

# Κεφάλαιο 6

---

## ΕΝΙΣΧΥΣΗ

### ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ

### ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

---

#### 6.1 Εισαγωγή: Εφαρμογές και γενικά χαρακτηριστικά

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 μία 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 μία 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 (Σχήμα 6.1) όσο και από άοπλη τοιχοποιία, την ενίσχυση γεφυρών και κτιριακών κατασκευών, κτλ. Οι προσπάθειες των ερευνητών αυτών είχαν ως αποτέλεσμα μία πραγματικά εντυπωσιακή ανάπτυξη της μεθόδου ενίσχυσης κατασκευών με σύνθετα υλικά, με τις πρώτες ευρείας κλίμακας εφαρμογές να αναφέρονται στις αρχές της περασμένης δεκαετίας.

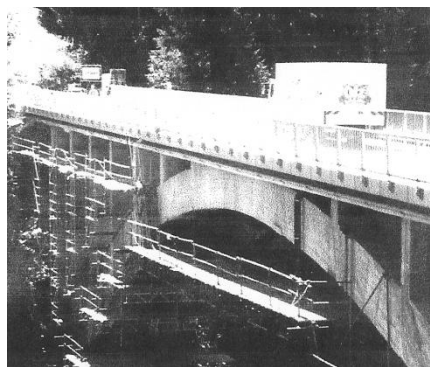
---

\* Για λόγους συντομίας τα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή θα αναφέρονται στη συνέχεια του κεφαλαίου απλά και ως σύνθετα υλικά.

Η πρώτη ευρείας κλίμακας εφαρμογή σύνθετων υλικών αφορά στην ενίσχυση δύο χιλιάδων βάρων γεφυρών στην 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 ΗΠΑ όσο και σε πολλά άλλα κράτη της Αμερικής, της Ευρώπης και της Ασίας (Σχήμα 6.2). Αποτελεί χαρακτηριστικό γεγονός ότι στην Ιαπωνία, χώρα με ιδιαίτερα υψηλή σεισμική επικινδυνότητα, η χρήση σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή αυξήθηκε την περίοδο 1992-1995 και κυρίως μετά το σεισμό του Hyogoken-Nangu το 1995 κατά 500%. Στην Ελλάδα εφαρμογές πολιτικού μηχανικού αναφέρονται από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 (Χαλκίδα).



**Σχήμα 6.1** Ενίσχυση υποστρώματος με μανδύα σύνθετων υλικών σε υπόγειο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων, Δουβλίνο, Ιρλανδία.



**Σχήμα 6.2.:** Ενίσχυση γέφυρας με σύνθετα υλικά στις Αυστριακές Άλπεις.

Οι βασικές αρχές για το σχεδιασμό μανδυνών από σύνθετα υλικά είναι αντίστοιχες με τις αρχές σχεδιασμού των μεταλλικών μανδυνών. 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 εξωτερική 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 περίσφιγξη* για βελτιστοποίηση της *ικανότητας ανάληψης σεισμικών φορτίων*. Χαρακτηριστικές εφαρμογές αποτελούν η ενίσχυση της γέφυρας Osaky στη 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.

Ως επίλογος αξίζει να αναφερθεί ότι οι μηχανικοί που επιλέγουν τη χρήση ινοπλισμένων πολυμερών για την ενίσχυση μίας κατασκευής βρίσκονται αντιμέτωποι με μία 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. Για το λόγο αυτό το παρόν κεφάλαιο είναι σχετικά εκτεταμένο, έτσι ώστε πολλές από τις έννοιες που σχετίζονται με τη χρήση σύνθετων υλικών να αποσαφηνιστούν όσο το δυνατόν πληρέστερα.

## **6.2 Κατηγορίες σύνθετων υλικών**

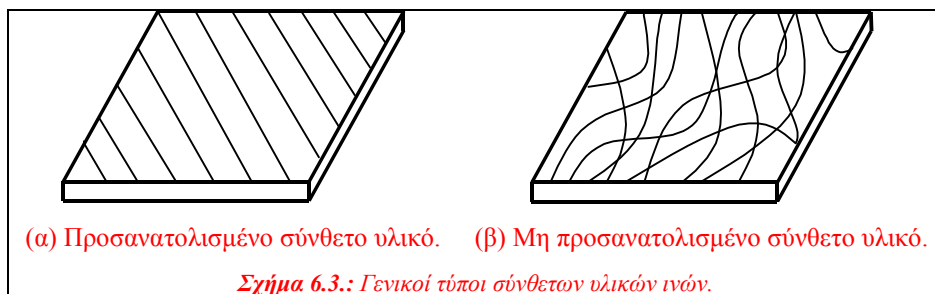
Με την ευρύτερη χρήση του όρου, συνδυασμός δύο ή περισσότερων υλικών συνιστά ένα δομικό στοιχείο από *σύνθετο υλικό*. Τα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή στα οποία κυρίως εστιάζεται αυτό το κεφάλαιο, έχουν ως συστατικά τους στοιχεία ίνες υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας σε παχύρρευστη 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 δύο γενικές κατηγορίες σύνθετων υλικών ινών

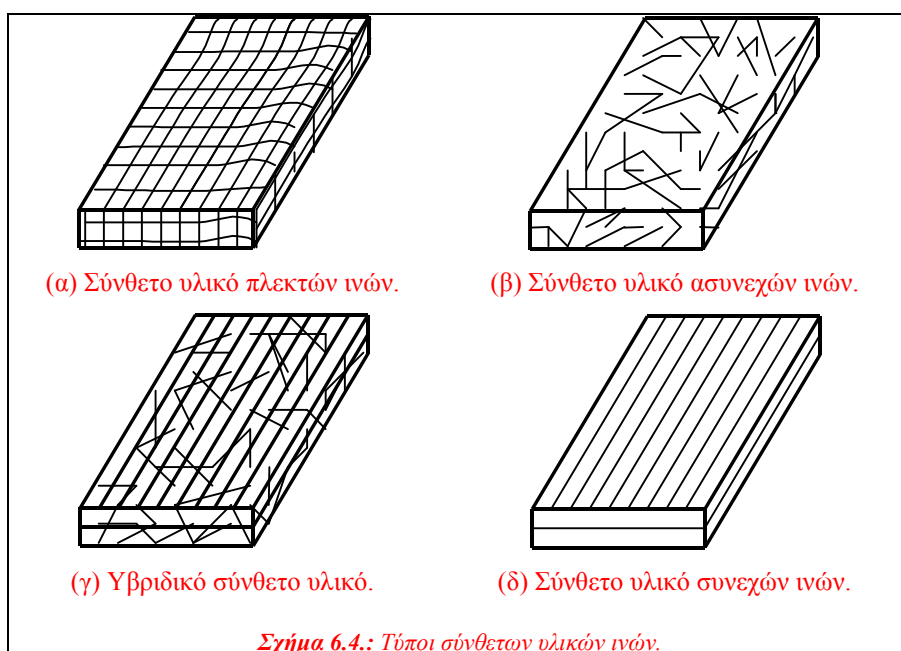
- *Προσανατολισμένα* (directional), των οποίων οι ίνες είναι συνεχείς και έχουν όλες την ίδια διεύθυνση (Σχήμα 6.3α).
- *Μη προσανατολισμένα* (random), των οποίων οι ίνες είναι τυχαία τοποθετημένες στο συνδετικό υλικό (Σχήμα 6.3β).



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 (Σχήμα 6.4α). 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 (Σχήμα 6.4β). Οι μηχανικές τους αντοχές είναι κατά κανόνα κατώτερες των αντίστοιχων με συνεχείς ίνες.

- *Υβριδικά* (hybrid), τα οποία αποτελούνται είτε από συνεχείς και ασυνεχείς ίνες (Σχήμα 6.4γ) είτε από περισσότερους του ενός τύπους ινών (π.χ. ύαλο και 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 (Σχήμα 6.4δ). Παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή, αλλά αποκόλληση μεταξύ των στρωμάτων είναι πιθανή.



Τα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα 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.

### 6.3 Ιδιότητες σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή

Όπως προαναφέρθηκε, 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 που 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.

#### 6.3.1 Υλικά Ινών

Οι τρεις συνηθέστεροι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται σε σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών είναι τα υαλονήματα, τα ανθρακονήματα και οι ίνες πολυαραμιδής.

(α) *Ινες Υάλου.* Τα υαλονήματα εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στο εμπόριο το 1939. Παράγονται με μηχανικό τρόπο από ύαλο που τήκεται. 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, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.1, 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.

Πίνακας 6.1.: Ιδιότητες υάλου-E και υάλου-S

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

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 πολυαραμίδης, 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 του σύνθετου υλικού.

**(β) Ίνες Άνθρακα.** Οι ίνες άνθρακα διατίθενται στο εμπόριο από τα τέλη της δεκαετίας του 1950. Ο άνθρακας παράγεται από πολυακρυλονιτρίλιο, πίσσα (υποπροϊόν της δύλισης του πετρελαίου) ή ρεγιόν 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 εντείνονται 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 αυτή 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 Πολυαραμίδης.** Η εμπορική ονομασία των πρώτων ινών πολυαραμίδης που κυκλοφόρησαν στην αγορά στις αρχές της δεκαετίας του 1970 είναι Kevlar. Η χρήση των σύνθετων υλικών από ίνες πολυαραμίδης 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. 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.

Εκτός από τις παραπάνω τρεις κύριες κατηγορίες, 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 (0.05-0.2 mm) 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.

### **6.3.2 Μήτρες Σύνθετων Υλικών**

Ρητίνες χρησιμοποιούνται συνήθως 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. Παρόλ' 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 προένταση 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 6.2.

**(α) 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.

Πίνακας 6.2.: Ιδιότητες ρητινών

Είδος ρητίνης	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	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

**(β) 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 ανυδρίδες. 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 τις 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.

### 6.3.3 Ιδιότητες Σύνθετου Υλικού

Οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού προκύπτουν ως συνδυασμός των ιδιοτήτων των διακριτών συστατικών του υλικών, δηλαδή των ινών και της μήτρας. Στον Πίνακα 6.3 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.

**Πίνακας 6.3** Ενδεικτικές ιδιότητες σύνθετων υλικών ινοπλισμένων πολυμερών

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

Στη διάθεση του μηχανικού βρίσκονται επίσης με τη μορφή ελασμάτων μικρού πλάτους (60 – 100 mm) 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.

#### 6.4 Μικρομηχανική των σύνθετων υλικών

Όπως προαναφέρθηκε, 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.

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 της σύνθεσης περιγράφεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$v_f + v_m + v_u = 1 \quad (6.1)$$

$$w_f + w_m = 1 \quad (6.2)$$

$$\rho_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m \quad (6.3)$$

όπου  $v_f$ ,  $v_m$  και  $v_u$  είναι οι λόγοι όγκου των ινών, της ρητίνης και των κενών, αντίστοιχα και ισούνται με  $v_i = V_i/V$ , όπου  $V$  ο συνολικός όγκος του

σύνθετου υλικού και  $V_i$  με  $i = f, m, u$  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 ισούνται 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,  $\rho_f$ ,  $\rho_m$  και  $\rho_c$  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:

$$E = E_f v_f + E_m v_m \quad (6.4)$$

Όσον αφορά στην εφελκυστική αντοχή του σύνθετου υλικού, αυτή εξαρτάται από την εφελκυστική αντοχή των ινών, δεδομένου ότι η αντοχή τους είναι μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή του συνδετικού υλικού. Πρακτικά αστοχία της ίνας συνεπάγεται αστοχία του σύνθετου υλικού.

Εάν  $s$ ,  $s_f$  και  $s_{mf}$  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

$$s = s_f v_f + s_{mf} (1 - v_f) \quad (6.5)$$

**Εφαρμογή.** Προκειμένου να κατανοήσουμε την εφαρμογή των παραπάνω σχέσεων, θεωρούμε δοκίμιο γραφίτη – εποξικής ρητίνης διαστάσεων  $2.54 \text{ cm} \times 2.54 \text{ cm} \times 0.30 \text{ cm}$ , που ζυγίζει  $2.980 \text{ gr}$ . Οι πυκνότητες του γραφίτη και της ρητίνης είναι  $\rho_f = 1.9 \text{ gr/cm}^3$  και  $\rho_m = 1.2 \text{ gr/cm}^3$ , αντίστοιχα. Διαλύοντας τη ρητίνη με οξύ, οι ίνες που απομένουν ζυγίζουν  $1.863 \text{ gr}$ . Ζητείται να προσδιοριστούν οι λόγοι όγκου ινών  $v_f$ , ρητίνης  $v_m$  και κενών  $v_u$ .

Η πυκνότητα του σύνθετου υλικού είναι

$$\rho_c = W/V = 2.98 / (2.54 \times 2.54 \times 0.3) = 1.54 \text{ gr/cm}^3$$

Επίσης, σύμφωνα με τις σχέσεις (6.1) και (6.2) ο λόγος όγκου κενών  $v_u$  είναι

$$v_u = 1 - (v_f + v_m) = 1 - [W_f/\rho_f + (W - W_f)/\rho_m] / V =$$

$$= 1 - [1.863/1.9 + (2.98 - 1.863)/1.2] / (2.54 \times 2.54 \times 0.3) =$$

$$= 0.012 = 1.2\%$$

Επομένως,  $v_f + v_m = 0.988$  οπότε η σχέση (6.3) γράφεται

$$\begin{aligned} \rho_c &= \rho_f v_f + \rho_m v_m \Rightarrow \\ \Rightarrow 1.54 &= 1.9 v_f + 1.2 (0.988 - v_f) \Rightarrow \\ \Rightarrow v_f &= 50.6\% \end{aligned}$$

Συνοψίζοντας λοιπόν έχουμε

$$v_f = 50.6\% , v_m = 48.2\% , v_u = 1.2\%$$

## 6.5 Συμπεριφορά σύνθετων υλικών ινοπλισμένων πολυμερών

### 6.5.1 Ιστορική Αναδρομή

Τα πρώτα σύνθετα υλικά χρονολογούνται από τα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα και είχαν ως συστατικά στοιχεία φυσικές ρητίνες και ίνες, όπως πίσσα και ίνες ξύλου. Η μαζική παραγωγή υαλονημάτων ξεκίνησε στο τέλος της δεκαετίας του 1930 και ουσιαστικά σηματοδοτεί τη γέννηση των σύνθετων υλικών προηγμένης τεχνολογίας. Τα σύγχρονα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών από υπόγειες δεξαμενές καυσίμων έως ύφαλα πλοίων και πολεμικά αεροσκάφη. Αρχικά, λόγω του υπερβολικού κόστους και των περιορισμένων πειραματικών αποτελεσμάτων, οι εφαρμογές των σύνθετων υλικών περιορίστηκαν στην αεροναυπηγική, τη χημική βιομηχανία και τη ναυπηγική. Η επικόλληση στρώσεων ινοπλισμένων πολυμερών από ανθρακονήματα σε δομικά στοιχεία κατασκευών με σκοπό την επισκευή και ενίσχυσή τους πρωτοεφαρμόστηκε στην Ελβετία το 1984. Το Υπουργείο Συγκοινωνιών της Καλιφόρνια (CALTRANS) πρωτοπόρησε με τη χρήση 'υφασμάτων' ινοπλισμένων πολυμερών για τη σεισμική ενίσχυση βάθρων γεφυρών στην Καλιφόρνια πριν από περίπου μία δεκαετία (Σχήμα 6.5). Η συμπεριφορά των συστημάτων επισκευής και ενίσχυσης κατασκευών με σύνθετα υλικά σε μεγάλο εύρος εφαρμογών κατά την τελευταία εικοσαετία έχει δοκιμαστεί με εξαιρετική επιτυχία και ιδιαίτερα σε χώρες με δυσμενείς κλιματολογικές συνθήκες, όπως είναι οι ΗΠΑ, ο Καναδάς, η Ιαπωνία, η Ελβετία, η Αυστραλία, κτλ..

Τα μόνα στοιχεία που διαθέτουμε για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των ινοπλισμένων πολυμερών που έχουν εγκατασταθεί σήμερα σε εφαρμογές Πολιτικού Μηχανικού προέρχονται από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ερευνητικών προγραμμάτων, καθώς και από την προβολή στο χρόνο συμπερασμάτων που αφορούν στην τρέχουσα κατάσταση των

υλικών αυτών. Τα τελευταία χρόνια, η ταχεία πρόοδος που έχει σημειωθεί στην τεχνολογία των σύνθετων υλικών, όσον αφορά τόσο στις ιδιότητες όσο και στη διαδικασία παραγωγής τους, έχει επιφέρει σημαντικές βελτιώσεις στη διάρκεια ζωής των ινοπλισμένων πολυμερών και δραματική αύξηση εφαρμογής τους σε τεχνικά έργα. Σήμερα το 1/4 της παραγωγής σύνθετων υλικών χρησιμοποιείται σε εφαρμογές πολιτικού μηχανικού. Στη χώρα μας οι πρώτες εφαρμογές πραγματοποιήθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και εξαπλώθηκαν ιδιαίτερα μετά το σεισμό της Πάρνηθας το 1999.



*Σχήμα 6.5.: Ενίσχυση της γέφυρας Gaviota στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ με 'υφάσματα' ινοπλισμένων πολυμερών.*

### 6.5.2 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 και  $650^{\circ}\text{C}$  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 χρήση.
- *Υπεριώδης ακτινοβολία:* δείκτης υπεριώδους ακτινοβολίας ίσος με 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 10000 ώρες.

### 6.5.3 Επίδραση της Θερμοκρασίας 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 ανάλυση 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 θερμοκρασίες μεταξύ -10 και -30°C αυξάνεται σημαντικά η δυσκαμψία του υλικού με συνέπεια μία 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 φασματοσκοπησης 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 αντοχής 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. Για το λόγο αυτό τα σύνθετα υλικά που δε διαθέτουν πυροπροστασία θεωρούνται ανενεργά σε περίπτωση πυρκαγιάς. Πυροπροστασία επιτυγχάνεται με ειδικά επιχρίσματα ή κοινά επιχρίσματα μεγάλου πάχους (40 – 50 mm). 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 υπεριώδους ακτινοβολίας. Επίσης, η τοποθέτηση επιχρίσματος αποτελεί οικονομικότερη λύση και επιπλέον δίνει τη δυνατότητα βαφής και διακοσμητικής επέμβασης στο δομικό στοιχείο που ενισχύεται.

#### **6.5.4 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 στη 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 αναστρέψιμες είτε όχι, ανάλογα με το χρόνο και τη θερμοκρασία της έκθεσης. Με βάση τα παραπάνω μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι όσο υψηλότερη 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 διαμήκους άξονα 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 πολυαραμιδής 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, συνιστάται 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. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι η θεμελίωση κατασκευών στη θάλασσα (Σχήμα 6.6), η

ενίσχυση λιμενικών εγκαταστάσεων, η ενίσχυση και στεγάνωση σιηράγγων και αγωγών μεγάλων διαστάσεων, κτλ.

#### **6.5.5 Υπεριώδης Ακτινοβολία**

Η υπεριώδης ακτινοβολία του ηλίου (UV) προκαλεί μείωση της αντοχής των σύνθετων υλικών. Ένδειξη αποτελεί σε εκτεθειμένες επιφάνειες η μικρορηγμάτωση και η χρωματικά αλλοίωση. Για την προστασία προτείνεται η εφαρμογή επιχρισμάτων ή ειδικών βαφών.

#### **6.5.6 Γαλβανική Διάβρωση**

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 με ίνες υάλου ή πολυαραμιδής.

#### **6.5.7 Ερπυσμός**

Μεταξύ όλων των συστατικών στοιχείων ινοπλισμένων πολυμερών που έχουν αναφερθεί στις προηγούμενες ενότητες, 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 πολυαραμιδίδη, μπορεί να είναι σημαντική η παραμόρφωση λόγω ερπυσμού του σύνθετου υλικού.



**Σχήμα 6.6.:** Ενίσχυση πασσάλων με σύνθετα υλικά ανθρακονημάτων στο Lamma Island Jetty του Χονγκ Κονγκ.

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 ιδίου βάρους και επίσης το υφιστάμενο σκυρόδεμα έχει αναπτύξει το μεγαλύτερο τμήμα των φαινομενικών παραμορφώσεών του.

#### **6.5.8 Θραύση και Διάβρωση λόγω Έντασης**

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 πρόωπη, 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.

### 6.5.9 Κόπωση

Γενικά τα ινοπλισμένα πολυμερή συμπεριφέρονται καλύτερα από το σκυρόδεμα ή το χάλυβα υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Τα ανθρακονήματα είναι καλύτερα από τις ίνες πολυαραμίδης, 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.

### 6.5.10 Κρούση

Όσον αφορά στην επίδραση της κρούσης την καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζουν κατά σειρά τα σύνθετα υλικά με ίνες πολυαραμίδης (είναι χαρακτηριστικό ότι χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αλεξίσφαιρων γιλέκων), ακολουθούν αυτά με ίνες υάλου και τέλος αυτά με ίνες άνθρακα.

## 6.6 Διαδικασία εφαρμογής σύνθετων υλικών

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.

### 6.6.1 Σύμφυση και Επαφή Διεπιφανειών

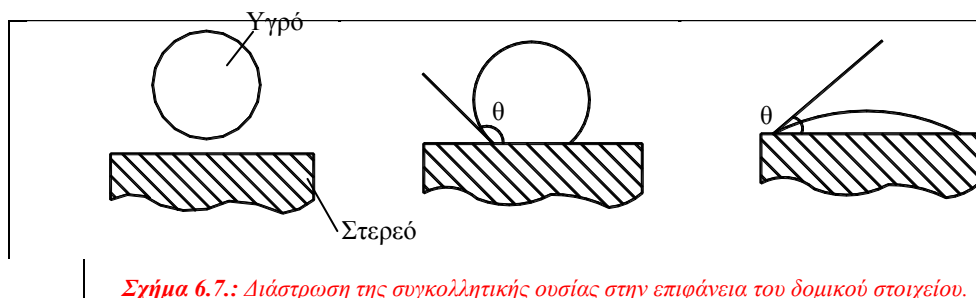
Τα σύνθετα υλικά επικολλούνται στα δομικά στοιχεία με χρήση διαφόρων συγκολλητικών ουσιών, όπως είναι οι εποξικές κόλλες, οι πολυεστερικές κόλλες, κτλ.. Οι ουσίες αυτές εξασφαλίζουν τη διαρκή σύνδεση και από κοινού λειτουργία του ινοπλισμένου πολυμερούς με το

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 ( $T_g$ ) τουλάχιστον ίση με  $45^\circ\text{C}$ .
- Ελάχιστη διατμητική αντοχή στους  $20^\circ\text{C}$  ίση 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 nm. 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 6.7, 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.



**Σχήμα 6.7.:** Διάστρωση της συγκολλητικής ουσίας στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου.

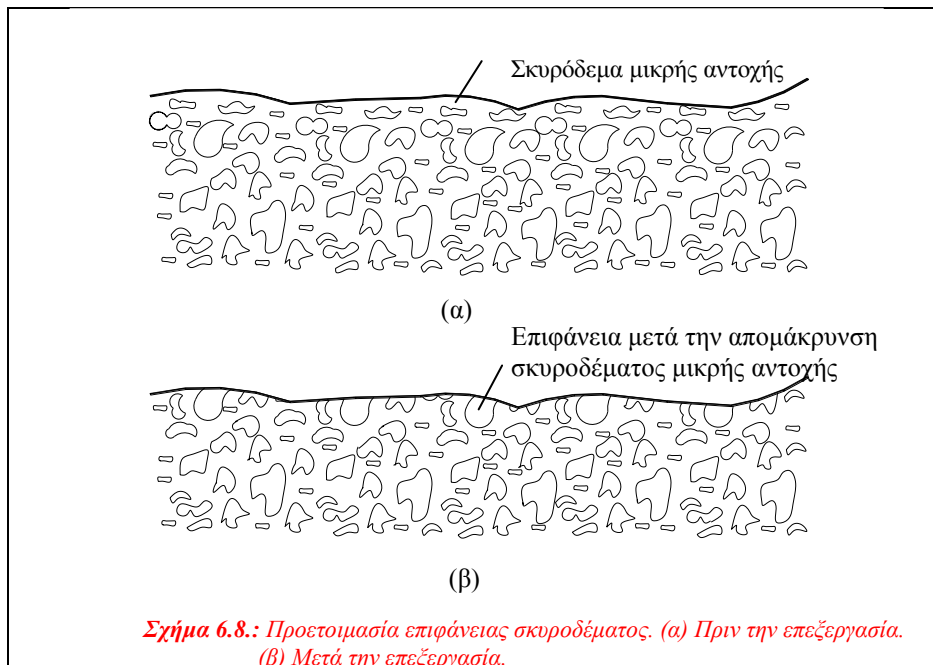
### **6.6.2 Προετοιμασία Επιφάνειας Σκυροδέματος**

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, κτλ.), 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 απαιτήσεις 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 (Σχήμα 6.8). 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 ρητινενέσεις 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, όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο των μεθόδων διάγνωσης βλαβών. Το χρονικό κενό μεταξύ προετοιμασίας της επιφάνειας και επικόλλησης των στρώσεων του σύνθετου υλικού καλό είναι να διατηρείται όσον το δυνατόν μικρότερο, ώστε να προλαμβάνεται περαιτέρω ενανθράκωση του σκυροδέματος.

### 6.6.3 Στάδια Εφαρμογής Σύνθετων Υλικών

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, κτλ.).



- 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 αγκυριών όπου απαιτείται (τοιχεία, άνω παρειές δοκών, κτλ.).
- 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.

#### **6.7 Αρχές σχεδιασμού συστημάτων επισκευής και ενίσχυσης με σύνθετα υλικά**

Τα σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό της ενίσχυσης τόσο 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 τόσο 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*. Δίνονται χαρακτηριστικά παραδείγματα ώστε να γίνει κατανοητή η μεθοδολογία που αναπτύσσεται.

**6.7.1 Επιβολή Εξωτερικής Περίσφιγξης με Μανδύα Σύνθετων Υλικών**

Η τεχνική της επιβολής εξωτερικής περίσφιγξης με τοποθέτηση μανδύων από σύνθετα υλικά εφαρμόζεται κυρίως σε υποστυλώματα κτιρίων και βάρθρα γεφυρών. Η ενίσχυση με ινοπλισμένα πολυμερή είναι αποδοτικότερη για στοιχεία κυκλικής και τετραγωνικής διατομής. Για υποστυλώματα με ορθογωνική διατομή, η απόδοση της εφαρμογής περιορίζεται όσο αυξάνεται ο λόγος των πλευρών της διατομής του υποστυλώματος. Προκειμένου να επιτευχθεί πλήρης περίσφιγξη ορθογωνικής διατομής, απαιτείται η τροποποίηση του σχήματος της διατομής, είτε με λάξευση των γωνιών της είτε με τοποθέτηση πρόσθετου σκυροδέματος, έτσι ώστε να δημιουργηθεί μία συνεχής καμπύλη επιφάνεια πάνω στην οποία θα τοποθετηθεί ο μανδύας. Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή της περίσφιγξης μπορεί να έχουν μία από τις ακόλουθες μορφές:

- Ολόσωμοι μανδύες που αποτελούνται από στρώσεις ινοπλισμένων πολυμερών, οι οποίοι επικολλούνται εξωτερικά σε όλο το ύψος του προς ενίσχυση στοιχείου.
- Μανδύες περιορισμένου ύψους ('κολάρα') που αποτελούνται από μεμονωμένες λωρίδες ινοπλισμένων πολυμερών.
- Προεντεταμένοι μανδύες περιορισμένου ύψους από ινοπλισμένα πολυμερή με μορφή ταινιών 'πακεταρίσματος'.
- Ινοπλισμένα πολυμερή με μορφή σπειροειδούς οπλισμού, ο οποίος περιελίσσεται στην εξωτερική επιφάνεια του προς ενίσχυση στοιχείου κατ' αντιστοιχία με το συνήθη σπειροειδή σιδηροπλισμό που χρησιμοποιείται για την όπλιση του στοιχείου.

Μέσω της εξωτερικής περίσφιγξης που επιβάλλει ο μανδύας σύνθετων υλικών, εισάγεται τριαξονική θλίψη στο σκυρόδεμα και έτσι επιτυγχάνεται αύξηση τόσο της θλιπτικής του αντοχής του όσο και της πλαστιμότητας του στοιχείου έναντι του πρόσθετου φορτίου που καλείται να αναλάβει μετά την επέμβαση. Επιπλέον με το μανδύα σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή μπορεί να αποτραπεί ο λυγισμός των θλιβόμενων ράβδων του διαμήκους οπλισμού του στοιχείου λόγω μεγάλης απόστασης μεταξύ των υπαρχόντων συνδετήρων στις περιοχές σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων. Τέλος, όταν το διατιθέμενο μήκος υπερκάλυψης των διαμήκων οπλισμών στις περιοχές των ενώσεων δεν είναι επαρκές, είναι δυνατό μέσω της εξωτερικά επιβαλλόμενης περίσφιγξης από το μανδύα σύνθετων υλικών να επιτευχθεί βελτίωση των συνθηκών αγκύρωσης και κατά συνέπεια να μειωθεί ο κίνδυνος αστοχίας της συνάφειας των ματιζόμενων ράβδων οπλισμού του στοιχείου.

### 6.7.1.1 Βελτίωση Μηχανικών Χαρακτηριστικών Σκυροδέματος κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Η αυξημένη λόγω μανδύα σύνθετων υλικών θλιπτική αντοχή  $f_{cd,c}$  του σκυροδέματος ορθογωνικής διατομής διαστάσεων  $b \times d$  υπολογίζεται από τη σχέση\*

$$f_{cd,c} = (1,125 + 1,25\alpha\omega_{wd})f_{cd} \quad (6.6)$$

όπου  $f_{cd}$  είναι η θλιπτική αντοχή σχεδιασμού του υφιστάμενου σκυροδέματος,  $\alpha$  ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης, στην οποία συνεκτιμάται και η ευεργετική επίδραση της εξομάλυνσης των ακμών του στοιχείου, και  $\omega_{wd}$  το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό της περίσφιγξης.

Για ορθογωνικά υποστυλώματα οι συντελεστές  $\alpha$ ,  $\alpha_n$  και  $\alpha_s$  υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις\*\*

$$\alpha = \alpha_n \alpha_s \quad (6.7)$$

με

$$\alpha_n = 1 - \frac{1}{3A_c} [b_c^2(1-\beta)^2 + d_c^2(1-\gamma)^2] \quad (6.8)$$

όπου

$$A_c = b_c d_c \quad (6.9)$$

και

$$\beta = 2b_p/b_c \quad (6.10)$$

$$\gamma = 2d_p/d_c \quad (6.11)$$

και

$$\alpha_s = 0.9 \quad (6.12)$$

\* Σχέση (6.21) ΚΑΝ.ΕΠΕ.

\*\* §18.4.4.2 ΕΚΩΣ 2000 και σχέση (Σ6.13) ΚΑΝ.ΕΠΕ.

όπου  $b_p$  και  $d_p$  είναι οι ακτίνες καμπυλότητας του ΙΟΠ στις γωνίες του υποστρώματος και  $b_c$  και  $d_c$  οι διαστάσεις της διατομής του οπλισμένου σκυροδέματος, βλέπε Σχήμα 6.9.



Σχήμα 6.9.: Περίσφιγξη με ινοπλισμένα πολυμερή – στρογγύλευση γωνιών.

Το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό οπλισμού  $\omega_{wd}$  υπολογίζεται από τη σχέση\*

$$\omega_{wd} = (2 n t_j (b + d) / (b d)) (f_{jd} / f_{cd}) \quad (6.13)$$

όπου  $t_j$  είναι το πάχος του ΙΟΠ και  $f_{jd}$  η εφελκυστική αντοχή του ΙΟΠ.

Η αυξημένη λόγω μανδύα σύνθετων υλικών ανηγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος  $\varepsilon_{c2,c}$  υπολογίζεται από τη σχέση†

$$\varepsilon_{c2,c} = \gamma_{I\Omega\Gamma} 0.0035^* (f_{cd,c} / f_{cd})^2 \quad (6.14)$$

όπου  $\gamma_{I\Omega\Gamma} = 1.00$  για ΙΩΠ με ίνες άνθρακα ή  $2.00$  για ΙΩΠ με ίνες υάλου.

\* §18.4.4.2 ΕΚΩΣ 2000

† Σχέση (6.21) ΚΑΝ.ΕΠΕ.

\*\* §18.4.4.2 ΕΚΩΣ 2000 και σχέση (Σ6.13) ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιείται μειωμένη τιμή,  $f_j'$ , της εφελκυστικής αντοχής του ΙΟΠ που υπολογίζεται από τη σχέση\*\*

$$f_j' = f_j \psi \quad (6.15)$$

όπου η τιμή του συντελεστή μεγάλου πλήθους στρώσεων,  $\psi$ , εκτιμάται με βάση τη σχέση

$$\psi = k^{-1/4} \quad (6.16)$$

όπου  $k$  το πλήθος των στρώσεων του ΙΟΠ, όταν  $k \geq 4$ . Αλλιώς, λαμβάνεται  $\psi = 1,0$ .

#### 6.7.1.2 Αύξηση Πλαστιμότητας κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ.

α) Όταν ο στόχος ανασχεδιασμού εκφράζεται σε όρους καθολικού δείκτη συμπεριφοράς “ $q$ ”, ελέγχεται η ικανότητα όλων των δομικών μελών να επιδείξουν τοπικούς δείκτες πλαστιμότητας “ $m$ ” ικανούς για την επίτευξη του δείκτη  $q$ . Προς τούτο, μπορεί να ακολουθείται η εξής διαδικασία υπολογισμού:

i) Λαμβάνοντας υπόψη τον παράγοντα συμπεριφοράς  $q_v$  του δομήματος, υπολογίζεται ο απαιτούμενος παράγοντας πλαστιμότητας  $q_\pi$  από τη σχέση\*\*\*

$$q_\pi = q / q_v \quad (6.17)$$

ii) Υπολογίζεται ο απαιτούμενος δείκτης πλαστιμότητας  $\mu_\delta$  του δομήματος σε όρους μετακινήσεων από τη σχέση\*

$$\begin{aligned} \mu_\delta &= q_\pi \text{ όταν } T > T_c \\ \mu_\delta &= 1 + (T_c/T)(q_\pi - 1) \text{ όταν } T < T_c \end{aligned} \quad (6.18)$$

όπου  $T_c$  η περίοδος απ' την οποία αρχίζει ο φθιτός κλάδος του φάσματος σχεδιασμού.

\*\* Σχέση (6.2.3) ΚΑΝ.ΕΠΕ.

\*\*\* Παράρτημα 4.2 ΚΑΝ.ΕΠΕ.

\* Σχέση (8.17) ΚΑΝ.ΕΠΕ.

iii) Ελέγχεται ότι κάθε όροφος του κτιρίου μπορεί να επιδείξει τον ως άνω δείκτη πλαστιμότητας  $\mu_\delta$ , υπολογίζοντας τους αντίστοιχους δείκτες πλαστιμότητας  $\mu_{\delta i}$  του κάθε πρωτεύοντος στοιχείου εκάστου ορόφου.

Προς τούτο, είναι δυνατόν σε κάθε όροφο να εντοπίζεται το πιο εύρωστο πρωτεύον δομικό μέλος ( $\max \lambda$  ορόφου), το οποίο θα αναδιαστασιολογείται με απαιτούμενο τοπικό δείκτη πλαστιμότητας ίσο με " $\mu_\delta$ ", ενώ από τα πρωτεύοντα μέλη του ορόφου " $i$ ", θα απαιτηθεί να επιδεικνύουν τοπικό δείκτη πλαστιμότητας σε όρους μετακινήσεων ίσον με

$$\mu_{\delta i} = (\lambda_i / \lambda_{\max}) \mu_\delta \quad (6.19)$$

όπου  $\lambda_i$  είναι οι δείκτες ανεπάρκειας των πρωτεύοντων δομικών μελών του δομήματος μετά την επέμβαση και

$$\lambda_{\max} = \max \lambda_i \quad (6.20)$$

iv) Για κάθε κρίσιμη διατομή του κάθε πρωτεύοντος δομικού στοιχείου υπολογίζεται η απαιτούμενη τιμή  $\mu_{1/r}$  (του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων) συναρτήσει του ως άνω αντίστοιχου  $\mu_{\delta i}$ .

Προς τούτο επιτρέπεται η χρήση της έκφρασης

$$\mu_\delta = (\mu_{1/r} + 2) / 3 \quad (6.21)$$

Σημειώνεται πάντως ότι στην περίπτωση όπου από διαθέσιμες τιμές  $\mu_{1/r}$  εκτιμάται η διαθέσιμη τιμή " $q$ ", τότε υπολογίζεται υπέρ της ασφαλείας το  $\mu_\delta$  από την ακόλουθη σχέση σε συνδυασμό με τη σχέση (6.18)

$$(\mu_{1/r} - 1) / (\mu_\delta - 1) = 2 \quad (6.22)$$

v) Τέλος, αναζητείται υπολογιστικώς η τιμή  $\alpha\omega_w$  με την οποία το διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων της υπόψη διατομής θα παρουσιάζει τιμή

$$(1/r)_u / (1/r)_r = \mu_{1/r, \text{απ}} \quad (6.23)$$

Εναλλακτικώς επιτρέπεται, για  $\nu > 0,2$ , η χρήση της προσεγγιστικής έκφρασης από τη σχέση\*

$$\varepsilon_{cu,c} = 2,2 \mu_{1/r} \varepsilon_{sy} \nu \geq 0,0035 \quad (6.24)$$

όπου  $\varepsilon_{sy}$  η παραμόρφωση διαρροής του διαμήκους οπλισμού του στοιχείου και “ $\nu$ ” η ανοιγμένη αξονική θλιπτική δύναμη, υπολογιζόμενες με χρήση μέσων τιμών υλικών του υπόψη στοιχείου. Η απαιτούμενη τιμή  $\alpha\omega_{wd}$ , που αντιστοιχεί στην τιμή  $\mu_{1/r}$ , υπολογίζεται με χρήση της σχέσεων\*\*

Περίσφιγξη ΙΟΠ με ίνες άνθρακα:

$$\varepsilon_{cu,c} = 0,0035 (f_{c,c} / f_c)^2 \quad (6.25)$$

Περίσφιγξη ΙΟΠ με ίνες γυαλιού:

$$\varepsilon_{cu,c} = 0,007 (f_{c,c} / f_c)^2 \quad (6.26)$$

β) Όταν ο στόχος ανασχεδιασμού εκφράζεται σε όρους τοπικών δεικτών πλαστιμότητας “ $m$ ” μέλους, ελέγχεται ότι η διαθέσιμη πλαστιμότητα των κρίσιμων περιοχών του κάθε πρωτεύοντος μέλους είναι επαρκής για να εξασφαλίσει το δεδομένο στόχο του υπόψη μέλους, σύμφωνα με τα παραπάνω.

γ) Όταν ο στόχος ανασχεδιασμού εκφράζεται σε όρους επιθυμητής γωνίας στροφής χορδής “ $\theta_d$ ”, τότε η αναγκαία ανά δομικό στοιχείο πλαστιμότητα  $\mu_{1/r}$  σε όρους καμπυλοτήτων, επιτρέπεται να υπολογίζεται μέσω αξιόπιστων συσχετίσεων  $\mu_{1/r}$  και  $\mu_\theta$ , προκειμένου να υπολογιστεί η αναγκαία περίσφιγξη, όπως παραπάνω.

δ) Όταν ως οπλισμός περίσφιγξης χρησιμοποιούνται ανεξάρτητα εξωτερικά κολάρα (λωρίδες), η μέγιστη αξονική τους απόσταση ορίζεται ως

$$s_{max} = 100 + w_i (mm) \leq 0.5b_c \quad (6.27)$$

\* Σχέση (Σ8.11) ΚΑΝ.ΕΠΕ.

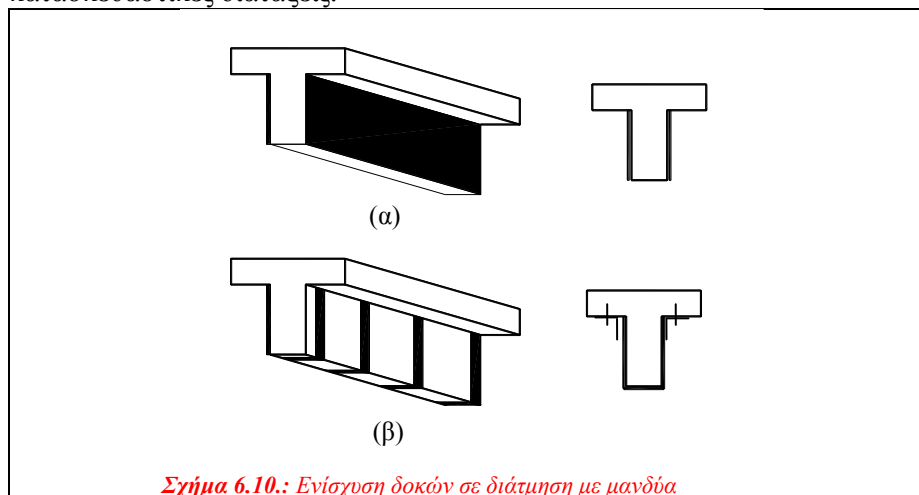
\*\* Σχέσεις (8.19) και (8.20) ΚΑΝ.ΕΠΕ.

όπου  $w_i$  το πλάτος του κολάρου και  $b_c$  η μικρότερη διάσταση της διατομής.

### 6.7.2 Αύξηση Αντοχής σε Τέμνουσα

Η διατμητική αντοχή δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα, μπορεί να αυξηθεί με μανδύες σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή, οι οποίοι επικολλούνται εξωτερικά στα στοιχεία και παραλαμβάνουν τέμνουσα δύναμη κατ' αντιστοιχία με το συμβατικό οπλισμό διάτμησης. Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται για ενίσχυση σε διάτμηση μπορεί να έχουν, είτε τη μορφή ολόσωμων μανδυών που αποτελούνται από επικολλητές στρώσεις ινοπλισμένων πολυμερών είτε τη μορφή μανδυών περιορισμένου ύψους ('κολάρα') που αποτελούνται από λωρίδες ινοπλισμένων πολυμερών. Στο Σχήμα 6.10 φαίνεται η εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων ενίσχυσης στην περίπτωση δοκών. Για την περίπτωση ενίσχυσης υποστυλωμάτων σε διάτμηση, η τοποθέτηση των ινοπλισμένων πολυμερών εφαρμόζεται όπως για την περίπτωση της επιβολής εξωτερικής περισφιγξης που περιγράφεται στην §6.7.1. Οι ίνες του πολυμερούς είναι κατά κανόνα κάθετες στον άξονα του στοιχείου.

Πρέπει να τονιστεί ότι, στην περίπτωση που ο μανδύας από σύνθετο υλικό δεν είναι δυνατό να περιβάλλει πλήρως τη διατομή του στοιχείου (π.χ. περίπτωση ενίσχυσης πλακοδοκού), ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην όσο το δυνατόν καλύτερη αγκύρωση των στρώσεων του σύνθετου υλικού στο υπάρχον στοιχείο (Σχήμα 6.10). Στην περίπτωση ορθογωνικών διατομών, συνιστάται επίσης η λάξευση των γωνιών τους πριν την τοποθέτηση των στρώσεων του μανδύα, όπως καθορίζουν οι κατασκευαστικές διατάξεις.



Σχήμα 6.10.: Ενίσχυση δοκών σε διάτμηση με μανδύα



σύνθετων υλικών. (α) Ολόσωμοι μανδύες. (β) 'Κολάρα'.



Σχήμα 6.11.: Αγκύρωση μανδύα σύνθετου υλικού για ενίσχυση πλακοδοκού.

Όσον αφορά στο σχεδιασμό του μανδύα σύνθετων υλικών, θεωρούμε ότι αυτός συμπεριφέρεται σαν πρόσθετος οπλισμός διάτμησης, ενώ δεν συνεισφέρει στην αντοχή της διατομής λόγω λοξής θλίψης κορμού. Για το λόγο αυτό, η τέμνουσα αντοχής σχεδιασμού λόγω λοξής θλίψης κορμού  $V_{Rd2}$  λαμβάνεται ίση με αυτήν του στοιχείου πριν την επέμβαση. Η τέμνουσα αντοχής σχεδιασμού λόγω οπλισμού διάτμησης  $V_{Rd3}$  υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$V_{Rd3} = V_{cd} + V_{wd,οπ} + V_{sj} \quad (6.28)$$

όπου  $V_{cd}$  και  $V_{wd,οπ}$  είναι η τέμνουσα που παραλαμβάνεται από το σκυρόδεμα και τον υπάρχοντα οπλισμό διάτμησης, αντίστοιχα, ενώ  $V_{sj}$  είναι η πρόσθετη τέμνουσα που παραλαμβάνει ο μανδύας σύνθετων υλικών.

#### 6.7.2.1 Αύξηση αντοχής σε τέμνουσα κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ.

- i) Η ενίσχυση έναντι τέμνουσας ενός στοιχείου Ο.Σ. η οποία απαιτείται λόγω ανεπάρκειας του οπλισμού διάτμησης ( $V_{Sd} > V_{Rd3}$ ), μπορεί να γίνει με ινοπλισμένα πολυμερή τα οποία επικολλώνται πλήρως επί του στοιχείου, αναλαμβάνοντας ρόλο οπλισμού διάτμησης, ανάλογου με αυτόν του αντίστοιχου συμβατικού οπλισμού.

Συνιστάται η επιδίωξη “κλειστών” ενισχύσεων με τη μορφή ολόπλευρων μανδύων ή κολάρων που περιβάλλουν ολόκληρη τη διατομή του στοιχείου. Στην περίπτωση που αυτό δεν είναι εφικτό, απαιτείται η πλήρης αγκύρωση του διατμητικού οπλισμού της “ανοικτής” ενίσχυσης στο υφιστάμενο σκυρόδεμα με πρόσθετα στοιχεία σύνδεσης, με επαρκή

ικανότητα για τη μεταφορά των δυνάμεων στο αρχικό στοιχείο. Πάντως δεν επιτρέπονται “ανοικτές” ενισχύσεις με ανεξάρτητα ελάσματα ή υφάσματα ΙΟΠ επικολλημένα στις παρειές του στοιχείου: “Ανοικτές” ενισχύσεις επιτρέπονται μόνο υπό μορφή συνεχούς U.

Κατά παρέκκλιση, επιτρέπεται η εφαρμογή “ανοικτών” ενισχύσεων με αγκύρωση χωρίς πρόσθετα στοιχεία σύνδεσης, αλλά μόνο μέσω εποξειδικής κόλλας υπό τις ακόλουθες σύγχρονες προϋποθέσεις:

(α) Το ύψος του αρχικού στοιχείου που διατίθεται για την επικόλληση του στοιχείου ενίσχυσης είναι επαρκές για την εξασφάλιση της δύναμης η οποία ζητείται να αναληφθεί από τους νέους συνδετήρες. Η παραπάνω προϋπόθεση θεωρείται ότι εξασφαλίζεται αν  $h \geq h_j \geq 2L_e$  όπου  $h$  και  $h_j$  είναι τα ύψη του αρχικού στοιχείου και του στοιχείου ενίσχυσης, αντίστοιχα, και  $L_e$  το ενεργό μήκος αγκύρωσης που υπολογίζεται από τη σχέση\*

$$L_e = ((E_j t_j) / (2 f_{ctm}))^{0.5} \text{ (MPa, mm)} \quad (6.29)$$

όπου  $t_j$ ,  $E_j$  είναι το πάχος και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού ενίσχυσης, αντίστοιχα. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται  $k$  παράλληλες στρώσεις υλικού ενίσχυσης πάχους  $t_{ji}$  λαμβάνεται

$$t_j = \psi k t_{ji} \quad (6.30)$$

όπου  $\psi$  είναι ο μειωτικός συντελεστής πολλών στρώσεων που εκτιμάται από τη σχέση

$$\psi = k^{-1/4} \quad (6.31)$$

όπου  $k$  το πλήθος των στρώσεων του ΙΟΠ, όταν  $k \geq 4$ . Αλλιώς, λαμβάνεται  $\psi = 1,0$ .

(β) Η ικανότητα του αρχικού στοιχείου χωρίς ενίσχυση είναι επαρκής για το συνδυασμό φόρτισης  $G + \psi_2 Q$ , και

(γ) Ο ποιοτικός έλεγχος των εργασιών είναι υψηλής στάθμης.

ii) Η τέμνουσα αντοχής σχεδιασμού λόγω οπλισμού διάτμησης ( $V_{Rd,tot}$ ) υπολογίζεται από τη σχέση\*\*

\* Σχέση (Σ8.4) ΚΑΝ.ΕΠΕ.

\*\* Σχέση (8.12) ΚΑΝ.ΕΠΕ.

$$V_{Rd,tot} = V_{Rd,s} + V_{jd} \quad (6.32)$$

όπου  $V_{Rd,s}$  είναι η τέμνουσα που αναλαμβάνουν οι συνδετήρες του αρχικού στοιχείου,  $V_{jd}$  είναι η τέμνουσα που αναλαμβάνει ο νέος οπλισμός διάτμησης που υπολογίζεται από τη σχέση \*\*\*

$$V_{jd} = \sigma_{jd} \rho_j b_w h_{j,ef} (\cot\theta + \cot\alpha) \sin^2\alpha \quad (6.33)$$

όπου  $\sigma_{jd}$  είναι η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσης του εξωτερικού οπλισμού διάτμησης,  $\rho_j$  είναι το ογκομετρικό ποσοστό του εξωτερικού οπλισμού,  $b_w$  είναι το πλάτος της διατομής,  $\theta$  είναι η γωνία μεταξύ του άξονα του στοιχείου και της διεύθυνσης των αναμενόμενων λοξών ρωγμών, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ίση προς  $45^\circ$  και  $\alpha$  είναι η γωνία των κύριων ινών του πολυμερούς ως προς το διαμήκη άξονα του στοιχείου. Στην περίπτωση υλικών με ίνες σε περισσότερες από μία κύριες διευθύνσεις, η σχέση (6.33) μπορεί να εφαρμόζεται ανεξάρτητα για κάθε κύρια διεύθυνση ινών (με αντίστοιχο  $\rho_j$ ).

Το γεωμετρικό ποσοστό του εξωτερικού οπλισμού ορίζεται από τη σχέση \*

$$\rho_j = 2 A_j / (s_j b_w \sin\alpha) \quad (6.34)$$

όπου

$$A_j = t_j w_j \quad (6.35)$$

$w_j$  και  $s_j$  είναι το πλάτος και η αξονική απόσταση του εξωτερικού οπλισμού στην περίπτωση λωρίδων.

Για συνεχή φύλλα

$$t_j = A_j / s_j \quad (6.36)$$

και

$$w_i = s_i \quad (6.37)$$

Για  $\theta = 45^\circ$  και  $\alpha = 90^\circ$  η παραπάνω σχέση απλοποιείται και παίρνει τη μορφή της σχέσης \*\*

\*\*\* Σχέση (8.13) ΚΑΝ.ΕΠΕ.

\* Σχέση (Σ8.8) ΚΑΝ.ΕΠΕ.

\*\* Σχέση (Σ8.9) ΚΑΝ.ΕΠΕ.

$$V_{jd} = (2 A_j / s_j) h_{j,ef} \sigma_{jd} \quad (6.38)$$

όπου  $h_{j,ef}$  είναι το ενεργό (για την ανάληψη τέμνουσας) ύψος της ενίσχυσης  
Μπορεί να θεωρηθεί

$$h_{j,ef} = (2/3) d \quad (6.39)$$

iii) Η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσεως  $\sigma_{jd}$ , του οπλισμού διάτμησης με ΙΟΠ, εκτιμάται με βάση μία κρίσιμη τιμή της τάσης  $\sigma_{j,crit}$  ή της παραμόρφωσης  $\varepsilon_{j,crit}$  του υλικού ενίσχυσης, η οποία εξαρτάται από τη μορφή αστοχίας. Ως τιμή σχεδιασμού  $\sigma_{jd}$  θεωρείται αυτή που αντιστοιχεί στη δυσμενέστερη από τις δύο μορφές αστοχίας (Α) και (Β) που αναπτύσσονται ακολούθως:

Α) Αστοχία του ίδιου του υλικού ενίσχυσης.  
Έναντι αυτής πρέπει<sup>\*\*\*</sup>

$$\sigma_{jd} \leq f_{jk} / \gamma_m \quad (6.40)$$

όπου  $f_{jk}$  είναι η χαρακτηριστική τιμή αντοχής του υλικού ενίσχυσης και  $\gamma_m$  είναι ο συντελεστής ασφαλείας για το υλικό ενίσχυσης ο οποίος για τα ινοπλισμένα πολυμερή λαμβάνεται  $\gamma_m = \gamma_{IOΠ} = 1,20$ .

Η χαρακτηριστική τιμή αντοχής των ινοπλισμένων πολυμερών υπολογίζεται από τη σχέση

$$f_{jk} = E_j \varepsilon_{j,crit} \quad (6.41)$$

Η αστοχία του υλικού μπορεί να συμβεί υπό παραμορφώσεις σημαντικά μικρότερες της συμβατικής παραμόρφωσης αστοχίας του υλικού (όπως αυτή προκύπτει από τις δοκιμές αξονικού εφελκυσμού), λόγω τοπικής υπερκαταπόνησης στη θέση όπου γεφυρώνεται το μεγαλύτερο άνοιγμα μίας κρίσιμης διατμητικής ρωγμής. Έναντι αυτού του δυσμενούς ενδεχομένου, λαμβάνεται

$$\varepsilon_{j,crit} = k_v \varepsilon_{j,max} \quad (6.42)$$

<sup>\*\*\*</sup> Σχέση (8.14) ΚΑΝ.ΕΠΕ.

όπου  $k_v$  συντελεστής που εκφράζει την περίπου τριγωνική κατανομή των παραμορφώσεων κατά μήκος της κρίσιμης λοξής ρωγμής και λαμβάνεται  $k_v = 1/2$ , και

$$\varepsilon_{j,max} = \varepsilon_{ju} \psi \leq 1.5\% \quad (6.43)$$

όπου  $\varepsilon_{ju}$  είναι η μέγιστη εφελκυστική παραμόρφωση του υλικού και  $\psi$  ο μειωτικός συντελεστής πολλών στρώσεων που υπολογίζεται από τη σχέση (6.60).

Η μέγιστη τιμή  $\varepsilon_{j,max} = 1,5\%$  αποσκοπεί στον περιορισμό του ανοίγματος μίας κρίσιμης λοξής ρωγμής πέραν της οποίας μειώνεται η συμβολή του σκυροδέματος ( $V_c$ ) στη διατμητική αντοχή του μέλους, η δε αστοχία συμβαίνει πριν από την εξάντληση της αντοχής του υλικού ενίσχυσης.

B) Πρόωση αποκόλληση του υλικού ενίσχυσης λόγω ανεπαρκούς αγκύρωσης των άκρων του.

Αυτή η μορφή αστοχίας αφορά μόνο τις κατά παρέκκλιση επιτρεπόμενες ανοικτές ενισχύσεις που δεν έχουν πρόσθετα ακραία στοιχεία αγκύρωσης, και η αγκύρωση των άκρων τους εξασφαλίζεται μόνο με πρόσφυση μέσω κόλλας.

Στην περίπτωση “κλειστών” ενισχύσεων, η αστοχία αυτή αποφεύγεται εξασφαλίζοντας την περιμετρική συνέχεια του στοιχείου ενίσχυσης. Για τα ινοπλισμένα πολυμερή η περιμετρική συνέχεια θεωρείται ότι εξασφαλίζεται μέσω επαρκούς (της τάξεως των 150mm) υπερκάλυψης των δύο άκρων του υφάσματος ΙΟΠ.

“Ανοικτές” ενισχύσεις μπορούν να θεωρηθούν ως οιονεί “κλειστές” εάν εξασφαλίζεται η πλήρης αγκύρωση των άκρων τους στα υφιστάμενα στοιχεία σκυροδέματος, ελέγχοντας και όλους τους ενδεχόμενους τρόπους αστοχίας των στοιχείων αγκύρωσης.

Έναντι αυτής της αστοχίας πρέπει\*

$$\sigma_{jd} \leq \sigma_{j,crit} / \gamma_{Rd} \quad (6.44)$$

όπου  $\gamma_{Rd}$  είναι ο συντελεστής αβεβαιότητας του προσομοιώματος και λαμβάνεται ίσος με 1,20.

Οι τιμές των  $\sigma_{j,crit}$  ή  $\varepsilon_{j,crit}$  προσδιορίζονται από τις σχέσεις

$$\sigma_{j,crit} \leq k_v \sigma_{j,max} \quad (6.45)$$

\* Σχέση (8.15) ΚΑΝ.ΕΠΕ.

με

$$k_v = 0,40 + 0,25\lambda \leq 0,65 \quad (6.46)$$

όπου  $\lambda$  είναι ο δείκτης του διατιθέμενου μήκους αγκύρωσης ( $L_{av}$ ) του οπλισμού ενίσχυσης ως προς το ενεργό ( $L_e$ ), δηλαδή

$$\lambda = L_{av} / L_e \quad (6.47)$$

με

$$L_{av} = h_{j,ef} \quad (6.48)$$

και το  $L_e$  υπολογίζεται από τη σχέση (6.58).  
Ενώ το  $\sigma_{j,max}$  υπολογίζεται από τη σχέση\*\*

$$\sigma_{j,max} = \beta (\tau_b^{αποκ.} / t_j) L_e \quad (6.49)$$

με

$$\tau_b^{αποκ.} \approx f_{ctm} \quad (6.50)$$

όπου  $t_j$  το πάχος του υλικού ενίσχυσης που απομειώνεται κατάλληλα σύμφωνα με τη σχέση (6.30) και  $\beta$  διορθωτικός συντελεστής που υπολογίζεται από τη σχέση

$$\beta = \beta_w \beta_L \quad (6.51)$$

όπου  $\beta_w$  είναι ο συντελεστής επιρροής πλάτους οπλισμού ενίσχυσης και  $\beta_L$  ο συντελεστής επιρροής διατιθέμενου μήκους αγκύρωσης, οι οποίοι υπολογίζονται από τις σχέσεις

$$\beta_w = \sqrt{(2 - (w_i / (s_i \sin \alpha))) / (1 + (w_i / (s_i \sin \alpha)))} \quad (6.52)$$

ο συντελεστής  $\beta_w$  λαμβάνεται ίσος με  $1/\sqrt{2}$  για ενίσχυση με συνεχή φύλλα ή υφάσματα, και

$$\beta_L = \sin(\pi\lambda/2) \approx \lambda(\lambda-2) \quad (6.53)$$

με

\*\* Σχέση (Σ8.10) ΚΑΝ.ΕΠΕ.

$$\beta_L = 1 \text{ αν } \lambda \geq 1.0 \quad (6.54)$$

iv) Για στοιχεία με κυκλική διατομή, η  $V_{jd}$  υπολογίζεται από τη σχέση\*\*

$$V_{jd} = \sigma_{jd} \rho_j (1/2) (\pi D^2/4) (\cot\theta + \cot\alpha) \sin^2\alpha \quad (6.55)$$

όπου  $\rho_j$  είναι το ογκομετρικό ποσοστό του εξωτερικού οπλισμού διάτμησης και  $D$  η διάμετρος της διατομής. Το εμβαδόν της διατομής του οπλισμού διάτμησης  $A_j$  και η τιμή σχεδιασμού της ενεργού τάσης  $\sigma_{jd}$  του οπλισμού διάτμησης υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις (6.35), (6.40) και (6.44).

Το ογκομετρικό ποσοστό του οπλισμού διάτμησης  $\rho_j$  υπολογίζεται σύμφωνα με τις σχέσεις

i) Για την περίπτωση λωρίδων ή κολάρων

$$\rho_j = 4 A_j / (D s_j \sin\alpha) \quad (6.56)$$

ii) Για την περίπτωση ολόσωμων μανδυνών

$$\rho_j = 4 t_j / (D \sin\alpha) \quad (6.57)$$

### 6.7.3 Αποκατάσταση Ανεπαρκών Μηκών Παράθεσης Ράβδων Οπλισμού

Όταν το διατιθέμενο μήκος επικάλυψης ράβδων οπλισμού είναι ανεπαρκές, είναι δυνατή η βελτίωση των συνθηκών μεταφοράς δυνάμεων μέσω εξωτερικής περίσφιγξης. Το αναγκαίο μήκος παράθεσης σε υφιστάμενα δομήματα επιτρέπεται να υπολογίζεται ίσο με το μήκος αγκύρωσης όπως προβλέπεται από τον EC2 (§8.4), όπου όμως οι αντοχές των υλικών εισάγονται με τις μέσες τιμές τους, χωρίς άλλους συντελεστές ασφαλείας, και χωρίς οποιονδήποτε πολλαπλασιαστικό συντελεστή υπερκάλυψης.

Σκοπός της περίσφιγξης είναι η παρεμπόδιση της πρόωρης αστοχίας της περιοχής μάτισης από διάρρηξη του περιβάλλοντος τη ράβδο σκυροδέματος, (άρα αστοχίας του μηχανισμού μεταφοράς δυνάμεων μεταξύ των ράβδων) και, τελικά, από ολίσθηση κατά μήκος της κρίσιμης ρωγμής που θα έχει δημιουργηθεί μεταξύ των ράβδων, πριν οι ράβδοι φτάσουν στη διαρροή τους. Η εξωτερική περίσφιγξη μπορεί να εξασφαλίζεται μέσω ινοπλισμένων πολυμερών. Απαραίτητη κατασκευαστική προϋπόθεση είναι η εξασφάλιση της πλήρους συνάφειας του υλικού περίσφιγξης με την επιφάνεια του

\*\* Σχέση (8.16) ΚΑΝ.ΕΠΕ.

δομικού στοιχείου. Η εξωτερική περίσφιγξη ενεργοποιείται κυρίως λόγω του περιορισμού της εγκάρσιας διόγκωσης η οποία προκαλείται από τη σχετική ολίσθηση των ματιζόμενων ράβδων.

Η σχετική ολίσθηση των ματιζόμενων ράβδων προκαλεί την εμφάνιση ρωγμής ολίσθησης, ανοίγματος «w». Το εμποδιζόμενο άνοιγμα αυτής της ρωγμής προκαλεί την ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων «σ<sub>τ</sub>» στο υλικό της εξωτερικής περίσφιγξης, οι οποίες με τη σειρά τους οδηγούν σε θλιπτικές τάσεις «σ<sub>λ</sub>» στο σκυρόδεμα, στην περιοχή των ράβδων, βελτιώνοντας τις συνθήκες συνάφειας.

Για την περίπτωση των γωνιακών ράβδων, το απαιτούμενο μέγεθος εξωτερικής περίσφιγξης επιτρέπεται να υπολογίζεται μέσω των ακόλουθων σχέσεων\*

$$\frac{A_j}{s_w d_s} = 1.3 \left[ \frac{f_{sy}}{f_c} : (2.2 \frac{s_d}{s_u} + 0.25) \frac{l_s}{d_s} - 0.2 \left( 2 \frac{c}{d_s} + 1.5 \right) \right]^2 :$$

$$: \frac{w_d}{d_s} \frac{E_j}{f_c} \frac{f_{ctm}}{f_c} \quad (6.58)$$

υπό την προϋπόθεση ότι η απαιτούμενη τάση του υλικού περίσφιγξης δεν ξεπερνά το όριο αντοχής του ΙΟΠ ( $f_u$ ), για ανεκτή ολίσθηση ράβδων  $s_d$ .  $c$  είναι η μικρότερη επικάλυψη ματιζόμενης ράβδου,  $d_s$ , είναι η μικρότερη διάμετρος από τις ματιζόμενες ράβδους. Η τιμή του λόγου  $c/d_s$  δεν απαιτείται να τίθεται μεγαλύτερη του 1.5. Αν χρησιμοποιείται συνεχές υλικό περίσφιγξης, πάχους  $t_j$  ισχύει

$$A_j / s_w = t_j \quad (6.59)$$

ενώ αν εφαρμόζεται η τεχνική με “κολάρα”,  $A_j$  και  $s_w$  είναι το εμβαδόν της διατομής περίσφιγξης και η απόσταση των “κολάρων”, αντίστοιχα.  $l_s$  είναι το μήκος μάτισης των ράβδων,  $s_u$  είναι η ολίσθηση αστοχίας των ματιζόμενων ράβδων της τάξης των 2 mm,  $s_d$  είναι η αποδεκτή σχετική ολίσθηση των ματιζόμενων ράβδων ανάλογα με τη στάθμη επιτελεστικότητας. Συγκεκριμένα, επιλέγεται 0.3mm για στάθμη επιτελεστικότητας A και 0.4mm για στάθμη επιτελεστικότητας B ή Γ. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών ( $f_c$  για σκυρόδεμα,  $f_{sy}$  για ματιζόμενες ράβδους) εισάγονται με τις διαπιστωμένες μέσες τιμές τους.

\* Σχέση (Σβ.14α) ΚΑΝ.ΕΠΕ.



Για  $s_u = 2.0$  mm οι παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί\*

$$\left(\frac{A_j}{s}\right)_{απ.} = 1.3 \left[ k_1 \frac{f_{sy}}{f_c} \frac{d_s}{l_s} - 0.4 \frac{c}{d_s} - 0.30 \right]^2 * \\ * \frac{f_c^2}{k_2 f_{ctm}} \frac{d_s^2}{E_j} \quad (6.60)$$

Με  $k_1$  συμβολίζεται ο δείκτης που εκφράζει τον αποδεκτό βαθμό βλάβης πριν απ' την αστοχία, και μπορεί να ληφθεί ίσος με 1.7 για στάθμη επιτελεστικότητας Α ή 1.5 για στάθμη επιτελεστικότητας Β ή Γ. Το  $k_2 = 0.3$  για κάθε στάθμη επιτελεστικότητας.

Αν το υλικό περίσφιγξης φτάνει στο όριο αντοχής του ( $f_u$ ) για ολίσθηση μικρότερη της ανεκτής (ανάλογα με τη στάθμη επιτελεστικότητας) ολίσθησης  $s_d$  ισχύει\*\*

$$\frac{A_j}{s_w} = \frac{12}{s_d \cdot s_u} \frac{f_{sy}^3}{f_u f_c^2} \left( \frac{d_s^2}{a_N l_s} \right)^3 \alpha_N \quad (6.61)$$

όπου  $f_u$  η μέση τιμή του ορίου θραύσης για το υλικό περίσφιγξης. Ο συντελεστής  $\alpha_N$  υπολογίζεται από τη σχέση

$$\alpha_N = \sqrt{2} (2c + 1.5d_s) \quad (6.62)$$

Η τιμή του ανοίγματος της ρωγμής,  $w_d$ , υπολογίζεται από τη σχέση

$$w_d = 0.6 s_d^{2/3} \text{ [mm]} \quad (6.63)$$

Αν δεν γίνουν ειδικότεροι έλεγχοι για την εκτίμηση της αναπτυσσόμενης τάσης του υλικού περίσφιγξης, ως  $(A_j / s)_{απ.}$  επιλέγεται η μεγαλύτερη τιμή που θα προκύψει από τις παραπάνω σχέσεις.

Για την περίπτωση ενδιάμεσων ματιζόμενων ράβδων, τα εξαιρετικά περιορισμένα διατιθέμενα στοιχεία δεν επιτρέπουν τη διατύπωση αξιόπιστου προσομοιώματος.

\* Σχέσεις (Σ8.1α) και (Σ8.1β) ΚΑΝ.ΕΠΕ.

\*\* Σχέση (Σ6.14β) ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Για μη γωνιακές ράβδους σε απόσταση μεγαλύτερη των  $3d_s$  από τη γωνία του δομικού στοιχείου, ο οπλισμός ενίσχυσης μπορεί να εκτιμηθεί θεωρούμενος ως οπλισμός συρραφής της κρίσιμης ρωγμής ολίσθησης. Η επιλογή του κατάλληλου προσομοιώματος γι' αυτή την περίπτωση και ο εξ αυτού προσδιορισμός του απαιτούμενου οπλισμού ενίσχυσης γίνεται μετά από κατάλληλη και εμπειριστατωμένη βιβλιογραφική τεκμηρίωση που θα περιλαμβάνει και έλεγχο αξιοπιστίας με διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα. Διαφορετικά, στην περίπτωση ενδιάμεσων ράβδων, η θετική επιρροή της περίσφιγξης θα αγνοείται.

Η εφαρμογή της περίσφιγξης μπορεί να εξασφαλίσει την αποφυγή αστοχίας της συνάφειας των ματιζόμενων ράβδων, εφόσον το διατιθέμενο μήκος αλληλοκάλυψης  $l_s$  είναι μεγαλύτερο από  $0.30l_{so}$  και  $15d_s$ . Διαφορετικά, αγνοείται η συμβολή της περίσφιγξης και ο τοπικός δείκτης πλαστιμότητας ( $m$ ) του στοιχείου λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα.

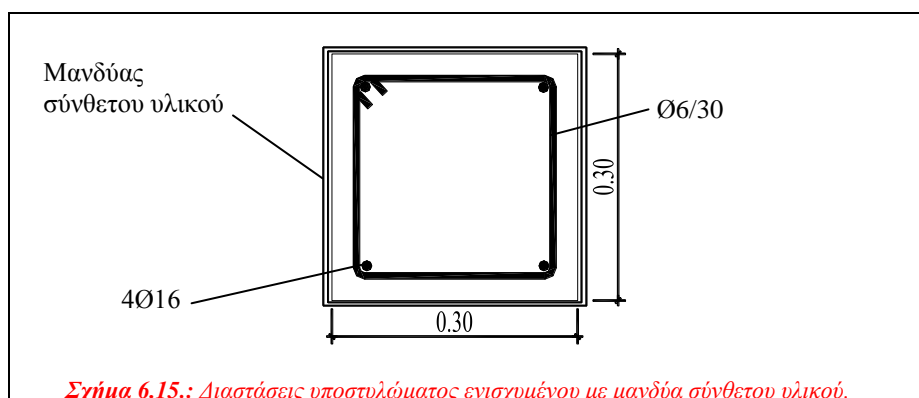
Το μήκος του στοιχείου στο οποίο εφαρμόζεται η περίσφιγξη πρέπει κατ' ελάχιστον να είναι όσο το ύψος της κρίσιμης περιοχής και όχι λιγότερο από  $1.3l_s$  ή  $0.60m$ . Το ελάχιστο μήκος περίσφιγξης προκύπτει σε συνάρτηση και με τις απαιτήσεις για πλαστιμότητα και διάτμηση στην περιοχή. Επιλέγεται εξασφαλίζοντας ότι: (α) η πλαστική άρθρωση δεν δημιουργείται αμέσως πάνω από το πέρας του στοιχείου περίσφιγξης και (β) δεν αστοχεί σε διάτμηση το απερίσφικτο τμήμα του στοιχείου.

Το ονομαστικό πάχος των ινών των ΙΟΠ πρέπει να είναι τουλάχιστον  $0.25mm$ . Αν χρησιμοποιούνται κολάρα διατομής  $A_j$  ανά αποστάσεις  $s$  οι παραπάνω τιμές αντιστοιχούν στο μέγεθος  $A_j / s$  ενώ οι αποστάσεις  $s$  δεν πρέπει να ξεπερνούν το  $0.3d$ .

#### 6.7.5 Παράδειγμα Ενίσχυσης Υποστυλώματος με Μανδύα Σύνθετων Υλικών

Θεωρούμε υποστύλωμα ορθογωνικής διατομής διαστάσεων  $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ , το οποίο πρόκειται να ενισχυθεί με μανδύα σύνθετου υλικού από ανθρακονήματα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.11, το υποστύλωμα έχει διαμήκη οπλισμό  $4\varnothing 16$ . Ο υπάρχων οπλισμός περίσφιγξης του υποστυλώματος αποτελείται από συνδετήρες  $\varnothing 6/30$  και η επικάλυψη του σκυροδέματος είναι  $c = 2\text{ cm}$ . Η χαρακτηριστική αντοχή του σκυροδέματος όπως προέκυψε μετά από εργαστηριακές δοκιμές και επί τόπου μετρήσεις είναι  $f_{ck} = 12\text{ MPa}$  και του χάλυβα  $f_{yk} = 400\text{ MPa}$ . Το πάχος μίας στρώσης ΙΟΠ είναι  $t_j = 0.17\text{ mm}$ . Επίσης, το μέτρο ελαστικότητας στην κατεύθυνση των κυρίων ινών είναι  $E_f = 240\text{ GPa}$ . Τέλος η χαρακτηριστική τιμή της παραμόρφωσης θραύσης είναι  $\varepsilon_{fuk} = 0.015$ . Ζητείται να υπολογιστεί (α) ο αριθμός των στρώσεων του μανδύα σύνθετου υλικού που απαιτούνται σε κάθε περίπτωση ώστε να επιτευχθεί αύξηση της διατμητικής αντοχής του

υποστύλωματος που θα εξασφαλιζόταν με συνδετήρες  $\varnothing 8/10$ . Επίσης να υπολογιστεί ( $\beta$ ) η αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος και ( $\gamma$ ) η αύξηση της πλαστιμότητας του στοιχείου λόγω του μανδύα σύνθετων υλικών. Το αξονικό θλιπτικό φορτίο που καταπονεί τη διατομή είναι  $N_{sd}=400$  kN. Θεωρούμε ότι η στάθμη αξιοπιστίας δεδομένων (Σ.Α.Δ.) είναι «ικανοποιητική» σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.



### 1. Αύξηση διατμητικής αντοχής υποστύλωματος κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Θεωρούμε ότι δεν υπάρχει κίνδυνος αποκόλλησης του υλικού ενίσχυσης καθώς περικλύεται πλήρως από αυτό το υποστύλωμα, και θα πραγματοποιηθεί μάστιξη των άκρων της στρώσης κατά  $l_u = 15$  cm.

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  $V_{sj}$  θα προκύψει ως η διαφορά της τέμνουσας  $V_{wd,επ} - V_{wd,υπ}$  που παραλαμβάνει ο επιθυμητός και ο υπάρχων οπλισμός διάτμησης, δηλαδή οι συνδετήρες  $\varnothing 8/10$  και  $\varnothing 6/30$ , αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τη σχέση (11.11) του ΕΚΩΣ 2000, η τέμνουσα που παραλαμβάνεται από τον οπλισμό διάτμησης της διατομής είναι

$$V_{wd} = \frac{A_{sw}}{s} 0.90 d f_{ywd} (1 + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (6.80)$$

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.

Οι συντελεστές ασφαλείας που θα χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των τιμών σχεδιασμού των υφιστάμενων υλικών, για (Σ.Α.Δ.) «ικανοποιητική» είναι  $\gamma_c = 1.50$  και  $\gamma_s = 1.15$ .

Για τους συνδετήρες  $\varnothing 8/10$ ,  $d = 30 - 2 - 0.8 - 1.6 / 2 = 26.4$  cm οπότε αντικαθιστώντας στη σχέση (6.80) προκύπτει

$$V_{wd,\varepsilon\pi} = \frac{2 \times 0.50}{10} \times 0.90 \times 26.4 \times \frac{40}{1.15} (1 + \cot 90^\circ) \sin 90^\circ = 82.64 \text{ kN}$$

Ομοίως, για τους συνδετήρες  $\varnothing 6/30$ ,  $d = 30 - 2 - 0.6 - 1.6 / 2 = 26.6$  cm οπότε

$$V_{wd,\upsilon\pi} = \frac{2 \times 0.28}{30} \times 0.90 \times 26.6 \times \frac{40}{1.15} (1 + \cot 90^\circ) \sin 90^\circ = 15.54 \text{ kN}$$

Επομένως, η τέμνουσα που πρέπει να παραλάβει ο μανδύας σύνθετων υλικών είναι

$$V_{sj} = V_{wd,\varepsilon\pi} - V_{wd,\upsilon\pi} = 82.64 - 15.54 = 67.10 \text{ kN}$$

Θεωρώντας  $\theta = 45^\circ$  και  $\alpha = 90^\circ$ , η  $V_{sj}$  υπολογίζεται από τη σχέση (6.38)

$$V_{jd} = (2 A_j / s_j) h_{j,ef} \sigma_{jd} n$$

η οποία μετά τη χρήση των σχέσεων (6.36) και (6.39) παίρνει τη μορφή

$$V_{jd} = 2 t_j (2/3) d \sigma_{jd} n$$

Για τον υπολογισμό της  $\sigma_{jd}$  χρησιμοποιούνται οι σχέσεις (6.40), (6.41) και (6.71), από τις οποίες προκύπτει

$$\sigma_{jd} = E_j k_v \varepsilon_{j,max} / \gamma_m$$

Οπότε για  $\varepsilon_{j,max} = 0.015$

$$\sigma_{jd} = 240000 \times (1/2) \times 0.015 / 1.20 = 1500 \text{ Mpa}$$

Άρα

$$n = V_{jd} / (2 t_j (2/3) d \sigma_{jd})$$

$$= 67.10 / (2 \times 0.017 \times (2/3) \times 26.6 \times 150) = 0.74 \approx 1$$

Συνεπώς μία στρώση ανθρακοϋφάσματος πάχους  $t_j = 0.17$  mm είναι επαρκής για την αύξηση της διατμητικής αντοχής του υποστύλωματος.

## 2. Αύξηση θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Σύμφωνα με την §18.4.4.2 του ΕΚΩΣ 2000, το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό του οπλισμού περίσφιξης για το τετραγωνικό υποστύλωμα του παραδείγματος δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\omega_{wd} = \frac{4 A_{sw} f_{yd}}{s b_o f_{cd}} \quad (6.81)$$

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  $\varnothing 8/10$  είναι

$$b_o = 30 - 2 \times 2 - 2 \times 0.8 - 1.6 = 22.8 \text{ cm}$$

Αντικαθιστώντας στη σχέση (6.81), το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό των συνδετήρων  $\varnothing 8/10$  είναι

$$\omega_{wd} = \frac{4 \times 0.50}{10 \times 22.8} \times \frac{400/1.15}{12/1.50} = 0.383 \geq 0.10$$

Αντίστοιχα, για τους συνδετήρες  $\varnothing 6/30$  είναι

$$b_o = 30 - 2 \times 2 - 2 \times 0.6 - 1.6 = 23.2 \text{ cm}$$

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

$$\omega_{wd} = \frac{4 \times 0.28}{30 \times 23.2} \times \frac{400/1.15}{12/1.50} = 0.071$$

Βάσει πειραματικών αποτελεσμάτων από τη βιβλιογραφία, η θλιπτική αντοχή  $f_{cc}'$  του περισφιγμένου από κλειστούς συνδετήρες σκυροδέματος υπολογίζεται από τις σχέσεις

$$f_{cc}' = (1 + 2.5 \alpha \omega_{wd}) f_c \quad \alpha \omega_{wd} < 0.10 \quad (6.82)$$

$$f_{cc}' = (1.125 + 1.25 \alpha \omega_{wd}) f_c \quad \alpha \omega_{wd} > 0.10 \quad (6.83)$$

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

$$\alpha = \alpha_n \alpha_s = (1 - 8 / 3 n) (1 - s' / 2 b_o)^2 \quad (6.84)$$

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

Για τους συνδετήρες  $\varnothing 8/10$ ,  $s' = 10 - 2 \times 0.4 = 9.2$  cm οπότε

$$\alpha = (1 - 8 / 3 \times 4) \times (1 - 9.2 / 2 \times 22.8)^2 = 0.333 \times 0.637 = 0.212$$

Επομένως

$$\alpha \omega_{wd} = 0.212 \times 0.383 = 0.0814 < 0.10$$

οπότε, σύμφωνα με τη σχέση (6.39) έχουμε

$$f_{cc}' = (1 + 2.5 \times 0.0814) f_c = 1.204 f_c$$

Για τους υπάρχοντες συνδετήρες  $\varnothing 6/30$ ,  $s' = 30 - 2 \times 0.3 = 29.4$  cm οπότε

$$\alpha = (1 - 8 / 3 \times 4) \times (1 - 29.4 / 2 \times 23.2)^2 = 0.333 \times 0.134 = 0.045$$

Επομένως

$$\alpha \omega_{wd} = 0.045 \times 0.071 = 0.0032 < 0.10$$

οπότε, σύμφωνα με τη σχέση (6.39) έχουμε

$$f_{cc}' = (1 + 2.5 \times 0.0032) f_c = 1.008 f_c$$

Η αυξημένη λόγω μανδύα σύνθετων υλικών θλιπτική αντοχή  $f_{cd,c}$  του σκυροδέματος υπολογίζεται από τη σχέση (6.6)

$$f_{cd,c} = (1.125 + 1.25 \alpha \omega_{wd}) f_{cd}$$

Ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιγξης  $\alpha$  υπολογίζεται από τις σχέσεις (6.7) – (6.12). Λόγω του ότι η επικάλυψη του σκυροδέματος είναι  $c = 2$  cm, οι ακτίνες καμπύλωσης του σύνθετου υλικού στις γωνίες του στοιχείου θα είναι  $b_p = d_p = 2$  cm. Επομένως

$$\alpha_s = 0.9$$

$$\beta = 2b_p/b_c = 2 \times 20/300 = 0.133$$

$$\gamma = 2d_p/d_c = 2 \times 20/300 = 0.133$$

$$A_c = b_c d_c = 30 \times 30 = 900 \text{ cm}^2$$

$$\alpha_n = 1 - \frac{1}{3A_c} [b_c^2(1-\beta)^2 + d_c^2(1-\gamma)^2]$$

$$= 1 - (1/(3 \times 900)) [30^2 \times (1-0.133)^2 + 30^2 \times (1-0.133)^2] =$$

$$= 0.499$$

$$\alpha = \alpha_n \alpha_s = 0.499 \times 0.9 = 0.449$$

Το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό οπλισμού  $\omega_{wd}$  υπολογίζεται από τη σχέση (6.13).

$$\omega_{wd} = (2 n t_j (b+d) / (b d))(f_{jd} / f_{cd}) =$$

$$(2 \times 1 \times 0.017 \times (30+30) / (30 \times 30)) \times ((3600/1.20) / (12/1.50)) =$$

$$= 0.85$$

Άρα από τη σχέση (6.7) προκύπτει

$$f_{cd,c}' = (1.125 + 1.25 \times 0.449 \times 0.85) f_{cd,c} = 1.602 f_{cd,c}$$

$$= 1.602 \times 1.008 f_{cd} = 1.615 f_{cd}$$

Επομένως, η συνολική αύξηση που παρέχεται στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος από τους συνδετήρες  $\varnothing 6/30$  και τη μία στρώση μανδύα σύνθετου υλικού ανθρακονημάτων είναι 61.5% και είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτήν που επιτυγχάνεται από τους συνδετήρες  $\varnothing 8/10$ , ήτοι 20%.

### 3. Αύξηση πλαστιμότητας κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Προκειμένου να υπολογιστεί η αύξηση της πλαστιμότητας λόγω του μανδύα σύνθετων υλικών πρέπει αρχικά να υπολογιστεί η πλαστιμότητα του υποστρώματος με τους υπάρχοντες συνδετήρες  $\varnothing 6/30$ .

Η παραμόρφωση αστοχίας του σκυροδέματος  $\varepsilon_{cu,c}$  λόγω περισφιγξης της διατομής από τους υπάρχοντες συνδετήρες σύμφωνα με τη σχέση (6.20) του ΚΑΝ.ΕΠΕ. είναι ίση με

$$\varepsilon_{cu,c} = 0.0035 + 0.10 \alpha \omega_{wd} = 0.0035 + 0.10 \times 0.0032 = 0.0038$$

Η μέση τιμή αντοχής του χάλυβα είναι ίση με 400 MPa ενώ για το σκυρόδεμα ισχύει η σχέση\*

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ (MPa)} \quad (6.85)$$

από όπου προκύπτει

$$f_{cm} = 12 + 8 = 20 \text{ MPa}$$

Η πλαστιμότητα σε όρους καμπυλοτήτων υπολογίζεται από τη σχέση (6.24), με την προϋπόθεση ότι  $\nu > 0.2$

$$\varepsilon_{cu,c} = 2.2 \mu_{1/r} \varepsilon_{sy} \quad \nu \geq 0,0035$$

Για τη σχέση αυτή χρησιμοποιούνται οι μέσες τιμές αντοχής του σκυροδέματος και του χάλυβα.

Οπότε

$$\varepsilon_{sy} = f_y / E_s = 400 / 200000 = 0.002$$

και

\* Σχέση (Σ2.1) ΕΚΩΣ 2000



$$v = N_{sd} / (b h f_{cm}) = 400 / (0.30 \times 0.30 \times 20000) = 0.222 > 0.2$$

Άρα

$$\mu_{1/r} = \varepsilon_{cu,c} / 2.2 \varepsilon_{sy} v = 0.0038 / (2.2 \times 0.002 \times 0.222) = 3.89$$

Η παραμόρφωση αστοχίας του περισφιγμένου σκυροδέματος με ΙΟΠ υπολογίζεται από τη σχέση (6.25)

$$\varepsilon_{cu,c} = 0.0035 (f_{cd,c}' / f_{cd,c})^2 = 0.0035 \times 1.602^2 = 0.0090$$

Η πλαστιμότητα σε όρους καμπυλοτήτων υπολογίζεται από τη σχέση (6.24)

$$\varepsilon_{cu,c} = 2.2 \mu_{1/r} \varepsilon_{sy} v \geq 0,0035$$

Άρα

$$\mu_{1/r} = 0.0090 / (2.2 \times 0.002 \times 0.222) = 9.21$$

Είναι προφανής η ουσιαστική αύξηση της πλαστιμότητας με την προσθήκη του ΙΟΠ.

#### 6.7.6 Παράδειγμα Αποκατάστασης Ανεπαρκών Μηκών Παράθεσης Ράβδων Οπλισμού Υποστρώματος με Μανδύα Σύνθετων Υλικών

Θεωρούμε το υποστύλωμα του προηγούμενου παραδείγματος. Επίσης, θεωρούμε διατιθέμενο μήκος μάτισης 35cm. Να υπολογιστεί το απαιτούμενο πάχος του σύνθετου υλικού προκειμένου να αποφευχθεί η ολίσθηση της μάτισης. Θεωρούμε στάθμη επιτελεστικότητας Β.

Η μέση τιμή αντοχής του χάλυβα είναι ίση με 400 MPa ενώ για το σκυρόδεμα ισχύει η σχέση\*

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ (MPa)} \quad (6.86)$$

\* Σχέση (Σ2.1) ΕΚΩΣ 2000

από όπου προκύπτει

$$f_{cm} = 12 + 8 = 20 \text{ MPa}$$

Για στάθμη επιτελεστικότητας B προκύπτουν οι τιμές  $k_1 = 1.5$ ,  $s_d = 0.4$  mm. Το απαιτούμενο πάχος του σύνθετου υλικού για  $s_u = 2.0$  mm υπολογίζεται από τις σχέσεις (6.58), (6.60) και (6.61)

$$\frac{A_j}{s_w d_s} = 1.3 \left[ \frac{f_{sy}}{f_c} : (2.2 \frac{s_d}{s_u} + 0.25) \frac{l_s}{d_s} - 0.2 \left( 2 \frac{c}{d_s} + 1.5 \right) \right]^2 : \frac{w_d}{d_s} \frac{E_j}{f_c} \frac{f_{ctm}}{f_c}$$

$$= 1.3 \times 16 \times \left[ (400/20) : (2.2 \times 0.4/2.0 + 0.25) \times 350/16 - 0.2 \times (2 \times 20/16 + 1.5) \right]^2 : (0.32573 \times 240000 \times 1.60 / (16 \times 20 \times 20)) = 0.293 \text{ mm}$$

με

$$w_d = 0.6 s_d^{2/3} = 0.6 \times 0.4^{2/3} = 0.32573$$

ή

$$\left( \frac{A_j}{s} \right)_{\alpha\pi.} = 1.3 \left[ k_1 \frac{f_{sy}}{f_c} \frac{d_s}{l_s} - 0.4 \frac{c}{d_s} - 0.30 \right]^2 \times \frac{f_c^2}{k_2 f_{ctm}} \frac{d_s^2}{E_j}$$

$$= 1.3 \times \left[ 1.5 \times (400/20) \times (16/350) - 0.4 \times (20/16) - 0.30 \right]^2 \times (20^2 \times 16^2 / (0.3 \times 1.60 \times 240000)) = 0.377 \text{ mm}$$

ή

$$\left( \frac{A_j}{s_w} \right)_{\alpha\pi.} = \frac{12}{s_d / s_u} \frac{f_{sy}^3}{f_u f_c^2} \left( \frac{d_s^2}{a_N l_s} \right)^3 \alpha_N$$

$$= (12 / (0.4 / 2.0)) \times (400^3 / (3500 \times 20^2)) \times (16^2 / (90.510 \times 350))^3 \times 90.510$$

$$= 0.131 \text{ mm}$$

με

$$\alpha_N = \sqrt{2} (2c + 1.5d_s) = \sqrt{2} \times (2 \times 20 + 1.5 \times 16) = 90.510 \text{ mm}$$