{M_{Rd,o}} = 1,459$

Ενίσχυση σε Τέμνουσα
 Πάχος FRP $t_f = 0$ [mm]
 Πρόσθετη τέμνουσα $V_{fd} = 0$ [kN]

Περίσφιγξη
 Αντοχή πριν την ενίσχυση $f_{cc1d} = 0$ [N/mm²]
 Πάχος FRP $t_f = 0$ [mm]
 Οριακή αξονική παραμόρφωση μετά την ενίσχυση $\epsilon_{ccud} = 0$ [-]
 Αντοχή μετά την ενίσχυση $f_{ccd} = 0$ [N/mm²]

Εισαγωγή διαστάσεων FRP
Εκτύπωση | **Επιστροφή** | **Εξοδος**

Παραμορφωσιακή κατάσταση διατομής

Εικόνα 70:Διαστασιολόγηση πεδילוδοκού με ανθρακολάμες

Εισαγωγή διαστάσεων FRP

Ενίσχυση σε Κάμψη

Για ενίσχυση: $M_{Rd} = 200,06$ [kNm] $N_{Rd} = 0,00$ [kN]

Απαιτούμενο εμβαδόν FRP για την ενίσχυση $A_f = 220,3$ [mm²]

Λωρίδες FRP πλάτους [mm] και πάχους [mm]

 Απαιτούμενος αριθμός λωρίδων: **4**

Εφαρμοζόμενο εμβαδόν FRP $A_f = 240,0$ [mm²]

Για πλάτος ελάσματος 50 mm, πάχος 1,2 mm απαιτούνται 4 λωρίδες και το εφαρμοζόμενο εμβαδόν FRP είναι $A_f=240$ mm².

Εισαγωγή διαστάσεων FRP

Ενίσχυση σε Κάμψη

Για ενίσχυση: $M_{Rd} = 200,06$ [kNm] $N_{Rd} = 0,00$ [kN]

Απαιτούμενο εμβαδόν FRP για την ενίσχυση $A_f = 220,3$ [mm²]

Λωρίδες FRP πλάτους [mm] και πάχους [mm]

 Απαιτούμενος αριθμός λωρίδων: **3**

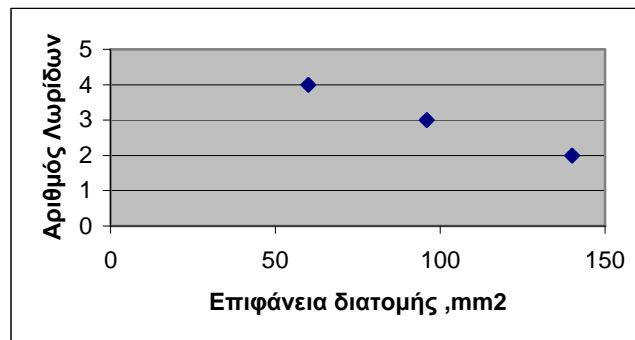
Εφαρμοζόμενο εμβαδόν FRP $A_f = 288,0$ [mm²]

Εικόνα 71:Υπολογισμός στρώσεων ανθρακολαματων με το πρόγραμμα FRP.

Για πλάτος ελάσματος 80 mm, πάχος 1,2 mm απαιτούνται 3 λωρίδες και το εφαρμοζόμενο εμβαδόν FRP είναι $A_f=288$ mm².

Πλάτος mm	Πάχος, mm	Επιφάνεια διατομής, mm ²	Αριθμός Λωρίδων	Εφαρμοζόμενο εμβαδόν FRP, mm ²
50	1,2	60	4	240
80	1,2	96	3	288
100	1,4	140	2	280
120	1,4	168	2	336

Παρατηρούμε ότι ο αριθμός των λωρίδων μειώνεται όταν η επιφάνεια διατομής του FRP αυξάνεται όπως φαίνεται στο κάτωθι σχήμα. Πάνω από 140 mm² α αριθμός των λωρίδων παραμένει 2.



Εικόνα 72: Επίδραση της επιφανείας διατομής επί του αριθμού των λωρίδων.

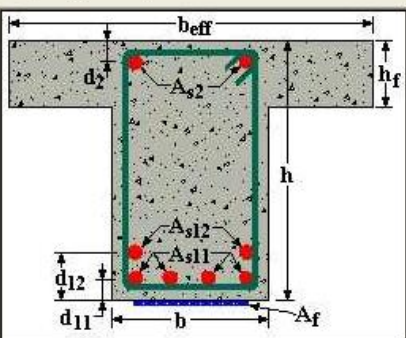
Υποθέτουμε ότι θα ενισχύσουμε γέφυρα πλάτους 7 m σε δευτερεύων δίκτυο εθνικών οδών, με 2 λωρίδες κυκλοφορίας, συνολικού μήκους 30 m και ύψους 5 m. Απαιτούνται 6 πλακοδοκοί πλάτους 1,2 m και 6 υποστυλώματα κατά μήκος της γέφυρας. Η στατική μελέτη δείχνει (θεωρητικά) ότι 4 σειρές υποστυλωμάτων κατά μήκος. Άρα απαιτούνται 6 δοκοί χ 30 m μήκος=180 m λάμες FRP για την ενίσχυση των δοκών.

B. $E_f=400$ Gra (Ανθρακολάμες)

Αυτοματοποιημένη Διαστασιολόγηση Στοιχείων Ο. Σ. Ενισχυμένων με Σύνθετα Υλικά (FRP)

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ | **ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΤΕΜΝΟΥΣΑ** | **ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ**

Εισαγωγή Δεδομένων



Σκυρόδεμα
 Κατηγορία ή Αντοχή σχεδιασμού
 C16/20 ή $f_{od} = 0$ [N/mm²]

Σύνθετα Υλικά
 Μέτρο ελαστικότητας $E_f = 400$ [kN/mm²]
 Μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση $\epsilon_{f,lim} = 0,004$ [-]

Οπλισμοί Διατομής
 Χαρακτηριστική αντοχή χάλυβα $f_{yk} = 400$ [N/mm²]
 Πάνω $A_{s2} = 300$ [mm²] σε απόσταση $d_2 = 0,05$ [m]
 Κάτω $A_{s12} = 0$ [mm²] σε απόσταση $d_{12} = 0$ [m]
 Κάτω $A_{s11} = 900$ [mm²] σε απόσταση $d_{11} = 0,05$ [m]

Τύπος Διατομής
 Δοκός Υποστυλώμα

Γεωμετρία Διατομής
 Πλάτος $b = 0,25$ [m]
 Συνεργ/νο πλάτος $b_{eff} = 1,20$ [m]
 Ύψος $h = 0,50$ [m]
 Πάχος πλάκας $h_f = 0,150$ [m]

Εντακτά Μεγέθη
 Κατά την φάση ενίσχυσης
 $N_o = 0$ [kN] $M_o = 30$ [kNm]
 Μετά την φάση ενίσχυσης
 $N_{Rd} = 0$ [kN] $M_{Rd} = 200$ [kNm]

Αποτελέσματα υπολογισμού απαιτούμενης διατομής σύνθετων υλικών

Ενίσχυση σε Κάμψη
 Εμβαδόν διατομής FRP $A_f = 93,6$ [mm²]
 Ροπή αντοχής μετά την ενίσχυση $M_{Rd} = 200,06$ [kNm]
 Ροπή αντοχής πριν την ενίσχυση $M_{Rd,o} = 137,13$ [kNm]
 Βαθμός ενίσχυσης $\frac{M_{Rd}}{M_{Rd,o}} = 1,459$

Ενίσχυση σε Τέμνουσα
 Πάχος FRP $t_f = 0$ [mm]
 Πρόσθετη τέμνουσα $V_{fTd} = 0$ [kN]

Περίσφιγξη
 Αντοχή πριν την ενίσχυση $f_{cc1d} = 0$ [N/mm²]
 Πάχος FRP $t_f = 0$ [mm]
 Οριακή αξονική παραμ/ση μετά την ενίσχυση $\epsilon_{ccud} = 0$ [-]
 Αντοχή μετά την ενίσχυση $f_{ccd} = 0$ [N/mm²]

Εισαγωγή διαστάσεων FRP

Ενίσχυση σε Κάμψη

Για ενίσχυση: $M_{Rd} = 200,06$ [kNm] $N_{Rd} = 0,00$ [kN]
 Απαιτούμενο εμβαδόν FRP για την ενίσχυση $A_f = 93,6$ [mm²]
 Λωρίδες FRP πλάτους [mm] και πάχους [mm]

Απαιτούμενος αριθμός λωρίδων: **2**
 Εφαρμοζόμενο εμβαδόν FRP $A_f = 156,0$ [mm²]

Γ. $E_f=700$ Gpa (Ανθρακολάμες)

Αποτελέσματα υπολογισμού απαιτούμενης διατομής σύνθετων υλικών

Ενίσχυση σε Κάμψη

Εμβαδόν διατομής FRP $A_f = 53,5$ [mm²]
 Ροπή αντοχής μετά την ενίσχυση $M_{Rd} = 200,06$ [kNm]

Ροπή αντοχής πριν την ενίσχυση $M_{Rd,o} = 137,13$ [kNm]
 Βαθμός ενίσχυσης $\frac{M_{Rd}}{M_{Rd,o}} = 1,459$

Ενίσχυση σε Τέννωση

Πάχος FRP $t_f = 0$ [mm]
 Πρόσθετη τέννωση $V_{fd} = 0$ [kN]

Περίσφιγξη

Αντοχή πριν την ενίσχυση $f_{cc1d} = 0$ [N/mm²]
 Πάχος FRP $t_f = 0$ [mm]
 Οριακή αξονική παραμόρφωση μετά την ενίσχυση $\epsilon_{ccud} = 0$ [-]
 Αντοχή μετά την ενίσχυση $f_{ccd} = 0$ [N/mm²]

Εισαγωγή διαστάσεων FRP

Εισαγωγή διαστάσεων FRP

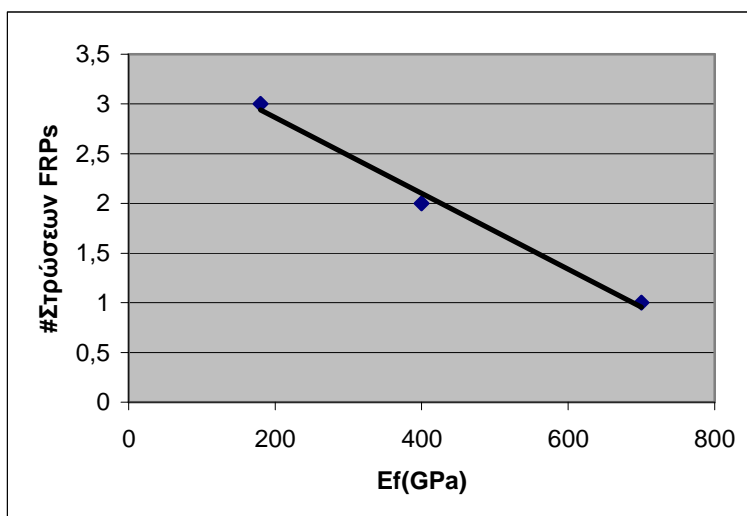
Ενίσχυση σε Κάμψη

Για ενίσχυση: $M_{Rd} = 200,06$ [kNm] $N_{Rd} = 0,00$ [kN]
 Απαιτούμενο εμβαδόν FRP για την ενίσχυση $A_f = 53,5$ [mm²]
 Λωρίδες FRP πλάτους [mm] και πάχους [mm]

Απαιτούμενος αριθμός λωρίδων: **1**
 Εφαρμοζόμενο εμβαδόν FRP $A_f = 78,0$ [mm²]

Εικόνα 73:Υπολογισμός στρώσεων ανθρακολαμών

Διάγραμμα στρώσεις FRPs συναρτήσει του E_f



Εικόνα 74:Αριθμός στρώσεων σε συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας του FRP

Το ανωτέρω διάγραμμα δείχνει τον απαιτούμενο αριθμό των FRPs στρώσεων σε συνάρτηση του μέτρου ελαστικότητας. Παρατηρούμε ότι ο αριθμός των στρώσεων ελαττώνεται γραμμικά καθώς αυξάνει το E_f . Πρέπει όμως να αντισταθμίσουμε το κόστος επισκευής με τον αριθμό των στρώσεων. Αυτό θα το μελετήσει ο μηχανικός στο στάδιο της μελέτης επισκευής της γέφυρας και θα πάρει την τελική απόφαση.

Εφαρμογή 2^η Ενίσχυση υποστυλωμάτων γέφυρας σε περίσφιξη με FRPs

Χρησιμοποιούμε το SikaWrap 300C με χαρακτηριστικά που αναγράφονται κατωτέρω.



Εικόνα 75:Ανθρακούφασμα

Περιγραφή του Προϊόντος Το SikaWrap-300 C είναι ένα πλεκτό ύφασμα με ίνες άνθρακα μονής διεύθυνσεως, μέσων αντοχών, σχεδιασμένο για τοποθέτηση χρησιμοποιώντας την ξηρή ή την υγρή μέθοδο εφαρμογής.

Δομητική ενίσχυση κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, φέρουσας τοιχοποιίας, τοιχοποιίας πληρώσεως και ξύλινων δομικών στοιχείων, για αύξηση της καμπτικής και διατμητικής φέρουσας ικανότητας όπως:

- Βελτίωση της σεισμικής απόκρισης κατασκευών φέρουσας τοιχοποιίας
- Αναπλήρωση του απαιτούμενου χαλύβδινου οπλισμού
- Αύξηση των αντοχών και της ολκιμότητας των υποστυλωμάτων
- Αύξηση της φέρουσας ικανότητας των δομικών στοιχείων
- Αποδοχή σχεδιαστικών τροποποιήσεων λόγω αλλαγής/επισκευών
- Βελτίωση αρχικών σχεδιαστικών ή κατασκευαστικών ατελειών
- Αύξηση της αντίστασης έναντι σεισμικών μετακινήσεων
- Βελτίωση του χρόνου λειτουργίας και της ανθεκτικότητας
- Δομητική αναβάθμιση για συμμόρφωση με τους εν ισχύ κανονισμούς

Χαρακτηριστικά /Πλεονεκτήματα

- Χρησιμοποιείται η μέθοδος ύφανσης με στημόνι για τη σταθεροποίηση των ινών (διαδικασία θερμής επεξεργασίας)
- Πολλαπλής χρήσης ύφασμα για κάθε απαίτησης δομητική ενίσχυση
- Ευκολία μορφοποίησης ακολουθώντας τη γεωμετρία του δομικού μέλους (δοκούς, υποστυλώματα, καπνοδόχους, βάθρα, τοίχους, σιλό, κα.)
- Διαθέσιμο σε διαφορετικά πλάτη, για διευκόλυνση στην εφαρμογή
- Χαμηλής πυκνότητας, για αποφυγή επιπρόσθετου ιδίου βάρους
- Υψηλής οικονομικής απόδοσης, συγκρινόμενο με τις παραδοσιακές τεχνικές ενίσχυσης

Χαρακτηριστικά Προϊόντος

Μορφή

Τύπος Ινών Ειδικής επιλογής ίνες άνθρακα, μέσης αντοχής

Πλέξη Υφάσματος Διεύθυνση ινών: 0° (μονής διεύθυνσεως).

Υφάδι: μαύρες ίνες άνθρακα (99% του συνολικού βάρους υφάσματος).

Στημόνι: λευκές θερμοπλαστικές ίνες θερμικά σχηματιζόμενες (1% του συνολικού βάρους υφάσματος).

Συσκευασία

	Μήκος υφάσματος / ρολού	Πλάτος υφάσματος
4 ρολά σε χάρτινο κουτί	50 m	100/ 300 / 600 mm

Αποθήκευση

Συνθήκες Αποθήκευσης /Διάρκεια Ζωής 24 μήνες από την ημερομηνία παραγωγής αποθηκεμένο σωστά στην αρχικήκλειστή, σφραγισμένη συσκευασία, σε ξερές συνθήκες και σε θερμοκρασίες μεταξύ +5°C και +35°C. Προστατέψτε το από άμεση έκθεση σε ηλιακή ακτινοβολία.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Βάρος Υφάσματος 304 g/m² + 10 g/m² (μόνο ίνες άνθρακα)

Σχεδιαστικό Πάχος Υφάσματος 0.167 mm (βασισμένο σε περιεχόμενο ινών).

Πυκνότητα Ινών 1.82 g/cm³

Μηχανικές / Φυσικές Ιδιότητες

Ιδιότητες Ινών Τιμές κατά την διαμήκη διεύθυνση των ινών (σύμφωνα με ISO 10618)

Μέτρο Ελαστικότητας	Ελάχιστη Τιμή:	230.000 N/mm ²
Εφελκυστική Αντοχή	Ελάχιστη Τιμή:	4.000 N/mm ²
Οριακή παραμόρφωση (σε εφελκυσμό):		1.7 %

Ιδιότητες Ινοπλισμένων Πολυμερών (ΙΩΠ) (σχετιζόμενες με πάχος των ινών)

Τιμές κατά τη διαμήκη διεύθυνση των ινών (σύμφωνα με EN 2561*)

Μονή στρώση, κατ' ελάχιστον 27 δείγματα ανά σειρά δοκιμών

Πάχος διαστρωμάτωσης (ονομαστικό)	0,167 mm	
Σχεδιαστικό για πλάτος 1000 mm	167 mm ²	
Μέτρο Ελαστικότητας (εφελκυστικό)	Μέση	225 kN/mm ²
	Χαρακτηριστική	220 kN/mm ²
Εφελκυστική Αντοχή	Μέση	3500 N/mm ²
	Χαρακτηριστική	3200 N/mm ²

*τροποποίηση δείγματος με 50mm

Τιμές Σχεδιασμού Οι πραγματικές σχεδιαστικές τιμές παραμορφώσεων πρέπει να προσδιορίζονται σύμφωνα με τους σχετικούς σχεδιαστικούς κανονισμούς.

Οι τιμές αφορούν εμποτισμό με ρητίνη Sikadur -330 και Sikadur -300

Εφελκυστική αντοχή	Μέση	585 kN/m
	Χαρακτηριστική	534 kN/m
Εφελκυστική αντοχή για παραμόρφωση 0.4%	Μέση	150 kN/m
	Χαρακτηριστική	147 kN/m
Εφελκυστική αντοχή για παραμόρφωση 0.6%	Μέση	225 kN/m
	Χαρακτηριστική	220 kN/m

Πληροφορίες Συστήματος

Διάταξη Συστήματος Η διάταξη και η διαδικασία διαστρωμάτωσης του συστήματος θα πρέπει να ακολουθείται με ακρίβεια όπως αυτή περιγράφεται στη συνέχεια, και δεν επιδέχεται καμία τροποποίηση. Συγκολλητικό αστάρι υποστρώματος σκυροδέματος – Sikadur -330 ή Sikadur -300 με Extender T.

Ρητίνη εμποτισμού / επικόλλησης – Sikadur -330 ή Sikadur-300.

Ύφασμα δομητικής ενίσχυσης – SikaWrap-300 C.

Λεπτομέρειες Εφαρμογής

Κατανάλωση Ξηρή διαδικασία εφαρμογής με Sikadur-330

Πρώτη στρώση συμπεριλαμβανομένου και του ασταριού: 1.0 – 1.5 kg/m²

Κάθε επόμενη στρώση: 0.8 kg/m²

Υγρή διαδικασία εφαρμογής με Sikadur-300

Πρώτη στρώση συμπεριλαμβανομένου και του ασταριού: 1.0 – 1.5 kg/m²

Κάθε επόμενη στρώση: 0.7 kg/m²

Ποιότητα Υποστρώματος Ελάχιστη αντοχή εφελκυσμού υποστρώματος: 1.0 N/mm² ή όπως προδιαγράφεται στην μελέτη δομητικής ενίσχυσης.

Προετοιμασία Υποστρώματος Το σκυρόδεμα πρέπει να καθαρίζεται και να προετοιμάζεται ώστε να επιτευχθεί μια επιφάνεια ανοικτής δομής, χωρίς τσιμεντοεπιδερμίδα και ρύπους.

Οδηγίες Εφαρμογής

Μέθοδος Εφαρμογής /Εργαλεία Το ύφασμα μπορεί να κοπεί με ειδικό ψαλίδι ή επαγγελματική λεπίδα. Ποτέ δεν διπλώνεται το ύφασμα! Το ύφασμα SikaWrap-300 C εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας την ξηρή ή την υγρή διαδικασία εφαρμογής.

Σημειώσεις Εφαρμογής /Περιορισμοί Το προϊόν αυτό πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο από κατάλληλα εκπαιδευμένο και εξειδικευμένο συνεργείο εφαρμογής.

Το ύφασμα SikaWrap -300 C εγκιβωτίζεται σε μήτρα εποξειδικής ρητίνης εμποτισμού / επικόλλησης Sikadur , έτσι ώστε να εξασφαλιστεί μέγιστη συγκόλληση και ανθεκτικότητα. Για να διατηρήσετε την πλήρη συμβατότητα του συστήματος αποφύγετε την οποιαδήποτε αλλαγή των επιμέρους υλικών του συστήματος.

Το ύφασμα SikaWrap-300 C μπορεί να επικαλύπτεται με μία επίστρωση ή επικάλυψη τσιμεντοειδούς βάσης ή βαφές για λόγους αισθητικής και / ή προστασίας. Η επιλογή βασίζεται στις συνθήκες έκθεσης του προϊόντος και τις ειδικές απαιτήσεις του κάθε έργου. Για επιπρόσθετη προστασία από υπεριώδεις ακτινοβολίες UV χρησιμοποιείστε Sikagard-550W Elastic ή Sikagard-680S Betoncolor.

Βάση Μετρήσιμων Τιμών Όλα τα τεχνικά δεδομένα που δηλώνονται σε αυτό το Φύλλο Ιδιοτήτων Προϊόντος βασίζονται σε εργαστηριακές δοκιμές. Τα πραγματικά μετρήσιμα δεδομένα μπορεί να διαφοροποιούνται λόγω συνθηκών που δεν υπόκεινται στον έλεγχο μας.

Πληροφορίες Υγιεινής και Ασφάλειας

Το παρόν προϊόν είναι ένα αντικείμενο κατά την έννοια του άρθρου 3 του κανονισμού (ΕΚ) αριθ. 1907/2006 (REACH). Δεν περιέχει ουσίες που προβλέπεται να ελευθερωθούν από το αντικείμενο υπό φυσιολογικές ή εύλογα προβλέψιμες συνθήκες χρήσεως. Δελτίο δεδομένων ασφαλείας σύμφωνα με το άρθρο 31 του ίδιου κανονισμού δεν απαιτείται για τη διάθεση του προϊόντος στην αγορά, την μεταφορά ή τη χρήση του. Για την ασφαλή χρήση ακολουθείστε τις οδηγίες που δίδονται στο παρόν φύλλο ιδιοτήτων προϊόντος.

Σύμφωνα με την τρέχουσα γνώση μας, το παρόν προϊόν δεν περιέχει SVHC (substances of very high concern / ουσίες υψηλής ανησυχίας) όπως καταχωρίζονται στο Παράρτημα XIV του κανονισμού REACH ή στον κατάλογο υποψηφίων ουσιών του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Χημικών Προϊόντων σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του 0.1% κατά βάρος (κ.β.).

Η κατωτέρω καρτέλα δείχνει όλα τα χαρακτηριστικά του υποστυλώματος σε περίσφιξη

A. $E_f=230$ GPa, το πάχος του FRP είναι 0,167 mm (σύμφωνα με την ιστοσελίδα της εταιρείας SIKA HELLAS)

Αυτοματοποιημένη Διαστασιολόγηση Στοιχείων Ο. Σ. Ενισχυμένων με Σύνθετα Υλικά (FRP)

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ | **ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΤΕΜΝΟΥΣΑ** | **ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ**

Εισαγωγή Δεδομένων



Σκυρόδεμα

Κατηγορία: C12/15 ή Αντοχή σχεδιασμού: $f_{cd} = 20$ [N/mm²]

Σύνθετα Υλικά

Μέτρο ελαστικότητας: $E_f = 230$ [kN/mm²]
 Αντοχή σχεδιασμού: $f_{fd} = 4000$ [N/mm²]
 Ενεργή αντοχή σχεδιασμού: $f_{rde} = 0,8 \times f_{fd}$

Οπλισμοί Διατομής

Χαρακτηριστική αντοχή χάλυβα: $f_{ywk} = 220$ [N/mm²]
 Απόσταση συνδετήρων: $s = 0,250$ [m]
 Εμβαδόν συνδετήρων ανά διεύθυνση: $A_{st} = 200$ [mm²]
 Επικάλυψη οπλισμών: $c = 0,02$ [m]

Ζητούμενα Προβλήματος

Αξονική καταπόνηση $f_{ccd} = 25$ [N/mm²]
 Αύξηση αντοχής $\epsilon_{ccud} = 0, \dots$ [-]
 Αύξηση οριακής αξονικής παράσης

Οριζόντια καταπόνηση παράλληλα στην:
 μικρή πλευρά
 μεγάλη πλευρά

Αύξηση δείκτη πλαστιμότητας $\mu_{\Delta} = 4$ [-]

Επίλυση

Νέα Δεδομένα

Τύπος Διατομής
 Ορθογωνικό υποστύλμα Κυκλικό υποστύλμα

Γεωμετρία Διατομής

Πλάτος: $b = 0,30$ [m]
 Ύψος: $h = 0,40$ [m]
 Ακτίνα καμπύλης γωνίας: $R = 0,030$ [m]
 Διάμετρος: $D = 0$ [m]

Για την ενίσχυση όταν έχουμε **αξονική καταπόνηση** απαιτούνται

Εισαγωγή διαστάσεων FRP

Περίσφιγξη

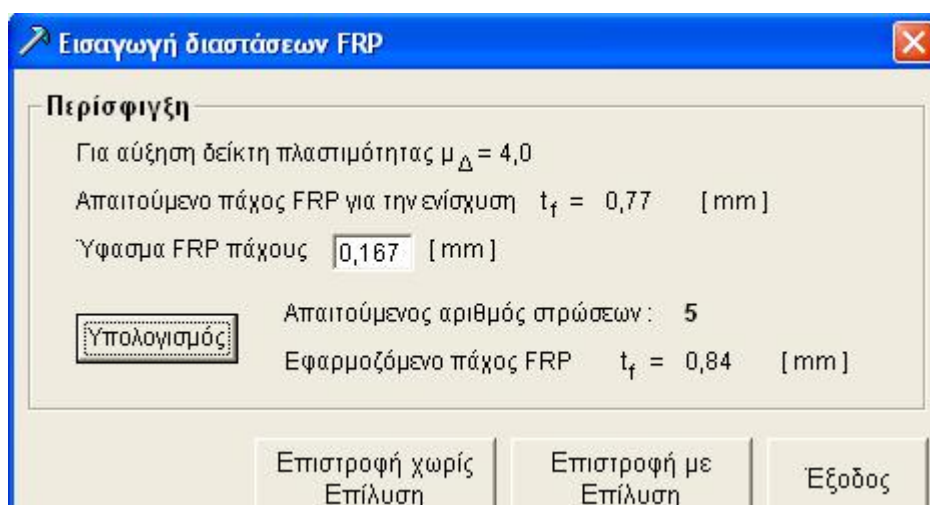
Για ενίσχυση: $f_{ccd} = 25,00$ [N/mm²] $\epsilon_{ccud} = 0,02542$ [-]
 Απαιτούμενο πάχος FRP για την ενίσχυση $t_f = 0,12$ [mm]
 Υφασμα FRP πάχους $0,167$ [mm]

Υπολογισμός

Απαιτούμενος αριθμός στρώσεων: **1**
 Εφαρμοζόμενο πάχος FRP $t_f = 0,17$ [mm]

Επιστροφή χωρίς Επίλυση Επιστροφή με Επίλυση Εξοδος

Στην περίπτωση **οριζόντιας καταπόνησης** παράλληλα στη μικρή πλευρά με αύξηση δείκτη πλαστιμότητας $\mu_{\Delta}=4$ ο αριθμός των λωρίδων είναι 5 και το πάχος κάθε λωρίδας είναι 0,167 mm, ενώ το συνολικό πάχος είναι 0,84 mm.



Εισαγωγή διαστάσεων FRP

Περίσφιγξη

Για αύξηση δείκτη πλαστιμότητας $\mu_{\Delta} = 4,0$

Απαιτούμενο πάχος FRP για την ενίσχυση $t_f = 0,77$ [mm]

Υφασμα FRP πάχους [mm]

Απαιτούμενος αριθμός στρώσεων: **5**

Εφαρμοζόμενο πάχος FRP $t_f = 0,84$ [mm]

Εάν υποθέσουμε ότι το FRP περιέλιξης έχει πλάτος 60 cm, για κάθε υποστυλώμα απαιτούνται 8,3 m² υφάσματος. Κατασκευαστικά απαιτούνται 6 υποστυλώματα ανά σειρά και 3 σειρές κατά μήκος ανά 10 m. Οπότε ο συνολικός αριθμός των υποστυλωμάτων είναι 18 ή $3,9 \times 18 = 70,2$ m² υφάσματος.

B. $E_f=400$ GPa.

ü Αξονική καταπόνηση

Εισαγωγή διαστάσεων FRP

Περίσφιγξη

Για ενίσχυση: $f_{ccd} = 25,00$ [N / mm²] $\epsilon_{ccud} = 0,01068$ [-]

Απαιτούμενο πάχος FRP για την ενίσχυση $t_f = 0,13$ [mm]

Υφασμα FRP πάχους [mm]

 Απαιτούμενος αριθμός στρώσεων: **1**

 Εφαρμοζόμενο πάχος FRP $t_f = 1,10$ [mm]

Απαιτείται μόνο μια στρώση FRP πάχους 1,1 mm.

ü Οριζόντια καταπόνησης παράλληλα στη μικρή πλευρά

Εισαγωγή διαστάσεων FRP

Περίσφιγξη

Για αύξηση δείκτη πλαστιμότητας $\mu_{\Delta} = 4,0$

Απαιτούμενο πάχος FRP για την ενίσχυση $t_f = 1,10$ [mm]

Υφασμα FRP πάχους [mm]

 Απαιτούμενος αριθμός στρώσεων: **2**

 Εφαρμοζόμενο πάχος FRP $t_f = 2,20$ [mm]

ü $E_f = 700$ GPa

Μετά από συστηματική μελέτη συμπεραίνουμε ότι ο αριθμός των στρώσεων , για αξονική καταπόνησης, παραμένει σταθερός ένα και το πάχος 1,1 mm. Στην περίπτωση οριζόντιας καταπόνησης παράλληλα στην μικρά πλευρά ο αριθμός των στρώσεων είναι 2 ενώ το πάχος του FRP είναι σταθερό 1,1 mm.

Ο κάτωθι πίνακας δείχνει για κάθε περίπτωση ενίσχυσης το πάχος και τον αριθμό των στρώσεων :

	Αξονική Καταπόνηση		Οριζόντια Καταπόνηση παράλληλα στην μικρή πλευρά	
Ef(GPa)	Πάχος,m m	#Στρώσεω ν	Πάχος,mm	#Στρώσεων
230	0,17	1	0,84	5
400	1,10	1	2,20	2
700	1,10	1	1,10	2

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για διαφορετικά υλικά ενίσχυσης, δηλαδή διαφορετικό Ef οι στρώσεις είναι διαφορετικού πάχους και από την μελέτη με το πρόγραμμα FRPs του Τριανταφύλλου προκύπτει ότι ο αριθμός των στρώσεων είναι ίδιος ($\Sigma=1$) στην περίπτωση της αξονικής φόρτισης. Στη περίπτωση όμως της οριζόντιας καταπόνησης το πάχος είναι διαφορετικό απ' ότι στην αξονική καταπόνηση και ο αριθμός των στρώσεων μεγαλύτερος.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Antonio Nanni, Antonio De Luca, Hany Jawaheri Zadeh, Reinforced Concrete with FRP Bars: Mechanics and Design, (2014).
2. N Uddin , Developments in Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Civil Engineering, 1st Edition (2013).
3. Kiang Hwee Tan, Fibre Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (In 2 Volumes) (2003).
4. Antonio Nanni , Hany Jawaheri Zadeh , Reinforced Concrete with FRP Bars : Mechanics and Design, Taylor & Francis Ltd, (2014).
5. Eugenijus Gudonisa, Edgaras Timinskasa, Viktor Gribniakab, Gintaris Kaklauskasa, Aleksandr K. Arnautovc & Vytautas Tamulénasa , FRP reinforcement for concrete structures: state-of-the-art review of application and design (2013).
6. Marwan Bilkasem Salah Alferjani, Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminate: A Review, American Journal of Civil Engineering Volume 2, Issue 1, January 2014, Pages: 1-7 .
7. Carol K Shield, Fiber-reinforced polymer (FRP) reinforcement for concrete structures : [proceedings of the Seventh International Symposium of the Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-7), Kansas City, Missouri, November 6-9, 2005.
8. Prefabricated Composite Jacketing of RC Columns for Enhanced Shear Strength. Y. Xiao, H. Wu, and G.R. Martin. ASCE J. Str. Eng., Mar 99, pp 255.
9. Column seismic retrofitting using high strength fiber jackets. Fyfe ACI SP160, 1996.
10. Finite element analysis of r/c columns confined with composite materials. Parent, Labossiere. Canadian Journal of Civil Eng. Vol 27, 2000.
11. Effect of Concrete Parameters on FRP-Confined Concrete, Mirmiran A., Shahawy M., Samaan M., El Echary H., Mastrapa J., Pico O., ASCE Journal of Composites for Construction, Vol. 2(4), (1998).
12. Confinement of r/c columns with fibre-reinforced composite sheets-an experimental study. Demers, Neale. Can. J. of Civ. Eng. Vol 26, pp226-241, 1999.