

**ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ: ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ  
ΠΟΛΥΜΕΡΗ**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΑ: ΜΑΛΛΙΑΡΗ ΒΑΣΙΛΙΚΗ**

**ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΚΑΘΡΕΠΤΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

**ΠΑΤΡΑ 2006**

*Ευχαριστώ θερμά τον κύριο Αθανάσιο Τριανταφύλλου, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, για την πολύτιμη συνεισφορά του στην πραγματοποίηση της εργασίας αυτής.*

*Επίσης ευχαριστώ θερμά τον κύριο Νικόλαο Καθρέπτα, Καθηγητή του Τμήματός μου, για την βοήθεια που μου προσέφερε όχι μόνο κατά την εκπόνηση της εργασίας αυτής αλλά και κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.*

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελ.
• Εισαγωγή	3
• Κατηγορίες σύνθετων υλικών	7
• Υλικά	9
• Υλικά ινών	10
• Ίνες υάλου	10
• Ίνες άνθρακα	11
• Ίνες πολυαραμίδης	12
• Μήτρες σύνθετων υλικών	14
• Εποξεικές ρητίνες	15
• Πολυεστερικές ρητίνες	15
• Βινυλεστερικές ρητίνες	16
• Κόλλα	17
• Ιδιότητες σύνθετων υλικών	18
• Μικρομηχανική σύνθετων υλικών	19
• Περιβαλλοντικές συνθήκες	22
• Επίδραση της θερμοκρασίας	22
• Συμπεριφορά στο νερό	24
• Υπεριώδης ακτινοβολία	26
• Αλκαλικό και όξινο περιβάλλον	27
• Γαλβανική διάβρωση	27
• Ερπυσμός	27
• Θραύση και διάβρωση λόγω έντασης	28
• Κόπωση	29
• Κρούση	29
• Αξιολόγηση τύπου ινών	30
• Συστήματα υγρής εφαρμογής	31
• Προκατασκευασμένα υλικά	32
• Βασική τεχνική εφαρμογής	33
• Ειδικές τεχνικές εφαρμογής	33

• Αυτοματοποιημένη περιτύλιξη	33
• Εφαρμογή με προένταση	33
• Επιταχυμένη σκλήρυνση με θέρμανση	34
• Προκατασκευασμένα στοιχεία	35
• Εφαρμογή σε εγκοπές	35
• Διαδικασία εφαρμογής σύνθετων υλικών	36
• Σύμφυση και επαφή διεπιφανειών	36
• Προετοιμασία επιφάνειας σκυροδέματος	37
• Στάδια εφαρμογής σύνθετων υλικών	39
• Βάσεις σχεδιασμού	40
• Οριακή κατάσταση αντοχής-πλήρης συνεργασία υλικών	40
• Οριακή κατάσταση αντοχής-αποκόλληση	41
• Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας	42
• Συνάφεια σύνθετων υλικών σκυροδέματος	42
• Γενικά, συμπεριφορά	42
• Αναλυτικό προσωμείωμα	43
• Αρχές σχεδιασμού συστημάτων επισκευής και ενίσχυσης με σύνθετα υλικά	45
• Ενίσχυση σε κάμψη	45
• Ενίσχυση σε διάτμηση	64
• Περίσφιγξη	78
• Κατασκευαστικές λεπτομέρειες	89
• Παράδειγμα ενίσχυσης με ινοπλισμένα πολυμερή της γέφυρας στο East Church της Νέας Υόρκης	92
• Παράδειγμα ενίσχυσης με ινοπλισμένα πολυμερή της γέφυρας στο Rensselear County της Νέας Υόρκης	95
• Βιβλιογραφία	97

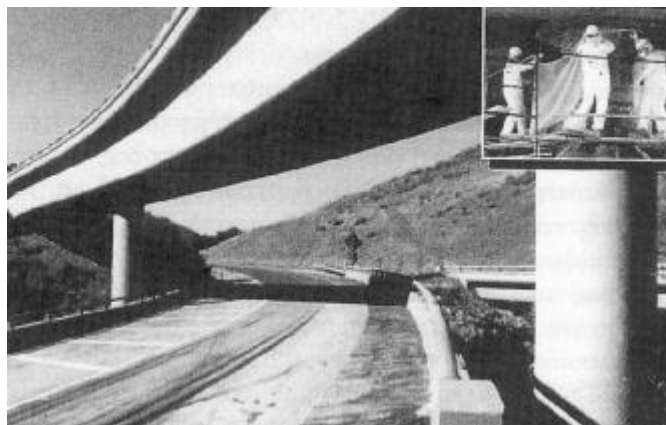
## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ραγδαία πρόοδος που έχει σημειωθεί στον τομέα της τεχνολογίας των δομικών υλικών τα τελευταία χρόνια, είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη πληθώρας νέων προϊόντων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές της επιστήμης του Πολιτικού Μηχανικού, όπου η αποκλειστική χρήση συμβατικών υλικών αποτυγχάνει να παρέχει μια ικανοποιητική λύση. Μεταξύ των προϊόντων αυτών σημαντική θέση κατέχουν τα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή (fiber reinforced polymer composites), τα οποία αποτελούνται από υφάσματα από ινώδη οπλισμένα πολυμερή εμποτισμένα με ειδικές εποξικές ρητίνες. Τα υφάσματα αυτά τοποθετούνται στις επιφάνειες των δομικών στοιχείων, αποτελώντας εξωτερικό οπλισμό και μόνιμη ενίσχυσή τους. Λόγω κυρίως της ανθεκτικότητάς τους σε ηλεκτροχημική διάβρωση και του υψηλού λόγου αντοχής προς βάρος, αποτελούν μια πολύ καλή εναλλακτική επιλογή για την επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών.

Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαπενταετίας, στο πλαίσιο ερευνητικών προγραμμάτων και δραστηριοτήτων, ερευνητές από διάφορα μέρη του κόσμου έχουν αναπτύξει πολλές εφαρμογές σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή για την όπλιση και προένταση κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, τη σεισμική ενίσχυση κατασκευών τόσο από οπλισμένο σκυρόδεμα όσο και από άοπλη τοιχοποιία, την ενίσχυση γεφυρών και κτιριακών κατασκευών κ.τ.λ. Οι προσπάθειες των ερευνητών αυτών είχαν ως αποτέλεσμα μια πραγματικά εντυπωσιακή ανάπτυξη της μεθόδου ενίσχυσης κατασκευών με σύνθετα υλικά, με τις πρώτες ευρείας κλίμακας εφαρμογές να αναφέρονται στις αρχές της περασμένης δεκαετίας.

Η πρώτη ευρείας κλίμακας εφαρμογή σύνθετων υλικών αφορά στην ενίσχυση δυο χιλιάδων βάρων γεφυρών στη περιοχή Yolo δυτικά του Sacramento, πρωτεύουσας της Καλιφόρνια, στα μέσα της προηγούμενης δεκαετίας. Γρήγορα η χρήση τους επεκτάθηκε στην ενίσχυση πάσης φύσεως τεχνικών έργων τόσο στις Η.Π.Α. όσο και σε πολλά άλλα κράτη της Αμερικής, της Ευρώπης και της Ασίας. Αποτελεί χαρακτηριστικό γεγονός ότι στην Ιαπωνία, χώρα με ιδιαίτερα υψηλή σεισμικότητα, η χρήση σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή αυξήθηκε την περίοδο 1992-1995 και κυρίως μετά

το σεισμό του Hyogoken-Nangu το 1995 κατά 500%. Στην Ελλάδα εφαρμογές του πολιτικού μηχανικού αναφέρονται από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 (Χαλκίδα).



Ενίσχυση της γέφυρας Gaviota της Καλιφόρνια των Η.Π.Α. με υφάσματα ινοπλισμένων πολυμερών.



Ενίσχυση πασσάλων με σύνθετα υλικά ανθρακονημάτων στο Lamma Island Jetty του Χονγκ Κονγκ.

Οι βασικές αρχές για το σχεδιασμό μανδύων από σύνθετα υλικά είναι αντίστοιχες με τις αρχές σχεδιασμού των μεταλλικών μανδύων. Σε σύγκριση με τη χρήση μεταλλικών ελασμάτων για την ενίσχυση δομικών στοιχείων, η εναλλακτική εφαρμογή ινοπλισμένων πολυμερών παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως οι εξαιρετικές ιδιότητες βάρους προς αντοχή, η διαθεσιμότητα του υλικού σε σχετικά απεριόριστο μήκος, η συγκριτικά ευκολότερη εγκατάσταση και η ανθεκτικότητα σε διάβρωση. Τα πλεονεκτήματα αυτά καθιστούν τα σύνθετα υλικά μία πολύ ελκυστική εναλλακτική πρόταση.

Γενικά, η εφαρμογή των υλικών αυτών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση ή ορθότερα την τροποποίηση της καμπτικής, διατμητικής και αξονικής αντοχής του μέλους στο οποίο εφαρμόζεται. Η εξαιρετική ενίσχυση με μανδύα από

ινοπλισμένα πολυμερή είναι κατάλληλη για πληθώρα εφαρμογών. Αντιπροσωπευτικές χρήσεις είναι οι ακόλουθες:

- Ενίσχυση της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής. Ως παράδειγμα αναφέρεται μεταξύ άλλων η ενίσχυση κτιρίων στάθμευσης αυτοκινήτων στο Μόναχο της Γερμανίας και στο Δουβλίνο της Ιρλανδίας, καθώς και βιομηχανικών κτιρίων στην πόλη Zug της Ελβετίας.
- Παθητική περίσφιξη για βελτιστοποίηση της ικανότητας ανάληψης σεισμικών φορτίων. Χαρακτηριστικές εφαρμογές αποτελούν η ενίσχυση της γέφυρας Osaky στην Νότια Κορέα και η ενίσχυση της οδογέφυρας Belo Horizonte στο Σάο Πάολο της Βραζιλίας.
- Έλεγχος ρηγματώσεως και συρραφή ρωγμών. Τα σύνθετα υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί και για την επισκευή και ενίσχυση διατηρητέων κτιρίων, μνημείων και ιστορικών και αρχαιολογικών κτισμάτων που έχουν υποστεί ρηγματώσεις και άλλου είδους βλάβες. Ενδεικτικά αναφέρεται η ενίσχυση του τρούλου του ιστορικού καθεδρικού ναού στη British Columbia του Καναδά.

Παρόλες τις υψηλές προσδοκίες που έχουν καλλιεργηθεί, η χρήση σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή έχει μία σχετικά βραχύχρονη ιστορία. Κατά συνέπεια, η απόφαση για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών με ινοπλισμένα πολυμερή πρέπει να λαμβάνεται με ιδιαίτερη προσοχή και αφού συνεξεταστούν όλες οι υπόλοιπες εναλλακτικές επιλογές. Η χρήση ινοπλισμένων πολυμερών πρέπει γενικά να αποφεύγεται στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Η κατάσταση της υπόστρωσης πάνω στην οποία θα εφαρμοστούν τα σύνθετα υλικά είναι άγνωστη ή έχει υποστεί σημαντική απομείωση της αντοχής της.
- Υπάρχει σε εξέλιξη σημαντική διάβρωση του σιδηροπλισμού.
- Δεν υπάρχει σιδηροπλισμός που να εξασφαλίζει την πλάστιμη συμπεριφορά του μέλους που πρόκειται να ενισχυθεί.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της χρήσης σύνθετων υλικών για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους επισκευής και ενίσχυσης με χρήση συμβατικών υλικών είναι τα εξής:

- Απαιτείται μικρή προετοιμασία στο εργοτάξιο. Η εκκένωση του χώρου δεν είναι αναγκαία και η όχληση στους χρήστες είναι ελάχιστη. Η προετοιμασία των προς ενίσχυση στοιχείων είναι μικρή και σύντομη.
- Η εφαρμογή των σύνθετων υλικών είναι απλή.
- Οι διαστάσεις του ενισχυόμενου δομικού στοιχείου παραμένουν ουσιαστικά αμετάβλητες, λόγω του μικρού πάχους του σύνθετου υλικού.
- Η τοποθέτηση των σύνθετων υλικών είναι δυνατή ακόμα και σε περιπτώσεις που υπάρχει περιορισμός του χώρου εργασίας (π.χ. υποστυλώματα σε μεσοτοιχία).
- Το βάρος των σύνθετων υλικών είναι μικρό και για την τοποθέτησή τους δεν απαιτείται βαρύς ή ειδικός εξοπλισμός.
- Τα σύνθετα υλικά μπορούν να επιχριστούν και να χρωματιστούν σύμφωνα με τις αισθητικές απαιτήσεις του έργου.
- Τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά των κατασκευών παραμένουν πρακτικά αμετάβλητα.
- Το κόστος εφαρμογής των σύνθετων υλικών είναι ανάλογο των παραδοσιακών μεθόδων επισκευής και ενίσχυσης.

Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι οι μηχανικοί που επιλέγουν τη χρήση ινοπλισμένων πολυμερών για την ενίσχυση μιας κατασκευής βρίσκονται αντιμέτωποι με μια μεγάλη πρόκληση. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η τεχνολογία τους δεν είναι ευρέως γνωστή στον τεχνικό κόσμο σε σύγκριση με την αντίστοιχη τεχνολογία των συμβατικών υλικών επισκευής και ενίσχυσης, όπως είναι ο χάλυβας και το σκυρόδεμα.



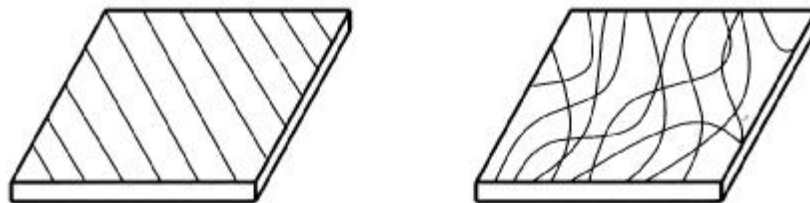
## ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Με την ευρύτερη χρήση του όρου, συνδυασμός δύο ή περισσότερων υλικών συνιστά ένα δομικό στοιχείο από σύνθετο υλικό. Τα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή έχουν ως συστατικό τους στοιχεία ίνες υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας σε παχύρρευστη σκληρυμένη μήτρα. Σε αυτή τη μορφή, τόσο οι ίνες όσο και η μήτρα διατηρούν τις φυσικές και χημικές τους ιδιότητες ενώ ταυτόχρονα παράγουν ένα συνδυασμό ιδιοτήτων που δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί με κανένα από τα συστατικά στοιχεία όταν δρα μόνο του. Η συγκόλληση των προσανατολισμένων ινών πάνω στο μαλακότερο υλικό της μήτρας έχει ως αποτέλεσμα ένα σύνθετο υλικό ινοπλισμένου πολυμερούς με σαφώς καλύτερες ιδιότητες στη διεύθυνση των ινών. Ανάλογα με το συνδυασμό των υλικών, τα σύνθετα υλικά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- Σύνθετα υλικά ινών (fibrous composites) αποτελούμενα από ίνες εμποτισμένες σε ρητίνη ή μη.
- Σύνθετα υλικά στρωμάτων (laminated composites) αποτελούμενα από επίπεδα διαφόρων υλικών.
- Σύνθετα υλικά σωματιδίων (particulate composites) αποτελούμενα από σωματίδια διαφόρων υλικών σε ένα σώμα.

Βάσει του προσανατολισμού των ινών υπάρχουν δυο γενικές κατηγορίες σύνθετων υλικών ινών:

- Προσανατολισμένα (directional), των οποίων οι ίνες είναι συνεχείς και έχουν όλες την ίδια διεύθυνση.
- Μη προσανατολισμένα (random), των οποίων οι ίνες είναι τυχαία τοποθετημένες στο συνδετικό υλικό.



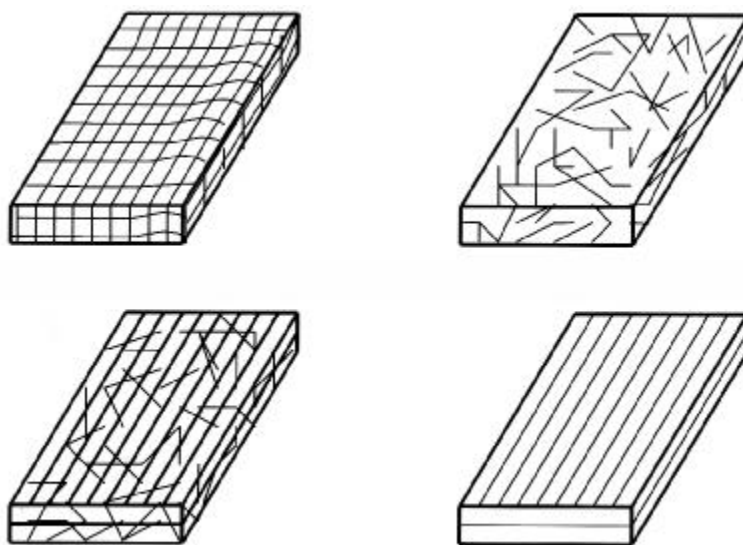
(α) Προσανατολισμένο σύνθετο υλικό (β) Μη προσανατολισμένο σύνθετο υλικό

Γενικοί τύποι σύνθετων υλικών ινών

Οι ίνες των σύνθετων υλικών τοποθετούνται με διάφορους τρόπους ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής. Βάσει του τρόπου τοποθέτησης και του

συνδυασμού των ινών στο συνδετικό υλικό, τα σύνθετα υλικά ινών κατατάσσονται στις ακόλουθες τέσσερις κατηγορίες:

- Πλεκτών ινών (woven fiber), τα οποία αποτελούν συνεχές σώμα χωρίς επιμέρους στρώματα, οπότε και δεν παρουσιάζουν πιθανότητες αποκόλλησης. Η αντοχή τους όμως, είναι μειωμένη εξαιτίας της μεγάλης συγκέντρωσης τάσεων, αλλά και της χρήσης υψηλού ποσοστού ρητίνης.
- Ασυνεχών ινών (chopped fiber), τα οποία έχουν κοντές ίνες διάσπαρτες μέσα στο συνδετικό υλικό. Οι μηχανικές τους αντοχές είναι κατά κανόνα κατώτερες των αντίστοιχων με συνεχείς ίνες.
- Υβριδικά (hybrid), τα οποία αποτελούνται είτε από συνεχείς και ασυνεχείς ίνες είτε από περισσότερους του ενός τύπους ινών (π.χ. ύαλο, γραφίτη). Χρησιμοποιούνται όταν το σύνθετο υλικό ινών μόνο του δεν έχει τις επιθυμητές ιδιότητες.
- Συνεχών ινών (continuous fiber) όπου στρώματα συνεχών ινών ρητίνης τοποθετούνται στην επιθυμητή διεύθυνση και συνδέονται αποτελώντας ένα σώμα. Παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή, αλλά αποκόλληση μεταξύ των στρωμάτων είναι πιθανή.



(α) Σύνθετο υλικό πλεκτών ινών (β) Σύνθετο υλικό ασυνεχών ινών  
(γ) Υβριδικό σύνθετο υλικό και (δ) Σύνθετο υλικό συνεχών ινών

Τύποι σύνθετων υλικών ινών

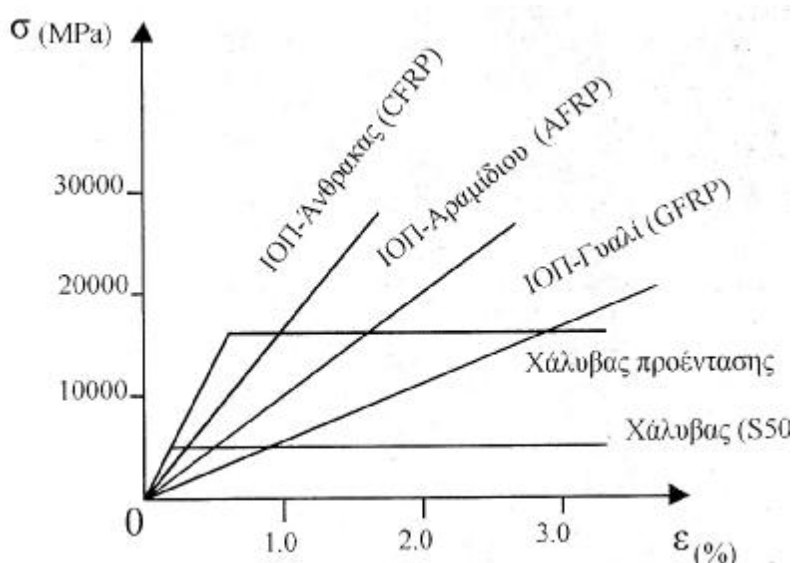
Τα σύνθετα υλικά από οπλισμένα πολυμερή που χρησιμοποιούνται για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών ανήκουν κυρίως στην κατηγορία των προσανατολισμένων σύνθετων υλικών συνεχών ινών (directional continuous fibrous composites). Λόγω του προσανατολισμού των ινών, το σύνθετο υλικό που προκύπτει συμπεριφέρεται ανισοτροπικά, σε αντιστοιχία με τη συμπεριφορά του οπλισμένου σκυροδέματος. Αυτή η ανισοτροπική συμπεριφορά δίνει στο μελετητή τη δυνατότητα να διευθετήσει κατά τέτοιο τρόπο τις στρώσεις του σύνθετου υλικού έτσι ώστε να ενισχύσει το μέλος στη διεύθυνση που αναπτύσσονται οι υψηλότερες τάσεις.

### **ΥΛΙΚΑ**

Η επιλογή του τύπου, της μορφής και της μεθόδου εφαρμογής των σύνθετων υλικών εξαρτώνται κάθε φορά από πολλούς παράγοντες όπως: η γεωμετρία και οι διαστάσεις των προς ενίσχυση στοιχείων, το είδος της εντατικής τους καταπόνησης, οι περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. σε θερμοκρασίες κάτω των 10°C περίπου η σκλήρυνση των ρητινών είναι δύσκολη), η εμπειρία του μηχανικού και του διατιθέμενου εργοτεχνικού προσωπικού και, τέλος, ο προϋπολογισμός της επέμβασης. Βεβαίως εκτός από την προσεκτική επιλογή των σύνθετων υλικών και την επιμελημένη εφαρμογή τους, ένας παράγοντας που καθορίζει αν η επέμβαση θα είναι επιτυχής είναι η αντοχή και η ποιότητα του υποστρώματος (σκυρόδεμα) στο οποίο θα γίνει η επικόλληση. Πολύ χαμηλή εφελκυστική αντοχή ή επιφάνεια τραχεία, γεμάτη σκόνη, λάδια κ.τ.λ. δεν θα εξασφαλίσουν καλή ποιότητα δεσμού μεταξύ σκυροδέματος - σύνθετων υλικών, με αποτέλεσμα πρόωρη αστοχία του οπλισμού ενίσχυσης. Ακολούθως επιχειρείται μία συνοπτική περιγραφή των βασικών συστατικών ενός συστήματος ενίσχυσης: τα σύνθετα υλικά που αποτελούνται από ίνες σε πολυμερική μήτρα και η κόλλα.

## ΥΛΙΚΑ ΙΝΩΝ

Οι ίνες στα σύνθετα υλικά, διαμέτρου 20-25 mm, αποτελούν το φορέα ανάληψης δυνάμεων (κατά κανόνα εφελκυστικών) παράλληλα στη διεύθυνσή τους. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή και η γραμμικά ελαστική συμπεριφορά μέχρι τη θραύση τους. Οι κυριότεροι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται στο πεδίο των ενισχύσεων είναι οι ίνες υάλου (υαλονήματα), οι ίνες άνθρακα (ανθρακονήματα) και οι ίνες πολυαραμιδής, με βασικές ιδιότητες που φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί. Επισημαίνεται ότι οι ιδιότητες αυτές αναφέρονται στις ίνες υπό μονωτική φόρτιση, χωρίς να έχει ληφθεί υπόψη η επίδραση μακροχρόνιας φόρτισης και τυχόν δυνάμεων περιβαλλοντικών παραγόντων.



Σχέσεις τάσης – παραμόρφωσης για σύνθετα υλικά σε εφελκυσμό

### A. Ίνες Υάλου

Τα υαλονήματα εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στο εμπόριο το 1939. Παράγονται με μηχανικό τρόπο από ύαλο που τήκεται. Έχει πυκνότητα 2300-2500 Kgr/m<sup>3</sup>. Το κύριο χαρακτηριστικό του υάλου είναι ότι δεν παρουσιάζει ούτε πλήρως κρυσταλλική δομή αλλά ούτε και ιδιότητες ρευστού. Ανάλογα με το είδος της εφαρμογής για το οποίο αναπτύχθηκαν, υπάρχουν έξι διαφορετικοί τύποι υαλονημάτων. Από αυτούς οι δύο τύποι που χρησιμοποιούνται για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών είναι ο ύαλος-E και ο ύαλος-S. Αν και ο ύαλος-S έχει μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας από τον ύαλο-E, λόγω του υψηλού του κόστους έχει

περιορισμένη εφαρμογή σε σχέση με το δεύτερο. Επίσης σημαντικός είναι και ο ύαλος-Z (ή AR) που έχει μεγάλη αντοχή στο αλκαλικό περιβάλλον.

Οι ίνες υάλου, αν και είναι ανθεκτικές στους περισσότερους διαλύτες, αντιδρούν με ορισμένες αλκαλικές ενώσεις και ισχυρά οξέα. Ο ύαλος παρέχει εξαιρετική θερμική και ηλεκτρική μόνωση. Τα φύλλα υάλου έχουν μικρότερη αντοχή σε κόπωση από τα φύλλα άνθρακα ή πολυαραμιίδης αλλά μεγαλύτερη από τα περισσότερα μέταλλα. Όπως και ο άνθρακας, ο ύαλος δεν παρουσιάζει ερπυστικές παραμορφώσεις, είναι όμως ευπαθής σε διάβρωση. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω ιδιότητες επηρεάζονται σημαντικά από τις περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς και τη μήτρα που επιλέγεται για την παραγωγή σύνθετου υλικού. Ένα πλεονέκτημα των ινών υάλου (έναντι των άλλων τύπων) είναι το αρκετά χαμηλό κόστος.

Είδος υαλονήματος	Εφελκυστική αντοχή (Mpa)	Μέτρο ελαστικότητας (Gpa)	Επιμήκυνση θραύσης (%)	Πυκνότητα (gr/cm <sup>3</sup> )
Ύαλος-E	2000-3000	70-75	3,0-4,5	2,54
Ύαλος-S	3500-4800	85-90	4,5-5,5	2,48

## B. Ίνες Άνθρακα

Οι ίνες άνθρακα διατίθενται στο εμπόριο από τα τέλη της δεκαετίας του 1950. Έχουν πυκνότητα 1800-1900 Kgr/m<sup>3</sup>. Ο άνθρακας παράγεται από πολυακρυλονιτρίλιο (PAN), πίσσα (υποπροϊόν της διύλισης του πετρελαίου) ή ρεγίον με πυρόλυση σε πολύ υψηλή θερμοκρασία (συχνά έως 3000° C). Μέσω της πυρόλυσης απομακρύνονται από το πολυμερές του άνθρακα διάφορες ενώσεις κυανίου και άτομα υδρογόνου. Τα κρυσταλλικά φύλλα άνθρακα που σχηματίζονται εκτείνονται έτσι ώστε να προσανατολιστούν παράλληλα προς τον άξονα της ίνας. Με τον τρόπο αυτό οι κρύσταλλοι στερεοποιούνται σε μία βέλτιστη διάταξη. Θεωρητικά, οι ίνες άνθρακα είναι δυνατό να αποκτήσουν μηχανικές ιδιότητες που προσεγγίζουν τα 100 GPa εφελκυστικής αντοχής και 1000 GPa μέτρου ελαστικότητας. Πάντως οι τιμές αυτές κατά κανόνα δεν αναπτύσσονται πλήρως λόγω ατελειών που παρουσιάζονται στην κρυσταλλική δομή.

Οι ίνες άνθρακα που διατίθενται στο εμπόριο έχουν εφελκυστική αντοχή που κυμαίνεται από 2100 MPa έως 6800 MPa με συνήθη για τις εφαρμογές τιμή της τάξης των 3500 MPa και μέτρο ελαστικότητας από 215 GPa έως 700 GPa. Η επιμήκυνση θραύσης κυμαίνεται από 0,2 έως 2,5%, ανάλογα με το είδος του νήματος και τη μέθοδο κατασκευής.

Οι ίνες άνθρακα είναι χημικά αδρανείς στους περισσότερους διαλύτες είτε αυτοί είναι όξινοι είτε βασικοί και επιπλέον έχουν μεγάλη αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες. Τα φύλλα από ανθρακονήματα και εποξική ρητίνη είναι ανθεκτικά σε κόπωση, ερπυσμό και διάβρωση. Λόγω της δράσης του ως ευγενές μέταλλο, ο άνθρακας έχει υψηλή αγωγιμότητα και μπορεί να προκαλέσει γαλβανική διάβρωση των μετάλλων που έρχονται σε επαφή μαζί του. Για το λόγο αυτό πρέπει να αποφεύγεται η απευθείας επαφή του χάλυβα ή του αλουμινίου με τις ίνες άνθρακα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κόστος των ανθρακονημάτων, παρότι παραμένει αρκετά υψηλό σε σχέση με τα άλλα είδη ινών, ωστόσο έχει μειωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια.

### **Γ. Ίνες Πολυαραμιίδης**

Η εμπορική ονομασία των πρώτων ινών πολυαραμιίδης που κυκλοφόρησαν στην αγορά στις αρχές της δεκαετίας του 1970 είναι Kevlar. Η χρήση των σύνθετων υλικών από ίνες πολυαραμιίδης σε δομικά έργα είναι περιορισμένη σε σχέση με τα υαλονήματα και τα ανθρακονήματα. Κύρια εφαρμογή τους αποτελεί η θωράκιση κατασκευών από κρουστικά φορτία.

Λόγω της χημικής δομής του πολυμερούς από το οποίο παράγονται, οι ίνες πολυαραμιίδης έχουν μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και υψηλή πυκνότητα (1450 Kgr/m<sup>3</sup>). Διακρίνονται σ' εκείνες που προέρχονται από αρωματικό πολυαμιίδιο (Κέβλαρ) και σε εκείνες που προέρχονται από αρωματικό πολυαιθεραμιίδιο (Technora). Παρόλο που ορισμένες από τις ίνες της κατηγορίας αυτής παρουσιάζουν εφελκυστική αντοχή από 3500 έως 4100 MPa και μέτρο ελαστικότητας της τάξης των 175 GPa, που σε εξαιρετικές περιπτώσεις μπορεί να φτάσει έως τα 210 GPa, η συνήθης τιμή της εφελκυστικής αντοχής είναι 3800 MPa, ενώ το μέτρο ελαστικότητας κυμαίνεται από 70 έως 130 GPa. Η επιμήκυνση θραύσης είναι μεταξύ 2,5 και 5,0%. Επιπλέον έχουν μεγάλη αντοχή σε κόπωση και τριβή και είναι ανθεκτικές στους διαλύτες, με εξαίρεση τα ισχυρά οξέα και τις βάσεις. Επειδή είναι υδρόφιλες, παρουσιάζουν μερική

απώλεια αντοχής σε θερμό περιβάλλον με υψηλό ποσοστό υγρασίας. Η θλιπτική τους αντοχή είναι σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη εφελκυστική (περίπου το 20%) ενώ ακόμα, υπό δεδομένη τάση, παρουσιάζουν ερπυστικές παραμορφώσεις.

Κύριο πλεονέκτημα είναι η πιο καλή συμπεριφορά σε κρουστικά φορτία, γι' αυτό και τα τελευταία χρόνια προτιμούνται (π.χ. στη Μ. Βρετανία) για την κατασκευή μανδύων σε υποστυλώματα γεφυρών όπου υπάρχει κίνδυνος πρόσκρουσης οχημάτων.

Άλλοι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται σε ορισμένες εφαρμογές πολιτικού μηχανικού είναι οι ακόλουθες:

- Ίνες γραφίτη: παράγονται όπως και οι ίνες άνθρακα με πυρόλυση. Οι ίνες γραφίτη περιέχουν κατά τουλάχιστον 99% άνθρακα ενώ το ποσοστό άνθρακα των ανθρακονημάτων είναι λιγότερο από 95%.
- Ίνες βορίου: έχουν τη μεγαλύτερη διάμετρο (0,05-0,2mm) σε σχέση με τις άλλες ίνες. Η αντοχή και η ακαμψία τους είναι μεγαλύτερες από αυτές των ινών γραφίτη.
- Ίνες από καρβίδιο του πυριτίου: έχουν υψηλή αντοχή σε οξειδωση και ανθεκτικότητα στις υψηλές θερμοκρασίες.

Ίνες	Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> ·10 <sup>3</sup> )	Μέτρο ελαστικότητας (Gpa)	Λόγος Poisson	Εφελκυστική αντοχή (Mpa)	Παραμόρφωση αστοχίας (%)
Άνθρακα					
Υψηλού E	1,90	380	0,35	2100	0,6
Υψηλής f <sub>t</sub>	1,80	230	0,35	2700	1,3
Γυαλιού					
Τύπου E	2,54	72-75	0,25	3500	4,8
Τύπου Z (ή AR)	2,27	70-76	0,25	2500-3500	3-4,6
Τύπου S2	2,44	85-88	0,25	4600	5
Αραμιδίου					
Κέβλαρ 29	1,45	65	0,32	3500	4
Κέβλαρ 49	1,44	125	0,32	3500	2,1
Χάλυβας	7,86	200	0,28	400-1700	10

## ΜΗΤΡΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η μήτρα στα σύνθετα υλικά αποτελεί τη συγκολλητική ύλη μεταξύ των ινών. Συνήθως χρησιμοποιούνται ρητίνες ως μήτρες για την παραγωγή σύνθετων υλικών ινών. Η ρητίνη αποτελεί τη συνδετική ύλη μεταξύ των ινών και ταυτόχρονα συνεισφέρει στην ανθεκτικότητα και στην ηλεκτρική μόνωση του σύνθετου υλικού. Προκειμένου να αναπτυχθεί ισχυρή μηχανική και χημική σύνδεση μεταξύ ινών και ρητίνης, είναι απαραίτητη η ύπαρξη συνάφειας μεταξύ τους. Επιπλέον πρέπει να υπάρχει χημική συμβατότητα έτσι ώστε να μη λάβουν χώρα ανεπιθύμητες αντιδράσεις κατά τη σύνδεσή τους.

Οι ρητίνες από τη φύση τους είναι τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους ασθενέστερες από τις ίνες στις οποίες εμποτίζονται. Είναι περισσότερο ευπαθείς στη θερμότητα και στην πυρκαγιά και γενικά εμφανίζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στους χημικούς διαλύτες, τα οξέα, τις βάσεις και το νερό σε σχέση με τις ίνες. Όλα τα είδη των ρητινών παρουσιάζουν επίσης σημαντικές ερπυστικές παραμορφώσεις σε σχέση με τα παραδοσιακά δομικά υλικά. Παρόλα αυτά, τα σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών δεν θα μπορούσαν να υπάρξουν χωρίς τις ρητίνες καθώς αυτές είναι που μεταφέρουν τα φορτία και κατανέμουν τις τάσεις στις ίνες κάθε στρώσης του πολυμερούς. Με τον τρόπο αυτό επιτρέπουν στο ινοπλισμένο πολυμερές να συμπεριφέρεται σχεδόν σαν ομογενές υλικό.

Η μεγάλη διάρκεια ζωής που χαρακτηρίζει τις μήτρες πολυμερών σχετίζεται με την προοδευτική αλλαγή των φυσικών τους ιδιοτήτων, η οποία λαμβάνει χώρα με την πάροδο του χρόνου και τη φόρτιση. Η προέκταση των σύνθετων υλικών μπορεί να έχει εξαιρετικά σημαντική επίδραση στη διάρκεια ζωής της μήτρας πολυμερούς. Η διάρρηξη λόγω ερπυσμού που αποτελεί τυπική μορφή αστοχίας των ινοπλισμένων πολυμερών οφείλεται στην ιξωδοπλαστική συμπεριφορά της μήτρας από πολυμερές και όχι στις ίνες.

Οι ρητίνες που χρησιμοποιούνται συνήθως για την παραγωγή σύνθετων υλικών για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών είναι οι εποξικές, οι πολυεστερικές και οι βινυλεστερικές. Οι σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες των τριών αυτών κατηγοριών ρητινών παρουσιάζονται στον πίνακα.



## A. Εποξικές ρητίνες

Οι εποξικές ρητίνες θεωρούνται γενικά οι καλύτερες μήτρες για χρήση σε ινοπλισμένα πολυμερή λόγω της μεγάλης αντοχής, συγκολλητικής ικανότητας, ανθεκτικότητας σε κόπωση και χημική διάβρωση καθώς και της χαμηλής συστολής ξηράνσεως που παρουσιάζουν. Όπως συμβαίνει και με τα άλλα είδη ρητινών, οι εποξικές ιδιότητες ποικίλουν σημαντικά ανάλογα με τη ρητίνη βάσης και τις χημικές ενώσεις που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τους.

Ο συντελεστής ιξώδους των εποξικών ρητινών είναι γενικά μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο συντελεστή τόσο των πολυεστερικών όσο και των βινυλεστερικών ρητινών. Χρειάζονται επίσης περισσότερο χρόνο για να αναπτύξουν πλήρως τις μηχανικές τους ιδιότητες και έχουν υψηλότερο κόστος σε σχέση με τις δύο άλλες κατηγορίες ρητινών.

Είδος ρητίνης	Εφελκυστική αντοχή (Mpa)	Μέτρο ελαστικότητας (Gra)	Επιμήκυνση θραύσης (%)	Πυκνότητα (gr/cm <sup>3</sup> )
Εποξική	55-130	2,0-4,5	4,0-14,0	1,20-1,30
Πολυεστερική	35-104	2,1-4,1	<5,0	1,10-1,46
Βινυλεστερική	73-81	3,0-3,6	3,5-5,5	1,12-1,32

## B. Πολυεστερικές ρητίνες

Οι ρητίνες αυτές αποτελούν τον κύριο όγκο των πολυμερών που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία παραγωγής σύνθετων υλικών. Πρόκειται για ακόρεστους πολυεστέρες που παράγονται από την αντίδραση γλυκόλης, είτε με διβασικά οξέα είτε με ανυδρίτες. Λόγω της μεγάλης ποικιλίας των συστατικών τους στοιχείων, οι ιδιότητες των πολυεστερικών ρητινών μπορούν να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους.

Η χημική αντίδραση με την οποία παράγονται οι πολυεστέρες είναι σημαντικά εξώθερμη, για το λόγο αυτό απαιτείται μεγάλη προσοχή στη χρήση της ποσότητας της μάζας των αντιδρώντων. Εάν η μάζα είναι μεγάλη το φύλλο πολυεστέρα μπορεί να αναφλεγεί ή να ρηγματωθεί. Αντίθετα, εάν η μάζα είναι μικρή η θερμότητα που εκλύεται δεν επαρκεί για την ολοκλήρωση της αντίδρασης.

Οι πολυεστέρες παρουσιάζουν μέτρια ανθεκτικότητα στους διαλύτες και τα οξέα ενώ είναι ευπαθείς στις βάσεις και στο νερό υψηλής θερμοκρασίας. Είναι γενικά λιγότερο ανθεκτικοί σε κόπωση συγκριτικά με τις εποξικές και βινυλεστερικές ρητίνες. Η παραμόρφωση θραύσης είναι κατά κανόνα της τάξης του 1%. Ωστόσο το κυριότερο μειονέκτημα των πολυεστερικών ρητινών για χρήση τους σε κατασκευές που κατοικούνται είναι η δυσάρεστη οσμή λόγω της χημικής τους σύστασης.

### **Γ. Βινυλεστερικές ρητίνες**

Πρόκειται για υβριδικές ρητίνες που παράγονται με αλυσιδωτές αντιδράσεις ενός εποξικού πολυμερούς με ακρυλικές ή μεθακρυλικές ενώσεις. Λόγω της παρουσίας του εποξικού πολυμερούς, οι βινυλεστερικές ρητίνες είναι περισσότερο εύκαμπτες, σκληρότερες, πιο ανθεκτικές σε κόπωση και λιγότερο χημικά ενεργές σε σχέση με τις πολυεστερικές. Οι υδροξυλικές ενώσεις που περιέχονται στο εποξικό πολυμερές σχηματίζουν δεσμούς υδρογόνου με αντίστοιχες ενώσεις στην επιφάνεια των ινών υάλου. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται σημαντικά η σύνδεση της ρητίνης με τις ίνες, αν και δεν φτάνει στο επίπεδο της συγκολλησιμότητας των εποξικών ρητινών. Αυτό οφείλεται κυρίως στη μεγάλη απώλεια όγκου των βινυλεστερικών ρητινών λόγω συστολής ξηράνσεως.

Αντιθέτως, οι βινυλεστερικές ρητίνες δεν έχουν τόσο υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα σε κόπωση όσο οι εποξικές. Λόγω της χημικής τους σύστασης αντιμετωπίζουν επίσης το ίδιο πρόβλημα δυσοσμίας με τις πολυεστερικές ρητίνες. Η συστολή ξηράνσεως είναι γενικά της τάξης του 5 με 10%. Το κόστος τους είναι συνήθως μεταξύ του κόστους των εποξικών και των πολυεστερικών ρητινών.

## ΚΟΛΛΑ

Η κόλλα (κατά κανόνα εποξειδική ρητίνη δύο συστατικών) εφαρμόζεται μεταξύ του σκυροδέματος και του σύνθετου υλικού, εξασφαλίζοντας έτσι τη συνεργασία τους και τη μεταφορά τάσεων από το πρώτο στο δεύτερο. Η χρήση εποξειδικών ρητινών στις κατασκευές προϋποθέτει την κατασκευή τριών βασικών εννοιών. Η πρώτη είναι ο χρόνος εργασιμότητας (pot life), η δεύτερη είναι ο χρόνος εφαρμογής (open time) και η τρίτη είναι η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης Tg (glass transition temperature).

Ο χρόνος εργασιμότητας είναι αυτός που έχει κανείς στη διάθεσή του για να χρησιμοποιήσει την κόλλα με ευκολία πριν αρχίσει να μειώνεται το ιξώδες της και να σκληρύνεται στο δοχείο όπου έγινε η ανάμιξη. Εξαρτάται από τον τύπο κόλλας, από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος αλλά και από την ποσότητα κόλλας που προκύπτει με την ανάμιξη δύο συστατικών. Ενδεικτικοί χρόνοι για ποσότητα (τυπικής) κόλλας 5 Kgr είναι 90 min σε 15° C και 30 min σε 35° C.

Ο χρόνος εφαρμογής αντιπροσωπεύει το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο η κόλλα είναι ενεργή, δηλαδή έχει ικανοποιητικές συγκολλητικές ιδιότητες. Μέσα σε αυτό το διάστημα θα πρέπει να ολοκληρώνεται η επικόλληση του οπλισμού ενίσχυσης στην επιφάνεια του σκυροδέματος.

Τέλος, στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (χαρακτηριστική ιδιότητα όλων των πολυμερών) οι κόλλες υφίστανται ραγδαία απομείωση του μέτρου ελαστικότητας, οπότε έχουν περιορισμένη πλέον ικανότητα μεταφοράς δυνάμεων.

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Οι τυπικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών περιλαμβάνουν το χαμηλό ειδικό βάρος, τον υψηλό λόγο αντοχής προς βάρος και τον υψηλό λόγο μέτρου ελαστικότητας προς βάρος. Επίσης τα περισσότερα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή είναι εξαιρετικά ανθεκτικά σε ηλεκτροχημική διάβρωση.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή είναι η σχεδόν γραμμική καμπύλη έντασης - παραμόρφωσης έως την αστοχία τους. Παρόλο τα υλικά που συνθέτουν τις μήτρες επιδέχονται πλαστική παραμόρφωση, οι ίνες γενικά συμπεριφέρονται μόνο ελαστικά. Καθώς όμως η συμπεριφορά του σύνθετου υλικού καθορίζεται κυρίως από τη συμπεριφορά των ινών, οι οποίες αποτελούν και τον κύριο φορέα μεταφοράς του φορτίου, πολύ σπάνια τα ινοπλισμένα πολυμερή που χρησιμοποιούνται για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών παρουσιάζουν πλαστική παραμόρφωση ή έστω διαρροή. Αντίθετα η θραύση είναι η τυπική μορφή αστοχίας ενός σύνθετου υλικού που καταπονείται από οριακή τιμή τάσης.

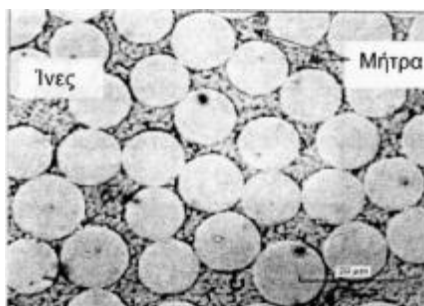
Στον πίνακα παρουσιάζονται η εφελκυστική αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας και το πάχος μίας στρώσης των δύο συνηθέστερων τύπων ινοπλισμένων πολυμερών υγρής εφαρμογής που χρησιμοποιούνται για ενίσχυση δομικών στοιχείων. Οι τύποι αυτοί προκύπτουν με συνδυασμό είτε υαλονημάτων και εποξικής ρητίνης είτε ανθρακονημάτων και εποξικής ρητίνης.

Στη διάθεση του μηχανικού βρίσκονται επίσης με τη μορφή ελασμάτων μικρού πλάτους (60-100mm) και πάχους της τάξης του 1,5 mm προκατασκευασμένα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα τα οποία επικολλούνται στο σκυρόδεμα μέσω ρητίνης. Εφαρμόζονται κυρίως για την ενίσχυση πλακών και δοκών.

Τύπος σύνθετου υλικού	Εφελκυστική αντοχή (Mpa)	Μέτρο ελαστικότητας (Gpa)	Πάχος στρώσης (mm)
Υαλονήματα και εποξική ρητίνη	1800-4300	65-80	0,30-1,30
Ανθρακονήματα υψηλής αντοχής και εποξική ρητίνη	2200-4300	200-450	0,12-0,60

## ΜΙΚΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες ενός σύνθετου υλικού καθορίζονται από τα αντίστοιχα των συστατικών του. Από τη σκοπιά της μικρομηχανικής, προκειμένου να καθοριστούν οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού θα πρέπει να είναι γνωστό το ποσοστό με το οποίο συμμετέχει το κάθε υλικό στο τελικό προϊόν. Τα σύνθετα υλικά που εφαρμόζονται στο πεδίο των ενισχύσεων προκύπτουν από τον συνδυασμό συνεχών ινών, συνήθως μίας διεύθυνσης και πολυμερικής μήτρας (γι' αυτό ονομάζονται και ινοπλισμένα πολυμερή). Στην περίπτωση ελασμάτων σύνθετων υλικών (π.χ. για την καμπτική ενίσχυση δοκών) οι ίνες καταλαμβάνουν περίπου το 50-70% του συνολικού όγκου υλικού, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για μανδύες που κατασκευάζονται με επί τόπου εφαρμογή της ρητίνης 20-35%.



Οι βασικές μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών με ίνες σε μια κυρίως διεύθυνση μπορούν είτε να μετρηθούν πειραματικά (αυτός είναι ο ορθότερος τρόπος εύρεσης των ιδιοτήτων αυτών), είτε να εκτιμηθούν βάσει των αντίστοιχων για τις ίνες και τη μήτρα, μέσω της σχέσης που είναι γνωστή και ως νόμο σύνθεσης.

Ο νόμος της σύνθεσης (Rule of Mixtures) χρησιμοποιεί τα ποσοστά συμμετοχής ινών και ρητίνης στο τελικό προϊόν για την πρόβλεψη των μηχανικών ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού. Ο νόμος αυτός περιγράφεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$v_f + v_m + v_n = 1$$

$$w_f + w_m = 1$$

$$q_c = q_f v_f + q_m v_m$$

όπου  $v_f$ ,  $v_m$ ,  $v_n$  είναι οι λόγοι όγκου των ινών, της ρητίνης και των κενών αντίστοιχα και ισούται με  $v_i = v_i / v$  όπου  $v$  ο συνολικός όγκος του σύνθετου

υλικού και  $v_i$  με  $i=f,m,n$  ο όγκος των ινών, της ρητίνης και των κενών αντίστοιχα.

Επίσης  $w_f$  και  $w_m$  είναι οι λόγοι βάρους των ινών και της ρητίνης και ισούται με  $w_i = w_i / w$  όπου  $w$  το συνολικό βάρος του σύνθετου υλικού και  $w_i$  με  $i=f,m$  το βάρος του αντίστοιχου συστατικού στοιχείου.

Τέλος  $q_f$ ,  $q_m$  και  $q_c$  είναι οι πυκνότητες των ινών, της ρητίνης και η συνολική του σύνθετου υλικού αντίστοιχα.

Επίσης η σχέση που συνδέει το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού  $E$  με το μέτρο ελαστικότητας των ινών  $E_f$  και το μέτρο ελαστικότητας της μήτρας  $E_m$  είναι η ακόλουθη:

$$E = E_f v_f + E_m v_m$$

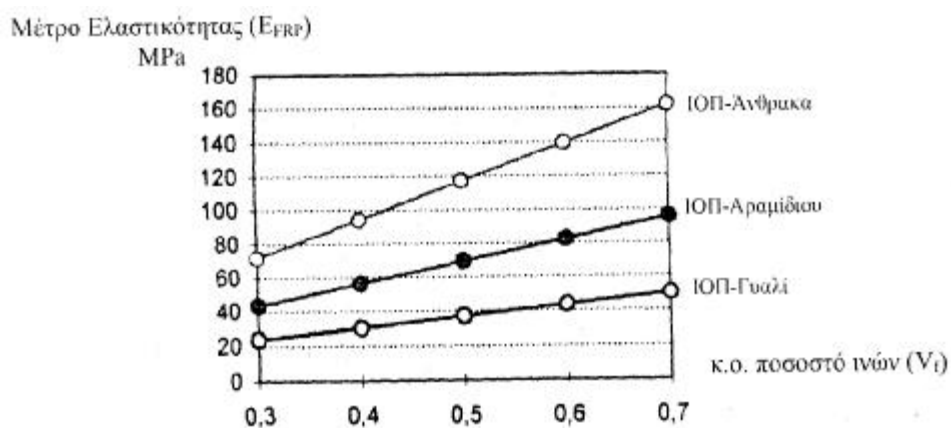
Εάν  $S$ ,  $S_f$ ,  $S_m$  είναι η εφελκυστική αντοχή του σύνθετου υλικού, η εφελκυστική αντοχή της ίνας και η εφελκυστική τάση της μήτρας κατά την αστοχία της ίνας αντίστοιχα, τότε ισχύει:

$$S = S_f v_f + S_m (1 - v_f)$$

Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι επειδή  $E_f / E_m \gg 1$  και  $S_f / S_m \gg 1$ , οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν κατά προσέγγιση ακόμα και αν στα αθροίσματα του δεξιού σκέλους αγνοηθούν οι δεύτεροι όροι. Δηλαδή τόσο το μέτρο ελαστικότητας όσο και η εφελκυστική αντοχή των σύνθετων υλικών ουσιαστικά μπορούν να εκτιμηθούν από το γινόμενο της αντίστοιχης ιδιότητας για τις ίνες επί το ογκομετρικό ποσοστό αυτών.

Οι προμηθευτές συστημάτων ενίσχυσης με βάση τα σύνθετα υλικά διαθέτουν στην αγορά συνήθως είτε προκατασκευασμένα ελάσματα, οπότε η παραγωγή του σύνθετου υλικού έχει γίνει σε βιομηχανική μονάδα, είτε υφάσματα με ίνες μίας διεύθυνσης. Στην πρώτη περίπτωση οι μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών είναι γνωστές εκ των προτέρων π.χ. βάσει εργαστηριακών μετρήσεων. Στη δεύτερη όμως, όπου η επικόλληση των ινών με τη μήτρα γίνεται επί τόπου του έργου, υπάρχει μια σχετική αβεβαιότητα ως προς την ποσότητα ρητίνης η οποία θα εμποδίσει τις ίνες και άρα ως προς το τελικό ογκομετρικό ποσοστό ινών στο σύνθετο υλικό. Οι πιθανές λύσεις σχετικά με τις τιμές ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών που θα πρέπει να υιοθετηθούν στους υπολογισμούς είναι δύο: α) χρήση των ιδιοτήτων των τελικώς διαμορφωμένων συστημάτων (σύνθετων υλικών) όπως αυτές έχουν μετρηθεί (εργαστηριακά) από τον προμηθευτή με βάση τη χρήση δεδομένης

ποσότητας ρητίνης β) χρήση των ιδιοτήτων των ινών, αφού προηγηθεί ελαφρά μείωση (βάσει πολλαπλασιασμού με μειωτικό συντελεστή  $r_1$ , ο οποίος θα πρέπει να έχει προσδιοριστεί πειραματικά από τον προμηθευτή).



Εξάρτηση του μέτρου ελαστικότητας από το ποσοστό των ινών

Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας(Gpa)	Παραμόρφωση αστοχίας (%)
Σύνθετο υλικό με ίνες γυαλιού(GFRP)	50	3%
Σύνθετο υλικό με ίνες αραμιδίου(AFRP)	65-120	2-3%
Σύνθετο υλικό με ίνες άνθρακα (CFRP)	35-190	1-1,5%
Χάλυβας	200	10%

## ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

### Περιβαλλοντικές συνθήκες

Γενικά, τα σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών σχεδιάζονται και παρασκευάζονται έτσι ώστε να είναι ανθεκτικά υπό φυσιολογικές συνθήκες περιβάλλοντος για μακρές χρονικές περιόδους.

Τα σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών παρουσιάζουν μεγάλη διάρκεια ζωής για ένα λογικό εύρος περιβαλλοντικών συνθηκών, οι οποίες περιλαμβάνουν

- Θερμοκρασία: από  $-30^{\circ}\text{C}$  έως  $60^{\circ}\text{C}$  για μακρά έκθεση, έως  $1100^{\circ}\text{C}$  για βραχεία έκθεση (μικρότερη από 2 ώρες) σε φωτιά.
- Υγρασία: πλήρης βύθιση σε γλυκό ή αλμυρό νερό για έκθεση μακράς διάρκειας από  $0^{\circ}\text{C}$  έως  $40^{\circ}\text{C}$ .
- pH: από 3,0 έως 10,0 για μακρά έκθεση.
- Υδρογονάνθρακες: απορρόφηση συγκεκριμένης ποσότητας για μακρές χρονικές περιόδους.

Σε εφαρμογές σε έντονα αλκαλικό περιβάλλον π.χ. ενίσχυση πασσάλων στη θάλασσα, απαιτείται χρήση ειδικών ρητινών με ίνες άνθρακα ή υάλου. Αξίζει να τονιστεί ότι οι προδιαγραφές ενός καλά σχεδιασμένου συστήματος ινοπλισμένων πολυμερών πρέπει να περιέχουν στοιχεία για έκθεση του συστήματος σε κάθε μία από τις παραπάνω συνθήκες για περιόδους έως 10.000 ώρες.

### Επίδραση της θερμοκρασίας και του περιβάλλοντος

Για το φυσιολογικό εύρος των θερμοκρασιών στις οποίες χρησιμοποιούνται τα περισσότερα συστήματα ινοπλισμένων πολυμερών δεν αναμένονται σημαντικές αλλαγές στη συμπεριφορά τους, με την προϋπόθεση ότι τόσο η επιλογή όσο και η εφαρμογή του συστήματος έχει γίνει με τον ενδεδειγμένο τρόπο. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης υάλου ( $T_g$ ) είναι το σημείο πέρα από το οποίο η συμπεριφορά του ινοπλισμένου πολυμερούς αλλοιώνεται δραματικά παρουσιάζοντας σημαντική μείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του. Η παρεχόμενη θερμική ενέργεια για αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από την  $T_g$  επιτρέπει στις χημικές αλυσίδες της



ρητίνης να μετακινηθούν και να γίνουν πιο εύκαμπτες. Ως εκ τούτου μειώνεται η συμμετοχή της ρητίνης στην ανάληψη φορτίου αλλά και η ικανότητά της να μεταφέρει τα φορτία ισομερώς στις ίνες, προκαλώντας περαιτέρω φόρτιση μεμονωμένων ινών, κυρίως των κοντύτερων από αυτές. Κατά συνέπεια είναι πιθανό να υπάρξει υπέρβαση της αντοχής και ενδεχόμενη αστοχία. Η διαδικασία είναι εξελικτική και έχει ως αποτέλεσμα την απομείωση της φέρουσας ικανότητας του ινοπλισμένου πολυμερούς κατά 30 με 40 % σε ακραίες περιπτώσεις.

Κατά το σχεδιασμό συστημάτων ινοπλισμένων πολυμερών πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η πιθανή επιβλαβής επίδραση θερμοκρασιών μεγαλύτερων από 80° C. Σκούρες επιφάνειες που εκτίθενται άμεσα στο ηλιακό φως, έχουν καταγράψει θερμοκρασίες της τάξης των 70° C. Σύνθετα υλικά έχουν επίσης δοκιμαστεί σε ακραίες αρνητικές θερμοκρασίες της τάξης των - 40° C και δεν έχουν διαπιστωθεί δυσμενείς επιπτώσεις στην εν γένει συμπεριφορά τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε θερμοκρασία μεταξύ -10° C και -30° C αυξάνεται σημαντική δυσκαμψία του υλικού με συνέπεια μια εξαιρετικά ψαθυρή μορφή αστοχίας αλλά και μείωση της αντοχής σε κρούση. Πειράματα που έχουν γίνει σε μεμονωμένες στρώσεις ινοπλισμένου πολυμερούς δεν έχουν δείξει απομείωση της αντοχής των ινών λόγω επαναλαμβανόμενης εναλλαγής ψύξης – απόψυξης. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν τόσο σε συνθήκες τριετούς σταθερής έκθεσης όσο και επιταχυνόμενης έκθεσης για την προσομοίωση πεντηκονταετούς πραγματικής έκθεσης. Η μοναδική αλλοίωση της εποξικής ρητίνης που διαπιστώθηκε με τη μέθοδο της υπέρυθρης φασματοσκόπησης περιοριζόταν στην επιφανειακή της στρώση, χωρίς να επηρεάζει τη συνολική συμπεριφορά του ινοπλισμένου πολυμερούς. Επίσης ανακυκλιζόμενες ψύξεις και αποψύξεις είχαν μικρή ή καθόλου επίδραση σε σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών όταν για την παρασκευή τους είχαν χρησιμοποιηθεί υλικά υψηλής ποιότητας και αντοχή σε υγρασία.

Όσον αφορά στη συμπεριφορά των σύνθετων υλικών σε περίπτωση πυρκαγιάς, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται, τα σύνθετα υλικά που έρχονται σε άμεση επαφή με τη φωτιά αναφλέγονται, εκτός εάν επιχριστούν ή επαλειφθούν με ειδική ρητίνη. Οι υψηλές

θερμοκρασίες της τάξης των 50-80° C μειώνουν σημαντικά την ικανότητα ανάληψης δυνάμεων στις ρητίνες (μήτρα σύνθετων υλικών, κόλλα στη διεπιφάνεια σύνθετων υλικών-σκυροδέματος). Ακόμα υψηλότερες θερμοκρασίες όπως αυτές κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς προκαλούν πλήρη αποσύνθεση των ρητινών (πολλές από τις οποίες κατά την καύση τους εκλύουν τοξικά αέρια) και επομένως τα σύνθετα υλικά δεν μπορούν να φέρουν τάσεις. Οι θερμοκρασίες “αποσύνθεσης” των ινών είναι 1.000° C για το γυαλί, 650° C για τον άνθρακα και 200° C για το αραμίδιο. Πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι μανδύες σύνθετων υλικών με ίνες άνθρακα σε εποξειδική μήτρα υφίστανται απώλεια αντοχής για θερμοκρασίες πάνω από 260° C περίπου. Έτσι, κατά τη διάρκεια ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών (αλλά και μετά) το σύστημα ενίσχυσης θα πρέπει να θεωρείται ανενεργό, εκτός αν φέρει πυροπροστασία. Προστασία επιτυγχάνεται με ειδικά επιχρίσματα ή κοινά επιχρίσματα μεγάλου πάχους (40-50mm). Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ειδικά προστατευτικά όπως γυψοσανίδες. Το επίχρισμα προστατεύει τα υλικά και ιδιαίτερα τη ρητίνη όχι μόνο από τη φωτιά και γενικά τις υψηλές θερμοκρασίες αλλά και από τη γήρανση λόγω της υπερϊώδους ακτινοβολίας. Επίσης η τοποθέτηση επιχρίσματος αποτελεί οικονομικότερη λύση και επιπλέον δίνει τη δυνατότητα βαφής και διακοσμητικής επέμβασης στο δομικό στοιχείο που ενισχύεται.

### **Συμπεριφορά στο νερό**

Το νερό αποτελεί εν γένει εξαιρετικά δυσμενές περιβάλλον για όλα τα δομικά υλικά. Ο χάλυβας οξειδώνεται, το σκυρόδεμα ενανθρακώνεται, το ξύλο σαπίζει, οι ρητίνες μπορούν να αποσχιστούν λόγω σκλήρυνσης της αλυσίδας του πολυμερούς και ο ύαλος μπορεί να χάσει την εφελκυστική του αντοχή. Κατά συνέπεια, η κύρια μέριμνα όσον αφορά στα σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών είναι η αντοχή της μήτρας από ρητίνη σε παρατεταμένη έκθεση σε νερό. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι στην διάρκεια των εξήντα περίπου χρόνων που ινοπλισμένα πολυμερή υαλονημάτων χρησιμοποιούνται για την επένδυση υφάλων πλοίων, δεν έχει παρατηρηθεί απομείωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων λόγω σήψης ή

διάβρωσης, με αποτέλεσμα, όταν τα πλοία αυτά εγκαταλείπονται, να μην υπάρχει εύκολος τρόπος αποσύνθεσής τους. Το παραπάνω παράδειγμα δεν σημαίνει ότι η υγρασία δεν έχει επίδραση στη συμπεριφορά των ινοπλισμένων πολυμερών, αλλά ότι η επίδραση είναι μικρή και χρειάζεται εξαιρετικά μακρά χρονική περίοδο για να εκδηλωθεί. Μετά το πέρας του χρόνου αυτού, οι χημικές αλυσίδες του πολυμερούς είναι πλήρως υδατοδιαλυτές, μεταλλικά ιόντα διηθούνται από τα υαλονήματα και το σύνθετο υλικό γίνεται εξαιρετικά εύθραυστο.

Η μήτρα από ρητίνη απορροφά νερό. Η ποσότητα του νερού που απορροφάται εξαρτάται από το είδος της ρητίνης και τη θερμοκρασία του νερού. Οι άμεσες συνέπειες της απορρόφησης νερού από τη μήτρα είναι συνήθως οι ακόλουθες δύο: πρώτον, η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης υάλου ( $T_g$ ) μειώνεται και, δεύτερον, η ρητίνη χάνει τη δυσκαμψία της. Και τα δύο φαινόμενα είναι μερικώς ανατρέψιμα σε συστήματα με εποξικές ρητίνες. Αντίθετα, στις πολυεστερικές και βινυλεστερικές ρητίνες, οι μεταβολές μπορεί να είναι είτε ανατρέψιμες είτε όχι, ανάλογα με το χρόνο και τη θερμοκρασία της έκθεσης. Με βάση τα παραπάνω μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι όσο ψηλότερη είναι η θερμοκρασία, τόσο ταχύτερες και δυσμενέστερες είναι οι μόνιμες επιπτώσεις της διείσδυσης υγρασίας. Προσεγγιστικά, η ταχύτητα των χημικών αντιδράσεων διπλασιάζεται για κάθε αύξηση της θερμοκρασίας κατά  $10^{\circ}\text{C}$ .

- Η υγρασία αποκτά πρόσβαση στο ινοπλισμένο πολυμερές μέσω τριών διαφορετικών οδών:
- Μέσω της τριχοειδούς δράσης κατά μήκος του διαμήκου άξονά της ίνας στη διεπιφάνεια ρητίνης και ίνας.
- Μέσω ρωγμών και κενών στη δομή του σύνθετου υλικού.
- Μέσω διάχυσης διαμέσου της μήτρας.

Λόγω της υψηλής πολικότητας των μορίων υάλου, τα υαλονήματα απορροφούν υγρασία κατά τη διάρκεια της παρασκευής, αποθήκευσης, μεταφοράς και εφαρμογής τους στο δομικό στοιχείο. Οι ίνες πολυαραμίδης απορροφούν υγρασία έως 13% του βάρους τους, η οποία μπορεί να έχει επιβλαβή επίδραση στην εφελκυστική τους αντοχή, καθώς και στη

διεπιφάνεια ρητίνης και ινών. Τα ανθρακονήματα είναι αδρανή στο νερό ενώ οι ίνες υάλου παρουσιάζουν μικρή μείωση αντοχής. Επομένως η επίδραση της υγρασίας σε αυτού του είδους τα σύνθετα υλικά περιορίζεται στην επίδραση που έχει στη ρητίνη της μήτρας.

Πλήρης στεγάνωση στοιχείων σκυροδέματος με σύνθετα υλικά δημιουργεί στεγανές εξωτερικές επιφάνειες σε νερό με αποτέλεσμα την προστασία τους από περιβαλλοντικούς παράγοντες. Πρέπει όμως να επισημανθεί ότι σε στοιχεία τα οποία πρέπει να 'αναπνέουν' π.χ. πλάκες, συνίσταται να αποφεύγεται η τοποθέτηση καθολικού μανδύα σύνθετου υλικού.

Με την επιλογή της κατάλληλης ρητίνης, ινοπλισμένα πολυμερή ανθρακονημάτων μπορούν να εφαρμοστούν σε κατασκευές που είναι μέσα στο νερό. Στις περιπτώσεις αυτές μπορεί κανείς να αξιοποιήσει τη δυνατότητα που έχουν τα σύνθετα υλικά να αυξάνουν την πλαστιμότητα, την αντοχή και τη δυσκαμψία των στοιχείων στα οποία εφαρμόζονται, αλλά και να τα χρησιμοποιήσει ως στεγανωτική μόνωση. Παράδειγμα τέτοιων εφαρμογών είναι η θεμελίωση των κατασκευών στη θάλασσα, η ενίσχυση λιμενικών εγκαταστάσεων, η ενίσχυση και στεγάνωση σηράγγων και αγωγών μεγάλων διαστάσεων κ.τ.λ.

## **ΥΠΕΡΙΩΔΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ**

Η υπεριώδης ακτινοβολία του ήλιου (UV) επιφέρει αλλοίωση της ισχύος των δεσμών και γενικά μείωση της αντοχής στα πολυμερή (μήτρα σύνθετων υλικών) που εκτίθενται σε αυτή. Φαινομενικά, το αποτέλεσμα της επίδρασης της υπεριώδους ακτινοβολίας είναι η χρωματική αλλοίωση και μικρορηγματώση των εκτιθέμενων επιφανειών. Για την περίπτωση των σύνθετων υλικών η υπεριώδης ακτινοβολία επηρεάζει κάπως την επιφανειακή στρώση ρητίνης, επιφέροντας χρωματική αλλοίωση και ενδεχομένως μικρή μείωση της αντοχής της, όχι όμως και τις ίνες (εξαίρεση αποτελούν και οι ίνες πολυαραμίδης, οι οποίες είναι ελαφρώς ευπαθείς). Ως μέθοδος προστασίας στην περίπτωση απευθείας έκθεσης στον ήλιο επί μακρό προτείνεται η εφαρμογή επιχρισμάτων ή ειδικών αντι-UV (ακρυλικής ή πολυουρεθανικής σύστασης) βαφών ανοιχτού χρώματος (π.χ. γκρι ανοιχτό).

## **ΑΛΚΑΛΙΚΟ ΚΑΙ ΟΞΙΝΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**

Γενικά, τόσο το αλκαλικό περιβάλλον (π.χ. αυτό του σκυροδέματος) όσο και το όξινο δεν έχουν δυσμενείς επιδράσεις σε σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα. Οι ίνες γυαλιού είναι όμως αρκετά ευπαθείς (υφίστανται μείωση αντοχής), ενώ οι ίνες αραμιδίου έχουν ενδιάμεση συμπεριφορά. Προστασία από ευπαθείς ίνες μπορεί να παρέχεται από την μήτρα (ρητίνη), υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι αυτή της απομονώνει από το αλκαλικό ή το όξινο περιβάλλον.

## **ΓΑΛΒΑΝΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ**

Πρέπει να αποφεύγεται η επαφή ινών άνθρακα με χάλυβα. Η επαφή των δύο υλικών προκαλεί γαλβανική διάβρωση του χάλυβα. Το πρόβλημα δεν υφίσταται όταν χρησιμοποιούνται σύνθετα υλικά ή με ίνες υάλου ή πολυαραμιδής.

## **ΕΡΠΥΣΜΟΣ**

Μεταξύ όλων των συστατικών στοιχείων ινοπλισμένων πολυμερών μόνο τα ανθρακονήματα και τα υαλονήματα δεν υπόκεινται σε ερπυσμό. Τόσο οι ίνες πολυαραμιδής όσο και οι μήτρες των ρητινών, άλλες λιγότερο και άλλες περισσότερο, παρουσιάζουν ερπυσμό. Ο βαθμός του ερπυσμού είναι συνάρτηση του υλικού της ίνας και του προσανατολισμού των ινών σε σχέση με την εφαρμοζόμενη ένταση. Εάν πρόκειται για ίνες υάλου ή άνθρακα, οι οποίες δεν στρεβλώνονται αλλά παραμένουν αμετακίνητες στα άκρα τους, δεν παρατηρείται ερπυσμός και το σύνθετο υλικό συμπεριφέρεται σχεδόν πλήρως ελαστικά. Οι ίνες μπορεί να γίνονται ευθείες όταν υπόκεινται σε φόρτιση, το ινοπλισμένο πολυμερές μπορεί να ολισθαίνει στις θέσεις που αγκυρώνεται, ενώ υπάρχει επίσης η πιθανότητα επιπλέον έντασης των ινών λόγω χαλάρωσης της μήτρας του πολυμερούς, ακόμα και μετά την απομάκρυνση της εξωτερικής φόρτισης. Αν και τα παραπάνω φαινόμενα προκαλούν 'έκταση' του σύνθετου υλικού. Δεν αποτελούν πραγματικό ερπυσμό και τα περισσότερα έχουν ασήμαντες επιδράσεις στις διαστάσεις του ινοπλισμένου πολυμερούς. Στην περίπτωση

όμως που ο άξονας των ινών βρίσκεται εκτός του επιπέδου της φόρτισης ή οι ίνες είναι από πολυαραμίδη, μπορεί να είναι σημαντική η παραμόρφωση λόγω ερπυσμού του σύνθετου υλικού.

Σε εφαρμογές σύνθετων υλικών για την ενίσχυση κατασκευών σε σεισμό ο ερπυσμός σπάνια αποτελεί φαινόμενο προεξέτασης διότι τα σύνθετα υλικά θα αναπτύξουν τάσεις μόνο για τα πρόσθετα φορτία επιπλέον του ίδιου βάρους και επίσης το υφιστάμενο σκυρόδεμα έχει αναπτύξει το μεγαλύτερο τμήμα των φαινομενικών παραμορφώσεών του.

### **ΘΡΑΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΛΟΓΩ ΕΝΤΑΣΗΣ**

Στα περισσότερα ινοπλισμένα πολυμερή παρατηρείται το φαινόμενο της θραύσης λόγω έντασης υπό διατηρούμενη φόρτιση. Η διάβρωση λόγω έντασης συμβαίνει όταν η ατμόσφαιρα που περιβάλλει το σύνθετο υλικό περιέχει διαβρωτικά στοιχεία αλλά όχι επαρκή ώστε να προκαλέσουν διάβρωση του υλικού χωρίς την ταυτόχρονη δράση διατηρούμενης φόρτισης. Και τα δύο φαινόμενα σχετίζονται με το χρόνο έκθεσης, το επίπεδο της έντασης, τον περιβάλλοντα χώρο, τη μήτρα και τις ίνες του σύνθετου υλικού. Η αστοχία που οφείλεται στα φαινόμενα αυτά κρίνεται πρώιμη, καθώς το ινοπλισμένο πολυμερές αστοχεί για επίπεδο έντασης σαφώς μικρότερο από την αντοχή του.

Η ποιότητα της μήτρας που χρησιμοποιείται έχει πολύ σημαντική επίδραση στο χρόνο που θα εκδηλωθεί η αστοχία και στο επίπεδο της έντασης που μπορεί να φέρει το υλικό. Συνήθως συστήματα με εποξικές ρητίνες είναι δύο έως τέσσερις τάξεις μεγέθους πιο ανθεκτικά από αντίστοιχα συστήματα που περιέχουν άλλη κατηγορία ρητίνης. Επίσης οι βινυλεστερικές ρητίνες εμφανίζουν κατά κανόνα μεγαλύτερη τρωτότητα σε θραύση και διάβρωση λόγω διατηρούμενης έντασης από τις πολυεστερικές.

Όσον αφορά στις ίνες, τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά όταν χρησιμοποιούνται για την ανάληψη μόνιμων φορτίων.

## **ΚΟΠΩΣΗ**

Γενικά τα ινοπλισμένα πολυμερή συμπεριφέρονται καλύτερα από το σκυρόδεμα ή το χάλυβα υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Τα ανθρακονήματα είναι καλύτερα από τις ίνες πολυουραμίδης, οι οποίες είναι με τη σειρά τους καλύτερες από τα υαλονήματα. Ειδικά για σύνθετα υλικά με ίνες από άνθρακα, η αντοχή σε κόπωση είναι μεγαλύτερη από αυτή του χάλυβα οπλισμού. Η αντίστοιχη κατάταξη των ρητινών, όσον αφορά στην αντοχή τους σε κόπωση, είναι εποξικές, πολυεστερικές και βινυλεστερικές. Πρέπει να τονιστεί ότι η αντοχή σε κόπωση ενός συστήματος ινοπλισμένου πολυμερούς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος της ρητίνης στο οποίο εμποτίζονται οι ίνες.

Τα ινοπλισμένα πολυμερή, λόγω της οργανικής φύσης του υλικού της μήτρας, είναι ευαίσθητα στη συχνότητα εφαρμογής της ανακυκλιζόμενης φόρτισης. Ως γενικός κανόνας, η συχνότητα αυτή πρέπει να διατηρείται μικρότερη από 10 Hz, έτσι ώστε να προλαμβάνεται η έκλυση θερμότητας στο πολυμερές, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε πρόωμη αστοχία της μήτρας και στη συνέχεια ολόκληρου του συστήματος του πολυμερούς.

## **ΚΡΟΥΣΗ**

Σε ό,τι αφορά στην επίδραση της κρούσης (π.χ. λόγω πρόσκρουσης οχήματος σε υποστύλωμα γέφυρας ενισχυμένο με μανδύα σύνθετων υλικών) στην εναπομένουσα αντοχή των σύνθετων υλικών, καλύτερη συμπεριφορά δίνουν τα υλικά με ίνες πολυουραμίδης (οι ίνες αυτές χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αλεξίσφαιρων γιλέκων), ακολουθούν αυτά με ίνες γυαλιού και τέλος αυτά με ίνες άνθρακα.

## ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΥΠΟΥ ΙΝΩΝ

Ένα ερώτημα το οποίο τίθεται στην πράξη από τους μηχανικούς-μελετητές ενισχύσεων με σύνθετα υλικά αφορά στην επιλογή του πλέον κατάλληλου για κάθε περίπτωση τύπου ινών. Η παράμετρος που καθορίζει το σχεδιασμό μιας επέμβασης σε πολλές περιπτώσεις (π.χ. ενίσχυση σε κάμψη, ενίσχυση σε τέμνουσα, περίσφιγξη με στόχο αύξηση της θλιπτικής αντοχής, περίσφιγξη στις κρίσιμες περιοχές υποστυλωμάτων με στόχο την αποτροπή λυγισμού των διαμήκων ράβδων) είναι η δυστένεια του υλικού, δηλαδή το γινόμενο  $E_f t_f$  (μέτρο ελαστικότητας επί συνολικό πάχος). Έτσι, ένα πρώτο κριτήριο επιλογής υλικού ινών θα μπορούσε να αποτελέσει το κόστος για δεδομένη δυστένεια. Για παράδειγμα, ένα ύφασμα ινών άνθρακα με μέτρο ελαστικότητας 230 GPa και πάχος  $f_{fib} = 0,12$  mm είναι ουσιαστικά 'ισοδύναμο' ενός υφάσματος ινών γυαλιού με μέτρο ελαστικότητας 69 GPa και πάχος  $f_{fib} = 0,40$  mm. Το σύνθετο υλικό θα προκύψει και από τα δύο και θα έχει 'δυστένεια' κάτι λιγότερο (λόγω του μειωτικού συντελεστή  $r_1$ ) από  $uE_f t_{fib}$  όπου  $u$  = αριθμός στρώσεων. Σαν δεύτερο παράδειγμα, δύο στρώσεις υφάσματος ινών άνθρακα με μέτρο ελαστικότητας 230 GPa και πάχος 0,12 mm είναι ουσιαστικά 'ισοδύναμες' 5 στρώσεων υφάσματος γυαλιού με μέτρο ελαστικότητας 69 GPa και πάχος 0,16 mm. Έτσι, αν το κόστος (π.χ. ανά  $m^3$ ) κάθε υφάσματος γυαλιού είναι πάνω από 2,5 φορές χαμηλότερο του αντίστοιχου για το ύφασμα άνθρακα, η επιλογή του γυαλιού αποτελεί τη βέλτιστη λύση. Στην περίπτωση που στόχος της ενίσχυσης είναι η αύξηση της παραμορφωσιμότητας του σκυροδέματος, μέσω περίσφιγξης (π.χ. σε περιοχές πλαστικών αρθρώσεων με στόχο την αύξηση του δείκτη πλαστιμότητας) η παράμετρος που καθορίζει το σχεδιασμό μιας επέμβασης είναι το γινόμενο  $f_{td} t_f$  (εφελκυστική αντοχή επί συνολικό πάχος), οπότε ως κριτήριο επιλογής του τύπου ινών θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το κόστος για δεδομένη τιμή του παραπάνω γινομένου.



Χαρακτηριστικό	ΙΟΠ-Άνθρακας	ΙΟΠ-Αραμιδίου	ΙΟΠ-Γυαλιού
Εφελκυστική αντοχή	9	9	9
Μέτρο ελαστικότητας	9	6	3
Παραμόρφωση αστοχίας	6	9	9
Συμπεριφορά σε μακροχρόνιες δράσεις	9	6	3
Συμπεριφορά σε κόπωση	6	4	2
Ανθεκτικότητα σε διάρκεια	6	4	2
Πυκνότητα	4	6	2
Κόστος	6	6	9

### ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

Τα συστήματα ενίσχυσης στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά είναι γενικά δύο τύπων:

- α) 'υγρής εφαρμογής' (ή 'επί τόπου σκλήρυνσης' της μήτρας) και
- β) 'προκατασκευασμένα' (η σκλήρυνση της μήτρας έχει προηγηθεί της εφαρμογής)

Η παρουσίαση αυτών γίνεται συνοπτικά παρακάτω.

### ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΓΡΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

- Φύλλα (sheets) ή υφάσματα (fabrics) αποτελούμενα από συνεχείς ίνες μίας (κυρίως) διεύθυνσης χωρίς μήτρα ('ξηρή' κατάσταση). Για την εφαρμογή τους απαιτείται συνήθως η εφαρμογή 'ασταρώματος' στο σκυρόδεμα και ακολούθως ο εμποτισμός των ινών με ρητίνη, βάσει μίας εκ των εξής μεθόδων:
  - Εφαρμογή της ρητίνης στο σκυρόδεμα, τοποθέτηση των ινών απευθείας στη ρητίνη.
  - Προεμποτισμός των ινών (επί τόπου στο έργο αλλά όχι επάνω στο υπό ενίσχυση σημείο) με ρητίνη και ακολούθως επικόλληση.
- Υφάσματα (fabrics) αποτελούμενα από συνεχείς ίνες σε τουλάχιστο δύο διευθύνσεις (π.χ. 0° και 90° ή +/- 45° σε σχέση με τον άξονα του

υπό ενίσχυση μέλους), χωρίς μήτρα ( 'ξηρή' κατάσταση). Η εφαρμογή της γίνεται όπως περιγράφεται στις παραπάνω δύο περιπτώσεις.

- Φύλλα (sheets) ή υφάσματα (fabrics) αποτελούμενα από συνεχείς ίνες σε τουλάχιστον δύο διευθύνσεις, προεμπροτισμένα με ρητίνη (μήτρα) σε μη σκληρυμένη μορφή. Η εφαρμογή τους γίνεται με ή χωρίς επιπλέον ρητίνη.
- Συνεχείς ίνες χωρίς μήτρα ( 'ξηρή' κατάσταση) συγκεντρωμένες σε μορφή νήματος (tow), το οποίο εμποτίζεται με ρητίνη ενώ τυλίγεται (π.χ. με αυτοματοποιημένο τρόπο) στο στοιχείο σκυροδέματος.
- Προεμπροτισμένες συνεχείς ίνες, συγκεντρωμένες σε μορφή νήματος (tow), το οποίο ενώ τυλίγεται (π.χ. με αυτοματοποιημένο τρόπο) στο στοιχείο σκυροδέματος, ενδεχομένως να υφίσταται και πρόσθετο εμποτισμό.

#### **ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ**

- Προκατασκευασμένα ευθύγραμμα (και σχετικά δύσκαμπτα) ελάσματα (strips), τα οποία επικολλούνται μέσω ρητίνης. Τα ελάσματα διατίθενται συνήθως σε μορφή ρολών ( 'κουλούρες' ) και παράγονται με τη μέθοδο της εξέλασης (pultrusion) ή σπανιότερα της στρωμάτωσης (lamination). Στη μέθοδο της εξέλασης οι ίνες είναι κατά κανόνα συνεχείς και παράλληλες στη διεύθυνση των ελασμάτων, ενώ η στρωμάτωση επιτρέπει τη χρήση ινών σε διαφορετικές διευθύνσεις (π.χ. παράλληλες και κάθετες στην διεύθυνση των ελασμάτων ή και υπό γωνίες  $\pm 45^\circ$  .
- Προκατασκευασμένα κελύφη (shells), μανδύες (jackets) ή γωνίες (angles), τα οποία επικολλούνται μέσω ρητίνης.

Γενικά μπορεί να διατυπωθεί το συμπέρασμα ότι τα προκατασκευασμένα ελάσματα προτιμούνται έναντι των υφασμάτων (ή φύλλων) όταν η εφαρμογή γίνεται σε επίπεδες επιφάνειες (π.χ. καμπτική ενίσχυση δοκών ή πλακών), ενώ σε άλλες περιπτώσεις (π.χ. μανδύες υποστυλωμάτων, διατμητική ενίσχυση δοκών) η εφαρμογή υφασμάτων μέσω της υγρής μεθόδου είναι προτιμητέα.

## **ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ**

### **ΒΑΣΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ**

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

### **ΕΙΔΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ**

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

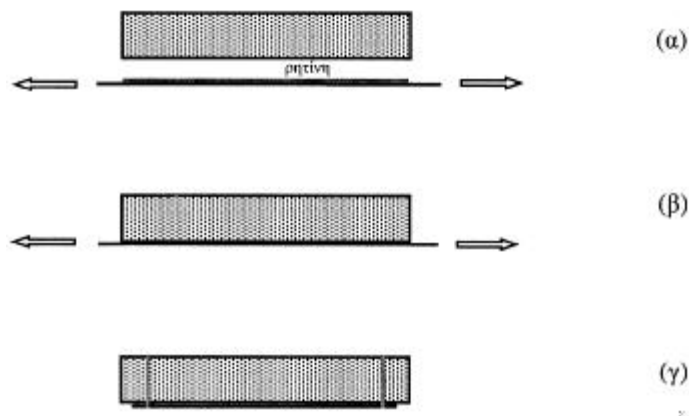
### **ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΠΕΡΙΥΛΙΞΗ**

Η τεχνική της αυτοματοποιημένης περιύλιξης 'νημάτων' αναπτύχθηκε στην Ιαπωνία στις αρχές της δεκαετίας του '90 και λίγο αργότερα στις Η.Π.Α. Περιλαμβάνει την χωρίς διακοπή περιύλιξη προεμπροτισμένων με ρητίνη νημάτων υπό μικρή γωνία γύρω από υποστυλώματα γεφυρών ή άλλα στοιχεία (π.χ. καπνοδόχοι), μέσω ειδικής συσκευής ρομπότ. Βασικό πλεονέκτημα της τεχνικής, πλέον του καλού ποιοτικού ελέγχου, είναι η μεγάλη ταχύτητα εφαρμογής.

### **ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗ**

Η μέθοδος προέντασης, η οποία αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του '90 περιλαμβάνει την επικόλληση ελασμάτων ενώ αυτά βρίσκονται υπό τάνυση. Έτσι εκμεταλλευόμαστε τα βασικά πλεονεκτήματα της προέντασης (αύξηση δυσκαμψίας, καθυστέρηση ρηγματώσης, μείωση πλάτους ρωγμών, αύξηση καμπτικής και διατμητικής αντοχής σε σχέση με την εφαρμογή της τεχνικής χωρίς προένταση κ.λ.π.), με τίμημα την αύξηση του κόστους αλλά και του βαθμού πολυπλοκότητας της μεθόδου εφαρμογής,

λόγω της ανάγκης για την χρήση ειδικών αγκυρώσεων. Η τεχνική της προέντασης μπορεί να εφαρμοστεί και σε μανδύες υποστυλωμάτων, π.χ. είτε εφαρμόζοντας τα σύνθετα υλικά με τις ίνες υπό τάνυση, είτε εισάγοντας από κενό μεταξύ του μανδύα και σκυροδέματος ρητίνη υπό πίεση ή διογκούμενο κονίαμα.



Σχηματική διάταξη προέντασης με ελάσματα. (α) Προένταση (β) Επικόλληση υπό τάνυση (γ) Αγκύρωση άκρων



Διάταξη εφαρμογής προέντασης ελάσματος και αγκύρωσης στο άκρο.

## ΕΠΙΤΑΧΥΜΕΝΗ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΜΕ ΘΕΡΜΑΝΣΗ

Η σκλήρυνση την εποξειδικής ρητίνης στη διεπιφάνεια ελασμάτων-σκυροδέματος μπορεί να επιταχυνθεί σημαντικά μέσω της χρήσης ειδικών συσκευών θέρμανσης (π.χ. θερμαντικά σώματα, συσκευές θέρμανσης με βάση υπέρυθρες ακτίνες, θερμαντικά κωλύματα), με παράλληλη εκμετάλλευση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των ινών άνθρακα. Έτσι αυξάνεται σημαντικά η ταχύτητα εφαρμογής της ενίσχυσης (π.χ. τρεις ώρες θέρμανσης σε 70<sup>0</sup> C αρκούν για πλήρη σκλήρυνση), ακόμα και σε

περιπτώσεις που η τελευταία θα ήταν αδύνατη (π.χ. λόγω χαμηλής θερμοκρασίας, οπότε δεν ευνοείται η σκλήρυνση της ρητίνης). Πρόσθετο πλεονέκτημα της επιταχυμένης σκλήρυνσης είναι η αύξηση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης της ρητίνης.

### **ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ**

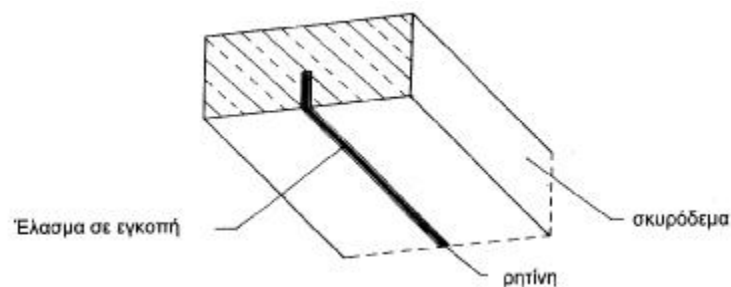
Τα προκατασκευασμένα στοιχεία από σύνθετα υλικά είναι συνήθως μορφής:

1. Ελάσματος (πάχους της τάξης του 1mm και πλάτους π.χ. 50 mm, 100 mm).
2. Γωνιών, που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ενίσχυσης (π.χ. πλακοδοκών) έναντι τέμνουσας.
3. Μανδύα-κελύφους, που τοποθετείται περιμετρικά υποστυλωμάτων με στόχο την αύξηση της περίσφιγξης ή διατμητικής αντοχής.

### **ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΕΓΚΟΠΕΣ**

Η τοποθέτηση και επικόλληση (μέσω εποξειδικής ρητίνης) ράβδων ή ελασμάτων σε εγκοπές αποσκοπεί συνήθως στην αύξηση της καμπτικής αντοχής υφισταμένων μελών σκυροδέματος.

Κύριο πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής, σε σχέση με την επιφανειακή επικόλληση είναι η εξαιρετικά βελτιωμένη συνάφεια των σύνθετων υλικών με το σκυρόδεμα και εν γένει η καλύτερη προστασία τους.



Τοποθέτηση ελασμάτων σε εγκοπές

## ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η διαδικασία εφαρμογής σύνθετων υλικών για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών περιλαμβάνει δύο βασικά στάδια, την προετοιμασία της επιφάνειας του δομικού στοιχείου στο οποίο γίνεται η επέμβαση και την επικόλληση των στρώσεων του ινοπλισμένου πολυμερούς στην επιφάνεια αυτή. Πρέπει να τονιστεί ότι η προετοιμασία της επιφάνειας του δομικού στοιχείου στην οποία θα επικολληθεί το σύνθετο υλικό αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την επίτευξη της επιδιωκόμενης συμπεριφοράς του ενισχυμένου στοιχείου, καθώς από αυτήν εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η συνεργασία παλαιού και νέου υλικού.

### ΣΥΜΦΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΑΦΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

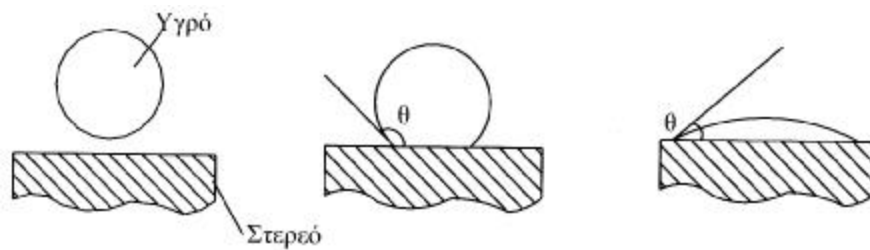
Τα σύνθετα υλικά επικολλούνται στα δομικά στοιχεία με χρήση διαφόρων συγκολλητικών ουσιών, όπως είναι οι εποξικές κόλλες, οι πολυεστερικές κόλλες, κ.τ.λ. Οι ουσίες αυτές εξασφαλίζουν τη διαρκή σύνδεση και από κοινού λειτουργία του ινοπλισμένου πολυμερούς με το σκυρόδεμα του στοιχείου μέσω της διατμητικής τάσης που μεταφέρεται στη διεπιφάνεια επαφής τους.

Οι κυριότερες απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιεί η συγκολλητική ουσία είναι οι ακόλουθες:

- Επαρκής αντοχή σε υγρασία και ερπυσμό
- Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης υάλου (Tg) τουλάχιστον ίση με 45<sup>0</sup> C.
- Ελάχιστη διατμητική αντοχή στους 20<sup>0</sup> C με 18 Mpa.
- Ικανότητα πλήρωσης κενών και εφαρμογής σε κατακόρυφες και ανεστραμμένες επιφάνειες.
- Ανθεκτικότητα στην αλκαλική φύση του σκυροδέματος.

Οι συγκολλητικές ουσίες συνδέουν δύο υλικά επικολλώντας στις επιφάνειές τους μία στρώση απειροελάχιστων διαστάσεων, της τάξης των 0,1-0,5 mm. Ο όρος σύμφυση αναφέρεται στις εφελκυστικές μοριακές δυνάμεις που δρουν κατά μήκος της διεπιφάνειας μεταξύ των δύο υλικών. Λόγω της υγρής τους φύσης, οι συγκολλητικές ουσίες ρέουν πάνω και ανάμεσα στις ανωμαλίες της στερεάς επιφάνειας και, καθώς έρχονται σε επαφή με αυτή,

αλληλεπιδρούν μέσω των μοριακών τους δυνάμεων. Στη συνέχεια η ουσία στερεοποιείται και έτσι επιτυγχάνεται η σύνδεση των δύο υλικών. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επίτευξη ικανοποιητικής σύμφυσης, είναι η άμεση επαφή μεταξύ της συγκολλητικής ουσίας και των δύο υποστρωμάτων, καθώς και η απουσία αδύναμων και ενανθρακωμένων στρώσεων ή σκόνης από την επιφάνεια του σκυροδέματος. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η ποιότητα της συγκόλλησης εξαρτάται από την ομοιόμορφη διάστρωση της συγκολλητικής ουσίας, η οποία πρέπει να σχηματίζει μία πολύ λεπτή στρώση χωρίς να διαιρείται σε επιμέρους σταγονίδια.



Διάστρωση της συγκολλητικής ουσίας στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου.

## ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Λόγω της σύνθετης σύστασης του σκυροδέματος, η επιφάνειά του μπορεί να περιέχει εκτεθειμένα αδρανή, άμμο, άνυδρα σωματίδια τσιμέντου και τσιμεντοκονίας, καθώς επίσης ρωγμές και κενά. Σκοπός της προετοιμασίας της επιφάνειας του σκυροδέματος είναι η απομάκρυνση τυχόν αδύναμων ή ενανθρακωμένων στρώσεων καθώς και η εξομάλυνσή της, έτσι ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή συγκόλληση των στρώσεων του σύνθετου υλικού σε αυτή.

Η προετοιμασία της επιφάνειας έχει γενικά πολύ μεγαλύτερη επίδραση στη μακρόχρονη παρά στη βραχύχρονη αντοχή της σύνδεσης. Για το λόγο αυτό η προσεκτική προετοιμασία της επιφάνειας του δομικού στοιχείου συνδέεται άμεσα με τη συμπεριφορά του ενισχυμένου στοιχείου με την πάροδο του χρόνου.

Σε πολλές εφαρμογές επισκευής και ενίσχυσης, οι εργασίες στην επιφάνεια του σκυροδέματος εκτελούνται επιτόπου υπό αντίξοες συνθήκες. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου προετοιμασίας είναι άμεση συνάρτηση

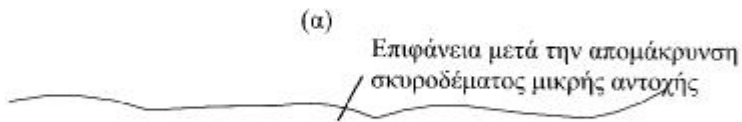
του προσανατολισμού της επιφάνειας του σκυροδέματος (οριζόντια, κατακόρυφη, ανεστραμμένη κ.τ.λ.) αλλά και διαφόρων άλλων παραμέτρων όπως είναι το κόστος, η κλίμακα και η τοποθεσία του έργου, η εύκολη πρόσβαση στα υλικά και τον εξοπλισμό καθώς και απαντήσεις που σχετίζονται με την ασφάλεια και την υγιεινή του προσωπικού.

Ουσιαστικά ο αντικειμενικός σκοπός της προεργασίας που γίνεται στην επιφάνεια του σκυροδέματος είναι η απομάκρυνση της εξωτερικής, μειωμένης αντοχής και ενδεχομένως ενανθρακωμένης, επιφανειακής στρώσης, με ταυτόχρονη έκθεση αδρανών μικρού έως μεσαίου μεγέθους. Ο σκοπός αυτός πρέπει να επιτευχθεί χωρίς να προκληθούν μικρορωγμές ή άλλες βλάβες στην υποκείμενη στρώση που θα μειώσουν την αντοχή της. Τυχόν μεγάλα κενά, οπές και ρωγμές μεγάλου εύρους πρέπει να πληρωθούν με κατάλληλα κονιάματα ή ρητινέσεις πριν την εφαρμογή της συγκολλητικής ουσίας. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η δημιουργία μίας στρώσης σχετικά ομοιόμορφου πάχους και μεγιστοποιείται η ικανότητα μεταφοράς διατμητικής τάσης. Η διαδικασία προετοιμασίας της επιφάνειας του δομικού στοιχείου συνιστάται να περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- Απομάκρυνση βλαμμένου σκυροδέματος ή σκυροδέματος που δεν πληροί τις προδιαγραφές και αντικατάσταση με υλικό καλής ποιότητας.
- Απομάκρυνση σκυροδέματος υψηλής περιεκτικότητας σε τσιμέντο, κατά προτίμηση με αμμοβολή.
- Απομάκρυνση σκόνης και θραυσμάτων με χρήση πεπιεσμένου αέρα.

Μετά την προεργασία, συνιστάται η καταλληλότητα της επιφάνειας να ελεγχθεί με τη μέθοδο του εξολκέα. Το χρονικό κενό μεταξύ προετοιμασίας της επιφάνειας και επικόλλησης των στρώσεων του σύνθετου υλικού καλό είναι να διατηρείται όσο το δυνατό μικρότερο, ώστε να προλαμβάνεται περαιτέρω ενανθράκωση του σκυροδέματος.





(β)

Προετοιμασία επιφάνειας σκυροδέματος (α) Πριν την επεξεργασία και (β) Μετά την επεξεργασία

## ΣΤΑΔΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Συνοπτικά, η διαδικασία εφαρμογής σύνθετων υλικών περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- Καθαίρεση του επιχρίσματος.
- Αποκατάσταση των ενδεχόμενων βλαβών με χρήση κατάλληλης μεθόδου.
- Προετοιμασία της επιφάνειας του δομικού στοιχείου (εξομάλυνση της επιφάνειας, λάξευση γωνιών κ.τ.λ.).
- Επάλειψη της επιφάνειας του δομικού στοιχείου με εποξική ρητίνη ή άλλη κατάλληλη συγκολλητική ουσία.
- Τοποθέτηση της πρώτης στρώσης του ινοπλισμένου πολυμερούς στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου. Συνιστάται η πλήρης επαφή του σύνθετου υλικού με την επιφάνεια του δομικού στοιχείου. Στην περίπτωση χρήσης υλικών τύπου ελάσματος χρησιμοποιείται μόνο μία στρώση.
- Τοποθέτηση ειδικών αγκυρίων όπου απαιτείται (τοιχεία, άνω παρειές δοκών κ.τ.λ.).
- Τοποθέτηση επιπλέον στρώσεων σύνθετου υλικού σύμφωνα με τη μελέτη επισκευής / ενίσχυσης.

- Μετά τη σκλήρυνση του συστήματος (περίπου μετά από 24 ώρες) εφαρμογή επιχρίσματος και βαφή της επιφάνειας του δομικού στοιχείου με βάση αρχιτεκτονικές και αισθητικές απαιτήσεις.

## **ΒΑΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ**

Ο σχεδιασμός ενισχύσεων με σύνθετα υλικά ακολουθεί τη φιλοσοφία των σύγχρονων κατασκευών (π.χ. ΕΚΩΣ 2000, ΕΑΚ 2000) και περιλαμβάνει όλους τους γνωστούς ελέγχους των οριακών καταστάσεων αντοχής και λειτουργικότητας, με τροποποιήσεις όπου χρειάζεται ώστε να ληφθεί υπόψη η συνεισφορά των σύνθετων υλικών. Ειδική μνεία χρειάζεται μόνο η ακραία περίπτωση πρόωρης αστοχίας των οπλισμών ενίσχυσης π.χ. λόγω πυρκαγιάς. Η περίπτωση αυτή αντιμετωπίζεται εν γένει ως τυχηματική δράση (και κατά πάς πιθανότητα δεν απαιτούνται ειδικά μέτρα πυροπροστασίας όπως π.χ. σε πολλές εφαρμογές αντισεισμικών ενισχύσεων), σε ειδικές όμως περιπτώσεις που πρέπει να ικανοποιούνται συγκεκριμένες απαιτήσεις πυροπροστασίας, η μελέτη ενίσχυσης θα πρέπει να περιλαμβάνει το σχεδιασμό αντίστοιχων συστημάτων (π.χ. ειδικά επιχρίσματα ή γυψοσανίδες).

Ακολουθώντας περιγράφονται οι καταστατικοί νόμοι των υλικών σε μονοαξονική φόρτιση και δίνονται οι τιμές για τους μερικούς συντελεστές ασφαλείας.

## **ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ – ΠΛΗΡΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΥΛΙΚΩΝ**

Για το σκυρόδεμα και τον χάλυβα ισχύουν οι υποθέσεις που υιοθετούνται στο σχεδιασμό κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος (π.χ. ΕΚΩΣ 2000). Έτσι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος είναι  $0,85 f_{cd} = 0,85 f_{ck}/\gamma_c$ , όπου  $f_{ck}$  = χαρ/κή αντοχή (κυλίνδρου) και  $\gamma_c = 1,5$ . Η τιμή σχεδιασμού της τάσης διαρροής του χάλυβα είναι  $f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s$  όπου  $f_{yk}$  = χαρ/κή τιμή τάσης διαρροής και  $\gamma_s = 1,15$ . Η συμπεριφορά των σύνθετων υλικών σε εφελκυσμό θεωρείται γραμμικά ελαστική μέχρι τη θραύση, η οποία επέρχεται σε τάση (σχεδιασμού)  $f_{fd} = f_{fk}/\gamma_f$ :

$$\Sigma_f = E_f \varepsilon_f \leq f_{fd}$$

Το μέτρο ελαστικότητας προσδιορίζεται από το λόγο των χαρακτηριστικών τιμών εφελκυστικής αντοχής προς οριακή παραμόρφωση,  $E_f = f_{fk} / \varepsilon_{fuk}$

Σε μερικές περιπτώσεις η επί τόπου εφελκυστική αντοχή των σύνθετων υλικών είναι μικρότερη αυτής που προκύπτει από εργαστηριακές δοκιμές εφελκυσμού. Αυτό οφείλεται σε συγκεντρώσεις τάσεων, σε ενδεχόμενη πολυαξονικότητα της εντατικής κατάστασης στα σύνθετα υλικά, στην ύπαρξη σημαντικού αριθμού στρώσεων κλπ. Μπορεί δε να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς, θεωρώντας ότι η αστοχία επέρχεται όταν η παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά ισούται με μία 'ενεργή' παραμόρφωση  $\varepsilon_{fue}$ , που κατά κανόνα είναι μικρότερη από τη μέση οριακή παραμόρφωση αστοχίας,  $\varepsilon_{fum}$  (η τελευταία προσδιορίζεται μέσω δοκιμής εφελκυσμού). Βάσει των παραπάνω, η ενεργή αντοχή σχεδιασμού  $f_{fde}$  για τα σύνθετα υλικά σε εφελκυσμό μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$f_{fde} = \varepsilon_{fue} / \varepsilon_{fum} f_{fk} / \gamma_f = u_e f_{fd}$$

Περισσότερα στοιχεία για την ενεργή παραμόρφωση  $\varepsilon_{fue}$  θα δοθούν στην περιγραφή των ενοτήτων όπου ο ρόλος αυτής είναι σημαντικός (π.χ. ενίσχυση σε διάτμηση, περίσφιγξη).

Οι τιμές για το συντελεστή ασφαλείας δίνονται στον πίνακα με την επισήμανση ότι αποτελούν ακόμα αντικείμενο τρέχουσας έρευνας, γι' αυτό και θα πρέπει να θεωρούνται ενδεικτικές.

## **ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ – ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗ**

Σε ορισμένες περιπτώσεις ο μηχανισμός της εφελκυστικής αστοχίας των σύνθετων υλικών δεν ενεργοποιείται αλλά αντ' αυτού παρατηρείται αποκόλλησή του από την επιφάνεια του σκυροδέματος. Η αποκόλληση αυτή οφείλεται στην ανάπτυξη σημαντικών διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια σκυροδέματος – σύνθετων υλικών και γίνεται κατά κανόνα μέσω του σκυροδέματος, δεδομένου ότι αυτό έχει μικρότερη διατμητική αντοχή από τις συνήθεις εποξειδικές ρητίνες καλής ποιότητας. Σε τέτοιες περιπτώσεις ο συντελεστής ασφαλείας υλικού αφορά στο σκυροδέμα και λαμβάνεται ίσος με  $\gamma_b = 1,5$ .

## **ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ**

Για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας το μέτρο ελαστικότητας των σύνθετων υλικών μπορεί να θεωρηθεί κατά προσέγγιση ίσο με αυτό που υπολογίζεται για την οριακή κατάσταση αστοχίας και φυσικά όλοι οι συντελεστές ασφαλείας των υλικών είναι ίσοι με 1,0.

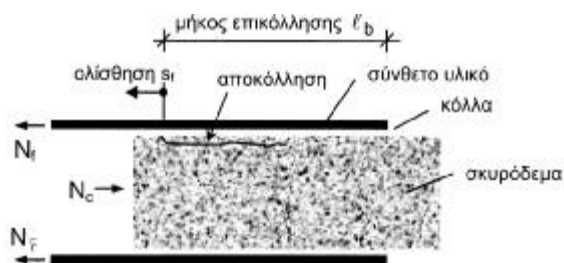
## **ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

Η πλήρης συνεργασία των σύνθετων υλικών με το σκυρόδεμα προϋποθέτει την ύπαρξη ισχυρού δεσμού μεταξύ των δύο υλικών, ο οποίος εξασφαλίζεται μέσω των εποξειδικών ρητινών. Τυχόν αστοχία του δεσμού αυτού (απώλεια συνάφειας) αποτελεί κρίσιμη παράμετρο, η οποία θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στους ελέγχους των οριακών καταστάσεων.

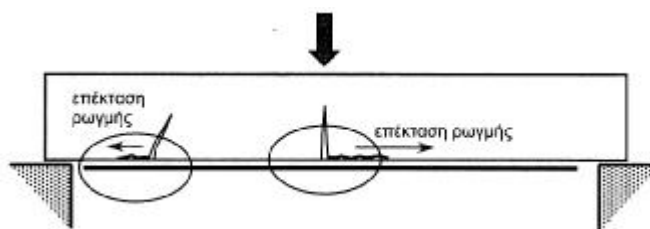
## **ΓΕΝΙΚΑ, ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ**

Η συμπεριφορά του δεσμού σύνθετων υλικών – σκυροδέματος μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητή μέσω απλών δοκιμών συνάφειας, η οποία αντιπροσωπεύει (κατά προσέγγιση) την εντατική και παραμορφωσιακή κατάσταση σε περιοχές ρωγμών, όπως φαίνεται στη δοκό του σχήματος.

Στις περιοχές ανάπτυξης ρωγμών, ο εξωτερικός οπλισμός παραλαμβάνει εφελκυστική δύναμη  $N_f$ , η οποία μεταφέρεται στο σκυρόδεμα μέσω διάτμησης. Ιδιαίτερο πρακτικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η σχέση μεταξύ της μέσης διατμητικής τάσης  $\tau_b$  στη διεπιφάνεια σύνθετων υλικών και σκυροδέματος (ίση με  $N_f / l_b b_f$  όπου  $b_f$  το πλάτος του ελάσματος) συναρτήσει της ολισθησης  $S_f$ . Η σχέση αυτή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, μεταξύ των οποίων είναι η αντοχή του σκυροδέματος, η ποιότητα της κόλλας, τα χαρακτηριστικά των σύνθετων υλικών (π.χ. πάχος, μέτρο ελαστικότητας) και το μήκος επικόλλησης. Μπορεί δε να παρασταθεί γραφικά όπως το σχήμα, στο οποίο δίνονται για λόγους σύγκρισης και ενδεικτικές σχέσεις τάσης συνάφειας – ολισθησης για ράβδους οπλισμού με ή χωρίς νευρώσεις.



Δοκιμή συνάφειας σύνθετων υλικών – σκυροδέματος



Ρηγμάτωση δοκού οπλισμένου σκυροδέματος και ενδεχόμενη αστοχία λόγω αποκόλλησης των σύνθετων υλικών.

Κύριο χαρακτηριστικό της συμπεριφοράς του δεσμού σύνθετων υλικών – σκυροδέματος είναι ότι η θραύση των σύνθετων υλικών σπανίως προηγείται της αποκόλλησης, σε αντίθεση με τις εσωτερικές ράβδους οπλισμού, οι οποίες μπορούν να σχεδιαστούν με επαρκές μήκος αγκύρωσης ώστε να εξασφαλίζεται η αστοχία τους – διαρροή τους – πριν την απώλεια συνάφειας. Η δύναμη που απαιτείται για την αποκόλληση (η οποία, σημειωτέον, γίνεται λόγω ρηγμάτωσης του σκυροδέματος κοντά στη στρώση της κόλλας, δεδομένου ότι η διατμητική αντοχή αυτής ξεπερνά κατά πολύ αυτήν του σκυροδέματος), δηλαδή η μέγιστη δύναμη ‘αγκύρωσης’,  $N_{fa}$ , αυξάνεται με το μήκος επικόλλησης  $l_b$ , μέχρις ότου αυτό λάβει μια οριακή τιμή  $l_{b,max}$ , πέρα από την οποία η δύναμη επικόλλησης παραμένει πρακτικά αμετάβλητη, ίση με  $N_{fa,max}$ .

## ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΠΡΟΣΩΜΕΙΩΜΑ

Η σχέση δύναμης αποκόλλησης – μήκους επικόλλησης περιγράφεται μαθηματικά από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\text{Για } l_b \geq l_{b,max} : N_{fa} = N_{fa,max} = c_1 k_c k_b b_f (f_{ctm} E_{ftf})^{1/2}$$

$$\text{Για } l_b < l_{b,max} : N_{fa} = N_{fa,max} l_b / l_{b,max} (2 - l_b / l_{b,max})$$

$$l_{b,max} = (E_{ftf} / c_2 f_{ctm})^{1/2} \text{ (mm)}$$

$$\text{όπου: } k_b = (1,125(2 - b_f/b)/(1 + b_f/400))^{1/2} \geq 1$$

με  $b_f/b$  όχι μικρότερο από 0,33,  $k_c$  = συντελεστής συμπίκνωσης του σκυροδέματος ίσος με 1,0 για κανονική συμπίκνωση ή ίσος με 0,87 για πτωχή συμπίκνωση (π.χ. επιφάνειες όχι σε επαφή με ξυλοτύπους κατά την διάρκεια της σκυροδέτησης),  $b_f$  = πλάτος ελάσματος (mm),  $b$  = πλάτος διατομής στοιχείου σκυροδέματος στο οποίο έχει επικολληθεί το έλασμα (mm),  $f_{ctm}$  = μέση εφελκυστική τιμή σκυροδέματος (Mpa),  $E_f$  = μέτρο ελαστικότητας σύνθετων υλικών (Mpa),  $t_f$  = πάχος ελάσματος σύνθετων υλικών (mm). Επίσης  $c_1=0,64$  (ή 0,50, αν το ζητούμενο είναι η χαρακτηριστική τιμή της  $N_{fa,max}$ ) και  $c_2=2,0$ .

Σε όρους τάσεων, από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι η αποκόλληση των σύνθετων υλικών επέρχεται όταν η εφελκυστική τάση σχεδιασμού σε αυτά ( $\sigma_{fd} = N_{fad} / b_f t_f$ ) γίνει ίση με

$$\text{για } l_b \geq l_{b,max} : \quad \sigma_{fd} = 0,5 k_c k_b / \gamma_b (f_{ctm} E_f t_f)^{1/2}$$

$$\text{για } l_b < l_{b,max} : \quad \sigma_{fd} = 0,5 k_c k_b / \gamma_b (f_{ctm} E_f t_f)^{1/2} l_b / l_{b,max} (2 - l_b / l_{b,max})$$

## **ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ**

Τα σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό της ενίσχυσης τόσο των γραμμικών στοιχείων- υποστυλωμάτων, τοιχωμάτων και δοκών όσο και επιφανειακών στοιχείων –πλακών- από οπλισμένο σκυρόδεμα. Με την εφαρμογή των σύνθετων υλικών μπορεί να επιτευχθεί σημαντική αύξηση της καμπτικής και διατμητικής αντοχής των ενισχυόμενων στοιχείων με πρακτικά μηδενική επιβάρυνση του βάρους τους. Ειδικά για την περίπτωση γραμμικών στοιχείων, τα ινοπλισμένα πολυμερή χρησιμοποιούνται επιπλέον για την επιβολή εξωτερικής περίσφιγξης στο στοιχείο μέσω της οποίας επιτυγχάνεται αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος όσο και της πλαστιμότητας του στοιχείου.

Η διαστασιολόγηση βασίζεται στην ικανοποίηση της συνθήκης συμβιβαστού των παραμορφώσεων μεταξύ σκυροδέματος, υπάρχοντος σιδηροπλισμού και σύνθετου υλικού. Πρέπει να τονιστεί ότι απαραίτητη προϋπόθεση του σχεδιασμού ενίσχυσης με χρήση σύνθετων υλικών είναι ο αποκλεισμός της αποκόλλησης του ινοπλισμένου πολυμερούς από την επιφάνεια του στοιχείου που ενισχύεται κατά την επιβολή των φορτίων.

Στις ενότητες που ακολουθούν περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία σχεδιασμού με χρήση σύνθετων υλικών για αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, αύξηση της πλαστιμότητας του στοιχείου, αύξηση της αντοχής σε τέμνουσα και αύξηση της αντοχής σε κάμψη.

### **ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ**

Η εφαρμογή σύνθετων υλικών για ενισχύσεις έναντι κάμψης γίνεται κυρίως σε στοιχεία τύπου δοκού ή πλάκας, μέσω ελασμάτων ή υφασμάτων τα οποία επικολλούνται στο εφελκυσμένο πέλμα με διεύθυνση των ινών τέτοια ώστε να παραλαμβάνουν τις λόγω κάμψης εφελκυστικές δυνάμεις (π.χ. παράλληλα στο άξονα του μέλους, για την περίπτωση των δοκών, σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις για την περίπτωση δοκών, σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις για την περίπτωση τετραέρειστων πλακών). Στην περίπτωση υποστυλωμάτων με κρίσιμες σε κάμψη τις ακραίες διατομές, η

εφαρμογή των σύνθετων υλικών σε μορφή ελασμάτων ή υφασμάτων είναι γενικά δύσκολη, δεδομένου ότι στις περιπτώσεις αυτές πρέπει να εξασφαλιστεί η συνέχεια (αγκύρωση) των οπλισμών εντός των κόμβων. Τούτο γίνεται εφικτό όταν οι δοκοί έχουν μικρότερο πλάτος από τα υποστρώματα ή όταν χρησιμοποιούνται οπλισμοί σύνθετων 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:

1. Τις ιδιαιτερότητες της μηχανικής συμπεριφοράς των σύνθετων υλικών (π.χ. γραμμική ελαστικότητα μέχρι την θραύση)
2. Το ενδεχόμενο πρόωρης αποκόλλησης τους από το σκυρόδεμα.

Η αποδοτικότητα της ενίσχυσης της καμπτικής αντοχής με χρήση υφασμάτων ινοπλισμένου πολυμερούς, είναι δυνατή μόνο εφόσον έχει εξασφαλιστεί η επάρκεια του μηχανισμού μεταφοράς δυνάμεων στην περιοχή απόληξης του 'υφάσματος' μέσω κατάλληλης αγκύρωσης των στρώσεων του σύνθετου υλικού στο υφιστάμενο στοιχείο, η οποία καλό είναι να γίνεται στη θλιβόμενη ζώνη της διατομής. Ενδεχόμενη ανεπάρκεια του μηχανισμού αυτού, μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του συστήματος της ενίσχυσης με αποκόλληση από το ενισχυόμενο στοιχείο, λόγω υπερβολικής συγκέντρωσης τάσεων στα άκρα του μανδύα σύνθετου υλικού.

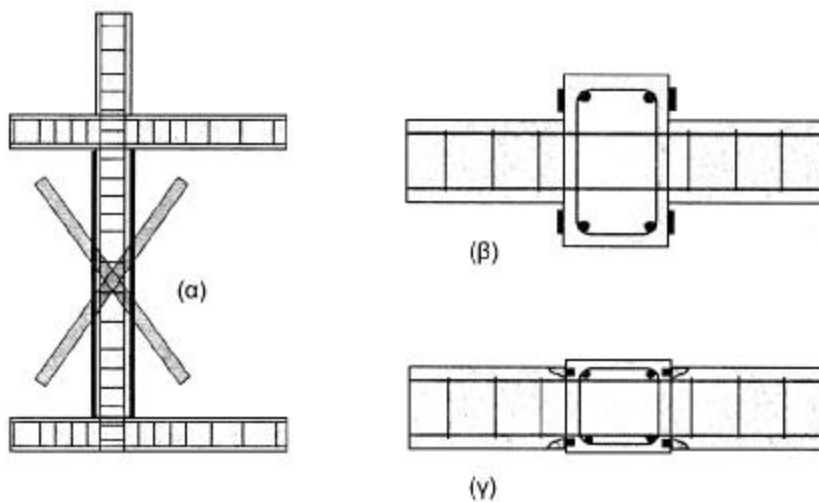
Οι γενικοί κανόνες που πρέπει να ακολουθούνται προκειμένου να μειωθεί η πιθανότητα αστοχίας της ενίσχυσης είναι η εξής:

- Είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται περισσότερες στρώσεις ινοπλισμένου πολυμερούς μικρότερου πάχους αντί για λιγότερες στρώσεις μεγαλύτερου πάχους, αφού έτσι ικανοποιείται ευκολότερα το συμβιβαστό των παραμορφώσεων χωρίς σημαντική επιβολή τάσεων στο σύνθετο υλικό. Συνιστάται ο αριθμός των στρώσεων να μην υπερβαίνει τις πέντε.
- Δεδομένου ότι τα σύνθετα υλικά διατίθενται κατά κανόνα σε ρολά μεγάλου σχετικά μήκους, συνιστάται να αποφεύγεται η τοποθέτηση επικαλυπτόμενων φύλλων ινοπλισμένου πολυμερούς κατά μήκος



του ενισχυόμενου στοιχείου, αλλά να χρησιμοποιούνται ενιαία 'υφάσματα.'

- Προκειμένου να μειωθεί ο κίνδυνος αποκόλλησης του σύνθετου υλικού από το στοιχείο, η απόσταση του 'υφάσματος' από το άκρο της διατομής του ενισχυόμενου στοιχείου δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την επικάλυψη του σκυροδέματος της πλησιέστερης προς το άκρο παράλληλης ράβδου σιδηροπλισμού.
- Για την καλύτερη αγκύρωση του ινοπλισμένου πολυμερούς στο στοιχείο μπορούν να χρησιμοποιούνται εγκάρσιες λωρίδες σύνθετου υλικού ή γωνιακά. Αντίθετα, πρέπει να αποφεύγεται η αγκύρωση του υλικού με διάνοιξη οπών, γιατί έτσι μειώνεται σημαντικά η αντοχή στα σημεία αυτά.
- Όταν χρησιμοποιούνται παράλληλα 'κολλάρα' σύνθετου υλικού, η απόσταση μεταξύ τους δεν πρέπει να υπερβαίνει το μικρότερο μήκος από το πενταπλάσιο του πάχους του στοιχείου και το 20% της απόστασης μεταξύ των σημείων μηδενισμού του διαγράμματος των ροπών κάμψεως κατά μήκος του στοιχείου.



Ενδεικτικές διατάξεις ενίσχυσης σε κάμψη υποστυλωμάτων (α) Εσφαλμένη εφαρμογή (β) Συνέχεια οπλισμού τύπου ελάσματος μέσω του κόμβου (γ) Συνέχεια οπλισμού τύπου ράβδου σε εγκοπές μέσω του κόμβου.

## ΑΡΧΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Όπως θα φανεί παρακάτω, οι υπολογισμοί των απαιτούμενων ποσοτήτων σύνθετων υλικών προκειμένου να ικανοποιηθούν οι έλεγχοι για τις οριακές καταστάσεις αντοχής και λειτουργικότητας προϋποθέτουν γνώση των παραμορφώσεων (και τάσεων) στα υπό ενίσχυση δομικά στοιχεία κατά τη χρονική στιγμή που λαμβάνει χώρα η ενίσχυση (αρχική κατάσταση). Σημειώνεται δε ότι τα δομικά στοιχεία δρουν ως ενισχυμένα μόνο για τα πρόσθετα φορτία, αυτά δηλαδή τα οποία ασκούνται μετά την ενίσχυση.

Ας υποθέσουμε ότι κατά τη φάση της ενίσχυσης η κρίσιμη διατομή μιας δοκού καταπονείται σε ροπή  $M_o$ , μεγαλύτερη από τη ροπή ρηγμάτωσης  $M_{cr}$  (αν είναι μικρότερη, η επίδραση της  $M_o$  είναι αμελητέα). Από ισοροπία δυνάμεων στη διατομή προκύπτει το ύψος της θλιβόμενης ζώνης  $x_o$ :

$$\frac{1}{2} b x_o^2 = (a_s - 1) A_{s2}(x_o - d_2) = a_s A_{s1}(d - x_o)$$

όπου:  $A_{s1}$ =εμβαδόν εφελκόμενου χάλυβα,  $A_{s2}$ =εμβαδόν θλιβόμενου χάλυβα,  $d_1$ =απόσταση κέντρου βάρους τη διατομής εφελκόμενου χάλυβα από την ακραία εφελκόμενη ίνα,  $d_2$ =απόσταση κέντρου βάρους διατομή θλιβόμενου χάλυβα από την ακραία θλιβόμενη ίνα,  $d$ =στατικό ύψος,  $h$ =ύψος διατομής,  $b$ =πλάτος διατομής,  $a_s = E_s/E_c$ =λόγος μέτρο ελαστικότητας χάλυβα προς μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος.

Η παραμόρφωση  $\epsilon_{co}$  στην ακραία θλιβόμενη ίνα σκυροδέματος είναι:

$$\epsilon_{co} = M_o x_o / E_c I_{o2}$$

όπου  $I_{o2}$  είναι η ροπή αδρανείας της ρηγματωμένης διατομής ίση με

$$I_{o2} = b x_o^3 / 3 + (a_s - 1) A_{s2}(x_o - d_2)^2 + a_s A_{s1}(d - x_o)^2$$

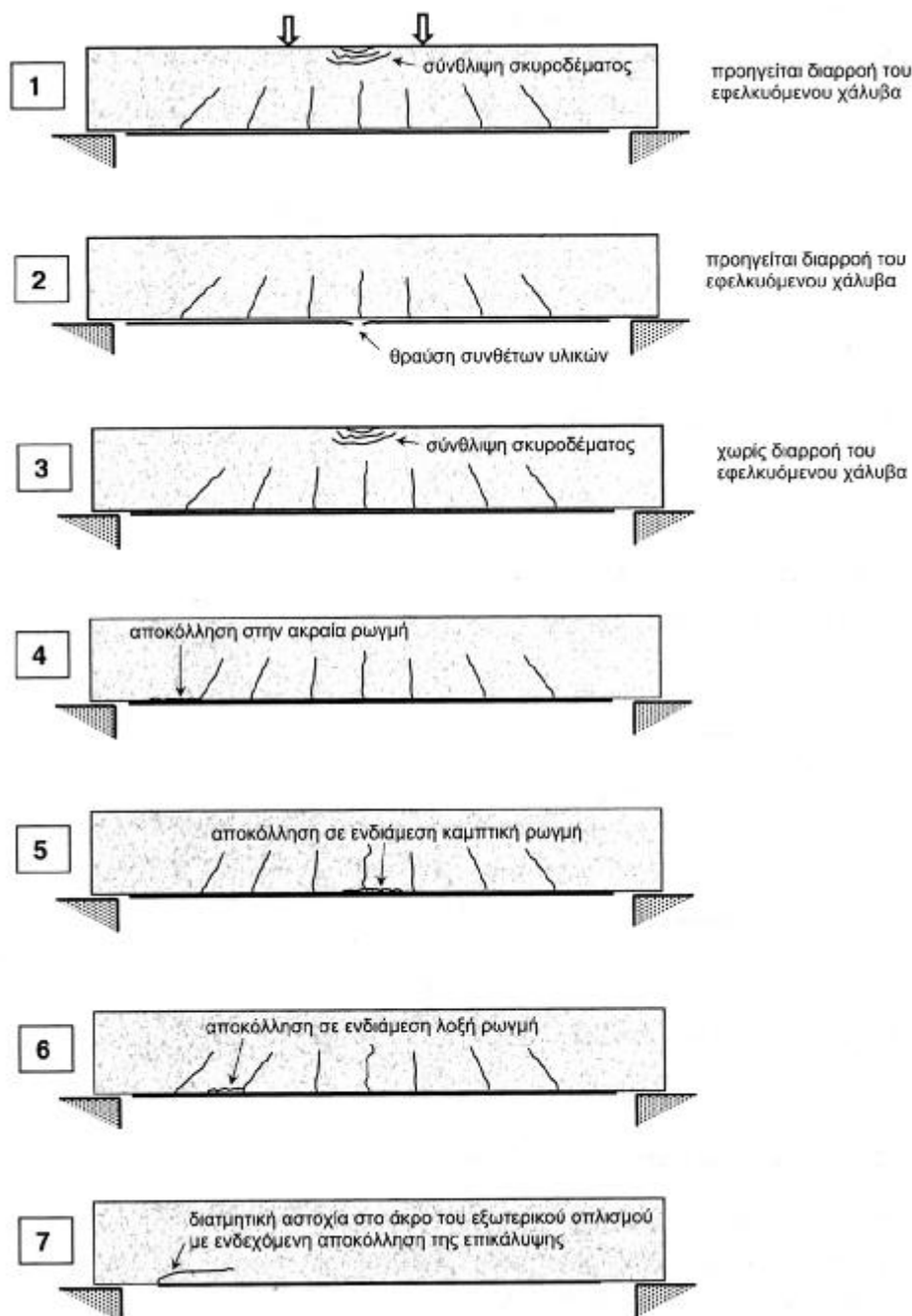
Τέλος η παραμόρφωση  $\epsilon_{co}$  στην ακραία εφελκόμενη ίνα υπολογίζεται βάσει του συμβιβαστού των παραμορφώσεων ως εξής:

$$\epsilon_o = \epsilon_{co} (h - x_o) / x_o$$

Το  $\epsilon_o$  που προσδιορίζεται από την παραπάνω εξίσωση αποτελεί την αρχική παραμόρφωση στη θέση επικόλλησης των οπλισμών ενίσχυσης.

## ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ-ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Οι πιο πιθανοί μηχανισμοί αστοχίας στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος ενισχυμένων σε κάμψη με σύνθετα υλικά περιγράφονται στα παρακάτω σχήματα.



## ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ

Οι τρεις πρώτοι από τους παραπάνω μηχανισμούς δεν σχετίζονται με πρόωρες αστοχίες (π.χ. αποκολλήσεις των σύνθετων υλικών). Έτσι το ενισχυόμενο στοιχείο μπορεί να μελετηθεί ως ένα σύμμικτο στοιχείο στο οποίο υπάρχει πλήρης συνεργασία μεταξύ του σκυροδέματος και των εξωτερικών σπλισμών. Όλοι οι υπόλοιποι μηχανισμοί αντιστοιχούν σε απώλεια της πλήρους συνεργασίας και αναλύονται ξεχωριστά.

## ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΛΗΡΟΥΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ

Διαρροή εφελκυσμένου χάλυβα, σύνθλιψη σκυροδέματος.

Σύμφωνα με το μηχανισμό αυτό, ο οποίος είναι και ο πλέον επιθυμητός, πρώτα διαρρέει ο διαμήκης οπλισμός σε εφελκυσμό και ακολούθως υφίσταται σύνθλιψη το σκυρόδεμα στη θλιβόμενη ζώνη, χωρίς να υπάρχει αστοχία ή κάποιου είδους αποκόλληση στα σύνθετα υλικά. Ο υπολογισμός της ροπής αντοχής στην κρίσιμη διατομή του μέλους γίνεται βάσει ισορροπίας των εσωτερικών δυνάμεων και του συμβιβαστού των παραμορφώσεων:

Υπολογισμός ύψους θλιβόμενης ζώνης  $x$ , από ισορροπία εσωτερικών δυνάμεων:

$$0,85 \psi f_{cd}bx + A_{s2}E_s\varepsilon_{s2} = A_{s1}f_{yd} + A_fE_f\varepsilon_f$$

όπου  $\psi=0,8$ ,  $f_{cd}$ =θλιπτική αντοχή σκυροδέματος(τιμή σχεδιασμού),  $x$ =ύψος θλιβόμενης ζώνης,  $A_f$  =εμβαδόν διατομής σύνθετων υλικών,  $\varepsilon_{s2}$  και  $\varepsilon_f$  είναι οι παραμορφώσεις του θλιβόμενου χάλυβα και των σύνθετων υλικών, αντίστοιχα, οι οποίες δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις (συμβιβαστό των παραμορφώσεων):

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_c(x - d_2/x)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_c(h - x)/x - \varepsilon_0$$

Στις παραπάνω σχέσεις είναι η οριακή παραμόρφωση του σκυροδέματος ( $=0,0035$ ) και η αρχική παραμόρφωση στην ακραία εφελκυσμένη ίνα. Επίσης, το γινόμενο  $E_s\varepsilon_{s2}$  (τάση στον θλιβόμενο χάλυβα) δεν θα πρέπει να λαμβάνεται πάνω από  $f_{yd}$

Υπολογισμός ροπής αντοχής:

$$M_{Rd} = A_{s1}f_{yd}(d - \delta_Gx) + A_fE_f\varepsilon_f(h - \delta_Gx) + A_{s2}E_s\varepsilon_{s2}(\delta_Gx - d_2)$$

Όπου  $\delta_G=0,4$

Προϋποθέσεις για την εφαρμογή των παραπάνω εξισώσεων είναι ότι ο εφελκυσμένος χάλυβας έχει πράγματι διαρρεύσει και ότι η παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά είναι μικρότερη της οριακής (αυτής δηλαδή που αντιστοιχεί στη θραύση ή αποκόλλησή τους), δηλαδή:

$$\varepsilon = \varepsilon_c(d - x)/x \geq f_{yd}/E_s$$

$$\varepsilon = \varepsilon_c(h - x)/x - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{f,lim}$$

ΌΠΟΥ  $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$

### **Διαρροή εφελκυσμένου χάλυβα, θραύση σύνθετων υλικών.**

Ο μηχανισμός αστοχίας κατά τον οποίο μετά την διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα ακολουθεί θραύση των σύνθετων υλικών είναι γενικά σπάνιος (ενδέχεται να εμφανιστεί αν το εμβαδόν διατομής των σύνθετων υλικών είναι πάρα πολύ μικρό). Πάντως για λόγους πληρότητας μπορούμε να αναφέρουμε ότι η ανάλυση της κρίσιμης διατομής στην περίπτωση αυτή γίνεται όπως παραπάνω, δηλαδή ισχύουν οι παραπάνω εξισώσεις με τις εξής τροποποιήσεις:

Η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση στο σκυρόδεμα δεν είναι κατ' ανάγκη ίση με την οριακή.

Η παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά ισούται με την οριακή, δηλαδή  $\varepsilon_f = \varepsilon_{fud}$

Οι συντελεστές  $\psi$  και  $\delta_c$  δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\psi = 1000 \varepsilon_c (0,5 - 1000/12 \varepsilon_c)$$

$$\text{για } \varepsilon_c \leq 0,002$$

$$\psi = 1 - (2/3000 \varepsilon_c)$$

$$\text{για } 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035$$

$$\delta_c = [8 - 1000 \varepsilon_c] / [4(6 - 1000 \varepsilon_c)]$$

$$\text{για } \varepsilon_c \leq 0,002$$

$$\delta_c = [1000 \varepsilon_c (3000 \varepsilon_c - 4) + 2] / [2000 \varepsilon_c (3000 \varepsilon_c - 2)]$$

$$\text{για } 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035$$

Έτσι για τον υπολογισμό της ροπής αντοχής απαιτείται η επίλυση των εξισώσεων (αφού προηγηθούν οι προαναφερθείσες τροποποιήσεις) με αγνώστους τα  $x$ ,  $\varepsilon_c$  και  $M_{Rd}$ .

Τούτο μπορεί να γίνει είτε υπολογιστικά, είτε βάσει διαδοχικών δοκιμών.

### **Σύνθλιψη σκυροδέματος**

Ο μηχανισμός σύμφωνα με τον οποίο η θραύση του σκυροδέματος στην θλιβόμενη ζώνη προηγείται οποιασδήποτε άλλης αστοχίας αντιστοιχεί σε ψαθυρή συμπεριφορά και δεν είναι αποδεκτός, γι' αυτό και δεν αναλύεται περαιτέρω. Η μη ενεργοποίηση του εν λόγω μηχανισμού επιτυγχάνεται

περιορίζοντας το εμβαδόν των σύνθετων υλικών κάτω από μία κρίσιμη τιμή, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα.

## **Μηχανισμοί με απώλεια της πλήρους συνεργασίας**

### **Αποκόλληση με ακραία ρωγμή**

Εφαρμόζοντας το αναλυτικό προσομοίωμα μπορεί να γίνει ο υπολογισμός του απαιτούμενου μήκους αγκύρωσης στα άκρα των σύνθετων υλικών ώστε να μην επέλθει αποκόλληση στην περιοχή της αγκύρωσης. Ας θεωρήσουμε για παράδειγμα την δοκό του σχήματος με διάγραμμα ροπών. Το σχήμα δίνει τις δυνάμεις που ασκούνται τόσο στον εφελκυσμένο χάλυβα ( $N_{sd}$ ) όσο και στα σύνθετα υλικά ( $N_{fd}$ ) σε κάθε διατομή, ως αποτέλεσμα της δρώσας ροπής σχεδιασμού ( $M_{sd}$ ). Προσεγγιστικά η συνολική εφελκυστική δύναμη (σε ράβδους οπλισμού και σύνθετα υλικά), δηλαδή το άθροισμα  $M_{sd}+N_{fd}$ , ισούται με  $M_{sd}/z$ , όπου  $z$  ο μοχλοβραχίονας της δύναμης αυτής, περίπου ίσος με  $0,95d$ .

Βάσει του σχήματος η θέση πέρα από την οποία υπολογίζεται το μήκος αγκύρωσης των σύνθετων υλικών προσδιορίζεται εκεί όπου η καμπύλη της συνολικής εφελκυστικής δύναμης  $M_{sd}/z$  τέμνει τη μέγιστη δύναμη που μπορεί να παραληφθεί από το χάλυβα μόνο,  $N_{Rsd}=A_s f_{yd}$ .

Στη θέση αυτή η εφελκυστική δύναμη στα σύνθετα υλικά είναι , ενώ το αντίστοιχο μήκος αγκύρωσης είναι  $l_b$ . Η προς αγκύρωση δύναμη  $N_{fad}$  (τιμή σχεδιασμού) μπορεί να προσεγγιστεί βάσει ισορροπίας εσωτερικών εντατικών μεγεθών ως εξής:

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

Στην παραπάνω σχέση θεωρήθηκε ότι  $\varepsilon_{s1}/\varepsilon_f \approx 1$

Είναι αυτονόητο ότι η  $N_{sd}$  δεν πρέπει να ξεπερνά την  $N_{fad,max}$  (με συντελεστή ασφαλείας  $\gamma_b$ ) και ότι θα πρέπει να υπάρχει επαρκής διαθέσιμος χώρος για το μήκος αγκύρωσης  $l_b$ . Αν αυτό δεν συμβαίνει, η διατομή  $A$  θα πρέπει να οριστεί παραπέρα (προς την κατεύθυνση όπου μειώνεται η ροπή κάμψης, δηλαδή κοντά στην στήριξη), έτσι ώστε ή να μειωθεί η  $N_{fad}$  μέχρι την τιμή  $N_{fad,max}$  ή να απαιτείται μικρότερο  $l_b$  (μικρή σχετικά μείωση στη  $N_{fad}$  επιφέρει

σημαντική μείωση στο  $I_b$ ). Αν το μήκος αγκύρωσης και πάλι 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 ρωγμή**

Και εδώ μπορεί να εφαρμοστεί το αναλυτικό προσομοίωμα στο οποίο όμως πρέπει να γίνει μια μικρή διόρθωση δεδομένου ότι η πραγματική εντατική κατάσταση στη διεπιφάνεια σύνθετων υλικών - σκυροδέματος στις περιοχές δοκών με κατακόρυφη ρηγμάτωση (χαμηλή τιμή τέμνουσας δύναμης) διαφέρει ως προς αυτή της πειραματικής διάταξης. Λεπτομερείς αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία αλλά και πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι για αποκολλήσεις σε περιοχές πολύ μικρής ή μηδενικής τέμνουσας η μέγιστη διατμητική τάση στη διεπιφάνεια είναι αισθητά μικρότερη σε σχέση με αυτή της διάταξης. Με βάση λοιπόν διαθέσιμα αποτελέσματα προτείνεται μια ελαφρά τροποποίηση του προσομοιώματος, η οποία συνίσταται στην προσαύξηση της δύναμης που προκαλεί αποκόλληση κατά 30%. Συμπερασματικά, η μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά για αποκόλληση σε περιοχές καμπτικών ρωγμών (όπου η τέμνουσα είναι πρακτικά μηδέν) είναι :

$$\text{για } I_b \geq I_{b, \max} : \epsilon_{fbd,fl} = [(a_{fl} 0,5 k_c k_b) / \gamma_b] (f_{ctm} / E_{ftf})^{1/2}$$

$$\text{για } I_b < I_{b, \max} : \epsilon_{fbd,fl} = [(a_{fl} 0,5 k_c k_b) / \gamma_b] (f_{ctm} / E_{ftf})^{1/2} (I_b / I_{b, \max}) (2 - I_b / I_{b, \max})$$

όπου  $a_{fl} = 1,30$

Οι υπολογισμοί για τη ροπή αντοχής γίνονται με  $\epsilon_f = \epsilon_{fbd,fl}$

### **Αποκόλληση σε ενδιάμεση λοξή ρωγμή.**

Για αποκολλήσεις σε καμπτο-διατμητικές ρωγμές ισχύουν οι παρατηρήσεις με τη διαφορά ότι η προσαύξηση της δύναμης αποκόλλησης είναι μικρότερη, της τάξης του 25%. Έτσι η μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση στα σύνθετα υλικά είναι:

$$\text{για } I_b \geq I_{b, \max} : \epsilon_{fbd,fl-sh} = [(a_{fl-sh} 0,5 k_c k_b) / \gamma_b] (f_{ctm} / E_{ftf})^{1/2}$$

για  $I_b < I_{b,max}$  :  $\epsilon_{fbd,fl-sh} = [(a_{fl-sh} 0,5 k_c k_b) / \gamma_b] (f_{ctm} / E_{ft})^{1/2} (I_b / I_{b,max}) (2 - I_b / I_{b,max})$  .

όπου  $a_{fl-sh} = 1,25$

Οι υπολογισμοί για τη ροπή αντοχής γίνονται με  $\epsilon_f = \epsilon_{fbd,fl-sh}$ .

### **Διατμητική αστοχία στο άκρο- αποκόλληση της επικάλυψης.**

Η αποκόλληση των σύνθετων υλικών λόγω της ανάπτυξης διατμητικής δύναμης στο άκρο με κατεύθυνση επέκτασης περίπου οριζόντια (κάπου μεταξύ της κάτω στρώσης οπλισμού χάλυβα και της κόλλας), αποτελεί έναν από τους πιο συνηθισμένους μηχανισμούς αστοχίας δοκών (και πλακών) ενισχυμένων σε κάμψη. Ο μηχανισμός αυτός, ο οποίος οφείλει τη γένεση του κατά βάση στην ανάπτυξη σημαντικών οριζοντίων διατμητικών αλλά και κάθετων στον άξονα του οπλισμού ενίσχυσης εφελκυστικών τάσεων, στη στρώση επικάλυψης του σκυροδέματος έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης δεκάδων ερευνητών. Μια απλή, συντηρητική και αρκετά αξιόπιστη μέθοδος αντιμετώπισης περιλαμβάνει την παρακάτω σειρά ελέγχων:

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

$$M_{sd,end} \leq 2/3 M_{Rd}$$

Όπου  $V_{sd,end}$  και  $M_{sd,end}$  είναι η δρώσα τέμνουσα και ροπή (τιμές σχεδιασμού), αντίστοιχα, στη διατομή που τερματίζουν τα σύνθετα υλικά, είναι η διατμητική αντοχή του μέλους αγνοώντας τη συνεισφορά οπλισμών διάτμησης (συνδετήρες) και  $M_{Rd}$  είναι η ροπή αντοχής του μέλους (δηλαδή η ελάχιστη τιμή εξ αυτών που αντιστοιχούν στους μηχανισμούς. Επισημαίνεται ότι η ικανοποίηση της συνθήκης γίνεται εύκολα, π.χ. ρυθμίζοντας τη θέση τερματισμού των σύνθετων υλικών. Αν όμως δεν ικανοποιείται η συνθήκη, τότε απαιτείται ενίσχυση του μέλους (στην περιοχή κοντά στα άκρα των σύνθετων υλικών) έναντι τέμνουσας.



## Απαιτήσεις πλαστιμότητας

Βασική απαίτηση πλαστιμότητας αποτελεί η ενεργοποίηση μηχανισμού αστοχίας κατά τον οποίο η διαρροή του εφελκυσμένου χάλυβα θα προηγείται σαφώς οποιασδήποτε άλλης αστοχίας, ούτως ώστε να εξασφαλίζεται μια ελάχιστη τιμή πλαστιμότητας καμπυλοτήτων ( $\mu_\phi$ ). Αυτό σημαίνει ότι η εφελκυστική παραμόρφωση των σύνθετων υλικών στην κρίσιμη διατομή κατά την οριακή κατάσταση αντοχής,  $\epsilon_{f,u,c}$  θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από μια ελάχιστη τιμή  $\epsilon_{f,min}$ , ενώ έχει ως άνω όριο είτε την παραμόρφωση θραύσης  $\epsilon_{fud}$ , είτε την παραμόρφωση εκείνη η οποία αντιστοιχεί σε αποκόλληση (όχι όμως κατ' ανάγκη στην κρίσιμη διατομή σε κάμψη).

Η ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή παραμόρφωσης στα σύνθετα υλικά κατά την οριακή κατάσταση αντοχής  $\epsilon_{f,min}$  για δεδομένη πλαστιμότητα καμπυλοτήτων, υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

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

Όπου  $x_y$  το ύψος της θλιβόμενης ζώνης κατά την εκκίνηση διαρροής του χάλυβα. Η επίτευξη μεγάλης πλαστιμότητας δεν είναι πάντα εφικτή, ιδιαίτερα όταν η απαιτούμενη ποσότητα σύνθετων υλικών καθορίζεται από τις απαιτήσεις της οριακής κατάστασης λειτουργικότητας, οπότε το μέλος είναι υπέρ-διαστασιολογημένο σε όρους αντοχής.

## Σύνοψη διαδικασίας υπολογισμών- οριακή κατάσταση αντοχής

Η προτεινόμενη διαδικασία ελέγχων για την οριακή κατάσταση αντοχής συνοψίζεται στα παρακάτω βήματα:

1. Υπολογισμός ροπής αντοχής πριν από την ενίσχυση ( $M_o, R_d$ )
2. Υπολογισμός της αρχικής παραμόρφωσης  $\epsilon_o$  στην ακραία εφελκυσμένη ίνα βάσει της ροπής  $M_o$  που ασκείται στην κρίσιμη διατομή κατά την φάση της ενίσχυσης.
3. Υπολογισμός απαιτούμενης ποσότητας  $A_f$  υπολογισμού σύνθετων υλικών (για δεδομένη  $M_{Rd}$ ) για τις περιπτώσεις αστοχίας, αν δεν δρα τέμνουσα δύναμη στην κρίσιμη διατομή. Σημειώνεται ότι οι εξισώσεις με  $\epsilon_f \leq \epsilon_{f,lim} = \min(\epsilon_{fud}, \epsilon_{fbd}, \epsilon_{f-sh})$  περιγράφουν τρεις πιθανούς μηχανισμούς

αστοχίας (διαρροή χάλυβα-σύνθλιψη σκυροδέματος, διαρροή χάλυβα-θραύση σύνθετων υλικών, διαρροή χάλυβα-αποκόλληση σε ενδιάμεση ρωγμή)[προσεγγιστικά η  $\varepsilon_{f,lim}$  μπορεί θεωρηθεί σταθερή και ίση με 0,004-0,005]. Ακολουθεί ο έλεγχος των απαιτήσεων πλαστιμότητας.

4. Υπολογισμός μήκους αγκύρωσης και γενικά οριστικοποίηση της διάταξης των σύνθετων υλικών βάσει του ελέγχου αγκύρωσης.
5. Έλεγχος μηχανισμού (διατμητική αστοχία στο άκρο). Αν ο έλεγχος δεν ικανοποιείται γίνεται ενίσχυση σε τέμνουσα.
6. Έλεγχος της οριακής κατάστασης αστοχίας του μέλους από διάτμηση (δεδομένου ότι έχει αυξηθεί η καμπτική αντοχή). Αν ο έλεγχος δεν ικανοποιείται απαιτείται ενίσχυση.

#### **Παράδειγμα ενίσχυσης πλάκας με μανδύα σύνθετων υλικών**

Θεωρούμε πλάκα πάχους  $h=16\text{cm}$ , η οποία ενισχύεται στην κάτω παρειά της με δύο στρώσεις μανδύα σύνθετου υλικού από υαλονήματα. Ο μανδύας είναι τοποθετημένος σε λωρίδες (strips) με πλάτος  $w=60\text{cm}$ . Ο υπάρχων εφελκυστικός οπλισμός της πλάκας είναι  $A_s=2,96$  ή  $\varnothing 8/17$  και η επικάλυψη του σκυροδέματος είναι C16/20 και του χάλυβα S500. Το μέτρο ελαστικότητας στην κατεύθυνση των κυρίων ινών του σύνθετου υλικού είναι  $E_f=60\text{ GPa}$  και το πάχος μιας στρώσης ινοπλισμένου πολυμερούς είναι  $t_f=0,6\text{mm}$ . Επίσης η μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση του σύνθετου υλικού είναι  $\varepsilon_{f,lim}=0,007$ . Ζητείται να υπολογιστεί η αύξηση της ροπής αντοχής της πλάκας λόγω του μανδύα του σύνθετου υλικού θεωρώντας ότι η καμπτική ροπή λόγω ίδιου βάρους της πλάκας είναι μικρότερη από την ροπή ρηγμάτωσης οπότε η αρχική παραμόρφωση λόγω ίδιου βάρους είναι αμελητέα.

Η επίλυση γίνεται με δοκιμές έως ότου ικανοποιηθεί η εξίσωση ισοροπίας των δυνάμεων που ασκούνται στην διατομή

$$F_{cd}=F_s+F_{Sj}$$

Όπου  $F_{cd}$  είναι η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος,  $F_s$  η εφελκυστική δύναμη του χάλυβα του σιδηροοπλισμού και  $F_{Sj}$  η εφελκυστική δύναμη του μανδύα σύνθετου υλικού.

Η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος  $F_{cd}$  δίνεται από την σχέση

$$F_{cd} = \alpha \cdot 0,85 \cdot f_{cd} \cdot x \cdot b$$

όπου  $\alpha$  είναι ο συντελεστής πληρώσεως,  $f_{cd}$  η θλιπτική αντοχή σχεδιασμού του σκυροδέματος,  $x$  το βάθος της θλιβόμενης ζώνης και  $b$  το πλάτος της διατομής της πλάκας. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα θεωρούμε μοναδιαίο πλάτος οπότε  $b=1,00$  m.

Ο συντελεστής πληρώσεως  $\alpha$  υπολογίζεται ως συνάρτηση της θλιπτικής παραμόρφωσης αστοχίας της άνω παρεπείας του σκυροδέματος  $\epsilon_{cu}$ .

$$\alpha = \epsilon_{cu}(6 - \epsilon_{cu})/12 \quad \text{για } \epsilon_{cu} < 0,002$$

$$\alpha = 3\epsilon_{cu} - 2/3 \quad \text{για } 0,0035 \leq \epsilon_{cu} \leq 0,002$$

Επίσης το βάθος της θλιβόμενης ζώνης είναι:

$$x = [\epsilon_{cu} / (\epsilon_{cu} + \epsilon_{uj})] \cdot h$$

Η εφελκυστική δύναμη  $F_s$  του χάλυβα του σιδηροπλισμού εξαρτάται από την παραμόρφωση αστοχίας του χάλυβα  $\epsilon_{su}$

$$F_s = A_s E_s \epsilon_{su} \quad \epsilon_{su} < \epsilon_{syd}$$

$$F_s = A_s f_{yd} \quad \epsilon_{su} \geq \epsilon_{syd}$$

Όπου  $E_s = 200$  GPa είναι το μέτρο ελαστικότητας,  $f_{yd}$  η τιμή σχεδιασμού του ορίου διαρροής και  $\epsilon_{syd}$  η παραμόρφωση διαρροής του χάλυβα, αντίστοιχα.

Η εφελκυστική δύναμη του μανδύα σύνθετου υλικού  $F_{sj}$  υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$F_{sj} = n \cdot t_j \cdot w_j \cdot E_f \cdot \epsilon_{uj}$$

Όπου  $n$  ο αριθμός των στρώσεων του υλικού.

Με διαδοχικές δοκιμές βρίσκουμε ότι στην οριακή κατάσταση αστοχίας  $\epsilon_{su} = 0,0035$ ,  $\epsilon_{uj} = 0,00652 \leq \epsilon_{e,lim} = 0,0007$  και  $\epsilon_{su} = 0,00502 \geq \epsilon_{syd} = 0,00217$

Επίσης  $\alpha = 0,81$  και  $x = 0,056$  m. Αντικαθιστώντας στις εξισώσεις έχουμε  $f_{cd} = 410,28$  KN,  $F_s = 128,70$  KN  $F_{sj} = 281,58$  KN, οπότε ικανοποιείται η εξίσωση ισορροπίας.

Η ροπή αντοχής υπολογίζεται ως προς την κάτω παρεπεία της ενισχυμένης διατομής αμελώντας το πάχος του μανδύα

$$M_{Rd} = F_{cd}(h-a) - F_s(h-d)$$

Όπου  $a$  είναι η απόσταση της θλιπτικής δύναμης  $F_{cd}$  από την άνω παρεπεία του σκυροδέματος και  $d$  το στατικό ύψος της διατομής.

Είναι  $d = h - c - .8/2 = 13,6$  cm.

Επίσης  $\alpha = \zeta \times \text{όπου}$

$$\zeta = 8 - \varepsilon_{cu} / 4(6 - \varepsilon_{cu}) \quad \text{για} \quad \varepsilon_{cu} < 0,002$$

$$\zeta = \varepsilon_{cu}(3\varepsilon_{cu} - 4) + 2 / [2\varepsilon_{cu}(3\varepsilon_{cu} - 2)] \quad \text{για} \quad 0,0035 \geq \varepsilon_{cu} \geq 0,002$$

Αντικαθιστώντας στην σχέση επάνω έχω  $\zeta = 0,416$  οπότε  $\alpha = 0,023$  m.

$$\text{Άρα } M_{sd} = 410,28(0,16 - 0,023) - 128,70(0,16 - 0,136) = 53,02 \text{ KNm.}$$

Χωρίς τον μανδύα η ροπή αντοχής της διατομής υπολογίζεται με βάση τους πίνακες CEB

$$\omega = A_s / A_c f_{yd} / f_{cd} = 0,0087 \rightarrow \mu_{Rd} = 0,084$$

$$M_{Rd} = \mu_{Rd} b d^2 f_{cd} = 16,57 \text{ KNm.}$$

Επομένως η χρήση δύο στρώσεων μανδύα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της καμπτικής αντοχής της διατομής κατά 220%.

### **Παράδειγμα ενίσχυσης δοκού με ελάσματα σύνθετων υλικών.**

Θεωρούμε αμφιέριστη δοκό μήκους  $l = 7$  m. και διαστάσεων 30cm x 60cm η οποία διαθέτει στο άνοιγμα εφελκόμενο οπλισμό 6Ø18 ( $A_s = 15,26 \text{ cm}^2$ ), θλιβόμενο οπλισμό 2Ø12 ( $A_s = 2,26 \text{ cm}^2$ ) και συνδετήρες Ø8/20. Η επικάλυψη του σκυροδέματος είναι  $c = 2,5$  cm, η ποιότητα του σκυροδέματος C20/25 και του χάλυβα S500. Τα φορτία σχεδιασμού της δοκού είναι  $g_{sd} = 17 \text{ KN/m}$  (συμπεριλαμβανομένου του ίδιου βάρους) και  $q_{sd} = 25 \text{ KN/m}$ . Η δοκός πρόκειται να ενισχυθεί με ελάσματα πλάτους  $w_f = 7,5$  cm, πάχους  $t_f = 1,2$  cm, μέτρου ελαστικότητας  $E_f = 235 \text{ GPa}$  και μέγιστης επιτρεπόμενης παραμόρφωσης  $\varepsilon_{f,lim} = 0,005$ . Ζητείται να υπολογιστεί ο αριθμός των ελασμάτων ώστε το κινητό φορτίο σχεδιασμού της δοκού να αυξηθεί σε 35 KN/m. Για τους υπολογισμούς να θεωρηθεί ότι η καμπτική ροπή κατά την διάρκεια της ενίσχυσης είναι μεγαλύτερη από τη ροπή ρηγμάτωσης της δοκού.

Επειδή η ροπή κάμψης κατά τη διάρκεια των εργασιών ενίσχυσης είναι μεγαλύτερη από τη ροπή ρηγμάτωσης της δοκού, πρέπει να υπολογιστεί η αρχική παραμόρφωση λόγω μόνιμων φορτίων. Η ροπή κάμψης στο μέσο του ανοίγματος είναι  $M_o = g_{sd} l^2 / 8 = 17 \cdot 7^2 / 8 = 104,13 \text{ kNm}$ . Λόγω ισοροπίας η ροπή αυτή πρέπει να είναι ίση με το άθροισμα των ροπών των εσωτερικών δυνάμεων ως προς το κέντρο βάρους του εφελκόμενου χάλυβα.

$$M_o = F_{cd}(d - \alpha) + F_{s2}(d - d^2)$$

όπου  $d=60-2,5-0,8-1,8/2=55,8$  cm

$$d=2,5+0,8+1,8/2=4,2$$
 cm

Επίσης πρέπει να ισχύει η εξίσωση ισοροπίας των εσωτερικών δυνάμεων

$$F_{cd}+F_{s2}=F_{s1}$$

Αντίστοιχα το βάθος της θλιβόμενης ζώνης είναι

$$x_0=[\varepsilon_{co}/\varepsilon_{co}+\varepsilon_{so}]d.$$

όπου  $\varepsilon_{co}$  και  $\varepsilon_{so}$ , είναι η αρχική παραμόρφωση της άνω παρειάς του σκυροδέματος και του εφελκόμενου χάλυβα, αντίστοιχα. Επιλύοντας τις παραπάνω εξισώσεις και κάνοντας διαδοχικές δοκιμές βρίσκουμε:

$$\varepsilon_{co}=0,0006, \varepsilon_{so}=0,0008, F_{cd}=220,3 \text{ KN}, F_{s1}=242,7 \text{ KN}, x_0=0,24 \text{ m}.$$

Επίσης η παραμόρφωση στην ακραία εφελκόμενη ίνα της διατομής λόγω συμβιβαστού των παραμορφώσεων είναι

$$\varepsilon_o=[h-x_0/x_0] \varepsilon_{co}=[0,6-0,24/0,196]0,0006 = 0,0009$$

Η απαιτούμενη ροπή αντοχής της διατομής μετά την ενίσχυση είναι

$M_{Rd}=[(g_{sd}+q_{sd}) I^2] /8=52 \text{ } 7^2/8=318,50$  KNm. Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις βρίσκουμε ότι η οριακή κατάσταση αστοχίας  $\varepsilon_{cu} = 0,0035$ ,  $\varepsilon_{uj}=[\varepsilon_u(h-x)/x]-\varepsilon_{co},=0,0036 \leq \varepsilon_{c,lim} =0,005$  και  $\varepsilon_{su} =0,0039 \geq \varepsilon_{syd} =0,00217$ . Επίσης  $x=0,263 \text{ m}$ ,  $F_{cd} =724,6$  KN,  $F_{s1}=663,5$  KN,  $F_{s2} =98,3$  KN,  $n=2$  και  $F_{sj} =159,4$  KN. Ακόμα βρίσκουμε ότι η ροπή αντοχής της ενισχυμένης διατομής είναι  $M_{Rd}=382,37 \text{ KNm} > 318,5$  KNm. Επομένως, για την καμπτική ενίσχυση της δοκού απαιτούνται 2 ελάσματα.

Η θέση πέρα από την οποία υπολογίζεται το μήκος αγκύρωσης του σύνθετου υλικού βρίσκεται εκεί όπου η τιμή της συνολικής εφελκυστικής δύναμης που καταπονεί την διατομή είναι ίση με την μέγιστη δύναμη που μπορεί να παραλάβει ο χάλυβας μόνος του  $A_s f_{yd}$ . Η συνολική εφελκυστική δύναμη ισούται με το άθροισμα  $F_s+F_{sj}$  οπότε

$$A_s f_{yd}=A_s E_s \varepsilon_s+n t_j w_j E_f \varepsilon_j=F_{sj}(1+A_s E_s \varepsilon_s/n t_j w_j E_f \varepsilon_j)$$

Θεωρώντας ότι  $\varepsilon_s=\varepsilon_j$  η σχέση γράφεται

$$A_s f_{yd}=F_{sj}(1+A_s E_s/n t_j w_j E_f)$$

Αντικαθιστώντας στη σχέση  $A_s=15,26 \text{ cm}^2$ ,  $f_{yd}=43,48 \text{ KN/cm}^2$ ,  $E_s=2000 \text{ Gra}$ ,  $n=2$ ,  $w_j=7,5 \text{ cm}$  και  $E_f=235 \text{ Gra}$  έχουμε  $F_{sj}=84,53$  KN.

Η δύναμη αγκύρωσης του σύνθετου υλικού  $F_{sj}$ , υπέρβαση της οποίας συνεπάγεται αποκόλληση των ελασμάτων, αυξάνεται το μήκος αγκύρωσης  $l_b$ . Πειραματικά έχει βρεθεί ότι πέρα από μία οριακή τιμή του μήκους αγκύρωσης  $l_{b,max}$  παραμένει πρακτικά αμετάβλητη και ίση με  $F_{sj,max}$ . Είναι  $c_1 = 0,64$ ,  $k_c$  ο συντελεστής συμπίκνωσης του σκυροδέματος που μπορεί να λαμβάνεται ίσος με 1,0, για κανονική συμπίκνωση,  $k_b = 1,2$ ,  $f_{ctm} = 2,2$  Mpa και  $\gamma_b = 1,5$ . Επομένως  $F_{sj,max} = 30,25$  KN. Επίσης η οριακή τιμή του μήκους αγκύρωσης δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$l_{b,max} = (E_f t_j / c_2 f_{ctm})^{1/2}$$

Είναι  $c_2 = 2,0$  οπότε αντικαθιστώντας στην παραπάνω εξίσωση έχουμε  $l_{b,max} = 253$  mm. Επομένως το απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης των ελασμάτων σύνθετου υλικού ώστε να αποτραπεί η αποκόλλησή τους είναι 25 cm.

### Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας

Οι υπολογισμοί για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας μπορούν να βασιστούν σε γραμικά ελαστική συμπεριφορά των υλικών (εξαιρουμένου βεβαίως του σκυροδέματος σε εφελκυσμό).

Το ύψος της θλιβόμενης ζώνης της ρηγματωμένης διατομής υπολογίζεται βάσει των συνθηκών ισορροπίας και συμβιβαστού των παραμορφώσεων

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

$$E_c \epsilon_c = M_k / [1/2 b x_e (h - x_e / 3) + (\alpha_s - 1) A_{s2} (x_e - d_2) / x_e (h - d_2) - \alpha_s A_{s1} (d - x_e) / x_e (h - d)] + \alpha_s A_{s1} (d - x_e)^2 + \alpha_f A_f (h - x_e)^2$$

Όπου και η χαρακτηριστική ροπή κάμψης στη διατομή. Οι παραπάνω δύο εξισώσεις μπορούν να επιλυθούν για τους αγνώστους

Η ροπή αδρανείας της ρηγματωμένης διατομής δίνεται από την σχέση :

$$I_2 = b x_e^3 / 3 + (\alpha_s - 1) A_{s2} (x_e - d_2)^2 + \alpha_s A_{s1} (d - x_e)^2 + \alpha_f A_f (h - x_e)^2$$

ενώ της ρηγματωμένης μπορεί προσεγγιστικά να ληφθεί ως:

$$I_1 = b h^3 / 12$$

Σε ό,τι αφορά ελέγχους τάσεων, πλέον αυτών για το σκυρόδεμα και το χάλυβα, θα πρέπει να ελεγχθεί ότι η τάση στα σύνθετα υλικά,  $\sigma_f$ , για το μακροχρόνιο συνδυασμό δράσεων ικανοποιεί την συνθήκη:

$$\sigma_f = E_f \left[ \varepsilon_c (h - x_e) / x_e - \varepsilon_o \right] \leq \eta f_{fk}$$

όπου ο μειωτικός συντελεστής  $\eta$  αντανακλά την πτωχή συμπεριφορά (μείωση αντοχής) ορισμένων τύπων σύνθετων υλικών (π.χ. αυτών με ίνες γυαλιού) όταν βρίσκονται υπό μακροχρόνια ένταση. Βάσει πειραματικών δεδομένων ενδεικτικές τιμές για το συντελεστή  $\eta$  είναι 0,8, 0,5 και 0,3 για υλικά με ίνες άνθρακα, αραμιδίου και γυαλιού αντίστοιχα.

Γενικά πάντως ο παραπάνω έλεγχος σπανίως είναι κρίσιμος. Η διαδικασία υπολογισμών βέλους κάμψης και ανοίγματος ρωγμών είναι αντίστοιχη αυτής για στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος.

## ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ

Η ανάλυση διατομών για τις οποίες πρέπει να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση ροπής-κάμψης-αξονικής δύναμης (υποστυλώματα) γίνεται σε πλήρη αναλογία με τα προαναφερθέντα, με βασική διαφορά την προσθήκη ενός επί πλέον όρου στις εξισώσεις ισοροπίας δυνάμεων και υπολογισμού ροπών, αυτού που αντιστοιχεί στην αξονική δύναμη (τιμή σχεδιασμού που ασκείται στη διατομή, δηλαδή  $N_{sd}$  στο δεξί μέλος της εξίσωσης και  $N_{sd}[(h/2) - \delta_{Gx}]$  Επί πλέον μπορεί να αγνοηθεί η συνεισφορά των σύνθετων υλικών σε θλίψη. Υπό την προϋπόθεση επαρκούς αγκύρωσης ο μηχανισμός αστοχίας θα είναι ένας από τους παρακάτω:

- Διαρροή εφελκούμενου χάλυβα ( $\epsilon_{s1} \geq f_{yd}/E_s$ ) σύνθλιψη σκυροδέματος ( $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ )
- Διαρροή εφελκούμενου χάλυβα ( $\epsilon_{s1} \geq f_{yd}/E_s$ ), αποκόλληση ή θραύση σύνθετων υλικών [ $\epsilon_f = \epsilon_{f,lim} = \min(\epsilon_{fud}, \epsilon_{fbd,fl-sh})$ ]
- Σύνθλιψη σκυροδέματος ( $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ )

Ο συνδυασμός ροπής-αξονικής δύναμης κατά την αστοχία της κρίσιμης διατομής μπορεί να παρασταθεί γραφικά μέσω διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης στα οποία το ογκομετρικό ποσοστό διαμήκους οπλισμού ορίζεται ως:

$$q_{eq} = q_s + q_f E_f / E_s = A_{s,tot} / bd + A_{f,tot} / bd E_f / E_s.$$

όπου  $A_{s,tot} = 2A_{s1} = 2A_{s2}$  (συμμετρικά τοποθετημένος οπλισμός χάλυβα) και  $A_{s,tot} = 2A_f$  (συμμετρικά τοποθετημένος οπλισμός ενίσχυσης). Επίσης απλουστευτικά έχει υποτεθεί ότι  $\epsilon_{f,min} = 0,008$ .

Από τα παραπάνω διαγράμματα αλληλεπίδρασης φαίνεται ότι η αποτελεσματικότητα των σύνθετων υλικών στην αύξηση της ροπής αντοχής εξαρτάται σημαντικά από το μέγεθος του αξονικού φορτίου, και πάντως μειώνεται όσο αυτό αυξάνεται. Επίσης φαίνεται ότι οι καμπύλες αλληλεπίδρασης συγκλίνουν προς σημείο πάνω από το οποίο ολόκληρη η διατομή βρίσκεται σε θλίψη και επομένως η δράση των σύνθετων υλικών μπορεί (προσεγγιστικά) να αγνοηθεί (οπότε όλες οι καμπύλες ταυτίζονται).

Ως γενικό συμπέρασμα μπορούμε να αναφέρουμε ότι η εφαρμογή των υλικών για την αύξηση της καμπτικής αντοχής υποστυλωμάτων δεν είναι πάντοτε πρακτικά (κατασκευαστικά) εφικτή, ενώ είναι γενικά περιορισμένης

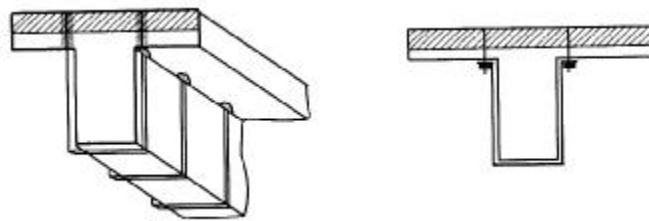


αποτελεσματικότητας, εκτός αν η αξονική δύναμη διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα (π.χ.  $V_d < 0,2$ ).

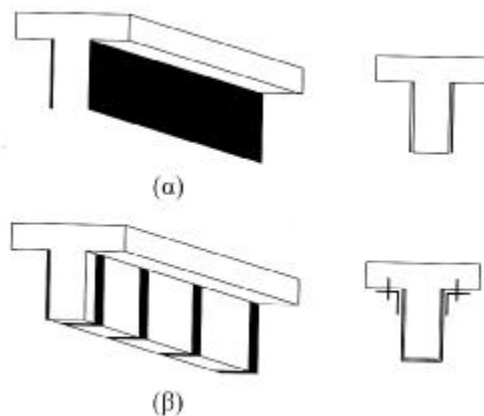
## ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

### Γενικά

Η ενίσχυση στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος σε διάτμηση με σύνθετα υλικά επιτυγχάνεται μέσω της επικόλλησης υφασμάτων ή σπανιότερα, ελασμάτων, τα οποία επικολλούνται στις εξωτερικές επιφάνειες με τις ίνες κατά το δυνατόν παράλληλες στις τροχιές των κυρίων τάσεων, δηλαδή περίπου κάθετα σε πιθανές ρωγμές. Τούτο βέβαια δεν είναι γενικά εφικτό, γι' αυτό, όπως και στην περίπτωση της χρήσης συνδετήρων για την ανάληψη τέμνουσας, οι ίνες εφαρμόζονται στις πιο πολλές περιπτώσεις με διεύθυνση κάθετη στον άξονα των δομικών μελών. Για σύνθετα υλικά με ίνες μιας διεύθυνσης, η σχέση διεύθυνσης ινών - αποτελεσματικότητας ως προς την ανάληψη φορτίων φαίνεται στο διάγραμμα, ενώ ενδεικτικές διατάξεις ενίσχυσης δομικών στοιχείων σε τέμνουσα φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



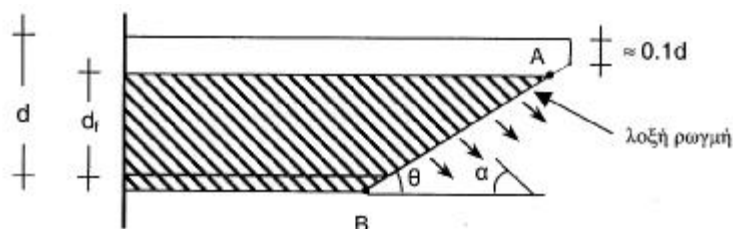
Αγκύρωση οπλισμών διάτμησης στη θλιβόμενη ζώνη.



Ενίσχυση δοκών σε διάτμηση με μανδύα σύνθετων υλικών (α) Ολόσωμοι μανδύες (β) 'Κολάρα'

## Ανάληψη τέμνουσας από τα σύνθετα υλικά

Κατά την οριακή κατάσταση διατμητικής αστοχίας οι ίνες που διαπερνούν μια λοξή (διατμητικού τύπου) ρωγμή “ ενεργοποιούνται ” και παραλαμβάνουν δυνάμεις κατ’ αναλογία με τους εσωτερικούς συνδετήρες.



Μηχανισμός ανάληψης τέμνουσας από τα σύνθετα υλικά σε λοξή ρωγμή.

Για την περίπτωση χρήσης λωρίδων πάχους  $t_f$  και πλάτους  $b_f$  (κάθετα στον άξονα κάθε λωρίδας), ανά αποστάσεις  $s_f$  (παράλληλα στον άξονα του μέλους), η τέμνουσα δύναμη σχεδιασμού που παραλαμβάνεται από τα σύνθετα υλικά,  $V_{fd}$  δίνεται από την σχέση:

$$V_{fd} = [2t_f b_f / s_f] d_f (\epsilon_{fe,d} E_f) (\cot\theta + \cot\alpha) \sin\alpha$$

Όπου  $d_f$  = ύψος του μανδύα που διαπερνάται από την ρωγμή μετρούμενο από τη στάθμη του διαμήκους οπλισμού ( και ίσο με  $0,9d$  στην περίπτωση που ο οπλισμός διάτμησης καλύπτει πλήρως τις πλευρές),  $\theta$  = γωνία ρωγμής ως προς τον άξονα του μέλους (μπορεί να θεωρηθεί  $45^\circ$ ),  $E_f$  = μέτρο ελαστικότητας σύνθετου υλικού παράλληλα στην διεύθυνση των ινών και  $\epsilon_{fe,d}$  = μέση τιμή, κατά μήκος της ρωγμής της παραμόρφωσης στα σύνθετα υλικά παράλληλα στη διεύθυνση των ινών, κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας λόγω τέμνουσας (“ενεργή” παραμόρφωση).

Οι διαφορές της παραπάνω εξίσωσης με την αντίστοιχη για τη συνεισφορά  $V_{wd}$  του συμβατικού οπλισμού διάτμησης (συνδετήρες), είναι:

$2t_f b_f$  αντί  $A_{sw}$  (εμβαδόν διατομής συνδετήρων),  $s_f$  αντί  $s$  (απόσταση συνδετήρων) και  $\epsilon_{fe,d} E_f$  αντί για  $f_{ywd}$  (τάση διαρροής συνδετήρων).

Στην πιο συνηθισμένη περίπτωση εφαρμογής συνεχούς υφάσματος αντί λωρίδων (οπότε  $b_f = s_f \sin\alpha$ ) η εξίσωση είναι :

$$V_{fd} = 2t_f d_f (\epsilon_{fe,d} E_f) (\cot\theta + \cot\alpha) \sin^2\alpha$$

Επίσης, συνήθως τα υλικά εφαρμόζονται με τις ίνες κάθετα στον άξονα του μέλους ( $\alpha = 90^\circ$ ), οπότε:

$$V_{fd} = 2t_f d_f (\epsilon_{fe,d} E_f) \cot\theta$$

Κατά τη οριακή κατάσταση αστοχίας του μέλους σε τέμνουσα, στα υλικά έχει αναπτυχθεί μια “ενεργή” παραμόρφωση  $\epsilon_{f_e,d}$ , με αντίστοιχη ορθή τάση  $\epsilon_{f_e,d} E_f$ . Ο υπολογισμός της πραγματικής κατανομής των ορθών τάσεων και παραμορφώσεων στα σύνθετα υλικά κατά μήκος της λοξής γραμμής είναι σχετικά περίπλοκος. Η παραμόρφωση αυτή είναι περίπου ανάλογη του ανοίγματος της ρωγμής, το οποίο είναι ελάχιστο στην θέση Α και μέγιστο στην θέση Β (του σχήματος) οπότε και η παραμόρφωση μεταβάλλεται περίπου γραμμικά μέχρι μία μέγιστη τιμή  $\epsilon_{f_d,max}$ , η οποία είναι και η καθοριστική για την αστοχία του σύνθετου υλικού. Βάσει των παραπάνω υποθέσεων, η “ενεργή” παραμόρφωση ισούται με:

$$\epsilon_{f_e,d} = D_f \epsilon_{f_d,max} = (1 - 0,5d_f/0,9d) \epsilon_{f_d,max}$$

Η τιμή της παραμόρφωσης  $\epsilon_{f_d,max}$  κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας, λόγω τέμνουσας εξαρτάται από το μηχανισμό αστοχίας, που μπορεί να είναι ένας από τους παρακάτω:

### **Θραύση των σύνθετων υλικών**

Αναμένεται να συμβεί κατά κανόνα σε επαρκώς αγκυρωμένους (κλειστούς) μανδύες. Στην περίπτωση αυτή:

$$\epsilon_{f_d,max} = f_{fde} / E_f$$

Όπου  $f_{fde}$  η (μειωμένη ως προς την εφελκυστική αντοχή, λόγω συγκεντρώσεων τάσεων στις γωνίες του μέλους) αντοχή σχεδιασμού. Ελλείψει περισσοτέρων στοιχείων μπορεί να θεωρηθεί ότι ο μειωτικός συντελεστής  $n_e$  για τον υπολογισμό της  $f_{fde}$  είναι 0,80 (αντιστοιχεί σε 20% μείωση της αντοχής που προκύπτει μέσω δοκιμής εφελκυσμού).

### **Αποκόλληση σύνθετων υλικών**

Για μανδύες ανοιχτού τύπου (τρίπλευροι ή δίπλευροι) η πιθανότητα αστοχίας με θραύση του μανδύα είναι σχετικά μικρή. Κύριος μηχανισμός αστοχίας είναι η αποκόλληση των σύνθετων υλικών, για την οποία αποδεχόμαστε την ισχύ του αναλυτικού προσομοιώματος. Στο προσομοίωμα αυτό θεωρούμε  $k_c=1$ ,  $k_b=1$  και μια προσαύξηση της παραμόρφωσης αποκόλλησης (όπως και στους υπολογισμούς ενισχύσεων έναντι κάμψης) δεδομένου ότι η πραγματική

εντατική κατάσταση στη διεπιφάνεια σύνθετων υλικών- σκυροδέματος στην περιοχή της ρωγμής διαφέρει ως προς αυτήν της πειραματικής διαταξης.

$$\text{για } l_b \geq l_{b,max} : \varepsilon_{fd,max} = \alpha_{sh} 0,5/\gamma_b [f_{ctm}/E_f t_f]$$

$$\text{για } l_b < l_{b,max} : \varepsilon_{fd,max} = \alpha_{sh} 0,5/\gamma_b [f_{ctm}/E_f t_f] (l_b/l_{b,max})(2-l_b/l_{b,max})$$

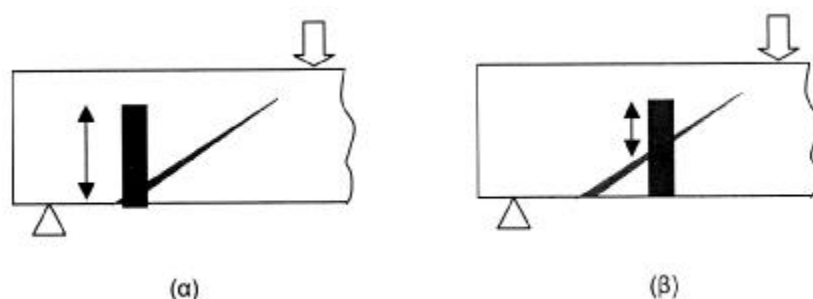
$$\text{για } \alpha_{sh} = 1,25$$

$$l_b = d_f / \sin \alpha \text{ για "τρίπλευρο" μανδύα τύπου V}$$

$$l_b = d_f / 2 \sin \alpha \text{ για "δίπλευρο" μανδύα τύπου II}$$

$$l_{b,max} = (E_f t_f / C_2 f_{ctm})^{1/2}$$

Στην περίπτωση τρίπλευρου μανδύα το καλύτερο αγκυρωμένο τμήμα σύνθετων υλικών είναι αυτό στο κάτω τμήμα, με μήκος αγκύρωσης  $d_f / \sin \alpha$ , ενώ στην περίπτωση δίπλευρου μανδύα το μήκος αγκύρωσης είναι μέγιστο στο μέσο της ρωγμής. Αυτό εξηγεί τον αριθμό 2 στον παρανομαστή της παραπάνω εξίσωσης.



Μήκος αγκύρωσης μανδύα (α) που καλύπτει και το κάτω πλέγμα (β) μόνο στις δύο πλευρές

### Πρόωρη αστοχία λόγω μεγάλου ανοίγματος της λοξής ρωγμής

Η ανάπτυξη μεγάλου ανοίγματος ρωγμής ενδέχεται να μειώσει σημαντικά την συνεισφορά των μηχανισμών ανάληψης τέμνουσας που εκφράζονται μέσω του όρου  $V_{cd}$  (λόγω σημαντικής μείωσης της αλληλεμπλοκής των αδρανών και / ή της θλιβόμενης ζώνης), με αποτέλεσμα να βρεθεί το μέλος στην οριακή κατάσταση αστοχίας λόγω τέμνουσας πριν αστοχήσουν (λόγω θραύσης ή αποκόλλησης) τα σύνθετα υλικά. Γι' αυτό είναι σκόπιμο να περιορίζεται η  $\varepsilon_{fd,max}$  σε μία μέγιστη τιμή, της τάξης του 6%.

Η συνεισφορά των σύνθετων υλικών στην ανάληψη τέμνουσας υπολογίζεται μέσω του όρου  $V_{fd}$  στην γνωστή σχέση με την τέμνουσα σχεδιασμού:

$$V_{Rd} = \min(V_{cd} + V_{wd} + V_{fd}, V_{Rd2})$$

Όπου η  $V_{cd}$  εκφράζεται ως ποσοστό της  $V_{Rd1}$  (π.χ. 30% στις κρίσιμες περιοχές δοκών και υποστυλωμάτων αν  $v_d < 0,1$ , 90% στις κρίσιμες περιοχές υποστυλωμάτων αν  $v_d > 0,1$ , 25% στις κρίσιμες περιοχές τοιχωμάτων, 100% στις μη κρίσιμες περιοχές.

Το  $\varepsilon_{fd,max}$  υπολογίζεται ως:

- Για κλειστό, επαρκώς αγκυρωμένο μανδύα (π.χ. υποστυλώματα):  
Το ελάχιστο της τιμής της εξίσωσης και του 0,6
- Για ανοικτό, ανεπαρκώς αγκυρωμένο μανδύα (π.χ. δίπλευρος ή τρίπλευρος):  
Το ελάχιστο της τιμής της εξίσωσης και του 0,6.

Η  $V_{fd}$  είναι η πρόσθετη τέμνουσα που παραλαμβάνει ο μανδύας.

### Κυκλική Διατομή

Η τέμνουσα δύναμη  $V_{fd}$  που παραλαμβάνεται από το μανδύα, ο οποίος χρησιμοποιείται για την ενίσχυση στοιχείου κυκλικής διατομής διαμέτρου  $D$ , δίνεται από την σχέση :

$$V_{fd} = 0,5 \sigma_{wd} \rho_w \pi D^2 / 4 (\cot \theta + \cot \alpha) \sin^2 \alpha$$

όπου  $\sigma_{wd}$  και  $\rho_w$  είναι η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσης και το ογκομετρικό ποσοστό του μανδύα σύνθετου υλικού, αντίστοιχα,  $\theta$  είναι η γωνία κλίσης των θλιβόμενων διαγωνίων του σκυροδέματος και  $\alpha$  η γωνία κλίσης των κυρίως ινών του πολυμερούς ως προς τον διαμήκη άξονα του στοιχείου.

Το ογκομετρικό ποσοστό  $\rho_w$  του μανδύα σύνθετου υλικού είναι ίσο με :

$$\rho_w = 4n t_j / D \sin \alpha$$

όπου  $n$  ο αριθμός των στρώσεων του μανδύα από πολυμερές και  $t_j$  το πάχος μιας στρώσης.

Θεωρώντας  $\theta = 45^\circ$  και  $\alpha = 90^\circ$  η σχέση απλοποιείται ως εξής:

$$V_{fd} = 0,5 \sigma_{wd} n t_j \pi D$$

Η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσης  $\sigma_{wd}$  του μανδύα σύνθετου υλικού μπορεί να ληφθεί από την παρακάτω σχέση:

$$\sigma_{wd} = \varepsilon_{max} E_f / \gamma_\beta$$

όπου  $\varepsilon_{\max}=0,006$  είναι η μέγιστη παραμόρφωση του υλικού,  $E_f$  το μέτρο ελαστικότητας στην κατεύθυνση των κυρίων ινών, ενώ ο συντελεστής  $\gamma_\beta$  λαμβάνεται ίσος με 1,25.

### Ορθογωνική διατομή

Στην περίπτωση στοιχείου ορθογωνικής διατομής με πλάτος  $b_w$  και ύψος  $h$ , η τέμνουσα  $V_{fd}$  που παραλαμβάνεται από τον μανδύα υπολογίζεται από την σχέση:

$$V_{fd}=\sigma_{wd}\rho_w b_w(0,9h)(\cot\theta+\cot\alpha)\sin^2\alpha.$$

όπου  $\sigma_{wd}$  και  $\rho_w$  είναι η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσης και το γεωμετρικό ποσοστό του μανδύα, αντίστοιχα,  $\theta$  είναι η γωνία κλίσης των θλιβόμενων διαγωνίων του σκυροδέματος και  $\alpha$  η γωνία των κυρίων ινών του υλικού ως προς τον διαμήκη άξονα του στοιχείου. Στη γενική περίπτωση που  $\theta=45^\circ$  και  $\alpha=90^\circ$ , η σχέση παίρνει την μορφή

$$V_{fd}=0,9\sigma_{wd}\rho_w b_w h$$

Για τον υπολογισμό της τιμής σχεδιασμού της ενεργού τάσης  $\sigma_{wd}$  του μανδύα χρησιμοποιούμε την ακόλουθη σχέση:

$$\sigma_{wd}=\varepsilon_{fd}E_f$$

όπου  $E_f$  είναι το μέτρο ελαστικότητας στην κατεύθυνση των κυρίων ινών και  $\varepsilon_{fd}$  η τιμή σχεδιασμού της ενεργού παραμόρφωσης του ινοπλισμένου πολυμερούς. Η  $\varepsilon_{fd}$  εξαρτάται από τον τύπο του μανδύα.

Για μανδύες κλειστού τύπου η  $\varepsilon_{fd}$  μπορεί να υπολογιστεί:

$$\varepsilon_{fd}=\min[0,17\varepsilon_{fud}(f_{cm}^{2/3}/E_f\rho_w)^{0,30}, 0,006/\gamma_{fi}]$$

όπου  $f_{cm}=f_{ck}+8$  η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.

Αντίστοιχα για ανοικτούς μανδύες:

$$\varepsilon_{fd}=\min[0,17\varepsilon_{fud}(f_{cm}^{2/3}/E_f\rho_w)^{0,30}, 0,65 \cdot 10^{-3}/\gamma_{fb}, (f_{cm}^{2/3}/E_f\rho_w)^{0,56}, 0,006/\gamma_{fi}]$$

Στις παραπάνω σχέσεις με  $f_{cm}$  συμβολίζουμε τη μέση θλιπτική τάση του σκυροδέματος σε  $M_{pa}$ , το  $E_f$  λαμβάνεται σε  $Mpa$ , το  $E_f$  λαμβάνεται σε  $Gpa$ , ενώ οι συντελεστές ασφαλείας  $\gamma_{fi}$  και  $\gamma_{fb}$  παίρνουν τις τιμές 1,25 και 1,30 αντίστοιχα. Επίσης  $\varepsilon_{fud}$  είναι η τιμή σχεδιασμού της παραμόρφωσης θραύσης του ινοπλισμένου πολυμερούς, η οποία δίνεται από την σχέση:

$$\varepsilon_{fud}=\varepsilon_{fuk}/\gamma_f$$

όπου  $\varepsilon_{fuk}$  είναι η χαρακτηριστική τιμή της παραμόρφωσης θραύσης του υλικού ενώ ο συντελεστής ασφαλείας  $\gamma_f$  λαμβάνει την τιμή 1,20, 1,25 και 1,30 για ίνες υάλου, πολυαραμίδης και άνθρακα αντίστοιχα.

Το γεωμετρικό ποσοστό του μανδύα υπολογίζεται από την σχέση:

$$\rho_w = 2nt/b_w \sin \alpha$$

όπου  $n$  είναι ο αριθμός των στρώσεων του μανδύα και  $t$  είναι το πάχος μιας στρώσης.

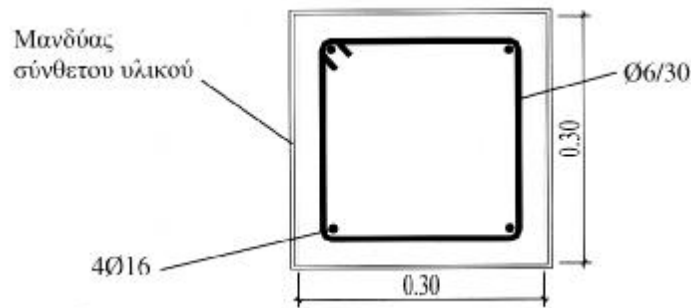
Εάν οι ίνες του πολυμερούς είναι κάθετες στον άξονα του στοιχείου, τότε  $\alpha = 90^\circ$  οπότε η σχέση απλοποιείται ως εξής:

$$V_{fd} = 1,8nt_f \varepsilon_{fd} E_f$$

### **Παράδειγμα ενίσχυσης υποστυλώματος σύνθετων υλικών**

Θεωρούμε υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής διαστάσεων 30 cm 30 cm, το οποίο πρόκειται να ενισχυθεί με μανδύα σύνθετου υλικού είτε από υαλονήματα είτε από ανθρακονήματα. Το υποστύλωμα έχει διαμήκη οπλισμό 4Ø16. Ο υπάρχων οπλισμός περίσφιγξης του υποστυλώματος αποτελείται από συνδετήρες Ø6/30 και η επικάλυψη του σκυροδέματος είναι  $c = 2$  cm. Η ποιότητα του σκυροδέματος είναι C12/15 και του χάλυβα S400. Το πάχος μιας στρώσης υαλονημάτων και ανθρακονημάτων είναι  $t_j = 1,0$  mm και  $t_j = 0,6$  mm, αντίστοιχα. Επίσης το μέτρο ελαστικότητας στην κατεύθυνση των κυρίων ινών για το μανδύα υαλονημάτων είναι  $E_f = 70$  GPa και για τον μανδύα ανθρακονημάτων  $E_f = 200$  GPa. Τέλος η χαρακτηριστική τιμή της παραμόρφωσης θραύσης είναι  $\varepsilon_{fuk} = 0,01$  και  $\varepsilon_{fuk} = 0,008$  για τον μανδύα υαλονημάτων και ανθρακονημάτων αντίστοιχα. Ζητείται να υπολογιστεί ο αριθμός των στρώσεων του μανδύα που απαιτούνται σε κάθε περίπτωση ώστε να επιτευχθεί αύξηση της διατμητικής αντοχής του υποστυλώματος που θα εξασφαλιζόταν με συνδετήρες Ø8/10. Επίσης να υπολογιστεί η αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος και της πλαστιμότητας του στοιχείου λόγω του μανδύα σύνθετων υλικών. Το αξονικό θλιπτικό φορτίο που καταπονεί τη διατομή είναι  $N_{sd} = 400$  KN.





### Αύξηση διατμητικής αντοχής υποστυλώματος

Δεδομένου ότι η τέμνουσα που παραλαμβάνεται από το σκυρόδεμα  $V_{cd}$  είναι η ίδια τόσο για την αρχική όσο και για την ενισχυμένη διατομή, η πρόσθετη τέμνουσα που θα παραλάβει ο μανδύας σύνθετων υλικών  $V_{fd}$  θα προκύψει ως η διαφορά τη τέμνουσας  $V_{wd,επ}-V_{wd,υπ}$  που παραλαμβάνει ο επιθυμητός και ο υπάρχων οπλισμός διάτμησης, δηλαδή οι συνδετήρες  $\text{Ø}8/10$  και  $\text{Ø}6/30$  αντίστοιχα.

Η τέμνουσα που παραλαμβάνεται από τον οπλισμό διάτμησης της διατομής είναι :

$$V_{wd}=A_{sw}/s \cdot 0,90 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (1+\cot\alpha) \cdot \sin\alpha$$

Όπου  $A_{sw}$  είναι η διατομή του οπλισμού διάτμησης,  $s$  η απόσταση μεταξύ των συνδετήρων,  $d$  το στατικό ύψος της διατομής,  $f_{ywd}$  η τιμή σχεδιασμού του ορίου διαρροής του χάλυβα των συνδετήρων και  $\alpha$  η γωνία κλίσης του οπλισμού διάτμησης.

Για τους συνδετήρες  $\text{Ø}8/10$ ,  $d=30-2\cdot 0,8-1,6/2=26,4$  cm οπότε αντικαθιστώντας στην πάνω σχέση έχουμε:

$$V_{wd,επ}=(2\cdot 0,50/10) \cdot 0,90 \cdot 26,4 \cdot (40/1,15) \cdot (1+\cot 90^\circ) \cdot \sin 90^\circ= 82,64 \text{ KN}$$

Ομοίως, για τους συνδετήρες  $\text{Ø}6/30$ ,  $d=30-2\cdot 0,6-1,6/2=26,6$  cm οπότε:

$$V_{wd,υπ}=(2\cdot 0,28/30) \cdot 0,90 \cdot 26,6 \cdot (40/1,15) \cdot (1+\cot 90^\circ) \cdot \sin 90^\circ=15,54 \text{ KN}$$

Θεωρώντας  $\theta=45^\circ$  και  $\alpha=90^\circ$ , η  $V_{fd}$  δίνεται από την σχέση  $1,8n_t \cdot h \cdot \varepsilon_{fd} \cdot E_f$

Επιλύοντας ως προς τον αριθμό των στρώσεων του μανδύα  $n$  έχουμε:

$$n=V_{fd}/1,8 \cdot t \cdot h \cdot \varepsilon_{fd} \cdot E_f$$

### Μανδύας Υαλονημάτων

Δεδομένου ότι για τον υπολογισμό της  $\varepsilon_{fd}$  πρέπει να είναι γνωστό το γεωμετρικό ποσοστό του μανδύα  $\rho_w$ , το οποίο είναι συνάρτηση του αριθμού των στρώσεων  $n$ , απαιτείται επαναληπτική διαδικασία.

Για μια στρώση μανδύα υαλονημάτων έχουμε

$$\rho_w = 2nt/b_w \sin\alpha = 2 \cdot 1 \cdot 0,1 / (30 \cdot \sin 90^\circ) = 0,0067$$

$$\varepsilon_{fud} = \varepsilon_{fuk} / \gamma_f = 0,01 / 1,20 = 0,0083$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{fud} &= \min[0,17 \varepsilon_{fud} (f_{cm}^{2/3} / E_f \rho_w)^{0,30}, 0,006 / \gamma_f] = \\ &= \min[0,17 \cdot 0,0083 (20^{2/3} / 70 \cdot 0,0067)^{0,30}, 0,006 / 1,25] = \\ &= \min[0,0032, 0,0048] = 0,0032 \end{aligned}$$

$$n = V_{fd} / 1,8 t h \varepsilon_{fd} E_f = 67,10 / 1,8 \cdot 0,1 \cdot 30 \cdot 0,0032 \cdot 7000 = 0,55 \approx 1$$

Επομένως μια στρώση μανδύα υαλονημάτων είναι επαρκής για την αύξηση της διατμητικής αντοχής του υποστύλωματος. Παρόλ' αυτά, συνίσταται να χρησιμοποιηθούν δυο στρώσεις για πρόσθετη προστασία των θλιβομένων ράβδων του διαμήκους οπλισμού από λυγισμό.

### Μανδύας Ανθρακονημάτων

Όμοια με την επαναληπτική διαδικασία για το μανδύα υαλονημάτων, για μια στρώση μανδύα ανθρακονημάτων έχουμε:

$$\rho_w = 2nt/b_w \sin\alpha = 2 \cdot 1 \cdot 0,06 / (30 \cdot \sin 90^\circ) = 0,004$$

$$\varepsilon_{fud} = \varepsilon_{fuk} / \gamma_f = 0,008 / 1,30 = 0,0062$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{fud} &= \min[0,17 \varepsilon_{fud} (f_{cm}^{2/3} / E_f \rho_w)^{0,30}, 0,006 / \gamma_f] = \\ &= \min[0,17 \cdot 0,0062 (20^{2/3} / 200 \cdot 0,004)^{0,30}, 0,006 / 1,25] = \\ &= \min[0,0020, 0,0048] = 0,0020 \end{aligned}$$

$$n = V_{fd} / 1,8 t h \varepsilon_{fd} E_f = 67,10 / 1,8 \cdot 0,06 \cdot 30 \cdot 0,0020 \cdot 20000 = 0,52 \approx 1$$

Επομένως μία στρώση μανδύα ανθρακονημάτων είναι επαρκής για την αύξηση της διατμητικής αντοχής του υποστύλωματος. Παρόλ' αυτά, όπως και στην περίπτωση του μανδύα υαλονημάτων, θα χρησιμοποιηθούν δύο στρώσεις μανδύα.

### Αύξηση θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος

Σύμφωνα με την §18.4.4.2 του Ε.Κ.Ω.Σ. 2000, το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό του οπλισμού περίσφιγξης για το τετραγωνικό υποστύλωμα του παραδείγματος δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\omega_{wd}=(4A_{sw}/sb_o) (f_{yd}/f_{cd})$$

όπου  $A_{sw}$  είναι το εμβαδόν της διατομής του συνδετήρα,  $s$  η απόσταση μεταξύ των συνδετήρων και  $b_o$  το πλάτος της διατομής του πυρήνα, αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί ότι το  $b_o$  μετράται στα κέντρα των διαμήκων ράβδων.

Επομένως, για τους συνδετήρες  $\emptyset 8/10$  είναι

$$b_o=30-2 \cdot 2 \cdot 0,8-1,6=22,8 \text{ cm}$$

Αντικαθιστώντας στην αρχική σχέση για το  $\omega_{wd}$ , το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό των συνδετήρων  $\emptyset 8/10$  είναι

$$\omega_{wd}=(4 \cdot 0,50/10 \cdot 22,8) [(400/1,15)/ (12/1,5)]=0,383 \geq 0,10$$

Αντίστοιχα για τους συνδετήρες  $\emptyset 6/30$  είναι

$$b_o=30-2 \cdot 2 \cdot 0,6-1,6=23,2 \text{ cm}$$

Το υπάρχον μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό των συνδετήρων  $\emptyset 6/30$  είναι :

$$\omega_{wd}=(4 \cdot 0,28/30 \cdot 23,2) [(400/1,15)/ (12/1,5)]=0,071$$

Βάσει πειραματικών αποτελεσμάτων από την βιβλιογραφία, η θλιπτική αντοχή

$$f_{cc}=(1+2,5 \alpha \omega_{wd})f_c \quad \alpha \omega_{wd} < 0,10$$

$$f_{cc}=(1+2,5 \alpha \omega_{wd})f_c \quad \alpha \omega_{wd} > 0,10$$

όπου  $\alpha$  είναι ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης που εξαρτάται από την διάταξη και τη απόσταση των συνδετήρων και  $f_c$  η θλιπτική αντοχή του απερίσφιγκτου σκυροδέματος. Σύμφωνα με την §18.4.4.2 του Ε.Κ.Ω.Σ. 2000 , για ορθογωνικά υποστυλώματα ο συντελεστής  $\alpha$  υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\alpha=\alpha_n \alpha_s=(1-8/3n) (1-s/2b_o)^2$$

όπου  $s$  είναι η καθαρή ελεύθερη απόσταση μεταξύ των συνδετήρων

Για τους συνδετήρες  $\emptyset 8/10$ ,  $s=10-2 \cdot 0,4=9,2 \text{ cm}$  οπότε

$$\alpha=(1-8/3 \cdot 4) (1- 9,2/2 \cdot 22,8)^2=0,333 \cdot 0,637=0,212$$

Επομένως

$$\alpha \omega_{wd}=0,212 \cdot 0,383=0,0814 < 0,10$$

οπότε σύμφωνα με τις αρχικές σχέσεις έχουμε :

$$f_{cc}=(1+2,5 \cdot 0,0814)f_c=1,204f_c$$

Για τους υπάρχοντες συνδετήρες  $\emptyset 6/30$ ,  $s =30-2 \cdot 0,3=29,4 \text{ cm}$  οπότε:

$$\alpha=(1-8/3 \cdot 4) (1- 29,4/2 \cdot 23,2)^2=0,333 \cdot 0,134=0,045$$

Επομένως

$$\alpha \omega_{wd}=0,045 \cdot 0,071=0,0032 < 0,10$$

οπότε σύμφωνα με τις αρχικές σχέσεις έχουμε :

$$f_{cc}=(1+2,5 \cdot 0,0032)f_c=1,008f_c$$

### **Μανδύας υαλονημάτων**

Το ογκομετρικό ποσοστό περίσφιγξης του σκυροδέματος από το μανδύα σύνθετου υλικού που αποτελείται από δύο στρώσεις ινών υάλου δίνεται από την σχέση:

$$\rho_{fd}=2nt(b+d)/(bd)=2 \cdot 2 \cdot 0,01 \cdot (30+30)/(30 \cdot 30)=0,026$$

Επομένως η αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος λόγω του μανδύα των υαλονημάτων είναι :

$$f_{cc}=f_{co}(1+1,5\rho_{fd})=1,040f_{co}=1,040 \cdot 1,008 f_c=1,048f_c$$

Άρα η συνολική αύξηση που παρέχεται στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος από τους υπάρχοντες συνδετήρες Ø6/30 και τις δυο στρώσεις μανδύα σύνθετου υλικού υαλονημάτων είναι 4,8%.

### **Μανδύας ανθρακονημάτων**

Το ογκομετρικό ποσοστό περίσφιγξης του σκυροδέματος από το μανδύα δύο στρώσεων ανθρακονημάτων είναι:

$$\rho_{fd}=2nt(b+d)/(bd)=2 \cdot 2 \cdot 0,06 \cdot (30+30)/(30 \cdot 30)=0,016$$

Επομένως η αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος λόγω του μανδύα των ανθρακονημάτων είναι :

$$f_{cc}=f_{co}(1+1,5\rho_{fd})=1,024f_{co}=1,024 \cdot 1,008 f_c=1,032f_c$$

Άρα η συνολική αύξηση που παρέχεται στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος από τους συνδετήρες Ø6/30 και τις δυο στρώσεις μανδύα σύνθετου υλικού ανθρακονημάτων είναι 3,2%.

Παρατηρούμε ότι και στις δυο περιπτώσεις η αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος λόγω του μανδύα σύνθετων υλικών είναι σημαντικά μικρότερη από την αύξηση που επιτυγχάνεται με συνδετήρες Ø8/10 και η οποία είναι περίπου 20% ( $f_{cc}=1,20f_c$ ). Είναι χαρακτηριστικό ότι για να επιτευχθεί μια τέτοια αύξηση, απαιτούνται είτε δέκα στρώσεις μανδύα υαλονημάτων είτε δεκάξι στρώσεις μανδύα ανθρακονημάτων. Επειδή ο παραπάνω αριθμός στρώσεων είναι μη ρεαλιστικός, στην πράξη δεν θα επιδιώκαμε να επιτύχουμε τόσο μεγάλη αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος με μανδύα ινοπλισμένων πολυμερών.

### Αύξηση πλαστιμότητας

Προκειμένου να υπολογιστεί η αύξηση της πλαστιμότητας λόγω του μανδύα πρέπει αρχικά να βρεθεί η πλαστιμότητα του του υποστυλώματος με τους υπάρχοντες συνδετήρες Ø6/30.

Η παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος  $\varepsilon_{co}$ , λόγω περισφιγξης της διατομής από τους υπάρχοντες συνδετήρες είναι ίση με  $\varepsilon_{co}=0,0035+0,10\alpha\omega_{wd}=0,0035+0,0003=0,0038$

Από τον υπολογισμό ροπών-καμπυλοτήτων για  $N_{sd}=400$  KN, προκύπτει η καμπυλοτητα διαρροής της διατομής της πλαστικής άρθρωσης του στοιχείου  $\varphi_y=0,013m^{-1}$ , καθώς και το μήκος της θλιβόμενης ζώνης κατά την αστοχία  $c_u=0,238m$ .

Η καμπυλότητα κατά την αστοχία της διατομής  $\varphi_u$  προκύπτει από τη σχέση θέτοντας  $\varepsilon_{cu}=\varepsilon_{co}$

$$\Phi_u=\varepsilon_{cu}/c_u=0,0038/0,238=0,016m^{-1}$$

Επομένως, η πλαστιμότητα καμπυλότητας με της διατομής της πλαστικής άρθρωσης είναι :

$$\mu_c = \varphi_u / \varphi_y = 0,016/0,013 = 1,24$$

### Μανδύας υαλονημάτων

Η αυξημένη παραμόρφωση αστοχίας του περισφιγμένου από το μανδύα υαλονημάτων σκυροδέματος  $\varepsilon_{cu}$  υπολογίζεται από την αρχική σχέση αντικαθιστώντας  $\rho_{fd}=0,026, \varepsilon_{co}=0,0038, f_{cc}=1,048f_c=1,048*12=12,58$  Mpa,  $\varepsilon_{fud}=0,0083$  και  $f_{uj}=\varepsilon_{fud}Ef=583$  Mpa.

$$\varepsilon_{cu}=[\rho_{fd} f_{uj} \varepsilon_{fud}/0,8 f_{cc}]+\varepsilon_{co}=[0,026 \cdot 583 \cdot 0,0083/0,8 \cdot 12,58]+0,0038=0,0167.$$

Από την ανάλυση ροπών-καμπυλοτήτων προκύπτει  $\varphi_y=0,013m^{-1}$  και  $c_u=0,215m$ .

Η καμπυλότητα κατά την αστοχία της διατομής  $\varphi_u$  προκύπτει από τη σχέση:

$$\Phi_u=\varepsilon_{cu}/c_u=0,0167/0,215=0,082m^{-1}$$

Άρα, η πλαστιμότητα καμπυλότητας  $\mu_c$  της διατομής της πλαστικής άρθρωσης είναι :

$$\mu_c = \varphi_u / \varphi_y = 0,082/0,013 = 6,29.$$

Είναι προφανής η ουσιαστική αύξηση της πλαστιμότητας με την προσθήκη υαλονημάτων.

## Μανδύας ανθρακονημάτων

Η αυξημένη παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος  $\varepsilon_{cu}$  υπολογίζεται από την αρχική σχέση αντικαθιστώντας  $\rho_{fd}=0,016, \varepsilon_{co}=0,0038, f_{cc}=1,032f_c=1,032 \cdot 12=12,38 \text{ Mpa}, \varepsilon_{fud}=0,0062$  και  $f_{uj}=\varepsilon_{fud}E_f=1231 \text{ Mpa}$ .

$$\varepsilon_{cu}=[\rho_{fd} f_{uj} \varepsilon_{fud}/0,8 f_{cc}]+\varepsilon_{co}=[0,016 \cdot 1231 \cdot 0,0062/0,8 \cdot 12,38]+0,0038=0,0160.$$

Από την ανάλυση ροπών-καμπυλοτήτων προκύπτει  $\varphi_y=0,013\text{m}^{-1}$  και  $c_u=0,214\text{m}$ .

Η καμπυλότητα κατά την αστοχία της διατομής  $\varphi_u$  προκύπτει από τη σχέση:

$$\Phi_u=\varepsilon_{cu}/c_u=0,0160/0,214=0,078 \text{ m}^{-1}$$

Άρα, η πλαστιμότητα καμπυλότητας  $\mu_c$  της διατομής της πλαστικής άρθρωσης είναι :

$$\mu_c = \varphi_u / \varphi_y = 0,078/0,013 = 6,03.$$

Επομένως όπως και στην περίπτωση των υαλονημάτων παρατηρείται σημαντική αύξηση της πλαστιμότητας.

## Κόμβοι

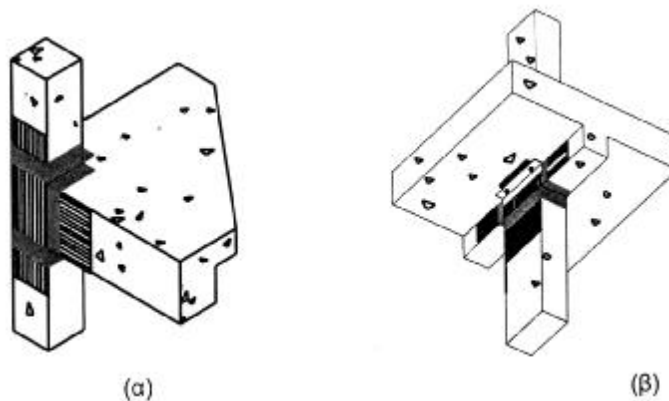
Η μελέτη της ενίσχυσης κόμβων δοκών - υποστυλωμάτων σε διάτμηση ξεκίνησε πρόσφατα και κατέδειξε ότι ακόμα και σχετικά μικρά ποσοστά σύνθετων υλικών (π.χ. 2-3 στρώσεις υφάσματος με ίνες άνθρακα ) καλά αγκυρωμένων έξω από τις περιοχές των κόμβων επαρκούν για την αύξηση της διατμητικής αντοχής των κόμβων σε ποσοστά μέχρι και 80-100%. Η διάταξη των σύνθετων υλικών για να καταστεί τούτο εφικτό θα πρέπει να περιλαμβάνει υφάσματα τοποθετημένα με τη διεύθυνση των ινών παράλληλη κατά προτεραιότητα στις δοκούς, αλλά όπου είναι δυνατόν και στα υποστυλώματα.

Η σημαντική αύξηση της διατμητικής αντοχής κόμβων μέσω της ενίσχυσης με σύνθετα υλικά καταδεικνύεται μέσω διαγραμμάτων τα οποία δίνουν την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης μη ενισχυμένου και ενισχυμένου ( με δυο στρώσεις υφάσματος ινών άνθρακα) δοκιμίου μορφής κόμβου σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

Η εφαρμογή επικολλητών φύλλων από ινοπλισμένα πολυμερή (FRPs), πλέον όλων των γνωστών πλεονεκτημάτων που αναφέρθηκαν έχει το πλεονέκτημα της μεγάλης ευκολίας τοποθέτησης των φύλλων στην δύσκολη περιοχή του κόμβου. Τα φύλλα επικολλώνται με εποξειδική ρητίνη όχι μόνο

στον κόμβο αλλά και στα συντρέχοντα υποστυλώματα και δοκούς, και για την αντίστοιχη περίπτωση εφαρμογής με χαλύβδινα ελάσματα.

Αν και η πειραματική έρευνα βρίσκεται ακόμα σε εξέλιξη, τα μέχρι σήμερα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά. Παρ' όλα αυτά οι τεχνικές δυσκολίες εφαρμογής της τεχνικής στην πράξη λόγω της παρουσίας πλακών και εγκαρσίων δοκών, σε συνδυασμό με την έλλειψη επαρκούς επιστημονικής τεκμηρίωσης, έχουν συντελέσει σε περιορισμένη χρήση της τεχνικής.



Ενδεικτικές διατάξεις ενίσχυσης κόμβων με σύνθετα υλικά σε δύο διευθύνσεις (δοκού, υποστυλώματος) και αγκύρωση των υλικών εκτός περιοχής κόμβου (α) Εξωτερικός κόμβος (β) Εσωτερικός κόμβος.

## ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ

### Γενικά

Η δράση των σύνθετων υλικών κατά την περίσφιγξη του σκυροδέματος είναι εξαιρετικά ευνοική σε σχέση με αυτήν μεταλλικών μανδύων ίσης δυσκαμψίας. Κατά την αξονική καταπόνηση υποστυλωμάτων (π.χ. λόγω κάμψης και/ή αξονικού φορτίου) το σκυρόδεμα διογκώνεται εγκάρσια, με αποτέλεσμα ο μανδύας που το περιβάλλει να ενεργοποιείται (μέσω της ανάπτυξης εφελκυστικών παραμορφώσεων στις ίνες), επιβάλλονται έτσι εγκάρσιες θλιπτικές τάσεις (περίσφιγξης) κάθετα στον άξονα του μέλους, μέχρις ότου αστοχήσει. Οι τάσεις περίσφιγξης έχουν ως αποτέλεσμα:

1. Αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος και αύξηση της παραμορφωσιμότητας, δηλαδή της μέγιστης παραμόρφωσης που καταγράφεται στο σκυρόδεμα μέχρι την θλιπτική αστοχία.
2. Αύξηση της πλαστιμότητας, λόγω αύξησης της παραμορφωσιμότητας
3. Αύξηση της συνάφειας μεταξύ ράβδων οπλισμού και σκυροδέματος σε περιοχές με ματίσεις και άρα παρεμπόδιση της ολίσθησης των διαμήκων ράβδων στις περιοχές αυτές.
4. Παρεμπόδιση του τοπικού λογισμού των διαμήκων ράβδων σε περιοχές με έλλειψη συνδετήρων.

### Διαδικασίες επιβολής της περίσφιγξης

Η επιβολή εξωτερικής περίσφιγξης σε υποστυλώματα μπορεί να γίνει με τους παρακάτω τρόπους:

- Με χρήση επικολλητών κολλάρων που μπορεί να είναι μεταλλικά ελάσματα συνήθους πάχους 1-2 mm ή λωρίδες από ινοπλισμένα πολυμερή.
- Με χρήση προεντεταμένων κολλάρων από χάλυβα ή ινοπλισμένα πολυμερή, που μπορεί να έχουν τη μορφή ταινιών “πακεταρίσματος”.
- Με χρήση σπειροειδούς οπλισμού που μπορεί να είναι από μεταλλικό έλασμα ή από ινοπλισμένο πολυμερές.



- Με χρήση ολόσωμου μανδύα από φύλλα χάλυβα ή ινοπλισμένο πολυμερές, επικολητού επί των πλευρών του υποστυλώματος. Σήμερα στην πράξη έχει αρχίσει να επεκτείνεται η εφαρμογή της τεχνικής με χρήση φύλλων FRPs.

### **Μανδύες από ινοπλισμένα πολυμερή**

Οι μανδύες με ινοπλισμένα πολυμερή (FRPs) αποτελούν ίσως τον πλέον εύχρηστο τρόπο επιβολής της περίσφιξης. Αυτός είναι στην πραγματικότητα ο κύριος λόγος για τον οποίο η εφαρμογή αυτής της τεχνικής εξαπλώνεται ραγδαία στην πράξη.

Τα φύλλα εφαρμόζονται με τις ίνες τους σε οριζόντια διεύθυνση συμβάλλοντας έτσι ιδιαίτερα στον εγκιβωτισμό του στοιχείου και στην αύξηση της διατμητικής του αντοχής.

Εάν αυτοί μόνο είναι οι λόγοι της ενίσχυσης τα φύλλα μπορούν να αντικατασταθούν από οριζόντιες λωρίδες (“ κολλάρα”). Αυτή η εναλλακτική τεχνική έχει μεν οικονομία υλικού, αλλά απαιτεί περισσότερα εργατικά και γι’ αυτό η επιλογή θα πρέπει να εξαρτηθεί από την εκτίμηση του συνολικού κόστους.

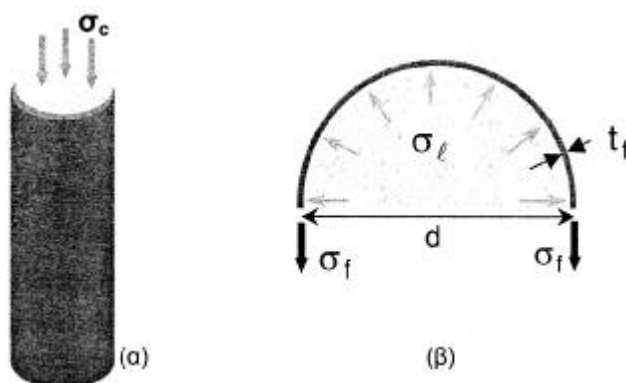
Εάν συγχρόνως επιδιώκεται και η καμπτική αντοχή του στοιχείου, θα πρέπει προφανώς να χρησιμοποιηθούν και φύλλα με κατακόρυφη διεύθυνση ινών. Όμως, σ’ αυτή την περίπτωση η τεχνική θα πρέπει να συνδυαστεί με ανάλογη εφαρμογή ενίσχυσης του κόμβου (δοκών-υποστυλωμάτων) επειδή τα άκρα του υποστυλώματος βρίσκονται σε περιοχές με αυξημένη καμπτική ένταση.

Η εφαρμογή της τεχνικής είναι απλούστερη και περισσότερο αποδοτική στα κυκλικά υποστυλώματα. Στα ορθογωνικά υποστυλώματα απαιτείται προηγουμένως κατάλληλα εξομάλυνση των γωνιών, έτσι ώστε να αποκτήσουν καμπυλότητα με ακτίνα τουλάχιστον 30 mm. Η αποδοτικότητα της τεχνικής μπορεί να αυξηθεί εάν η εφαρμογή των φύλλων ή των λωρίδων γίνει με προένταση. Όμως, στην περίπτωση αυτή οι τεχνικές δυσκολίες του εγχειρήματος είναι αυξημένες και γι’ αυτό η εφαρμογή της θα πρέπει να εξετάζεται μόνο σε ειδικές περιπτώσεις.

## Συμπεριφορά και καταστατικός νόμος σκυροδέματος περισφιγμένου μέσω σύνθετων υλικών

### Συμπεριφορά

Ας θεωρήσουμε ένα κυλινδρικό στοιχείο από σκυρόδεμα με διάμετρο  $d$ , το οποίο περιβάλλεται από μανδύα σύνθετων υλικών πάχους  $t_f$  και μέτρα ελαστικότητας (παράλληλα στην διεύθυνση των ινών, δηλ. κατά την έννοια της περιμέτρου)  $E_f$ .



(α) Αξονική καταπόνηση υποστυλώματος με μανδύα (β) Ανάπτυξη εγκάρσιων τάσεων λόγω διόγκωσης.

Οι λόγω διόγκωσης εγκάρσιες (κατά την ακτινική διεύθυνση) τάσεις στον μανδύα (ίσες και αντίθετες) που ασκούνται στο σκυρόδεμα,  $\sigma_l$ , δίνονται από την σχέση:

$$\sigma_l = [2t_f/d] \sigma_f = [2t_f/d] E_f \varepsilon_f$$

όπου  $\sigma_f$  και  $\varepsilon_f$  είναι η εφελκυστική τάση και η παραμόρφωση στον μανδύα αντίστοιχα. Αποτέλεσμα των τάσεων περίσφιγξης  $\sigma_l$  είναι η παρεμπόδιση της ρηγμάτωσης και άρα η αύξηση της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας, έως ότου η εφελκυστική τάση  $\sigma_l$  (αντίστοιχη παραμόρφωση  $\varepsilon_f$ ) στον μανδύα φθάσει στην αντοχή του,  $f_{fde}$  (αντίστοιχη παραμόρφωση  $\varepsilon_{fud,e}$ ), οπότε θα προκληθεί θραύση του μανδύα που σηματοδοτεί και την αντοχή του στοιχείου (υπό την προϋπόθεση φυσικά ότι δεν θα προηγηθεί αποκόλληση των σύνθετων υλικών).

Η εφελκυστική αντοχή του μανδύα κατά την έννοια της περιμέτρου είναι γενικά μικρότερη από την εφελκυστική αντοχή των σύνθετων υλικών όπως αυτή μετράται μέσω δοκιμών εφελκυσμού. Αυτό οφείλεται στην πολυαξονικότητα της εντατικής κατάστασης στον μανδύα, σε τυχόν συγκεντρώσεις τάσεων κοντά σε γωνίες, στην ενδεχόμενη ύπαρξη αρκετών

στρώσεων αλλά και στην ποιότητα εφαρμογής του μανδύα. Η διαφορά αυτή μπορεί να ληφθεί υπόψη μέσω του μειωτικού συντελεστή  $n_e$  που μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά περίπου ίσος με 0,7-0,9:

$$f_{fde} = n_e f_{fd}$$

### Αναλυτικό προσομοίωμα σχεδιασμού

Σε ό,τι αφορά στο σχεδιασμό μανδύων, αυτό που ενδιαφέρει κυρίως είναι ο υπολογισμός του απαιτούμενου πάχους  $t_f$  ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή θλιπτική αντοχή σχεδιασμού ( $f_{ccd}$ ) και/ή η επιθυμητή μέγιστη παραμόρφωση σχεδιασμού ( $\epsilon_{ccud}$ ). Για τον υπολογισμό των εν λόγω ποσοτήτων η διεθνής βιβλιογραφία έχει να προσφέρει πληθώρα αναλυτικών προσομοιωμάτων, ένα εκ των οποίων παρουσιάζεται ακολούθως για την περίσφιγξη ορθογωνικών διατομών πλευρών  $b$  και  $d$  ( $b \geq d$ ) με ακτίνα καμπυλότητας στις γωνίες  $r_c$ :

$$f_{ccd} = E_{sec,ud} \epsilon_{ccud} \geq f_{cd}$$

$$\epsilon_{ccud} = 0,002 [1 + 5(\alpha_{1d} \alpha_{2d} - 1)] [E_{sec,Md} (E_c - E_{sec,ud}) / E_{sec,ud} (E_c - E_{sec,Md})]^{(1 - E_{sec,Md}/E_c)}$$

$$E_{sec,ud} = E_c / [1 + 2((E_c/f_{cd}) - (1/0,002)) f_{fde}/E_f]$$

$$E_{sec,Md} = \alpha_{1d} \alpha_{2d} f_{cd} / 0,002 [1 + 5(\alpha_{1d} \alpha_{2d} - 1)]$$

$$\alpha_{1d} = 2,254 (1 + 7,94 \sigma_{lud,b}/f_{cd})^{1/2} - 2 \sigma_{lud,b}/f_{cd} - 1,254$$

$$\alpha_{2d} = 1 - [0,6(d/b) - 1,4d/b + 0,8] (\sigma_{lud,b}/f_{cd})^{1/2}$$

$$\sigma_{lud,b} = k_e 2t_f/d f_{fde}$$

Στις παραπάνω σχέσεις  $E_c$  είναι το αρχικό μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος [ $E_c = 1,05 \cdot 9500 (f_{ck} + 8)^{1/3}$ ] και  $k_e$  είναι ο συντελεστής αποτελεσματικότητας του μανδύα που εξαρτάται:

1. Από τη γεωμετρία της διατομής (λόγω πλευρών, ακτίνα καμπυλότητας στις γωνίες)
2. Από το βαθμό περιτύλιξης (κάλυψης) του σκυροδέματος και
3. Από την διεύθυνση των ινών σε σχέση με τον άξονα του περισφιγμένου μέλους.

Συγκεκριμένα είναι :

$$k_e = k_{e1} k_{e2} k_{e3} \leq 1$$

Συντελεστής διατομής :

$$k_{e1} = A_e/A_g = 1 - b^2 + b^2/3A_g(1 - A_s/A_g)$$

Συντελεστής κάλυψης:

$$k_{e2} = (1 - s_f/2d)^2 / (1 - A_s/A_g)$$

Συντελεστής διεύθυνσης:

$$k_{e3} = 1 / [1 + (\tan \alpha_f)^2]$$

όπου  $A_g$ =εμβαδόν διατομής,  $A_s$ =εμβαδόν διατομής διαμήκουσ οπλισμού,  $s_f$ =καθαρή απόσταση λωρίδων σε περίπτωση μερικής περιτύλιξης,  $d$ =μήκος μικρότερης πλευρας (ή διάμετρος, στην περίπτωση κυκλικής διατομής),  $\alpha_f$ =γωνία ινών ως προς τον άξονα του μέλους. Σημειώνεται ότι για κυκλικές διατομές  $k_{e1}=1$ , για πλήρη κάλυψη του στοιχείου  $k_{e2}=1$  και για οριζόντια διάταξη των ινών  $k_{e3}=1$ .

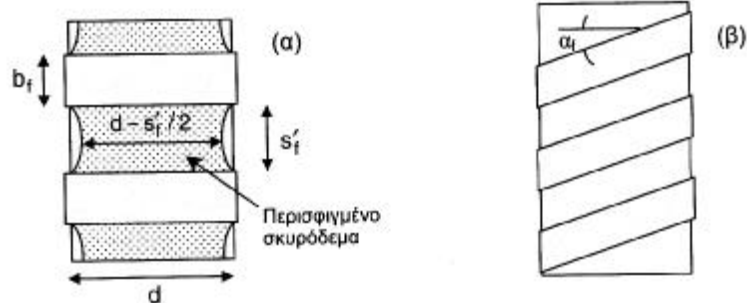
Αν οι υπολογισμοί απαιτούν, πλέον της αντοχής και μέγιστης παραμόρφωσης, τον πλήρη καταστατικό νόμο για σκυρόδεμα περισφιγμένο μέσω σύνθετων υλικών (π.χ. ανάλυση διατομής υποστυλώματος για συνδυασμό κάμψης και αξονικού φορτίου), τότε μπορεί να γίνει χρήση του απλού προσομοιώματος των Lam και Teng.

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c - [(E_c - E_2)/2] \varepsilon_c^2 \quad \text{για } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_f$$

$$\sigma_c = f_{cd} + E_2 \varepsilon_c \quad \text{για } \varepsilon_f \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{ccud}$$

$$E_t = 2f_{cd} / (E_c - E_2)$$

$$E_2 = f_{ccd} - f_{cd} / \varepsilon_{ccud}$$



Περίσφιξη (α) με λωρίδες ανά αποστάσεις (β) με ίνες υπό γωνία

## Παράδειγμα

Θεωρούμε ορθογωνική διατομή σκυροδέματος  $f_{cd}=20$  Μρα και μέτρου ελαστικότητας  $E_c=33,5$  Γρα. Έστω ότι διαθέτουμε δυο διαφορετικούς τύπους υλικών, προκειμένου να τα χρησιμοποιήσουμε για την κατασκευή μανδύα με

στόχο την αύξηση της θλιπτικής αντοχής σε  $f_{cd}=35$  Μρακαι της μέγιστης παραμόρφωσης σε  $\epsilon_{ccud}=0,025$ :

Υλικά ινών άνθρακα με μέτρο ελαστικότητας  $E_f=230$  Gpa, εφελκυστική αντοχή (χαρ/κή τιμή)  $f_{fk}=2500$  Mpa, πάχος υφάσματος 0,12 mm.

Υλικά ινών γυαλιού με  $E_f=70$  Gpa,  $f_{fk}=2100$ Mpa, πάχος υφάσματος 0,17 mm.

Υποθέτουμε συνήθεις συνθήκες ποιοτικού ελέγχου της εφαρμογής

Τέλος, θεωρούμε ότι η εφελκυστική αντοχή του μανδύα είναι κατά 5% μειωμένη σε σχέση με τις αντίστοιχες ιδιότητες ευθύγραμμων δοκιμίων (δηλ.  $n_e=0,95$ ).

Για τα υλικά ινών άνθρακα είναι  $f_{fde}=n_e(f_{fk}/\gamma_f)=0,95(3500/1,35)=2665$  Mpa ενώ για τα υλικά ινών γυαλιού είναι  $f_{fde}=0,95(2100/1,5)=1330$  Mpa

Τα αποτελέσματα πίνακα για το απαιτούμενο πάχος υφάσματος και τον αντίστοιχο αριθμό στρώσεων δείχνουν ότι για τις τιμές των ιδιοτήτων υλικών που επιλέγησαν :

1. Υλικά με ίνες άνθρακα υπερέρχουν έναντι αυτών με ίνες γυαλιού όταν στόχος της περισφιγξης είναι η αύξηση της αντοχής (στα παραπάνω παραδείγματα χρειαζόμαστε περίπου διπλάσιο πάχος υλικού με ίνες γυαλιού για την ίδια θλιπτική αντοχή σκυροδέματος,
2. Υλικά με ίνες γυαλιού υπερέρχουν έναντι αυτών με ίνες άνθρακα όταν στόχος της περισφιγξης είναι η αύξηση της παραμορφωσιμότητας (στα παραπάνω παραδείγματα χρειαζόμαστε κάτι παραπάνω από διπλάσιο πάχος υλικού με ίνες άνθρακα για την ίδια παραμορφωσιμότητα).

## Πλαστιμότητα

Ένας από τους βασικούς στόχους αντισεισμικών ενισχύσεων σε υφιστάμενα δομικά στοιχεία είναι η αύξηση της πλαστιμότητας, η οποία συνήθως ποσοτικοποιείται μέσω του δείκτη πλαστιμότητας μετατοπίσεων  $\mu_\Delta$ :

$$\mu_\Delta = \Delta_u / \Delta_y$$

όπου  $\Delta_u$  η μετατόπιση κατά την αστοχία του μέλους και  $\Delta_y$  η μετατόπιση κατά την διαρροή του διαμήκους οπλισμού. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση μη διακριτής πτώσης της δύναμης λόγω κάποιας αστοχίας (π.χ. θραύση ή λυγισμού ράβδου, θραύση του μανδύα ενίσχυσης) η  $\Delta_u$  συνήθως ορίζεται εκεί όπου το μέγιστο φορτίο υφίσταται μείωση κατά 20%.

Ο δείκτης πλαστιμότητας  $\mu_{\Delta}$  μπορεί να αυξηθεί μέσω της κατασκευής μανδύα σύνθετων υλικών στις κρίσιμες περιοχές, εκεί δηλαδή όπου ενδέχεται να αναπτυχθούν σημαντικές παραμορφώσεις στο χάλυβα και στο σκυρόδεμα, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγάλων καμπυλοτήτων. Η περίσφιγξη του σκυροδέματος στις περιοχές αυτές αυξάνει τη μέγιστη παραμόρφωσή του (πλέον του ότι παρεμποδίζει το λυγισμό ράβδων και/ή την απώλεια συνάφειας σε περιοχές με ματίσεις) και άρα την πλαστιμότητα.

Ο σχεδιασμός μανδύα σύνθετων υλικών για την επίτευξη δεδομένης πλαστιμότητας προϋποθέτει τη συσχέτισή του  $\mu_{\Delta}$  με τα χαρακτηριστικά του μανδύα. Τούτο μπορεί να γίνει βάσει των παρακάτω βημάτων:

1. Εκτίμηση του απαιτούμενου δείκτη πλαστιμότητας μετατοπίσεων  $\mu_{\Delta}$  βάσει της μετατόπισης κατά την διαρροή  $\Delta_y$  και της επιθυμητής μετατόπισης κατά την αστοχία  $\Delta_u$ .
2. Υπολογισμός του μήκους πλαστικής άρθρωσης  $L_p$ , βάσει της γεωμετρίας του μέλους και των χαρακτηριστικών των διαμήκων ράβδων οπλισμού:  $L_p = 0,08 L_s + 0,022 f_y d_b \geq 0,044 f_y d_b$ , όπου  $L_s$  είναι το διαμηθικό μήκος (απόσταση από την βάση του υποστυλώματος μέχρι το σημείο μηδενισμού των ροπών),  $f_y$  είναι η τάση διαρροής του διαμήκους οπλισμού ( $M_{pr}$ ),  $d_b$  είναι η διάμετρος των ράβδων του διαμήκους οπλισμού. Εναλλακτικά, το  $L_p$  μπορεί να ληφθεί περίπου ίσο με το στατικό ύψος της διατομής.
3. Υπολογισμός του δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων,  $\mu_{\phi}$  ( $=\phi_u/\phi_y$ ) από την σχέση:  $\mu_{\Delta} = 1 + 3(\mu_{\phi} - 1) L_p/L_s (1 - 0,5 L_p/L_s)$
4. Υπολογισμός της καμπυλότητας της διατομής κατά την διαρροή,  $\phi_y$ . Το βήμα αυτό προϋποθέτει ανάλυση της διατομής (εύρεση της σχέσης ροπών- καμπυλοτήτων)
5. Υπολογισμός της καμπυλότητας της διατομής κατά την αστοχία (θραύση σκυροδέματος)  $\phi_u = \mu_{\phi} \phi_y$ .
6. Υπολογισμός της μέγιστης παραμόρφωσης στο σκυρόδεμα κατά την αστοχία  $\epsilon_{ccud} = \phi_u x_u$  όπου  $x_u$  το ύψος της θλιβόμενης ζώνης κατά την αστοχία (και εδώ απαιτείται ανάλυση της διατομής για την εύρεση του  $x_u$ ).

7. Εφαρμογή του αναλυτικού προσομοιώματος περίσφιγξης για τη συσχέτιση του  $\varepsilon_{ccud}$  με τα χαρακτηριστικά (πάχος, εφελκυστική αντοχή) του μανδύα.

Εναλλακτική (και απλούστερη) μέθοδο συσχέτισης του  $\mu_{\Delta}$  με τα χαρακτηριστικά του μανδύα αποτελεί η χρήση της παρακάτω εμπειρικής (αλλά αρκετά συντηρητικής) σχέσης:  $\mu_{\Delta}=1,3+12,4(\sigma_{lud}/f_{cd}-0,1)\geq 1,3$  όπου  $\sigma_{lud}$  η τάση περίσφιγξης στο σκυρόδεμα κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας (τιμή σχεδιασμού), η οποία (αγνοώντας την περίσφιγξη μέσω υφιστάμενων συνδετήρων). Στην αρχική σχέση σε ορθογωνικά υποστυλώματα ως  $d$  θα πρέπει να ληφθεί η πλευρά του υποστυλώματος που είναι κάθετη στην διεύθυνση φόρτισης.

### Ματίσεις

Σε υφιστάμενες κατασκευές πολλά προβλήματα πτωχής αντισεισμικής συμπεριφοράς άπτονται του μηχανισμού συνάφειας μεταξύ ράβδων οπλισμού και σκυροδέματος σε περιοχές ματίσεων των διαμήκων οπλισμών (π.χ. ακριβώς πάνω από την βάση του κάθε ορόφου, όπου σύμφωνα με τις σύγχρονες αντιλήψεις αντισεισμικού σχεδιασμού προβλέπεται η πραγματοποίηση πλαστικών αρθρώσεων, χωρίς όμως την πρόβλεψη περίσφιγξης μέσω εγκάρσιου οπλισμού). Συνηθισμένα αίτια αστοχιών σε περιοχές ματίσεων είναι το μικρό μήκος μάτισης και/ή η χρήση λείων ράβδων (οπότε η αντοχή σε συνάφεια εξαρτάται κυρίως από τον μηχανισμό τριβής στο διάστημα που αναπτύσσεται η αγκύρωση).

Η ευνοϊκή δράση της περίσφιγξης που παρέχουν οι μανδύες σε περιοχές ματίσεων έχει καταδειχθεί σε αρκετές ερευνητικές εργασίες.

Η δύναμη  $F$  που μπορεί να αναπτυχθεί σε ράβδο οπλισμού εμβαδού  $A_b$  στην περιοχή μάτισης μήκους  $l_s$  εξισοροπείται από την διατμητική τάση συνάφειας  $\tau_b$  που αναπτύσσεται στην περιφέρεια της ράβδου. Η τάση αυτή λαμβάνεται από θεώρηση μοντέλου τριβής, είναι δηλαδή ανάλογη με την εγκάρσια τάση  $\sigma_l$  μέσω συντελεστή  $\mu$ , ο οποίος είναι περίπου ίσος με 1,4. Απουσία εγκάρσιου οπλισμού στο μήκος μάτισης, η εγκάρσια τάση αναλαμβάνεται μόνο από την εφελκυστική αντοχή της επικάλυψης (πάχους  $c$ ) του οπλισμού,

αναπτύσσονται ρωγμή διαδρομής  $\rho_c$ . Η δύναμη  $F$  που μπορεί να αναπτυχθεί σε αυτή την περίπτωση είναι ίση με  $\rho_c(\mu f_{ctm})l_s$ .

Για τον σχεδιασμό μανδύα σε περιοχές ματίσεων αρκεί να εξασφαλιστεί ότι η διαρροή του διαμήκου οπλισμού θα αναπτυχθεί πριν από την απώλεια συνάφειας, δηλαδή ότι:

$$A_b f_{yd} = \rho_c \mu \sigma_l l_s$$

όπου  $\sigma_l$  η τάση περίσφιγξης που παρέχει ο μανδύας των σύνθετων υλικών (αγνοώντας τη συνεισφορά συνδετήρων) κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας ( $\sigma_l = \sigma_{lud}$ ). Σημειώνοντας ότι η τάση αυτή ασκείται μόνο στις ράβδους εκείνες που βρίσκονται εντός της περιοχής επαρκώς περισφιγμένου σκυροδέματος, δίνεται από την σχέση:

$$\sigma_{lud} = 2t_f/d f_{fde}$$

όπου  $d$  η μικρότερη πλευρά του υποστυλώματος. Το απαιτούμενο πάχος μανδύα ώστε να αποφεύγεται η απώλεια συνάφειας σε περιοχές ματίσεων:

$$t_f = d A_b f_{yd} / 2 \rho_c \mu f_{fde} l_s$$

Στην παραπάνω σχέση  $A_b$  είναι το εμβαδόν διατομής μιας εφελκυσμένης ράβδου οπλισμού (με διάμετρο  $d_b$ ) που ματίζεται εντός της περιοχής επαρκώς περισφιγμένου σκυροδέματος και  $\rho_c$  είναι η αντίστοιχη διαδρομή ρηγμάτωσης που αντιστοιχεί στην ράβδο αυτή. Για τυχόν ράβδους εντός της περιοχής αυτής ο μανδύας είναι μειωμένης αποτελεσματικότητας ως προς την αποτροπή απώλειας συνάφειας σε ματίσεις.

Η εξίσωση για το απαιτούμενο πάχος μανδύα δεν εξασφαλίζει πάντα την μη ενεργοποίηση του μηχανισμού απώλειας συνάφειας. Βασισμένοι σε σειρά πειραματικών αποτελεσμάτων, οι ερευνητές Seible et al. διέτυπωσαν μία επί πλέον συνθήκη, σύμφωνα με την οποία για να εξασφαλιστεί η συνάφεια ράβδου - σκυροδέματος θα πρέπει η εγκάρσια παραμόρφωση (διόγκωση του σκυροδέματος) να μην ξεπερνά μια κρίσιμη τιμή, γύρω στο 0,001-0,002. Έτσι στην εξίσωση για τον σχεδιασμό του πάχους μανδύα, η ενεργή τάση σχεδιασμού των σύνθετων υλικών θα πρέπει να περιορίζεται σε:

$$f_{fde} \leq 0,0015 E_f$$



## Λυγισμός ράβδων

Σύμφωνα με τους Priestley et al. σε υποστυλώματα για τα οποία ο λόγος  $M/V_d > 4$  ( $M$  και  $V$  είναι η μέγιστη δρώσα αποτομή κάμψης και τέμνουσα, αντίστοιχα, και  $d$  είναι το μήκος της πλευράς της διατομής που είναι παράλληλη με το επίπεδο κάμψης) και ο λόγος της απόστασης συνδετήρων προς την διάμετρο των διαμήκων ράβδων,  $s/d_b$ , ξεπερνά μια κρίσιμη τιμή, τότε υπάρχει ενδεχόμενο λυγισμού των διαμήκων ράβδων λόγω υψηλής τιμής του αξονικού φορτίου. Ο λυγισμός αυτός επιτρέπεται όταν ο μανδύας ο οποίος επιβάλλει τάσεις περίσφιγξης στο υποστυλώμα έχει πάχος τουλάχιστον ίσο με :

$$t_f = 0,45 n f_s^2 d / 4 E_{ds} E_f k_e$$

Όπου  $n$  είναι ο συνολικός αριθμός των διαμήκων ράβδων στην διατομή,  $f_s$  είναι η τάση στον διαμήκη σπλισμό για παραμόρφωση ίση με 0,04 και  $E_{ds}$  είναι το διπλό μέτρο ελαστικότητας του διαμήκους σπλισμού, το οποίο ορίζεται:

$$E_{ds} = 4 E_s E_i / (E_s^{1/2} + E_i^{1/2})^2$$

Στην παραπάνω εξίσωση  $E_s$  είναι το μέτρο ελαστικότητας του διαμήκους χάλυβα από την τάση  $f_s$  στην τάση  $f_u$  (αντοχή του χάλυβα) και  $E_i$  είναι το αρχικό μέτρο ελαστικότητας του διαμήκους χάλυβα. Η ποσότητα  $0,45 f_s^2 / E_{ds}$  μπορεί να ληφθεί προσεγγιστικά (και συντηρητικά) ίση με 40 Mpa οπότε:

$$t_f = 10 n d / E_f k_e \quad (E_f \text{ σε Mpa}).$$

## Στρατηγική αντισεισμικών επέμβάσεων

Θα πρέπει να καταστεί σαφές ότι η χρήση μανδύα σύνθετων υλικών σε υποστυλώματα προσδίδει αντοχή και παραμορφωσιμότητα χωρίς να αυξάνει την δυσκαμψία των ενισχυμένων στοιχείων (όπως συμβαίνει στην περίπτωση συμβατικού μανδύα σπλισμένου σκυροδέματος). Σε ιδιαίτερα εύκαμπτες κατασκευές (π.χ. κτίρια με πιλοτή) τούτο θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη, διότι αν η οριζόντια μετάθεση ορόφου αποτελέσει παράμετρο ελέγχου στο σχεδιασμό της ενίσχυσης των επιμέρους κατακορύφων στοιχείων, τότε η βελτίωση μόνο της ικανότητας για παραμόρφωση μέσω μανδύα σύνθετων υλικών μπορεί να αποδειχθεί ανεπαρκής λύση σε σχέση με τις σύγχρονες απαιτήσεις αντισεισμικότητας (οι οποίες μπορεί να περιλαμβάνουν και αύξηση της δυσκαμψίας).

Υπό την προϋπόθεση ότι η επέμβαση δεν αποσκοπεί σε αύξηση της δυσκαμψίας, με δεδομένη την επιβαλλόμενη σεισμική καταπόνηση θα πρέπει αρχικά να υπολογισθεί για κάθε υποστύλωμα:

- Η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας μετατοπίσεων και
- Η τέμνουσα σχεδιασμού (η οποία, ανάλογα με την δυσκαμψία κάθε υποστυλώματος, θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε η διαρροή του διαμήκους οπλισμού να προηγείται της διατμητικής αστοχίας - ικανοτική τέμνουσα). Το πάχος του μανδύα σύνθετων υλικών είναι το μέγιστο των παχών που απαιτούνται για την εξασφάλιση του απαιτούμενου δείκτη πλαστιμότητας, της τέμνουσας σχεδιασμού, της αποφυγής λυγισμού των διαμήκων ράβδω και της αποφυγής αστοχίας σε περιοχές με ματίσεις (αν υπάρχουν).

## Κατασκευαστικές λεπτομέρειες

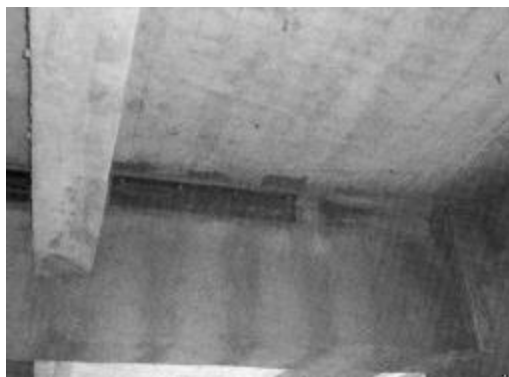
### Ενίσχυση σε κάμψη

Στο fib 14 (2001) προτείνονται οι παρακάτω κατασκευαστικοί κανόνες (για την ενίσχυση των δοκών):

- Μέγιστη απόσταση μεταξύ ελασμάτων =  $\min(0,2l, 5h)$ , όπου  $l$  είναι μήκος δοκού και  $h$  είναι το ύψος της δοκού (στην περίπτωση προβόλου το 0,2 γίνεται 0,4).
- Ελάχιστη απόσταση ελάσματος (ή υφάσματος) από την γωνία της διατομής τουλάχιστον ίση με το πάχος επικάλυψης του διαμήκους οπλισμού.
- Να αποφεύγονται οι ματίσεις ελασμάτων (ή υφασμάτων) με υπερκάλυψη (αυτό είναι πολύ εύκολο, λόγω της διαθεσιμότητας των σύνθετων υλικών σε πολύ μεγάλα μήκη). Όπου αυτές είναι τελείως απαραίτητες και γίνονται (παράλληλα στην διεύθυνση των ινών) με μήκος υπερκάλυψης τέτοιο ώστε να εξασφαλίζεται ότι η εφελκυστική αστοχία του οπλισμού θα προηγείται της αποκόλλησης στη μάτιση.
- Επιτρέπονται οι διασταυρώσεις ελασμάτων ή υφασμάτων (με επικόλληση στην διασταυρούμενη επιφάνεια), π.χ. για την ενίσχυση επιφανειακών στοιχείων (όπως οι πλάκες).
- Να αποφεύγεται η τοποθέτηση των ελασμάτων ή υφασμάτων σε πολλές στρώσεις. Αυτές δεν θα πρέπει να ξεπερνούν τις 3 ή 5 για ελάσματα ή υφάσματα αντίστοιχα.
- Οι οπλισμοί στήριξης (αρνητική ροπή) θα πρέπει να έχουν μήκος επικόλλησης της τάξης του 1m στην θλιβόμενη περιοχή.
- Στις θέσεις τερματισμού των ελασμάτων ή υφασμάτων μορφής U (όπως οι οπλισμοί διάτμησης) ώστε να βελτιωθούν οι συνθήκες αγκύρωσης.

## Ενίσχυση σε διάτμηση

- Στην περίπτωση ενίσχυσης πλακοδοκών συνίσταται η αγκύρωση των οπλισμών διάτμησης στην θλιβόμενη ζώνη.



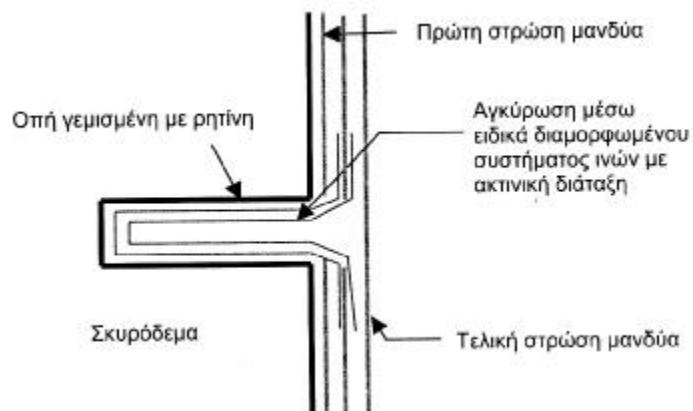
Αγκύρωση μανδύα για ενίσχυση πλακοδοκού.

- Στην περίπτωση ενίσχυσης υποστυλωμάτων ορθογωνικής διατομής θα πρέπει να στρογγυλεύονται οι γωνίες της διατομής με ακτίνα καμπυλότητας της τάξης των 20 mm (ειδικά για υλικά με ίνες αραμιδίου η ακτίνα μπορεί να μειωθεί στα 10 mm).
- Στην περίπτωση ενίσχυσης υποστυλωμάτων μεταξύ τοίχων πλήρωσης οι οποίοι καλύπτουν μερικώς το ύψος ορόφου, η διατμητική ενίσχυση θα πρέπει να γίνεται σε όλο το ύψος του υποστυλώματος και όχι μόνο στο ελεύθερο τμήμα.
- Όταν γίνεται καθολική περιτύλιξη υποστυλωμάτων με υφάσματα, η μάτιση κάθε τμήματος θα πρέπει να γίνεται σε διαφορετική πλευρά.

## Περίσφιγξη

- Συνιστάται να στρογγυλεύονται οι γωνίες της διατομής με την μέγιστη εφικτή ακτίνα καμπυλότητας (η οποία καθορίζεται συνήθως από το πάχος επικάλυψης).
- Η υπερκάλυψη των δυο άκρων σε επάλληλες στρώσεις επί υποστυλωμάτων ορθογωνικής διατομής θα πρέπει να έχει μήκος τέτοιο ώστε η θραύση του μανδύα να προηγείται της αποκόλλησης. Ενδεικτικό ελάχιστο μήκος υπερκάλυψης είναι τα 200 mm, για υφάσματα ινών άνθρακα ονομαστικού πάχους 0,12-0,13 mm.

- Ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός στρώσεων για την κατασκευή μανδύα είναι της τάξης του 15 (ή όπως συνιστάται από τον προμηθευτή του συστήματος ενίσχυσης).
- Στην περίπτωση εφαρμογής μανδύα στις κρίσιμες περιοχές υποστρωμάτων πρέπει να αφήνεται κενό της τάξης των 15 mm, ώστε αφενός να μην παρεμποδίζεται η στροφή της ακραίας διατομής, αφετέρου να μην υφίσταται σύνθλιψη ο μανδύας λόγω της στροφής αυτής.
- Όταν ο μανδύας αποσκοπεί στην αποτελεσματική περίσφιγξη υποστρωμάτων ορθογωνικής διατομής με λόγο πλευρών (π.χ. >3) ή τοιχωμάτων, τα τμήματα του μανδύα επί των μεγάλων πλευρών θα πρέπει είτε να συνδέονται μεταξύ τους μέσα κατάλληλα διαμορφωμένων βλήτρων (κατά προτίμηση), είτε να στερεώνονται επαρκώς στις πλευρές αυτές μέσω ειδικών βλήτρων σε οπές.



Στερέωση μανδύα μέσω ειδικού βλήτρου – αγκυρίου σε αυτή.

- Όπως και στην περίπτωση διαμητικής ενίσχυσης υποστρωμάτων με καθολική περιτύλιξη υφασμάτων, η μάτιση κάθε τμήματος θα πρέπει να γίνεται σε διαφορετική πλευρά.

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΔΟΚΩΝ ΒΑΘΡΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ ΜΕ FRP

### A. Ενίσχυση δοκού βάθρου γέφυρας στο East Church της Νέας Υόρκης με σύνθετα συγκολλητά φύλλα FRP

#### Γενικά στοιχεία

Η γέφυρα αυτή χτίστηκε το 1954 για τις οδούς 17 και 352 της Νέας Υόρκης. Έχει 4 ανοίγματα συνολικού μήκους 67 m, μεταλλικές δοκίδες για μεταφορά φορτίων από το κατάστρωμα στην δοκό, 2 λωρίδες κυκλοφορίας πλάτους 3,66 m και 2 πεζοδρόμια (ρείθρα) πλάτους 1,07m και ύψους 0,23 m. Η μέση ημερήσια κυκλοφορία ανέρχεται σε 9000 και 20000 οχήματα για τις οδούς 17 και 352 αντίστοιχα.

#### Περιγραφή βλάβης

Κατά την διάρκεια μιας συνηθισμένης επιθεώρησης γεφυρών παρατηρήθηκαν εκτεταμένες ρωγμές στη δοκό του βάθρου 3.

Κάθε δοκός είναι τετραγωνικής διατομής διαστάσεων 1,1m \* 1,1m και στηρίζεται σε τρία βάθρα κυκλικής διατομής 1,1m. Η αιτία πρόκλησης ρωγμών ήταν η αύξηση των μόνιμων φορτίων λόγω:

- Της αύξησης του πάχους του καταστρώματος από 292 σε 318 mm.
- Στην προσθήκη διαχωριστικού διαζώματος από σκυρόδεμα, βάρους 12KN/m.

Μια πρώτη μελέτη επιβεβαίωσε την ανεπάρκεια της δοκού σε καμπτική και διατμητική αντοχή.

#### Τρόπος ενίσχυσης

Για την δοκό του βάθρου 3, επιλέχθηκε από το υπουργείο μεταφορών της Νέας Υόρκης να γίνει ενίσχυση με σύνθετα υλικά FRP (γυαλί/άνθρακας), σε πειραματική βάση. Σκοπός της ενίσχυσης αυτής ήταν να αυξηθεί η διατμητική και καμπτική αντοχή της δοκού κατά 10% και 20% αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας τα φύλλα.

### **Προετοιμασία επιφάνειας και τοποθέτησης φύλλων**

Για την ενίσχυση της δοκού χρησιμοποιήθηκαν καμπτικά και διατμητικά φύλλα FRP από άνθρακα και γυαλί.

Τα καμπτικά φύλλα είχαν πάχος 13m, πλάτος 254mm και μήκος 5,18m, ενώ τα διατμητικά πάχος 7mm, πλάτος 1,1m και μήκος 1,7m.

Η δοκός καθαρίστηκε με νερό υπό πίεση ώστε να απομακρυνθούν χαλαροί κόκκοι σκυροδέματος που εμποδίζουν την καλή σύνδεση των φύλλων. Μετά, η επιφάνεια αφέθηκε να στεγνώσει. Τη μέρα της τοποθέτησης, τα φύλλα τοποθετήθηκαν και ευθυγραμμίστηκαν στις πλευρές της δοκού, σημαδεύτηκαν και έγιναν τρύπες στα φύλλα και το σκυρόδεμα, σε διάφορες θέσεις. Η εποξειδική ρητίνη επαλείφθηκε στα φύλλα και στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν μπουλόνια με τρύπες ώστε να εξασφαλίζεται η σφιχτή σύνδεση μεταξύ των φύλλων και της επιφάνειας του σκυροδέματος. Η εποξειδική ρητίνη προετοιμάστηκε σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. Στη μία πλευρά της δοκού η εποξειδική ρητίνη επαλείφθηκε πρώτα στο σκυρόδεμα και μετά τα φύλλα 'κόλλησαν' στην δοκό με ένα ξύλινο πλαίσιο. Μετά την τοποθέτηση των φύλλων, επαλείφθηκε στη δοκό μια στρώση πίσσας για προστασία από το νερό ανάμεσα στα φύλλα και το σκυρόδεμα, αν παρουσιάζονταν κενά. Στη συνέχεια οι δοκοί βιάστηκαν για αισθητικούς λόγους αλλά και για προστασία από υπεριώδεις ακτινοβολίες. Η δοκιμή φόρτισης έγινε 14 μέρες μετά την ολοκλήρωση των εργασιών.

### **Δοκιμές φόρτισης και σχολιασμός αποτελεσμάτων**

Ο κύριος σκοπός των δοκιμών φόρτισης ήταν να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης με φύλλα στην μείωση των τάσεων της δοκού. Στη δοκιμή φόρτισης πριν και μετά την ενίσχυση μετρήθηκαν οι καμπτικές τάσεις της δοκού σε θετικές και αρνητικές περιοχές ροπής.

Η ενίσχυση με σύνθετα φύλλα στις αρνητικές περιοχές ροπής, μείωσε τις τάσεις λόγω κινητών φορτίων στον οπλισμό του σκυροδέματος κατά 10%. Ομοίως, για τις θετικές ροπές το σύστημα ενίσχυσης μείωσε ελάχιστα τις τάσεις στον οπλισμό κατά 6%. Αυτή η μικρή μείωση οφείλεται στο ότι η δυσκαμψία της δοκού, όπως μετρήθηκε από την κλίση της βέλτιστης ευθείας, δεν αλλάζει σημαντικά μετά την ενίσχυση.

Ιδιαίτερη σημασία έχει ο προσδιορισμός της θέσης του ουδέτερου άξονα. Από μετρήσεις η απόσταση της πιο θλιβόμενης ίνας από τον ουδέτερο άξονα ήταν πριν και μετά την ενίσχυση 478 mm και 487mm αντίστοιχα, δηλαδή ο ουδέτερος άξονας μετατοπίστηκε λίγο προς τα κάτω μετά την εφαρμογή των FRP.

### **Συμπεράσματα**

Η μέθοδος ενίσχυσης με σύνθετα φύλλα FRP είναι:

- Προσιτή οικονομικά (18.000\$) σε σχέση με άλλες μεθόδους που υπολογίζονται σε 150.000\$ για την παρούσα ενίσχυση.
- Κατασκευαστικά, η ενίσχυση με φύλλα δεν απαιτεί διακοπή της κυκλοφορίας κατά την διάρκεια των εργασιών και είναι σχετικά εύκολη η τοποθέτηση από το συνεργείο.
- Η σύνδεση μεταξύ των φύλλων και του σκυροδέματος είναι ικανοποιητική παράλληλη τη διαφορά που προέκυψε μεταξύ των αναμενόμενων και των μετρηθέντων τάσεων.



## **B. Ενίσχυση δοκού γέφυρας Rensselear County Νέας Υόρκης με σύστημα FRP.**

### **Γενικά στοιχεία**

Η γέφυρα χτίστηκε το 1932. Έχει ένα μόνο άνοιγμα και διαστάσεις: μήκος 12,19m, πλάτος 36,58m και στηρίζεται σε 26 δοκούς διατομής T, που απέχουν 1,37m μεταξύ τους. Ο κύριος οπλισμός των δοκών αποτελείται από 8 ράβδους 32\*32 mm<sup>2</sup>. Η γέφυρα έχει 5 λωρίδες κυκλοφορίας και μέση ημερήσια κυκλοφορία περίπου 30.000 οχήματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει περιορισμός στην διέλευση των οχημάτων εξαιτίας του βάρους τους.

### **Λόγος ενίσχυσης**

Η ενίσχυση στην παρούσα γέφυρα ήταν επιβεβλημένη καθώς:

- Εξαιτίας της διάβρωσης είχε παρατηρηθεί σημαντική μείωση του ποσοστού οπλισμού
- Υπήρχαν ρωγμές λόγω παγετού
- Η γέφυρα είχε κατασκευαστεί με παλιούς κανονισμούς.

### **Τρόπος ενίσχυσης της δοκού με FRP**

Πρίν την τοποθέτηση των φύλλων η επιφάνεια καθαρίστηκε ώστε να απομακρυνθούν χαλαροί κόκκοι σκυροδέματος. Γενικά, στην τοποθέτηση ακολουθήθηκε η διαδικασία που προτείνει ο κατασκευαστής.

Το σύστημα ενίσχυσης αποτελείται από ίνες άνθρακα και 3 τύπους εποθερμικού υλικού: στόκος, ρητίνη και μίνιο (putty, resin, primer). Η μέγιστη αντοχή των φύλλων ενίσχυσης ήταν 3.400 Mpa σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Τα φύλλα βρίσκονται στη βάση της δοκού ενώ ανάμεσα στα δοκάρια τα φύλλα τοποθετούνται παράλληλα. Τα φύλλα στο χείλος του διαζώματος ανάμεσα στις δοκούς έχουν προσανατολιστεί με δεξιά γωνία στις δοκούς. Οι μανδύες τύπου U των φύλλων FRP τοποθετήθηκαν στη βάση και στις πλευρές της δοκού.

### **Δοκιμές φόρτισης και αποτελέσματα**

Οι δοκιμές φόρτισης έγιναν 2 χρόνια μετά την ενίσχυση. Στόχος ήταν να εξαχθούν συμπεράσματα για:

- Την αποτελεσματικότητα ενίσχυσης με τα επικολλητά φύλλα και την αύξηση καμπτικών και διατμητικών τάσεων.
- Την σύνδεση μεταξύ των φύλλων και του σκυροδέματος.
- Την συμμετοχή της ενίσχυσης στην ανάληψη φορτίων. Οι δοκιμές φόρτισης έγιναν σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Χρησιμοποιήθηκαν 4 φορτηγά βάρους 196 kN.

Όσο αφορά την ποιότητα σύνδεσης των φύλλων ΙΟΠ και του σκυροδέματος δεν παρατηρείται καμία μεταβολή στο χρονικό διάστημα των 2 χρόνων μεταξύ της ενίσχυσης και των μετρήσεων. Αυτό επιβεβαιώνεται και από την θερμογραφική ανάλυση που έγινε.

Συμπερασματικά, με την ενίσχυση της γέφυρας παρατηρήθηκε:

Μείωση των καμπτικών και διατμητικών τάσεων.

Η σύνδεση των φύλλων FRP και του σκυροδέματος σε χρονικό διάστημα 2 ετών δεν παρουσίασε φαινόμενα χαλάρωσης.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ενισχύσεις κατασκευών με ινοπλισμένα πολυμερή  
Τριανταφύλλου Θ. (2000)
- Ενίσχυση Κατασκευών για σεισμικά φορτία  
ΤΕΕ (2004)
- Επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα.  
Δρίτσος Σ.Η.
- Συστάσεις για επισκευές κτιρίων βλαμμένων από τον σεισμό.  
ΕΜΠ (1987)
- Δομικά υλικά  
Αθ. Τριανταφύλλου (2001)
- Ωπλισμένο Σκυρόδεμα  
Θεοφάνης Γεωργόπουλος (Τόμοι Α΄, Β΄, Γ΄)

