

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ
ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ –
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΡΟΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ Η/Υ**



ΕΙΣΗΓΗΤΕΣ-ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ:

Δρ. ΔΙΟΝΥΣΙΑ – ΠΗΝΕΛΟΠΗ ΚΟΝΤΟΝΗ

Αναπλ. Καθηγήτρια Τ.Ε.Ι.

Δρ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΜΠΑΡΟΣ

Πανεπ. Υπότροφος Τ.Ε.Ι.

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:

ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ, Α.Μ. 4361

ΜΑΣΤΡΑΝΤΩΝΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, Α.Μ. 4635

ΣΚΑΡΠΙΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ, Α.Μ. 4706

ΠΑΤΡΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2014

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία εξετάζει την χρήση των ινοπλισμένων πολυμερών (Fiber Reinforced Polymers, FRPs) στην ενίσχυση βάθρων γεφυρών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η ενίσχυση των γεφυρών αποτελεί μια πρόκληση για τον μελετητή πολιτικό μηχανικό και μια δύσκολη υπόθεση για τον κατασκευαστή μηχανικό, καθώς πρόκειται για μια κατασκευή με ποικίλα δομικά μέλη που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Η προσομοίωση της αλληλεπίδρασης αυτής σε επίπεδο μελέτης κατά την αρχική κατασκευή της γέφυρας είναι από μόνη της μια απαιτητική εργασία που προϋποθέτει εμπειρία και ισχυρά υπολογιστικά συστήματα, συνεπώς η μελέτη και ο σχεδιασμός της ενίσχυσης υφιστάμενων γεφυρών που πρέπει να λάβουν υπόψη επιπρόσθετους παράγοντες αποτελεί μια πρόκληση. Το γεγονός ότι οι γέφυρες αποτελούν μεγάλα έργα με κύκλο ζωής μεγαλύτερο των εκατό ετών καταδεικνύει πως σε περίπτωση βλαβών τους λόγω σεισμού δεν υπάρχει η ευχέρεια και κατεδαφιστούν και να κατασκευαστούν εκ νέου. Συνεπώς η επιλογή της ενίσχυσής τους καθίσταται μονόδρομος. Στον σκοπό αυτό η χρήση των ινοπλισμένων πολυμερών παρέχει μια ελκυστική και ταυτόχρονα εργονομική λύση που καλύπτει τις ανάγκες επισκευής και ενίσχυσης, παραμένοντας κατά το δυνατόν οικονομική.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΗΡΙΑ

Οι συντάκτες της παρούσης Πτυχιακής Εργασίας επιθυμούν να ευχαριστήσουν τους επιβλέποντες καθηγητές, Δρ. Διονυσία–Πηνελόπη Κοντονή, Αν. Καθηγήτρια, και Δρ. Δημήτριο Μπάρο, Πανεπιστημιακό Υπότροφο, του Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας για την παροχή της απαραίτητης βιβλιογραφίας και οδηγιών, την καθοδήγηση και την κριτική ανάγνωση και τα πολύτιμα σχόλια επί του τελικού κειμένου.

Πάτρα, Οκτώβριος 2014
Αντωνόπουλος Δημήτριος
Μαστραντώνης Κωνσταντίνος
Σκάρπος Αλέξανδρος

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι καταστροφικοί σεισμοί ανά την υφήλιο δημιούργησαν την επιτακτική ανάγκη αναβάθμισης της φέρουσας ικανότητας υφιστάμενων κατασκευών που σχεδιαστήκαν στη βάση παλαιών ή και ανεπαρκών αντισεισμικών κωδικών/ή κανονισμών. Επίσης, οι αυξανόμενες λειτουργικές ανάγκες των υπαρχουσών κατασκευών καθιστούν αναγκαία την αναβάθμιση αυτών. Για τους λόγους αυτούς, το πεδίο των ενισχύσεων και των επισκευών κατασκευών έχει αρχίσει να απασχολεί σε σημαντικό βαθμό τον τεχνικό κόσμο της χώρας.

Τα τελευταία 20 περίπου χρόνια έχει αναπτυχθεί μια νέα τεχνική ενίσχυσης που βασίζεται στη χρήση προηγμένων υλικών, τα οποία αποτελούνται από ίνες εγκιβωτισμένες σε μήτρα εποξειδικής ρητίνης. Τα υλικά αυτά, γνωστά ως ινοπλισμένα πολυμερή (FPP – Fiber Reinforced Polymers) χαρακτηρίζονται από εξαιρετικές ιδιότητες, που κάνουν την εφαρμογή τους στα τεχνικά έργα, και ιδιαίτερα στο πεδίο των επισκευών και των ενισχύσεων, ιδιαίτερα ελκυστική. Η εφαρμογή τους ως οπλισμός ενίσχυσης στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος συνίσταται στην επικόλλησή τους σε εξωτερικές δομικές επιφάνειες μελών μέσω εποξειδικών ρητινών, με προσανατολισμό ινών τέτοιον ώστε να παραλαμβάνουν εφελκυστικές δυνάμεις.

Αντικείμενο και σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να παρουσιάσει τη χρήση των FRPs στον τομέα των ενισχύσεων και επισκευών υφιστάμενων γεφυρών οπλισμένου σκυροδέματος, και συγκεκριμένα των βάρθρων τους.

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας αναφέρονται γενικά στοιχεία για την παθολογία γεφυρών από οπλισμένο σκυρόδεμα, και συγκεκριμένα απαριθμούνται οι πιθανές βλάβες που μπορούν να υποστούν τα δομικά μέλη τους καθώς και οι πιθανές αιτίες πρόκλησής τους και οι επιπτώσεις τους στη λειτουργία της γέφυρας. Στο δεύτερο κεφάλαιο απαριθμούνται οι τρόποι επέμβασης σε υφιστάμενες γέφυρες που αποσκοπούν στην επισκευή και ενίσχυση αυτών. Στους τρόπους αυτούς περιλαμβάνονται οι επεμβάσεις με εξωτερικούς μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος, η χρήση χαλύβδινων κλωβών καθώς και η χρήση ινοπλισμένων πολυμερών. Για καθέναν από τους δύο τρόπους τους αναφέρονται οι αρχές εφαρμογής τους και αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται λεπτομερώς η χρήση των ινοπλισμένων πολυμερών στον τομέα των επεμβάσεων για λόγους ενίσχυσης και επισκευής. Περιγράφονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών και οι αρχές της ενίσχυσης σε κάμψη, διάτμηση και περίσφιγξη μέσω αναλυτικών σχέσεων. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται αποτελέσματα προδιαστασιολόγησης επεμβάσεων σε βάρθρα γεφυρών με χρήση κατάλληλου λογισμικού. Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο απαριθμούνται τα συμπεράσματα της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σελίδα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΓΕΦΥΡΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	1
1.1 Εισαγωγικά στοιχεία.....	1
1.2 Δομικό σύστημα γεφυρών.....	1
1.3 Πιθανές βλάβες δομικού συστήματος γεφυρών.....	3
1.3.1 Βλάβες στα ακρόβαθρα.....	3
1.3.2 Βλάβες στα μεσόβαθρα.....	7
1.3.3 Βλάβες στο κατάστρωμα.....	10
1.3.4 Βλάβες στους πτερυγότοιχους.....	11
1.4 Ενδεικτικές περιπτώσεις βλαβών σε γέφυρες από τη βιβλιογραφία.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ....	17
2.1 Γενικές αρχές.....	17
2.2 Βασικές μέθοδοι ενίσχυσης και επισκευής βάθρων γεφυρών	20
2.2.1 Γενικά.....	20
2.2.2 Προσαρμογή μεταλλικών μανδύων.....	20
2.2.3 Μανδύες Οπλισμένου Σκυροδέματος.....	22
2.2.4 Μανδύες από σύνθετα υλικά.....	23
2.3 Αρχές σχεδιασμού των επεμβάσεων σε βάθρα γεφυρών.....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΧΡΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ.....	31
3.1 Εισαγωγή.....	31
3.2 Σύνθεση των Ινοπλισμένων Πολυμερών	32
3.2.1 Ίνες.....	32
3.2.2 Μήτρα.....	37
3.2.3 Κόλλα.....	39
3.3 Μηχανικές ιδιότητες σύνθετων υλικών.....	40
3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της εφαρμογής των συνθέτων υλικών σε επεμβάσεις	42
3.5 Εφαρμογή των συνθέτων υλικών για την καμπτική ενίσχυση στοιχείων σκυροδέματος	44
3.6 Εφαρμογή των συνθέτων υλικών για την διατμητική ενίσχυση στοιχείων σκυροδέματος.....	45
3.7 Εφαρμογή περίσφιξης με μανδύες σύνθετων υλικών.....	46
3.8 Διαδικασίες παρασκευής και εφαρμογής των σύνθετων υλικών σε επεμβάσεις.....	54

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΡΟΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΣΕ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΕΦΥΡΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Η/Υ	58
4.1 Εισαγωγικά στοιχεία.....	58
4.2 Προδιαστασιολόγηση διατμητικής ενίσχυσης δομικών στοιχείων γεφυρών.....	59
3.4 Προδιαστασιολόγηση επεμβάσεων για την περίσφιγξη βάθρων γεφυρών	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	70
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	72

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΓΕΦΥΡΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

1.1 Εισαγωγικά στοιχεία.

Η ανάγκη για πιθανές επεμβάσεις σε γέφυρες με στόχο την αναβάθμιση της φέρουσας ικανότητάς τους σχετίζεται με την καταπόνησή που υφίστανται από τις διάφορες φορτίσεις κατά τη λειτουργία τους σε συνδυασμό με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των επιμέρους δομικών στοιχείων τους. Συνεπώς, στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας αυτής κρίνεται σκόπιμο να δοθούν αρχικά γενικές πληροφορίες για το δομικό σύστημα των γεφυρών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα (Ο/Σ) και τις σημαντικότερες βλάβες που εμφανίζονται σε τέτοιου είδους κατασκευές.

1.2 Δομικό σύστημα γεφυρών.

Τα επιμέρους στοιχεία του φορέα μιας γέφυρας των γεφυρών διακρίνονται σε αυτά που ανήκουν «υποδομή» της και σε αυτά της «ανωδομής». Η υποδομή περιλαμβάνει **τα βάθρα** (ακροβάθρα και μεσόβθρα, Εικ. 1.1), τους τυχόν **τοιίχους αντιστήριξης** στα ακροβάθρα, **έργα μετάβασης** στην οδό (πλάκες πρόσβασης κ.α.) και τέλος τη **θεμελίωση**. Η ανωδομή περιλαμβάνει το **φορέα καταστρώματος** (Εικ. 1.2), το **κατάστρωμα κυκλοφορίας**, τα τυχόν **εφέδρανα** στήριξης του φορέα στα βάθρα και διάφορα άλλα στοιχεία χωρίς δομικό ρόλο (πεζοδρόμια, κιγκλιδώματά τους, στηθαία ασφαλείας στα πεζοδρόμια, διαχωριστικά στηθαία κλάδων κυκλοφορίας, οδόστρωμα και τυχόν μόνωση φορέα καταστρώματος, αρμούς διαστολής, αποχετεύσεις ομβρίων, στύλους φωτισμού, διελεύσεις αγωγών, κ.α). Κάποια από τα ανωτέρω διάφορα στοιχεία, ιδίως το οδόστρωμα με τη μόνωση κ.α., καλούνται και «**επιδομή**» της γέφυρας. Στις σιδηροδρομικές γέφυρες, αντί οδοστρώματος υπάρχουν ως «**επιδομή**» οι στρωτήρες, το έρμα και οι σιδηροτροχιές.



Εικόνα 1.1 Κιβωτιόσχημο ακρόβαθρο (αριστερά) και μεσόβθρα γέφυρας μέσω των οποίων γίνεται προβολοδόμηση (δεξιά) [3].

Όταν η πρόσβαση στη γέφυρα γίνεται με επίχωμα, το ακρόβαθρο αποτελείται από ένα τοίχο αντιστήριξης κάθετο στον άξονα της γέφυρας, που συνεχίζεται δεξιά και αριστερά σε

δύο άλλους τοίχους αντιστήριξης για τον εγκιβωτισμό του επιχώματος, είτε παράλληλους στον άξονα της γέφυρας (οπότε καλούνται τοίχοι αντεπιστροφής), είτε λοξούς (που καλούνται απλώς πτερυγότοιχοι, Εικ. 1.2).



Εικόνα 1.2 Συνήθης πτερυγότοιχος στήριξης ακρόβαθρου (αριστερά) και κατάστρωμα γέφυρας απεικονιζόμενο από την κάτω πλευρά του (δεξιά) [3].

Αν ο φορέας καταστρώματος στηρίζεται στο ακρόβαθρο με εφέδρανα (διαφορετικά μπορεί να συνδέεται μονολιθικά με το ακρόβαθρο), τότε το ακρόβαθρο συνεχίζεται προς τα πάνω μέχρι την επιφάνεια της οδού πρόσβασης πίσω από το φορέα καταστρώματος, σχηματίζοντας ένα μικρό και λεπτότερο τοίχο αντιστήριξης που λέγεται *θωράκιο*. Στόχος του θωρακίου είναι να προστατεύσει τα εφέδρανα από το επίχωμα. Συνήθως υπάρχει θωράκιο και δεξιά και αριστερά από το φορέα καταστρώματος, παράλληλα στον άξονα της γέφυρας, έτσι ώστε να σχηματίζεται σε κάτοψη ένα Π, μέσα στο οποίο εισχωρεί ο φορέας καταστρώματος.

Αν το ακρόβαθρο δεν συνδέεται μονολιθικά με το φορέα καταστρώματος, τότε μεταξύ θωρακίων αφενός και πλάκας καταστρώματος/οδοστρώματος αφετέρου τοποθετείται ο αρμός διαστολής (επειδή οι αρμοί προκαλούν όχληση στην κυκλοφορία, τοποθετούνται πλέον μόνο στα άκρα της γέφυρας, στα ακρόβαθρα). Συχνά κάτω από το οδόστρωμα της οδού πρόσβασης τοποθετείται η λεγόμενη «πλάκα πρόσβασης», η οποία είναι πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος πάνω από το επίχωμα, που στηρίζεται σε πατούρα του θωρακίου ή του ακροβάθρου και έχει στόχο την εξομάλυνση διαφορετικών καθιζήσεων του ακροβάθρου και του επιχώματος, ώστε αυτές να μην εκδηλωθούν με τη μορφή αναβαθμού στον αρμό μεταξύ ακροβάθρων και επιχώματος. Η πλάκα πρόσβασης έχει πλάτος όσο το κατάστρωμα και μήκος (κατά τον άξονα της γέφυρας) λίγων μέτρων.

Σε αστικές περιοχές τα πεζοδρόμια έχουν πλάτος 2m έως 2.5m και εκτός αστικών περιοχών 0.5m έως 1m. Αν το κράσπεδο που τα χωρίζει από το οδόστρωμα είναι χαμηλό (λιγότερο από 0.15-0.2m), χρειάζεται να τοποθετηθεί και χαμηλό στηθαίο ασφαλείας (συνήθως χαλύβδινο), για την προστασία των πεζών αλλά και την αποφυγή πτώσης των οχημάτων. Γενικά το οδόστρωμα αποτελείται από σχετικά λεπτό ασφαλτοτάπητα και φύλλο μόνωσης (ανάλογα με το υλικό της μόνωσης μπορεί να χρειάζεται και τσιμεντοκονία προστασίας). Αν η πάνω επιφάνεια του οδοστρώματος δεν έχει κλίση εγκάρσια ή κατά μήκος λόγω της χάραξης, η πάνω επιφάνεια της πλάκας καταστρώματος διαμορφώνεται με

εγκάρσιες κλίσεις προς τα πεζοδρόμια για την απορροή των ομβρίων. Έτσι αποφεύγεται η επιβάρυνση της ανωδομής με υλικό ρήσεων κάτω από τον ασφαλτοτάπητα.

1.3 Πιθανές βλάβες του δομικού συστήματος των γεφυρών.

Οι φθορές που παρατηρούνται στα διάφορα δομικά μέλη των γεφυρών οπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να έχουν διάφορες αιτίες, οι συνηθέστερες εκ των οποίων είναι [8]:

- (α) **Σεισμικά γεγονότα.** Ο σεισμός ανάλογα με την ένταση και το μέγεθός του μπορεί να προκαλέσει σοβαρές βλάβες σε διάφορα μέλη του δομικού συστήματος μιας γέφυρας.
- (β) **Κακή κατασκευή / σχεδιασμός.** Οι πιθανές κακοτεχνίες που έχουν συμβεί κατά τη διάρκεια κατασκευής μιας γέφυρας, όπως πχ η λανθασμένη τοποθέτηση οπλισμών και η δημιουργία λανθασμένων διατομών, μπορούν να προκαλέσουν βλάβες και φθορές κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της γέφυρας.
- (γ) **Έλλειψη γνώσης κατά τη μελέτη.** Πολλές υφιστάμενες ανά τον κόσμο γέφυρες έχουν κατασκευαστεί με Κανονισμούς που πλέον έχουν πάψει να ισχύουν, ως συνέπεια της προόδου στον τομέα του Αντισεισμικού Σχεδιασμού Κατασκευών.
- (δ) **Περιβαλλοντικές επιδράσεις / ατυχήματα.** Ο χρόνος, οι περιβαλλοντικές συνθήκες, η ελλιπής συντήρηση και οι τυχηματικές δράσεις είναι πιθανοί λόγοι εμφάνισης φθορών.
- (ε) **Χρήση.** Ένα από τα βασικά φορτία σχεδιασμού μιας γέφυρας είναι ο κυκλοφοριακός φόρτος, ο οποίος όμως δεν παραμένει σταθερός στη διάρκεια ζωής της γέφυρας αλλά αυξάνεται συνεχώς ως άμεσο επακόλουθο της ανάπτυξης της τεχνολογίας και των μεταφορών.

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά οι πιθανές μορφές βλαβών και φθορών που μπορούν να εμφανιστούν στα διάφορα δομικά στοιχεία μιας γέφυρας.

1.3.1 Βλάβες στα ακρόβαθρα

Το ακρόβαθρο δεν λειτουργεί μόνο ως στήριξη του φορέα της γέφυρας, αλλά και ως τοίχος αντιστήριξης, αναλαμβάνοντας τις ωθήσεις που προέρχονται από το επίχωμα και, συνεπώς, αναλαμβάνοντας μεγάλα φορτία. Οι πιο συχνά παρατηρούμενες βλάβες στα ακρόβαθρα προέρχονται από την κατακόρυφη, την οριζόντια μετακίνηση ή τη στροφική μετακίνησή τους. Αυτού του είδους οι βλάβες, ακόμα και αν δεν επηρεάσουν τη στατική ακεραιότητα του φορέα, κατά κανόνα καθιστούν τη γέφυρα μη προσιτή.

Η **κατακόρυφη μετακίνηση** (Εικ. 1.3α) του ακρόβαθρου διακρίνεται σε ομοιόμορφη ή διαφορική. Η ομοιόμορφη κατακόρυφη μετακίνηση έχει μικρή επίδραση στην κατασκευή. Έχουν παρατηρηθεί τέτοιου είδους μετακινήσεις μέχρι 0.30 m χωρίς να οδηγούν σε σημαντικά προβλήματα στην ανωδομή. Οι επιπτώσεις των διαφορικών καθιζήσεων είναι σαφώς πιο σοβαρές από αυτές των ομοιομόρφων. Διαφορικές καθιζήσεις ανάμεσα στα ακρόβαθρα και τα μεσόβαθρα της γέφυρας μπορούν να προκαλέσουν βλάβες ανάλογα με το μέγεθος των σχετικών μετατοπίσεων, του μήκους του ανοίγματος και του δομικού τύπου της γέφυρας. Μπορούν επίσης να συμβούν τόσο κατά μήκος όσο και κατά πλάτος του ακρόβαθρου, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει άνοιγμα του αρμού (Εικ. 1.4) ανάμεσα στο

ακρόβαθρο και τον περυγότοιχο ή να οδηγήσει σε ρηγμάτωση του βάθρου. Η κατακόρυφη μετακίνηση του ακρόβαθρου μπορεί να οφείλεται σε [7]:

- (α) Απώλεια της φέρουσας ικανότητας του εδάφους
- (β) Ρευστοποίηση του εδάφους (Εικ. 1.2β)
- (γ) Υποσκαφή
- (δ) Διάβρωση του υλικού της θεμελίωσης του ακρόβαθρου
- (ε) Κακή εκτίμηση στη γεωτεχνική μελέτη του μέτρου ελαστικότητας των επιφανειακών στρώσεων του εδάφους.



Εικόνα 1.3 Παρατηρούμενη καθίζηση ακρόβαθρου (αριστερά) και αστοχία ακρόβαθρου λόγω ρευστοποίησης εδάφους θεμελίωσης (δεξιά) [7].

Σε μερικά ακρόβαθρα που είναι κατασκευασμένα με επιφανειακές θεμελιώσεις, οι οριζόντιες δυνάμεις που ασκούνται, υπερβαίνουν τις δυνάμεις τριβής που τα σταθεροποιούν και έτσι δημιουργείται η *οριζόντια* (πλευρική) μετακίνηση των ακροβάθρων. Οι αιτίες που δημιουργούν την οριζόντια μετακίνηση είναι [7]:

- (α) Αστοχία του πρανούς
- (β) Αλλαγές στα χαρακτηριστικά του εδάφους
- (γ) Το φαινόμενο της στερεοποίησης.



Εικόνα 1.4 Παρατηρούμενη διάνοιξη αρμού λόγω μετακίνησης του ακροβάθρου [3].

Η **στροφική μετακίνηση** των ακροβάθρων οφείλεται κυρίως στις μη συμμετρικές καθιζήσεις του εδάφους και στις πλευρικές μετακινήσεις λόγω οριζόντιων εδαφικών δυνάμεων. Οι αιτίες που δημιουργούν την στροφική μετακίνηση των ακροβάθρων είναι [3]:

- (α) Η υποσκαφή
- (β) Ο κορεσμός του πρσανούς
- (γ) Η απώλεια της φέρουσας ικανότητας του εδάφους
- (δ) Η διάβρωση του πρσανούς στις πλευρές των ακροβάθρων

Η **υποσκαφή** (Εικ. 1.5) είναι η διάβρωση του εδάφους, λόγω της ορμητικής ροής νερού ή εκτεταμένων αμμοληπιών, στα θεμέλια της γέφυρας, γύρω και κάτω από τα ακρόβαθρα και τα βάθρα. Ουσιαστικά πρόκειται για απομάκρυνση εδαφικού υλικού ή ακόμα και βράχου περιμετρικά και κάτω από τη θεμελίωση του βάθρου της γέφυρας λόγω της ροής του νερού. Ο κίνδυνος για υποσκαφή είναι υπαρκτός καθ' όλη την διάρκεια του χρόνου αλλά κυρίως θ είναι εντονότερος την χειμερινή περίοδο ή σε περιόδους πλημμυρών, όπου οι βροχοπτώσεις είναι εντονότερες, τα νερά πιο ορμητικά και η στάθμη υψηλότερη. Σε μερικές περιπτώσεις, η υποσκαφή οδήγησε σε αστοχίες γεφυρών που, σε κάποιες περιπτώσεις, προκάλεσαν σημαντικές απώλειες σε ανθρώπινες ζωές. Χαρακτηριστικά, στις ΗΠΑ το 60% των καταρρεύσεων γεφυρών από το 1961 ως το 1991 οφείλεται σε υποσκαφή [3].



Εικόνα 1.5 Υποσκαφή σε ακρόβαθρο [3].

Η παρουσία νερού στην περιοχή του ακρόβαθρου μπορεί να προκαλέσει περαιτέρω φθορές και βλάβες (Εικ 1.6). Το νερό που υπάρχει στο έδαφος πίσω από το ακρόβαθρο διαφεύγει από το σύστημα αποστράγγισης του ακροβάθρου. Οι οπές του συστήματος από διάφορες αιτίες βουλώνουν, όπως για παράδειγμα από φωλιές ζώων. Το νερό που «εγκλωβίζεται» πίσω από το ακρόβαθρο ασκεί πιέσεις σε αυτό με αποτέλεσμα να δημιουργούνται προβλήματα. Οι πιέσεις αυτές ενδέχεται να οδηγήσουν στην πλευρική μετακίνηση του ακροβάθρου. Επίσης το νερό που «κυκλοφορεί» στις οπές αποστράγγισης μπορεί να προκαλέσει διάβρωση του σκυροδέματος στο σημείο εκείνο.



Εικόνα 1.6 Ρωγμές στον κορμό του ακρόβαθρου (αριστερά) και κίνδυνος για διάβρωση λόγω μη στεγανότητας του αρμού του ακροβάθρου (δεξιά) [3].

Οι *φθορές σκυροδέματος* που μπορεί να δημιουργηθούν σε ένα ακρόβαθρο από Ο/Σ είναι ρηγμάτωση, αποφλοιώση, διάβρωση οπλισμού, θραύση, και αποκάλυψη οπλισμών. Όλες οι παραπάνω φθορές μπορεί να συνδεθούν μεταξύ τους. Δηλαδή αν ο οπλισμός του

ακρόβαθρου είναι κοντά στην επιφάνεια και δεν συντηρηθεί σωστά το ακρόβαθρο, θα ακολουθήσει η διάβρωσή του και στη συνέχεια η αποφλοίωση του σκυροδέματος. Η ρηγματώση μπορεί να δημιουργηθεί από πολλές αιτίες, όπως για παράδειγμα από συστολή - διαστολή του σκυροδέματος κατά την σκυροδέτηση, ή από την οξείδωση του οπλισμού κ.α.. Οι γυμνοί οπλισμοί μπορεί να υπάρχουν είτε από λάθος στο καλούπωμα ή από κάποια πρόσκρουση οχήματος.

Τέλος, πέραν των παραπάνω αναφερόμενων, πιθανές αιτίες πρόκλησης βλαβών στα ακρόβαθρα μιας γέφυρας είναι και οι παρακάτω :

- (α) Πρόωρη διακοπή των σωλήνων αποχέτευσης της γέφυρας με συνέπεια τη μη εξασφάλιση της ομαλής απορροής του ύδατος με αποτέλεσμα το νερό να διαβρέχει το σκυρόδεμα και να το φθείρει.
- (β) Διαρροή ύδατος από την περιοχή των αρμών, η οποία μπορεί να προκαλέσει διάβρωση του σκυροδέματος του ακρόβαθρου (Εικ. 1.7α)
- (γ) Κάθιση της οδού πρόσβασης όταν η συμπίκνωση του πρανούς είναι μικρότερη από την αναμενόμενη.
- (δ) Όταν η συμπίκνωση του πρανούς είναι μεγαλύτερη από την αναμενόμενη, τότε είναι πιθανή η ρηγματώση του σκυροδέματος του ακρόβαθρου εξαιτίας του περιορισμού της μετακίνησης.
- (ε) Πρόκληση προβλήματος από του μικρού εύρους ελεύθερες αποστάσεις κατά την εγκάρσια έννοια του φορέα ανάμεσα στις προεντεταμένες πλακοδοκούς και τους αντίστοιχους σεισμικούς συνδέσμους
- (στ) Διάβρωση του πρανούς στο ακρόβαθρο (Εικ. 1.7β).



Εικόνα 1.7 Διάβρωση σκυροδέματος στην περιοχή στραγγιστηρίων (αριστερά) και διάβρωση πρανούς στήριξης ακροβάθρου (δεξιά) [3].

1.3.2 Βλάβες στα μεσόβαθρα.

Η βασικότερη βλάβη που μπορεί να συμβεί στα μεσόβαθρα είναι η σημαντική απώλεια αντοχής λόγω αποσάθρωσης του σκυροδέματος και αστοχίας του οπλισμού των βάθρων. Ανάλογα με τη γεωμετρία του βάθρου, οι βλάβες μπορεί να είναι καμπτικού ή διατμητικού τύπου όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες (Εικ. 1.8).



Εικόνα 1.8 Αστοχία καμπτικού τύπου (αριστερά) και αστοχία διατμητικού τύπου (δεξιά) [7].

Άλλη σημαντική βλάβη που μπορεί να αναπτυχθεί στα μεσόβαθρα είναι η κατακόρυφη μετακίνηση (Εικ. 1.9), η οποία οφείλεται συνήθως στην καθίζηση του εδάφους. Οι κύριες αιτίες, όπως και στην περίπτωση της κατακόρυφης μετατόπισης των ακροβάθρων, είναι οι εξής [7]:

- (α) η απώλεια της φέρουσας ικανότητας του εδάφους,
- (β) η στερεοποίηση του αργιλικού εδάφους,
- (γ) η υποσκαφή και
- (δ) η ρευστοποίηση πολύ χαλαρού αμμώδους εδάφους.



Εικόνα 1.9 Αστοχία γέφυρας λόγω κατακόρυφης μετακίνησης μεσοβάθρου (αριστερά) και αστοχία λόγω απώλειας στήριξης στο μεσόβαθρο (δεξιά) [7].

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε μεσόβαθρα που θεμελιώνονται στην κοίτη ποταμών το φαινόμενο της υποσκαφής ενδέχεται να είναι εντονότερο σε σχέση με τα ακρόβαθρα, επειδή τα βαθιά τρεχούμενα νερά στην περιοχή αυτή έχουν μεγαλύτερη ορμή, επηρεάζοντας ανάλογα τις εδαφικές στρώσεις (Εικ. 1.10, 1.11).



Εικόνα 1.10 Υποσκαφή στην περιοχή μεσοβάθρου που εκδηλώθηκε ως απομάκρυνση του περιβάλλοντος εδάφους θεμελίωσης [3].



Εικόνα 1.11 Απώλεια φέρουσας ικανότητας μεσοβάθρου λόγω υποσκαφής και τελική κατάρρευση γέφυρας [3].

Τέλος, πιθανές βλάβες στα μεσόβαθρα μπορεί να προκληθούν και από στρωφικές ή οριζόντιες μετακινήσεις του φορέα της γέφυρας μετά από σεισμό ή, πιο σπάνια, μετά από την πρόσκρουση διερχόμενου βαρέως οχήματος στα μεσόβαθρα (Εικ. 1.12).



Εικόνα 1.12 Βλάβη μεσοβάθρου λόγω πρόσκρουσης οχήματος [3].

1.3.3 Βλάβες στο κατάστρωμα.

Οι βλάβες που μπορεί να παρατηρηθούν στο κατάστρωμα μιας γέφυρας ενδέχεται να οφείλονται είτε σε βλάβες άλλων δομικών μερών της, όπως π.χ. η ρηγμάτωση του καταστρώματος λόγω κατακόρυφης μετακίνησης του ακρόβαθρου (Εικ. 1.13)



Εικόνα 1.13 Ρηγμάτωση στο κατάστρωμα (στην στρώση της ασφάλτου) λόγω καθίζησης ακροβάθρου [3].

Άλλες πιθανές αιτίες βλαβών του καταστρώματος είναι η αύξηση των κατακορύφων φορτίων που φέρει (σπάνια περίπτωση, συνήθως οφείλεται και στην υποεκτίμηση των φορτίων αυτών κατά το σχεδιασμό) και η διάβρωση του οπλισμού (χαλαρού ή τενόντων προέντασης) λόγω ελλιπούς συντήρησης (Εικ. 1.14).



Εικόνα 1.14 Διαβρωμένοι τένοντες σε κατάστρωμα γέφυρας (αριστερά) και χαλαροί οπλισμοί σε δοκό του φορέα ανωδομής γέφυρας (δεξιά) [3].

1.3.4 Βλάβες στους πτερυγότοιχους

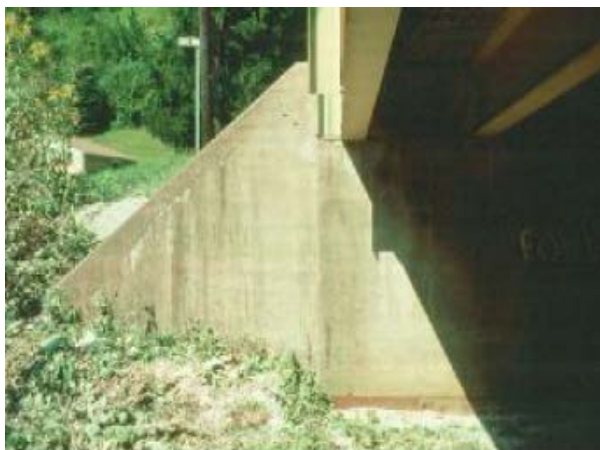
Οι πτερυγότοιχοι είναι στην ουσία οι προεκτάσεις των ακροβάθρων με τη διαφορά ότι δεν μεταβιβάζονται σε αυτούς οι κατακόρυφες δυνάμεις από το κατάστρωμα. Συνεπώς, οι οι βλάβες που παρατηρούνται σε αυτούς είναι παρόμοιες με αυτές των ακροβάθρων και, συγκεκριμένα, διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- (α) Κατακόρυφη μετακίνηση
- (β) Οριζόντια μετακίνηση
- (γ) Στροφική μετακίνηση
- (δ) Φθορά υλικού (ρωγμές, διάβρωση κλπ., Εικ. 1.15)
- (ε) Προβληματική αποστράγγιση
- (ε) Διάβρωση ερείσματος του δρόμου πίσω από το ακρόβαθρο (Εικ. 1.15).

1.4 Ενδεικτικές περιπτώσεις βλαβών σε γέφυρες από τη βιβλιογραφία.

Γέφυρα αυτοκινητοδρόμου 115 (Highway 115) στο Οντάριο, Καναδάς [4].

Ο αυτοκινητόδρομος 115 είναι ένας πολυσύχναστος δρόμος τεσσάρων λωρίδων κυκλοφορίας στο Τορόντο του Καναδά, νοτιοδυτικά του Peterborough. Το Υπουργείο Μεταφορών του Καναδά ανέλαβε το χειμώνα του 2011 ένα σχέδιο συντήρησης μεγάλου τμήματος του αυτοκινητόδρομου, στο οποίο περιλαμβάνονταν και η ενίσχυση και συνολική επισκευή των γεφυρών του αυτοκινητόδρομου. Κατά τη διάρκεια των επιθεωρήσεων παρατηρήθηκαν στις γέφυρες βλάβες στα μεσόβαθρα λόγω διάβρωσης η οποία προκλήθηκε από διαρροές νερού μολυσμένου με χλωριόντα στους αρμούς διαστολής του καταστρώματος.



Εικόνα 1.15 Ρωγμές σε περυγότοιχο γέφυρας (αριστερά) και διάβρωση επιχώματος στα ανάντη περυγότοιχου (δεξιά) [3].

Επίσης παρατηρήθηκαν βλάβες στα καλώδια προέντασης στις περιοχές αγκύρωσής τους και στις δοκούς του καταστρώματος λόγω πρόσκρουσης οχημάτων στα μέλη του φορέα (Εικ. 1.16, 1.17).

Βλάβες σε γέφυρες κατά το σεισμό του Northridge, 1994, Καλιφόρνια [5]

Ο σεισμός που χτύπησε το 1994 την περιοχή του του Northridge της Καλιφόρνια προκάλεσε σοβαρές αστοχίες σε δομικά μέλη γεφυρών. Χαρακτηριστικές οι περιπτώσεις βάρων γεφυρών οπλισμένου σκυροδέματος που απεικονίζονται στις παρακάτω φωτογραφίες (Εικ. 1.18).



Εικόνα 1.16 Βλάβες λόγω διάβρωσης του οπλισμού στην κεφαλή του μεσοβάθρου (αριστερά) και κατεστραμμένοι τένοντες προέντασης (δεξιά) της γέφυρας του αυτοκινητοδρόμου 115 στο Οντάριο του Καναδά [4].



Εικόνα 1.17 Βλάβη σε δοκό του καταστρώματος της γέφυρας του αυτοκινητοδρόμου 115 στο Οντάριο του Καναδά [4].



Εικόνα 1.18 Σύγκριση της σεισμικής συμπεριφοράς ενισχυμένου και μη ενισχυμένου βάθρου μετά το σεισμό του Northridge, California - άθικτο μεσόβαθρο ενισχυμένο με μεταλλικό κλωβό στη ράμπα της γέφυρας Cadillac Avenue, Santa Monica Freeway (αριστερά) και ολική μεσόβαθρου της γέφυρας Bull Creek στον αυτοκινητόδρομο 118 [5].

Στη μια περίπτωση φαίνεται ένα βάθρο του ανοδικού κλάδου πρόσβασης του αυτοκινητοδρόμου στο Cadillac Avenue το οποίο είχε ενισχυθεί προσεισμικά με μεταλλικό μανδύα και, όπως φαίνεται, δεν εμφάνισε καμία απολύτως βλάβη. Αντίθετα, στη δεύτερη

περίπτωση παρουσιάζεται η καθολική αστοχία του μεσόβαθρου της γέφυρας Bull Creek, η οποία είχε χτιστεί το 1976 και δεν είχε συντηρηθεί έκτοτε, λόγω λυγισμού των διαμήκων ράβδων εξαιτίας της ανεπαρκούς «ποσότητας» εγκάρσιου οπλισμού (συνδετήρων) που συνεπάγεται ελλιπή περίσφιγξη του σκυροδέματος και έλλειμμα διατμητικής αντοχής του στοιχείου.

Βλάβες στη γέφυρα του χείμαρρου Ζηλιάνα της Ε.Ο. Αθηνών – Θεσσαλονίκη [6].

Στις 28-11-1998 και ενώ επικρατούσαν άσχημες καιρικές συνθήκες για διάστημα αρκετών ημερών στην περιοχή του Πλαταμώνα Πιερίας, κατέρρευσε η γέφυρα στον χείμαρρο Ζηλιάνα, στη Χ/Θ 410+500 της Ν.Ε.Ο. Α/Θ, κοντά στα Διόδια Πλαταμώνα. Η καταστροφή της γέφυρας συνέβη μετά από υποσκαφή των θεμελίων των ακροβάθρων ενός τμήματός της κάτω από ένα συνδυασμό δυσμενών και εν πολλοίς απρόβλεπτων συνθηκών. Η κατάρρευση εκδηλώθηκε με την δημιουργία μεγάλης οπής στο οδόστρωμα, μπροστά ακριβώς από κινούμενο φορτηγό όχημα, που πρόλαβε να τροχοπεδήσει και να οπισθοχωρήσει. Μέσα σε διάστημα ωρών ολοκληρώθηκε η πλήρης καταστροφή της γέφυρας με αποτέλεσμα την προσωρινή αποκοπή της συγκοινωνίας Αθηνών-Θεσσαλονίκης (Εικ. 1.19). Ανάντη και κατάντη της γέφυρας που κατέρρευσε κατασκευάζονταν δύο νέες γέφυρες του Αυτοκινητοδρόμου Αθηνών – Θεσσαλονίκης.



Εικόνα 1.19 Η Γέφυρα Ζηλιάνα μετά την καταστροφή - η κυκλοφορία έχει εκτραπεί στην υπό κατασκευή γέφυρα του δεξιού κλάδου του αυτοκινητοδρόμου Αθηνών – Θεσσαλονίκης [6].

Το κύριο αίτιο που προκάλεσε την κατάρρευση της γέφυρας ήταν η υποσκαφή, δηλαδή η παράσυρση και μεταφορά του εδάφους το οποίο περίβαλε και επί του οποίου εδράζονταν τα

θεμέλιά της μέχρι στάθμης 1,00 έως 2,00 μέτρων, βαθύτερα της στάθμης έδρασης. Εξαιτίας της υποσκαφής τα βάθρα υπέστησαν σημαντική καθίζηση και στροφή, με αποτέλεσμα οι φορείς, οι οποίοι εδράζονταν ισοστατικά πάνω στα βάθρα, να καταρρεύσουν και να θραυστούν (Εικ. 1.20). Το πρόβλημα εκτιμάται ότι παρουσιάστηκε πρώτα στην πλακοσκεπή γέφυρα, στους τοίχους που συγκρατούσαν το μεταβατικό επίχωμα μεταξύ των δύο γεφυρών, που καταστράφηκαν. Τούτο αποδίδεται στο γεγονός ότι κατά το πρώτο αυτό στάδιο και πριν από την έναρξη των διαδοχικών αστοχιών που ακολούθησαν, ικανό τμήμα της παροχής παροχετευόταν με ορμή, μεγάλη ταχύτητα και στροβιλισμό δια του τεχνικού προσβάλλοντας και υποσκάπτοντας το έδαφος. Η διαμορφωθείσα κατάσταση επιβαρυνόταν από τον ιδιαίτερα δυσμενή - ως προς την ανάπτυξη μεγάλου βάθους υποσκαφής - προσανατολισμό των παράλληλων προς την οδό τοίχων που συγκρατούσαν το επίχωμα, οι οποίοι εκτιμάται ότι μετακινήθηκαν πρώτοι. Στη συνέχεια το πρόβλημα φαίνεται ότι επεκτάθηκε και στα βάθρα της αμφιπροέχουσας παλαιάς γέφυρας, τα οποία επίσης υποσκάφθηκαν και μετακινήθηκαν. Της κατάρρευσης προηγήθηκε ιδιαίτερα έντονη και μεγάλης διάρκειας βροχόπτωση η οποία είχε ως επακόλουθη συνέπεια να αυξηθεί σημαντικά η παροχή του χειμάρρου. Η αυξημένη παροχή, σε συνδυασμό με την κατά μήκος κλίση που επίσης αυξήθηκε μετά την καταστροφή των κατάντη αναβαθμών και με την στένωση, την οποία παρουσίαζε το εύρος της κοίτης στη θέση των γεφυρών, είχαν ως αποτέλεσμα να αναπτυχθούν πολύ υψηλές ταχύτητες στη ροή του νερού του χειμάρρου. Το γεγονός αυτό, είχε ως επόμενη συνέπεια, όταν η ταχύτητα ξεπέρασε μία κρίσιμη τιμή και η συρτική δύναμη αντίστοιχα ξεπέρασε τη σχετική αντίσταση του εδάφους, να ξεκινήσει η υποσκαφή.



Εικόνα 1.20 Μετατόπιση και στροφή των βάρων της αμφιπροέχουσας γέφυρας Ζηλιάνια οφειλόμενη σε υποσκαφή [6].

Ιδιαίτερη σημασία στην κατάρρευση είχε το μικρό βάθος στο οποίο εδράζονταν χωρίς πασσάλους τα θεμέλια των βάθρων της γέφυρας και του τεχνικού που κατέρρευσε, όπως και των τοίχων που περιόριζαν το επίχωμα. Είναι πολύ πιθανό σε περιπτώσεις των διαδοχικών πλημμυρικών περιστατικών (αλλά και άλλων) να προκλήθηκαν στο παρελθόν, από το χρόνο κατασκευής της γέφυρας (περί το 1960) μέχρι το χρόνο κατάρρευσης, διαδοχικές υποσκαφές, αλλά και αποθέσεις, οι οποίες διαφοροποίησαν το αρχικό βάθος θεμελίωσης στο ανεπαρκές βάθος, το οποίο υπήρχε κατά το χρόνο της κατάρρευσης.

Συμπερασματικά, το πολύ γνωστό αυτό γεγονός κατάρρευσης οδικής γέφυρας στην Ελλάδα οφείλεται σε αστοχία της θεμελίωσης, σε αντίθεση με τις διεθνείς εμπειρίες που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Είναι σαφές ότι οι τεχνικές επέμβασης με σύνθετα υλικά που αποτελούν το θέμα της εργασίας αυτής αφορούν την αποκατάσταση ή πρόληψη βλαβών σε δομικά μέλη του φορέα. Η μελέτη των επεμβάσεων στη θεμελίωση των τεχνικών έργων αυτών δεν αποτελεί στόχο της πτυχιακής εργασίας αυτής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ

2.1 Γενικές αρχές.

Ο γενικός στόχος της διαδικασίας ενίσχυσης ή επισκευής μιας κατασκευής είναι η αναβάθμιση της σεισμικής ικανότητάς της ή η αποκατάσταση των βλαβών που παρουσιάζονται στα δομικά μέρη της είτε λόγω σεισμικών γεγονότων είτε λόγω μακροχρόνιων επιδράσεων.

Εστιάζοντας στις βλάβες από σεισμικά γεγονότα, επισημαίνεται ότι όταν επισκευάζεται μία κατασκευή πρέπει να επιδιώκεται η αποκατάσταση του βαθμού αντισεισμικής ασφάλειας, που είχε πριν από το γεγονός, και ενδεχομένως η αύξηση της ασφάλειας αυτής, αν κριθεί ότι η κατασκευή δεν ήταν εξ' αρχής ασφαλής. Ο σκοπός αυτός επιτυγχάνεται με την αποκατάσταση ή και την αύξηση της ικανότητας της κατασκευής να απορροφήσει τη σεισμική ενέργεια και να την καταναίμει στον φέροντα οργανισμό του. Δευτερευόντως, και κυρίως για λόγους ψυχολογικούς, αλλά και αισθητικούς, πρέπει να επισκευάζονται οι ρωγμές και οι εμφανείς ζημιές που δεν επηρεάζουν κατ' ανάγκη την ασφάλεια της κατασκευής ώστε να ανακτάται πλήρως η λειτουργικότητά της.

Η στρατηγική των επεμβάσεων είναι η βασική προσέγγιση που υιοθετείται για τη βελτίωση της σεισμικής συμπεριφοράς μίας κατασκευής ή διαφορετικά για τη μείωση της διακινδύνευσης σε αποδεκτά όρια [7]. Για τη μείωση της σεισμικής διακινδύνευσης, μπορούν να εφαρμοστούν στρατηγικές είτε καθαρά τεχνικής είτε διαχειριστικής φύσης. Στην πρώτη κατηγορία περιλαμβάνονται επιλογές, όπως η αύξηση της αντοχής και της δυσκαμψίας του κτιρίου, η αύξηση της ικανότητας παραμόρφωσης και η μείωση της σεισμικής απαίτησης. Αντίστοιχα, στη δεύτερη κατηγορία ανήκει μεταξύ άλλων η πιθανή αλλαγή χρήσης, η προοδευτική εφαρμογή των επεμβάσεων και η λήψη προσωρινών μέτρων ενίσχυσης. Το εύρος των τεχνικών και των διαχειριστικών στρατηγικών που μπορούν να εφαρμοστούν για τη μείωση της σεισμικής διακινδύνευσης μίας υφιστάμενης κατασκευής είναι εξαιρετικά μεγάλο. Οι τεχνικές στρατηγικές αποτελούν προσεγγίσεις που στοχεύουν στη μεταβολή των βασικών παραμέτρων τόσο της σεισμικής απαίτησης όσο και της συμπεριφοράς του κτιρίου για το σεισμό σχεδιασμού. Περιλαμβάνουν επεμβάσεις στο φέροντα οργανισμό για τη διόρθωση ενδεχόμενων ατελειών, στην αύξηση της αντοχής και της δυσκαμψίας της κατασκευής, στην αύξηση της ικανότητας ανάληψης παραμορφώσεων, στην αύξηση της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας και στη μείωση της σεισμικής απαίτησης.

Οι γέφυρες συγκεκριμένα αποτελούν ογκώδεις κατασκευές με αρκετές απαιτήσεις όσον αφορά στην συντήρησή τους και τη διατήρησή τους σε καλή κατάσταση. Επίσης αποτελούν σύμβολα του επιπέδου εξυπηρέτησης των υποδομών μιας χώρας, συνεπώς πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στην επισκευή τους όταν παρουσιαστούν βλάβες αλλά και στην ενίσχυσή τους. Πέρα από τις αυστηρές απαιτήσεις αντισεισμικού σχεδιασμού των νέων γεφυρών, που έχουν επιβληθεί από τους σύγχρονους κανονισμούς και τη θεαματική αύξηση της επιστημονικής γνώσης πάνω στο αντικείμενο αυτό, εξαιρετικά σημαντικό είναι και το θέμα του προσεισμικού ελέγχου και αναβάθμισης των υφιστάμενων γεφυρών έτσι ώστε να

ανταποκρίνονται στις σύγχρονες ανάγκες σεισμικής προστασίας. Η εμπειρία έχει δείξει ότι πολλές φορές η αστοχία μίας γέφυρας μπορεί να προληφθεί με σχετικά απλές και μη δαπανηρές επεμβάσεις, αρκεί να έχει επισημανθεί το αδύνατο σημείο προ του σεισμού. Σε χώρες με προηγμένο τεχνολογικό επίπεδο και μεγάλα σεισμικά προβλήματα, όπως οι ΗΠΑ, η Ιαπωνία και η Νέα Ζηλανδία, έχουν ήδη γίνει σημαντικά βήματα προς αυτή την κατεύθυνση. Στην Ελλάδα, όπως άλλωστε και σε πολλές άλλες χώρες, η συγκεκριμένη προσπάθεια βρίσκεται ακόμα στο ξεκίνημα, αν και πρόσφατα έχουν γίνει κάποιες ενέργειες προς αυτή την κατεύθυνση [7]. Οι μέθοδοι προσεισμικού ελέγχου στοχεύουν στον εντοπισμό των γεφυρών που πρέπει να αξιολογηθούν λεπτομερώς και να εξεταστεί η πιθανότητα σεισμικής τους ενίσχυσης κατά προτεραιότητα. Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη για την ταξινόμηση αυτή είναι οι ακόλουθες [7].

- (α) Δομική τρωτότητα
- (β) Σπουδαιότητα
- (γ) Σεισμική επικινδυνότητα
- (δ) Εδαφικά χαρακτηριστικά
- (ε) Κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες

Η πλήρης διαδικασία περιλαμβάνει τον υπολογισμό των παρακάτω δεικτών [7]:

- (α) του **δείκτη δομικής τρωτότητας**, που είναι συνάρτηση της τρωτότητας των εφεδράνων, σεισμικών συνδέσμων, εδράσεων, μεσόβαθρων, ακρόβαθρων και ρευστοποίησης εδάφους, αλλά και της χρονολογίας μελέτης και της γενικής κατάστασης της γέφυρας,
- (β) του **δείκτη σπουδαιότητας** που εξαρτάται από διάφορες συγκοινωνιακές παραμέτρους, τις απώλειες ανθρώπινων ζωών και τις οικονομικές ζημιές που θα προκύψουν από ενδεχόμενη κατάρρευση της γέφυρας, τη στρατηγική σημασία της γέφυρας και τις συνέπειες από την αστοχία δικτύων (ύδρευσης, αποχέτευσης, φυσικού αερίου, κτλ.) που διέρχονται πάνω από τη γέφυρα στην περίπτωση υπερβολικής σεισμικής μετακίνησης του φορέα,
- (γ) του **δείκτη σεισμικής επικινδυνότητας**, που είναι συνάρτηση εδαφικών παραμέτρων, όπως αυτές ορίζονται στον αντίστοιχο αντισεισμικό κανονισμό κάθε χώρας,
- (δ) του **δείκτη σεισμικής τρωτότητας** της γέφυρας, που υπολογίζεται με βάση τους παραπάνω δείκτες,
- (ε) τη θεώρηση κοινωνικοοικονομικών παραγόντων για την εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων όσον αφορά στην προτεραιότητα σεισμικής ενίσχυσης κάθε γέφυρας. Τα κοινωνικοοικονομικά κριτήρια καθορίζονται από τις αρμόδιες κρατικές αρχές σε συνεργασία με τους παράγοντες της τοπικής αυτοδιοίκησης.

Με βάση την εξέταση των παραγόντων αυτών προσδιορίζεται ο βαθμός προτεραιότητας για περαιτέρω έλεγχο και ενδεχόμενη σεισμική ενίσχυση της εξεταζόμενης γέφυρας. Στην περίπτωση που οι δείκτες δομικής και σεισμικής τρωτότητας υπερβαίνουν συγκεκριμένες τιμές, απαιτείται περαιτέρω έλεγχος της γέφυρας που σκοπό έχει την ορθολογικότερη και με βάση πληρέστερα στοιχεία διερεύνηση της δομικής τρωτότητας του

έργου. Από τη διερεύνηση αυτή θα προκύψει η αναγκαιότητα εκπόνησης ειδικής μελέτης ελέγχου σεισμικής επάρκειας και ενίσχυσης της γέφυρας.

Σε γενικές γραμμές υπάρχουν δύο θεμελιώδεις αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν πριν την έναρξη της διαδικασίας σεισμικής ενίσχυσης μίας γέφυρας [7]. Η πρώτη, με βάση τα αποτελέσματα του προσεισμικού ελέγχου που πρέπει να έχει προηγηθεί, αφορά στο αν η υπολογισμένη πιθανότητα βλαβών ή αστοχίας της υπόψιν γέφυρας δικαιολογεί βάσιμα την ενίσχυση. Η απόφαση αυτή κατά κανόνα εξαρτάται από τη σύγκριση με άλλες γέφυρες για τις οποίες εξετάζεται η περίπτωση της σεισμικής ενίσχυσης (διαδικασία που ονομάζεται βαθμονόμηση), αλλά και από τους διαθέσιμους οικονομικούς πόρους. Αφού ληφθεί η απόφαση για την ενίσχυση, η δεύτερη απόφαση αφορά στο επίπεδο στο οποίο η γέφυρα πρέπει να ενισχυθεί. Θεωρητικά, η απόφαση πρέπει να βασίζεται σε οικονομικοτεχνική ανάλυση. Είναι πιθανό, π.χ. η σεισμική τρωτότητα να μειώνεται σημαντικά με αύξηση του μήκους έδρασης στις θέσεις των αρμών. Η πρόσθετη μείωση της τρωτότητας με πλήρη ενίσχυση της γέφυρας, η οποία περιλαμβάνει ενίσχυση των βάθρων, της θεμελίωσης και πιθανόν της ανωδομής, μπορεί να είναι μικρή και να επιτυγχάνεται μόνο με σημαντική αύξηση του κόστους. Με βάση τα παραπάνω μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η πιθανότητα υπέρβασης της οριακής κατάστασης αστοχίας πρέπει να είναι η ίδια για μία ενισχυμένη και μία νέα γέφυρα. Μπορούμε ωστόσο να δεχτούμε, με βάση την οικονομικοτεχνική ανάλυση, ότι οι ενισχυμένες κατασκευές πρέπει να έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα ικανοποίησης της στάθμης «σχεδόν πλήρους λειτουργικότητας» κατά τη διάρκεια και μετά το σεισμό σχεδιασμού σε σχέση με τις νέες κατασκευές. Έτσι, η φιλοσοφία των ενισχύσεων γεφυρών έχει αλλάξει τα τελευταία χρόνια, κυρίως στην Καλιφόρνια όπου και υπάρχουν οι περισσότερες εφαρμογές σεισμικά ενισχυμένων γεφυρών. Συγκεκριμένα, μετά το σεισμό του 1971 στο San Fernando, το Υπουργείο Συγκοινωνιών της Καλιφόρνια (CALTRANS) ξεκίνησε ένα πρόγραμμα ενισχύσεων που περιλάμβανε την τοποθέτηση σεισμικών συνδέσμων (restrainers) κατά μήκος των αρμών της ανωδομής μεγάλου αριθμού γεφυρών για μείωση της πιθανότητας απώλειας στήριξης. Σχεδόν ταυτόχρονα παρόμοιες ενέργειες ξεκίνησαν και στην Ιαπωνία. Παρόλο που δεν ήταν αποτέλεσμα οικονομικοτεχνικής ανάλυσης, επρόκειτο για μία προσπάθεια μείωσης της σεισμικής τρωτότητας με το μικρότερο δυνατό κόστος, αν και ήταν σαφές ότι η σεισμική τρωτότητα δεν είχε μειωθεί σε επίπεδα αποδεκτά για το σχεδιασμό νέων κατασκευών. Μετά την αστοχία πολλών γεφυρών με σεισμικούς συνδέσμους κατά τη διάρκεια των σεισμών του 1987 στο Whittier Narrows, του 1989 στη Loma Prieta και του 1994 στο Northridge, το CALTRANS απαιτεί οι σεισμικές ενισχύσεις γεφυρών να παρέχουν προστασία έναντι της οριακής κατάστασης αστοχίας με βάση τους σεισμούς σχεδιασμού των νέων γεφυρών.

Σε κάθε περίπτωση, εφόσον η μελέτη ενίσχυσης βασίζεται σε εμπεριστατωμένη ανάλυση και όχι σε γενικούς εμπειρικούς κανόνες, είναι συγκριτικά ακριβέστερος ο σχεδιασμός για ένα συγκεκριμένο επίπεδο σεισμικής τρωτότητας, ανεξάρτητα με το αν αυτό αντιστοιχεί στο επίπεδο σεισμικής δράσης μίας νέας γέφυρας ή κάποιο χαμηλότερο.

2.2 Βασικές μέθοδοι ενίσχυσης και επισκευής βάθρων γεφυρών.

2.2.1 Γενικά.

Όπως αναφέρεται και στην εισαγωγή της εργασίας αυτής, τα βάθρα από οπλισμένο σκυρόδεμα ενδέχεται να εμφανίσουν βλάβες λόγω ανεπάρκειας της καμπτικής τους αντοχής, της διατμητικής τους αντοχής ή της πλαστιμότητάς τους. Για τις δύο τελευταίες περιπτώσεις στις οποίες εστιάζει η πτυχιακή εργασία, οι κύριες διαθέσιμες μέθοδοι επέμβασης είναι:

- (α) η προσαρμογή μεταλλικών μανδύων,
- (β) η κατασκευή μανδύων από οπλισμένο σκυρόδεμα (επιτυγχάνεται και αύξηση της καμπτικής αντοχής),
- (γ) η χρήση μανδύων από σύνθετα υλικά (ινοπλισμένα πολυμερή σε εποξική βάση)

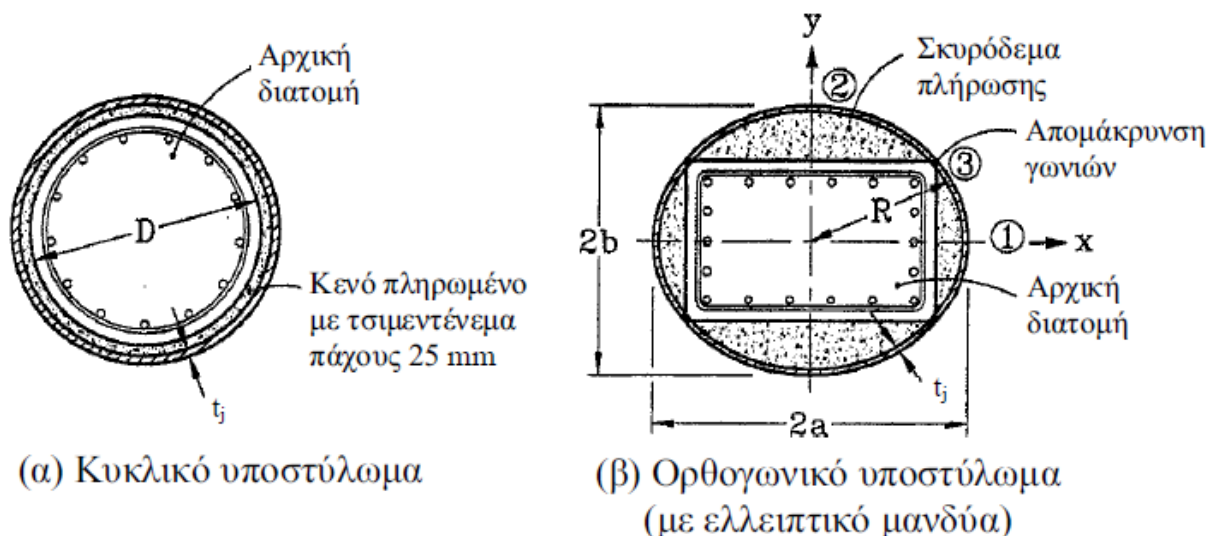
Από τις παραπάνω, οι πλέον διαδεδομένες μέθοδοι ενίσχυσης που εφαρμόζονται σήμερα είναι η προσαρμογή μεταλλικών μανδύων ή μανδύων από σύνθετα υλικά, ενώ σε μικρότερο βαθμό γίνονται ενισχύσεις βάθρων με μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος.

2.2.2 Προσαρμογή μεταλλικών μανδύων [7].

Η διαδικασία αναπτύχθηκε αρχικά για υποστυλώματα με κυκλική διατομή. Δύο κελύφη από μεταλλικό έλασμα με ημικυλινδρική μορφή και ακτίνα από 12.5 έως 25 mm μεγαλύτερη από την ακτίνα του υποστυλώματος, τοποθετούνται πάνω από την περιοχή που πρέπει να ενισχυθεί και συγκολλούνται επιτόπου με συνεχή ραφή, έτσι ώστε να σχηματίσουν σωλήνα, μεταξύ του οποίου και του υποστυλώματος υπάρχει μικρό δακτυλιοειδές κενό. Το κενό πληρώνεται με τσιμεντένεμα, αφού ξεπλυθεί με νερό. Συνήθως, ένα διάστημα περίπου 50 mm αφήνεται μεταξύ του μανδύα και της κεφαλής ή του θεμελίου του βάθρου, έτσι ώστε να αποφευχθεί η πιθανότητα δράσης του μανδύα ως θλιβόμενου οπλισμού που μπορεί να ασκήσει πίεση στο θεμέλιο ή στην κεφαλή για μεγάλες γωνίες στροφής. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η υπερβολική αύξηση της καμπτικής αντοχής στην περιοχή σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης, η οποία θα μπορούσε να έχει ως αποτέλεσμα αυξήσεις στα εντατικά μεγέθη (ροπές και τέμνουσες) που μεταβιβάζονται στα θεμέλια και στις κεφαλές των βάθρων κάτω από σεισμική φόρτιση.

Ο μεταλλικός μανδύας είναι αποτελεσματικός στην ανάπτυξη παθητικής περίσφιγξης στο σκυρόδεμα του υποστυλώματος. Συγκεκριμένα, καθώς το σκυρόδεμα προσπαθεί να διογκωθεί πλευρικά, στη μεν θλιβόμενη ζώνη λόγω υψηλών αξονικών θλιπτικών παραμορφώσεων, στη δε εφελκυσόμενη ζώνη λόγω διαστολής των συνδέσεων οπλισμού με παράθεση που σηματοδοτούν την έναρξη αστοχίας των συνδέσεων, πλευρικές τάσεις περίσφιγξης ασκούνται στο σκυρόδεμα από τον εύκαμπτο μανδύα. Το επίπεδο περίσφιγξης εξαρτάται από την αντοχή και τη δυσκαμψία του μεταλλικού μανδύα. Με παρόμοιο τρόπο ο μανδύας δρα αποτρεπτικά στην πλευρική διόγκωση του υποστυλώματος που σχετίζεται με την ανάπτυξη διαγώνιων διατμητικών ρωγμών. Και στις δύο περιπτώσεις – περίσφιγξη περιοχών σχηματισμού καμπτικών αρθρώσεων και ενδεχόμενων διατμητικών αστοχιών – ο μανδύας μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμος με επάλληλες στρώσεις κυκλικών συνδετήρων (ή

σπειροειδούς οπλισμού). Οι λεπτομέρειες εφαρμογής μεταλλικού μανδύα φαίνονται στο Σχήμα 2.1 σε ένα κυκλικό και ένα ορθογωνικό υποστύλωμα.

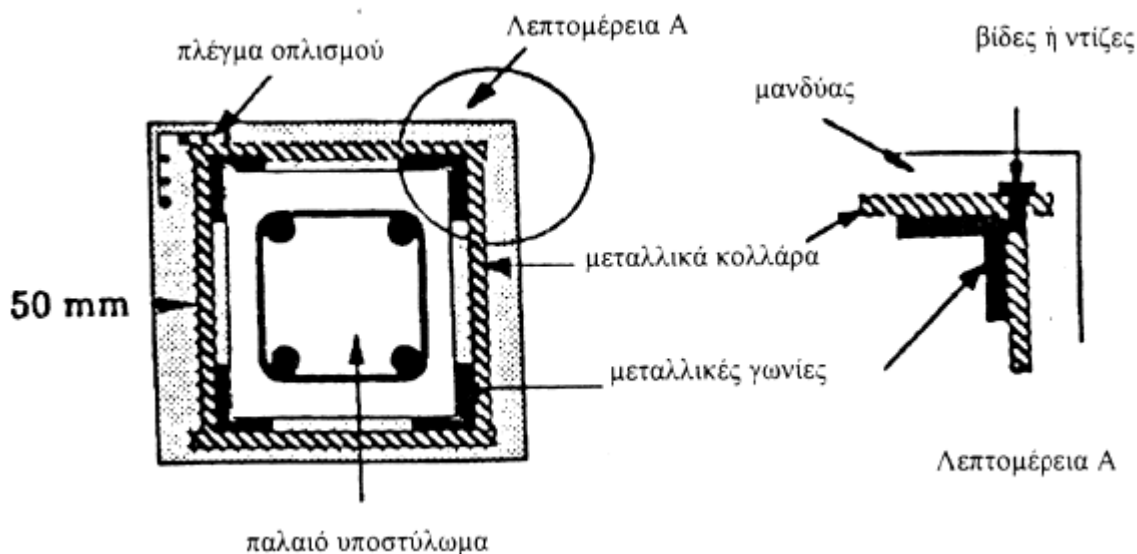


Σχήμα 2.1 Ενίσχυση κυκλικού και ορθογωνικού υποστύλωματος με μεταλλικό μανδύα [7].

Σε υποστύλωματα ορθογωνικής διατομής, συνιστάται η χρήση του κυκλικού μανδύα, με τη διαφορά ότι η τάση που αναπτύσσεται ποικίλει κατά μήκος της περιφέρειας λόγω της συνεχούς μεταβολής της καμπυλότητας του μανδύα. Το κενό μεταξύ του μανδύα και του υποστύλωματος πληρώνεται με έγχυτο σκυρόδεμα και όχι με τσιμεντένεμα.

Παρόμοια τεχνική με την ενίσχυση με μεταλλικό μανδύα είναι και η αυτή του μεταλλικού κλωβού, κατά την οποία τέσσερα μεταλλικά γωνιακά ελάσματα προσαρμόζονται στις γωνίες του υποστύλωματος και οριζόντια μεταλλικά ελάσματα (τύπου «κολλάρου») ή ράβδοι από δομικό χάλυβα συγκολλούνται πάνω στα γωνιακά. Πριν γίνει η συγκόλληση προηγείται σύσφιγξη των γωνιακών με ειδικά κλειδιά ή γίνεται προθέρμανση του οριζόντιου οπλισμού σε θερμοκρασία 200 – 400 ° C, έτσι ώστε να δημιουργηθεί περίσφιγξη με τη συστολή που επέρχεται όταν γίνει απόψυξη. Εναλλακτικά αντί για συγκόλληση μπορεί να χρησιμοποιηθούν βίδες ή ντίζες όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Τα κενά που δημιουργούνται στην επαφή του μεταλλικού κλωβού και του σκυροδέματος συμπληρώνονται με ένα μη συρρικνούμενο κονίαμα ή εποξειδική κόλα. Η τελική επιφάνεια μπορεί να δημιουργηθεί με μία ισχυρή τσιμεντοκονία οπλισμένη με ένα ελαφρύ πλέγμα ενώ δεν είναι απαραίτητη η χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Το πλεονέκτημα της τεχνικής του μεταλλικού κλωβού είναι η δυνατότητα μεταφοράς ενός τμήματος των κατακόρυφων φορτίων του υποστύλωματος. Σε συνδυασμό μάλιστα με την ταχύτητα με την οποία μπορεί να εφαρμοστεί η τεχνική αυτή σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, η τεχνική αποτελεί κατάλληλη προσωρινή λύση άμεσης ανάληψης κατακόρυφων φορτίων σε στοιχεία που υπέστησαν βλάβες και αδυνατούν να μεταφέρουν τα αξονικά τους φορτία.



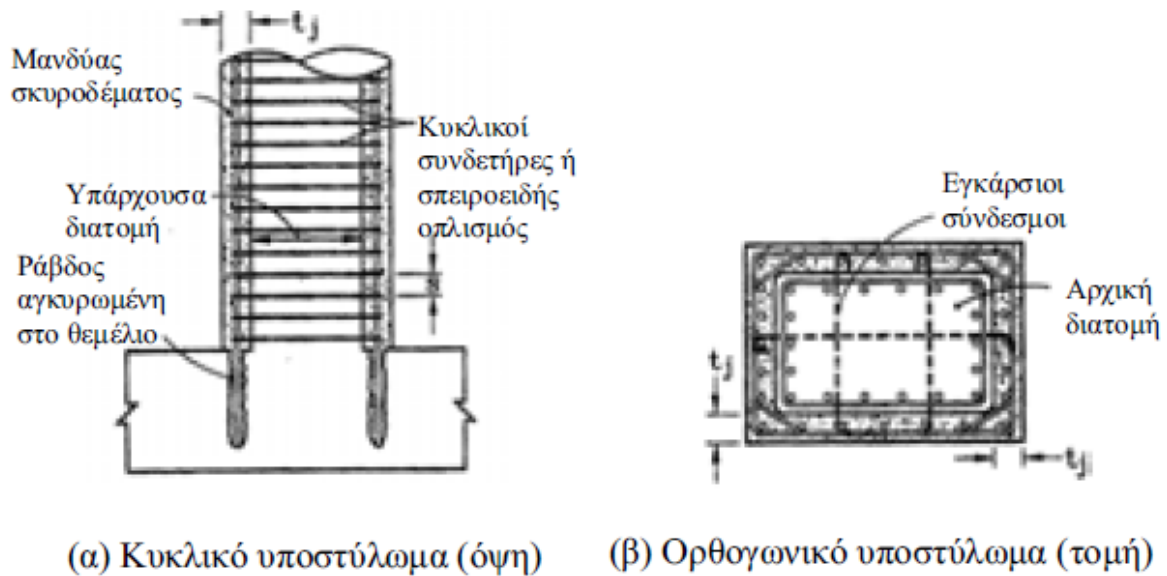
Σχήμα 2.2 Εφαρμογή της τεχνικής του μεταλλικού κλωβού χρησιμοποιώντας βίδες ή ντίζες[7].

Λόγω της σχετικής ομοιότητας ως προς τη σεισμική συμπεριφορά των υποστυλωμάτων κτιριακών κατασκευών με τα βάθρα, οι ανωτέρω τεχνικές έχουν επεκταθεί και μπορούν να εφαρμοστούν και για την ενίσχυση των στοιχείων αυτών σε γέφυρες από οπλισμένο σκυρόδεμα.

2.2.3 Μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος.

Η χρήση μανδύα από οπλισμένο σκυρόδεμα σε υποστυλώματα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση της καμπτικής αντοχής, της πλαστιμότητας και της διατμητικής αντοχής τους. Αγκυρώνοντας το διαμήκη οπλισμό του μανδύα μέσα στο θεμέλιο με επαρκές μήκος αγκύρωσης για την ανάπτυξη αντοχής, η καμπτική αντοχή του υποστυλώματος μπορεί να αυξηθεί, παρόλο που η αύξηση αυτή πρέπει να συνοδεύεται από μέτρα ενίσχυσης του θεμελίου, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ότι η πλαστική άρθρωση θα αναπτυχθεί στο υποστύλωμα. Αυξημένη περίσφιγξη υποστυλωμάτων κυκλικής διατομής με μανδύα σκυροδέματος επιτυγχάνεται σχετικά εύκολα με χρήση πυκνών κυκλικών συνδετήρων ή σπειροειδούς οπλισμού με μικρό βήμα σπείρας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Παρόλα αυτά, εκτός εάν ο μανδύας σκυροδέματος έχει ελλειπτικό ή κυκλικό σχήμα, είναι δύσκολο να επιτευχθεί επαρκής περίσφιγξη με ορθογωνικό μανδύα σκυροδέματος. Οι διαμήκεις ράβδοι στο μέσον κάθε πλευράς θα είναι ευάλωτες σε λυγισμό και μόνο το σκυρόδεμα κοντά στις γωνίες θα είναι επαρκώς περισφιγμένο. Η κατάσταση αυτή μπορεί να βελτιωθεί με αφαίρεση του σκυροδέματος των γωνιών της υπάρχουσας διατομής έως τις γωνιακές ράβδους και χρήση συνδετήρων στο μανδύα σκυροδέματος, οι οποίες έχουν καμφθεί κατά 45° στις γωνίες, εναλλάξ με ορθογωνικούς συνδετήρες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3(β).

Παρόλο που η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συχνότερα για την ενίσχυση υποστυλωμάτων κτιρίων και όχι γεφυρών, έχει εφαρμοσθεί για την ενίσχυση ορισμένων γεφυρών κυρίως στην Ιαπωνία [7].



Σχήμα 2.3 Ενίσχυση υποστυλωμάτων με μανδύες σκυροδέματος [7].

2.2.4 Μανδύες από σύνθετα υλικά.

Η χρήση μανδύων από σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών αποτελεί την πιο πρόσφατη και προηγμένη μέθοδο ενίσχυσης βάθρων. Η αποτελεσματικότητα των σύνθετων υλικών στην αύξηση της αντοχής και της πλαστιμότητας των βάθρων έχει αποδειχθεί με σειρά πειραμάτων. Τα πειράματα αυτά έχουν δείξει ότι τα σύνθετα υλικά είναι πιο αποδοτικά όσον αφορά στην περίσφιξη των βάθρων σε σχέση με τους μεταλλικούς μανδύες [7]. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι ο χάλυβας παρουσιάζει μη γραμμική συμπεριφορά με αποτέλεσμα μετά τη διαρροή του, που συμβαίνει από τους πρώτους κύκλους της ανακυκλιζόμενης σεισμικής φόρτισης, να απαιτείται ολοένα μεγαλύτερη παραμόρφωση για την ανάπτυξη της απαιτούμενης τάσης περίσφιξης. Αντίθετα τα σύνθετα υλικά συμπεριφέρονται γραμμικά μέχρι την αστοχία τους και επομένως η τάση περίσφιξης που αναπτύσσεται στο σκυρόδεμα του βάρου είναι σταθερή σε όλους τους κύκλους φόρτισης.

Το μήκος εφαρμογής του μανδύα ινοπλισμένου πολυμερούς για αύξηση της πλαστιμότητας του βάρου στην περιοχή σχηματισμού της πλαστικής άρθρωσης συνιστάται να είναι λίγο μεγαλύτερο από το απαιτούμενο για νέες κατασκευές. Καθώς οι απαιτήσεις σε περίσφιξη μειώνονται όσο αυξάνεται η απόσταση από την κρίσιμη διατομή, είναι αποδεκτό να μειώνεται κατά το ήμισυ το πάχος του μανδύα στο μισό ύψος της περισφιγμένης περιοχής. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται σημαντική οικονομία υλικού. Αντίστοιχη οικονομία υλικού είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί στην περίπτωση μεταλλικού μανδύα λόγω κατασκευαστικών δυσχερειών. Στις φωτογραφίες της Εικ. 2.1 φαίνονται δύο τρόποι εφαρμογής των σύνθετων υλικών. Η πρώτη αφορά διάστρωση με το χέρι μανδύα που αποτελείται από στρώσεις εμποτισμένου με εποξική ρητίνη υάλωνιμάτων και η δεύτερη μηχανική περιέλιξη του υποστύλωματος με στρώσεις από ανθρακονήματα επίσης εμποτισμένα με εποξική ρητίνη. Και οι δύο μέθοδοι έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικές σε εργαστηριακά πειράματα και έχουν εφαρμοστεί για τη σεισμική ενίσχυση βάρων γεφυρών σε διάφορες χώρες του κόσμου [7].

Σημαντικό βήμα που επηρεάζει την αποδοτικότητα της τεχνικής είναι η προετοιμασία της συγκεκριμένης περιοχής του σκυροδέματος η οποία θα ενισχυθεί. Πρέπει να αποφευχθεί όσο είναι δυνατό η αποδιοργάνωση των ινών του υλικού στην περιοχή, η οποία ενισχύεται έτσι ώστε να μπορέσει να τηρήσει τις προδιαγραφές για τις οποίες έχει κατασκευασθεί. Επίσης, βασικότερη προϋπόθεση επιτυχούς εφαρμογής των σύνθετων υλικών είναι η εξασφάλιση του απαιτούμενου μήκους αγκύρωσης, το οποίο πετυχαίνεται εύκολα στην περίσφιγξη, μέσω αλληλοεπικάλυψης των υφασμάτων.

Η ενίσχυση με ινοπλισμένα πολυμερή είναι πιο κατάλληλη για βάθρα κυκλικής διατομής, αφού η επίτευξη πλήρους περίσφιγξης ορθογωνικών βάρων απαιτεί την τροποποίηση του σχήματος της διατομής με ενισχύσεις από σκυρόδεμα ή με κάποιο άλλο τρόπο, έτσι ώστε ο μανδύας να τοποθετηθεί πάνω σε μία συνεχή καμπύλη επιφάνεια. Παρόλα αυτά, η έρευνα έχει δείξει ότι σημαντική αύξηση της πλαστιμότητας έχει επιτευχθεί και με ορθογωνικούς μανδύες από ινοπλισμένα πολυμερή σε βάθρα ορθογωνικής διατομής.



Εικόνα 2.1 Ενίσχυση βάρων με μανδύες σύνθετων υλικών - διάστρωση με το χέρι (αριστερά) και μηχανική περιέλιξη (δεξιά) [7].

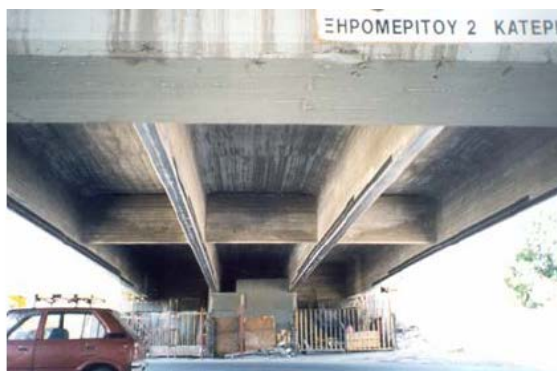
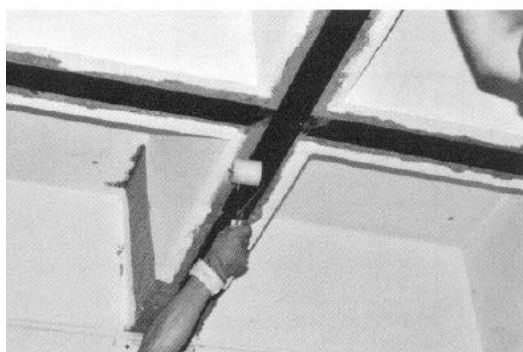
Η βελτίωση των ιδιοτήτων των μελών σκυροδέματος μέσω της ενίσχυσής τους με μανδύες σύνθετων υλικών συνίσταται συγκεκριμένα στα εξής [7]:

- (α) Ενίσχυση σε διάτμηση, μέσω της επικόλλησης υφασμάτων τα οποία τοποθετούνται στις εξωτερικές επιφάνειες με τις ίνες κατά το δυνατόν παράλληλες στις τροχιές των κυρίων τάσεων, δηλαδή περίπου κάθετα σε πιθανές ρωγμές. Αυτό δεν είναι γενικά εφικτό, γι' αυτό και στις περισσότερες περιπτώσεις τα υφάσματα τοποθετούνται έτσι ώστε οι ίνες να βρίσκονται κάθετα στον άξονα του μέλους (Εικ. 2.2).

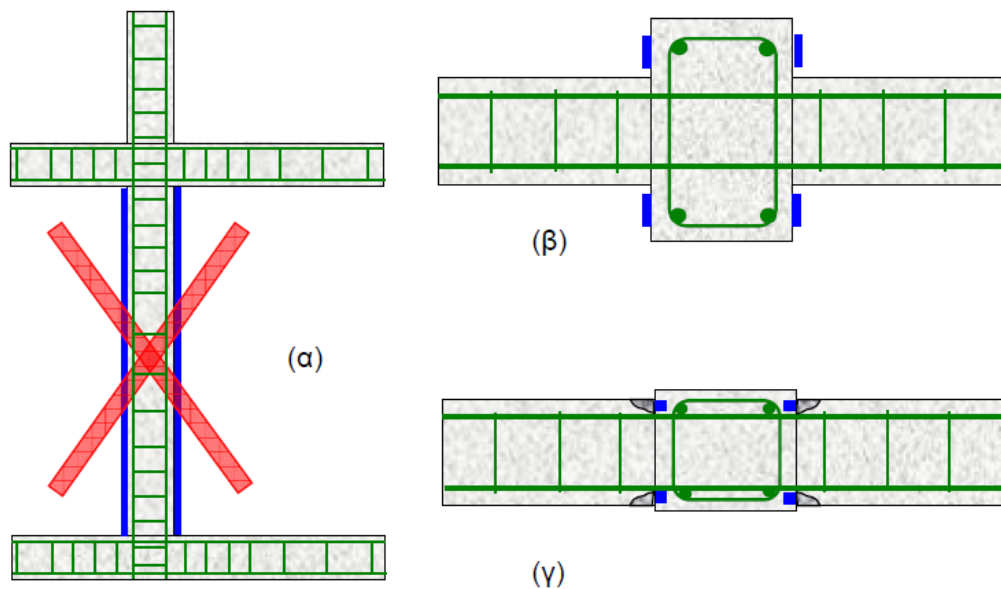


Εικόνα 2.2 Ενίσχυση σε διάτμηση κρίσιμης περιοχής (α) δοκού (β) υποστυλώματος [8].

- (β) Ενίσχυση σε κάμψη, η οποία στην περίπτωση στοιχείων τύπου πλάκας ή δοκού γίνεται μέσω ελασμάτων ή υφασμάτων ή ακόμα και ράβδων σε εγκοπές, τα οποία επικολλούνται στο άνοιγμα των στοιχείων στο εφελκυσμένο πέλμα με διεύθυνση των ινών τέτοια ώστε να παραλαμβάνουν τις λόγω κάμψης εφελκυστικές δυνάμεις (Εικ. 2.3). Στην περίπτωση των υποστυλωμάτων, τα οποία έχουν κρίσιμες σε κάμψη τις ακραίες διατομές, η εφαρμογή των σύνθετων υλικών μέσω υφασμάτων ή ελασμάτων είναι γενικά δύσκολη, δεδομένου ότι στις περιπτώσεις αυτές πρέπει να εξασφαλισθεί η αγκύρωση των οπλισμών εντός των κόμβων. Τούτο γίνεται εφικτό όταν οι δοκοί έχουν μικρότερο πλάτος από τα υποστυλώματα ή όταν χρησιμοποιούνται οπλισμοί σύνθετων υλικών μικρού πλάτους (πχ μορφής ράβδων) σε εγκοπές, όπως δείχνει το Σχήμα 2.4. Στην περίπτωση που αυτό δεν είναι εφικτό, η ενίσχυση των υποστυλωμάτων έναντι κάμψης γίνεται εμμέσως, μέσω της αύξησης της ικανότητας παραμόρφωσης και θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, που είναι και η τρίτη συνεισφορά των συνθετών υλικών ως οπλισμός ενίσχυσης.



Εικόνα 2.3 Ενίσχυση σε κάμψη δοκών μέσω εφαρμογής ελασμάτων [2].



Σχήμα 2.4 Ενδεικτικές διατάξεις καμπτικής ενίσχυσης υποστυλωμάτων για μέγιστη ροπή στα άκρα: (α) εσφαλμένη εφαρμογή (β) συνέχεια οπλισμού τύπου ελάσματος μέσω της πλάκας (γ) συνέχεια οπλισμού τύπου ράβδου σε εγκοπές μέσω του κόμβου [2].

- (γ) Βελτίωση των χαρακτηριστικών περίσφιγξης του σκυροδέματος η οποία κρίνεται εξαιρετικά ευνοϊκή. Επιτυγχάνεται μέσω περιέλιξης των υφασμάτων γύρω από τις ακραίες διατομές του υποστυλώματος, με τις ίνες είτε σε οριζόντια διάταξη είτε υπό γωνία ως προς τον άξονα του μέλους (Εικ. 2.4). Η δράση περίσφιγξης επιτυγχάνεται στην περίπτωση της αξονικής θλίψης του σκυροδέματος του υποστυλώματος, οπότε μέσω της εγκάρσιας διόγκωσής του, ενεργοποιούνται οι ίνες του μανδύα μέσω της ανάπτυξης εφελκυστικών παραμορφώσεων, επιβάλλοντας εγκάρσιες θλιπτικές τάσεις περίσφιγξης κάθετα στον άξονα του μέλους. Η ευεργετική αυτή επίδραση έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος και τη γενικότερης ικανότητας παραμόρφωσης του μέλους.



Εικόνα 2.4 Περίσφιγξη υποστυλωμάτων με μανδύες σύνθετων υλικών [8].

Εστιάζοντας στις γέφυρες οπλισμένου σκυροδέματος, αξίζει να σημειωθεί ότι οι μανδύες σύνθετων υλικών μπορούν να αποτελέσουν καλή λύση σε περιπτώσεις που χρειάζεται επισκευή βάθρων τα οποία βρίσκονται μέσα σε θαλασσινό νερό. Το νερό της θάλασσας σε συνδυασμό με τις υψηλές θερμοκρασίες και τις υψηλές τιμές της υγρασίας μπορούν να έχουν καταστροφικές επιπτώσεις στις γέφυρες που είναι κατασκευασμένες από οπλισμένο σκυρόδεμα, καθώς το περιβάλλον αυτό επιταχύνει τη «διείσδυση» των χλωριόντων τα οποία μέσα από ηλεκτροχημικές αντιδράσεις οδηγούν στη διάβρωση του χάλυβα. Η επισκευή των βάθρων με μανδύα FRP αποτελεί πλέον μια αρκετά αποτελεσματική λύση σε αυτό το πρόβλημα.

Στην Ιαπωνία χρησιμοποιούνται φύλλα σύνθετων υλικών FRPs για την ενίσχυση βάθρων γεφυρών αυτοκινητοδρόμων, όπου παρατηρείται το πρόβλημα τους πρόωρου τερματισμού των ράβδων του διαμήκου οπλισμού που συνεπάγεται μη επαρκές μήκος μάτισης [8]. Στην Εικόνα 2.5 φαίνεται ένα παράδειγμα ενίσχυσης βάθρου γέφυρας οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά φύλλων χάλυβα. Το φύλλο CFRP περιελίχθηκε για το σχηματισμό μανδύα γύρω από τις διατομές τερματισμού των διαμήκων οπλισμών κατά τη διαμήκη διεύθυνση και κατά την περιμετρική διεύθυνση για να ενισχύσει την καμπτική και διατμητική αντοχή.



Εικόνα 2.5 Ενίσχυση βάθρων γέφυρας οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά φύλλων άνθρακα [9].

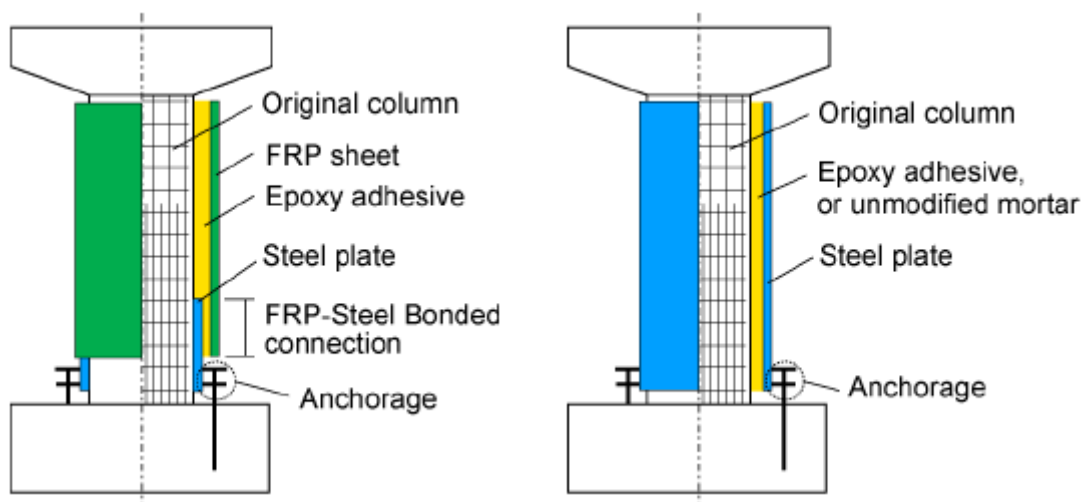
Τα φύλλα FRPs χρησιμοποιούνται επίσης σε άλλες περιπτώσεις για να ενισχύσουν την πλαστιμότητα των βάθρων, μέσω τοποθέτησης μανδύα γύρω από την περιοχή των αναμενόμενων πλαστικών αρθρώσεων. Παρόλα αυτά, η τεχνική αυτή δεν είναι αποτελεσματικός τρόπος για την αύξηση της καμπτικής αντοχής κατά τη διαμήκη διεύθυνση. Για το λόγο αυτό οι Zhang and Unjoh (2009) πρότειναν μια τεχνική συνδυασμένης χρήση φύλλων CFRP και μεταλλικού μανδύα. Στην τεχνική αυτή, η συνάφεια μεταξύ των φύλλων CFRP και του μεταλλικού μανδύα είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος, επειδή η διαμήκης δύναμη που προκαλείται από τις πρόσθετες βίδες αγκύρωσης πρέπει να μεταφερθεί στα φύλλα CFRP και συνεπώς ο μεταλλικός μανδύας πρέπει να έχει πολύ καλή συνάφεια με το

φύλλο CFRP κατά την ανελαστική απόκριση του βάρου. Στο Σχήμα 2.5(α) απεικονίζεται ενδεικτικά η παραπάνω προτεινόμενη μέθοδος. Έχει υιοθετηθεί ένας συνδυασμός μανδύα από φύλλα σύνθετων υλικών CFRPs και μεταλλικού μανδύα, ο οποίος προσφέρει στην τελική διάταξη τα πλεονεκτήματα τόσο των δύο αυτών τεχνικών. Η μεταφορά δυνάμεων μεταξύ του μεταλλικού μανδύα και των φύλλων CFRP επιτυγχάνεται μέσω ειδικών συνδέσμων με συγκεκριμένο μήκος. Συγκρίνοντας την προτεινόμενη διάταξη με την κλασική περίπτωση μεταλλικού μανδύα, η προτεινόμενη μέθοδος είναι περισσότερο σύνθετη καθώς απαιτεί το σχεδιασμό των λεπτομερειών των συνδέσμων συνάφειας. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής σύμφωνα με τους ερευνητές είναι:

- (α) Η υψηλή απόδοση και καλή σεισμική συμπεριφορά
- (β) Η μικρή αύξηση των μονίμων φορτίων που προκαλείται

Η συγκεκριμένη διάταξη είναι εφαρμόσιμη σε περιπτώσεις όπως:

- (α) Υφιστάμενες γέφυρες σε περιοχές με περιορισμένο χώρο και δυσκολία πρόσβασης, όπου δεν υπάρχει ελευθερία τοποθεσίας ξυλοτύπων ή μηχανημάτων για τη δημιουργία μανδύα οπλισμένου σκυροδέματος
- (β) Γέφυρες που διασχίζουν ποταμούς
- (γ) Γέφυρες σε περιοχές με έντονη χιονόπτωση όπου η περίοδος κατασκευής είναι μικρή.



Σχήμα 2.5 Σχηματική αναπαράσταση (α) προτεινόμενης μεθοδολογίας εφαρμογής σύνθετου μανδύα φύλλων CFRPS και μεταλλικού μανδύα και (β) μεταλλικού μανδύα [9].

2.3 Αρχές σχεδιασμού των επεμβάσεων σε βάρη γεφυρών.

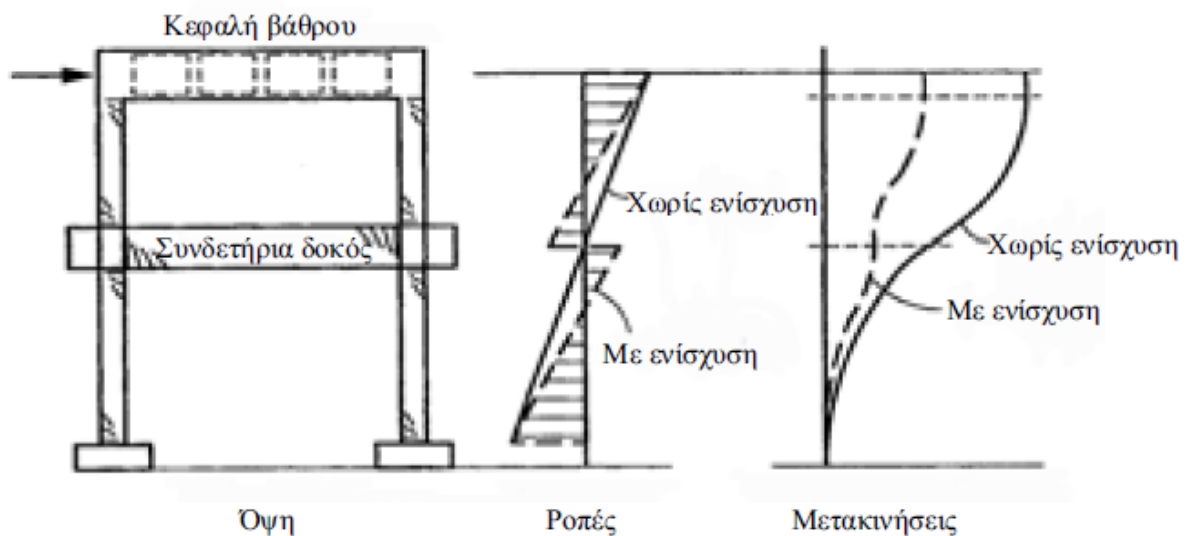
Η ενίσχυση ενός βάρου γέφυρας, όπως ακριβώς και η ενίσχυση υποστυλωμάτων ενός κτιριακού έργου, μπορεί να αποσκοπεί στους παρακάτω στόχους [7]:

- (α) **Περίσφιξη για αύξηση της πλαστιμότητας σε κάμψη.** Δεδομένου ότι πολλά υποστυλώματα (ενδεχομένως και μεσόβάρη μονολιθικά συνδεδεμένα με την

ανωδομή) έχουν αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας στις κρίσιμες περιοχές και ανεπαρκή οπλισμό περίσφιγξης (παλαιές κατασκευές), πρωταρχικός στόχος του σχεδιασμού ενίσχυσης των στοιχείων αυτών πρέπει να είναι η αύξηση της πλαστιμότητάς τους.

- (β) **Περίσφιγξη για καμπτική επάρκεια των συνδέσεων οπλισμού με παράθεση.** Η τάση για αστοχία των συνδέσεων οπλισμού με παράθεση, μπορεί να προβλεφθεί με εκτίμηση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος κατά μήκος της πιθανής επιφάνειας αστοχίας. Μετά την ανάπτυξη των αρχικών ρωγμών στη διεπιφάνεια ράβδου – σκυροδέματος, η αστοχία της σύνδεσης μπορεί να αποτραπεί εάν επαρκής τάση περίσφιγξης ασκηθεί κατά μήκος της επιφάνειας αστοχίας. Αυτή η τάση παρέχεται από τον οπλισμό περίσφιγξης και, εφόσον αυτός δεν επαρκεί, «προσφέρεται» από το μανδύα που χρησιμοποιείται για την ενίσχυση του βάρου.
- (γ) **Αύξηση της διατμητικής αντοχής.** Είναι κοινά αποδεκτό ότι για την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής υπαρχουσών κατασκευών μπορούν να υιοθετηθούν λιγότερο συντηρητικές προσεγγίσεις σε σύγκριση με τις νέες κατασκευές. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να εξασφαλιστεί ότι οι περιορισμένοι οικονομικοί πόροι για ενίσχυση θα τοποθετηθούν στις κατασκευές που πραγματικά χρήζουν ενίσχυσης, ενώ ταυτόχρονα αναγνωρίζεται ότι η καλύτερη γνώση των ιδιοτήτων των υλικών στα υπάρχοντα υποστυλώματα, σε σχέση με τα υποστυλώματα υπό μελέτη, έχει ως αποτέλεσμα μειωμένη αβεβαιότητα όσον αφορά στην αντοχή τους. Παρόλα αυτά, καθώς το κόστος της ενίσχυσης υποστυλωμάτων σε διάτμηση δεν επηρεάζεται σημαντικά από το πάχος του μανδύα, είναι θεμιτό να υιοθετείται η ίδια προσέγγιση τόσο για την ενίσχυση όσο και για το σχεδιασμό νέων υποστυλωμάτων σε διάτμηση. Επομένως η διατμητική δύναμη σχεδιασμού πρέπει να βασίζεται σε συντηρητικά υψηλές εκτιμήσεις της καμπτικής αντοχής του υποστυλώματος στην περιοχή της πλαστικής άρθρωσης και συντηρητικά χαμηλές εκτιμήσεις της διατμητικής αντοχής.
- (δ) **Αύξηση της Δυσκαμψίας των Υποστυλωμάτων.** Η τοποθέτηση μανδύων στα βάρια μιας γέφυρας θα αυξήσει τη δυσκαμψία τους και, επομένως, στην ελαστική περιοχή της απόκρισης, τα ενισχυμένα στοιχεία θα προσελκύουν μεγαλύτερο μέρος των σεισμικών δράσεων σε σχέση με τα μη ενισχυμένα (εάν υπάρχουν). Το μέγεθος της αύξησης της δυσκαμψίας εξαρτάται από το υλικό των μανδύων, το αρχικό σχήμα της διατομής του υποστυλώματος και το βαθμό της ενίσχυσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι η αύξηση της δυσκαμψίας λόγω τοποθέτησης μανδύων από οπλισμένο σκυρόδεμα ποικίλει σημαντικά ανάλογα με το ύψος, το πάχος και το ποσοστό του διαμήκους οπλισμού. Στην περίπτωση πολύ εύκαμπτων βάρων, επιδιώκεται η μείωση των μετακινήσεων του φορέα έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι επιρροές δευτέρας τάξεως και οι σχετικές μετακινήσεις μεταξύ των πλαισίων. Σε βάρια με ένα υποστυλώμα αυτό μπορεί να επιτευχθεί, σε μέτριο βαθμό, με μεταλλικούς μανδύες ή μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος, αν και είναι απίθανο ότι οι μανδύες θα χρησιμοποιηθούν μόνο για αύξηση της δυσκαμψίας των βάρων. Βάρια με πολλά υποστυλώματα μεγάλου ύψους μπορούν να ενισχυθούν εναλλακτικά συνδέοντας τα υποστυλώματα με συνδετήριες δοκούς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Στην περίπτωση αυτή, εάν η συνδετήρια δοκός βρίσκεται στο μέσον του υποστυλώματος, η πλευρική αντοχή του βάρου θα είναι διπλάσια και οι ελαστικές μετακινήσεις μειωμένες στο ήμισυ. Η συνδετήρια δοκός

μπορεί να σχεδιαστεί έτσι ώστε οι πλαστικές αρθρώσεις να σχηματιστούν είτε στα υποστυλώματα πάνω και κάτω από τη δοκό είτε, μειώνοντας την αντοχή της, στα άκρα της δοκού, προστατεύοντας έτσι τα υποστυλώματα από μη γραμμική συμπεριφορά στο μέσον τους. Παρόλα αυτά, προκειμένου να ολοκληρωθεί ο μηχανισμός πλαστικής κατάρρευσης απαιτείται ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων και στα άκρα των υποστυλωμάτων. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ικανοποιητική συμπεριφορά του συστήματος, είναι συχνά απαραίτητο να τοποθετηθούν μεταλλικοί μανδύες ή μανδύες από οπλισμένο σκυρόδεμα στα υποστυλώματα, μειώνοντας έτσι περαιτέρω τις μετακινήσεις.



Σχήμα 2.6 Χρήση συνδετήριας δοκού για μείωση των μετακινήσεων βάρων με πολλά υποστυλώματα λόγω εγκάρσιας σεισμικής δράσης [7].

- (ε) **Επισκευή βάρων με μανδύες από οπλισμένο σκυρόδεμα.** Οι μέθοδοι ενίσχυσης με χρήση μανδύων που παρουσιάστηκαν παραπάνω μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την επισκευή βάρων που έχουν υποστεί βλάβες σε σεισμούς με μέτρια ένταση. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να αποφασιστεί εάν το επίπεδο των βλαβών είναι τέτοιο που να απαιτεί πλήρη αποκατάσταση της αντοχής του βλαμμένου υποστυλώματος. Πειράματα έχουν δείξει ότι η αποφλοίωση της επικάλυψης του σκυροδέματος και η διαρροή είτε του διαμήκους είτε του εγκάρσιου οπλισμού δεν πρέπει να θεωρείται αποτρεπτική για την ενίσχυση. Παρόλα αυτά, εάν έχει συμβεί θραύση, λυγισμός ή σημαντική παραμόρφωση του οπλισμού, το υποστυλώμα πρέπει να αντικατασταθεί αντί να επισκευαστεί. Ομοίως, όταν έχουν παρατηρηθεί εκτεταμένες ρωγμές μεγάλου εύρους και αποφλοίωση του πυρήνα του σκυροδέματος, απαιτείται αντικατάσταση του υποστυλώματος του βάρου. Βλαμμένα βάρη που έχουν επισκευαστεί με μανδύες έχουν συμπεριφερθεί ικανοποιητικά σε πλήθος πειραμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΧΡΗΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ

3.1 Εισαγωγή.

Τα σχετικά καινούρια σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές αποτελούνται από ινώδη οπλισμένα πολυμερή εμποτισμένα σε ειδικές εποξικές, συνήθως, ρητίνες (μήτρες) ώστε να σχηματίζουν αντίστοιχα δύσκαμπτα ελάσματα ή εύκαμπτα υφάσματα μίας ή δύο διευθύνσεων (ΙνΟπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ) ή Fiber Reinforced Polymers (FRP)).

Τα FRPs θεωρούνται από τα πλέον υποσχόμενα υλικά κατασκευών –ενισχύσεων στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Χρησιμοποιούνται σε νέες κατασκευές από σκυρόδεμα, ως κύριος οπλισμός σε μορφή ράβδων και, κυρίως, σε ενισχύσεις, επισκευές και αποκαταστάσεις υφιστάμενων κατασκευών.

Τα FRPs κυρίως εφαρμόζονται σε δύο τύπους. Ο ένας είναι σε λεπτές στρώσεις φύλλων (υφάσματα) για επισκευές ή ενισχύσεις βλαμμένων υποστυλωμάτων, κυρίως, σκυροδέματος. Ο άλλος είναι υπό μορφή σωλήνων για ανακατασκευή στοιχείων σκυροδέματος ή καινούριες κατασκευές. Η διαφορά μεταξύ των δύο τύπων είναι προφανής. Στην περίπτωση επισκευής με μανδύα το σύνθετο υλικό εφαρμόζεται στην επιφάνεια ενός υπάρχοντος υποστυλώματος. Το ύφασμα τοποθετείται στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου με προσανατολισμό ινών τέτοιο ώστε να παραλαμβάνουν εφελκυστικές δυνάμεις (στην εγκάρσια διεύθυνση του προς ενίσχυση στοιχείου) αποτελώντας εξωτερικό οπλισμό και μόνιμη ενίσχυσή του. Μόνο μια μικρή αξονική δύναμη μεταφέρεται στον μανδύα μέσω της συνάφειας ή της δύναμης της τριβής. Στην περίπτωση των σωλήνων, η αξονική δύναμη εφαρμόζεται κατευθείαν στον σωλήνα εκτός από το στοιχείο σκυροδέματος.

Στις ενισχύσεις, σύνθετα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν τα δομικά στοιχεία μίας κατασκευής υπό κάποιες συνθήκες να παρουσιάσουν ανεπάρκεια αντοχής ή/και πλαστιμότητας (δυνατότητα να δεχτούν αυξημένες παραμορφώσεις σε περιπτώσεις σεισμών και άλλων έκτακτων φορτίων). Πέραν αυτής της περίπτωσης, τα FRPs χρησιμοποιούνται σε επεμβάσεις όταν εκτιμάται ότι η φέρουσα ικανότητα των δομικών μελών ενός φορέα έχει υποβαθμιστεί λόγω περιβαλλοντικών επιδράσεων ή άλλων φυσικών φαινομένων, οι εφαρμοζόμενες φορτίσεις έχουν αυξηθεί σε σχέση με την αρχική μελέτη, προκύπτει ανάγκη υποστήριξης ευρύτερων επισκευών ή, τέλος, απαιτείται η επέκταση της ωφέλιμης διάρκειας ζωής της κατασκευής με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των σχετικών δαπανών.

Η επιλογή του τύπου, της μορφής και της μεθόδου εφαρμογής των σύνθετων υλικών εξαρτάται κάθε φορά από παράγοντες όπως [8].

- (α) η γεωμετρία και οι διαστάσεις των προς ενίσχυση στοιχείων,
- (β) το είδος της εντατικής τους καταπόνησης,
- (γ) οι περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. σε θερμοκρασίες κάτω των 10°C η σκλήρυνση των ρητινών που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα υλικά είναι δύσκολη),
- (δ) η εμπειρία του μηχανικού και του διατιθέμενου εργατοτεχνικού προσωπικού και

(ε) ο προϋπολογισμός της επέμβασης.

Εκτός από την προσεκτική επιλογή των σύνθετων υλικών και την επιμελημένη εφαρμογή τους, ένας από τους παράγοντες που καθορίζει εάν η επέμβαση θα είναι επιτυχής είναι και η αντοχή και η ποιότητα του υποστρώματος στο οποίο θα γίνει η επικόλληση. Πολύ χαμηλή εφελκυστική αντοχή ή επιφάνεια του υπό ενίσχυση στοιχείου τραχειά, γεμάτη με σκόνη, λάδια κλπ. δεν θα εξασφαλίσει καλή ποιότητα δεσμού μεταξύ υποστρώματος και σύνθετων υλικών με αποτέλεσμα την πρόωρη αστοχία του ινοπλισμένου πολυμερούς.

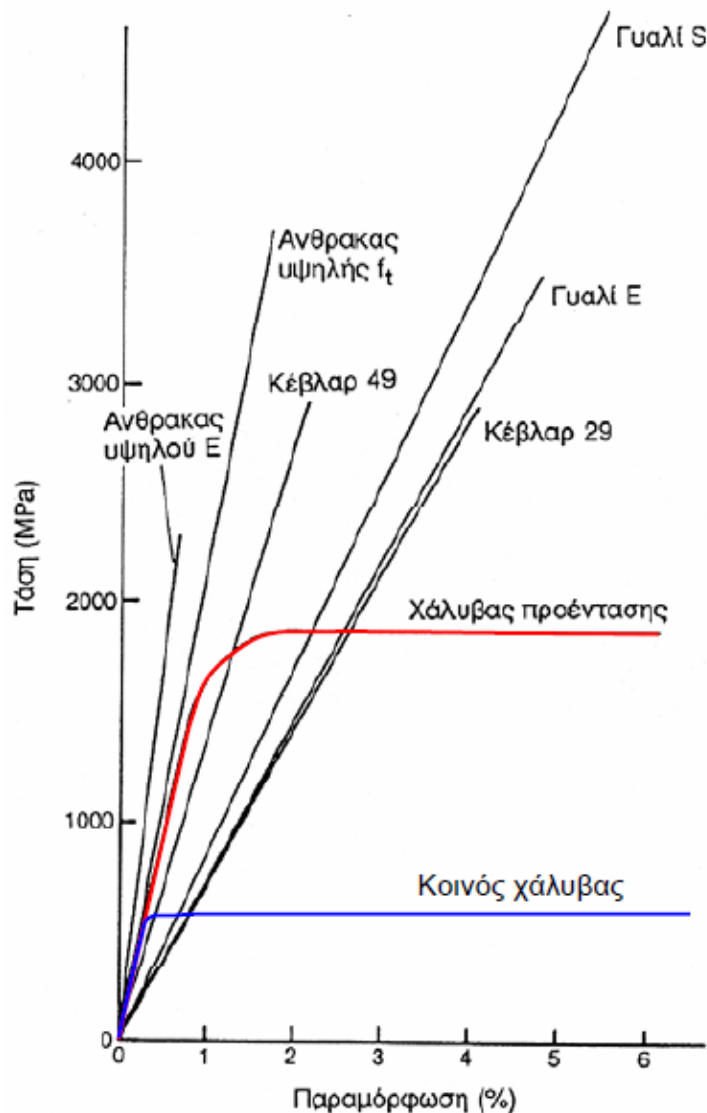
Οι βασικές αρχές για τον σχεδιασμό μανδύων ΙΟΠ είναι αντίστοιχες με αυτές των μεταλλικών μανδύων. Σε σχέση όμως με τα παραπάνω συστήματα ενίσχυσης, οι μανδύες από σύνθετα υλικά παρουσιάζουν υψηλότερη εφελκυστική αντοχή. Ακόμη πιο σημαντικός είναι ο υψηλός λόγος αντοχής προς βάρους που αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα των υλικών αυτών και, τέλος αξιοσημείωτη είναι η ευκολία τοποθέτησης τους που τα καθιέρωσε στον τομέα των ενισχύσεων.

3.2 Σύνθεση των Ινοπλισμένων Πολυμερών.

3.2.1 Ίνες.

Οι ίνες στα σύνθετα υλικά, διαμέτρου 5 – 25 μm, αποτελούν τον φορέα ανάληψης δυνάμεων (κατά κανόνα εφελκυστικών) παράλληλα στη διεύθυνσή τους. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή και η γραμμική ελαστική συμπεριφορά μέχρι τη θραύση τους, που φαίνεται και στο Σχήμα 3.1.

Οι κυριότεροι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται στο πεδίο των ενισχύσεων είναι οι ίνες άνθρακα (ανθρακονήματα), οι ίνες γυαλιού (υαλονήματα) και οι ίνες αραμιδίου, με βασικές ιδιότητες που δίνονται στον Πίνακα 3.1. Επισημαίνεται ότι οι ιδιότητες αυτές αναφέρονται στις ίνες υπό μονοτονική φόρτιση, χωρίς να έχει ληφθεί υπόψη η επίδραση της μακροχρόνιας φόρτισης και τυχόν δυσμενών περιβαλλοντικών επιπτώσεων.



Σχήμα 3.1 Τυπικές καμπύλες εφελκυστικής τάσης – παραμόρφωσης για διάφορους τύπους ινών και σύγκριση με απλοποιημένες καμπύλες για χάλυβα [8].

Οι **ίνες γυαλιού** (GFRP, Εικ. 3.1) παρασκευάζονται από λειωμένο γυαλί πυκνότητας $2300 - 2500 \text{ kg/m}^3$ και κατηγοριοποιούνται σε αυτές των τύπων E, A, Z, C, E-CR, R, S, ARS με τις E να έχουν εξαιρετικές ηλεκτρομονωτικές ιδιότητες και αυτές των S να έχουν καλύτερες αντοχές σε εφελκυσμό και αντίσταση σε διάβρωση και πυρκαγιά [7]. Οι ίνες γυαλιού χρησιμοποιήθηκαν στα σύνθετα πρώτης γενιάς (1940) και η χρήση τους συνεχίζεται επιτυχώς μέχρι σήμερα. Είναι από τους πλέον διαδεδομένους τύπους ενισχυτικών ινών στα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας, και θεωρούνται από τα πιο φθηνά ενισχυτικά υλικά. Ο τύπος E (E-glass, E = electrical) είναι ο κοινός και πλέον συνηθισμένος τύπος γυαλιού με βασικό μειονέκτημα τη μείωση της αντοχής σε αλκαλικό περιβάλλον, όπως είναι αυτό του σκυροδέματος. Πρόκειται για τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα υαλονήματα με καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, αντοχή και δυσκαμψία, καθώς και πολύ καλή συμπεριφορά στην αλλαγή των καιρικών συνθηκών, αλλά με μέτρια αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια. Ο τύπος C-glass (C=corrosion) περιλαμβάνει υαλονήματα με υψηλή αντίσταση στη χημική διάβρωση, αλλά και με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τις ίνες τύπου E, από

τις οποίες όμως είναι ακριβότερες [8]. Ο τύπος Z έχει μεγάλη αντοχή σε αλκαλικό περιβάλλον. Ο τύπος S-glass (S=stiffness) είναι ακριβότερο υλικό από το E-glass, αλλά με υψηλότερη δυσκαμψία και θερμική αντοχή. Χρησιμοποιείται κυρίως στην αεροπορική βιομηχανία. Ως μειονέκτημα της επιφάνειας των ινών μπορεί να θεωρηθεί το ευπρόσβλητο στην υγρασία σε ορισμένες συνθήκες έκθεσης και πάνω από κάποια επίπεδα φόρτισης. Είναι όμως υλικό εύκολο στην παραγωγή. Το μέτρο ελαστικότητας των GFRP είναι κοντά στο μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος που τα καθιστά πολύ πιο συμβατά με το σκυρόδεμα (25-37 MPa) συγκριτικά με άλλα υλικά ενίσχυσης, ενώ δοκιμές των GFRP υπό συνθήκες κόπωσης απέδειξαν πως συμπεριφέρονται 20 φορές καλύτερα από το συμβατικό χάλυβα υπό τις ίδιες συνθήκες [8].

Πίνακας 3.1 Ενδεικτικές τιμές ιδιοτήτων ινών [8]

<i>Υλικό</i>	<i>Μέτρο ελαστικότητας (GPa)</i>	<i>Εφελκυστική αντοχή (MPa)</i>	<i>Οριακή παραμόρφωση εφελκυστικής αστοχίας (%)</i>
<i>Άνθρακας</i>			
Υψηλής αντοχής	215 - 235	3500 – 4800	1.4 – 2.0
Υπερ – υψηλής αντοχής	215 - 235	3500 – 6000	1.5 – 2.3
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας	350 – 500	2500 – 3100	0.5 – 0.9
Υπερ - υψηλού μέτρου ελαστικότητας	500 – 700	2100 – 2400	0.2 – 0.4
<i>Γυαλί</i>			
E	70 – 75	1900 – 3000	3.0 – 4.5
Z	70 – 75	1900 – 3000	3.0 – 4.5
S	85 – 90	3500 – 4800	4.5 – 5.5
<i>Αραμίδιο</i>			
Χαμηλού μέτρου ελαστικότητας (Κέβλαρ 29)	70 – 80	3500 – 4100	4.3 – 5.0
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας (Κέβλαρ 49, Twaron)	115 – 130	3500 - 4000	2.5 – 3.5



Εικόνα 3.1 Ίνες υάλου E-Glass [1].

Οι **ίνες άνθρακα** (CFRP, Εικ. 3.2), με πυκνότητα $1800 - 1900 \text{ kg/m}^3$, είναι το κύριο υλικό ινών για επίτευξη υψηλών αντοχών. Ο όρος ίνες άνθρακα καλύπτει μια ολόκληρη οικογένεια υλικών που παρουσιάζουν μεγάλο εύρος αντοχών και ακαμψιών. Τυπικές τιμές μέτρου ελαστικότητας κυμαίνονται μεταξύ $230 - 300 \text{ GPa}$ και οι αντοχές τους από $3000 - 5000 \text{ MPa}$. Παρασκευάζονται είτε από θερμική κατεργασία του πολυακρυλονιτριλίου (PAN) είτε μέσω απόσταξης κάρβουνου (Pitch). Οι πρώτες χαρακτηρίζονται γενικά από μεγαλύτερες αντοχές και μέτρα ελαστικότητας, και συνεπώς θεωρούνται καλύτερης ποιότητας. Οι ίνες άνθρακα είναι η επικρατέστερη ενίσχυση υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας, η οποία χρησιμοποιείται για την παρασκευή υψηλών επιδόσεων σύνθετων υλικών ρητινικής μήτρας. Γενικά, όταν απαιτείται ο βέλτιστος συνδυασμός μηχανικής συμπεριφοράς και ελάττωσης του βάρους, οι χρησιμοποιούμενες ίνες είναι, συνήθως, ίνες άνθρακα. Επίσης, οι ίνες άνθρακα προτιμούνται όταν η θερμική διαστολή ενός υλικού πρέπει να συγκρατηθεί σε χαμηλό επίπεδο ή όταν απαιτείται συμβατότητα των χαρακτηριστικών διαστολής δύο συνενωμένων διαφορετικών υλικών. Η υπεροχή αυτή των ανθρακονημάτων οφείλεται στη φύση του άνθρακα ως στοιχείου [8].

Οι **ίνες αραμιδίου** (Εικ. 3.3) είναι πολύ ανθεκτικές οργανικής χημικής σύστασης (ενώσεις αρωματικών πολυαμιδίων) συνθετικές ίνες με μέτρο ελαστικότητας που κυμαίνεται μεταξύ $60 - 150 \text{ GPa}$ και αντοχές ως 3000 MPa και χαμηλή πυκνότητα (1400 kg/m^3). Γίνεται διάκριση μεταξύ των παρα-αραμιδικών (Kevlar) και μετα-αραμιδικών ινών [8] με τις πρώτες να παρουσιάζουν μεγαλύτερες αντοχές και καλή συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες και σε φωτιά (θερμοκρασία αποσύνθεσης 450°C) και εφαρμόζονται γενικότερα σε εφαρμογές υψηλών επιδόσεων. Επίσης, διακρίνονται σε εκείνες οι οποίες προέρχονται από αρωματικό πολυαμίδιο (Κέβλαρ, Twaron) και σε εκείνες οι οποίες προέρχονται από αρωματικό πολυαιθεραμίδιο (Technora). Συγκριτικά με τις ίνες άνθρακα παρουσιάζουν φαινόμενα λυγισμού και υψηλή απορρόφηση υγρασίας. Κύριο πλεονέκτημά τους είναι η πολύ καλή συμπεριφορά σε κρουστικά φορτία.



Εικόνα 3.2 Ίνες άνθρακα [1].



Εικόνα 3.3 Ίνες αραμιδίου [1].

Πέραν των παραπάνω, πολύ διαδεδομένων ινών, άλλοι τύποι που συναντώνται πιο σπάνια είναι οι ακόλουθοι [8]:

- (α) Οι **μεταλλικές ίνες**, οι οποίες θα μπορούσαν να αποτελέσουν εξαιρετικά ενισχυτικά συνθέτων υλικών, αφού παρουσιάζουν υψηλή τιμή ακαμψίας σε σχέση με το ειδικό βάρος τους (ειδική ακαμψία). Το βόριο είναι το περισσότερο υποσχόμενο υλικό για την κατασκευή ινών ενίσχυσης, ωστόσο οι τεχνικές παραγωγής μεταλλικών ινών ενίσχυσης εξακολουθούν να παραμένουν πολύ δαπανηρές.
- (β) Οι **κεραμικές ίνες** που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλών θεοκρασιών. Χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή, στιβαρότητα και θερμική ευστάθεια. Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες κεραμικές ίνες είναι οι ίνες καρβιδίου του πυριτίου (SiC) και αλούμινας (Al_2O_3).
- (γ) Οι **τριχίτες** είναι νηματικοί μονοκρύσταλλοι που παράγονται με αποσύνθεση άλατος μετάλλου σε αναγωγική ατμόσφαιρα, κάτω από αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Η παραγωγή τους σε βιομηχανική κλίμακα είναι δύσκολη.

(δ) Οι ίνες φυσικών ορυκτών παρασκευάζονται όταν αρκετά ορυκτά που βρίσκονται σε ινώδη ή φυλλώδη μορφή, μπορούν να αποτελέσουν φθηνό ενισχυτικό υλικό, αλλά χαμηλών προδιαγραφών. Ευρύτερα χρησιμοποιούμενα τέτοια ορυκτά είναι ο αμιάντος και η μαρμαρυγία (mica). Οι ίνες αμιάντου έχουν μέτρο ελαστικότητας της τάξης των 160 GPa, ενώ η μηχανική αντοχή τους μπορεί να φτάσει μέχρι 5500 MPa. Ο αμιάντος λόγω του χαμηλού του κόστους χρησιμοποιείται ευρύτερα. Η αντοχή σε εφελκυσμό των μαρμαρυγιών μπορεί να φτάσει μέχρι 2500 MPa (τέλεια φυλλίδια), ενώ, λόγω ατελειών στις άκρες των φυλλιδίων, οι συνήθεις τιμές της αντοχής κυμαίνονται στην περιοχή 700 - 900 MPa. Το μέτρο ελαστικότητας των μαρμαρυγιών είναι περίπου 220 GPa.

Στον παρακάτω πίνακα (Πιν. 3.2) γίνεται μια ποιοτική σύγκριση των τριών επικρατέστερων τύπων ινών, που παρέχει κριτήρια επιλογή για τη χρήσης τους στις κατασκευές.

Πίνακας 3.2 Ποιοτική σύγκριση μεταξύ ινοπλισμένων πολυμερών άνθρακα, αραμιδίου, γυαλιού [8].

<i>Κριτήρια</i>	<i>Ίνες άνθρακα</i>	<i>Ίνες αραμιδίου</i>	<i>Ίνες γυαλιού</i>
<i>Εφελκυστική αντοχή</i>	Πολύ καλή	Πολύ καλή	Πολύ καλή
<i>Θλιπτική αντοχή</i>	Πολύ καλή	Μη ικανοποιητική	Καλή
<i>Μέτρο ελαστικότητας</i>	Πολύ καλή	Καλή	Ικανοποιητική
<i>Συμπεριφορά σε μακροχρόνιες δράσεις</i>	Πολύ καλή	Καλή	Ικανοποιητική
<i>Συμπεριφορά κόπωσης</i>	Εξαιρετική	Καλή	Ικανοποιητική
<i>Πυκνότητα</i>	Καλή	Εξαιρετική	Ικανοποιητική
<i>Ανθεκτικότητα σε αλκάλια</i>	Πολύ καλή	Καλή	Μη ικανοποιητική
<i>Τιμή</i>	Ικανοποιητική	Ικανοποιητική	Πολύ καλή

3.2.2 Μήτρα.

Η μήτρα στα σύνθετα υλικά αποτελεί τη συγκολλητική ύλη μεταξύ των ινών. Αναλυτικότερα, ο ρόλος της μήτρας συνίσταται σε [7]:

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

Η μήτρα καθορίζει αρκετές μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών, όπως είναι η αντοχή κάθετα στη διεύθυνση των ινών, η διατμητική αντοχή και η θλιπτική αντοχή. Για να ικανοποιεί το ρόλο, με τον οποίο είναι επιφορτισμένη, η μήτρα, πρέπει να χαρακτηρίζεται από [7]:

- (α) Ολκιμότητα.
- (β) Ανθεκτικότητα.
- (γ) Σχετική ευκαμψία.
- (δ) Σημείο τήξης μεγαλύτερο από τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του συνθέτου υλικού.

Οι ιδιότητες αυτές πρέπει επίσης να παρουσιάζουν «συμβατότητα» με τις αντίστοιχες ιδιότητες των ενισχυτικών ινών. Συνήθως, το υλικό της μήτρας έχει χαμηλότερη πυκνότητα, αντοχή και δυσκαμψία από τις ίνες. Τέλος, για τη σωστή λειτουργία του συνθέτου υλικού, καθοριστικός παράγοντας είναι η καλή πρόσφυση ίνας – μήτρας.

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

- (α) Οργανικές.
- (β) Μεταλλικές.
- (γ) Κεραμικές.

Η επιλογή κατάλληλης μήτρας εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το περιβάλλον χρήσης του συνθέτου υλικού. Οι οργανικές μήτρες χρησιμοποιούνται για θερμοκρασίες έως 250°C, που είναι οι συνήθεις παρατηρούμενες στις κατασκευές. Οι οργανικές μήτρες διακρίνονται σε [7]:

- (α) **Θερμοπλαστικές:** Πρόκειται για πολυμερή με γραμμικές μοριακές αλυσίδες, που διασυνδέονται με ασθενείς δυνάμεις Van der Waals, οι οποίες λύνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας, καθιστώντας το υλικό μαλακότερο σε υψηλές θερμοκρασίες. Λόγω του χαμηλού τους κόστους, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ευρείας κατανάλωσης. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αποτελούν οι μήτρες πολυαιθυλενίου (PE) και πολυστυρενίου (PS). Ως ενισχυτικά υλικά θερμοπλαστικών μητρών χρησιμοποιούνται φθηνά υλικά (αμίαντος, μαρμαρυγίες, κ.α.), ώστε και το τελικό προϊόν να είναι χαμηλής τιμής.
- (β) **Θερμοσκληρυνόμενες:** Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή παρουσιάζουν τρισδιάστατη δομή πλέγματος από πρωτογενείς ισχυρούς δεσμούς μεταξύ των μοριακών αλυσίδων. Αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει το πλήθος των διαμοριακών δεσμών καθιστώντας τα υλικά αυτά σκληρότερα και ψαθυρότερα. Τέτοιες μήτρες είναι οι πολυεστερικές ρητίνες που ενισχύονται με ίνες γυαλιού, οι εποξειδικές ρητίνες με μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους 200°C και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις προηγούμενες και μεγάλη ανθεκτικότητα σε δυσμενείς περιβαλλοντικές επιδράσεις, οι βινυλεστερικές ρητίνες και, τέλος, οι φαινολικές ρητίνες, οι οποίες έχουν χαμηλή

πλαστικότητα και μέτριες μηχανικές ιδιότητες. Τυπικές μηχανικές ιδιότητες των ρητινών που χρησιμοποιούνται ως μήτρα σε σύνθετα υλικά παρατίθενται στον Πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3 Ενδεικτικές τιμές ιδιοτήτων ρητινών χρησιμοποιούμενων ως μήτρα [7].

<i>Είδος ρητίνης</i>	<i>Εφελκυστική αντοχή MPa</i>	<i>Μέτρο ελαστικότητας GPa</i>	<i>Επιμήκυνση Θράυσης (%)</i>	<i>Ποκνότητα g/cm³</i>
<i>Εποξειδική</i>	55 - 130	2.0 - 4.5	4.0 - 14.0	1.2 - 1.3
<i>Πολυεστερική</i>	35 - 104	2.1 - 4.1	< 5.0	1.1 - 1.46
<i>Βινυλεστερική</i>	73 - 81	3.0 - 3.6	3.5 - 5.5	1.12- 1.32

3.2.3 Κόλλα.

Στα σύνθετα υλικά χρησιμοποιείται ως κόλλα συνήθως εποξειδική ρητίνη δυο συστατικών που εφαρμόζεται μεταξύ του υποστρώματος 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 κατανόηση τριών βασικών εννοιών [8]: χρόνος εργασιμότητας (pot life), χρόνος εφαρμογής (open time), θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης T_g (glass transition temperature).

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

Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης είναι μια χαρακτηριστική ιδιότητα όλων των πολυμερών και είναι η θερμοκρασία εκείνη στην οποία η κόλλα υφίσταται ραγδαία απομείωση του μέτρου ελαστικότητας, οπότε έχει περιορισμένη πλέον ικανότητα μεταφοράς δυνάμεων.

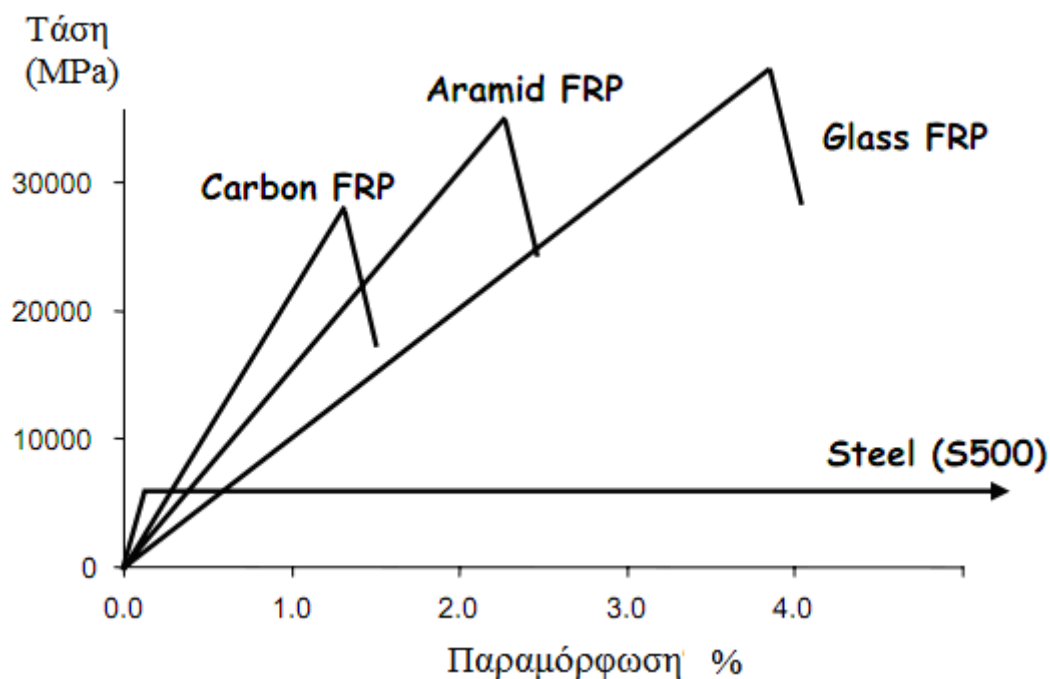
Στον παρακάτω πίνακα (Πιν. 3.4) παρατίθενται ενδεικτικές τιμές ιδιοτήτων εποξειδικών ρητινών και σύγκρισή τους με τις αντίστοιχες για σκυρόδεμα και χάλυβα.

Πίνακας 3.4 Ενδεικτικές τιμές ιδιοτήτων ρητινών χρησιμοποιούμενων ως κόλλα.

<i>Ιδιότητα (σε 20°C)</i>	<i>Εποξειδική ρητίνη</i>	<i>Σκυρόδεμα</i>	<i>Χάλυβας</i>
<i>Πυκνότητα (kg/m³)</i>	1100-1700	2350	7800
<i>Μέτρο ελαστικότητας (KN/mm²)</i>	0.5-20	20-50	205
<i>Μέτρο διάτμησης (KN/mm²)</i>	0.2-8.0	8-21	80
<i>Λόγος Poisson</i>	0.3-0.4	0.2	0.3
<i>Εφελκυστική αντοχή (N/mm²)</i>	9-30	1-4	200-600
<i>Διατμητική αντοχή (N/mm²)</i>	10-30	2-5	150-400
<i>Θλιπτική αντοχή (N/mm²)</i>	55-110	25-150	200-600
<i>Οριακή παραμόρφωση σε εφελκυσμό(%)</i>	0.5-5 0	0.015	20-25
<i>Ενέργεια θραύσης (J_m⁻²)- κατά προσέγγιση</i>	200-1000	100	10 ⁵ -10 ⁶
<i>Συντελεστής θερμικής διαστολής (10⁻⁶/°C)</i>	25-100	11-13	10-15
<i>Υδατοαπορροφητικότητα: 7ημ. - 25°C (% κ.β.)</i>	0.1-3	5	0
<i>Θερμοκρασία ναλώδους μετάπτωσης (°C)</i>	50-80	-	-

3.3 Μηχανικές ιδιότητες σύνθετων υλικών.

Τα σύνθετα υλικά είναι γενικά φύσει από τη φύση τους ανισοτροπικά (οι ιδιότητές τους εξαρτώνται από την κατεύθυνση της φόρτισης). Η μηχανική των παραμορφώσιμων υλικών περιγράφει τα ισοτροπικά υλικά με το μέτρο της ελαστικότητας, το μέτρο της διάτμησης και το λόγο Poisson με σχετικά απλές εξισώσεις. Για την περιγραφή των ανισοτροπικών υλικών απαιτούνται πιο σύνθετες μαθηματικές εκφράσεις και ως 21 σταθερές υλικών. Στα FRP η διαρροή εμφανίζεται μόνο κατά την διεύθυνση των ινών. Ακριβώς αυτή η ανισοτροπική συμπεριφορά επηρεάζει την διατμητική αντοχή των FRP όπως και την συνολική τους επίδοση ως υλικού ενίσχυσης κατασκευών. Χαρακτηριστική είναι η απότομη και καταστροφική διάρρηξη τους στην αστοχία, που φαίνεται και από τα διαγράμματα του Σχήματος 3.2. Σε αυτά αποτυπώνεται η πλήρως γραμμική, χωρίς διαρροή, μηχανική συμπεριφορά των ινοπλισμένων πολυμερών.



Σχήμα 3.2 Σχέσεις τάσης – παραμόρφωσης σύνθετων υλικών σε εφέλκυσμό για διάφορους τύπους ινών και σύγκρισή τους με το χάλυβα οπλισμού [8].

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθούν συγκεκριμένοι παράγοντες οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν την συμπεριφορά των σύνθετων υλικών και να μειώσουν πιθανόν τις τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων τους [8]:

- (α) *Ερπυσμός*. Σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη μακροχρόνια συμπεριφορά των σύνθετων υλικών είναι ο ερπυσμός. Τα ανθρακονήματα και τα υαλονήματα φαίνεται να έχουν πρακτικά μηδενικές ερπυστικές παραμορφώσεις ενώ οι ίνες πολυαραμιδίου και οι ρητινούχες μήτρες παρουσιάζουν ερπυσμό. Ο βαθμός του ερπυσμού είναι συνάρτηση του υλικού της ίνας και του προσανατολισμού της σε σχέση με την εφαρμοζόμενη ένταση.
- (β) *Θερμοκρασία*. Η αύξηση της θερμοκρασίας πέρα από κάποια τιμή μπορεί να προκαλέσει σημαντική υποβάθμιση των ευεργετικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι θερμοκρασίες της τάξης των 50-80 °C μειώνουν σημαντικά την ικανότητα ανάληψης δυνάμεων στις ρητίνες και άρα στους σύνθετους οπλισμούς. Είναι προφανές ότι υψηλότερες θερμοκρασίες όπως αυτές που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς, προκαλούν πλήρη αποσύνθεση των ρητινών και επομένως τα ΙΟΠ δεν μπορούν να φέρουν τάσεις. Ωστόσο, ενδεχόμενη κατάρρευση της κατασκευής αναμένεται σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες.
- (γ) *Υγρασία*. Γενικά τα σύνθετα υλικά έχουν καλή συμπεριφορά σε συνθήκες υγρασίας. Ωστόσο, μετά από μακροχρόνια έκθεση κάποιοι συνδυασμοί ινών - ρητινών μπορεί να παρουσιάσουν προβλήματα. Μετά το πέρας μιας εξαιρετικά μακράς περιόδου, οι χημικές αλυσίδες των πολυμερών είναι πλήρως υδατοδιαλυτές και όσον αφορά τις ίνες, ειδικά τα υαλονήματα γίνονται εξαιρετικά εύθραυστα. Η λύση για την προστασία

ινοπλισμένων πολυμερών που εφαρμόζονται σε κατασκευές που είναι μέσα στο νερό (βάθρα ποτάμιων γεφυρών), είναι η επιλογή κατάλληλης ρητίνης.

- (δ) *Όξινο περιβάλλον*. Η παρουσία διαφόρων τύπων αλάτων σε συνδυασμό με θερμοκρασιακούς παράγοντες μπορούν να προκαλέσουν υποβάθμιση των μηχανικών χαρακτηριστικών των ράβδων.
- (ε) *Αλκαλικό περιβάλλον*. Έκθεση ινοπλισμένων πολυμερών από αραμίδιο σε αλκαλικά διαλύματα οδηγεί σε 10% - 50% μείωση της αντοχής τους και 0 - 20% μειωμένο μέτρο ελαστικότητας. Μεγαλύτερες τιμές υποβάθμισης των μηχανικών ιδιοτήτων (έως 75%) έχουν διαπιστώθει στις αντίστοιχες ίνες GFRP, ενώ τα ΙΟΠ άνθρακα θεωρούνται πρακτικά απρόσβλητα από τέτοια περιβάλλοντα καθώς δεν παρατηρείται πτώση της αντοχής πάνω από 20%.
- (στ) *Υπεριώδης ακτινοβολία*. Η υπεριώδης ακτινοβολία επηρεάζει την εξωτερική στρώση ρητίνης επιφέροντας, σε κάποιες περιπτώσεις, μείωση της αντοχής των σύνθετων υλικών μέχρι και 40%. Μικρορηγματώσεις και χρωματικές αλλοιώσεις είναι οι οπτικές ενδείξεις που παρατηρούνται σε επιφάνειες συνθέτων υλικών εκτεθειμένες σε υπεριώδη ακτινοβολία. Για την προστασία προτείνεται η εφαρμογή επιχρισμάτων ή ειδικών βαφών

3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της εφαρμογής των συνθέτων υλικών σε επεμβάσεις.

Τα σύνθετα υλικά σαφώς υπερτερούν σε κάποια σημεία σε σχέση με τους πιο «κλασικούς» τρόπους ενίσχυσης και επισκευής, αλλά «εμφανίζουν» και μειονεκτήματα τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κατά το σχεδιασμό και την επιλογή του τύπου επέμβασης, ειδικά σε υψηλής σημασίας έργα όπως οι γέφυρες.

Το σημαντικότερο ίσως πλεονέκτημα των σύνθετων υλικών είναι η μεγάλη ευκολία, ευελιξία και ταχύτητα εφαρμογής τους. Επιπρόσθετα, με τις σχετικές τεχνικές ενίσχυσης, οι οποίες γενικά συνίσταται στην μέσω ρητινών επικόλληση οπλισμού από τα υλικά αυτά στις εξωτερικές επιφάνειες των υπό ενίσχυση δομικών στοιχείων επιτυγχάνεται η αύξηση της αντοχής και πλαστιμότητας της διατομής χωρίς να μεταβάλλεται ουσιαστικά η γεωμετρία της.

Από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα των συνθέτων υλικών ιδιαίτερα έναντι των μεταλλικών ελασμάτων είναι το μικρό τους βάρος και η μεγάλη εφελκυστική αντοχή τους. Επιπλέον, είναι πιο εύκαμπτα (έκτος από το CFRP) και έχουν γραμμικά ελαστική συμπεριφορά μέχρι την αστοχία τους, με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζουν «πλατώ» διαρροής. Ωστόσο, η έλλειψη αυτή μπορεί να οδηγήσει σε ψαθυρή αστοχία, η οποία δεν είναι επιθυμητή ή αποδεκτή σχεδιαστικά.

Σημαντικό πλεονέκτημα των εξωτερικών οπλισμών από ΙΟΠ σε σύγκριση με τους αντίστοιχους μεταλλικούς είναι ότι οι πρώτοι δεν προσβάλλονται από διαδικασίες ηλεκτροχημικής διάβρωσης. Παρόλα αυτά η έκθεση τους στην ατμόσφαιρα μπορεί να μειώσει κάποιες μηχανικές τους ιδιότητες λόγω του αλκαλικού περιβάλλοντος ή της υπεριώδους ακτινοβολίας.

Το γεγονός ότι τα ΙΟΠ εκτός από τις σχετικά δύσκαμπτες λωρίδες (πάχους της τάξης του 1 mm) διατίθενται και σε εύκαμπτα «υφάσματα» (πάχους της τάξης του 0,1 - 0,4 mm)

δίνει τη δυνατότητα πλήρους επαφής του πρόσθετου οπλισμού με το υπό ενίσχυση μέλος, συνεισφέροντας έτσι στην αποτελεσματικότερη ανάληψη εντάσεων οφειλομένων σε υπάρχοντα βέλη κάμψης (με την προϋπόθεση ότι το ενισχυμένο στοιχείο είχε αποφορτισθεί πριν την τοποθέτηση των συνθέτων υλικών) αλλά και στην εξαιρετική συνάφεια του οπλισμού με το υπόστρωμά του, κάτι πολύ σημαντικό και ουσιώδες για την επιτυχία της ενίσχυσης ή επισκευής. Τέλος, στα θετικά στοιχεία των υλικών αυτών και των σχετικών τεχνικών επέμβασης συμπεριλαμβάνεται κατά τη γνώμη μας και το γεγονός ότι υφίστανται αξιόπιστα προσομοιώματα σχεδιασμού τους, τα οποία εντάσσονται στο σύστημα των ισχυρόντων Κανονισμών.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα των σύνθετων υλικών που τονίζεται στη βιβλιογραφία είναι το υψηλό κόστος τους, το οποίο όμως μειώνεται όσο η ζήτηση του υλικού αυξάνεται και η παραγωγή μεγαλώνει. Συνυπολογίζοντας και τα εργατικά, τα οποία στην περίπτωση των μεταλλικών ελασμάτων είναι προφανώς μεγαλύτερα, συνάγεται ότι το κόστος της συνολικής ενίσχυσης με ΙΟΠ συγκριτικά και με τα πλεονεκτήματα που προσφέρει αυτή η λύση είναι αποδεκτό [8]. Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής αποτελεί η μικρή εμπειρία για το υλικό και για τις κατασκευαστικές εφαρμογές της πράξης για μεγάλο χρονικό διάστημα. Οι έντονες ερπυστικές παραμορφώσεις αποτελούν ένα ακόμα αρνητικό της μεθόδου.

Πέρα από τα παραπάνω, τα σύνθετα υλικά ως σύστημα ενίσχυσης συγκεντρώνουν και τα ακόλουθα πλεονεκτήματα [8]:

- (α) Πρόκειται για σύστημα ενίσχυσης που μπορεί να εφαρμοστεί σε πάσης φύσεως διατομές.
- (β) Παρέχουν την δυνατότητα στον μελετητή να χρησιμοποιήσει τα ΙΟΠ σε όποια κατεύθυνση κρίνει ότι χρειάζεται, λόγω των πολλών και διαφορετικών τρόπων διάταξης των ινών μέσα στο υλικό.
- (γ) Παρέχουν μεγαλύτερη παθητική περίσφιγξη σκυροδέματος από το χάλυβα και έμμεση βελτίωση του δεσμού σκυροδέματος και οπλισμού.
- (δ) Δεν αυξάνουν τη μορφή και τις διαστάσεις των ενισχυμένων στοιχείων λόγω του ότι το πάχος τους είναι της τάξης του χιλιοστού.
- (ε) Είναι αποτελεσματικά στην προστασία από διάβρωση.
- (στ) Προσφέρονται για ταχεία αντισεισμική ενίσχυση στοιχείων παλαιότερων κατασκευών με ανεπαρκή οπλισμό, τόσο διαμήκη (οπότε και εφαρμόζονται για την ενίσχυση έναντι κάμψης όπως αναφέρεται στη συνέχεια) όσο και εγκάρσιο (οπότε εφαρμόζονται για ενίσχυση έναντι τέμνουσας).

Τέλος, σε σχέση με την εκτεταμένη και αρκετά δημοφιλή τεχνική επικόλλησης χαλύβδινων ελασμάτων, η εφαρμογή υφασμάτων από ΙΟΠ παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα.

- (α) *Αντοχή*: Η τελική αντοχή των ινοπλισμένων πολυμερών μπορεί να ποικίλει, ανάλογα με την αναλογία των ινών τους. Συνήθως επιτυγχάνεται εφελκυστική αντοχή του σύνθετου υλικού τουλάχιστον 3 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του χάλυβα του ελάσματος.

- (β) *Βάρος*: Η πυκνότητα των ινοπλισμένων πολυμερών ισούται με το 20% της πυκνότητας του χάλυβα. Έτσι, σε συνδυασμό με το συνήθως χαμηλότερο ειδικό βάρος τους, μπορούν να έχουν λιγότερο από το 10% του βάρους του χάλυβα ελασμάτων της ίδιας τελικής αντοχής, γεγονός που διευκολύνει την μεταφορά και την τοποθέτησή τους.
- (γ) *Μήκος*: Τα χαλύβδινα ελάσματα παράγονται σε περιορισμένα μήκη, από 6.00 έως 8.00 m το πολύ, και πιθανόν να χρειάζεται συνένωση αυτών, Αντίθετα, τα υφάσματα ινοπλισμένων πολυμερών έχουν δυνητικά απεριόριστο μήκος.
- (δ) *Συντήρηση της ενίσχυσης*: Τα μεταλλικά ελάσματα απαιτούν συνεχή συντήρηση με ειδικού τύπου βαφή για να αποφευχθεί η διάβρωσή τους, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε προσωρινή διακοπή της χρήσης μιας κατασκευής ή να προκαλέσει επιπλέον έξοδα. Τα ινοπλισμένα πολυμερή δεν απαιτούν τέτοια συντήρηση, μειώνοντας έτσι το «κόστος ζωής» της μεθόδου.
- (ε) *Επισκευή κατεστραμμένης ενίσχυσης*: Η επισκευή ενός υφάσματος ινοπλισμένων πολυμερών μπορεί να γίνει ευκολότερα από αυτήν ενός κατεστραμμένου μεταλλικού ελάσματος. Ένα μεταλλικό έλασμα, εάν υποστεί εκτεταμένη καταστροφή π.χ. από κρούση οχήματος, είναι απαραίτητη η πλήρης απομάκρυνση και αντικατάστασή του, ενώ αντίστοιχες βλάβες σε οπλισμούς από ινοπλισμένα πολυμερή είναι συνήθως τοπικές, αφού τα στοιχεία αυτά είναι λεπτότερα και πιο εύκαμπτα.

3.5 Εφαρμογή των συνθέτων υλικών για την καμπτική ενίσχυση στοιχείων σκυροδέματος.

Η εφαρμογή σύνθετων υλικών για ενισχύσεις έναντι κάμψης γίνεται μέσω ελασμάτων ή υφασμάτων τα οποία επικολλούνται στο εφελκόμενο πέλμα με διεύθυνση ινών τέτοια ώστε να παραλαμβάνουν τις λόγω κάμψης εφελκυστικές δυνάμεις. Η εφαρμογή σε υποστυλώματα με τους δύο παραπάνω τρόπους είναι γενικά δύσκολη, δεδομένου ότι στις περιπτώσεις αυτές πρέπει να εξασφαλισθεί η αγκύρωση των οπλισμών εντός των κόμβων.

Ο μηχανισμός αστοχίας του ενισχυμένου στοιχείου (υπό την προϋπόθεση επαρκούς αγκύρωσης) θα είναι ένας εκ των τριών [8]:

- (α) Διαρροή εφελκόμενου χάλυβα, σύνθλιψη σκυροδέματος
- (β) Διαρροή εφελκόμενου χάλυβα, αποκόλληση ή θραύση σύνθετων υλικών
- (γ) Σύνθλιψη σκυροδέματος

Ο πιο επιθυμητός τρόπος αστοχίας είναι ο πρώτος σύμφωνα με τον οποίο έχουμε πρώτα διαρροή του διαμήκους οπλισμού σε εφελκυσμό και ακολούθως σύνθλιψη του σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη, χωρίς να υπάρχει αστοχία ή κάποιου είδους αποκόλληση στα σύνθετα υλικά. Ο δεύτερος τρόπος αστοχίας είναι και ο πιο σπάνιος και ενδέχεται να εμφανιστεί μόνο αν το εμβαδό της διατομής των σύνθετων υλικών είναι πάρα πολύ μικρό. Σύμφωνα με τον τρίτο μηχανισμό, η θραύση σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη προηγείται οποιασδήποτε άλλης αστοχίας και αντιστοιχεί σε ψαθυρή συμπεριφορά. Αυτός ο τρόπος δεν είναι αποδεκτός. Σημειώνεται ότι η αποτελεσματικότητα των σύνθετων υλικών στην αύξηση της ροπής αντοχής εξαρτάται σημαντικά από το μέγεθος του αξονικού φορτίου, και πάντα μειώνεται όσο αυτό αυξάνεται.

Σαν γενική παρατήρηση αξίζει να αναφερθεί ότι η εφαρμογή των σύνθετων υλικών για την αύξηση της καμπτικής αντοχής υποστυλωμάτων δεν είναι πάντοτε πρακτικά (κατασκευαστικά) εφικτή λόγω της δυσκολίας επαρκούς αγκύρωσης του πρόσθετου οπλισμού, ενώ η αποτελεσματικότητά της ενδέχεται να είναι περιορισμένη εάν η τιμή της αξονικής δύναμης στο υπό ενίσχυση στοιχείο είναι υψηλή.

3.6 Εφαρμογή των συνθέτων υλικών για την διατμητική ενίσχυση στοιχείων σκυροδέματος.

Η ενίσχυση στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος σε διάτμηση με σύνθετα υλικά επιτυγχάνεται μέσω υφασμάτων ή, σπανιότερα, ελασμάτων, τα οποία επικολλούνται στις εξωτερικές επιφάνειες με τις ίνες κατά το δυνατόν παράλληλες στις τροχιές των κύριων τάσεων, δηλαδή περίπου κάθετα στις ρωγμές.

Βέβαια, αυτό δεν είναι γενικά εφικτό, οπότε, όπως στην περίπτωση της χρήσης συνδετήρων, οι ίνες εφαρμόζονται στις πιο πολλές περιπτώσεις με διεύθυνση κάθετη στον άξονα των δομικών μελών.

Η τέμνουσα δύναμη που λαμβάνεται από μανδύα ΙΟΠ δίνεται σε αναλογία με τους συνδετήρες από τη σχέση [8]:

$$V_{fd} = 2 \cdot t_f \cdot d_f \cdot (\varepsilon_{fe,d} \cdot E_f) \cdot (\cot\theta + \cot\alpha) \cdot \sin^2\alpha \quad (3.1)$$

όπου:

d_f το ύψος του μανδύα που διαπερνάται από τη ρωγμή, μετρούμενο από τη στάθμη του διαμήκους οπλισμού και ίσο με $0,9d$ αν ο μανδύας καλύπτει πλήρως τις πλευρές.

$\alpha = 90^\circ$ γιατί συνήθως οι ίνες εφαρμόζονται κάθετα στον άξονα του υποστυλώματος

$\theta = 45^\circ$ γωνία ρωγμής ως προς τον άξονα του μέλους

Με τις παραδοχές αυτές καταλήγουμε στη σχέση:

$$V_{fd} = 2 \cdot t_f \cdot (0,9d) \cdot \varepsilon_{fe,d} \cdot E_f \quad (3.2)$$

Οπότε:

$$t_f = V_{fd} / (2 \cdot (0,9d) \cdot \varepsilon_{fe,d} \cdot E_f) \quad (3.3)$$

όπου

$\varepsilon_{fe,d}$ 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), ίση με [8]:

$$\varepsilon_{fe,d} = (1 - 0,5d_f/0,9d) \varepsilon_{fd,max} \quad (3.4)$$

Η μέγιστη παραμόρφωση σχεδιασμού των σύνθετων υλικών, $\varepsilon_{fd,max}$, υπολογίζεται ανάλογα με τον αναμενόμενο τρόπο αστοχία του οπλισμού ως εξής [8]:

(α) Για θραύση των σύνθετων υλικών που αναμένεται να συμβεί κατά κανόνα σε επαρκώς αγκυρωμένους μανδύες:

$$\varepsilon_{fd,max} = f_{fd,e} / E_f \quad (3.5)$$

όπου $f_{fd,e}$ είναι η μειωμένη εφελκυστική αντοχή σχεδιασμού των συνθέτων υλικών, λόγω συγκεντρώσεων τάσεων στις γωνίες του μέλους, που προκύπτει από τη σχέση :

$$f_{fd,e} = \eta_e f_{fd} \quad (3.6)$$

Λόγω έλλειψης περισσότερων στοιχείων μπορεί να θεωρείται $\eta_e = 0,8$. Οπότε μετά από πράξεις η Εξ. 3.3 μετασχηματίζεται ως εξής:

$$t_f = V_{fd} / (2 \cdot (0,9d) \cdot (1 - 0,5d_f / 0,9d) \cdot 0,8 f_{fd}) \quad (3.7)$$

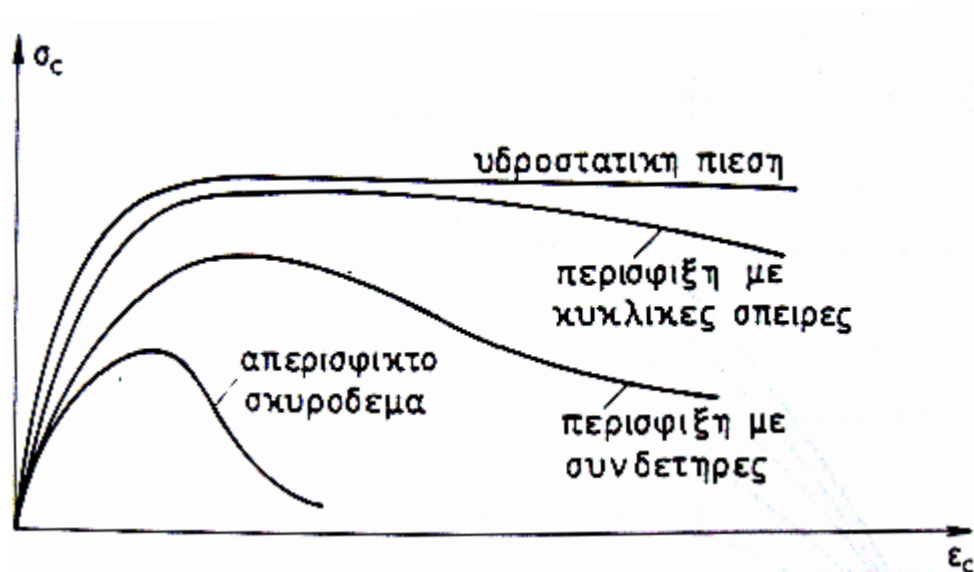
- (β) Η αποκόλληση των σύνθετων υλικών έχει μεγαλύτερη πιθανότητα για να συμβεί όταν οι μανδύες είναι ανεπαρκώς αγκυρωμένοι, όπως είναι οι τρίπλευροι και δίπλευροι, οπότε η πιθανότητα αστοχίας από θραύση είναι σχετικά μικρή. Αυτός ο τρόπος αστοχίας είναι σχετικά απίθανος για τα υποστυλώματα ή βάρθρα, μιας και συνήθως εφαρμόζονται είναι κλειστού τύπου μανδύες.
- (γ) Η ανάπτυξη μεγάλου ανοίγματος της λοξής ρωγμής ενδέχεται να μειώσει σημαντικά τη συνεισφορά των μηχανισμών ανάληψης τέμνουσας (λόγω σημαντικής μείωσης της αλληλεμπλοκής των αδρανών και/ή της θλιβόμενης ζώνης), με αποτέλεσμα το μέλος να βρεθεί στην οριακή κατάσταση αστοχίας λόγω τέμνουσας πριν αστοχήσουν (λόγω θραύσης ή αποκόλλησης) τα σύνθετα υλικά. Ωστόσο, λαμβάνονται κατά το σχεδιασμό μέτρα ώστε ο μηχανισμός αυτός να αποφευχθεί.

Συμπερασματικά ο μόνος πιθανός μηχανισμός αστοχίας είναι ο πρώτος και το απαιτούμενο πάχος μανδύα υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξ. 3.7.

3.7 Εφαρμογή περίσφιγξης με μανδύες σύνθετων υλικών.

Η περίσφιγξη του σκυροδέματος είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που λαμβάνεται υπόψιν κατά τον σχεδιασμό κατακορύφων στοιχείων, υπό σύνθετη αξονική και καμπτική καταπόνηση. Το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι η βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος, όπως αυτά αποτυπώνονται στο σχετικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων (Σχ. 3.3). Σύμφωνα με τον κανονιστικό πλαίσιο των Ε.Α.Κ. και Ε.Κ.Ω.Σ. 2000 (ΟΑΣΠ, 2003, 2000) ο οπλισμός περίσφιγξης οφείλει να είναι επαρκής:

- (α) για την αντιστάθμιση της απώλειας εμβαδού διατομής σκυροδέματος έξω από τους συνδετήρες, μετά την υπέρβαση της κρίσιμης παραμόρφωσης του μη-περίσφιγμένου σκυροδέματος («αποφλοιώση») και
- (β) για την πρόσδοση ικανής δυνατότητας στροφής της κρίσιμης περιοχής του στοιχείου («πλαστιμότητα»), έτσι ώστε η στροφή αυτή να είναι συμβιβαστή με την προεκτιμηθείσα στάθμη συνολικής απορρόφησης ενέργειας του δομήματος, όπως εκφράζεται από τον δείκτη σεισμικής συμπεριφοράς.



Σχήμα 3.3 Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων σκυροδέματος για διάφορους τύπους περίσφιξης με συμβατικό οπλισμό [8].

Η αποδοτικότητα της περίσφιξης εξαρτάται τόσο από τις αποστάσεις των συνδετήρων καθ' ύψος του στοιχείου (α_s), όσο και από την διάταξη των συνδετήρων μέσα στην διατομή (α_n). Ως περισφιγμένο θεωρούμε το σκυροδέμα το οποίο βρίσκεται μεταξύ των συνδετήρων και στο οποίο μπορούμε να υποθέσουμε ότι αναπτύσσονται τριαξονικές συνθήκες εντάσεως. Τόσο καθ' ύψος, όσο και μέσα στην διατομή, υπάρχει τμήμα του σκυροδέματος που δεν «απολαμβάνει» την περίσφιξη.

Ο συντελεστής αποδοτικότητας της συμβατικής περίσφιξης εκτιμάται με βάση τον Ε.Κ.Ω.Σ. 2000 (ΟΑΣΠ, 2000) ως εξής:

Ανάλογα με την διάταξη των συνδετήρων:

$$\alpha_n = 1 - \sum_1^n \frac{b_i^2}{6A_o} \quad (3.8)$$

όπου:

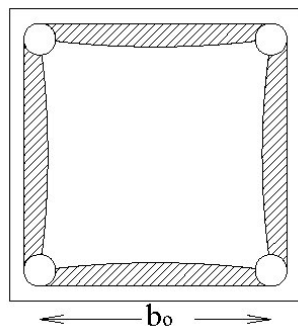
n ο αριθμός κορυφών συνδετήρων ή κόμβων με εγκάρσιους συνδέσμους που συγκρατούν διαμήκειες ράβδους

b_i η απόσταση μεταξύ διαδοχικών κορυφών ή κόμβων, όχι μεγαλύτερη από 200mm ή 300mm.

Ανάλογα της απόστασης των συνδετήρων:

(α) Για τετραγωνικής διατομής υποστυλώματα (Σχ. 3.4) ισχύει:

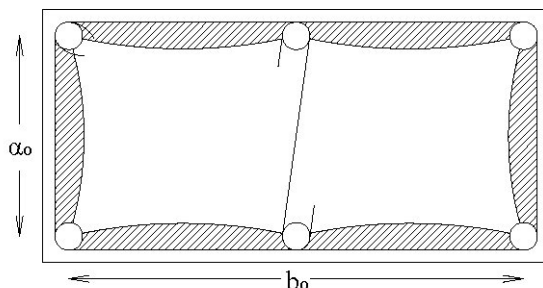
$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s'}{2b_o}\right) * \left(1 - \frac{s'}{2b_o}\right) = \left(1 - \frac{s'}{2b_o}\right)^2 \quad (3.9)$$



Σχήμα 3.4 Περίσφιγξη τετραγωνικής διατομής με «συμβατικό» συνδετήρα [7].

(β) Για ορθογωνικής διατομής υποστυλώματα (Σχ. 3.5) ισχύει:

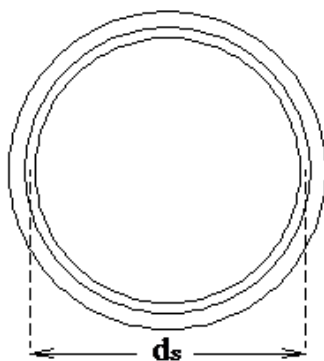
$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s'}{2a_o}\right) * \left(1 - \frac{s'}{2b_o}\right) \quad (3.10)$$



Σχήμα 3.5 Περίσφιγξη ορθογωνικής διατομής υποστυλώματος με «συμβατικό» συνδετήρα [7].

(γ) Για κυκλικής διατομής υποστυλώματα (Σχ. 3.6) ισχύει:

$$\alpha_s = \left(1 - \frac{s'}{2d_s}\right) \quad (3.11)$$



Σχήμα 3.6 Περίσφιγξη κυκλικής διατομής με κυκλική σπείρα [7].

Η επιτυγχανόμενη μέση εγκάρσια πίεση στον πυρήνα λόγω περισφίγξεως είναι περίπου:

$$\sigma_3 = f_l = \frac{1}{2} \cdot a \cdot \omega_{wd} \cdot f_{cd} \quad (3.12)$$

όπου:

$$a = a_n \cdot a_s \quad (3.13)$$

Τέλος, το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό του οπλισμού περίσφιγξης ω_{wd} εκφράζεται ως:

$$\omega_{wd} = \frac{\text{όγκος κλειστών συνδετήρων} \cdot f_{yd}}{\text{όγκος σκυροδέματος πυρήνα} \cdot f_{cd}} \quad (3.14)$$

Δεδομένου ότι ο οπλισμός περίσφιγξης είναι πολύ σημαντικός σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος, κυρίως για την επίτευξη πλαστιμότητας, ιδιαίτερη μέριμνα δίνεται στην περίπτωση στοιχείων με ελλειπείς συνδετήρες. Για τις περιπτώσεις αυτές προτείνονται οι παρακάτω λύσεις ενίσχυσης [7]:

- (α) Χρήση ολόσωμου μανδύα από φύλλα χάλυβα ή ΙΟΠ, επικολλητού επί των πλευρών του υποστυλώματος.
- (β) Χρήση μεταλλικού κλωβού, ο οποίος υλοποιείται με προσαρμογή τεσσάρων γωνιακών στις κορυφές του υποστυλώματος, τα οποία συσφίγγονται με ειδικά κλειδιά, έτσι ώστε να επιβληθεί περίσφιγξη. Πάνω στα γωνιακά συγκολλούνται οριζόντια μεταλλικά ελάσματα.
- (γ) Χρήση επικολλητών χαλύβδινων κολλάρων με σύνηθες πάχος 1-2 mm ή λωρίδων από ΙΟΠ.
- (δ) Χρήση προεντεταμένων κολλάρων από χάλυβα ή ΙΟΠ, που μπορεί να έχουν την μορφή ταινιών.
- (ε) Χρήση σπειροειδούς οπλισμού που μπορεί να είναι από μεταλλικό έλασμα ή από ΙΟΠ.

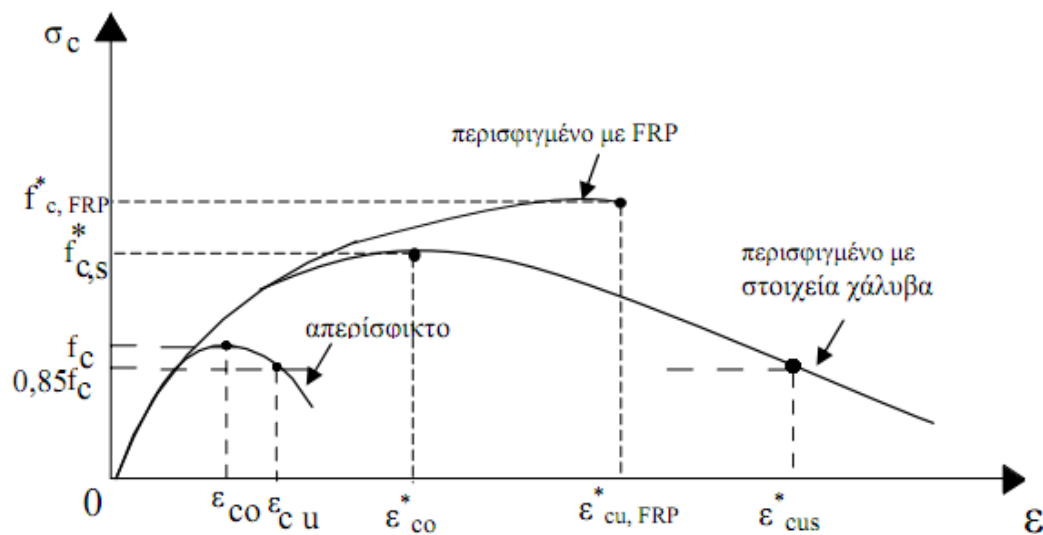
Οι μανδύες από ινοπλισμένα πολυμερή αποτελούν έναν από τους ~~φω~~ πλέον εύχρηστους τρόπους επιβολής της περίσφιγξης σε υποστυλώματα και βάθρα γεφυρών. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την συχνά εντυπωσιακή βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος που επιτυγχάνεται έχει οδηγήσει στη ραγδαία εξάπλωση της εφαρμογής αυτής της τεχνικής.

Η δράση των συνθέτων υλικών κατά την περίσφιγξη του σκυροδέματος είναι εξαιρετικά ευνοϊκή και θεωρείται ευνοϊκότερη από αυτήν των μεταλλικών μανδύων ίσης δυστένειας. Κατά την καταπόνηση υποστυλωμάτων λόγω κάμψης σε συνδυασμό με αξονικά φορτία, το σκυρόδεμα υφίσταται διόγκωση με αποτέλεσμα ο φαινόμενος συντελεστής του Poisson να φτάνει και να ξεπερνάει την οριακή τιμή 0,5. Ο εξωτερικός μανδύας, όπως και οι συνδετήρες, δρα παθητικά ως κινηματικός περιορισμός της διόγκωσης, αναπτύσσοντας εφελκυσμό λόγω τάνυσης μέχρι την αστοχία του. Σε κυκλικές διατομές η δράση αυτή είναι ιδανικά ομοιόμορφη στο σύνολο της διατομής και μπορεί να εξιδανικευτεί ως υδραυλική

πίεση, οπότε ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιξης είναι ίσος με μονάδα. Σε ορθογωνικές διατομές όμως, ο κινηματικός περιορισμός εξασθενεί επειδή η διόγκωση μπορεί να λάβει χώρα με κάμψη του συνδετήρα ή του μανδύα προς τα έξω στο μέσο των πλευρών. Σε αυτήν την περίπτωση ο συντελεστής αποδοτικότητας της περίσφιξης κυμαίνεται από 0,5 έως 0,6 για τετράγωνη διατομή και είναι περίπου μηδέν για επιμήκη ορθογωνική διατομή με λόγο πλευρών περίπου 3. Οι αναπτυσσόμενες τάσεις περίσφιξης έχουν ως αποτέλεσμα:

- (α) Την αύξηση της θλιπτικής αντοχής και της παραμορφωσιμότητας του σκυροδέματος.
- (β) Την αύξηση της γωνίας στροφής χορδής ενός μέλους στην (καμπτική) αστοχία, δηλαδή αύξηση της πλαστιμότητας.
- (γ) Τη βελτίωση των συνθηκών συνάφειας μεταξύ ράβδων οπλισμού και σκυροδέματος σε περιοχές με ματίσεις και άρα την παρεμπόδιση της ολίσθησης των διαμήκων ράβδων στις περιοχές αυτές.
- (δ) Την καθυστέρηση της εμφάνισης λυγισμού των διαμήκων ράβδων σε περιοχές με αραιή διάταξη συνδετήρων.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 3.7) δίνονται τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης για δομικό μέλος οπλισμένου σκυροδέματος περισφιγμένου με μανδύα ΙΟΠ και με μεταλλικό μανδύα, και γίνεται η σύγκριση μεταξύ τους, καθώς και με την περίπτωση απουσίας περίσφιξης. Παρατηρείται πως στην περίπτωση του μανδύα ΙΟΠ επιτυγχάνεται υψηλότερη αντοχή αλλά μικρότερη πλαστιμότητα, καθώς δεν υπάρχει ικανότητα ανάληψης δυνάμεων και παραμορφώσεων μετά την θραύση. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένα από τα βασικά μειονεκτήματα μειονέκτημα των ινοπλισμένων πολυμερών.

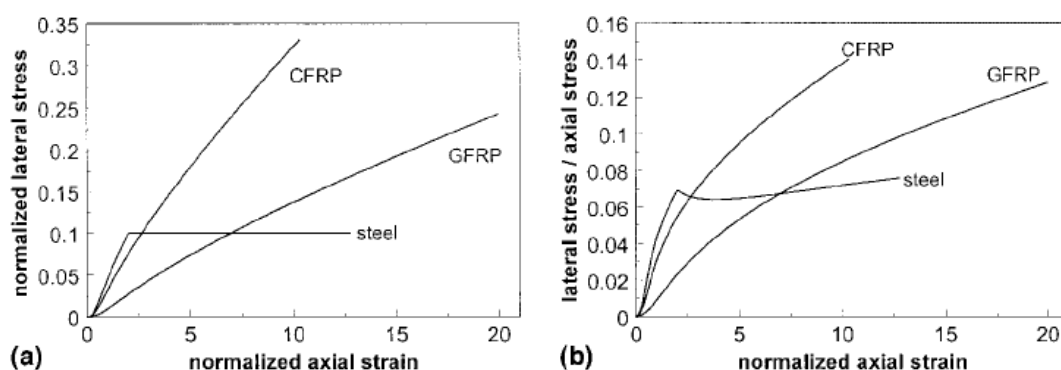


Σχήμα 3.7 Σχέσεις τάσης – παραμόρφωσης για σκυρόδεμα περισφιγμένο με χάλυβινα στοιχεία και με ινοπλισμένα πολυμερή [18].

Η μελέτη γύρω της περίσφιξης δομικών μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα με χρήση ΙΟΠ έχει βασισθεί σε πειράματα σε άοπλα, αρχικά, δοκίμια κυλινδρικά ή πρισματικά. Οι μεταβλητές που επηρεάζουν το πρόβλημα και έχουν διερευνηθεί πειραματικά είναι οι ακόλουθες [18].

- (α) ο τύπος των ινών (CFRP ή GFRP)
- (β) ο αριθμός των στρώσεων του ινοπλισμένου υφάσματος
- (γ) η κλίση των ινών ως προς τον διαμήκη άξονα του δοκιμίου
- (δ) η χρήση ολόσωμης στρώσης ή λωρίδων
- (ε) η γεωμετρία της κατασκευής (στην περίπτωση των ορθογωνικών διατομών)
- (στ) η ακτίνα καμπύλωσης των ακμών (επίσης για ορθογωνικές διατομές)
- (ζ) η ποιότητα και η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος και
- (η) το είδος της φόρτισης (μονοτονική ή ανακυκλιζόμενη).

Στο Σχήμα 3.8(α), συγκρίνεται η αποτελεσματικότητα της περίσφιγξης (διαγράμματα πλευρικής τάσης συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης) για τους τρεις τύπους μανδύων: μεταλλικούς, ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες γυαλιού και ινοπλισμένων πολυμερών με ίνες άνθρακα. Πριν τη διαρροή, η τάση περίσφιγξης που «ασκείται» από τον μανδύα χάλυβα είναι υψηλότερη, ωστόσο παραμένει σταθερή μετά από τη διαρροή. Οι μανδύες ΙΟΠ «προσφέρουν» μια μονοτονικά αυξανόμενη τάση περίσφιγξης με μέγιστη τιμή έως δύο φορές (GFRP) ή τρεις φορές (CFRP) μεγαλύτερη αυτής του χάλυβα, για το ίδιο ογκομετρικό ποσοστό οπλισμού. Στο Σχήμα 3.8(β), συγκρίνεται η αποτελεσματικότητα των μανδύων όπως εκφράζεται από τον λόγο της πλευρικής τάσης προς την αντίστοιχη αξονική. Σημειώνεται ότι η μικρή αύξηση της αποτελεσματικότητας του μανδύων χάλυβα μετά τη διαρροή που παρατηρείται οφείλεται στην φθίνουσα συμπεριφορά του σκυροδέματος, ενώ στις άλλες δύο περιπτώσεις μανδύων που εξετάζονται, η ελαστική συμπεριφορά των ΙΟΠ συνεπάγεται συνεχή αύξηση του λόγου πλευρικής προς αξονικής τάσης. Από τις καμπύλες του Σχήματος 3.8 είναι εμφανές πώς τα δύο υλικά ΙΟΠ φθάνουν σχεδόν στο ίδιο επίπεδο αποτελεσματικότητας (μέγιστης τάσης), αλλά σε διαφορετικά επίπεδα αξονικής παραμόρφωσης. Το γεγονός αυτό καθιστά περισσότερο ελκυστική τη χρήση των μανδύων GFRP ώστε να «αξιοποιείται» η ολκιμότητα του διαμήκους οπλισμού, διατηρώντας παράλληλα την ίδια αποτελεσματικότητα όσον αφορά την αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος, με τους μανδύες CFRP.



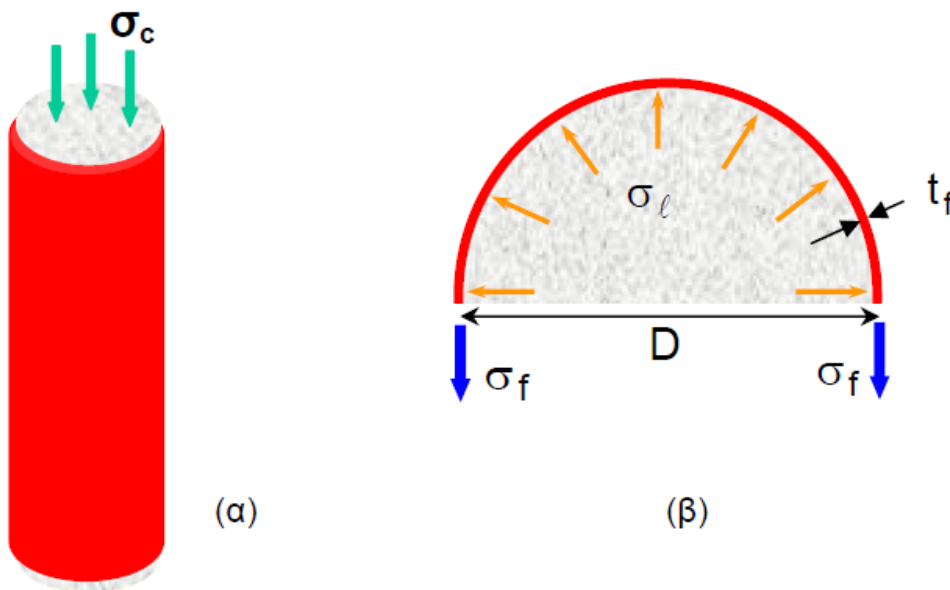
Σχήμα 3.8 Σύγκριση της αποτελεσματικότητας περίσφιγξης για τρεις τύπους μανδύων [18].

Ο καταστατικός νόμος του περισφιγμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά βασίζεται στη συμπεριφορά ενός κυλινδρικού στοιχείου από σκυρόδεμα, διαμέτρου D , το οποίο περιβάλλεται από μανδύα πάχους t_f και μέτρου ελαστικότητας E_f , με τις ίνες του κατά τη

διεύθυνση της περιμέτρου και στο σύνολο της επιφάνειάς της (Σχ. 3.9). Οι λόγω διόγκωσης εγκάρσιες (κατά την ακτινική διεύθυνση) τάσεις στον μανδύα που οφείλονται στην αξονική καταπόνησή του δίνονται από την σχέση [8].

$$\sigma_l = \frac{2 \cdot t_f}{D} \sigma_f = \frac{2 \cdot t_f}{D} E_f \cdot \varepsilon_f = \frac{1}{2} \cdot \rho_f E_f \cdot \varepsilon_f \quad (3.15)$$

Η σχέση αυτή δίνει ουσιαστικά τις τάσεις περίσφιγξης που δημιουργούνται λόγω της ύπαρξης του μανδύα σύνθετων υλικών. Στην παραπάνω σχέση:



Σχήμα 3.9 (α) Αξονική καταπόνηση υποστυλώματος περισφιγμένου από μανδύα σύνθετων υλικών και (β) Ανάπτυξη εγκάρσιων τάσεων λόγω διόγκωσης [8].

σ_f είναι η εφελκυστική τάση στον μανδύα

ε_f είναι η εφελκυστική παραμόρφωση στον μανδύα

ρ_f είναι το γεωμετρικό ποσοστό οπλισμού σύνθετων υλικών. Το ποσοστό αυτό δίνεται από το πηλίκο του εμβαδού της επιφάνειας του σύνθετου υλικού προς το εμβαδό της συνολικής επιφάνειας της διατομής σκυροδέματος:

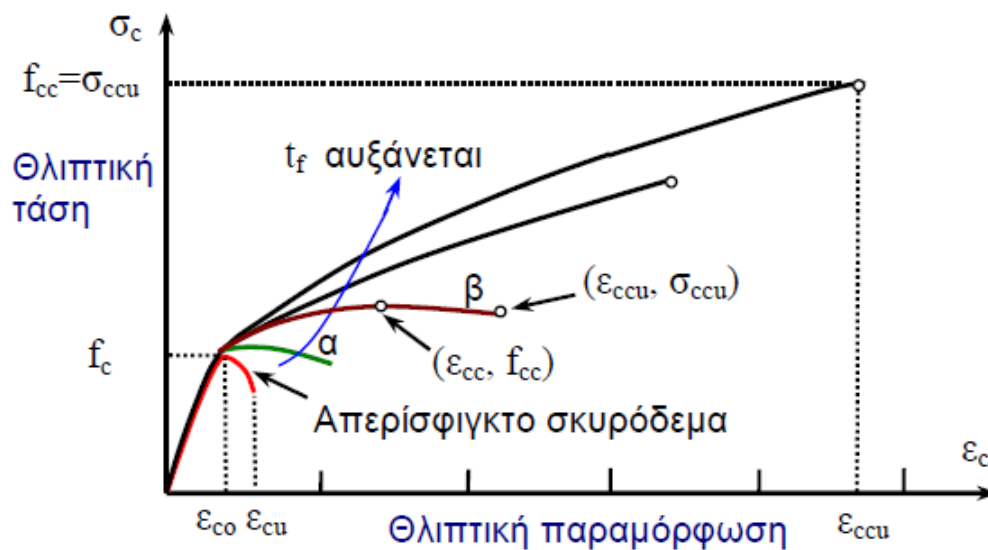
$$\rho_f = \frac{t_f \times (2\pi R/2)}{\pi R^2/2} = \frac{t_f}{R/2} = \frac{4t_f}{D} \quad (3.16)$$

Αποτέλεσμα των τάσεων περίσφιγξης σ_l είναι η παρεμπόδιση της ρηγμάτωσης και άρα η αύξηση της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας του σκυροδέματος. Όταν η εφελκυστική τάση σ_f γίνει ίση με την αντοχή του μανδύα f_{fd} τότε έχουμε θραύση του μανδύα, υπό την προϋπόθεση ότι δεν θα έχει προηγηθεί η αποκόλλησή του. Η εφελκυστική αντοχή του μανδύα κατά την έννοια της περιμέτρου είναι γενικά μικρότερη από την εφελκυστική αντοχή των σύνθετων υλικών f_{fd} όπως αυτή μετράται μέσω δοκιμών εφελκυσμού. Αυτό οφείλεται στην πολυαξονικότητα της εντατικής κατάστασης στον μανδύα, σε τυχόν συγκεντρώσεις

τάσεων σε γωνίες, στην ενδεχόμενη ύπαρξη πολλών στρώσεων αλλά και στην ποιότητα εφαρμογής του μανδύα. Η διαφορά αυτή μπορεί να ληφθεί υπόψη μέσω ενός μειωτικού συντελεστή η_e ο οποίος συνήθως λαμβάνει τιμές τη τάξης του 0,6 – 0,9 [8]:

$$f_{fde} = \eta_e \cdot f_{fd} \quad (3.17)$$

Η σχέση θλιπτικής τάσης – παραμόρφωσης για σκυρόδεμα περισφιγμένο με μανδύα συνθέτων υλικών απεικονίζεται στο Σχήμα 3.10. Η καμπύλη με κόκκινο χρώμα αναφέρεται στο απερίσφιγτο σκυρόδεμα, ενώ οι υπόλοιπες καμπύλες παριστάνουν πως μεταβάλλεται η ικανότητα παραμόρφωσης με την αύξηση του πάχους του μανδύα.



Σχήμα 3.10 Καμπύλες θλιπτικής τάσης – παραμόρφωσης για σκυρόδεμα απερίσφιγτο και περισφιγμένο με σύνθετα υλικά μεταβλητού πάχους [8].

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 3.10) μπορούν να διατυπωθούν οι εξής παρατηρήσεις [8]:

- (α) Η καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης είναι περίπου διγραμμική, με αλλαγή κλίσης στην παραμόρφωση ($\epsilon_{co}=0,002$) που αντιστοιχεί στην αντοχή του απερίσφιγτου σκυροδέματος. Μέχρι εκείνο το σημείο έχουμε σύμπτωση των καμπύλων του περισφιγμένου και του απερίσφιγτου σκυροδέματος γεγονός που υποδηλώνει τη μη ενεργοποίηση του μανδύα. Από το σημείο αυτό ο μανδύας αρχίζει να δρα περιορίζοντας την πλευρική διόγκωση.
- (β) Αν το πάχος του μανδύα είναι σχετικά μικρό, η αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος f_{cc} αντιστοιχεί σε παραμόρφωση ϵ_{cc} μικρότερη από την οριακή ϵ_{ccu} .
- (γ) Αν το πάχος του μανδύα είναι εξαιρετικά μικρό αυξάνεται μόνο η οριακή παραμόρφωσή του ϵ_{ccu} .
- (δ) Για δεδομένο τύπο συνθέτων υλικών, η αντοχή f_{cc} και η οριακή παραμόρφωση ϵ_{ccu} του περισφιγμένου σκυροδέματος αυξάνονται με το πάχος του μανδύα.

- (ε) Για μανδύες ίσης δυστένειας (εκφράζεται με το γινόμενο $E_f \cdot t_f$) η αντοχή f_{cc} αυξάνεται με την οριακή παραμόρφωση του μανδύα.

Συνεπώς, προκύπτει ότι η αποτελεσματικότητα ενός μανδύα σύνθετων υλικών στον εγκιβωτισμό του σκυροδέματος εξαρτάται από τις ακόλουθες παραμέτρους:

- (α) από το πάχος του μανδύα t_f , σε συνδυασμό με τον συνολικό αριθμό των στρώσεων
- (β) από την εφελκυστική αντοχή των σύνθετων υλικών κατά την έννοια της περιμέτρου, f_{fde} , και
- (γ) από τη γεωμετρία της εγκιβωτισμένης διατομής (αποδοτικότητα περίσφιγξης 100% σε κυκλικά υποστυλώματα και περίπου 50% σε ορθογωνικά).

Η επίδραση των παραμέτρων αυτών στα χαρακτηριστικά του περισφιγμένου σκυροδέματος διερευνάται στην εργασία αυτή στο επόμενο κεφάλαιο, μέσω της προδιαστασιολόγησης επεμβάσεων σε βάθρα γεφυρών.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η ακριβής πρόβλεψη της συμπεριφοράς και της ικανότητας παραμόρφωσης ενός δομικού μέλους ενισχυμένου με μανδύα σύνθετων υλικών έχει αποτελέσει αντικείμενο διεθνούς έρευνας. Έχουν προταθεί προσομοιώματα για τον υπολογισμό της τελικής αντοχής και ικανότητας παραμόρφωσης, υπό τη μορφή κλειστών αναλυτικών τύπων. Τα προσομοιώματα αυτά προβλέπουν για το ενισχυμένο μέλος:

- (α) την θλιπτική τάση αστοχίας $f_{cc,u}$
- (β) την ανηγμένη αξονική παραμόρφωση κατά την αστοχία $\epsilon_{cc,u}$
- (γ) την ανηγμένη εγκάρσια παραμόρφωση κατά την αστοχία $\epsilon_{lat,cc,u}$

Οι κλειστοί αναλυτικοί τύποι που υπολογίζουν τις τιμές των παραπάνω μεγεθών περιλαμβάνουν ως μεταβλητές [8]:

- (α) την εφελκυστική αντοχή των σύνθετων υλικών f_f
- (β) το μέτρο ελαστικότητας των σύνθετων υλικών E_f
- (γ) το πάχος του μανδύα t_f
- (δ) την αντοχή του απερίσφιγκτου μέλους f_{c0}
- (ε) την οριακή παραμόρφωση θραύσης του απερίσφιγκτου μέλους ϵ_{c0}
- (στ) την τάση περίσφιγξης f_t για την οποία ισχύει:

$$f_t = \frac{2t_f f_f}{D} \quad (3.17)$$

3.8 Διαδικασίες παρασκευής και εφαρμογής των σύνθετων υλικών σε επεμβάσεις.

Η διαδικασία εφαρμογής των ΙΟΠ αρχικά περιλαμβάνει το στάδιο προετοιμασίας της επιφάνειας του σκυροδέματος. Η προετοιμασία αυτή έχει γενικά πολύ μεγάλη επίδραση στην μακρόχρονη αντοχή της σύνδεσης. Γίνεται αντιληπτό, λοιπόν, πως η προσεκτική

προετοιμασία της επιφάνειας του δομικού στοιχείου συνδέεται άμεσα με την συμπεριφορά του ενισχυμένου δομικού στοιχείου με την πάροδο του χρόνου.

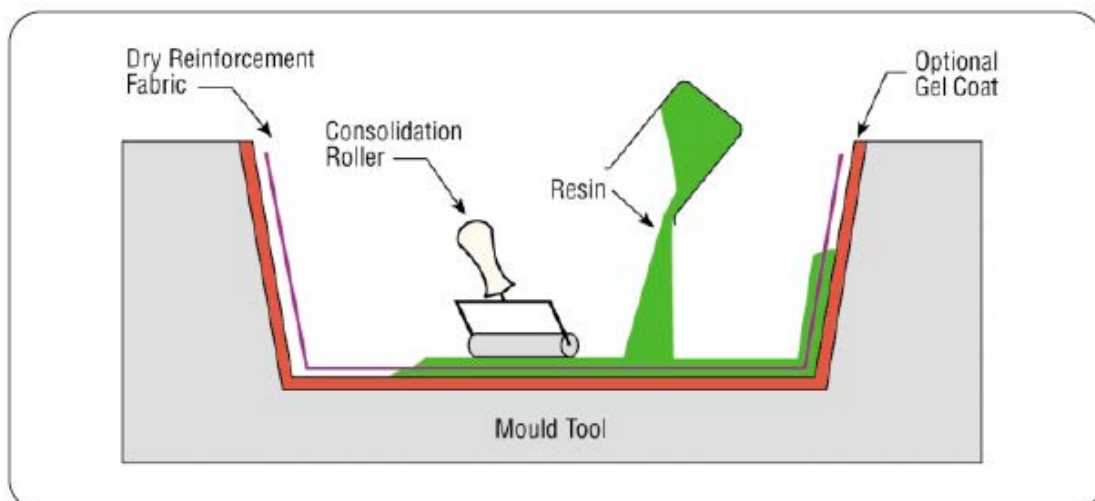
Αρχικά λοιπόν γίνεται απομάκρυνση του βλαμμένου σκυροδέματος ή του σκυροδέματος που δεν ικανοποιεί τις προδιαγραφές και αντικαθίστανται με υλικό καλής ποιότητας. Το υψηλής περιεκτικότητας σε τσιμέντο, σκυρόδεμα πρέπει να απομακρύνεται με αμμοβολή. Στην συνέχεια με την χρήση πεπιεσμένου αέρα απομακρύνονται τα θραύσματα και η σκόνη.

Η διαδικασία εφαρμογής των ΙΟΠ ξεκινά με την επάλειψη της επιφάνειας του δομικού στοιχείου με εποξική, κυρίως, ρητίνη. Κατά κανόνα χρησιμοποιείται εποξική ρητίνη δυο συστατικών που εφαρμόζεται μεταξύ του υποστρώματος και του σύνθετου υλικού, εξασφαλίζοντας έτσι τη συνεργασία τους και τη μεταφορά τάσεων από το πρώτο στο δεύτερο. Στη συνέχεια τοποθετείται η πρώτη στρώση του υφάσματος και επαναλαμβάνεται η διαδικασία με την τοποθέτηση επιπλέον στρώσεων, σύμφωνα με την μελέτη επισκευής – ενίσχυσης. Το χρονικό περιθώριο μεταξύ προετοιμασίας της επιφάνειας και επικόλλησης των σύνθετων υλικών πρέπει να είναι εξαιρετικά μικρό για την αποφυγή πιθανής ενανθράκωσης του σκυροδέματος.

Οι πιο συνηθισμένες τεχνικές εφαρμογής ινοπλισμένων πολυμερών σε επεμβάσεις, όπως προκύπτει από την βιβλιογραφία [8], είναι οι ακόλουθες:

(α) Εφαρμογή με το χέρι:

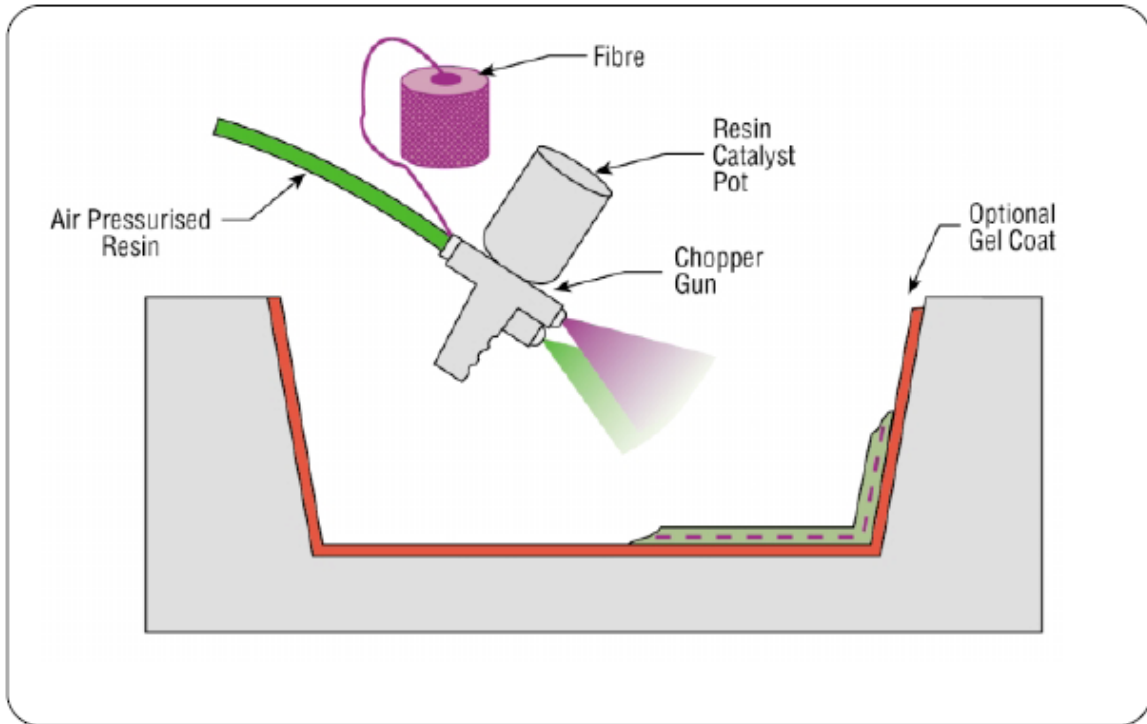
Η ρητίνη εμποτίζεται με το χέρι μεταξύ των ινών, οι οποίες βρίσκονται σε πλεκτή μορφή (ύφασμα, Σχ. 3.11). Η τελική διαμόρφωση γίνεται με ρολλά ή βούρτσες και το προϊόν αφήνεται όπως πριν να ωριμάσει σε κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες



Σχήμα 3.11 Εφαρμογή σύνθετων υλικών με το χέρι [1].

(β) Εφαρμογή με ψεκασμό:

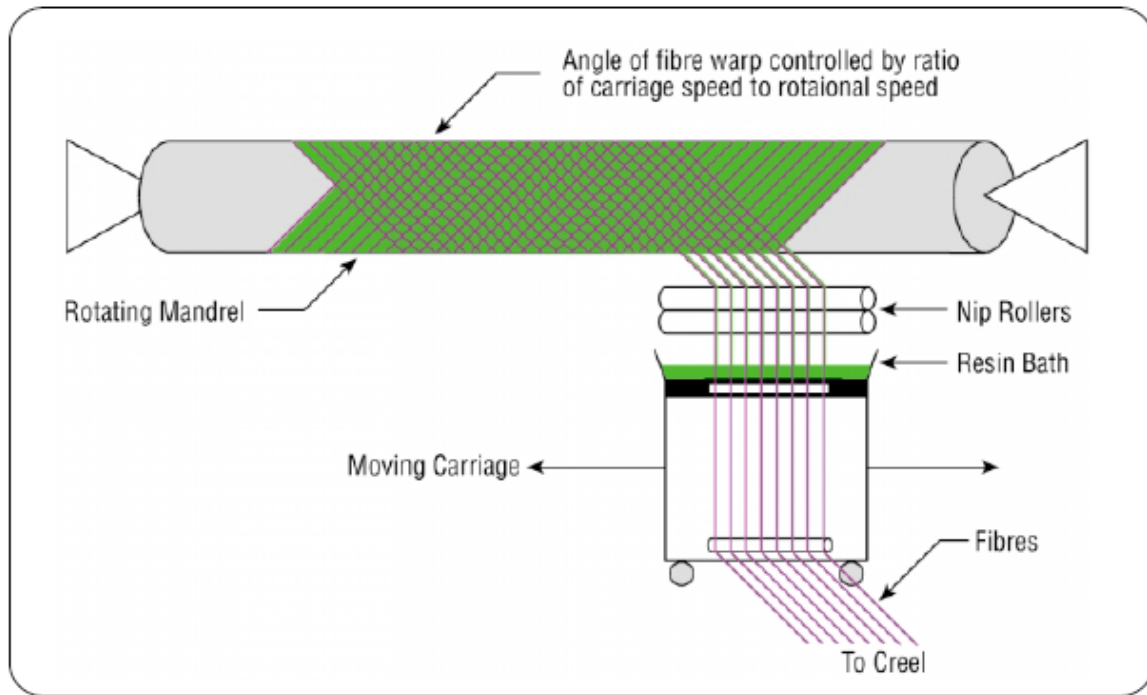
Οι ίνες κόβονται μέσα στο χειροκίνητο 'πιστόλι' (Σχήμα 3.12) και στην συνέχεια τροφοδοτούνται μέσω της, υπό μορφή σπρέι, ρητίνης κατευθείαν στο καλούπι. Το εναποτεθέν υλικό αφήνεται να ωριμάσει σε κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες.



Σχήμα 3.12 Εφαρμογή σύνθετων υλικών με ψεκασμό [1].

(γ) Περιέλιξη νήματος ηλεκτρονικής λυχνίας:

Αυτή η διαδικασία αρχικά χρησιμοποιήθηκε για κοίλες, κυκλικές ή οβάλ διατομές όπως σωλήνες και δεξαμενές. Οι ίνες περνούν διαμέσου ενός «λουτρού» ρητίνης πριν την περιέλιξή τους πάνω σε έναν άξονα σε διάφορες κατευθύνσεις, ελεγχόμενες από τον μηχανισμό τροφοδοσίας ινών και τον ρυθμό περιστροφής του άξονα (Σχ. 3.13).



Σχήμα 3.13 Περιέλιξη ινών σε άξονα [1].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΡΟΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΣΕ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΕΦΥΡΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Η/Υ

4.1. Εισαγωγικά στοιχεία.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία προδιαστασιολόγησης ενισχύσεων σε στοιχεία γεφυρών Ο/Σ με χρήση του προγράμματος «FRP analysis». Συγκεκριμένα επιχειρείται μία σύντομη επισκόπηση του τρόπου εισαγωγής των δεδομένων και μια σύντομη αναφορά στις δυνατότητες της γλώσσας προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία του προγράμματος «FRP analysis», προκειμένου να παρασχεθεί στο χρήστη η απαιτούμενη γνώση σχετικά με τον χειρισμό του προγράμματος, ώστε να μπορέσει από την εφαρμογή του να εξοικειωθεί με την μέθοδο της ενίσχυσης στοιχείων σκυροδέματος με σύνθετα υλικά.

Το πρόγραμμα αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Microsoft Visual Basic (Enterprise Edition Version 5.0) και μπορεί να λειτουργήσει σε υπολογιστικά συστήματα που χρησιμοποιούν περιβάλλον εργασίας των Microsoft Windows 95/98/ME και νεότερα. Το πρόγραμμα εκμεταλλεύεται την δυνατότητα που παρέχει η συγκεκριμένη γλώσσα προγραμματισμού και συνδυάζει την διαχείριση φορμών, πεδίων εισαγωγής δεδομένων, πλήκτρα εντολών και εικόνων με κλασσικές μεθόδους προγραμματισμού, όπως οι επαναληπτικές διαδικασίες (looping), λογικές προτάσεις if...then κλπ. Μετά την ολοκλήρωση της συγγραφής του προγράμματος και της αποσφαλμάτωσής του η συγκεκριμένη γλώσσα προγραμματισμού παρέχει την δυνατότητα δημιουργίας μιας εφαρμογής εγκατάστασης προκειμένου να τοποθετηθούν τα απαιτούμενα για την σωστή εκτέλεση αρχεία στις θέσεις που πρέπει.

Το εν λόγω πρόγραμμα, μέσα από απλά μενού, οδηγεί τον χρήστη στην εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων, επιτρέπει τον καθορισμό των επιλογών ανάλογα με τις επιτρεπόμενες επιλογές υλικών και διαστάσεων καθώς και κανονιστικών ορίων. Το πρόγραμμα διαχωρίζεται σε δύο μέρη, με το πρώτο να αφορά στην εισαγωγή των δεδομένων, τον καθορισμό των επιλογών επίλυσης και εκτύπωσης, καθώς και την επικύρωση των δεδομένων, ενώ το δεύτερο να αφορά στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων, την εισαγωγή των διαστάσεων των σύνθετων υλικών, την επίλυση και τέλος την εκτύπωση.

Με την επιλογή του εικονιδίου για την εκτέλεση του προγράμματος «FRP-analysis», εμφανίζεται αρχικά η φόρμα «Σχετικά με το πρόγραμμα FRP-analysis», στην οποία αναφέρονται τα στοιχεία του προγράμματος, δηλαδή ο τίτλος του, η έκδοση και το περιβάλλον εργασίας του, μία σύντομη περιγραφή του, καθώς και τα φυσικά πρόσωπα που συντέλεσαν στη συγγραφή του. Με την επιλογή της εντολής «OK» ολοκληρώνεται η φόρτωση του προγράμματος και εμφανίζεται η φόρμα «Εισαγωγή δεδομένων», η οποία ανάλογα με την επιλογή της καρτέλας στο πάνω τμήμα της φόρμας μπορεί να δεχθεί δεδομένα για την ενίσχυση στη περίπτωση της κάμψης, της διάτμησης ή της περίσφιγξης. Για κάθε είδος ενίσχυσης αναφέρονται στις επόμενες παραγράφους αναλυτικά ο τρόπος

εισαγωγής των δεδομένων, η διαδικασία επίλυσης καθώς και ο τρόπος παρουσίασης των αποτελεσμάτων επίλυσης.



Σχήμα 4.1 Φόρμα «Σχετικά με το πρόγραμμα FRP-Analysis» που εμφανίζεται κατά την ενεργοποίηση του εικονιδίου «FRP-analysis».

Το πρόγραμμα αναπτύχθηκε από το Εργαστήριο Τεχνολογίας Υλικών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών και η έκδοσή του που χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν στην εργασία αυτή και παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο ήταν ελεύθερα διαθέσιμη στο διαδίκτυο από την εταιρεία Sika.

4.2 Προδιαστασιολόγηση διατμητικής ενίσχυσης δομικών στοιχείων γεφυρών.

Στην περίπτωση της ενίσχυσης σε διάτμηση, η διαδικασία της εισαγωγής δεδομένων, αλλά και της επίλυσης και υπολογισμού των απαιτούμενων διατομών σύνθετων υλικών χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες, σε αυτή της ενίσχυσης στοιχείων τύπου δοκού και σε αυτή της ενίσχυσης σε διάτμηση στοιχείου τοιχώματος. Για την εφαρμογή που παρουσιάστηκε θεωρήθηκε απλουστευτικά ότι τα σύνθετα υλικά εφαρμόζονται σε κύρια δοκό γέφυρας Ο/Σ με διατομή μορφής σχήματος «Γ», με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά για τη διατομή και το υλικό ενίσχυσης:

Μέτρο ελαστικότητας σύνθετου υλικού : $E_f = 120 \text{ KN/mm}$

Παραμόρφωση σχεδιασμού : $\varepsilon_{fu} = 0,019$

Πλάτος των τοποθετούμενων λωρίδων του σύνθετου υλικού : $b_f = 40 \text{ mm}$

Πάχος λωρίδων : $t_f = 1,4 \text{ mm}$

Στατικό ύψος διατομής : $d = 1,75 \text{ m}$

Κατά την επιλογή της καρτέλας ενίσχυσης σε διάτμηση εμφανίζεται η φόρμα εισαγωγής δεδομένων με ήδη προεπιλεγμένη την περίπτωση της ενίσχυσης σε διάτμηση στοιχείων δοκού με τη χρήση λωρίδων πλάτους b_f , σε αποστάσεις s_f . Στην περίπτωση αυτή εμφανίζεται το εικονίδιο στο οποίο παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του φορέα καθώς και ο τρόπος ενίσχυσης.

The screenshot shows the 'FRP-Analysis' software interface with the 'FLEXURAL STRENGTHENING' tab selected. The interface is divided into several sections:

- Data Input:** A 3D diagram of a beam with FRP strips. Dimensions are labeled: d (static depth), t_f (FRP thickness), b (width), b_f (strip width), and s_f (strip spacing). The angle α is also indicated.
- Concrete:**
 - Strength class: C 12/15
 - Mean strength: $f_{cm} = 0$ [N/mm²]
- Composite Materials:**
 - Elastic modulus: $E_f = 231$ [kN/mm²]
 - Ultimate tensile strain: $\epsilon_{fu} = 0.015$ [-]
 - Limiting strain: $\epsilon_{f,lim} = 0.006$ [-]
 - Type of fibres: Carbon (CFRP)
 - Source: Sika CarboDur Properties
- Method of Anchorage:**
 - Closed jacket (selected)
 - Open jacket
- Cross Section Geometry:**
 - Width: $b = 0.3$ [m]
 - Static depth: $d = 0.5$ [m]
 - Angle between fibres direction and member axis: $\alpha = 90$ [degrees]
- Type of Application:**
 - Continuous jacket
 - Discrete strips (selected):
 - Width: $b_f = 0.15$ [m]
 - Spacing: $s_f = 0.4$ [m]
- Increase of Shear Capacity:**
 - Additional shear: $V_{fd} = 100$ [kN]

At the bottom, there are buttons for 'About ...', 'Exit', 'Options', 'Help', 'Open', 'Save', 'Solution', and 'New Input'. The Sika CarboDur logo is also present. The status bar at the bottom shows: Project: Introduction Steering Meeting, Name: Burdorf, Company: Sika Schweiz AG, 20.08.2002, 11:45.

Σχήμα 4.2 Ενδεικτική φόρμα «Εισαγωγής δεδομένων» για την περίπτωση ενίσχυσης έναντι διάτμησης.

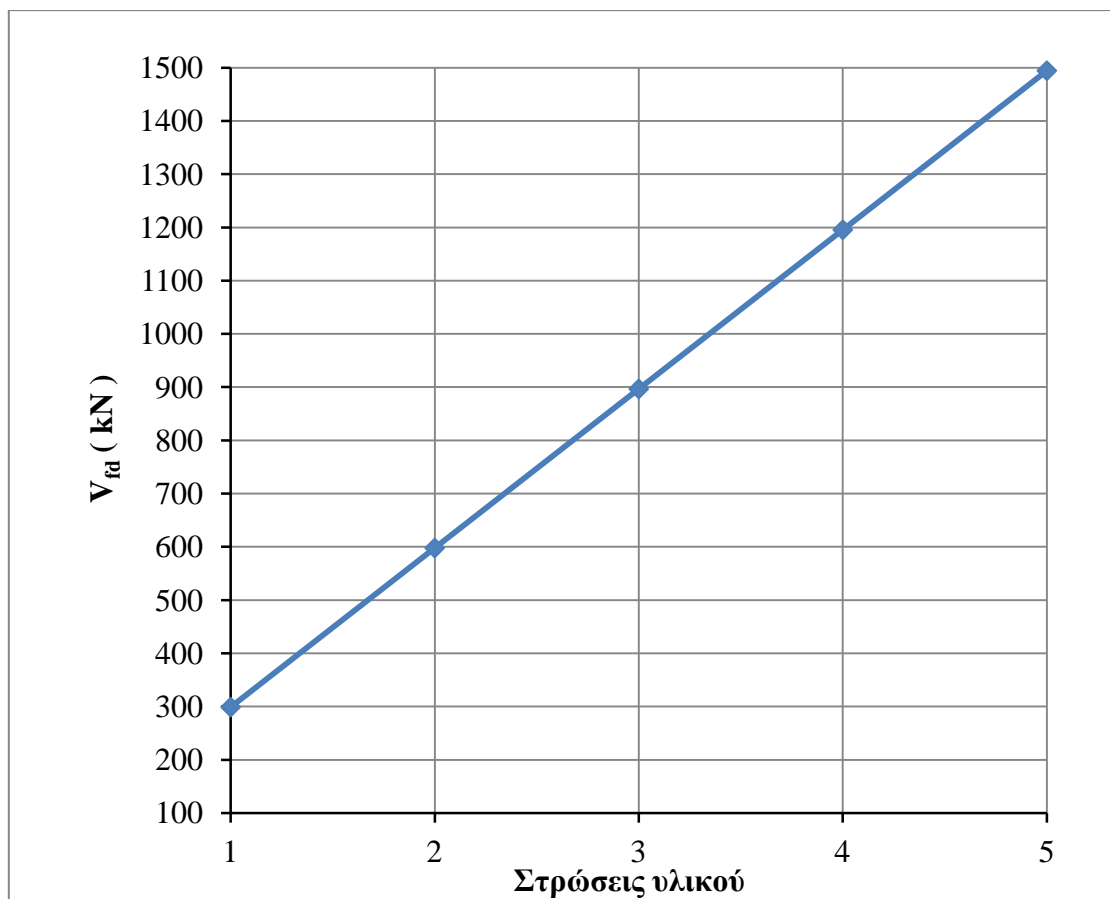
Κατά την εισαγωγή των αριθμητικών τιμών στα εκάστοτε πεδία, το πρόγραμμα εκτελεί ταυτόχρονο έλεγχο της συνέπειας των τιμών αυτών όσον αφορά στην φυσική και πρακτική τους εφαρμογή. Έτσι, μετά την έξοδο από κάθε πεδίο ελέγχεται αν η συγκεκριμένη αριθμητική τιμή βρίσκεται μεταξύ των άνω και κάτω ορίων τα οποία έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα. Στην περίπτωση λάθους εισαγωγής εμφανίζεται μήνυμα λάθους που δεν επιτρέπει την περαιτέρω εκτέλεση του προγράμματος μέχρις ότου αλλαχθεί η συγκεκριμένη τιμή. Επιπλέον, γίνεται και γεωμετρικός έλεγχος των στοιχείων που εισάγονται για την αποφυγή λαθών, όπως για παράδειγμα ότι το ενεργό μήκος της δοκού πρέπει να είναι 1.15 του μήκους του. Τέλος σε όλη τη διάρκεια της ανάλυσης εμφανίζονται διαγνωστικά μηνύματα τα οποία πληροφορούν τον χρήστη για την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η διατομή (αν κάποια μεγέθη έχουν ξεπεράσει τα όρια που ορίζουν οι κανονισμοί κλπ.).

Για τις ανάγκες της διερεύνησης που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας εξετάζονται δύο πιθανές περιπτώσεις ενίσχυσης της διατομής με σύνθετα υλικά. Η πρώτη αφορά την ενίσχυση με χρήση συνεχούς υφάσματος και η δεύτερη την επέμβαση με λάμες. Και στις δύο περιπτώσεις γίνεται παραμετρική επίλυση του προβλήματος. Στην περίπτωση της επέμβασης με ανθρακούφασμα ως ελεύθερη παράμετρος επιλέγεται ο αριθμός των στρώσεων του υφάσματος. Εξετάζεται η περίπτωση της εφαρμογής μίας έως και πέντε στρώσεων και τα αποτελέσματα που προκύπτουν (επιταχυνόμενη διατμητική αντοχή) συναρτήσει των στρώσεων του υλικού παρουσιάζονται πινακοποιημένα (Πίνακας 4.1) και σχηματικά (Σχήμα 4.3).

Όπως προκύπτει από τα εικονιζόμενα αποτελέσματα, η αύξηση της αντοχής που επιτυγχάνεται είναι πρακτικά ανάλογη των στρώσεων που χρησιμοποιούνται. Το γεγονός αυτό ήταν απόλυτα αναμενόμενο, δεδομένου ότι η αύξηση των στρώσεων συνεπάγεται ανάλογη αύξηση της ογκομετρικής ποσότητας του οπλισμού, δηλαδή του ποσοστού των ινών στο σύνθετο υλικό, οι οποίες εφελκούνται αναλαμβάνοντας τη διατμητική ένταση του στοιχείου. Με απλά λόγια, από την παραμετρική επίλυση διαπιστώνεται ότι περισσότερες ίνες σε κάθε διατομή οδηγούν σε πρακτικά ανάλογη αύξηση της αντοχής του ενισχυμένου μέλους σε διάτμηση.

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα προδιαστασιολόγησης της διατμητικής ενίσχυσης δοκού καταστρώματος με χρήση ανθρακούφασματος.

Στρώσεις υφάσματος	V_{fd} (kN)
1	298,84
2	597,69
3	896,53
4	1195,37
5	1494,21



Σχήμα 4.3 Μεταβολή της διατμητικής αντοχής του οπλισμού ενίσχυσης σε σχέση με τις εφαρμοζόμενες στρώσεις ανθρακούφασματος – περίπτωση ενίσχυσης δοκού καταστρώματος.

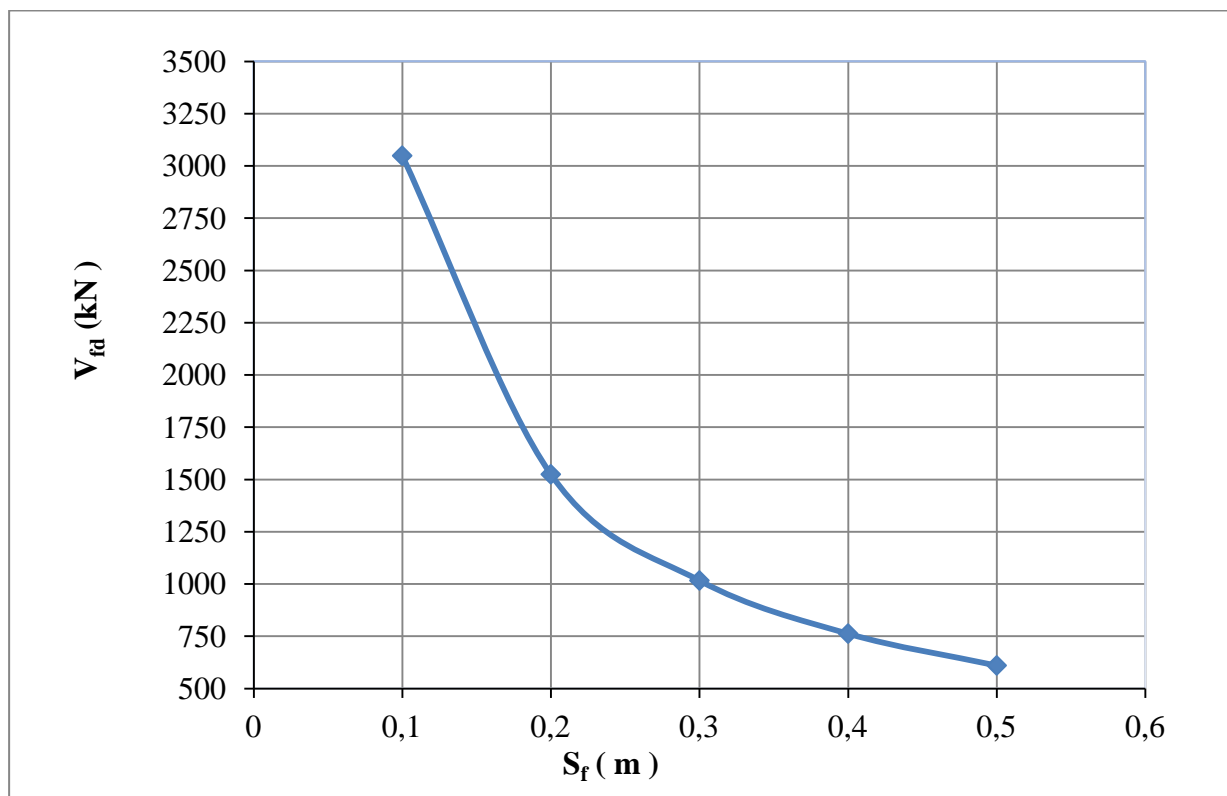
Στην περίπτωση της ενίσχυσης με χρήση λαμών από σύνθετα υλικά, ως παράμετρος της διερεύνησής μας επιλέχθηκε η απόσταση S_f μεταξύ τους, όπως ορίζεται στο Σχήμα 4.4. Το προς ενίσχυση στοιχείο είναι ξανά μια ιδεατοποιημένη κύρια δοκός γέφυρας με στατικό ύψος διατομής $d = 1,75m$. Για την ενίσχυση επιλέχθηκαν λάμες τύπου «L-shaped Strips» από τη διαθέσιμη γκάμα της εταιρείας Sika που είναι ενσωματωμένη στο πρόγραμμα. Δοκιμάστηκαν αποστάσεις S_f μεταξύ των στοιχείων ενίσχυσης από 0.10m έως και 0.50m. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2, και στο διάγραμμα του Σχήματος 4.5 εικονίζεται η μεταβολή της πρόσθετης διατμητικής αντοχής που αναλαμβάνουν τα σύνθετα υλικά σε συνάρτηση με την απόσταση των λαμών, S_f .

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, η απόσταση μεταξύ των στοιχείων ενίσχυσης επηρεάζει σημαντικά την αποδοτικότητά της. Η μείωσή οδηγεί σε σημαντική αύξηση της διατμητικής δύναμης που μπορούν να αναλάβουν τα σύνθετα υλικά. Χαρακτηριστικό είναι επίσης το γεγονός ότι η αύξηση αυτή δεν είναι γραμμική αλλά πρακτικά εκθετική, οδηγώντας σε ιδιαίτερα υψηλές τιμές αντοχής V_{fd} όταν η απόσταση S_f είναι μικρότερη από 0,30m (Σχήμα 4.5). Από την παραπάνω παρατήρηση μπορούν να προκύψουν δύο σημαντικά συμπεράσματα: (α) η αποδοτικότητα μιας επέμβασης με λάμες από σύνθετα υλικά μπορεί να αυξηθεί απλά «πυκνώνοντας» των πρόσθετο οπλισμό, λύση που μπορεί να είναι πιο εύκολη ή πιο φθηνή από την υιοθέτηση ενός υλικού με μεγαλύτερο ποσοστό ινών, άρα και βελτιωμένα

μηχανικά χαρακτηριστικά (β) δε συνιστάται η χρήση λαμών από σύνθετα υλικά σε αποστάσει μεγαλύτερες από 0.30m, δεδομένης της περιορισμένης απόδοσης που φαίνεται να έχει μια λύση ενίσχυσης αυτής της μορφής.

Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα προδιαστασιολόγησης της διατμητικής ενίσχυσης δοκού καταστρώματος με χρήση λαμών από σύνθετα υλικά.

S_f	V_{fd} (kN)
0,1	3048,2
0,2	1524,1
0,3	1016,07
0,4	762,05
0,5	609,64

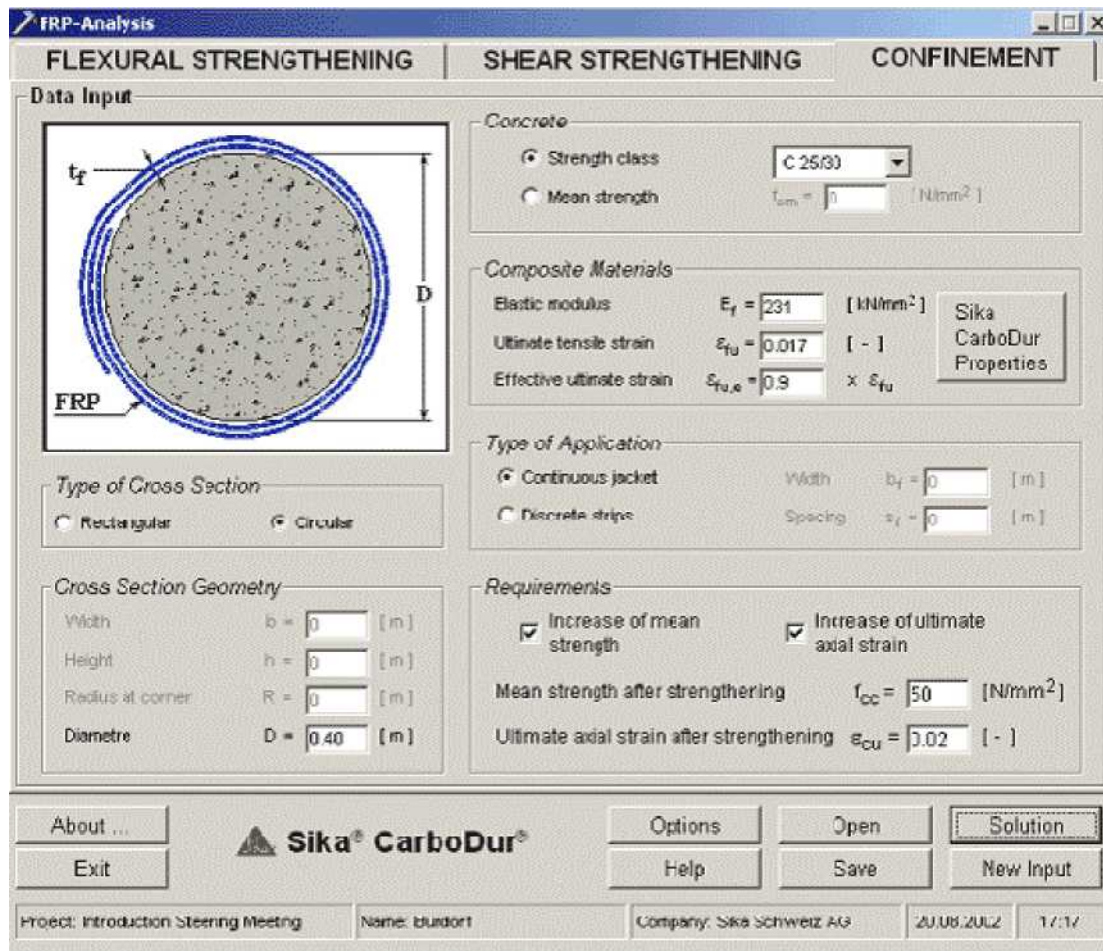


Σχήμα 4.5 Μεταβολή της διατμητικής αντοχής του οπλισμού ενίσχυσης σε σχέση με την απόσταση του τοποθετούμενου οπλισμού από σύνθετα υλικά – περίπτωση ενίσχυσης δοκού καταστρώματος.

4.3 Προδιαστασιολόγηση επεμβάσεων για την περίσφιγξη βάθρων γεφυρών.

Στην περίπτωση της περίσφιγξης, η διαδικασία της εισαγωγής δεδομένων, αλλά και της επίλυσης και υπολογισμού των απαιτούμενων διατομών των σύνθετων υλικών χωρίζεται σε

δύο υποκατηγορίες, σε αυτή της περίσφιξης ορθογωνικής διατομής και σε αυτή της περίσφιξης κυκλικής διατομής (Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4.6 Φόρμα «Εισαγωγής δεδομένων» για την περίπτωση της περίσφιξης.

Κατά την εισαγωγή των αριθμητικών τιμών στα εκάστοτε πεδία, το πρόγραμμα εκτελεί ταυτόχρονο έλεγχο της συνέπειας των τιμών αυτών όσον αφορά στην φυσική και πρακτική τους εφαρμογή. Έτσι, μετά την έξοδο από κάθε πεδίο ελέγχεται αν η συγκεκριμένη αριθμητική τιμή βρίσκεται μεταξύ των άνω και κάτω ορίων τα οποία έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα. Στην περίπτωση λάθους εισαγωγής εμφανίζεται μήνυμα λάθους που δεν επιτρέπει την περαιτέρω εκτέλεση του προγράμματος μέχρις ότου αλλαχθεί η συγκεκριμένη τιμή. Επιπλέον, γίνεται και γεωμετρικός έλεγχος των στοιχείων που εισάγονται για την αποφυγή λαθών όπως για παράδειγμα ότι η ακτίνα καμπυλότητας δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το ύψος ή το μήκος της διατομής. Τέλος σε όλη τη διάρκεια της ανάλυσης εμφανίζονται διαγνωστικά μηνύματα τα οποία πληροφορούν τον χρήστη για την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η διατομή.

Επίσης κατά τη φάση της επίλυσης το πρόγραμμα ελέγχει την ορθότητα των εισαγόμενων εντατικών μεγεθών. Αυτό σημαίνει ότι ελέγχονται οι τιμές που έχουν εισαχθεί για την οριακή παραμόρφωση και την αντοχή ώστε αυτές να είναι μεγαλύτερες από αυτές της απερίσφικτης διατομής.

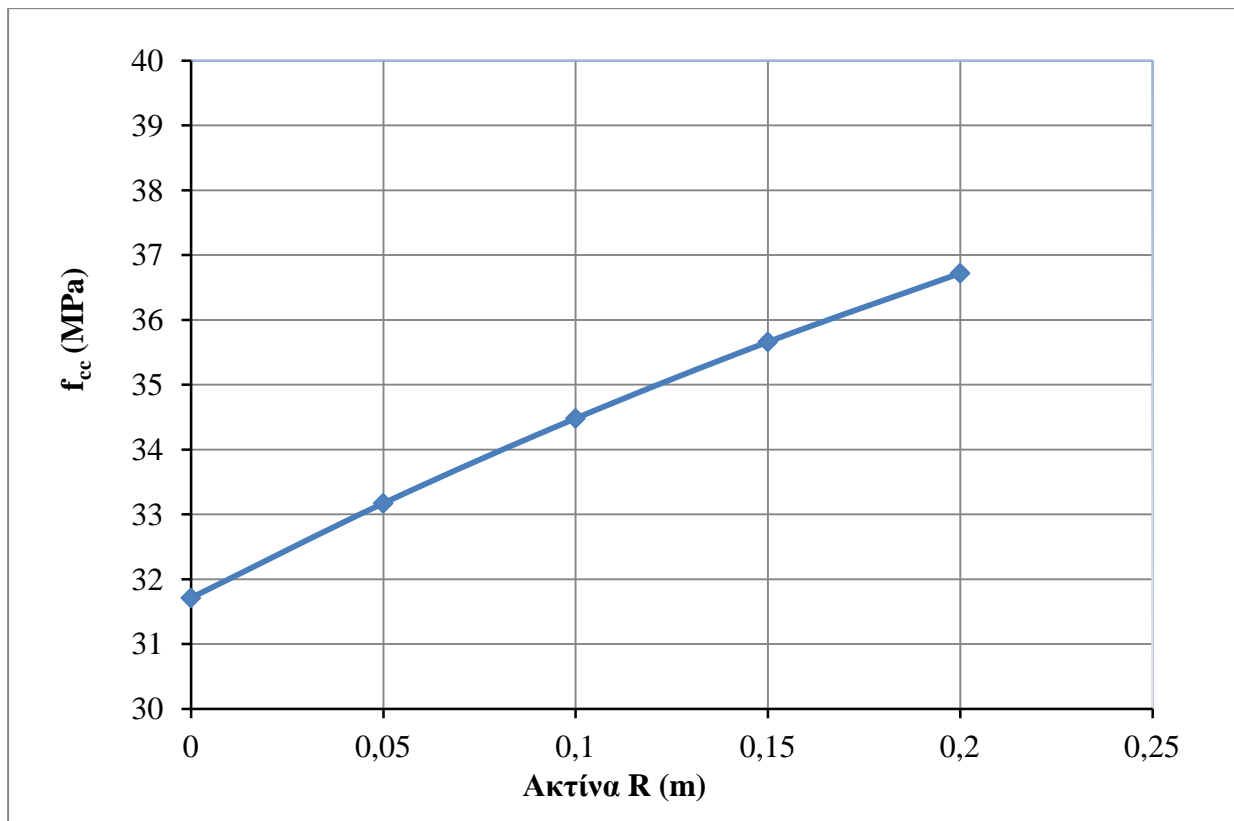
Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε η προδιαστασιολόγηση τριών περιπτώσεων επέμβασης σε βάθρα γεφυρών με στόχο την περισφιγξή τους με εξωτερικό οπλισμό από σύνθετα υλικά. Στην πρώτη περίπτωση εξετάστηκε η ενίσχυση βάρου ορθογωνικής διατομής διαστάσεων $b = 1.75\text{m}$, $h = 1.75\text{m}$ με συνεχή μανδύα από ύφασμα με ίνες άνθρακα. Οι άλλες δύο περιπτώσεις που εξετάστηκαν αφορούν την ενίσχυση κυκλικού βάρου διαμέτρου $D = 2.00\text{m}$ με συνεχές ανθρακούφασμα και λάμες από αντίστοιχο υλικό. Όλες οι διερευνήσεις είχαν παραμετρικό χαρακτήρα και εξετάζουν την επιρροή συγκεκριμένων σχεδιαστικών επιλογών στην επιτυγχανόμενη τάση περισφιγξης του σκυροδέματος, f_{cc} .

Για την περίπτωση του ορθογωνικού βάρου ως παράμετρος ελέγχου επιλέχθηκε η ακτίνα καμπύλωσης R των γωνιών του στοιχείου. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται κατά την περισφιγξη ορθογωνικών στοιχείων σκυροδέματος με σύνθετα υλικά για δύο λόγους: (α) γιατί αυξάνει την αποδοτικότητά της επέμβασης όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο της εργασίας (β) γιατί αποτρέπει την πιθανότητα «απόσχισης» του εξωτερικού οπλισμού στις γωνίες λόγω της απότομης καμπής του και των συγκεντρωμένων τάσεων αιχμής στις θέσεις αυτές. Εξετάστηκαν τιμές για την ακτίνα καμπύλωσης από 0 (καμία αλλαγή στη διατομή) έως και 0,20 m, η οποία είναι μία ακραία τιμή πιθανόν εφικτή σε βάθρα αλλά μάλλον αδύνατον να εφαρμοσθεί σε κοινά υποστυλώματα π.χ. κτιριακών έργων. Τα αποτελέσματα (αντοχή περισφιγμένου σκυροδέματος) παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3 και γραφικά στο Σχήμα 4.7.

Είναι εμφανές ότι η καμπύλωση της διατομής επηρεάζει σημαντικά την αποδοτικότητα της περισφιγξης. Χαρακτηριστικό είναι ότι η καμπύλωση με ακτίνα μόλις 0.10m οδηγεί σε 10% αυξημένη αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος (Πίνακας 4.3). Συνεπώς, η κατάλληλη προετοιμασία της ορθογωνικής διατομής παίζει σημαντικό ρόλο και δεν πρέπει να αμελείται κατά το σχεδιασμό και την εφαρμογή μίας τέτοιου είδους λύσης επέμβασης με σύνθετα υλικά.

Πίνακας 4.3 Αποτελέσματα προδιαστασιολόγησης της περισφιγξης ορθογωνικού βάρου με χρήση εξωτερικού οπλισμού από σύνθετα υλικά..

R (m)	f_{cc} (MPa)
0	31,71
0,05	33,17
0,1	34,48
0,15	35,66
0,2	36,72



Σχήμα 4.7 Μεταβολή της αντοχής του περισφιγμένου σκυροδέματος σε σχέση με τη διάμετρο καμπύλωσης της ορθογωνικής διατομής του βάρου.

Στα κυκλικά βάρη δεν απαιτείται τροποποίηση της διατομής τους, καθώς αποτελεί την ιδεατή περίπτωση για την επιβολή εξωτερικής περισφιγξης (επιτυγχάνεται ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων στην περίμετρο του στοιχείου). Για το λόγο αυτό ως παράμετρος προς διερεύνηση επιλέχθηκε ο αριθμός των στρώσεων του υφάσματος που εφαρμόζεται για την ενίσχυση του στοιχείου, ώστε να εξεταστεί πώς μεταβάλλεται η αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος όταν αυξάνεται η ποσότητα του εξωτερικού οπλισμού. Υπενθυμίζεται ότι η ανάλογη διερεύνηση στην περίπτωση της διατμητικής ενίσχυσης έδειξε ότι η σχέση αντοχής – στρώσεων του υλικού ήταν στην περίπτωση εκείνη γραμμική.

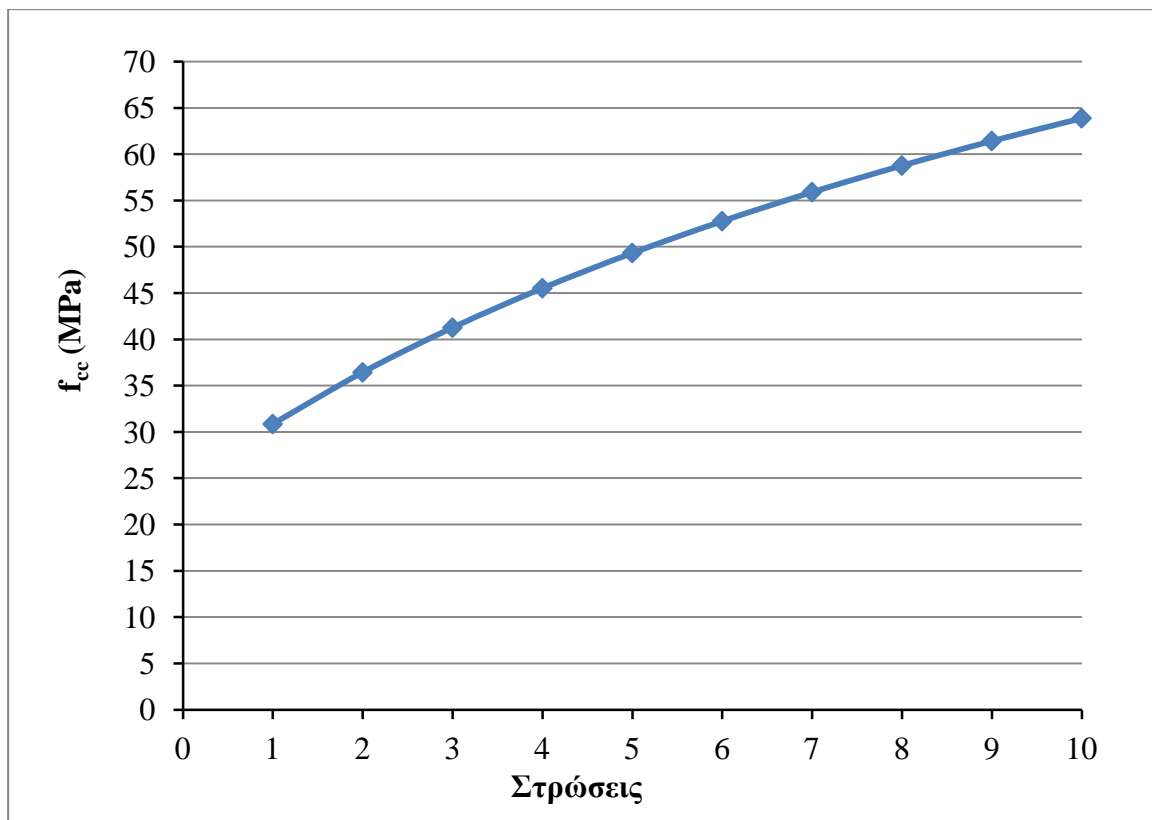
Τα αποτελέσματα της προδιαστασιολόγησης με τη χρήση του προγράμματος «FRP Analysis» παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4 και στο διάγραμμα του Σχήματος 4.8. Όπως προκύπτει η αύξηση του οπλισμού οδηγεί σε αύξηση της τάσης περισφιγξης. Ωστόσο η σχέση στρώσεων και αντοχής του σκυροδέματος δεν είναι γραμμική και η προσθήκη επιπλέον στρώσεων υφάσματος από ένα σημείο κι έπειτα δεν έχει την ίδια απόδοση σε σχέση με τις πρώτες 3 ÷ 4 στρώσεις. Συγκεκριμένα, η αρχική αύξηση της τάξης του 20% στην αντοχή του σκυροδέματος που επιτυγχάνει κάθε επιπλέον στρώση του υλικού για τις πρώτες στρώσεις υποβαθμίζεται σταδιακά και φθάνει να είναι ~5% για 6 στρώσεις και ακόμα μικρότερη για περισσότερες.

Με βάση την παραπάνω παρατήρηση μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι κατά το σχεδιασμό μιας επέμβασης σε βάρη με χρήση συνθέτων υλικών και με στόχο την περισφιγξη του σκυροδέματος καλό θα είναι να αποφεύγεται η χρήση περισσότερων από 5 ή

6 στρώσεων υφάσματος, καθώς για περισσότερες στρώσεις η απόδοση (το κέρδος) της επέμβασης είναι περιορισμένο, καθιστώντας μια τέτοια λύση οικονομικά ασύμφορη.

Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα προδιαστασιολόγησης της περίσφιγξης κυκλικού βάρου με χρήση συνθέτων υλικών με μορφή υφάσματος με ίνες άνθρακα.

Στρώσεις	f_{cc} (MPa)
1	30,86
2	36,44
3	41,27
4	45,53
5	49,33
6	52,77
7	55,91
8	58,78
9	61,43
10	63,89



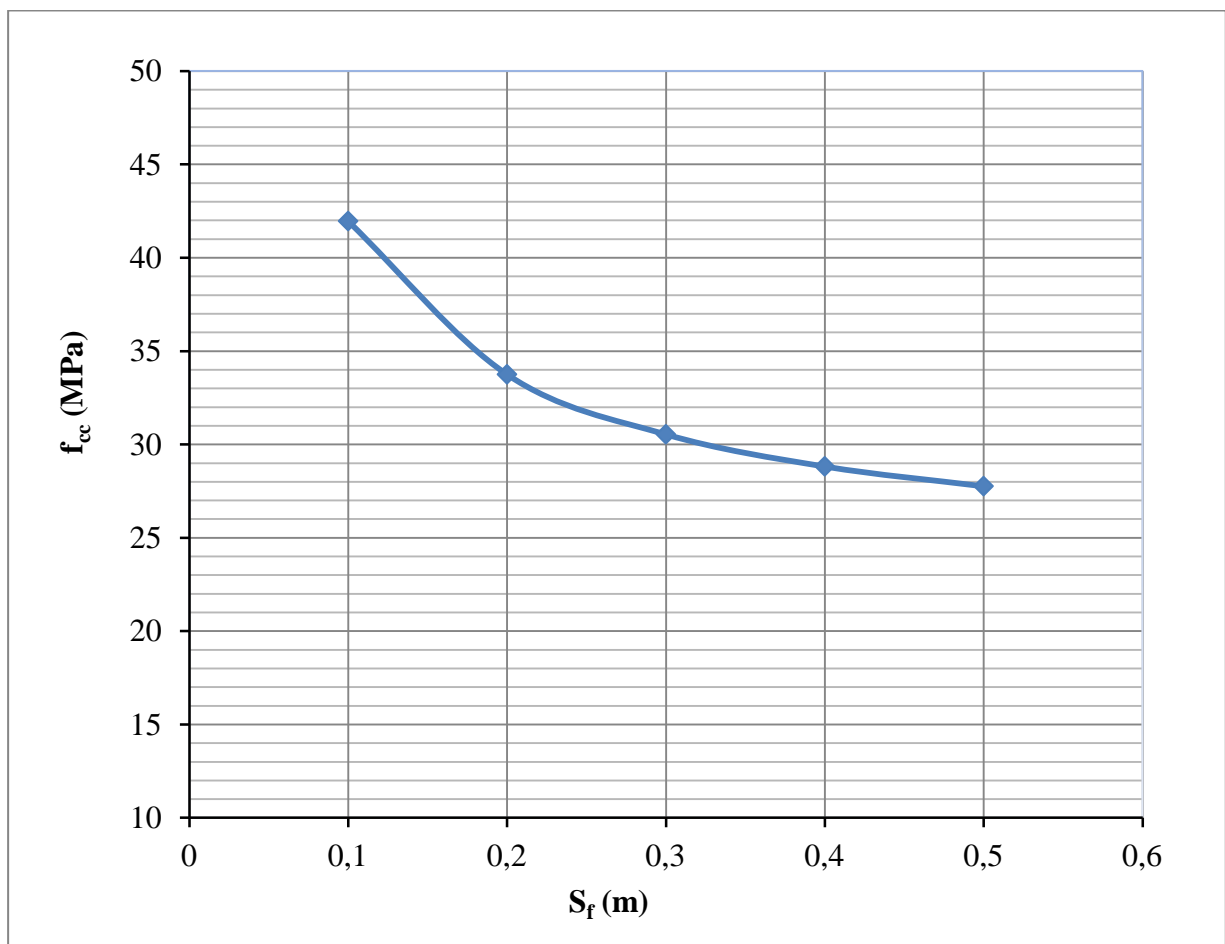
Σχήμα 4.8 Μεταβολή της αντοχής του περισφιγμένου σκυροδέματος σε σχέση με τις στρώσεις του υλικού ενίσχυσης – περίπτωση βάρου κυκλικής διατομής.

Η τελευταία περίπτωση επέμβασης που εξετάστηκε είναι η περίσφιγξη βάρου κυκλικής διατομής με σύνθετα υλικά με μορφή λαμών. Όπως στην αντίστοιχη διατημητική

ενίσχυση ως παράμετρος επιλέχθηκε η απόσταση S_f μεταξύ των εξωτερικά τοποθετούμενων οπλισμών και ελέγχθηκε η επίδρασή της στην αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5 και στο διάγραμμα του Σχήματος 4.9.

Πίνακας 4.5 Αποτελέσματα προδιαστασιολόγησης της περισφιγξης κυκλικού βάρου με χρήση συνθέτων υλικών με μορφή λαμών με ίνες άνθρακα.

Στρώσεις	f_{cc} (MPa)
0,1	41,96
0,2	33,75
0,3	30,54
0,4	28,82
0,5	27,76



Σχήμα 4.8 Μεταβολή της αντοχής του περισφιγμένου σκυροδέματος σε σχέση με τις αποστάσεις των εξωτερικών οπλισμών ενίσχυσης – περίπτωση βάρου κυκλικής διατομής, ενίσχυση με λάμες.

Είναι εμφανές ότι η εικόνα είναι αντίστοιχη με την περίπτωση της διατμητικής ενίσχυσης (Σχήμα 4.5). Αυτό σημαίνει ότι και για την περίσφιγξη βάρων με λάμες από σύνθετα υλικά είναι σημαντικό οι εξωτερικοί οπλισμοί να τοποθετούνται πυκνά, δηλαδή οι αποστάσεις μεταξύ του να είναι μικρότερες από $\sim 0.30\text{m}$, γεγονός που οδηγεί σε σημαντική αύξηση της αποδοτικότητας της περίσφιγξης (Σχήμα 4.9).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάλυση που διενεργείται στα προηγούμενα κεφάλαια έχει ως στόχο αφενός μεν να καταδείξει τα βασικά προβλήματα και βλάβες που αντιμετωπίζουν οι γέφυρες οπλισμένου σκυροδέματος, ειδικά τα βάθρα τους, και αφετέρου δε να απαριθμήσει τις διαθέσιμες τεχνικές θεραπείας των προβλημάτων αυτών. Όσον αφορά στις τεχνικές αυτές, η ανάλυση γίνεται πιο συγκεκριμένη στον τομέα των σύνθετων υλικών, για τα οποία επιχειρείται μια συνολική παρουσίαση των ιδιοτήτων τους και του τρόπου μηχανικής συμπεριφοράς τους.

Ως συμπερασματικές παρατηρήσεις της παρούσας πτυχιακής, μπορούν να αναφερθούν οι ακόλουθες:

- Τα πιο ευαίσθητα δομικά μέρη της γέφυρας είναι τα βάθρα. Αυτά αναλαμβάνουν να μεταφέρουν την ένταση στη θεμελίωση και μπορούν να εμφανίσουν βλάβες ως αποτέλεσμα πολλών παραγόντων, στους οποίους περιλαμβάνονται η κάμψη, η διάτμηση αλλά και η υποσκαφή.
- Η ενίσχυση των βάθρων των γεφυρών μπορεί να γίνει είτε με μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος, είτε με μανδύες σύνθετων υλικών είτε με μεταλλικούς μανδύες. Ο καθένας από αυτούς τους τρόπους έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του. Οι μανδύες από σύνθετα υλικά πλεονεκτούν κυρίως ως προς την ευκολία και ταχύτητα εφαρμογής τους και τον γεγονός ότι δεν αλλάζουν σημαντικά τα χαρακτηριστικά του φορέα.
- Η ενίσχυση των βάθρων έναντι κάμψης μέσω μανδύα σύνθετων υλικών είναι δύσκολη και δε συνιστάται. Παρουσιάζονται δυσκολίες που σχετίζονται με την ικανοποιητική αγκύρωση των εξωτερικών οπλισμών σε περιοχές κόμβων.
- Οι μανδύες σύνθετων υλικών μπορούν να προσφέρουν πολύ ικανοποιητικά οφέλη όσον αφορά στην αύξηση της διατμητικής αντοχής και την περίσφιγξη των βάθρων.
- Τα προγράμματα Η/Υ που είναι διαθέσιμα σήμερα διευκολύνουν σε μεγάλο βαθμό τη δουλειά του Πολιτικού Μηχανικού. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία διαθέτει ένα εύχρηστο περιβάλλον που επιτρέπει την εκτέλεση σύνθετων υπολογισμών σε μικρό χρόνο. Ωστόσο χρειάζεται προσοχή και εμπειρία για την αποφυγή πιθανών σφαλμάτων.
- Από την παραμετρική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε προκύπτει ότι, στην περίπτωση της διατμητικής ενίσχυσης οι μανδύες συνθέτων υλικών λειτουργούν όπως οι συνήθεις συνδετήρες, οδηγώντας σε αύξησης της αντοχής όσο αυξάνεται το ποσοστό των ινών στο υλικό (π.χ. αύξηση στρώσεων).
- Όταν για την ενίσχυση χρησιμοποιούνται λάμες συνθέτων υλικών, κρίσιμη παράμετρος είναι η αξονική απόστασή τους. Αποστάσεις μεγαλύτερες από 0.30m μειώνουν σημαντικά την αποδοτικότητα της επέμβασης και δεν συνιστώνται.
- Η παραπάνω παρατήρηση αφορά και την επέμβαση σε βάθρα με στόχο την περίσφιγξή τους. Στην περίπτωση αυτή παρατηρήθηκε ότι σημαντική παράμετρος είναι η καμπύλωση των γωνιών των ορθογωνικών ή τετραγωνικών διατομών. Εάν αυτή δεν

κατασκευαστεί η αποδοτικότητα της επέμβασης μειώνεται, ακόμα κι αν εφαρμόζεται κλειστού τύπου, συνεχής μανδύας.

- Τέλος, παρατηρήθηκε ότι κατά την επιβολή εξωτερικής περισφιγξης η αύξηση των στρώσεων δεν επηρεάζει αναλογικά την αποδοτικότητα της επέμβασης. Περισσότερες από ~5 έως 6 στρώσεις του υλικού δεν συνιστώνται καθώς το κέρδος, δηλαδή η επιπλέον αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος, είναι μάλλον μικρό σε σχέση με το κόστος του επιπλέον υλικού που απαιτείται.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ιστοσελίδα <http://www.getcarbonfiber.com/installation-instructions/carbonfiber-reinforced-polymer-applications-and-uses/>.
- [2] «Σύνθεση Γεφυρών Σκυροδέματος», Μ. Ν. Φαρδής, Πάτρα 2011.
- [3] «Επιθεώρηση και συντήρηση γεφυρών από οπλισμένο σκυρόδεμα», Αναστάσιος Ανέστης, ΤΕΙ Θεσσαλονίκης 2008.
- [4] Ιστοσελίδα Υπουργείου Μεταφορών Καναδά <http://www.mto.gov.on.ca>.
- [5] Ιστοσελίδα <http://www.nap.edu>, The National Academy Press.
- [6] «Καταστροφή γέφυρας χειμάρρου Ζηλιάνα της Εθνικής Οδού Αθηνών – Θεσσαλονίκης κατά την 28η Νοεμβρίου 1998», Στέφανος Τσότσος, Ιωάννης Τέγος, Μάριος Βαφειάδης, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- [7] «Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία», Κ. Σπυράκος, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, Αθήνα 2004.
- [8] «Ενισχύσεις κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος και φέρουσας τοιχοποιίας με σύνθετα υλικά», Τριανταφύλλου Χ. Αθανάσιος, Πάτρα 2006.
- [9] “Seismic retrofit techniques for reinforced concrete bridge columns with combination of FRP sheet and steel jacketing”, Guangfeng Zhang, Shigeki Unjoh, Jun-ichi Hoshikuma, and Junichi Sakai.
- [10] “FRP-encased concrete as a structural material”, Fardis M.N., Khalili H.H., Mag Concrete Res, Vol. 34, No 12, pp 191–202, 1982.
- [11] “Composite jacketed concrete under uniaxial compression – verification of simple design equations”, Karbhari V.M., Gao Y., Journal of Materials in Civil Engineering, pp 185 – 193, 1997.
- [12] “Model of concrete Confined by fiber composites”, Samaan M., Mirmiran A., Shahawy M., J. Struct. Eng., Vol. 124, No 9, pp 1025-1031, 1998.
- [13] “Strengthening effect of concrete columns with carbon fibre sheet” Miyouchi K., Inoue S., Kuroda T., Kobayashi A., Transactions of the Japan Concrete Inst, Vol. 21, pp 143–50, 1999.
- [14] “Stress-Strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced

- Fiber Composite Sheets”Toutanji H. A., ACI Materials Journal, Vol 96, pp 397-404, 1999.
- [15] “Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced Polymer tubes”, Saafi M., Toutanji H.A., Li Z., ACI Struct. J., Vol 96, No 4, pp 500–9, 1999.
- [16] “Compressive behaviour of concrete confined by carbon fiber composite jackets”, Xiao Y., Wu H., J Mater Civil Eng, Vol. 12, No 2, pp 139–46, 2000.
- [17] Lin H-J, Chen C-T, “Strength of Concrete Cylinder Confined by Composite Materials”, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol.20, No 18, pp 1577-1600, 2001.
- [18] Δρίτσος Σ.Η., “Ένισχύσεις / Επισκευές Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα” Πάτρα, 2006.