



Τ.Ε.Ι ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε

(πρώην Πολιτικών Έργων Υποδομής)

✓ ΤΙΤΛΟΣ ΘΕΜΑΤΟΣ: Ενισχύσεις Κατασκευών με Σύνθετα Υλικά (πρόγραμμα FRPs)



Σπουδάστρια: ΟΙΚΟΝΟΜΑΚΗ ΧΡΙΣΤΙΝΑ

Εισηγητής : ΚΑΚΑΒΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2016

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδάστριας: Η κάτωθι υπογεγραμμένη σπουδάστρια έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολόκληρου του κειμένου εξίσου ,έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιαδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο , το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομα του και την πηγή προέλευσης.

Η Σπουδάστρια

(Ονοματεπώνυμο)

ΟΙΚΟΝΟΜΑΚΗ ΧΡΙΣΤΙΝΑ

(Υπογραφή)

ΠΡΟΛΟΓΟΣ:

Η πτυχιακή αυτή ασχολείται με την εφαρμογή των συνθέτων υλικών στην επισκευή κτηρίων. Το πρώτο κεφάλαιο (1) παραθέτει γενικά στοιχεία για τα σύνθετα υλικά-ίνες και ρητίνες. Πιο αναλυτικά, περιγράφει τα διάφορα είδη συνθέτων υλικών, την σύνθεση ινών που χρησιμοποιούνται στην παρασκευή των συνθέτων υλικών. Ιδιαίτερως, περιγράφει τις σύνηθες ίνες π.χ ίνες υάλου, άνθρακα, πολυμερικές, μεταλλικές, κεραμικές και ίνες από φυσικά ορυκτά. Κατόπιν, αναλύεται η σύνθεση σύνηθων ρητινών (οργανικών-μεταλλικών-κεραμικών) οι οποίες χρησιμοποιούνται για την παρασκευή των συνθέτων υλικών. Επίσης, περιγράφεται ο τρόπος παρασκευής συνθέτων υλικών από ίνες και ρητίνες, τα οποία χρησιμοποιούνται για επισκευή δομικών στοιχείων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο (2) παραθέτονται τα γενικά στοιχεία ενισχύσεων δομικών κατασκευών με σύνθετα υλικά. Παρουσιάζεται ο τρόπος παρασκευής οπλισμένων πολυμερών και οι χρήσεις των συνθέτων υλικών στις επισκευές των κτηρίων. Επίσης, περιγράφεται η επισκευή με εκτοξευμένο σκυρόδεμα. Η μέθοδος επικόλλησης μεταλλικών ελασμάτων, η εφαρμογή των ρητινενέσεων και τσιμεντενέσεων στην επισκευή των κτηρίων αναλύονται επιπλέον και στο κεφάλαιο δυο (2).

Στο τρίτο κεφάλαιο (3) περιγράφονται όλες οι διαδικασίες ενίσχυσης δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα με FRPs. Επιπροσθέτως, παρουσιάζονται τα συστήματα ενίσχυσης και οι τεχνικές εφαρμογής.

Στο τέταρτο κεφάλαιο (4) πραγματεύεται η ενίσχυση κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα με λάμες ανθρακονημάτων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο (5) περιγράφονται εφαρμογές ενίσχυσης κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα με το πρόγραμμα FRPs.

Περιεχόμενα

ΕΙΚΟΝΕΣ.....	5
ΠΙΝΑΚΕΣ	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο : ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ (COMPOSITE MATERIALS).....	7
1.1 ΓΕΝΙΚΑ: ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΟΡΙΣΜΟΣ	7
1.2: ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	8
1.3: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	9
1.4: ΙΝΕΣ	11
1.4.1: ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ (GLASS FIBERS)	11
1.4.2: ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ (CARBON FIBERS)	14
1.4.3: ΙΝΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ (POLYMER FIBERS).....	17
1.4.4: ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΙΝΕΣ	19
1.4.5: ΚΕΡΑΜΙΚΕΣ ΙΝΕΣ	20
1.4.6: ΤΡΙΧΙΤΕΣ (WHISKERS)	21
1.4.7: ΙΝΕΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ	22
1.4.8: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ.....	22
1.5: ΜΗΤΡΑ.....	23
1.5.1: ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ.....	24
1.5.2: ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ.....	25
1.5.3: ΚΕΡΑΜΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ	25
1.6: ΕΠΙΛΟΓΗ ΙΝΩΝ ΚΑΙ ΜΗΤΡΑΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΙΝΩΔΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ.....	26
1.7: ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο : Ενισχύσεις δομικών κατασκευών με σύνθετα υλικά	36
2.1: Ινοπλισμένα πολυμερή – Σύνθετα υλικά (Fiber Reinforced Polymer Composites).....	36
2.2: Χρήσεις σύνθετων υλικών	36
2.3: Gunite - Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.....	37
2.4: Επικόλληση μεταλλικών ελασμάτων και νέα μεταλλικά στοιχεία	38
2.5: Μεταλλικά ελάσματα	39
2.6: Ρητινενέσεις	40
2.7: Αποκατάσταση διατομής και μηχανικών χαρακτηριστικών μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα.....	41
2.8: Τσιμεντενέσεις.....	41
2.9: Βλήτρα - Ριζοπλισμοί – Αγκύρια	42
2.9.1: Ριζοπλισμοί.....	42
2.9.2: Βλήτρα και αγκύρια	43
2.9.3: Είδη βλήτρων και αγκυρίων.....	43
Κεφάλαιο 3 ^ο : Ενίσχυση δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα με FRPs	45
3.1 Η ενίσχυση δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να πραγματοποιηθεί σε κάμψη.	45
3.1:ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ	45
3.2:ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ.....	46
3.2.1: Βασική τεχνική:.....	46
3.2.2: Ειδικές τεχνικές:.....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο :ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΛΑΜΕΣ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΩΝ	47
Κεφάλαιο 5 ^ο : Εφαρμογές ενίσχυσης κατασκευής με το πρόγραμμα FRP	54

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1: Κατηγορίες συνθέτων υλικών 8

Εικόνα 2: Τύποι διάταξης των ινών: (α) μονοδιευθυντικές ίνες, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με πλέξη ύφανσης και (δ) ίνες σε τρισσορθογώνια πλέξη..... 10

Εικόνα 3: Γενική ταξινόμηση των συνθέτων υλικών 10

Εικόνα 4 Περιοδικός Πίνακας Στοιχείων που χρησιμοποιούνται σε ενισχυμένα υλικά 11

Εικόνα 5: Δομή γυαλιού 11

Εικόνα 6: Παραγωγή ενισχυτικών ινών γυαλιού..... 13

Εικόνα 7 Δράση οργανοπυριτικών ενώσεων του τύπου $X_3Si(CH_2)_nY$ 14

Εικόνα 8 Γραφική δομή άτομων άνθρακα σε μορφή εξαγωνικών επιπέδων..... 15

Εικόνα 9 Τυπική δομή ανθρακονήματος..... 15

Εικόνα 10: Παραγωγή ενισχυτικών ινών άνθρακα..... 16

Εικόνα 11: Δομή ίνας Kevlar 18

Εικόνα 12: Διάταξη παραγωγής ινών πολυαμιδίου 19

Εικόνα 13: Παραγωγή ινών βορίου με αναγωγή αλογονιδίου του βορίου. 20

Εικόνα 14: (α) Χαρακτηριστικές καμπύλες σ-ε , (β) Συσχετισμός ειδική αντοχής και ειδικής ακαμψίας για διάφορα υλικά ενισχυτικών ινών. 22

Εικόνα 15: Θερμοκρασιακά όρια χρήσης των υλικών. 24

Εικόνα 16: Επίδραση του προσανατολισμού των ινών στην αντοχή σε εφελκυσμό συνθέτου υλικού εποξειδικής μήτρας με ίνες E-γυαλιού. 27

Εικόνα 17: Ασυνεχής μορφοποίηση συνθέτου: (α) χειροποίητη στρώση, (β) χύτευση θαλάμου πίεσης, (γ) χύτευση σε διαιρετό καλούπι. 30

Εικόνα 18: Συνεχής μορφοποίηση συνθέτου με περιέλιξη νήματος (filament winding) (α) Διάταξη μορφοποίησης, (β) Σχηματική παράσταση διαδικασίας. 31

Εικόνα 19: Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheet moulding process, SMC) (α) Διάταξη μορφοποίησης, (β) Σχηματική παράσταση διαδικασίας..... 32

Εικόνα 20: Μορφοποίηση με εμβάπτιση (pultrusion) (α) Διάταξη μορφοποίησης, (β) Σχηματική παράσταση διαδικασίας. 33

Εικόνα 21: Συνδιέλαση (co-extrusion) 34

Εικόνα 22: Μορφοποίηση με: (α) χύτευση με τη βοήθεια τριχοειδών φαινομένων, (β) πίεση βαρύτητας, (γ) εφαρμογή κενού και (δ) συνεχή χύτευση. 34

Εικόνα 23: Μορφοποίηση συνθέτων μεταλλικής μήτρας με συμπίεση..... 34

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1: Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού.....	12
Πίνακας 2: Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών άνθρακα.	16
Πίνακας 3: Χαρακτηριστικές ιδιότητες των ινών Kevlar	18
Πίνακας 4: Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων ινών SiC (μέσες τιμές).....	21
Πίνακας 6: Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων και τριχιτών από SiC και Al ₂ O ₃	22
Πίνακας 7: Σύγκριση θερμικής ευστάθειας ινών	23
Πίνακας 8: Σύγκριση παραμόρφωσης θραύσης ινών	23
Πίνακας 9: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μεταλλικών μητρών (έναντι των οργανικών μητρών).....	25
Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά παραδείγματα συνθέτων υλικών οργανικής μήτρας.....	28
Πίνακας 11: Χαρακτηριστικά παραδείγματα συνθέτων υλικών μεταλλικής μήτρας.....	28
Πίνακας 12: Χαρακτηριστικά παραδείγματα συνθέτων υλικών κεραμικής μήτρας.....	29

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ (COMPOSITE MATERIALS)

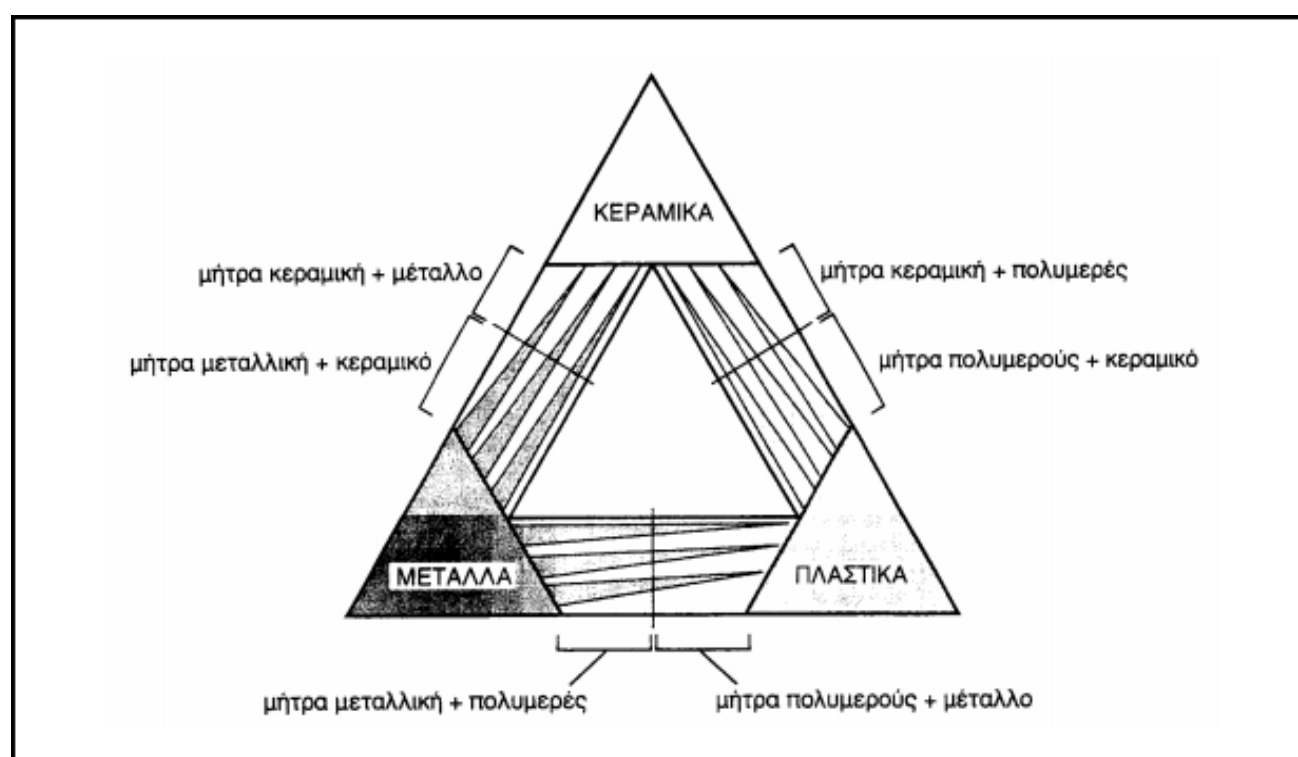
1.1 ΓΕΝΙΚΑ: ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΟΡΙΣΜΟΣ¹

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.](#)

1.2: ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ευρύτατα από τον άνθρωπο από αρχαιοτάτων χρόνων. Υλικά που εύκολα βρίσκουμε στη φύση (ξύλο, πέτρα, πηλός, κόκαλα) χρησιμοποιήθηκαν ευρύτατα από τον άνθρωπο, ο οποίος σύντομα έμαθε να βελτιώνει τις ιδιότητες τους ενισχύοντας τα υλικά αυτά με πρόσθετα συστατικά. Για παράδειγμα, οι Αιγύπτιοι (5000 π.Χ.) χρησιμοποιούσαν την τεχνική της ενίσχυσης τούβλων πηλού με πλέγμα άχυρων, με αποτέλεσμα τη μείωση των τάσεων συστολής που αναπτύσσονταν κατά την ξήρανση του πηλού. Επίσης, παρατήρησαν ότι οι πλάκες από πολύστρωτες βέργες ξύλου, παρουσίαζαν πολύ μεγαλύτερη αντοχή από το φυσικό ξύλο έναντι στρέβλωσης που οφειλόταν στην απορρόφηση υγρασίας. Στη Μεσοποταμία (1000 π.Χ.) εφαρμόστηκε η τεχνική του βερνικώματος των τούβλων και των πλακιδίων με σκοπό τον περιορισμό της επιφανειακής φθοράς, ενώ, κατά τους Ρωμαϊκούς χρόνους, η οδοποιία στηρίχθηκε στην ενίσχυση του οδοστρώματος με τρίμματα κεραμιδιών. Η χρήση της σιδηρόβεργας για προεντεταμένο σκυρόδεμα, που χρησιμοποιείται στις οικοδομές της σύγχρονης εποχής, δεν είναι παρά η μετεξέλιξη της τεχνικής της ανάμιξης γύψου με ζωικό τρίχωμα, η οποία ήταν μια πρακτική μέθοδος ενίσχυσης εύθραυστων υλικών κατασκευής στους αναπτυσσόμενους πολιτισμούς.

Το πρώτο σύνθετο υλικό βασισμένο σε μήτρα πλαστικού εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1920 και επρόκειτο για μίγμα ινιδίων ξύλου με φαινολική φορμαλδεΐδη, γνωστό αργότερα ως βακελίτης προς τιμή του Βέλγου επιστήμονα Leo Baekeland. Η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών με ενίσχυση ινών κατά την διάρκεια των τελευταίων 30 ετών υπήρξε ραγδαία και συνδυάστηκε με την προηγούμενη ανάπτυξη των υψηλής αντοχής ινών γυαλιού και των υψηλής δυσκαμψίας ινών βορίου (1960) και την έντονη τάση της αεροδιαστημικής βιομηχανίας για μεγαλύτερη απόδοση με παράλληλη μείωση βάρους αεροσκαφών και διαστημοπλοίων. Το 1964 διατέθηκαν στην αγορά, αρχικά σε μικρές ποσότητες, οι ίνες άνθρακα (carbon fibers), οι οποίες τελευταία αποτελούν τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες ενισχύσεις στις αεροδιαστημικές κατασκευαστικές εφαρμογές. Το 1971 διατέθηκαν στο εμπόριο οι ίνες αραμιδίου, οι οποίες τώρα χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα ελαστικά αυτοκινήτων, καθώς και σε αρκετές αεροδιαστημικές και ναυπηγικές κατασκευές.

Η ειδική αντοχή (λόγος αντοχής προς πυκνότητα) και η ειδική δυσκαμψία (λόγος δυσκαμψίας προς πυκνότητα) των ενισχυτικών ινών βαίνουν συνεχώς αυξανόμενες τα τελευταία 30 χρόνια, π.χ. η ειδική αντοχή και η ειδική δυσκαμψία των ινών γυαλιού, άνθρακα, αραμιδίου και βορίου έχουν φθάσει στο 10-14πλάσιο των αντίστοιχων τιμών του αλουμινίου (ελαφρό μέταλλο). Τα σύνθετα υλικά καλύπτουν μεγάλο μέρος των εφαρμογών των νέων τεχνολογιών αιχμής στις κατασκευές και έχουν μεταβάλει σημαντικά τις ακολουθούμενες διαδικασίες σχεδίασης, παραγωγής, ελέγχου και συντήρησης. Η μεγάλη ποικιλία ινών και ρητινών, καθώς και οι διάφορες μέθοδοι κατασκευής παρέχουν στο σχεδιαστή τη δυνατότητα να επιλέξει το πιο κατάλληλο σύστημα υλικών που καλύπτει τις απαιτήσεις του, σύστημα που έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και ιδιότητες, που πολλές φορές μπορεί να είναι και μοναδικά.

Το μικρό βάρος, η υψηλή αντοχή, η εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση, η πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση, σε κρούση και στη διάδοση ρωγμών, οι σχετικά εύκολες διαδικασίες παραγωγής και το μικρό κόστος συντήρησης είναι μερικοί από τους παράγοντες εκείνους που έχουν οδηγήσει τα σύνθετα υλικά στην πρώτη θέση μεταξύ των κατασκευαστικών υλικών για μεγάλο πλήθος εφαρμογών. Μερικά μειονεκτήματα των σύνθετων υλικών, όπως: τα υψηλά επίπεδα ερπυσμού, η μικρή αντίσταση σε μηχανική φθορά, η ιδιαίτερη και πολλές φορές ευαίσθητη συμπεριφορά σε δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος (θαλάσσιο περιβάλλον, υψηλές θερμοκρασίες, χημικό περιβάλλον, κλπ.) καθώς και το αρκετά υψηλό αρχικό τους κόστος, βαθμιαία αντιμετωπίζονται πιο αποτελεσματικά μέσω της συνεχούς τεχνολογικής ανάπτυξης στην παραγωγή νέων και καλλίτερων ινών, ρητινών και εξέλιξης των μεθόδων παραγωγής.

1.3: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

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.

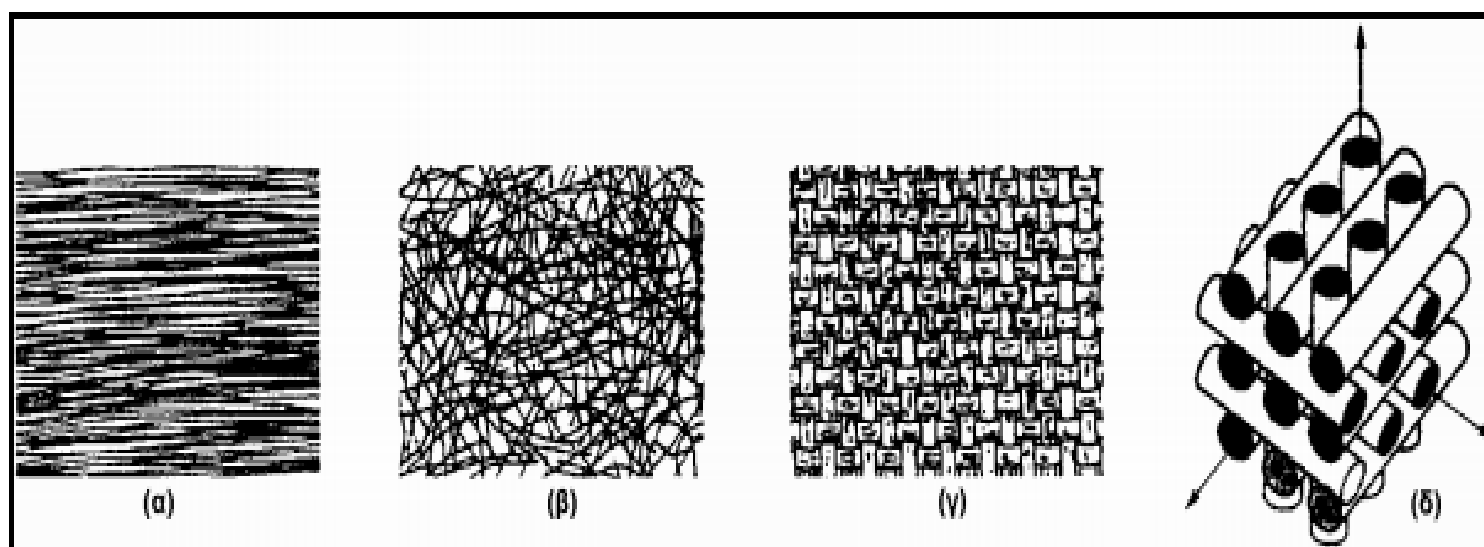
Η ιδιότητα αυτή οδηγεί άμεσα σε ταξινόμηση των πολυδιευθυντικών συνθέτων στις ακόλουθες υπο-ομάδες, βλ. **εικόνα 2**:

- **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:

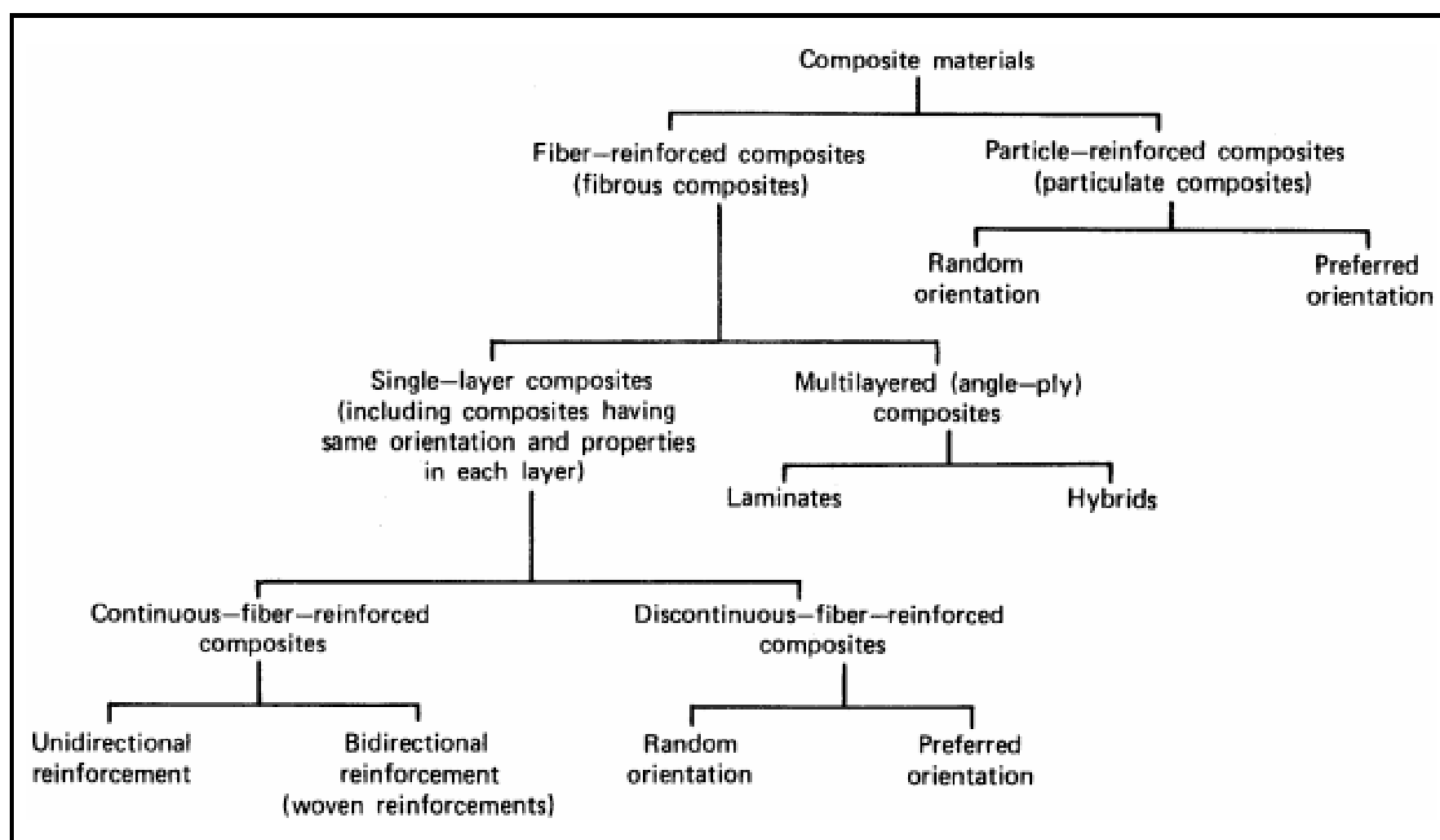
- Συνεχείς ή μεγάλου μήκους ίνες (continuous fibers), όταν είναι $A/d \geq 100$.
- Ασυνεχείς ή κοντές ίνες (discontinuous fibers), όταν είναι $A/d < 100$.
- Νηματίδια ή τριχίτες (whiskers): Με $d < 1$ μm και $A \cong 100$ μm (πρόκειται για λεπτούς μονοκρυστάλλους κεραμικού υλικού).

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.

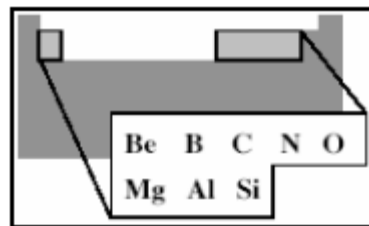


Εικόνα 3: Γενική ταξινόμηση των συνθέτων υλικών

1.4: ΙΝΕΣ

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).



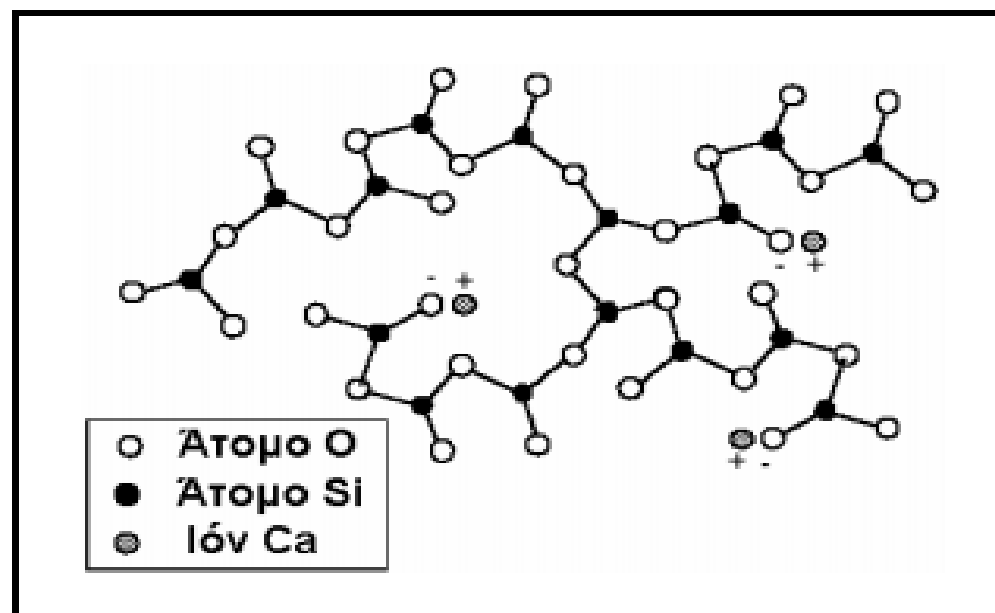
Εικόνα 4 Περιοδικός Πίνακας Στοιχείων που χρησιμοποιούνται σε ενισχυμένα υλικά

Στα προηγμένα σύνθετα υλικά, οι ενισχυτικές ίνες είναι κατασκευασμένες είτε από ανόργανα υλικά (γυαλί, άνθρακας, μέταλλα, κεραμικά) είτε από οργανικά υλικά (πολυμερή).

1.4.1: ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ (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 οξείδια 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.

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.

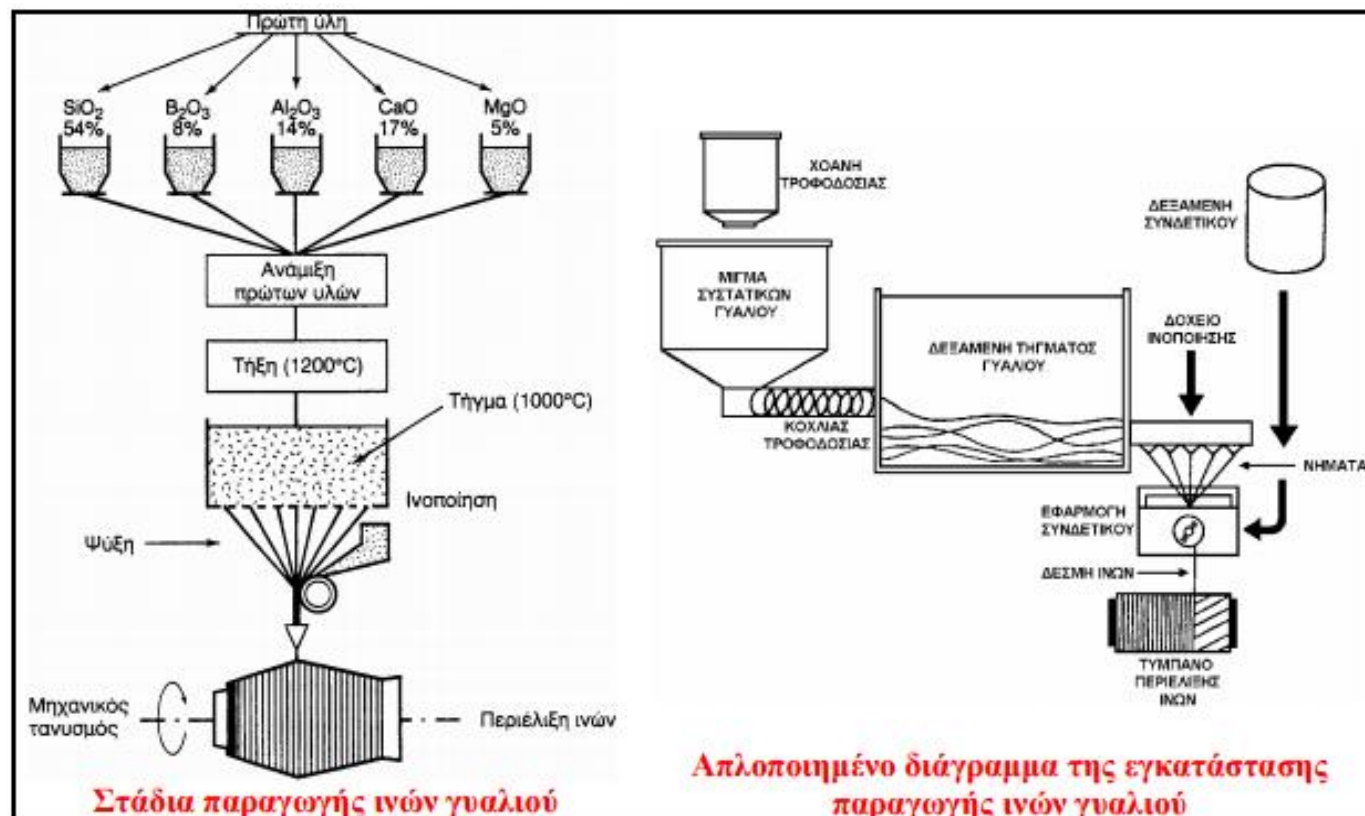
C-glass (C=corrosion): Υαλονήματα με υψηλή αντίσταση στη χημική διάβρωση, αλλά και με καλλίτερες μηχανικές ιδιότητες από τις ίνες τύπου E, από τις οποίες όμως είναι ακριβότερες.

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:



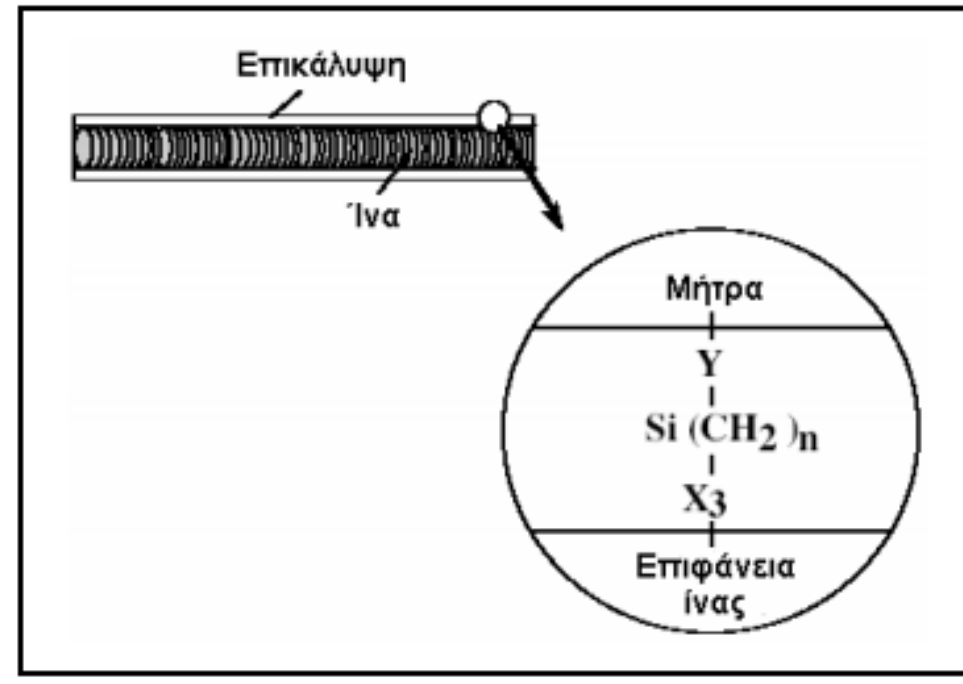
Εικόνα 6: Παραγωγή ενισχυτικών ινών γυαλιού

- 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 ($1 \div 15 \mu\text{m}$) και ακολουθεί ελαφρός ψεκασμός τους με νερό (ψύξη).
- Ακολούθως οι ίνες διέρχονται από μάντα 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 °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 οργανοπυριτικών ενώσεων του τύπου $X_3Si(CH_2)_nY$

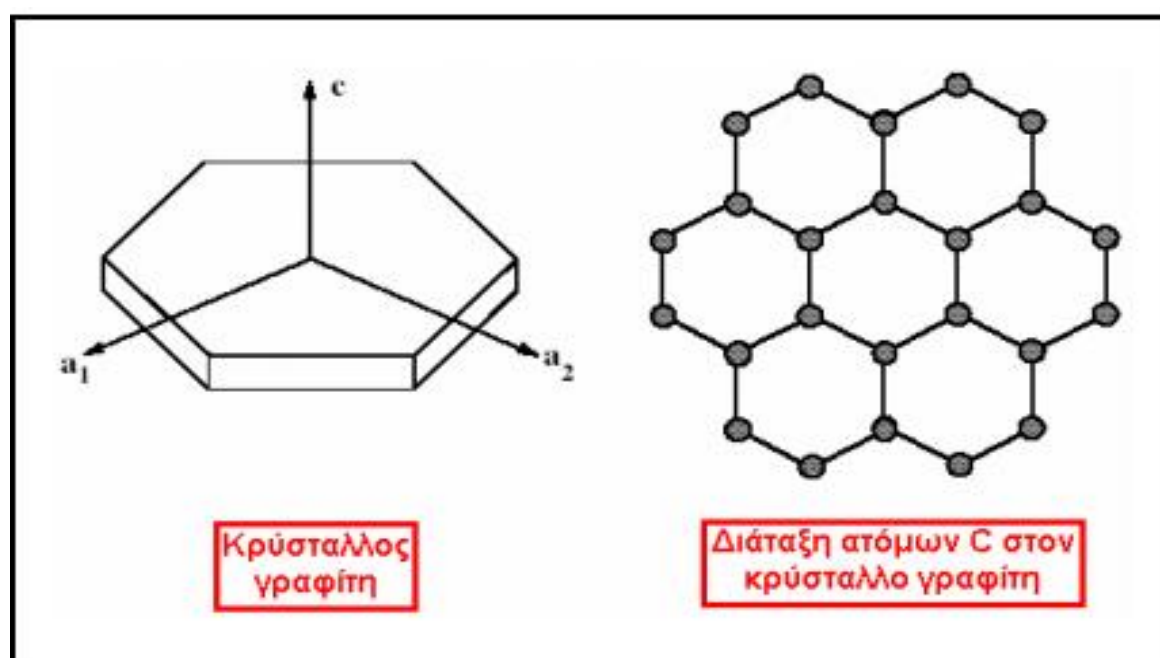
- Η αντοχή και η δυσκαμψία του γυαλιού προσδιορίζεται από την τρισδιάστατη δομή και διάταξη των συστατικών οξειδίων του. Λόγω αυτής της δομής τα υαλοήματα είναι ισότροπα υλικά και παρουσιάζουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά. Η συμμετοχή και των μεταλλικών οξειδίων στη σύνθεση των ινών μπορεί να επιφέρει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

1.4.2: ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ (CARBON FIBERS)

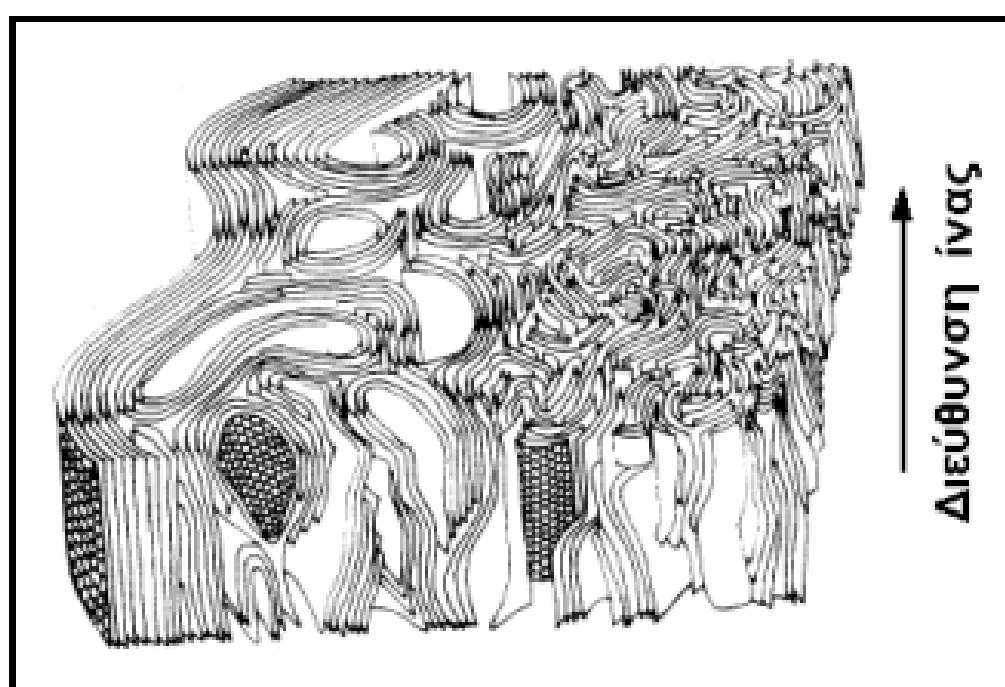
Οι ίνες γραφίτη είναι η επικρατέστερη ενίσχυση υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας, η οποία χρησιμοποιείται για την παρασκευή υψηλών επιδόσεων σύνθετων υλικών ρητινικής μήτρας. Γενικά, όταν απαιτείται ο βέλτιστος συνδυασμός μηχανικής συμπεριφοράς και ελάττωσης του βάρους, οι χρησιμοποιούμενες 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 κρυσταλλιτών 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 γραφίτη 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**.



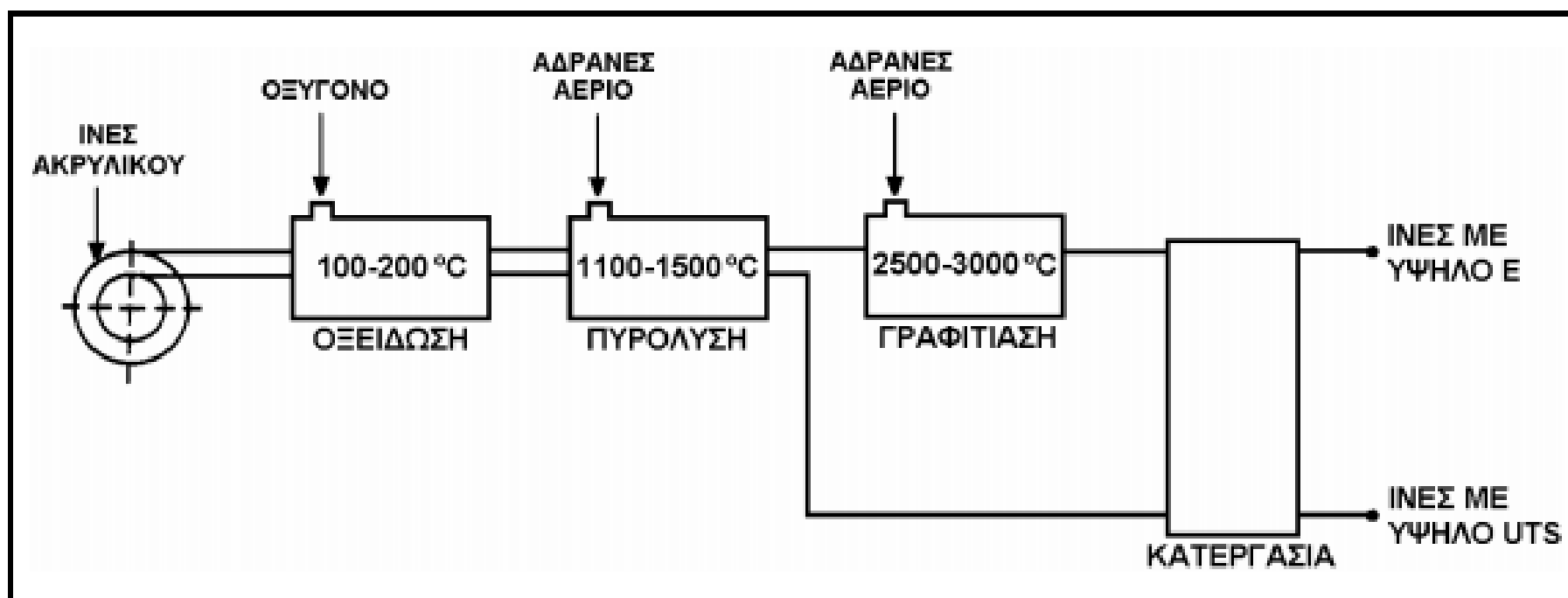
Εικόνα 8 Γραφιτική δομή ατόμων άνθρακα σε μορφή εξαγωνικών επιπέδων



Εικόνα 9 Τυπική δομή ανθρακονήματος

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

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



Εικόνα 10: Παραγωγή ενισχυτικών ινών άνθρακα

• Οξείδωση 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 γραφίτιωση, 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 (οξείδωση και πυρόλυση) και σε τρία στάδια (οξείδωση, 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 διεύθυνσης 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.

1.4.3: ΙΝΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ (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:

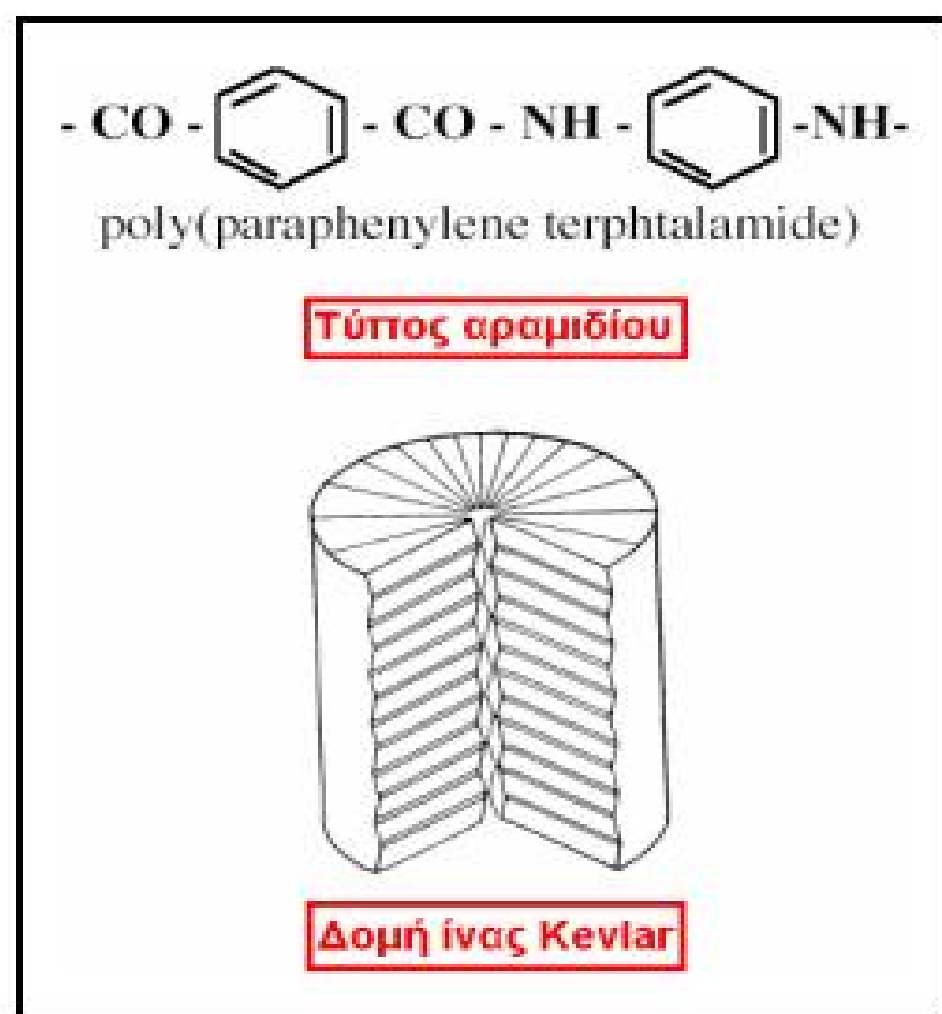
- Kevlar-29: Με μέτρο ελαστικότητας 60 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 3.6 GPa.
- Kevlar-49: Με μέτρο ελαστικότητας 120 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 3.6 GPa.
- Kevlar-149: Με μέτρο ελαστικότητας 180 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 3.4 GPa.

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

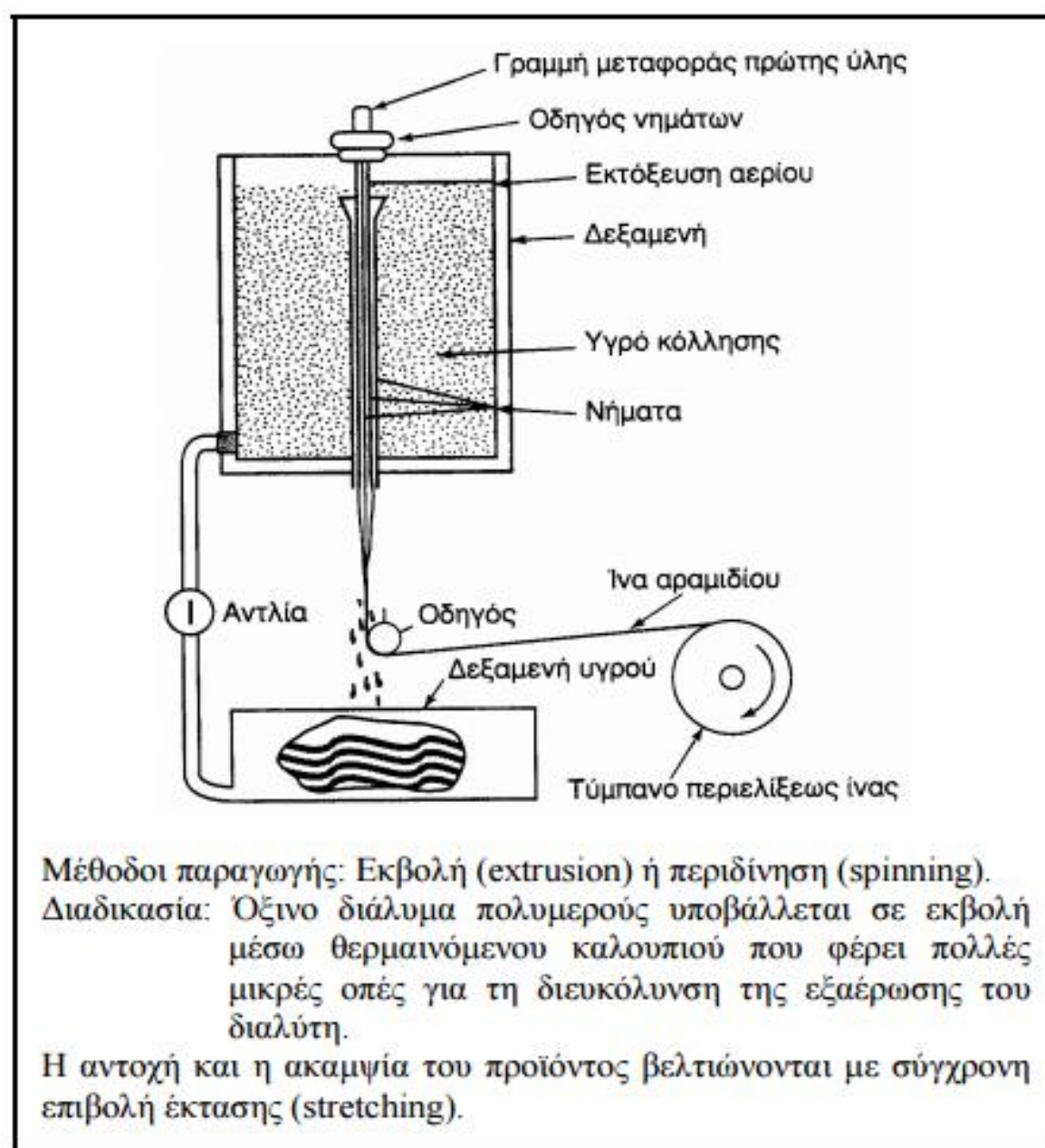
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	Kevlar 29	Kevlar 49
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	60	130
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2700	3600
Επιμήκυνση θραύσης (%)	4.5	2
Πυκνότητα (g/cm ³)	1.45	1.45
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	200	200
Θερμοκρασία αστοχίας (°C)	400	425

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).



Εικόνα 11: Δομή ίνας Kevlar

Στην **εικόνα 12** φαίνεται η διαδικασία παραγωγής ενισχυτικών ινών πολυαμιδίου.



Εικόνα 12: Διάταξη παραγωγής ινών πολυαμιδίου

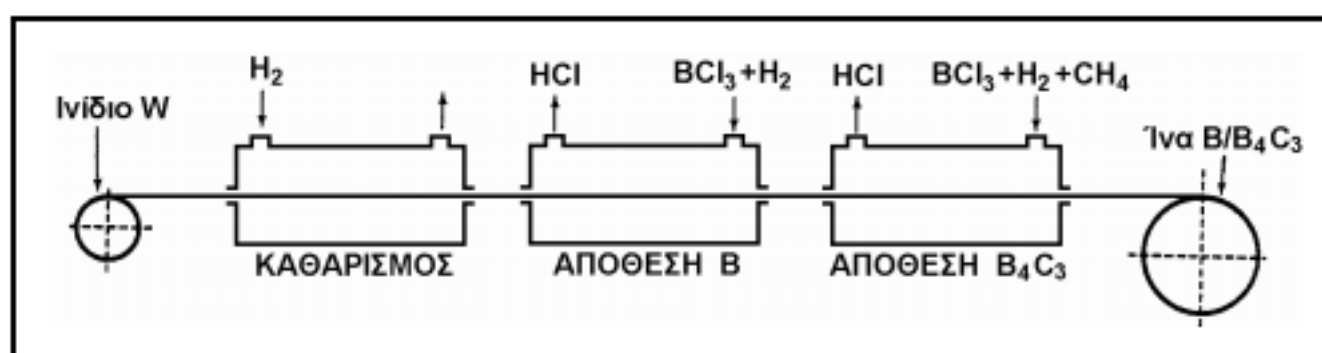
1.4.4: ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

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 °C) και αποτίθεται σε πολύ λεπτό νήμα βολφραμίου, διαμέτρου 10-15 μm , όπως φαίνεται στην **εικόνα 13**. Η

διάμετρος των παραγόμενων ινών με αυτήν την τεχνική κυμαίνεται μεταξύ $100\div 200\ \mu\text{m}$, 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 $500\ \text{C}$. 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.

1.4.5: ΚΕΡΑΜΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

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 αλούμινας (Al_2O_3), ενώ σπανιότερα συναντώνται και ίνες Si_3N_4 , BeO, B4C και ZrO_2 .

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 $10\div 25\ \mu\text{m}$ και εξωτερική διάμετρο $100\div 150\ \mu\text{m}$.

(β) Από πολυμερικές ίνες (Nicalon).

Θέρμανση σε κενό σε θερμοκρασία $850\ \text{C}$ μετατρέπει την πολυμερική ίνα σε ανόργανο SiC, ενώ θέρμανση σε υψηλότερη θερμοκρασία ($>1000\ \text{C}$) προκαλεί κρυστάλλωση σε $\beta\text{-SiC}$. Οι παραγόμενες ίνες έχουν διάμετρο $10\div 15\ \mu\text{m}$.

(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 (μm)	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 δραστηριότητας του πάνω από τη θερμοκρασία αυτή.

Οι μονοκρυσταλλικές ίνες αλούμινας (Al₂O₃) διαμέτρου 250 μm 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.

1.4.6: ΤΡΙΧΙΤΕΣ (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 1μm, 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 τριχιδίων από SiC και Al₂O₃

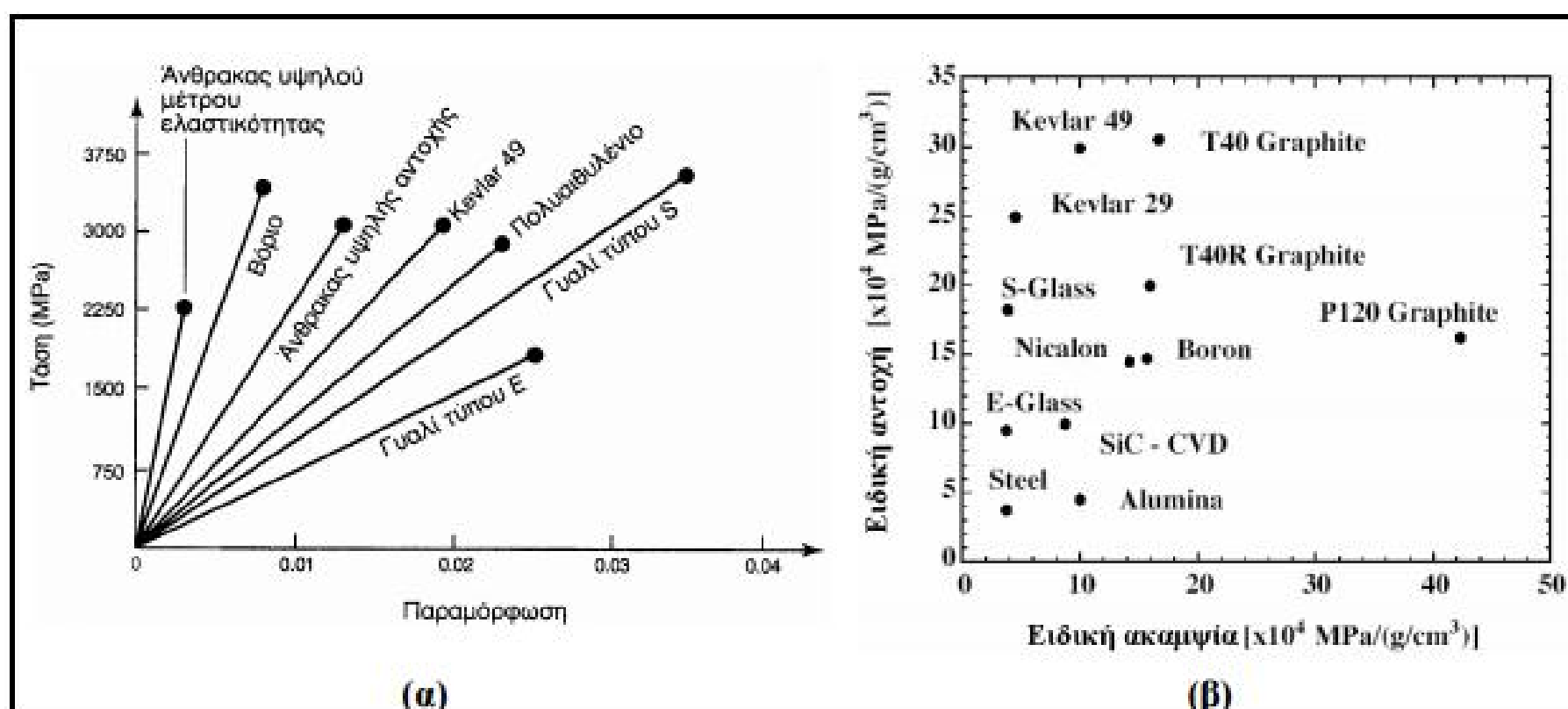
ΙΔΙΟΤΗΤΑ	SiC _{INA}	SiC _{ΤΡΙΧΙΤΗΣ}	Al ₂ O ₃ _{INA}	Al ₂ O ₃ _{ΤΡΙΧΙΤΗΣ}
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	480	840	500	755
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2300	21000	2000	19500
Πυκνότητα (g/cm ³)	3,2	3,2	4,0	4,0
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	900	1600	800	1300

1.4.7: ΙΝΕΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ

Αρκετά ορυκτά που βρίσκονται σε ινώδη ή φυλλώδη μορφή, μπορούν να αποτελέσουν φθηνό 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 500o 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 φυλλοπιριτικών 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.

1.4.8: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

(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

1.5: ΜΗΤΡΑ

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.

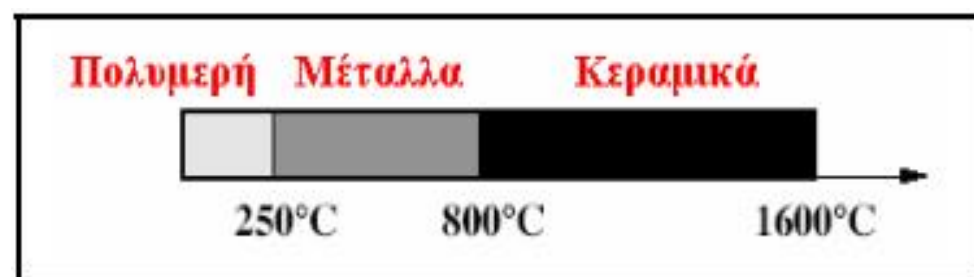
Συνήθως, το υλικό της μήτρας έχει χαμηλότερη πυκνότητα, αντοχή και δυσκαμψία από τις ίνες.

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

1.5.1: ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ

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 μητρών 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 θερμοκληρυνόμενα 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.

- **Εποξειδικές 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.

1.5.2: ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ

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 μήτρων, αφού η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρησιμοποίησης οργανικών μήτρων 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.

1.5.3: ΚΕΡΑΜΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ

Τα κεραμικά υλικά είναι σκληρά, δύστηκτα, μεγάλης στιβαρότητας και μεγάλης αντοχής στη διάβρωση και τη 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.

1.6: ΕΠΙΛΟΓΗ ΙΝΩΝ ΚΑΙ ΜΗΤΡΑΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΙΝΩΔΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ

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**

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

Εξίσωση 1

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

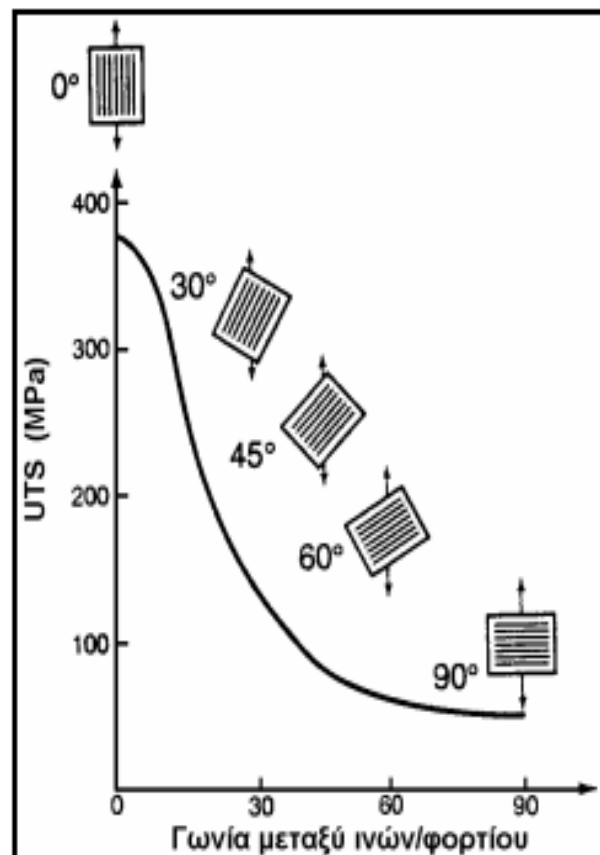
Η αντοχή και η στιβαρότητα ενός σύνθετου υλικού, αυξάνονται, με αύξηση της κατ' όγκο αναλογίας των περιεχόμενων ινών. Για ποσοστά υψηλότερα του 80%, τίθενται προβλήματα στην κατασκευή του σύνθετου, αφού οι ίνες δεν μπορούν να καλυφθούν πλήρως από το υλικό της μήτρας.

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 εποξειδικής 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 σύνθετου.

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 σύνθετου, 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, μαστούνια 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 κεραιών 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.

1.7: ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

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)

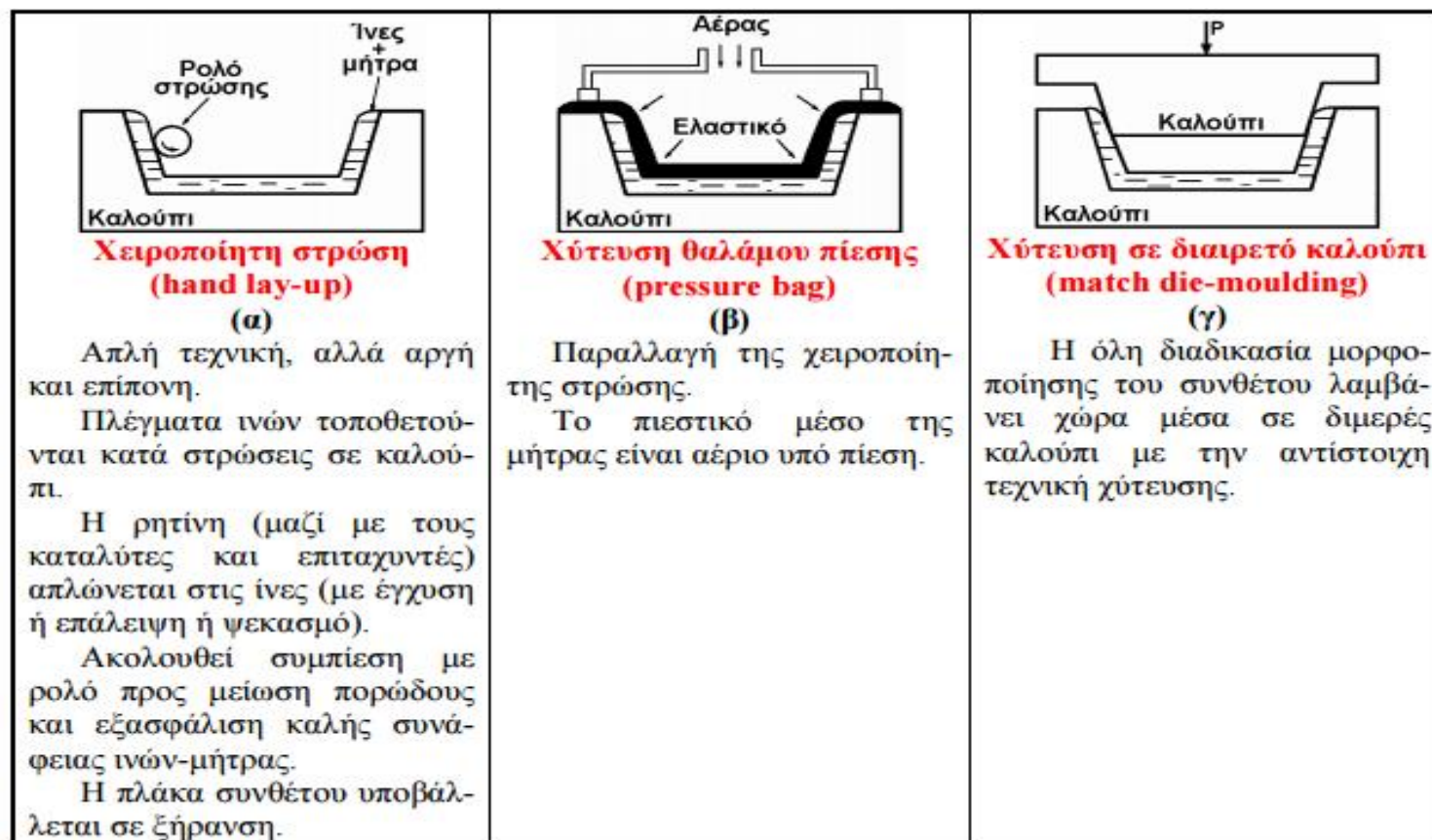
- Περιέλιξη νήματος (filament winding)
- Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheet moulding process, SMC)
- Μορφοποίηση με εμβάπτιση (pultrusion)

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



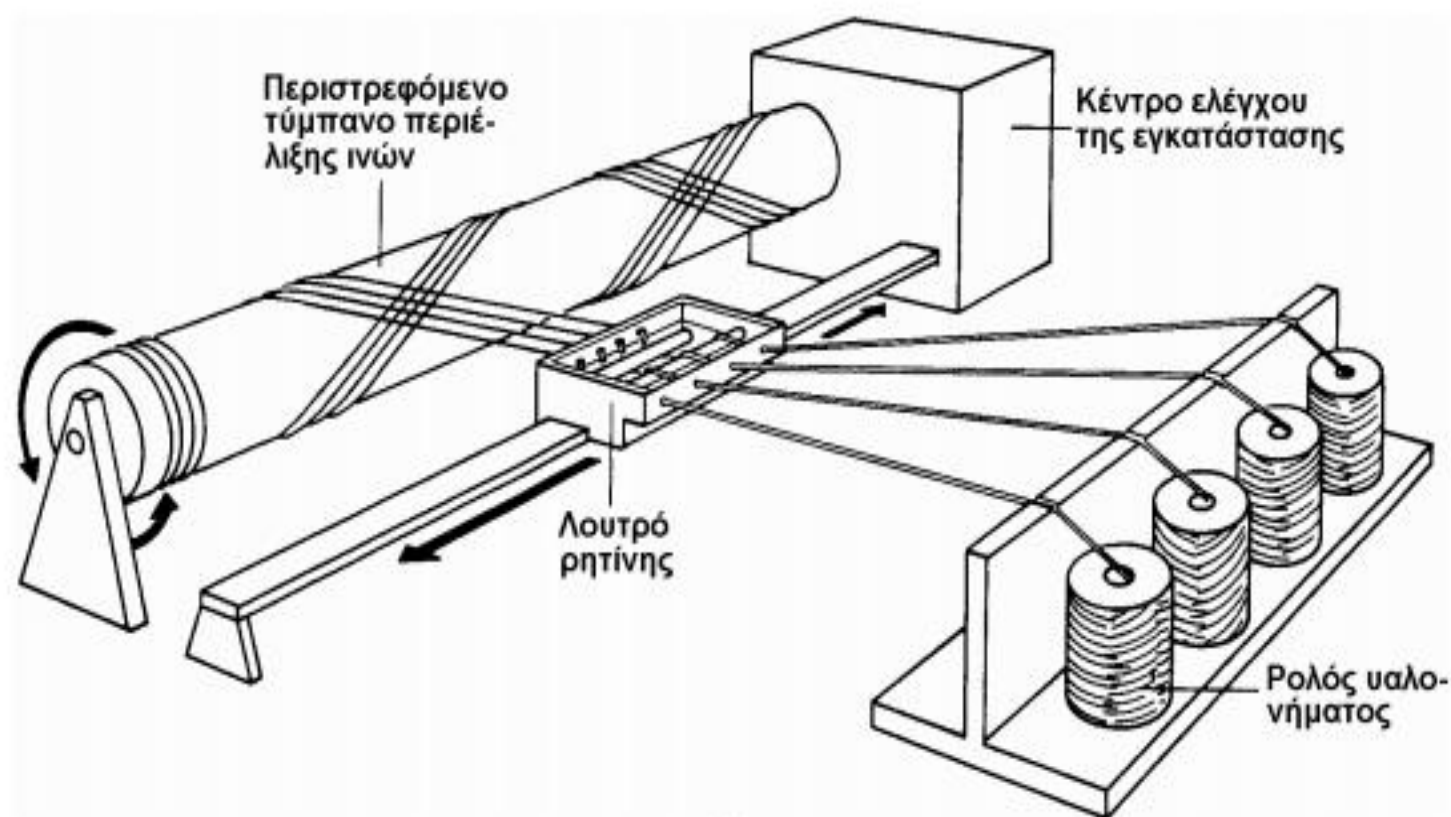
Εικόνα 17: Ασυνεχής μορφοποίηση συνθέτου: (α) χειροποίητη στρώση, (β) χύτευση θαλάμου πίεσης, (γ) χύτευση σε διαιρετό καλούπι.

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

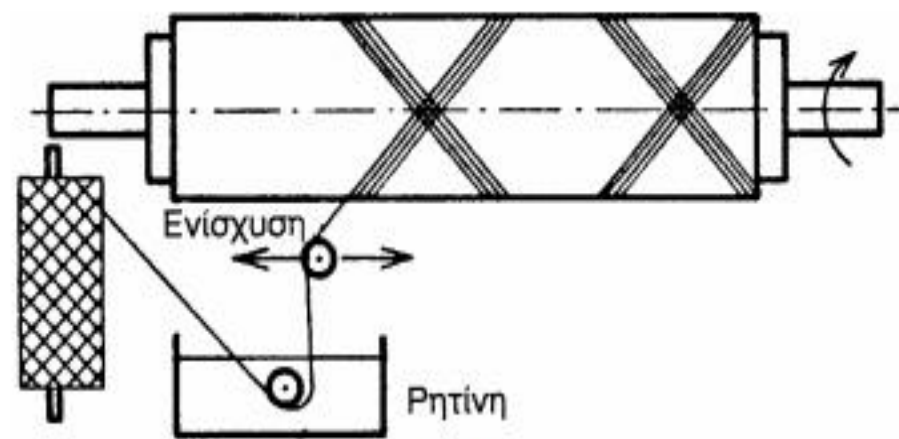
Μπορεί να είναι ευθυγραμμισμένες ή πεπλεγμένες.

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).



(α)



(β)

Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται κυρίως στην παραγωγή κοίλων κυλίνδρων, υψηλών προδιαγραφών.

Οι ίνες εμβαπτίζονται αρχικά σε λουτρό ρητίνης και στη συνέχεια περιτυλίσσονται σε καλούπι επιθυμητού σχήματος.

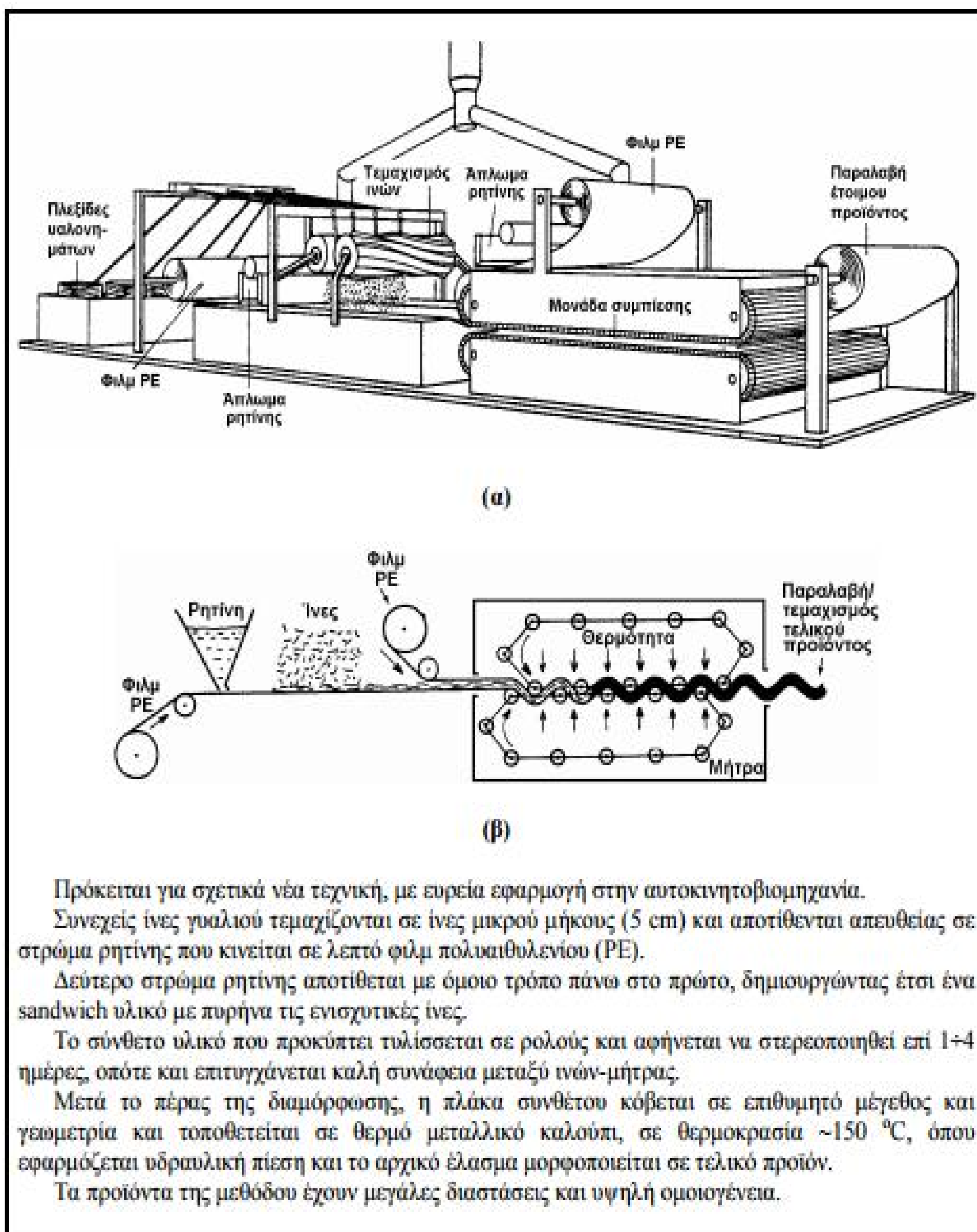
Ο εμποτισμός της στρώσης σε ρητίνη μπορεί να γίνεται ταυτόχρονα ή να ακολουθεί.

Το προϊόν που προκύπτει ξηραίνεται στον αέρα ή σε κλίβανο.

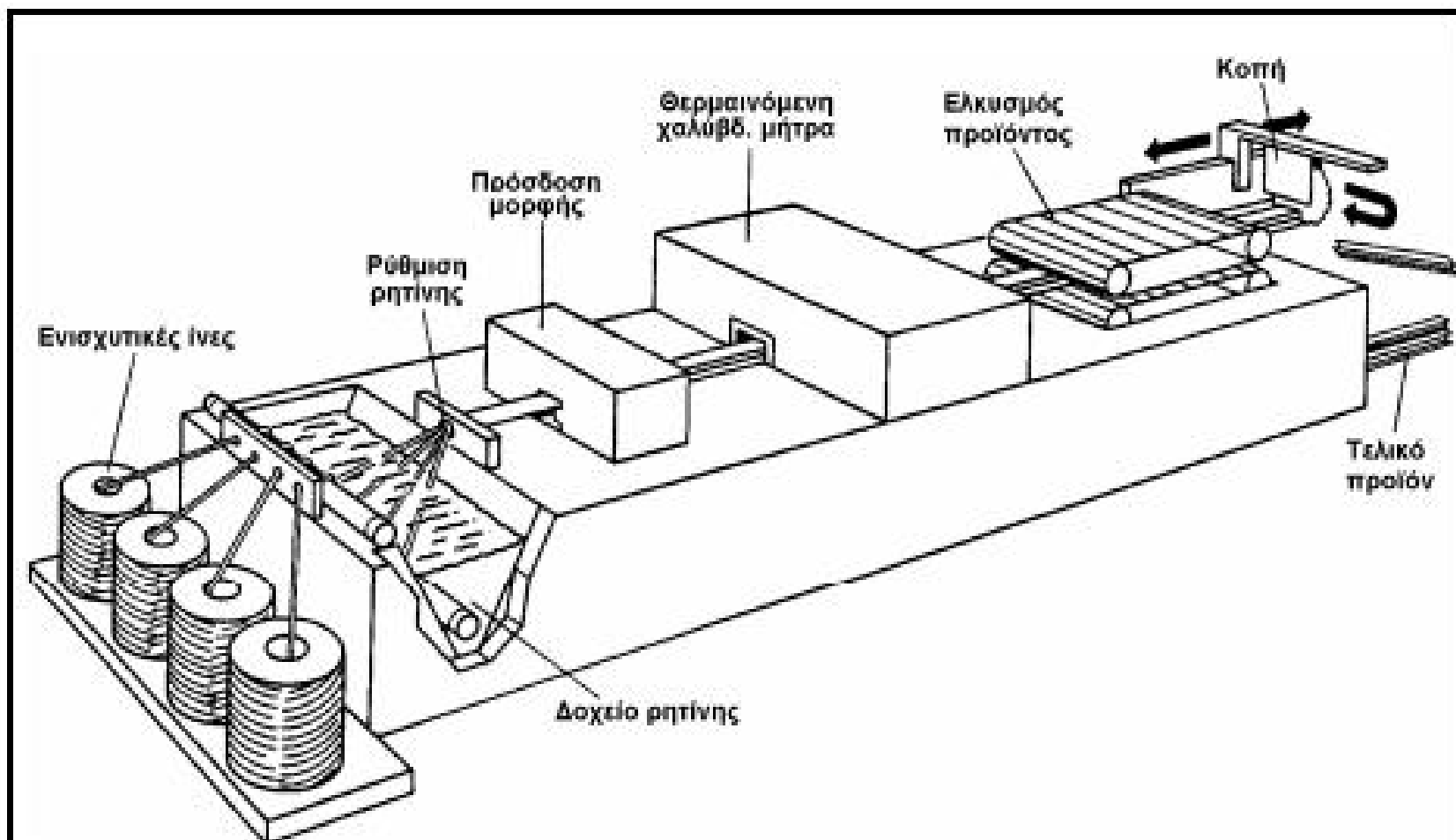
Ο ισχυρός προσανατολισμός των ινών δίνει κελύφη με υψηλή μηχανική αντοχή.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ: Κατασκευή δεξαμενών καυσίμου και χημικών, αγωγών υψηλών πιέσεων, κλπ.

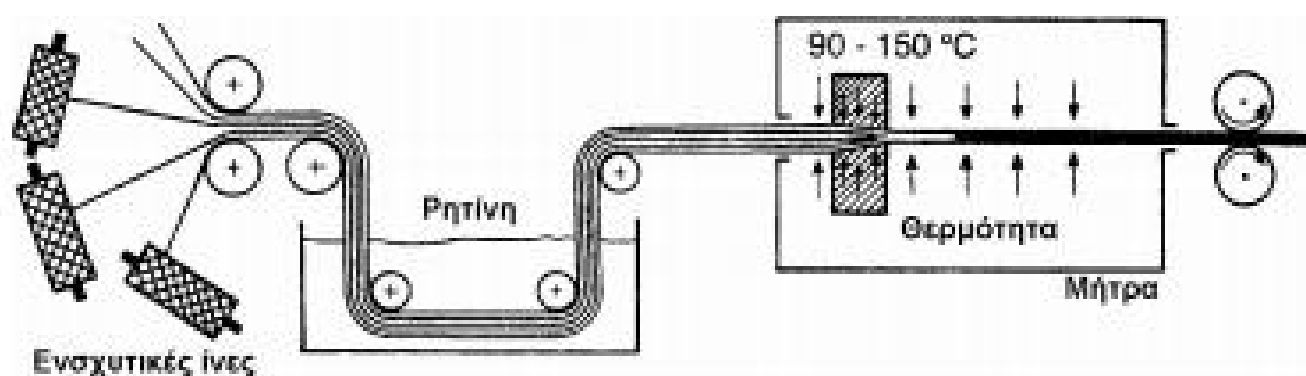
Εικόνα 18: Συνεχής μορφοποίηση συνθέτου με περιέλιξη νήματος (filament winding) (α) Διάταξη μορφοποίησης, (β) Σχηματική παράσταση διαδικασίας.



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



(α)



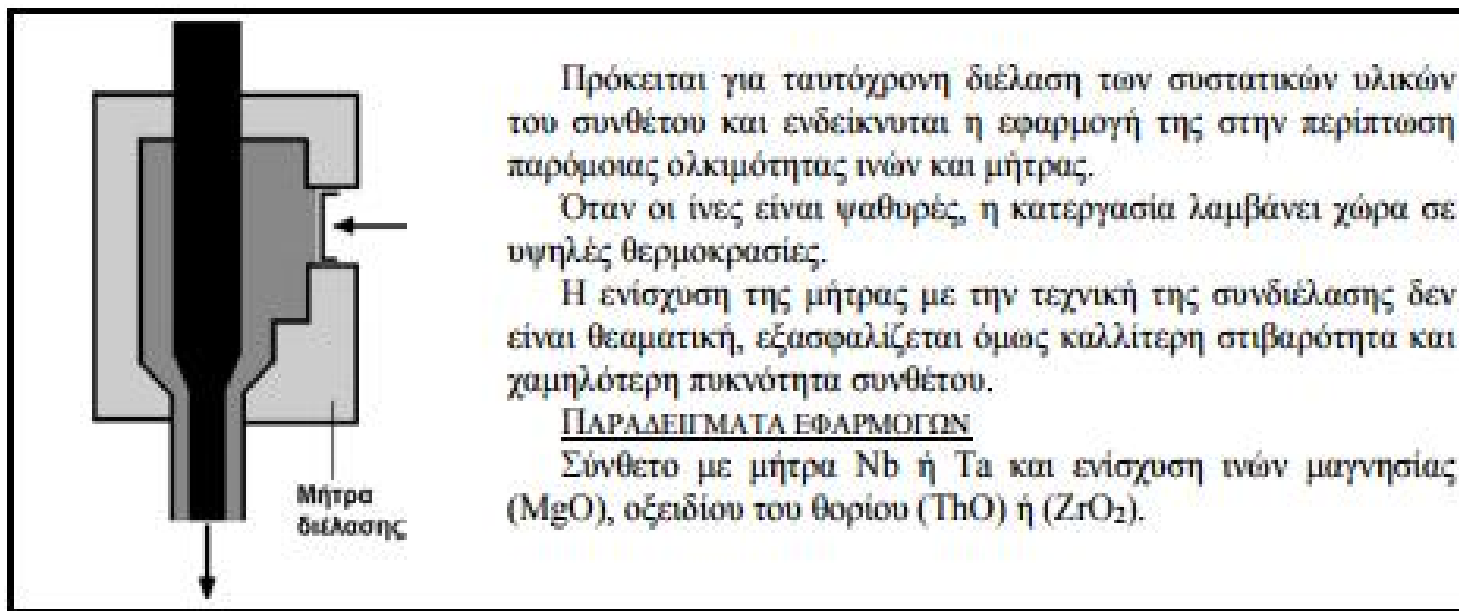
(β)

Η παρούσα τεχνική μορφοποίησης εφαρμόζεται όταν απαιτείται σταθερή διατομή προϊόντος (σωλήνες, αγωγοί, δοκοί, κλπ.).

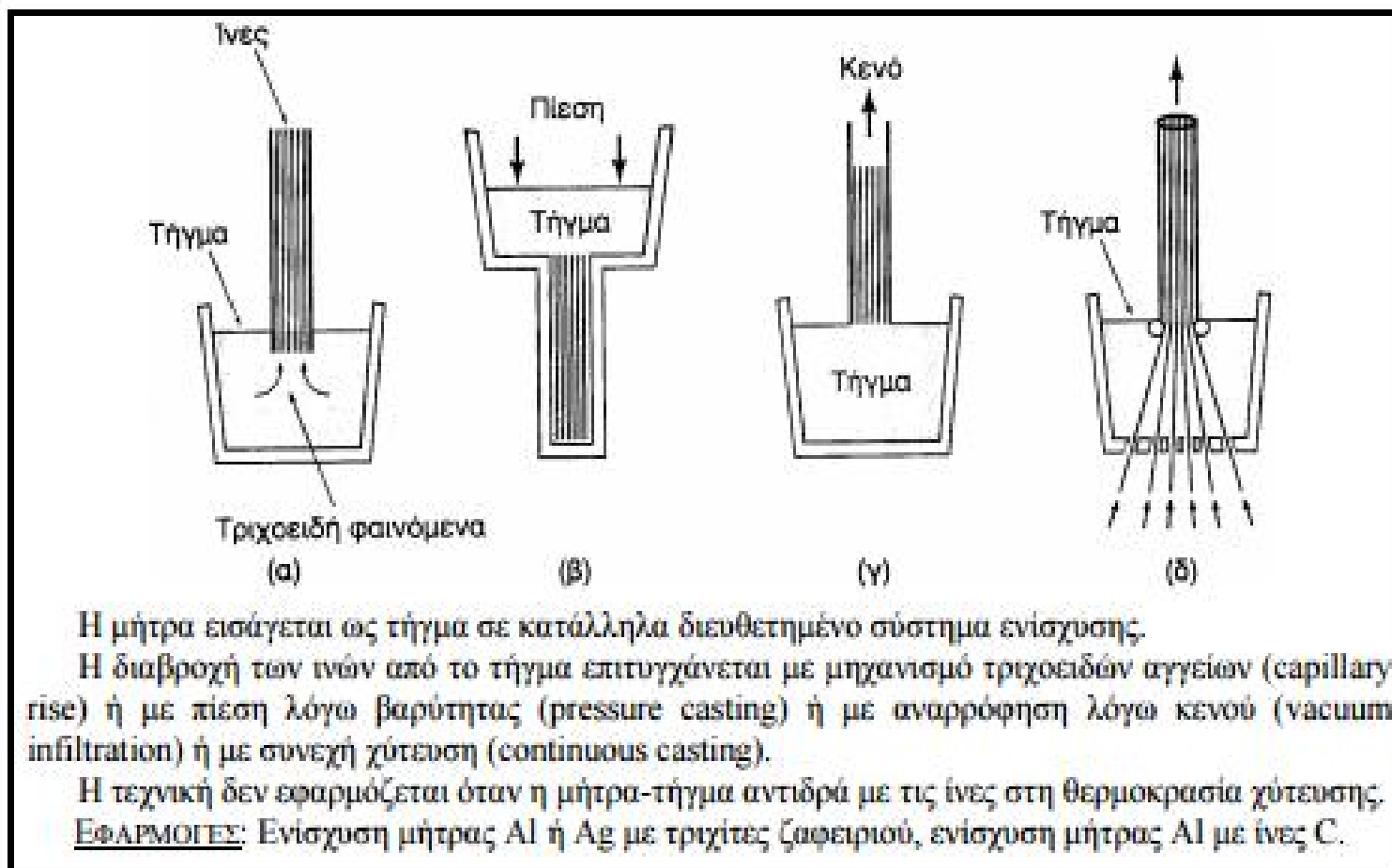
Ίνες μεγάλου μήκους, διευθετημένες παράλληλα μεταξύ τους εμβαπτίζονται κατά τρόπο συνεχή σε λουτρό ρητίνης και οδηγούνται σε θερμαινόμενη χαλύβδινη μήτρα, όπου το προϊόν λαμβάνει την τελική του διατομή.

Λόγω της υψηλής συγκέντρωσης ινών και του ισχυρού προσανατολισμού τους παράλληλα προς τον επιμήκη άξονα του προϊόντος, παρατηρείται υψηλή μηχανική αντοχή κατά τη διεύθυνση αυτή.

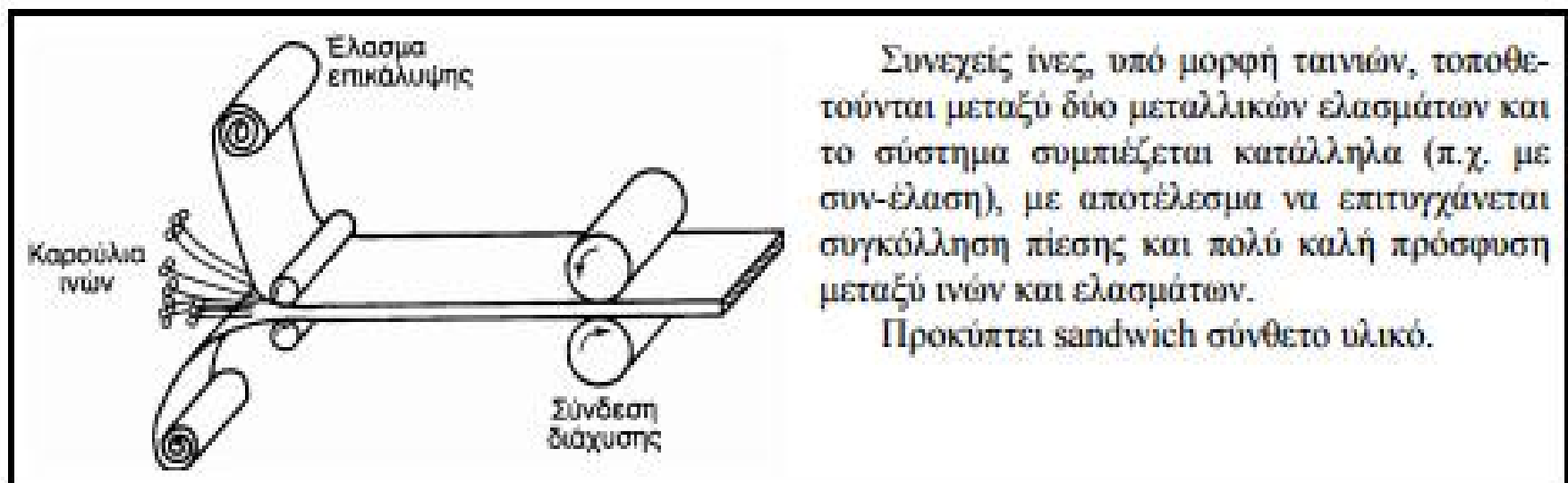
Εικόνα 20: Μορφοποίηση με εμβάπτιση (pultrusion) (α) Διάταξη μορφοποίησης, (β) Σχηματική παράσταση διαδικασίας.



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

2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Ενισχύσεις δομικών κατασκευών με σύνθετα υλικά .

2.1: Ινοπλισμένα πολυμερή – Σύνθετα υλικά (Fiber Reinforced Polymer Composites)

Τα σύνθετα υλικά τοποθετούνται στις επιφάνειες των δομικών στοιχείων και αποτελούν ένα είδος μόνιμου εξωτερικού τους οπλισμού. Η σύνδεση και η συνεργασία των διαφορετικών υλικών επιτυγχάνεται μέσω εποξειδικών ρητινών. Η χρήση τους αποτελεί σήμερα μία δημοφιλή τεχνική ενίσχυσης λόγω της ευκολίας εφαρμογής τους.

Τα ινοπλισμένα πολυμερή διακρίνονται σε :

1. Υφάσματα, ράβδους και ελάσματα ινών άνθρακα.
2. Υφάσματα ινών υάλου.
3. Υφάσματα ινών πολυαραμίδης (Kevlar)

Η επιλογή ενός εκ των ανωτέρω κατηγοριών εξαρτάται από το είδος της ενίσχυσης που θέλουμε να επιτύχουμε αλλά και από τις περιβαλλοντολογικές συνθήκες εφαρμογής.



Εικόνα 24 Εφαρμογή ανθρακούφασματος

2.2: Χρήσεις σύνθετων υλικών

- Ενίσχυση υποστυλωμάτων με επιβολή εξωτερικής περίσφιγξης και αύξηση πλαστιμότητας.

Η αύξηση της πλαστιμότητας επιτυγχάνεται μέσω της τριαξονικής θλίψης που αναπτύσσεται στο στοιχείο προς ενίσχυση με περίσφιγξη από μανδύα ινοπλισμένου πολυμερούς. Ως αποτέλεσμα έχουμε και αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος.

- Αύξηση αντοχής σε τέμνουσα

Σε αντιστοιχία με το συμβατικό οπλισμό διάτμησης, τοποθετούνται επικολλητά φύλλα ινοπλισμένων πολυμερών

² Σιδέρης Κων/νος, Ενισχύσεις Κατασκευών, Ινοπλισμένα Πολυμερή (www.sideris-konstantinos.blogspot.gr)

στο στοιχείο προς ενίσχυση τα οποία μπορούν να παραλάβουν τέμνουσα δύναμη. Η μορφή των σύνθετων υλικών μπορεί να έχουν μορφή είτε ολόσωμου μανδύα είτε μορφή μανδύων περιορισμένου ύψους (κολάρα).

- Αύξηση αντοχής σε κάμψη

Για την ενίσχυση κυρίως πλακών και δοκών οπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη, χρησιμοποιούμε επικολλητά φύλλα από ινοπλισμένα πολυμερή. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί κατά τη κατασκευή στην αγκύρωση του σύνθετου υλικού και στην ευθυγράμμιση των ινών του.

- Ενίσχυση σε κρούση.

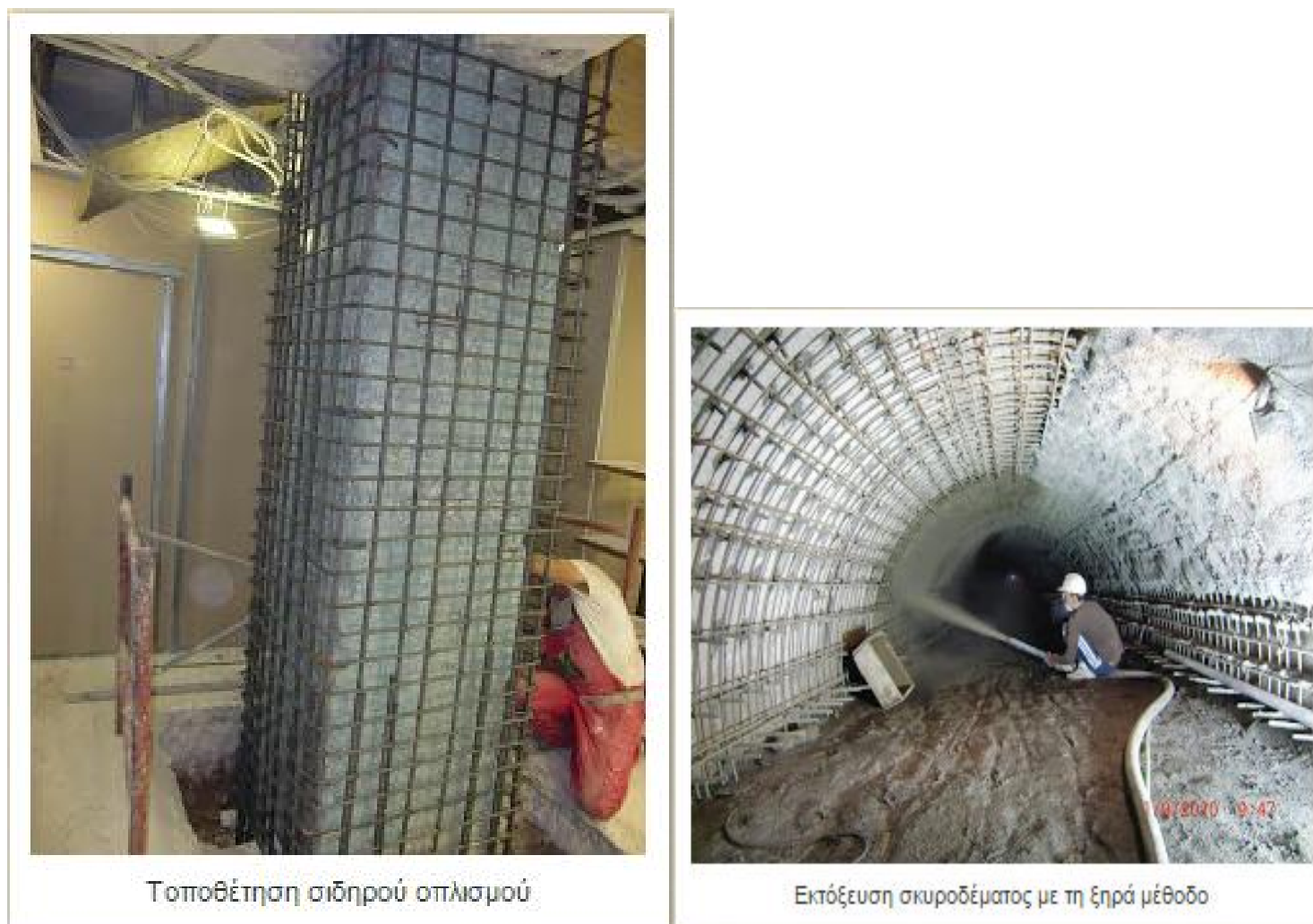
Στην επίδραση της κρούσης, καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζει το σύνθετο υλικό με ίνες πολυαραμίδης και εφαρμόζονται σε υποστυλώματα και βάθρα γεφυρών.

2.3: Guniting - Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (sprayed concrete ή shotcrete ή guniting) που χρησιμοποιείται σε έργα ενισχύσεων είναι σκυρόδεμα λεπτής διαβάθμισης αδρανών το οποίο σκυροδετείται με εκτόξευση. Η εφαρμογή του απαιτεί ειδικό εξοπλισμό και κατάλληλα εκπαιδευμένο προσωπικό. Στα παρακάτω τέσσερα χαρακτηριστικά οφείλεται η διαδεδομένη χρήση του σε έργα επεμβάσεων:

1. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έχει υψηλή θλιπτική αντοχή επειδή ο συντελεστής N/T είναι χαμηλός και εξαιτίας της μεγάλης ταχύτητας εκτόξευσης η οποία επιφέρει ιδιαίτερα υψηλή συμύκνωση.
2. Η πρόσφυση με το υφιστάμενο στοιχείο είναι ιδιαίτερα υψηλή λόγω της μεγάλης ταχύτητας εκτόξευσης.
3. Δεν απαιτούνται ξυλότυποι για τη στήριξη του, καθώς το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αυτοστηρίζεται.
4. Η σκυροδέτηση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε δυσπρόσιτες θέσεις αφού η εγκατάσταση είναι κινητή.

Οι συνήθεις μέθοδοι παραγωγής είναι η ξηρά και η υγρή μέθοδος. Σε επεμβάσεις ενισχύσεων εφαρμόζεται κυρίως η ξηρά μέθοδος εφόσον αυτή πλεονεκτεί έναντι της υγρής σε κλειστούς χώρους.



Εικόνα 25 (α) Τοποθέτηση σιδήρου οπλισμού και (β) Εκτόξευση σκυροδέματος με την ξηρά μέθοδο

2.4: Επικόλληση μεταλλικών ελασμάτων και νέα μεταλλικά στοιχεία

Η προσθήκη νέων μεταλλικών μελών αποτελεί οικονομική και ιδιαίτερα αποδοτική μέθοδο ενίσχυσης δοκών και πλακών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Το προφανές πλεονέκτημα είναι η μείωση των ανοιγμάτων, η δημιουργία νέων σύμμικτων διατομών μεγαλύτερης αντοχής από τις υφιστάμενες και η επιλογή ενεργητικής ή παθητικής προσέγγισης της ενίσχυσης.



Προσθήκη συνδέσμων δυσκαμψίας σε πλαίσιο

2.5: Μεταλλικά ελάσματα

Σε περιπτώσεις ενίσχυσης σε κάμψη ή διάτμηση δοκών από οπλισμένο σκυρόδεμα τοποθετούνται στο κάτω πέλμα ή στις παρειές της δοκού αντίστοιχα επικολητά ελάσματα χάλυβα πάχους από 1mm έως 5mm. Τα ελάσματα αυτά συνεργάζονται με την υφιστάμενη δοκό μέσω βλήτρων, κοχλιών, χημικών αγκυρίων, εποξειδικής ρητίνης ή συνδυασμό αυτών δημιουργώντας μία νέα ισχυρότερη και πιο άκαμπτη σύμμεικτη διατομή.

Σε υποστυλώματα αντίστοιχα, με τη μέθοδο των επικολητών ελασμάτων μπορούμε να πετύχουμε αύξηση αντοχής σε κάμψη και τέμνουσα, αντίσταση σε κάμψη και ενίσχυση με περίσφιγξη ενεργητική ή παθητική. Διαφορετικές μέθοδοι ενίσχυσης υποστυλωμάτων είναι η επικόλληση ολόκληρων φύλλων χάλυβα και η μέθοδος του μεταλλικού κλωβού.



Καμπτική ενίσχυση πλάκας με μεταλλικά ελάσματα

2.6: Ρητινενέσεις

Η χρήση των εποξειδικών ρητινών είναι ιδιαίτερα αυξημένη στις επεμβάσεις κυρίως για την αποκατάσταση ρωγμών αλλά και για άλλες εφαρμογές. Η τεχνική της ρητινένεσης απαντάται κυρίως στον φέροντα οργανισμό κατασκευών από σκυρόδεμα και στις τοιχοποιίες. Στοχεύει στην επανάκτηση της αρχικής φέρουσας ικανότητας ρηγματωμένων φορέων καθώς και της ακαμψίας τους. Συνιστάται για την προστασία κατά της διάβρωσης του οπλισμού, τη δημιουργία ανθεκτικής σύνδεσης τμημάτων σκυροδέματος και για τη στεγανοποίηση.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της τεχνικής εισπίεσης εποξειδικών ρητινών είναι:

- Ως υλικό οι εποξειδικές ρητίνες έχουν αντοχή 5~10 φορές μεγαλύτερη από το σκυρόδεμα σε θλίψη και 2~6 φορές σε εφελκυσμό.
- Η πρόσφυση με το σκυρόδεμα και το χάλυβα είναι υψηλή.
- Παρουσιάζουν μικρή συστολή ξήρανσης και μικρό βαθμό ερπυσμού.
- Έχουν μεγάλη συγκολλητική ικανότητα.
- Είναι υλικό με χαμηλό ιξώδες, γεγονός που επιτρέπει την εισχώρηση σε όλο το βάθος της ρωγμής.
- Μικρή έως καθόλου μείωση της συνάφειας με τη πάροδο του χρόνου και εξαιρετική ανθεκτικότητα σε περιβαλλοντικές προσβολές.
- Δεν παρουσιάζουν γήρανση.
- Δεν επηρεάζουν τις διαστάσεις των στοιχείων προς εφαρμογή.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι για τη κατάλληλη επιλογή εποξειδικής ρητίνης θα πρέπει να εκτιμηθούν οι ιδιότητές της ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία προορίζεται όπως το ιξώδες, το μέτρο ελαστικότητας και ο χρόνος πήξης.



Εισπίεση εποξειδικής ρητίνης

2.7: Αποκατάσταση διατομής και μηχανικών χαρακτηριστικών μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα

Η διαδικασία επισκευής ενός στοιχείου έχει ως στόχο την αποκατάσταση των αρχικών του μηχανικών χαρακτηριστικών που είχε πριν υποστεί τις βλάβες. Οι εργασίες που πραγματοποιούνται πραγματοποιούν πλήρη αποκατάσταση της διατομής του στοιχείου αλλά και επαναφορά της ακαμψίας του.

Η επιλογή της μεθόδου επισκευής εξαρτάται από το βαθμό της βλάβης που έχει υποστεί το δομικό στοιχείο. Σε περίπτωση ελαφρών βλαβών η επισκευή γίνεται με συγκόλληση των ρωγμών εισπίζοντας εποξειδική ρητίνη κατάλληλων-συμβατών ηλεκτροχημικών και μηχανικών χαρακτηριστικών με το υφιστάμενο μέλος. Εάν επιπλέον της ρηγμάτωσης παρατηρείται επιφανειακή αποσάθρωση ή και αποφλοίωση του σκυροδέματος χωρίς όμως την αποδιοργάνωση του πυρήνα του μέλους, η βλάβη αποκαθίσταται με χρήση επισκευαστικού κονιάματος και χρήση αναστολέας διάβρωσης. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να ελεγχθεί η κατάσταση του οπλισμού του στοιχείου και να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα αναστολής του φαινομένου της διάβρωσης. Σε όλες τις περιπτώσεις αποκατάστασης πρέπει να τηρείται το EN 1504, Ευρωπαϊκή οδηγία.



Αποκατάσταση διατομής δοκού

2.8: Τσιμεντενέσεις

Οι τσιμεντενέσεις χρησιμεύουν για την πλήρωση ρωγμών σε κτήρια από φέρουσα τοιχοποιία και λιθοδομή ή για τη βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών και τη στεγανοποίηση ενός εδαφικού ή βραχώδους σχηματισμού.

Για την σφράγιση των ρωγμών χρησιμοποιείται ισχυρή τσιμεντοκονία και στη συνέχεια εισπίζεται το τσιμεντένεμα μέσα από τεμάχια πλαστικού σωλήνα που προσαρμόζονται σε οπές που έχουν ανοιχτεί από πριν σε περίπτωση τοιχοποιίας ή μέσω χαλύβδινων ακροφυσίων (packers) για τη περίπτωση βελτίωσης των εδαφικών σχηματισμών.

Η αναλογία της σύνθεσης του μίγματος ξεκινάει από αναλογία 1:1 κατά βάρος νερού και τσιμέντου. Κατά περίπτωση και ανάλογα τις συνθήκες και τη στατική μελέτη προστίθενται πρόσμικτα όπως θηραϊκή γη, διάλυμα άσβεστου, επιβραδυντικό ή επιταχυντικό πήξεως, αντισυρρικνωτικό, κλπ. Η μέθοδος των τσιμεντενέσεων μπορεί να εφαρμοστεί για τις παρακάτω κατηγορίες έργων:

- Στεγανοποίηση θεμελίωσης φραγμάτων.
- Σταθεροποίηση και στεγανοποίηση πυθμένα και πρανών βαθιών εκσκαφών.

- Σταθεροποίηση σπράγγων και θεμελιώσεων κτηρίων.
- Τσιμεντενέσεις ομογενοποίησης μάζας τοιχοποιίας.
- Τσιμεντενέσεις πλήρωσης ρωγμών.
- Τσιμεντενέσεις στεγανοποίησης κι ενίσχυσης εδαφών.
- Τσιμεντενέσεις πάκτωσης αγκυρίων.



Τσιμεντενέσεις ομογενοποίησης λιθοδομής

2.9: Βλήτρα - Ριζοπλισμοί – Αγκύρια

2.9.1: Ριζοπλισμοί

Η αρχή της χρήσης μεταλλικών στοιχείων σε κατασκευές από φέροντα οργανισμό από φυσικά λιθοσώματα έγινε από τους αρχαίους Έλληνες, οι οποίοι χρησιμοποιούσαν μεταλλικούς συνδέσμους για να ενώσουν τα λιθοσώματα μεταξύ τους τόσο σε οριζόντια όσο και κατακόρυφη διεύθυνση. Όμως αυτή η τεχνική αφορούσε την φάση της κατασκευής του κτίσματος.

Επινοητής της μεθόδου εισαγωγής κοντών χαλύβδινων ράβδου με σκοπό την ενίσχυση και επισκευή υφιστάμενων κατασκευών από φέρουσα τοιχοποιία υπήρξε ο Ιταλός F.Lizzi περί το 1950. Η τεχνική αυτή εφαρμόσθηκε για να «δέσει» δυνατά με αδύναμα σημεία της τοιχοποιίας και να αυξήσει την θλιπτική, εφελκυστική και διατμητική αντοχή της τοιχοποιίας. Εν ολίγοις, τοποθετώντας χαλύβδινες ράβδους στο εσωτερικό της τοιχοποιίας της προσδίδουμε καλύτερες ιδιότητες με τα οφέλη που συνοδεύουν τον χάλυβα.

Η μέθοδος της ενίσχυσης με ριζοπλισμούς βρίσκει εφαρμογή σε πληθώρα κατασκευών από φέρουσα τοιχοποιία.

Οι συχνότερες περιπτώσεις είναι οι εξής:

- ενίσχυση πεσσών σε γέφυρες που έχουν ρηγματωθεί λόγω διαφορικών καθιζήσεων.
- ενίσχυση πεσσών σε παλαιές γέφυρες επειδή έχουν αυξηθεί τα κινητά φορτία για τα οποία έχουν μελετηθεί και κατασκευασθεί.
- σταθεροποίηση αψίδων, που έχουν υποστεί παραμορφώσεις.
- ενίσχυση υπογείων στοών, όπου το έδαφος έχει υποστεί καθίζηση ή μετακίνηση.
- ενίσχυση ασθενούς τοιχοποιίας σε περιοχές που εφαρμόζονται πλάκες αγκύρωσης τενόντων (προεντεταμένη τοιχοποιία ή ενίσχυση με ελκυστήρες).
- σύνδεση τμημάτων κατασκευών όπως αψίδες με τα ανώτερα τμήματα του τοίχου.
- ενδυνάμωση του σώματος του φέροντα οργανισμού και σύνδεση των σαθρών με τα δυνατά τμήματα της

τοιχοποιίας.

- δημιουργία υψίκορμων δοκών.

Η μέθοδος έγκειται στην κατασκευή ενός δικτύου οπών στο σώμα της τοιχοποιίας στις οποίες τοποθετούνται ράβδοι οπλισμού. Στη συνέχεια γίνεται η πλήρωση των οπών αυτών με ένεμα. Η μέθοδος ενδείκνυται στις περιπτώσεις παλαιών λιθοδομών μεγάλου πάχους για επεμβάσεις τοπικού ή καθολικού χαρακτήρα. Το αποτέλεσμα είναι η αύξηση της θλιπτικής και διατμητικής αντοχής της τοιχοποιίας ανάλογα με την πυκνότητα τοποθέτησης και τη διάμετρο των ριζοπλισμών. Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι η αλλοίωση της δομής της τοιχοποιίας κατά τρόπο μη αναστρέψιμο, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις εφαρμογής σε μνημεία.



2.9.2: Βλήτρα και αγκύρια

Ως βλήτρα χαρακτηρίζονται οι μεταλλικοί σύνδεσμοι, όταν αυτοί καταπονούνται με διατμητικό φορτίο, ενώ ως αγκύρια όταν η εξωτερική φόρτιση είναι αξονική. Προφανώς όταν ένας μεταλλικός σύνδεσμος καταπονείται αξονικά και διατμητικά τότε δρα ως αγκύριο και βλήτρο ταυτόχρονα.

2.9.3: Είδη βλήτρων και αγκυρίων

α) Κατακόρυφα βλήτρα προς τα κάτω:

Κυρίως σε πέδιλα ή συγκόλληση αναμονής υποστυλώματος χρησιμοποιείται λεπτόρρευστη ρητίνη χαμηλού ιξώδους για την πλήρωση του κενού. Σε πέδιλα κυρίως παλαιών οικοδομών μπορεί να υπάρχει λόγω κακής συμπύκνωσης διαρροή στα κενά. Επαναλαμβάνεται η εργασία με μεγαλύτερο ιξώδες αν χρειαστεί, μέχρι να γεμίσει πλήρως η οπή.

β) Οριζόντια βλήτρα:

Κυρίως σε υποστυλώματα – δοκούς – τοιχεία. Εδώ χρησιμοποιείται ρητίνη με αρκετά μεγάλο ιξώδες και γεμίζεται η οπή με πιστόλι χειρός, πριν τοποθετηθεί το βλήτρο. Έπειτα, σε ορισμένες περιπτώσεις, ακολουθεί επάλειψη του τμήματος του βλήτρου που θα εισέλθει στο σκυρόδεμα και η τοποθέτησή του. Σε ειδικές περιπτώσεις μπορεί να σφραγιστεί με ρητινόστοκο και να πρεσαριστεί ενέσιμη ρητίνη με δύο στόμια κάτω και πάνω, ώστε να επιτευχθεί 100% πλήρωση του κενού βλήτρου και της οπής. Αυτή η περίπτωση αν και αποτελεί πρόταση με μεγάλο κόστος, τα αποτελέσματα είναι σίγουρα.

γ) Κατακόρυφα βλήτρα οροφής:

Συνήθως χρησιμοποιούνται σε ενίσχυση πλακών. Επειδή εκεί συνήθως γίνεται διαμπερής διάτρηση, σφραγίζουμε από κάτω με ρητινόστοκο και ρίχνουμε από το πάνω μέρος της πλάκας ρητίνη μικρού ιξώδους. Σε άλλες περιπτώσεις, που δεν μπορούμε να διαπεράσουμε από κάτω, όπως π.χ. σε δοκούς, χρησιμοποιούμε ρητίνη μεγάλου ιξώδους και εφαρμόζουμε τη μέθοδο των οριζόντιων βλήτρων. Είναι πάντα απαραίτητο να γίνεται σχολαστικός καθαρισμός των οπών με αέρα υπό πίεση και μεταλλικό βουρτσάκι ανάλογης διαμέτρου ώστε να απομακρυνθεί η σκόνη που δημιουργήθηκε κατά τη διάτρηση. Επίσης προσπάθεια πρέπει να καταβληθεί ώστε πληρωθεί όσο το δυνατόν καλύτερα το κενό οπής και βλήτρου.



Τοποθετημένα βλήτρα σε έργο ενίσχυσης οχετού



Δοκιμές εξόλκευσης βλήτρων

3Κεφάλαιο 3^ο: Ενίσχυση δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα με FRPs

3.1 Η ενίσχυση δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να πραγματοποιηθεί σε κάμψη.

Πιο συγκεκριμένα, η εφαρμογή συνθέτων υλικών για ενισχύσεις έναντι κάμψης γίνεται κυρίως σε στοιχεία τύπου δοκού ή πλάκας, μέσω ελασμάτων ή υφασμάτων τα οποία επικολλούνται στο εφελκόμενο πέλμα 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 τετραερείστων 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).

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

3.1:ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

Τα συστήματα ενίσχυσης στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος ή φέρουσας ικανότητας με σύνθετα υλικά είναι γενικά δύο τύπων: α. "υγρής εφαρμογής" (ή επί τόπου σκλήρυνση της μήτρας) και β. προκατασκευασμένα" (η σκλήρυνση τη μήτρας έχει προηγηθεί της εφαρμογής). Παρακάτω γίνεται συνοπτικά η παρουσίαση αυτών των συστημάτων.

Συστήματα υγρής εφαρμογής:

- Φύλλα (sheets) ή υφάσματα (fabrics) αποτελούμενα από συνεχείς ίνες μιας (κυρίως) διεύθυνσης, χωρίς μήτρα
- Υφάσματα (fabrics) αποτελούμενα από συνεχείς ίνες σε δύο τουλάχιστον διευθύνσεις, χωρίς μήτρα
- Φύλλα (sheets) ή υφάσματα (fabrics) αποτελούμενα από συνεχείς ίνες μίας διεύθυνσης προεμποτισμένα με ρητίνη σε μη σκληρυμένη μορφή.
- Φύλλα (sheets) ή υφάσματα (fabrics) αποτελούμενα από συνεχείς ίνες σε τουλάχιστον δύο διευθύνσεις, προεμποτισμένα με ρητίνη σε μη σκληρυμένη μορφή.
- Συνεχείς ίνες χωρίς μήτρα, συγκεντρωμένες σε μορφή νήματος, το οποίο εμποτίζεται με ρητίνη ενώ τυλίγεται στο υπό ενίσχυση δομικό μέλος.

³ Τριανταφύλλου, Α.Χ. (2003). Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος με Σύνθετα Υλικά (Ινοπλισμένα Πολυμερή), Πάτρα-1^η ΈΚΔΟΣΗ.

- Προεμποτισμένες συνεχείς ίνες, συγκεντρωμένες σε μορφή νήματος (tow), το οποίο ενώ τυλίγεται στο υπό ενίσχυση δομικό μέλος, υφίσταται ενδεχομένως και πρόσθετο σπλισμό.

Προκατασκευασμένα Υλικά :

- Προκατασκευασμένα ευθύγραμμα ελάσματα (strips), τα οποία επικολλούνται μέσω ρητίνης. Τα ελάσματα διατίθενται συνήθως σε μορφή ρολών “κουλούρες”, και παράγονται με τη μέθοδο εξελασης ή σπανιότερα της στρωμάτωσης.
- Προκατασκευασμένες ράβδοι (bars)κυκλικής ή συνήθως ορθογωνικής διατομής, οι οποίες τοποθετούνται σε επιφανειακές εγκοπές γεμισμένες με ρητίνη ή πολυμερή κονίαμα.
- Προκατασκευασμένα κελύφη (shells), μανδύες (jackets) ή γωνίες (angles), τα οποία επικολλούνται μέσω ρητίνης

Σε γενικές γραμμές τα προκατασκευασμένα ελάσματα προτιμώνται έναντι των υφασμάτων (ή φύλλων) όταν η εφαρμογή γίνεται σε επίπεδες επιφάνειες (π.χ. καμπτική ενίσχυση δοκών ή πλακών, χιαστί ή οριζόντια διάταξη για τοιχοποιίες σε εντός επιπέδου τέμνουσα) και απαιτούνται σημαντικά πάχη, ενώ σε άλλες περιπτώσεις (π.χ. μανδύες υποστρωμάτων, διατμητική ενίσχυση δοκών) η εφαρμογή υφασμάτων μέσω της υγρής μεθόδου είναι προτιμητέα.

3.2:ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Η επιλογή του τύπου, της μορφής και της μεθόδου εφαρμογής των σύνθετων υλικών εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες όπως η γεωμετρία και οι διαστάσεις των ως προς ενίσχυση στοιχείων, το είδος της εντατικής τους καταπόνησης, οι περιβαλλοντικές συνθήκες, η εμπειρία του μηχανικού και του εργατικοτεχνικού προσωπικού καθώς και ο προϋπολογισμός της επέμβασης.

3.2.1: Βασική τεχνική:

Η βασική τεχνική, η οποία είναι και η πλέον συνηθισμένη (και εφαρμόζεται ουσιαστικά κατ’ αποκλειστικότητα στη χώρα μας), περιλαμβάνει την δια χειρός επικόλληση είτε υφασμάτων (προεμποτισμένων με ρητίνη ή μη προεμποτισμένων), είτε προκατασκευασμένων στοιχείων(π.χ. ελάσματα) σε στοιχεία σπλισμένου σκυροδέματος ή τοιχοποιίας, μέσω εποξειδικών ρητινών.

3.2.2: Ειδικές τεχνικές:

Οι περισσότερες από τις παρακάτω τεχνικές δεν έχουν τύχει ακόμα ευρείας εφαρμογής στη χώρα μας, αλλά αναφέρονται παρακάτω για λόγους πληρότητας.

- Αυτοματοποιημένη περιτύλιξη
- Εφαρμογή με προένταση
- Επιταχυμένη σκλήρυνση με θέρμανση
- Προκατασκευασμένα στοιχεία
- Εφαρμογή ράβδων εγκοπής
- Μηχανική στερέωση ελασμάτων με αγκύρια
- Πλέγματα συνεχών ινών σε ανόργανη μήτρα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο:ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΛΑΜΕΣ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΩΝ.

∅ ΕΦΑΡΜΟΓΗ 1^η:

- Περίπτωση α):Θεωρώντας 5 ελάσματα συνθέτου υλικού με διαφορετικό πλάτος βρίσκω την συνολική δύναμη που θα μπορούσε να παραλάβει το καθένα ξεχωριστά αν σε περίπτωση εξαντλούσε την αντοχή του.

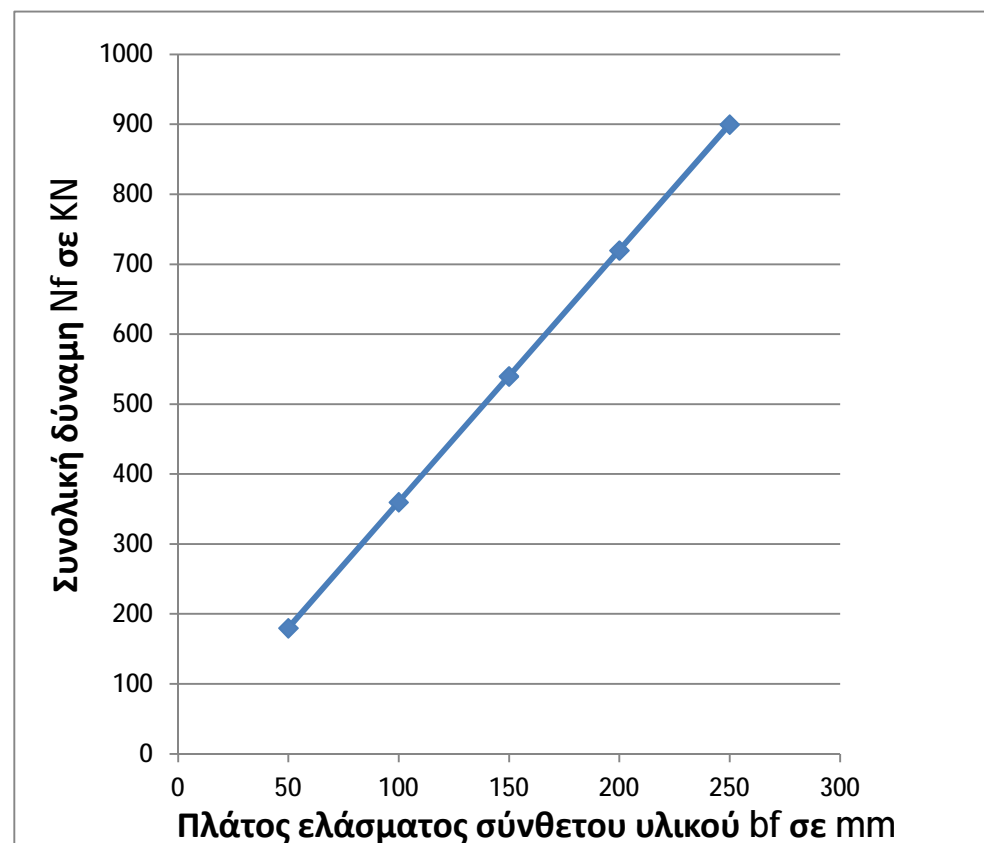
Πλάτος σύνθετου υλικού $b_f(\text{mm})$	Συνολική δύναμη $N_f(\text{KN})$
50	180
100	360
150	540
200	720
250	900

- Πλάτος σύνθετου υλικού $b_f=50\text{mm}$
- Πάχος $t_f=1,2\text{mm}$
- Μέτρο ελαστικότητας $E_f=180000\text{MPa}$
- Εφελκυστική αντοχή $f_f=3000\text{MPa}$

∅ Εξίσωση για συνολική δύναμη που μπορεί να παραλάβει το έλασμα σύνθετου υλικού :

$$N_f = \frac{f_f \cdot (b_f \cdot t_f)}{1000} \text{ σε KN}$$

∅ Απεικόνιση διαγράμματος εξίσωσης $N_f = f(b_f)$.



∇ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ:

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα παρατηρώ ότι όσο αυξάνεται το πλάτος του ελάσματος σύνθετου υλικού τόσο αυξάνεται και η συνολική δύναμη που θα μπορούσε να παραλάβει αν το έλασμα εξαντλούσε την αντοχή του δηλαδή αρκετά μεγαλύτερη από την δύναμη που προκαλεί αποκόλληση $N_{fa,max}(\text{KN})$.

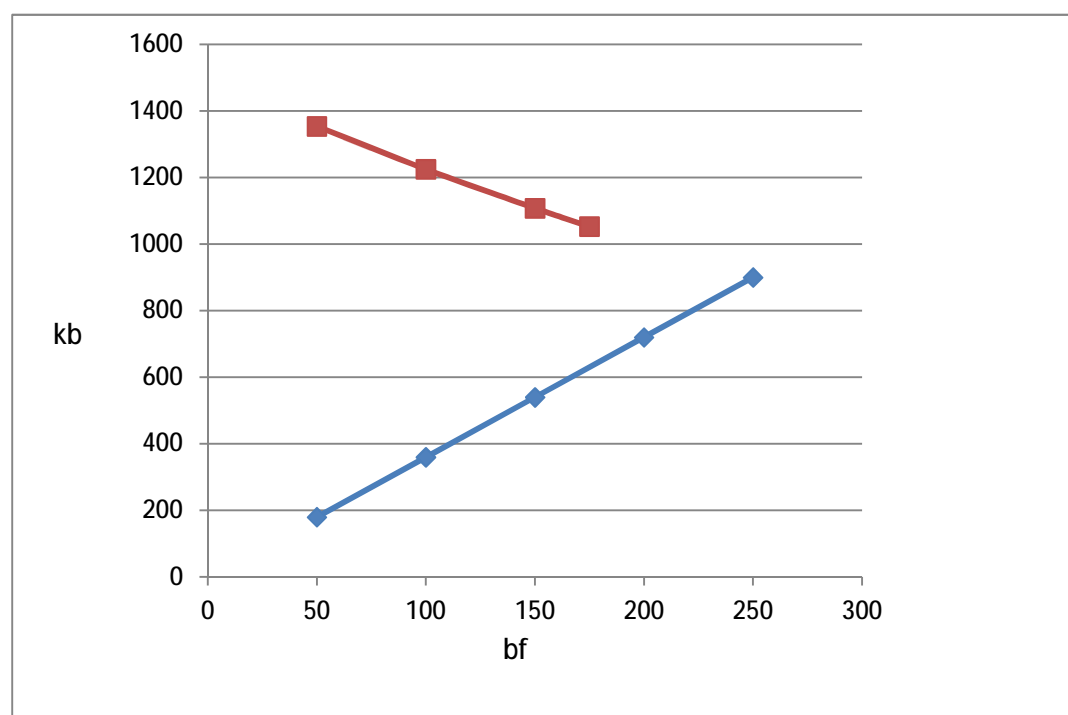
- Περίπτωση β): Θεωρώντας 5 ελάσματα συνθέτου υλικού με διαφορετικά πλάτη b_f το καθένα ξεχωριστά βρίσκω αντίστοιχα τον συντελεστή μεγέθους k_b .

Πλάτος σύνθετου υλικού $b_f(\text{mm})$	k_b
50	1.354
100	1.225
150	1.108
175	1.053

∅ Έυρεση του συντελεστή μεγέθους από τον τύπο:

$$k_b = \sqrt{\frac{1.125 * \left(2 - \frac{50}{100}\right)}{1 + \frac{50}{400}}} = 1.22 > 1$$

∅ Διάγραμμα απεικόνισης του πλάτους σύνθετου υλικού b_f συναρτήσεως του συντελεστή μεγέθους k_b .



- Περίπτωση γ): Θεωρώντας 5 ελάσματα συνθέτου υλικού διαφορετικού πάχους t_f , ίδιο μέτρο ελαστικότητας E_f και μέση εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος f_{ctm} ίδια.

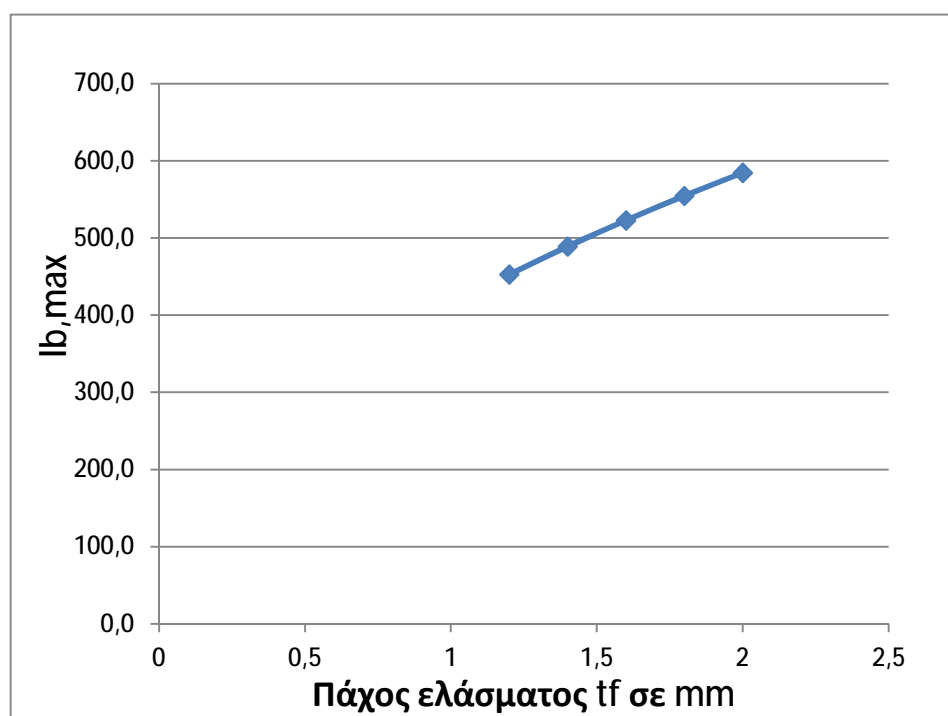
Πάχος ελάσματος $t_f(\text{mm})$	$l_{b,max}(\text{mm})$
1,2	453,0
1,4	489,3
1,6	523,1
1,8	554,8
2	584,8

- Μέτρο ελαστικότητας $E_f=180000\text{MPa}$
- $c_2=2.0$
- Μέση εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος $f_{ctm}=1,9\text{MPa}$

- Ø Εύρεση του απαιτούμενου μήκους επικόλλησης ώστε να μεγιστοποιηθεί η δύναμη που μπορεί να το έλασμα πριν αποκολληθεί ($N_{fa,max}$).

$$l_{b,max} = \sqrt{E_f * t_f / c_2 * f_{ctm}} \text{ σε mm}$$

- Ø Διάγραμμα απεικόνισης του πάχους ελάσματος t_f συναρτήσει του απαιτούμενου μήκους επικόλλησης $l_{b,max}$.



✓ ⁴Εικόνες και περιγραφή τεχνικής με λάμες ανθρακονημάτων.

- Βασική τεχνική

Η πλέον διαδεδομένη τεχνική περιλαμβάνει τη δια χειρός επικόλληση είτε υφασμάτων είτε προκατασκευασμένων στοιχείων σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος μέσω εποξειδικών ρητινών .

Μια τυπική διαδικασία εφαρμογής της τεχνικής (ΟΑΣΠ 2001) είναι η εξής:

- Απομακρύνεται η επιδερμική στρώση σκυροδέματος στην επιφάνεια που θα γίνει η επικόλληση έτσι ώστε να αποκαλυφθούν τα αδρανή σε βάθος περίπου 5mm χρησιμοποιώντας ειδικό μηχανικό εξοπλισμό ή υδροβολή.
- Εφόσον το σύνθετο υλικό καλύπτει και γωνίες του στοιχείου σκυροδέματος, αυτές εξομαλύνονται και λειαίνονται για να αποκτήσουν καμπυλότητα με ακτίνα 30mm.
- Η επιφάνεια σκυροδέματος καθαρίζεται καλά, διαβρέχεται με νερό υπό πίεση και μετά στεγνώνεται. Η υγρασία της τελικής επιφάνειας του σκυροδέματος δεν επιτρέπεται να είναι περισσότερο από 4%.
- Η επιφάνεια του σκυροδέματος εμποτίζεται με αραιό διάλυμα εποξειδικής κόλλας εάν κριθεί ότι είναι ιδιαίτερα πορώδης ή υπάρχουν μικρορηγματώσεις. Στη συνέχεια η επιφάνεια επαλείφεται με παχύρρευστο συγκολλητικό υλικό που συνήθως είναι εποξειδικός στόκος. Σημειώνεται ότι συχνά επιλέγεται η διαδικασία λείανσης της επιφάνειας χωρίς να προηγηθεί η εξομαλυντική στρώση του εποξειδικού στόκου.
- Μετά την σκλήρυνση το συγκολλητικού υλικού, η επιφάνεια λειαίνεται με επιμέλεια έτσι ώστε να μην υπάρχει ανωμαλία σε ύψος μεγαλύτερο από 1mm.

⁴ "Ολοκληρωμένα συστήματα ενίσχυσης κατασκευών με σύνθετα υλικά", ISOMAT A.B.E.E., 2006

- Η επιφάνεια αναμονής επαλείφεται με εποξειδική κόλλα πάχους 1-2mm με κατάλληλο ιξώδες που διευκολύνει την τοποθέτηση του φύλλου. Η κόλλα τοποθετείται με μεγαλύτερο πάχος, που είναι της τάξης των 10mm στην κεντρική περιοχή επαφής, με αποτέλεσμα κατά την τοποθέτηση του φύλλου η κόλλα να προχωράει προς τα έξω όταν συμπιεστεί. Συχνά, τα χαρακτηριστικά της κόλλας, προδιαγράφονται από τον προμηθευτή του σύνθετου υλικού.
- Το φύλλο του σύνθετου υλικού τοποθετείται στην επιφάνεια αναμονής, εφαρμόζοντας ομοιόμορφη πίεση, με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να μην εγκλωβιστεί αέρας. Συνήθως χρησιμοποιείται ένα σκληρό ρολό.
- Μετά την πάροδο χρόνου μισής έως μιας ώρας, αφαιρείται το προστατευτικό κάλυμμα του φύλλου και οι ίνες επαλείφονται με μια δεύτερη στρώση της ίδιας κόλλας.
- Αν προβλέπεται η τοποθέτηση περισσότερων του ενός φύλλου, η διαδικασία επαναλαμβάνεται, προετοιμάζοντας με ανάλογο τρόπο την εξωτερική επιφάνεια του προηγούμενου ελάσματος.
- Στο τέλος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα «πεταχτό» τσιμεντοκονίαμα για προστασία των φύλλων του σύνθετου υλικού από υψηλές θερμοκρασίες και άλλες περιβαλλοντικές προσβολές.



1) Ανθρακονήματα .



2) Τοποθέτηση ανθρακονημάτων .



3) Ενίσχυση οροφής με λάμες ανθρακονήματος.



4) Επισκευή και ενίσχυση με ανθρακονήματα στην περιοχή ΚΤΕΛ Κηφισού Αττικής.



5) Ελάσματα ανθρακονημάτων CARBOPREE.



6) Πεπλεγμένα υφάσματα ενίσχυσης πολυμερικών ινών άνθρακα (FRPs),μονής διεύθυνσης.



7) Τα χαλύβδινα ελάσματα (χαλυβοελάσματα) που επικολλώνται στην εξωτερική επιφάνεια δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα.

✓ ΕΦΑΡΜΟΓΗ (Καθαρή κάμψη με χαλύβδινες ράβδους):

Μια πλάκα δαπέδου από σκυρόδεμα ενισχύεται με χαλύβδινες ράβδους διαμέτρου $5/8$ in. τοποθετημένες 1.5 in. πάνω από την κάτω επιφάνεια της πλάκας και σε απόσταση 6 in. από τα κέντρα τους. Το μέτρο ελαστικότητας είναι $3,6 \times 10^6$ psi για το χάλυβα. Γνωρίζοντας ότι μια καμπτική ροπή ίση με $40 \text{ kip} \cdot \text{in.}$ εφαρμόζεται σε κάθε 1 ft. πλάτους της πλάκας, προσδιορίστε :

(a) την μέγιστη τάση στο σκυρόδεμα,

(b) την τάση στο χάλυβα.

Αποτέλεσμα:

Μετασηματισμένη διατομή. Θεωρούμε ένα τμήμα της πλάκας πλάτους 12 in. ,στο οποίο υπάρχουν δύο ράβδοι διαμέτρου $5/8 \text{ in.}$ που έχουν συνολικό εμβαδόν εγκάρσιας διατομής

$$A_s = 2 \times \left[\frac{\pi}{4} \times \left(\frac{5}{8} \text{ in.} \right)^2 \right] = 0.614 \text{ in}^2$$

Επειδή το σκυρόδεμα δρα μόνο σε θλίψη, όλες οι εφελκυστικές δυνάμεις φέρονται από τις χαλύβδινες ράβδους και η μετασχηματισμένη διατομή συνίσταται από τα δύο εικονιζόμενα εμβαδά. Το ένα είναι το τμήμα του σκυροδέματος σε θλίψη (βρίσκεται πάνω από τον ουδέτερο άξονα), και το άλλο είναι το μετασχηματισμένο εμβαδόν του χάλυβα nA_s . Έχουμε :

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{29 \times 10^6 \text{ psi}}{3.6 \times 10^6 \text{ psi}} = 8.06$$

$$nA_s = 8.06 \times (0.614 \text{ in}^2) = 4.95 \text{ in}^2$$

Ουδέτερος άξονας. Ο ουδέτερος άξονας της πλάκας διέρχεται από το κέντρο βάρους της μετασχηματισμένης διατομής. Αθροίζοντας τις ροπές του μετασχηματισμένου εμβαδού ως προς τον ουδέτερο άξονα, γράφουμε

$$12 \times \left(\frac{x}{2} \right) - 4.95 \times (4 - x) = 0$$

$$x = 1.450 \text{ in.}$$

Ροπή αδρανείας. Η κεντρική ροπή αδρανείας του μετασχηματισμένου εμβαδού είναι:

$$I = \frac{1}{3} \times (12) \times (1.450^3) + 4.95 \times (2.55^2) = 44.4 \text{ in}^4$$

a. **Μέγιστη τάση στο σκυρόδεμα.** Στην κορυφή της πλάκας, έχουμε $c_1 = 1.450 \text{ in.}$ και

$$\sigma_{c=\frac{Mc_1}{I}} = \frac{(40 \text{ kip} \cdot \text{in.})(1.450 \text{ in.})}{44.4 \text{ in}^4}$$

$$\sigma_c = 1.306 \text{ ksi}$$

b. **Τάση στο Χάλυβα.** Για το χάλυβα έχουμε $c_2 = 2.55 \text{ in.}$, $n = 8.06$ και

$$\sigma_{c=n \cdot \frac{Mc_2}{I}} = 8.06 \cdot \frac{(40 \text{ kip} \cdot \text{in.})(2.55 \text{ in.})}{44.4 \text{ in}^4}$$

$$\sigma_c = 18.52 \text{ ksi}$$

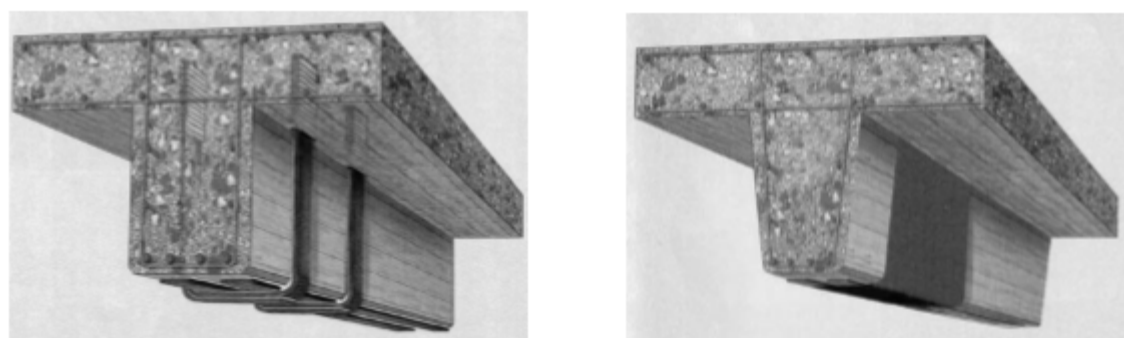
5^ο Κεφάλαιο 5^ο : Εφαρμογές ενίσχυσης κατασκευής με το πρόγραμμα FRP

Η ενίσχυση κατασκευών με FRP μπορεί να εφαρμοσθεί σε στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα, όπως δοκοί, πλακοδοκοί πλάκες, υποστυλώματα, τοιχία, κόμβοι, σε στοιχεία από φέρουσα τοιχοποιία καθώς και σε στοιχεία από ξύλο. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως τένοντες ή ως μέσο ενίσχυσης στο σκυρόδεμα, είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό με προεντεταμένο χάλυβα ή χάλυβα οπλισμού. Η εφαρμογή τους ως οπλισμός ενίσχυσης στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος ή φέρουσας τοιχοποιίας συνίσταται στην μέσω εποξειδικών ρητινών επικόλληση τους σε εξωτερικές επιφάνειες δομικών μελών με προσανατολισμό ινών τέτοιο ώστε να παραλαμβάνουν εφελκυστικές δυνάμεις.

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ

- Γενικά

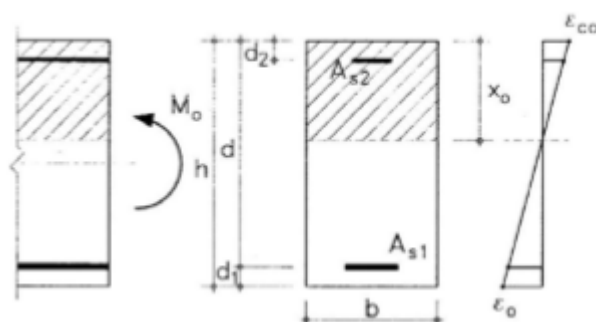
Τα προς ενίσχυση σε κάμψη στοιχεία μιας κατασκευής είναι συνήθως οι δοκοί ή οι πλάκες. Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούμε για την ενίσχυση σε κάμψη είναι ελάσματα ή υφάσματα (κυρίως ινών άνθρακα), τα οποία επικολλούμε στο εφελκυστικό πέλμα με διεύθυνση ινών τέτοια ώστε να παραλαμβάνουν τις λόγω κάμψης εφελκυστικές δυνάμεις .



ο ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΟΥ ΣΕ ΚΑΜΨΗ.

- Αρχική κατάσταση

Ο υπολογισμός των απαιτούμενων ποσοτήτων σύνθετων υλικών προϋποθέτει τη γνώση των παραμορφώσεων στα υπό ενίσχυση δομικά στοιχεία, τη στιγμή εκείνη που λαμβάνει χώρα η ενίσχυση. Στο Σχήμα φαίνεται η φάση ενίσχυσης στη κρίσιμη διατομή της δοκού, που καταπονείται σε ροπή $M_o > M_{cr}$.



Σχήμα 1.

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

Από την ισορροπία δυνάμεων στη διατομή προκύπτει το ύψος της θλιβόμενης ζώνης x_0 :

$$1/2 b x_0^2 + (\alpha_s - 1) A_{s2} (x_0 - d_2) = \alpha_s A_{s1} (d - x_0)$$

όπου: A_{s1} = εμβαδόν του εφελκόμενου χάλυβα A_{s2} = εμβαδόν θλιβόμενου χάλυβα d = στατικό ύψος d_1 = απόσταση κ.β. διατομής εφελκόμενου χάλυβα από την ακραία εφελκόμενη ίνα d_2 = απόσταση κ.β. διατομής εφελκόμενου χάλυβα από την ακραία θλιβόμενη ίνα h = ύψος διατομής b = πλάτος διατομής $\alpha_s = E_s / E_c$ = λόγος μέτρου ελαστικότητας χάλυβα προς μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος H παραμόρφωση στην ακραία θλιβόμενη ίνα σκυροδέματος ισούται με:

$$\epsilon_{c0} = M_0 x_0 / (E_c I_{02})$$

όπου: I_{02} = ροπή αδράνειας ρηγματωμένης διατομής I ροπή αδρανείας της ρηγματωμένης διατομής ισούται με:

$$I_{02} = b x_0^3 / 3 + (\alpha_s - 1) A_{s2} (x_0 - d_2)^2 + \alpha_s A_{s1} (d - x_0)^2$$

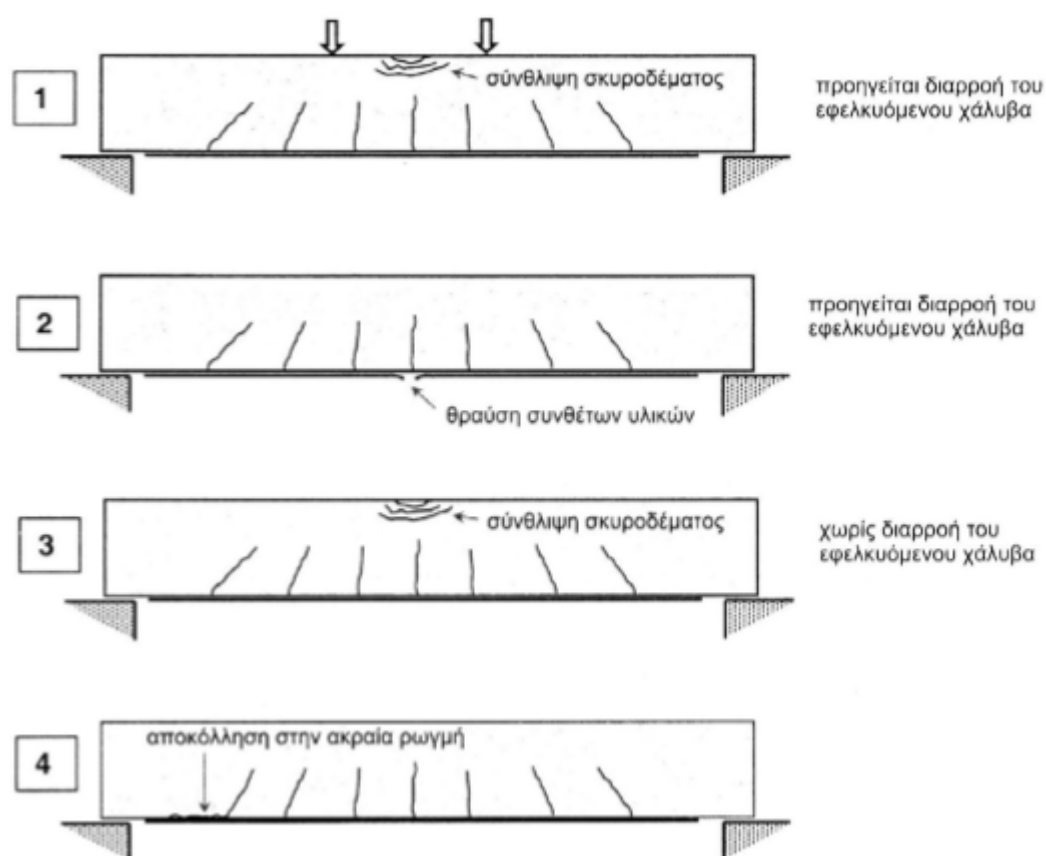
Η παραμόρφωση ϵ_0 στην ακραία εφελκόμενη ίνα υπολογίζεται από τη σχέση:

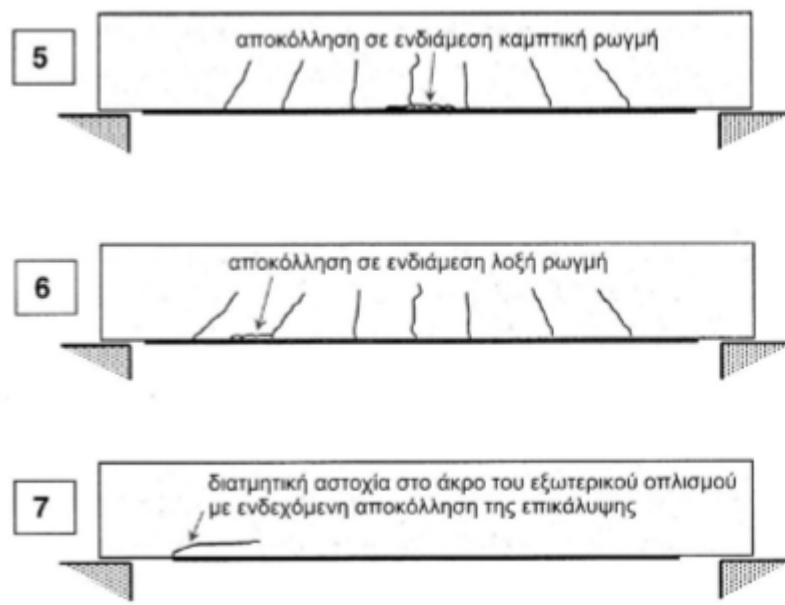
$$\epsilon_0 = \epsilon_{c0} (h - x_0) / x_0$$

Το ϵ_0 αποτελεί την αρχική παραμόρφωση στη θέση επικόλλησης του σπλισμού ενίσχυσης.

· Μορφές αστοχίας

Οι συνηθέστερες μορφές αστοχίας στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος, ενισχυμένων σε κάμψη με σύνθετα υλικά φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 2.





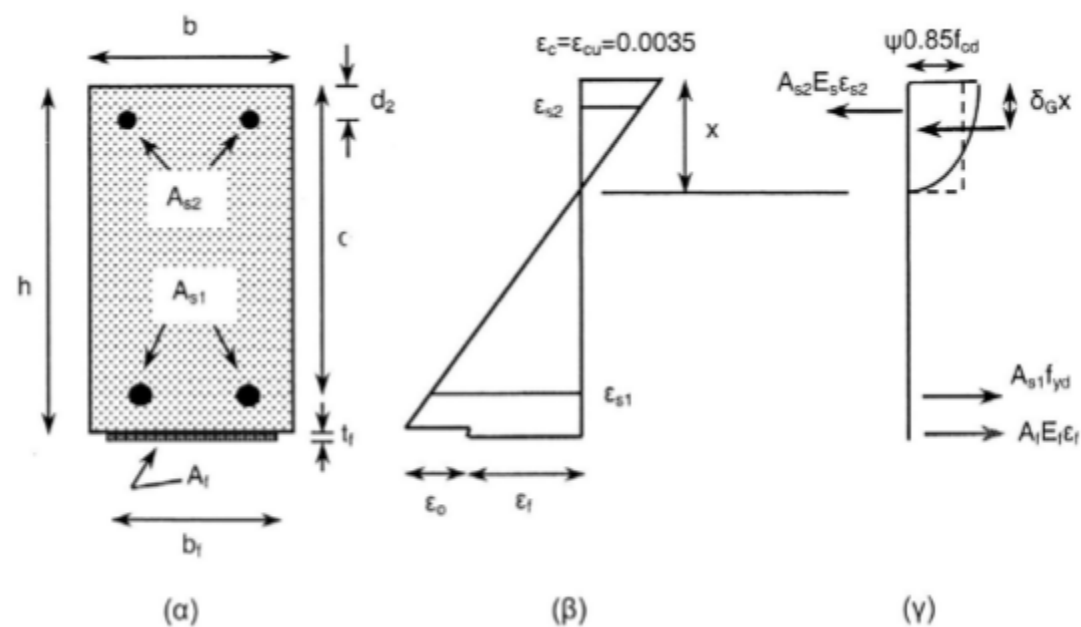
Στις παραπάνω μορφές αστοχίας, έχουμε τους μηχανισμούς πλήρους συνεργασίας σκυροδέματος – σύνθετων υλικών και τους μηχανισμούς με απώλεια πλήρους συνεργασίας.

· **Μηχανισμοί πλήρους συνεργασίας**

Διαρροή εφελκόμενου χάλυβα και σύνθλιψη σκυροδέματος .

Σε αυτή τη μορφή αστοχίας, πρώτα διαρρέει ο διαμήκης οπλισμός σε εφελκυσμό και ακολούθως συνθλίβεται το σκυρόδεμα, χωρίς να υπάρχει αστοχία ή αποκόλληση των σύνθετων υλικών.

Η ροπή αντοχής στη κρίσιμη διατομή του μέλους (Σχήμα 3. α, β, γ) γίνεται βάσει ισορροπίας των εσωτερικών δυνάμεων και του συμβιβαστού των παραμορφώσεων.



Ανάλυση διατομής στην οριακή κατάσταση αντοχής. α) γεωμετρικά χαρακτηριστικά, β) κατανομή παραμορφώσεων καθ' ύψος της διατομής, γ) κατανομή εσωτερικών δυνάμεων.

Υπολογισμός ύψους θλιβόμενης ζώνης x από ισορροπία εσωτερικών δυνάμεων:

$$0,85 \psi f_{cd} b x + A_{s2} E_s \varepsilon_{s2} = A_{s1} f_{yd} + A_f E_f \varepsilon_f$$

όπου:

- $\psi = 0,8$
- f_{cd} = θλιπτική αντοχή σκυροδέματος
- x = ύψος θλιβόμενης ζώνης
- f_{yd} = τάση διαρροής χάλυβα
- A_f = εμβαδόν διατομής σύνθετων υλικών ϵ
- ϵ_s = παραμόρφωση θλιβόμενου χάλυβα = $\epsilon_c (x - d_2) / x$
- ϵ_f = παραμορφώσεις σύνθετων υλικών = $\epsilon_c [(h - x) / x] - \epsilon_o$

Υπολογισμός ροπής αντοχής:

$$M_{Rd} = A_{s1} f_{yd} (d - \delta_G x) + A_f E_f \epsilon_f (h - \delta_G x) + A_{s2} E_s \epsilon_{s2} (\delta_G x - d_2)$$

όπου:

$$\delta_G = 0,4$$

Για να ισχύουν οι παραπάνω τύποι πρέπει:

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_c (d - x) / x \geq f_{yd} / E_s$$

$$\epsilon_f = \epsilon_c [(h - x) / x] - \epsilon_o \leq \epsilon_{f, \text{lim}}$$

όπου:

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu} = \text{οριακή παραμόρφωση σκυροδέματος (0,0035)}$$

• Διαρροή εφελκόμενου χάλυβα και θραύση σύνθετων υλικών

Αυτή η μορφή αστοχίας είναι πολύ σπάνια. Εδώ η ανάλυση της κρίσιμης διατομής, περιγράφεται από τις εξισώσεις

$$0,85 \psi f_{cd} b x + A_{s2} E_s \epsilon_{s2} = A_{s1} f_{yd} + A_f E_f \epsilon_f \quad \text{και} \quad \epsilon_f = \epsilon_c [(h - x) / x] - \epsilon_o \leq \epsilon_{f, \text{lim}} \quad \text{με τις εξής αλλαγές:}$$

- Η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση σκυροδέματος δεν είναι απαραίτητα ίση με την οριακή
- Η παραμόρφωση των σύνθετων υλικών ισούται με την οριακή ($\epsilon_f = \epsilon_{fud}$)
- Οι συντελεστές ψ και δ_G δίνονται από τις σχέσεις:

$$\S \quad \psi = 1000 \epsilon_c (0,5 - 1000 \epsilon_c / 12) \quad \text{για } \epsilon_c \leq 0,002$$

$$\S \quad \psi = 1 - 2 / 3000 \epsilon_c \quad \text{για } 0,002 \leq \epsilon_c \leq 0,0035$$

$$\S \quad \delta_G = [1000 \epsilon_c (3000 \epsilon_c - 4) + 2] / 2000 \epsilon_c (3000 \epsilon_c - 2) \quad \text{για } 0,002 \leq \epsilon_c \leq 0,0035$$

$$\S \quad \delta_G = 8 - 1000 \epsilon_c / 4(6 - 1000 \epsilon_c) \quad \text{για } \epsilon_c \leq 0,002$$

• Σύνθλιψη σκυροδέματος

Εδώ έχουμε ψαθυρή συμπεριφορά, κάτι που δεν το θέλουμε. Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου περιορίζουμε το εμβαδό των σύνθετων υλικών κάτω από μια κρίσιμη τιμή ώστε να επιτύχουμε διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα.

- Μηχανισμοί με απώλεια πλήρους συνεργασίας

• Αποκόλληση στην ακραία ρωγμή

Σε αυτή τη μορφή αστοχίας έχουμε αποκόλληση στην ακραία ρωγμή. Για να αποφύγουμε αυτό το φαινόμενο θα πρέπει να αγκυρώσουμε τα άκρα των σύνθετων υλικών.

Η αγκύρωση των σύνθετων υλικών γίνεται στη θέση με εφελκυστική δύναμη N_{fad} . Το μήκος αγκύρωσης είναι L_b . Η N_{fad} προσδιορίζεται βάσει ισορροπίας εσωτερικών εντατικών μεγεθών ως εξής:

$$M_{sd} / z = N_{fad} [1 + (A_{s1} E_s \varepsilon_{s1}) / (A_f E_f \varepsilon_f)] \approx N_{fad} [1 + (A_{s1} E_s) / (A_f E_f)]$$

Πρέπει η $N_{fad} \leq N_{fad,max}$ και επίσης να υπάρχει επαρκής διαθέσιμος χώρος για το μήκος αγκύρωσης L_b .

Αν το μήκος αγκύρωσης δεν επαρκεί θα πρέπει είτε να αυξηθεί το πλάτος και να μειωθεί το πάχος των ελασμάτων, είτε να βελτιωθεί η αγκύρωση με μηχανικό τρόπο.

• Αποκόλληση σε ενδιάμεση καμπτική ροπή

Η μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά για αποκόλληση σε περιοχές καμπτικών ροπών είναι:

για $L_b \geq L_{b,max}$:

$$\varepsilon_{bd,fl} = (\alpha_{fl} 0,5 k_c k_b / \gamma_b) \sqrt{(f_{ctm} / E_f t_f)}$$

για $L_b < L_{b,max}$:

$$\varepsilon_{bd,fl} = (\alpha_{fl} 0,5 k_c k_b / \gamma_b) \sqrt{(f_{ctm} / E_f t_f)} L_b / L_{b,max} (2 - L_b / L_{b,max})$$

όπου $\alpha_{fl} = 1,30$. Η ροπή αντοχής υπολογίζεται όπως και στις προηγούμενες μορφές με $\varepsilon_f = \varepsilon_{bd,fl}$.

• Αποκόλληση σε ενδιάμεση λοξή ρωγμή

Εδώ η μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση των σύνθετων υλικών μπορεί να είναι:

• για $L_b \geq L_{b,max}$:

$$\varepsilon_{bd,fl-sh} = \alpha_{fl-sh} 0,5 k_c k_b / \gamma_b \sqrt{(f_{ctm} / E_f t_f)}$$

• για $L_b < L_{b,max}$:

$$\varepsilon_{bd,fl-sh} = (\alpha_{fl-sh} 0,5 k_c k_b / \gamma_b) \sqrt{(f_{ctm} / E_f t_f)} L_b / L_{b,max} (2 - L_b / L_{b,max})$$

όπου:

$$\alpha_{fl-sh} = 1,25$$

Η ροπή αντοχής υπολογίζεται όπως και στις προηγούμενες μορφές με $\varepsilon_f = \varepsilon_{bd,fl-sh}$.

• Διατμητική αστοχία στο άκρο – Αποκόλληση της επικάλυψης

Είναι η πιο συνηθισμένη μορφή αστοχίας και οφείλεται στην ανάπτυξη σημαντικών οριζόντιων διατμητικών αλλά και κάθετων στον άξονα του σπλισμού ενίσχυσης εφελκυστικών τάσεων.

Η μέθοδος αντιμετώπισης του φαινομένου αυτού περιλαμβάνει τους παρακάτω ελέγχους:

$$\dot{\bar{u}} V_{sd,end} \leq 1,4 V_{cd}$$

$$\dot{\bar{u}} M_{sd,end} \leq 2/3 MR_d$$

όπου:

$V_{sd, end}$ = δρώσα τέμνουσα στη διατομή που τερματίζουν τα σύνθετα υλικά.

$M_{sd, end}$ = δρώσα ροπή στη διατομή που τερματίζουν τα σύνθετα υλικά.

V_{cd} = διατμητική αντοχή του μέλους MRd = ροπή αντοχής του μέλους.

· Πλαστιμότητα

Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ενεργοποίηση μηχανισμού αστοχίας όπου η διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα θα προηγείται οποιασδήποτε άλλης αστοχίας, ώστε να εξασφαλίζεται μία ελάχιστη τιμή πλαστιμότητας καμπυλοτήτων. Αυτό σημαίνει ότι η εφελκυστική παραμόρφωση των σύνθετων υλικών στην κρίσιμη διατομή κατά την οριακή κατάσταση αντοχής, $\epsilon_{fu,c}$, θα πρέπει να είναι $\epsilon_{fu,c} > \epsilon_{f, min}$, και να έχει ως άνω όριο είτε την παραμόρφωση θραύσης $\epsilon_{fu,d}$, είτε την παραμόρφωση αποκόλλησης.

Η $\epsilon_{f, min}$ για δεδομένη πλαστιμότητα καμπυλοτήτων $\mu\Phi$, δίνεται από την εξίσωση:

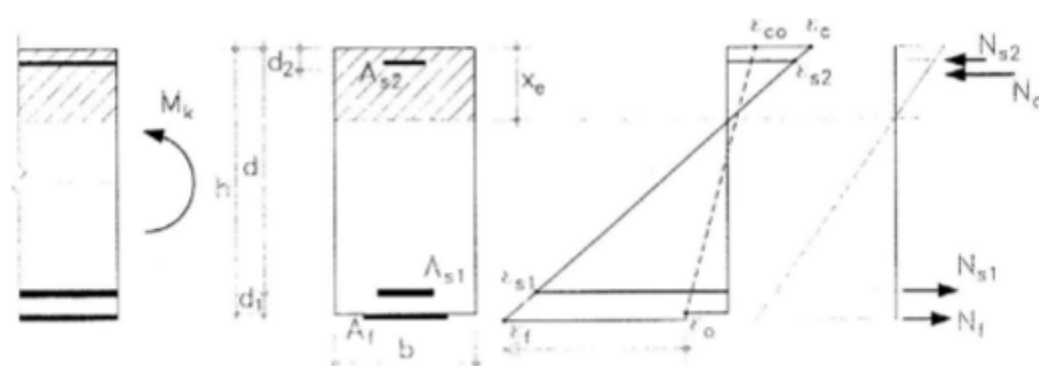
$$\epsilon_{f, min} = \{ \epsilon_{yd} \mu\Phi \frac{h}{[(d/h) - (x_y/h)] d} \} - \epsilon_{cu} - \epsilon_o$$

όπου:

x_y = ύψος θλιβόμενης ζώνης κατά την έναρξη διαρροής του χάλυβα.

· Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας

Στη γραμμικά ελαστική συμπεριφορά των υλικών στηρίζονται οι έλεγχοι για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.



Σχήμα 4.

Το ύψος της θλιβόμενης ζώνης x_e της ρηγματωμένης διατομής υπολογίζεται με βάσει τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\frac{1}{2} b x_e^2 + (\alpha_s - 1) A_{s2} (x_e - d_2) = \alpha_s A_{s1} (d - x_e) + \alpha_f A_f \left[h - \left(1 + \frac{\epsilon_o}{\epsilon_c} \right) x_e \right]$$

$$\epsilon_c \epsilon_c = \frac{M_k}{\frac{1}{2} b x_e \left(h - \frac{x_e}{3} \right) + (\alpha_s - 1) A_{s2} \frac{(x_e - d_2)}{x_e} (h - d_2) - \alpha_s A_{s1} \frac{d - x_e}{x_e} (h - d)}$$

όπου:

$$\alpha_f = E_f / E_c .$$

ü M_k = χαρακτηριστική ροπή κάμψης στη διατομή. Για τους ελέγχους τάσεων του σκυροδέματος και του χάλυβα, θα πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη:

$$\sigma_f = E_f \{ \epsilon_c [(h - x_e)/x_e] - \epsilon_o \} \leq \eta f_{fk} .$$

όπου:

ü σ_f = τάση σύνθετων υλικών για μακροχρόνιο συνδυασμό δράσεων.

$\eta < 1$ = μειωτικός συντελεστής, που δηλώνει μείωση αντοχής σύνθετων υλικών υπό μακροχρόνια ένταση.

· Υποστυλώματα

Εδώ πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη η αλληλεπίδραση ροπής κάμψης – αξονικής δύναμης. Η ανάλυση της διατομής γίνεται με βάση τα παραπάνω, με βασική διαφορά τη προσθήκη ενός επιπλέον όρου, αυτού που αντιστοιχεί στην αξονική δύναμη της διατομής (N_{sd}), στο δεξί μέλος της εξίσωσης

$$0,85 \psi f_{cd} b x + A_{s2} E_s \epsilon_{s2} = A_{s1} f_{yd} + A_f E_f \epsilon_f$$

και $N_{sd} [(h / 2) - \delta_G x]$ στο δεξί μέλος της εξίσωσης

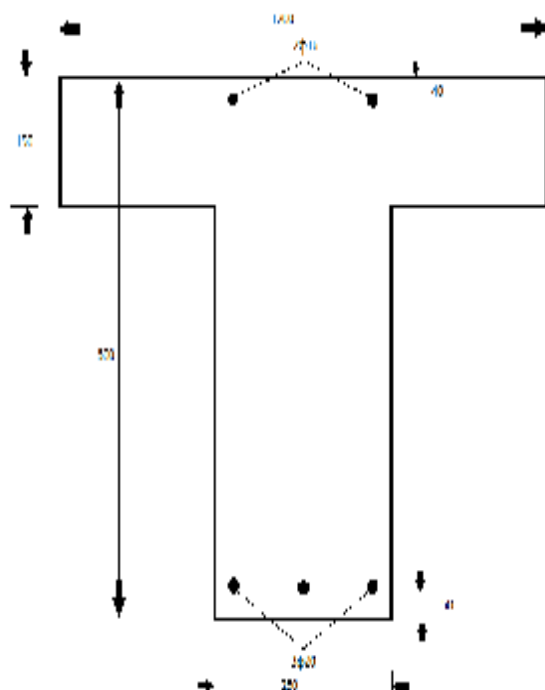
$$M_{Rd} = A_{s1} f_{yd} (d - \delta_G x) + A_f E_f \epsilon_f (h - \delta_G x) + A_{s2} E_s \epsilon_{s2} (\delta_G x - d_2)$$

✓ **ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ** Αυτοματοποιημένη Διαστασιολόγηση Στοιχείων Ενισχυμένων με Σύνθετα Υλικά (FRP) για αμφιέριστη πλακοδοκό ανοίγματος 5 m με γεωμετρία διατομής όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Υλικά C20/25, S500s.

✓ Πιο συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τα οποία αποτυπώνονται και στο σχήμα.

Στην εφαρμογή του προγράμματος FRPs και συγκεκριμένα ενίσχυση σε κάμψη δίνεται ο αριθμός ελασμάτων που απαιτείται σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της πλακοδοκού και επίσης σε άλλες περιπτώσεις παρακάτω δίνονται οι στρώσεις των λάμων με βάση κάποια χαρακτηριστικά της πλακοδοκού. Τέλος, σχεδιάζονται τα σχετικά διαγράμματα αλληλοεξάρτησης αυτών των μεγεθών.

ΑΜΦΙΕΡΕΙΣΤΗ ΠΛΑΚΟΔΟΚΟ ΑΠΟΤΕΛΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΤΑ ΠΑΡΑΚΑΤΩ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ :
$E_s=200, E_c=29$
Ανοίγματος $l=5m$
$h=500mm$
$d=450mm$
$d1=50mm$
$d2=40mm$
$b=1200mm$
Μόνιμο φορτίο: $g_d=15 kN /m$
Κινητό φορτίο: $q_d=30 kN /m$
Υλικά: C20/25, S500s
Στοιχεία για τα ελάσματα σύνθετων υλικών που χρησιμοποιούμε:
πάχος : 1.1mm
πλάτος : 80mm
μέτρο ελαστικότητας : $E_f=150GPa$
οριακής παραμόρφωσης αστοχίας : $\epsilon_{fud}= 0.01$



ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1^η: Για σκυρόδεμα C20/25 και δομικό χάλυβα S500, χαρακτηριστική αντοχή χάλυβα $f_{yk}=500\text{N/mm}^2$ δίνονται τα παρακάτω αποτελέσματα για ενίσχυση σε κάμψη της αμφιέριστης πλακοδοκού.

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

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

Εισαγωγή Δεδομένων

Τύπος Διατομής
 Δοκός Υποσύλωμα

Γεωμετρία Διατομής
 Πλάτος $b = 0,25$ [m]
 Συνεργόνο πλάτος $b_{eff} = 1,2$ [m]
 Ύψος $h = 0,5$ [m]
 Πάχος πλάκας $h_f = 0,15$ [m]

Σκυρόδεμα
 Κατηγορία Αντοχή σχεδιασμού
 C20/25 $f_{cd} = 0$ [N/mm²]

Σύνθετα Υλικά
 Μέτρο ελαστικότητας $E_f = 150$ [kN/mm²]
 Μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση $\epsilon_{f,lim} = 0,002$ [-]

Οπλισμοί Διατομής
 Χαρακτηριστική αντοχή χάλυβα $f_{yk} = 500$ [N/mm²]
 Πάνω $A_{s2} = 400$ [mm²] σε απόσταση $d_2 = 0,04$ [m]
 Κάτω $A_{s12} = 0$ [mm²] σε απόσταση $d_{12} = 0$ [m]
 Κάτω $A_{s11} = 940$ [mm²] σε απόσταση $d_{11} = 0,05$ [m]

Εντατικά Μεγέθη
 Κατά την φάση ενίσχυσης
 $N_o = 0$ [kN] $M_o = 46,9$ [kNm]
 Μετά την φάση ενίσχυσης
 $N_{Rd} = 0$ [kN] $M_{Rd} = 203,12$ [kNm]

Επιλογές | Σχετικά με ... | Έξοδος

Έργο: Ονομ/μο: Εταιρεία: 12/11/2015 7:03 μμ

Αποτελέσματα υπολογισμού απαιτούμενης διατομής σύνθετων υλικών

Ενίσχυση σε Κάμψη		Ενίσχυση σε Τέμνουσα	
Εμβαδόν διατομής FRP	$A_f = 246,9$ [mm ²]	Πάχος FRP	$t_f = 0$ [mm]
Ροπή αντοχής μετά την ενίσχυση	$M_{Rd} = 203,33$ [kNm]	Πρόσθετη τέμνουσα	$V_{fd} = 0$ [kN]
Ροπή αντοχής πριν την ενίσχυση		Περίσφιγξη	
$M_{Rd,0} = 177,75$ [kNm]		Αντοχή πριν την ενίσχυση	$f_{cc1d} = 0$ [N/mm ²]
Βαθμός ενίσχυσης	$\frac{M_{Rd}}{M_{Rd,0}} = 1,144$	Πάχος FRP	$t_f = 0$ [mm]
		Οριακή αξονική παραμ/ση μετά την ενίσχυση	$\epsilon_{ccud} = 0$ [-]
		Αντοχή μετά την ενίσχυση	$f_{ccd} = 0$ [N/mm ²]

Παραμορφωσιακή κατάσταση διατομής

Εισαγωγή διαστάσεων FRP

Εκτύπωση Επιστροφή Έξοδος

- Ύστερα επιλέγουμε την εισαγωγή διαστάσεων FRP όπου θεωρούμε ελάσματα συνθέτων υλικών πάχους 1,1mm , πλάτους 80mm, μέτρου ελαστικότητας $E_f=150GPa$ και οριακής παραμόρφωσης αστοχίας (τιμή σχεδιασμού) $\epsilon_{fud}=0.01$.

Εισαγωγή διαστάσεων FRP

Ενίσχυση σε Κάμψη	
Για ενίσχυση:	$M_{Rd} = 203,33$ [kNm] $N_{Rd} = 0,00$ [kN]
Απαιτούμενο εμβαδόν FRP για την ενίσχυση	$A_f = 246,9$ [mm ²]
Λωρίδες FRP πλάτους	80 [mm] και πάχους 1,1 [mm]
Υπολογισμός	Απαιτούμενος αριθμός λωρίδων : 3
	Εφαρμοζόμενο εμβαδόν FRP $A_f = 264,0$ [mm ²]

Επιστροφή χωρίς Επίλυση Επιστροφή με Επίλυση Έξοδος

- Συμπερασματικά καταλήγουμε στο ότι η ενίσχυση της πλακοδοκού με λάμες απαιτεί 3 ελάσματα.

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2^η: Για σκυρόδεμα C20/25 και δομικό χάλυβα S500, χαρακτηριστική αντοχή χάλυβα $f_{yk}=400N/mm^2$ δίνονται τα παρακάτω αποτελέσματα για ενίσχυση σε κάμψη της αμφιέριστης πλακοδοκού .

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

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

Εισαγωγή Δεδομένων

Σκυρόδεμα
 Κατηγορία C20/25 ή Αντοχή σχεδιασμού $f_{cd} = 0$ [N/mm²]

Σύνθετα Υλικά
 Μέτρο ελαστικότητας $E_f = 150$ [kN/mm²]
 Μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση $\epsilon_{f,lim} = 0,002$ [-]

Οπλισμοί Διατομής
 Χαρακτηριστική αντοχή χάλυβα $f_{yk} = 400$ [N/mm²]
 Πάνω $A_{s2} = 400$ [mm²] σε απόσταση $d_2 = 0,04$ [m]
 Κάτω $A_{s12} = 0$ [mm²] σε απόσταση $d_{12} = 0$ [m]
 Κάτω $A_{s11} = 940$ [mm²] σε απόσταση $d_{11} = 0,05$ [m]

Τύπος Διατομής
 Δοκός Υποστύλωμα

Γεωμετρία Διατομής
 Πλάτος $b = 0,25$ [m]
 Συνεργίνο πλάτος $b_{eff} = 1,2$ [m]
 Ύψος $h = 0,5$ [m]
 Πάχος πλάκας $h_f = 0,15$ [m]

Εντατικά Μεγέθη
 Κατά την φάση ενίσχυσης
 $N_o = 0$ [kN] $M_o = 46,9$ [kNm]
 Μετά την φάση ενίσχυσης
 $N_{Rd} = 0$ [kN] $M_{Rd} = 203,12$ [kNm]

Έργο: Ονομ/μο: Εταιρεία: 27/11/2015 3:08 μμ

Αποτελέσματα υπολογισμού απαιτούμενης διατομής σύνθετων υλικών

Ενίσχυση σε Κάμψη
 Εμβαδόν διατομής FRP $A_f = 489,7$ [mm²]
 Ροπή αντοχής μετά την ενίσχυση $M_{Rd} = 203,43$ [kNm]
 Ροπή αντοχής πριν την ενίσχυση $M_{Rd,o} = 143,79$ [kNm]
 Βαθμός ενίσχυσης $\frac{M_{Rd}}{M_{Rd,o}} = 1,415$

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 παραμ/ση μετά την ενίσχυση $\epsilon_{ccud} = 0$ [-]
 Αντοχή μετά την ενίσχυση $f_{ccd} = 0$ [N/mm²]

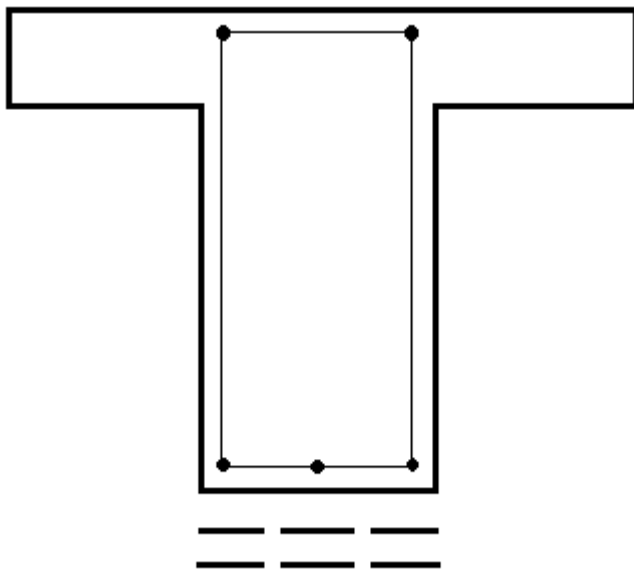
Εισαγωγή διαστάσεων FRP

- Ύστερα επιλέγουμε την εισαγωγή διαστάσεων FRP όπου θεωρούμε ελάσματα συνθέτων υλικών πάχους 1,1mm , πλάτους 80mm, μέτρου ελαστικότητας $E_f=150\text{GPa}$ και οριακής παραμόρφωσης αστοχίας (τιμή σχεδιασμού) $\epsilon_{fud}=0.01$.

Εισαγωγή διαστάσεων FRP

Ενίσχυση σε Κάμψη
 Για ενίσχυση: $M_{Rd} = 203,43$ [kNm] $N_{Rd} = 0,00$ [kN]
 Απαιτούμενο εμβαδόν FRP για την ενίσχυση $A_f = 489,7$ [mm²]
 Λωρίδες FRP πλάτους 80 [mm] και πάχους 1,1 [mm]
 Απαιτούμενος αριθμός λωρίδων: 6
 Εφαρμοζόμενο εμβαδόν FRP $A_f = 528,0$ [mm²]

- Συμπερασματικά καταλήγουμε στο ότι χρειάζονται δυο στρώσεις των 3 λάμων άρα συνολικά 6 ελάσματα. Συγκεκριμένα, αποτυπώνονται γραφικά τα 6 ελάσματα στο παρακάτω σχέδιο.



Σχέδιο 1.

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3^η: Για σκυρόδεμα C20/25 και δομικό χάλυβα S500, χαρακτηριστική αντοχή χάλυβα $f_{yk}=550\text{N/mm}^2$ δίνονται τα παρακάτω αποτελέσματα για ενίσχυση σε κάμψη της αμφιέριστης πλακοδοκού .

- Συμπερασματικά, στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν μπορεί να υλοποιηθεί η ενίσχυση σε κάμψη λόγω υπερπλισμένης διατομής , δηλαδή 0 ελάσματα!

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4^η: Για σκυρόδεμα C20/25 και δομικό χάλυβα S500, χαρακτηριστική αντοχή χάλυβα $f_{yk}=250\text{N/mm}^2$ δίνονται τα παρακάτω αποτελέσματα για ενίσχυση σε κάμψη της αμφιέριστης πλακοδοκού .

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

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

Εισαγωγή Δεδομένων

Σκυρόδεμα
 Κατηγορία: C20/25 ή Αντοχή σχεδιασμού: $f_{od} = 0$ [N/mm²]

Σύνθετα Υλικά
 Μέτρο ελαστικότητας: $E_f = 150$ [kN/mm²]
 Μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση: $\epsilon_{f,lim} = 0,002$ [-]

Οπλισμοί Διατομής
 Χαρακτηριστική αντοχή χάλυβα: $f_{yk} = 250$ [N/mm²]
 Πάνω: $A_{s2} = 400$ [mm²] σε απόσταση $d_2 = 0,04$ [m]
 Κάτω: $A_{s12} = 0$ [mm²] σε απόσταση $d_{12} = 0$ [m]
 Κάτω: $A_{s11} = 940$ [mm²] σε απόσταση $d_{11} = 0,05$ [m]

Τύπος Διατομής
 Δοκός Υποστύλωμα

Γεωμετρία Διατομής
 Πλάτος: $b = 0,25$ [m]
 Συνεργίνο πλάτος: $b_{eff} = 1,2$ [m]
 Ύψος: $h = 0,5$ [m]
 Πάχος πλάκας: $h_f = 0,15$ [m]

Εντατικά Μεγέθη
 Κατά την φάση ενίσχυσης: $N_o = 0$ [kN], $M_o = 46,9$ [kNm] **Επίλυση**
 Μετά την φάση ενίσχυσης: $N_{Rd} = 0$ [kN], $M_{Rd} = 203,12$ [kNm] **Νέα Δεδομένα**

Επιλογές | Σχετικά με ... | Έξοδος

Έργο: | Ονομ/μο: | Εταιρεία: | 27/11/2015 | 3:23 μμ

Αποτελέσματα υπολογισμού απαιτούμενης διατομής σύνθετων υλικών

Ενίσχυση σε Κάμψη
 Εμβαδόν διατομής FRP: $A_f = 850,4$ [mm²]
 Ροπή αντοχής μετά την ενίσχυση: $M_{Rd} = 203,12$ [kNm]
 Ροπή αντοχής πριν την ενίσχυση: $M_{Rd,o} = 92,25$ [kNm]
 Βαθμός ενίσχυσης: $\frac{M_{Rd}}{M_{Rd,o}} = 2,202$

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 παραμ/ση μετά την ενίσχυση: $\epsilon_{ccud} = 0$ [-]
 Αντοχή μετά την ενίσχυση: $f_{ccd} = 0$ [N/mm²]

Εισαγωγή διαστάσεων FRP
Παραμορφωσιακή κατάσταση διατομής

Εκτύπωση | Επιστροφή | Έξοδος

- Ύστερα επιλέγουμε την εισαγωγή διαστάσεων FRP όπου θεωρούμε ελάσματα συνθέτων υλικών πάχους 1,1mm , πλάτους 80mm, μέτρου ελαστικότητας $E_f=150\text{GPa}$ και οριακής παραμόρφωσης αστοχίας (τιμή σχεδιασμού) $\epsilon_{fud}=0.01$

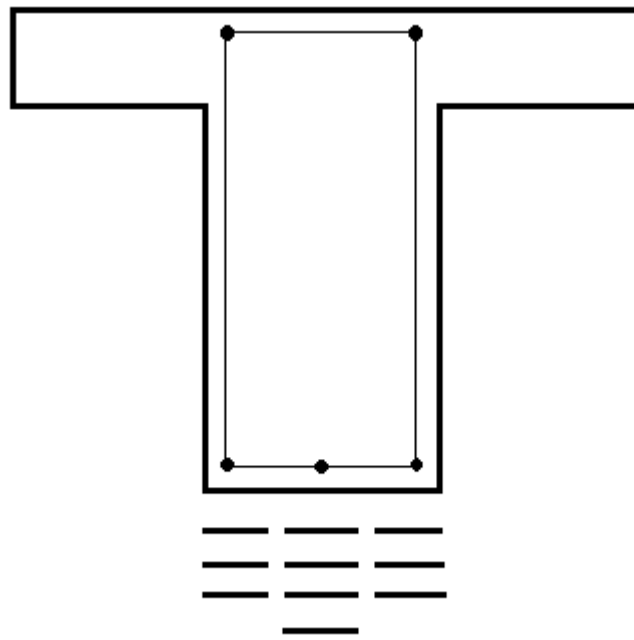
Εισαγωγή διαστάσεων FRP

Ενίσχυση σε Κάμψη
 Για ενίσχυση: $M_{Rd} = 203,12$ [kNm] $N_{Rd} = 0,00$ [kN]
 Απαιτούμενο εμβαδόν FRP για την ενίσχυση: $A_f = 850,4$ [mm²]
 Λωρίδες FRP πλάτους 80 [mm] και πάχους 1,1 [mm]
 Απαιτούμενος αριθμός λωρίδων: **10**
 Εφαρμοζόμενο εμβαδόν FRP: $A_f = 880,0$ [mm²]

Υπολογισμός

Επιστροφή χωρίς Επίλυση | Επιστροφή με Επίλυση | Έξοδος

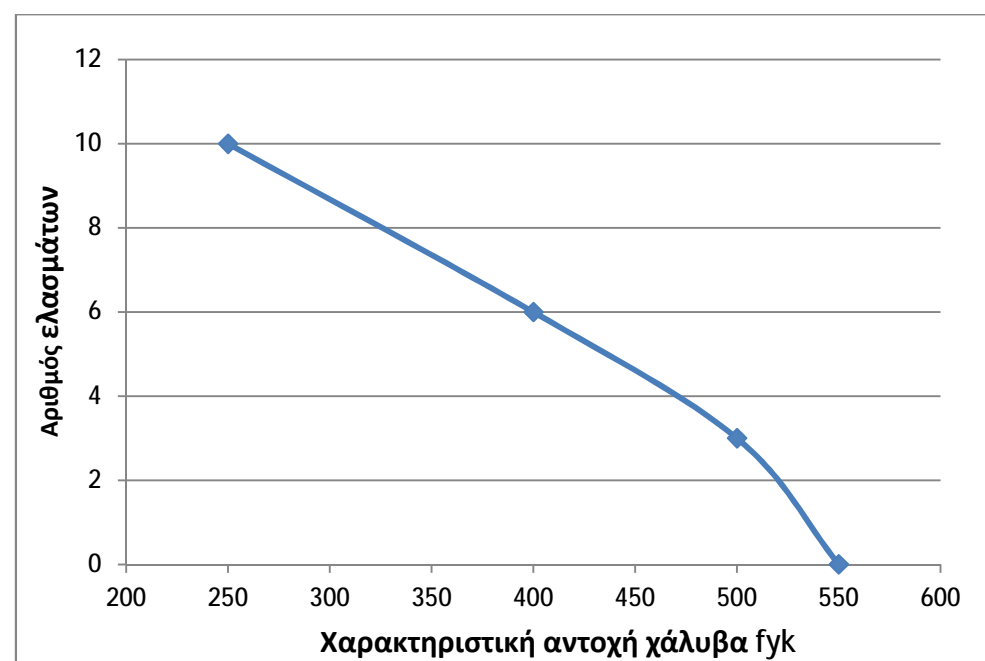
- Επομένως, καταλήγουμε στο ότι, χρειάζονται 3 στρώσεις από 3 λάμες η καθεμία στρώση ξεχωριστά και άλλη μία στρώση, η οποία να έχει μία μόνο λάμα στη μέση της τέταρτης στρώσης. Άρα συνολικά 10 ελάσματα. Συγκεκριμένα, αποτυπώνονται γραφικά στο παρακάτω σχέδιο.



Σχέδιο 2.

ü Πίνακας ελασμάτων σύμφωνα με την χαρακτηριστική αντοχή του χάλυβα.

Αριθμός ελασμάτων για χάλυβα C20/25	Χαρακτηριστική αντοχή χάλυβα f_{yk}
0	550
3	500
6	400
10	250



ü Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι ο αριθμός των στρώσεων των ανθρακονημάτων μειώνεται γραμμικά καθώς η χαρακτηριστική αντοχή του χάλυβα αυξάνεται μέχρι 500MPa

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 5^η: Για σκυρόδεμα C16/20 και δομικό χάλυβα S500, χαρακτηριστική αντοχή χάλυβα $f_{yk}=400\text{N/mm}^2$ δίνονται τα παρακάτω αποτελέσματα για ενίσχυση σε κάμψη της αμφιέριστης πλακοδοκού

- Ύστερα επιλέγουμε την εισαγωγή διαστάσεων FRP όπου θεωρούμε ελάσματα συνθέτων υλικών πάχους 1,1mm , πλάτους 80mm, μέτρου ελαστικότητας $E_f=150\text{GPa}$ και οριακής παραμόρφωσης αστοχίας (τιμή σχεδιασμού) $\epsilon_{fud}=0.01$

- Συμπερασματικά καταλήγουμε στο ότι χρειάζονται δυο στρώσεις των 3 λάμων άρα συνολικά 6 ελάσματα.

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 6^η: Για σκυρόδεμα C25/30 και δομικό χάλυβα S500, χαρακτηριστική αντοχή χάλυβα $f_{yk}=400\text{N/mm}^2$ δίνονται τα παρακάτω αποτελέσματα για ενίσχυση σε κάμψη της αμφιέριστης πλακοδοκού.

- Ύστερα επιλέγουμε την εισαγωγή διαστάσεων FRP όπου θεωρούμε ελάσματα συνθέτων υλικών πάχους 1,1mm , πλάτους 80mm, μέτρου ελαστικότητας $E_f=150\text{GPa}$ και οριακής παραμόρφωσης αστοχίας (τιμή σχεδιασμού) $\epsilon_{fud}=0.01$

Εισαγωγή διαστάσεων FRP

Ενίσχυση σε Κάμψη

Για ενίσχυση: $M_{Rd} = 203,52$ [kNm] $N_{Rd} = 0,00$ [kN]

Απαιτούμενο εμβαδόν FRP για την ενίσχυση $A_f = 478,4$ [mm²]

Λωρίδες FRP πλάτους [80] [mm] και πάχους [1,1] [mm]

Υπολογισμός Απαιτούμενος αριθμός λωρίδων: 6

Εφαρμοζόμενο εμβαδόν FRP $A_f = 528,0$ [mm²]

Επιστροφή χωρίς Επίλυση Επιστροφή με Επίλυση Έξοδος

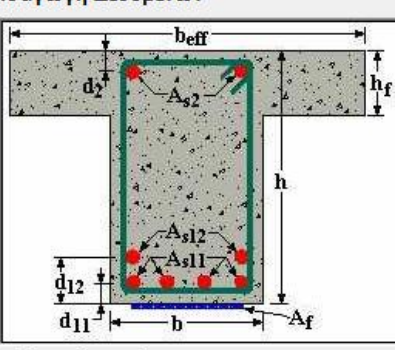
- **Συμπέρασμα:** Οι στρώσεις παραμένουν ίδιες ανεξάρτητα από την κατηγορία του σκυροδέματος αλλά εξαρτάται από την τάση διαρροής του χάλυβα!

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 7^η: Για σκυρόδεμα C20/25 και δομικό χάλυβα S500, χαρακτηριστική αντοχή χάλυβα $f_{yk} = 400 \text{ N/mm}^2$ αλλά $A_{s11} = 626 \text{ mm}^2$ δίνονται τα παρακάτω αποτελέσματα για ενίσχυση σε κάμψη της αμφίερευστης πλακοδοκού.

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

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

Εισαγωγή Δεδομένων



Σκυρόδεμα
 Κατηγορία: C20/25 Αντοχή σχεδιασμού: $f_{cd} = 0$ [N/mm²]

Σύνθετα Υλικά
 Μέτρο ελαστικότητας: $E_f = 150$ [kN/mm²]
 Μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση: $\epsilon_{f,lim} = 0,002$ [-]

Οπλισμοί Διατομής
 Χαρακτηριστική αντοχή χάλυβα: $f_{yk} = 400$ [N/mm²]
 Πάνω $A_{s2} = 400$ [mm²] σε απόσταση $d_2 = 0,04$ [m]
 Κάτω $A_{s12} = 0$ [mm²] σε απόσταση $d_{12} = 0$ [m]
 Κάτω $A_{s11} = 626$ [mm²] σε απόσταση $d_{11} = 0,05$ [m]

Τύπος Διατομής
 Δοκός Υποστύλωμα

Γεωμετρία Διατομής
 Πλάτος: $b = 0,25$ [m]
 Συνεργίνο πλάτος: $b_{eff} = 1,2$ [m]
 Ύψος: $h = 0,5$ [m]
 Πάχος πλάκας: $h_f = 0,15$ [m]

Εντατικά Μεγέθη
 Κατά την φάση ενίσχυσης: $N_o = 0$ [kN] $M_o = 46,9$ [kNm] **Επίλυση**
 Μετά την φάση ενίσχυσης: $N_{Rd} = 0$ [kN] $M_{Rd} = 203,12$ [kNm] **Νέα Δεδομένα**

Επιλογές Σχετικά με ... Έξοδος

Έργο: Ονομ/μο: Εταιρεία: 27/11/2015 4:29 μμ

Αποτελέσματα υπολογισμού απαιτούμενης διατομής σύνθετων υλικών

Ενίσχυση σε Κάμψη

Εμβαδόν διατομής FRP: $A_f = 808,4$ [mm²]

Ροπή αντοχής μετά την ενίσχυση: $M_{Rd} = 203,49$ [kNm]

Ροπή αντοχής πριν την ενίσχυση: $M_{Rd,o} = 98,27$ [kNm]

Βαθμός ενίσχυσης: $\frac{M_{Rd}}{M_{Rd,o}} = 2,071$

Παραμορφωσιακή κατάσταση διατομής

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]

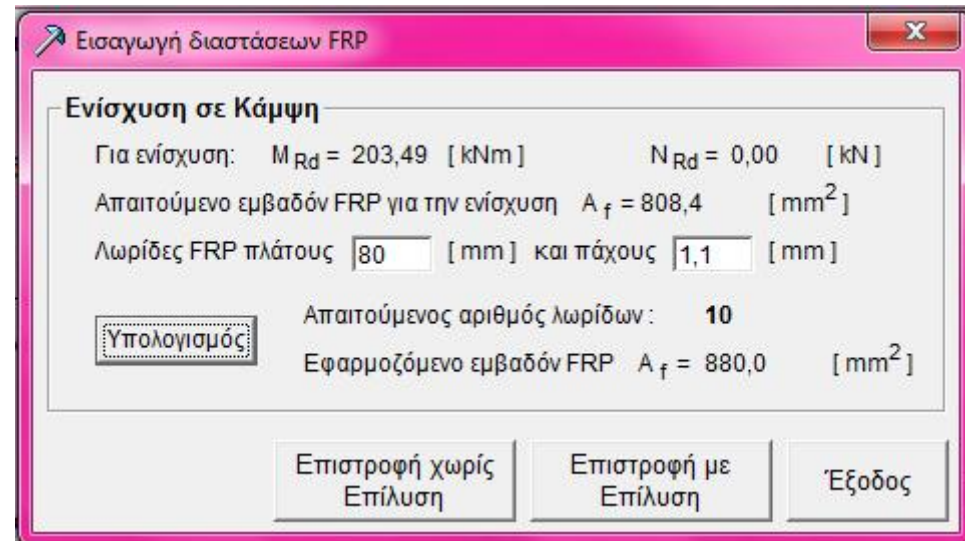
Οριακή αξονική παραμ/ση μετά την ενίσχυση: $\epsilon_{ccud} = 0$ [-]

Αντοχή μετά την ενίσχυση: $f_{ccd} = 0$ [N/mm²]

Εισαγωγή διαστάσεων FRP

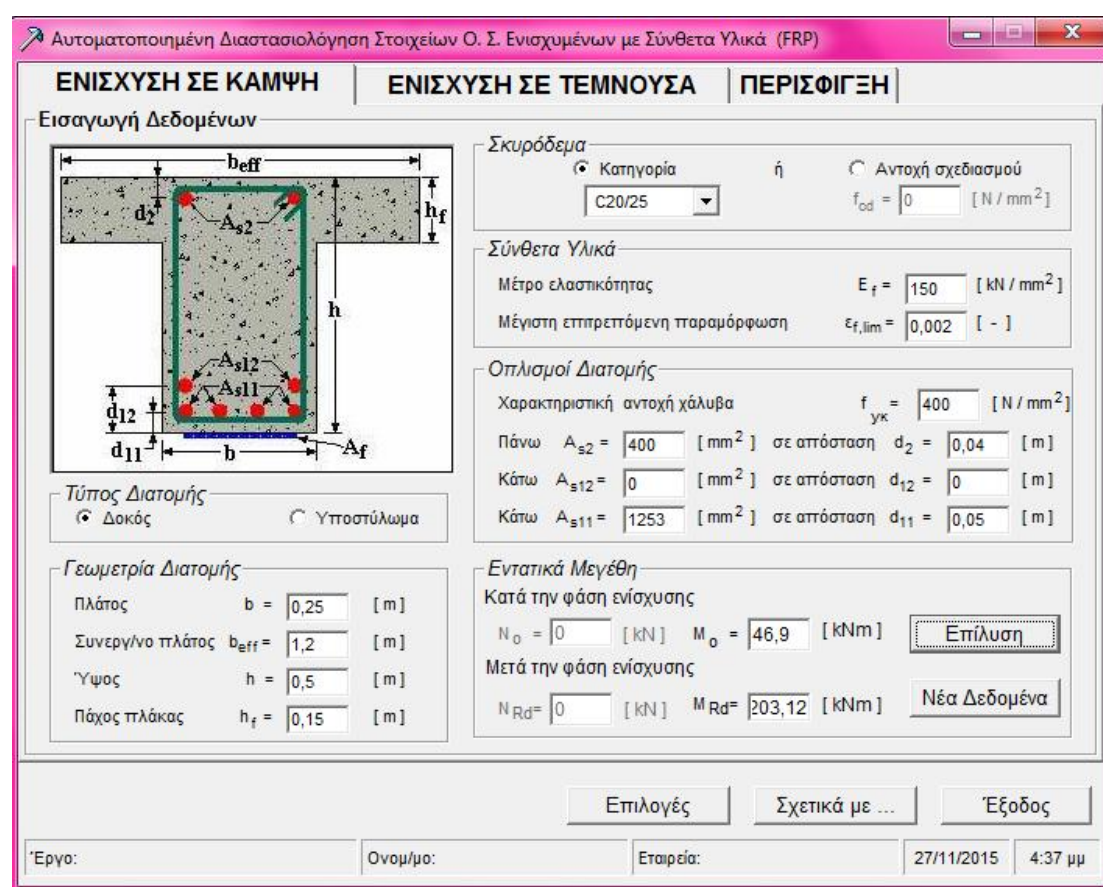
Εκτύπωση Επιστροφή Έξοδος

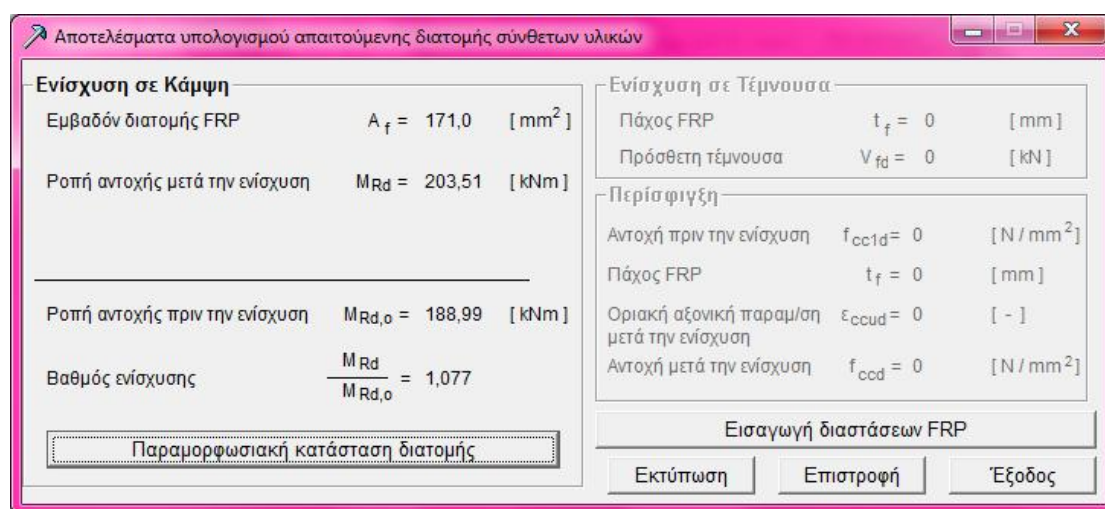
- Ύστερα επιλέγουμε την εισαγωγή διαστάσεων FRP όπου θεωρούμε ελάσματα συνθέτων υλικών πάχους 1,1mm , πλάτους 80mm, μέτρου ελαστικότητας $E_f=150\text{GPa}$ και οριακής παραμόρφωσης αστοχίας (τιμή σχεδιασμού) $\epsilon_{f,ud}=0.01$



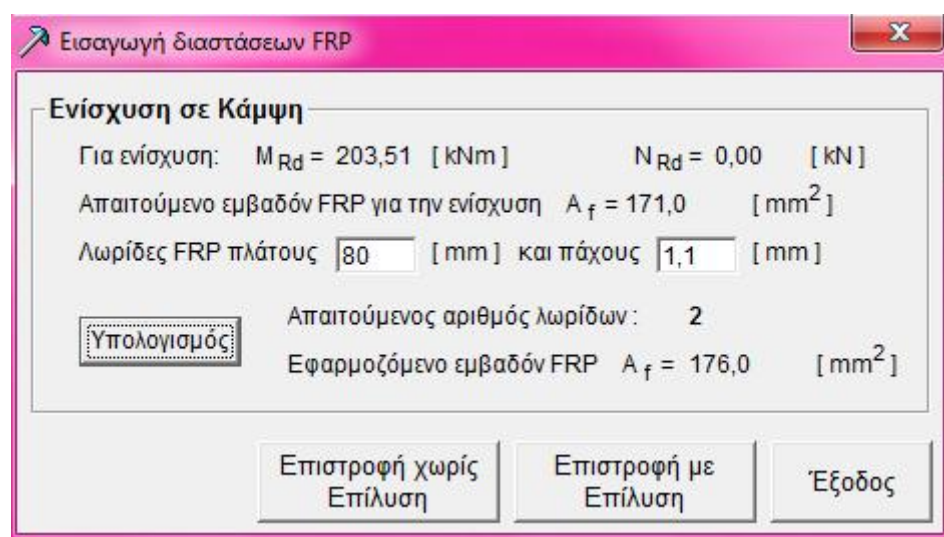
- Συμπέρασμα: Όταν ο αριθμός του οπλισμού ελαττώνεται από 3 σε 2 απαιτούνται 10 λάμες έναντι των 6.

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 8^η: Για σκυρόδεμα C20/25 και δομικό χάλυβα S500, χαρακτηριστική αντοχή χάλυβα $f_{yk}=400\text{N/mm}^2$ αλλά $A_{s11}=1253\text{mm}^2$ δίνονται τα παρακάτω αποτελέσματα για ενίσχυση σε κάμψη της αμφιέριστης πλακοδοκού.





- Ύστερα επιλέγουμε την εισαγωγή διαστάσεων FRP όπου θεωρούμε ελάσματα σύνθετων υλικών πάχους 1,1mm , πλάτους 80mm, μέτρου ελαστικότητας $E_f=150\text{GPa}$ και οριακής παραμόρφωσης αστοχίας (τιμή σχεδιασμού) $\epsilon_{fud}=0.01$

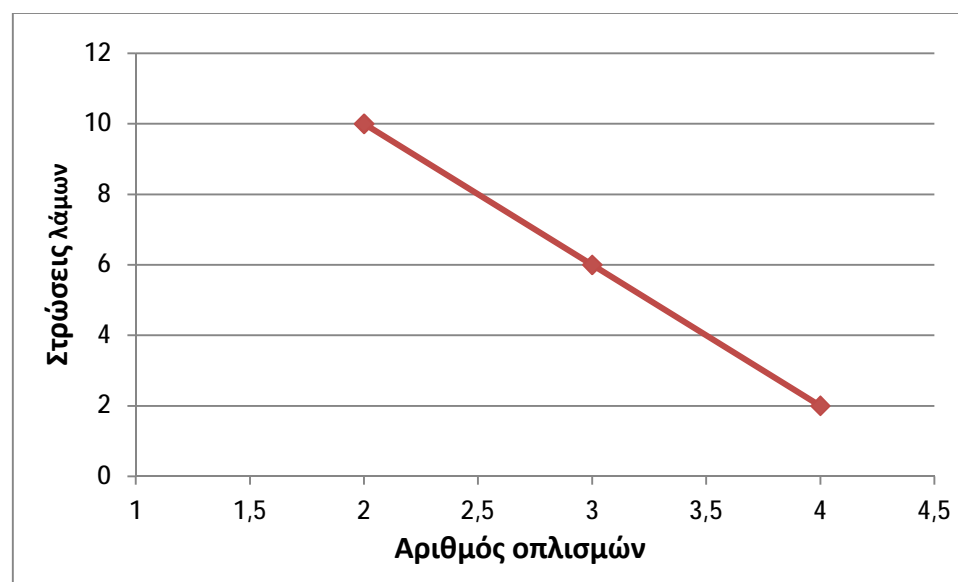


- Συμπερασματικά, καταλήγουμε στο ότι χρειάζονται 1 στρώση των 2 λάμων άρα συνολικά 2 ελάσματα.

✓ Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται οι στρώσεις των λάμων ανάλογα με πόσους σπλισμούς τοποθετούνται.

Στρώσεις λάμων	Οπλισμοί
2	4
6	3
10	2

✓ Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται ο αριθμός των οπλισμών συναρτήσει των στρώσεων των λάμων



- Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρώ ότι ο αριθμός των στρώσεων από λάμες FRP μειώνεται καθώς ο αριθμός των οπλισμών αυξάνεται.

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. 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 Bllkasem 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., EI 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.