



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

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΡΑΒΔΟΙ ΑΠΟ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΩΣ ΚΥΡΙΟΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΜΕΛΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ – ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΕΣ:

**ΚΑΒΒΑΔΑ ΑΛΕΞΙΑ, Α.Μ. 5109
ΠΑΞΙΜΑΔΗ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ – ΖΩΗ, Α.Μ. 5160**

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΜΠΑΡΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ, 2017

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστριών:

Οι κάτωθι υπογεγραμμένες σπουδάστριες, έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κείμενου, έχουμε δε αναφέρει στη Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και ελάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομα του και την πηγή προέλευσης.

Οι σπουδάστριες

Καββαδά Αλεξία

Παξιμάδη Κωνσταντίνα – Ζωή

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την ολοκλήρωση αυτής της πτυχιακής εργασίας , θέλουμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μας Κύριο Δ.Μπάρο για την βοήθειά του κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Καθώς και για την ευκαιρία που μας έδωσε να ασχοληθούμε με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα ολοκληρώνοντας έτσι με τον καλύτερο τρόπο τον κύκλο των σπουδών μας.

Τέλος, οφείλουμε ένα μεγάλο ευχαριστώ στις οικογένειές μας για την υποστήριξη που μας πρόσφεραν σε κάθε μας προσπάθεια όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	1
---------------	---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Σύνθετα υλικά

1.1 Ιστορική αναδρομή.....	2
1.2 Συστατικά των σύνθετων υλικών.....	3
1.2.1 Ίνες.....	3
1.2.2 Μήτρες σύνθετων υλικών.....	10
1.3 Φυσικές ιδιότητες ινοπλισμένων πολυμερών.....	10
1.4 Μηχανικές ιδιότητες ινοπλισμένων πολυμερών.....	10
1.4.1 Γενικά.....	10
1.4.2 Τρόπος προσδιορισμού μηχανικών ιδιοτήτων ΙΟΠ.....	11
1.5 Παράμετροι που επηρεάζουν την ανθεκτικότητα των σύνθετων υλικών.....	11
1.5.1 Γενικά.....	11
1.5.2 Επίδραση φωτιάς-θερμοκρασίας.....	12
1.5.3 Υπεριώδης ακτινοβολία.....	13
1.5.4 Υγρασία.....	13
1.5.5 Διάβρωση απο χλωρίδια και αλκάλια.....	14
1.6 Συμπεριφορά υπό μακροχρόνια φόρτιση.....	15
1.6.1 Ερπυσμός.....	15
1.6.2 Κόπωση.....	15
1.7 Συμπερασματικές Παρατηρήσεις.....	16

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Τα Ιοπλισμένα Πολυμερή στις κατασκευές από Σκυρόδεμα.

2.1 Ράβδοι ΙΟΠ ως οπλισμός κάμψης.....	18
2.1.1 Γενικά.....	18
2.1.2 Φιλοσοφία του σχεδιασμού έναντι κάμψης.....	18
2.1.3 Βασικές Παραδοχές.....	18
2.1.4 Αντοχή σε κάμψη.....	19
2.1.5 Θλιβόμενος οπλισμός.....	21
2.1.6 Περιορισμοί λειτουργικότητας.....	21
2.2 Ράβδοι ΙΟΠ ως οπλισμός διάτμησης.....	22
2.2.1 Γενικά.....	22

2.2.2 Μηχανισμοί αλληλεμπλοκής.....	22
2.2.3 Δράση βλήτρου.....	22
2.2.4 Γενικές παρατηρήσεις για τον οπλισμό διάτμησης.....	22
2.3 Προένταση φορέων με τένοντες από ΙΟΠ.....	23
2.3.1 Τένοντες ΙΟΠ.....	23
2.3.2 Αγκυρώσεις τενόντων ΙΟΠ.....	25
2.3.3 Αστοχία του συστήματος αγκύρωσης.....	28
2.3.4 Θέματα σχεδιασμού των τενόντων.....	28
2.3.4.1 Μέγιστη επιτρεπόμενη θλιπτική τάση λόγω προεντάσεως.....	28
2.3.4.2 Απώλειες προεντάσεως.....	29
2.3.4.3 Χαλάρωση.....	30
2.3.4.4 Απομείωση της εφελκυστικής αντοχής σε μη ευθύγραμμους τένοντες.....	31
2.3.4.5 Πλαστιμότητα ή Παραμορφωσιμότητα	32
2.3.4.6 Μήκος μεταφοράς και αγκύρωσης.....	33
2.4 Εξωτερική προένταση φορέων με τένοντες από ΙΟΠ.....	34
2.5 Η Τεχνολογία FIBER BRAGG GRATING σε κατασκευές από σκυρόδεμα	
2.5.1 «Έξυπνα» υλικά - «έξυπνες» κατασκευές.....	35
2.5.2 Είδη αισθητήρων.....	35
2.5.3 Συστήματα FBG και FRP.....	35
2.6 Εφαρμογές Ινοπλισμένων Πολυμερών σε επεμβάσεις.....	39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Διαστασιολόγηση Μελών σύμφωνα με τις συστάσεις του ACI-440

3.1 Γενικά – Τιμές Σχεδιασμού.....	42
3.2 Διασταδιολόγηση για οριακή αντοχή σε κάμψη.....	43
3.3 Οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας.....	47
3.4 Θράυση λόγω ερπυσμού και κόπωση των ράβδων	48
3.5 Διαστασιολόγηση σε διάτμηση.....	48
3.6 Αγκύρωση των ράβδων.....	50
3.7 Παράδειγμα εφαρμογής της διαδικασίας διαστασιολόγησης.....	51

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : Εφαρμογές των οπλισμών ΙΟΠ σε γέφυρες

4.1 Γενικά.....	55
4.2 Παραδείγματα γεφυρών προεντεταμένων με τένοντες απο FRP.....	55

4.2.1 Γέφυρα Heiwei στην επαρχία Huai' an Jiangsu.....	55
4.2.1.1 Προένταση δοκών στη γέφυρα Heiwei με τένοντες από CFRP.....	56
4.2.1.2 Αγκύρωση των τενόντων.....	58
4.2.1.3 Συμπεράσματα από την εφαρμογή.....	59
4.2.2 Γέφυρα Fico et al. bridge στην πόλη Rolla.....	61
4.2.2.1 Κατασκευαστικά θέματα.....	61
4.2.2.2 Συμπεράσματα από την εφαρμογή.....	62
4.3 Οι πρώτες πιλοτικές κατασκευές με οπλισμό FRP.....	63
4.4 Γέφυρες με φορέα από FRP.....	69
4.5 Ανάλυση κόστους.....	72

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα.....	74
Βιβλιογραφία.....	75

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα Πτυχιακή Εργασία παρουσιάζονται τα Σύνθετα Υλικά που χρησιμοποιούνται στον οπλισμό στοιχείων σκυροδέματος με τη μορφή ράβδων σαν κύριος οπλισμός, καθώς και οι εφαρμογές των ινοπλισμένων πολυμερών σε έργα υποδομής.

Ειδικότερα, χωρίζεται σε πέντε μέρη. Στο πρώτο μέρος γίνεται παρουσίαση των σύνθετων υλικών, του τρόπου κατασκευής και εφαρμογής τους, των ιδιοτήτων τους αλλά και των συμπεριφορών τους μαζί με τις περιβαλλοντολογικές παραμέτρους που τα επηρεάζουν.

Στο δεύτερο μέρος, γίνεται αναφορά στη χρήση ράβδων ινοπλισμένων πολυμερών σαν οπλισμός έναντι κάμψης και διάτμησης μαζί με τις γενικές παρατηρήσεις για αυτά. Επίσης αναφέρονται και η χρήση τους στη προένταση φορέων είτε σαν τένοντες, είτε σαν αγκυρώσεις μαζί με τα τυχόν προβλήματα που θα εμφανιστούν καθώς και οι εφαρμογές ινοπλισμένων πολυμερών σε επεμβάσεις.

Συνεχίζοντας, στο τρίτο μέρος, αναλύεται ο τρόπος διαστασιολόγησης των μελών, σύμφωνα με τις συστάσεις του ACI – 440, χρησιμοποιώντας και ένα παράδειγμα της εφαρμογής της παραπάνω διαδικασίας.

Στο τέταρτο μέρος παρουσιάζονται, με χαρακτηριστικά παραδείγματα, εφαρμογές των FRP στις γέφυρες καθώς και η ανάλυση του κόστους αυτών.

Ωστόσο, δεν πρέπει να παραλείψουμε τη συστηματική χρήση εικόνων, καθ' όλη την έκταση της παρούσας εργασίας, για την καλύτερη κατανόηση των όρων και των παραδειγμάτων που παρουσιάζονται. Τέλος, στο πέμπτο μέρος μαζί με τα συμπεράσματα της Πτυχιακής Εργασίας παρατίθεται και η σχετική βιβλιογραφία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Μια από τις βασικές ανάγκες του ανθρώπου είναι η ανάγκη του για ασφάλεια, η οποία εν μέρει καλύπτεται από την εύρεση στέγης ώστε να είναι προφυλαγμένος τόσο από τις καιρικές συνθήκες, όσο και από τους διάφορους παράγοντες που απειλούν τη ζωή του. Έτσι, από τα παλιά χρόνια προσπαθεί να βελτιώσει την ποιότητα και την αντοχή της κατοικίας του και γενικά των έργων που είναι ουσιώδη για την επικοινωνία αλλά και τη διαβίωσή του, μέσω της βελτίωσης των οικοδομικών υλικών που χρησιμοποιούνται σε αυτά καθότι μέχρι σήμερα δεν έχει βρεθεί οικοδομικό υλικό που να καλύπτει την κάθε δυνατή οικοδομική ανάγκη.

Αρχικά χρησιμοποιούνταν μεμονωμένα υλικά, τα οποία παρουσίαζαν ψαθυρή συμπεριφορά, με αποτέλεσμα τη μείωση της φέρουσας ικανότητάς τους. Σαν λύση σε αυτό το πρόβλημα, έχουν παρασκευαστεί τα σύνθετα υλικά, τα οποία συνδυάζουν δυο ή περισσότερα διακριτά υλικά, σε ένα σύνθετο υλικό, το οποίο έχει βελτιωμένες ιδιότητες σε ένα συγκεκριμένο πεδίο ,συγκριτικά με τις ιδιότητες των αρχικών υλικών. Τέτοιο υλικό είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα, το οποίο συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του χάλυβα με τα πλεονεκτήματα του σκυροδέματος και το έχει αναγάγει στο πλέον διαδεδομένο κατασκευαστικό υλικό της εποχής μας.

Παρότι διαδεδομένο το οπλισμένο σκυρόδεμα παρουσιάζει μειονεκτήματα με κυριότερο τη διάβρωση των ράβδων χάλυβα κατά τη χρήση τους σαν οπλισμό στις κατασκευές στα διάφορα περιβάλλοντα που χρησιμοποιείται. Προς αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, αντί του οπλισμού από χάλυβα, έχει αναπτυχθεί και προτείνεται προς χρήση οπλισμός από σύνθετα υλικά, που είναι γνωστός ως οπλισμός από Ινοπλισμένα Πολυμερή (ΙΟΠ) ή FRP (ακρωνύμιο του Fiber Reinforced Polymers).

Τα σύνθετα υλικά σαν ιδέα υπήρχαν για αρκετούς αιώνες, όμως η εισαγωγή τους στη βιομηχανία έγινε πριν από έναν αιώνα με τη δημιουργία πλαστικών υλικών από ίνες, γύρω στο 1900. Υπήρξε ραγδαία ανάπτυξη σε αυτόν τον κλάδο, επειδή υπήρξαν αυξημένες ανάγκες στην αεροναυπηγική για τη εξερεύνηση του διαστήματος. Λόγω των ιδιοτήτων τους, τον υψηλό λόγο αντοχής προς βάρος, αλλά κυρίως λόγω της μεγάλης τους αντοχής σε διαβρωτικό περιβάλλον, τα σύνθετα υλικά βρήκαν πολλές εφαρμογές στους τομείς της αεροναυπηγικής και του πολεμικού ναυτικού γύρω στο 940, αλλά και σε διάφορους άλλους τομείς. Το πρώτο προϊόν των Ινοπλισμένων Πολυμερών ήταν ένα κάλυμμα βάρκας στα μέσα της δεκαετίας του 1930. Μετά από αυτό έχουμε διάφορα προϊόντα βασισμένα στα ινοπλισμένα πολυμερή, όπως είναι τα αλεξίσφαιρα γιλέκα Kevlar, πλαστικοί οπλισμοί για το ερευνητικό έργο του Manhattan στον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, οι οποίοι οδήγησαν στην ανάπτυξη της τεχνολογίας ώστε να καταλήξουμε στις δεξαμενές και στους κινητήρες πυραύλων το 1960 και το 1970 [παρ.1].

Ανάλογη ανάπτυξη με την ανάπτυξη στη βιομηχανία υπήρξε και στη δομική βιομηχανία, όπου τα ινοπλισμένα πολυμερή αποτελούνται από δέσμες ινών ενσωματωμένες σε μήτρα ρητίνης. Χρησιμοποιήθηκαν πρώτη φορά τη δεκαετία του 1960 στα έργα υποδομής, κυρίως ως ενίσχυση σε υπάρχουσες γέφυρες, αλλά και αργότερα ως κυρίως οπλισμός σε νέες κατασκευές. [παρ.2]

Γενικά η έρευνα στο πεδίο των ινοπλισμένων πολυμερών είναι πρόσφατη. Η Ιαπωνική Ένωση Πολιτικών Μηχανικών JSCE (JSCE Recommendations for the Design and Construction of Fiber Reinforced Materials – JSCE, 1997), το Αμερικάνικο Ινστιτούτο Σκυροδέματος, ACI, (ACI 440.IR), η Καναδική Ένωση Προτύπων, το Καναδικό Δίκτυο ISIS (ISIS Design Manual 3) και το Ινστιτούτο των Δομικών Μηχανικών του Ηνωμένου Βασιλείου (Interim Guidance of the Design of Reinforced Concrete Structures using FRP, CIStruct), έχουν αναπτύξει την “πρώτη γενιά” οδηγιών σχεδιασμού για κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα με οπλισμό FRP. Πέρα από τις παραπάνω ενώσεις, πρόσφατα η Ιταλία και η Αίγυπτος (Egyptian Ministry of Housing, Utilities, and Urban Development, 2005), έχουν αναπτύξει τις δικές τους οδηγίες και συστάσεις για την χρήση του οπλισμού αυτού σε κατασκευές σκυροδέματος [παρ.3]. Όλες οι παραπάνω οδηγίες στηρίζονται σε ήδη υπάρχοντες κανονισμούς που αφορούν στις κατασκευές με οπλισμό από χάλυβα. Προς το παρόν δεν υπάρχει αντίστοιχος κώδικας στην Ελλάδα, αλλά στο επίπεδο των πανεπιστημίων υπάρχει αρκετά μεγάλο ερευνητικό έργο για την προσαρμογή των σχέσεων που υπάρχουν από τους υπόλοιπους κανονισμούς στα Ελληνικά δεδομένα ή και για τη δημιουργία απευθείας ελληνικών κανονισμών. Το επόμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας βασίζεται τόσο στον ΕΚΩΣ 2000 για τον οπλισμό με χαλύβδινες ράβδους αλλά και τον ACI για τον οπλισμό με ινοπλισμένα πολυμερή.

1.2 ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα σύνθετα υλικά έχουν προκύψει ως αποτέλεσμα της ανάπτυξης της γνώσης της τεχνολογίας των υλικών και της ανάγκης σχεδιασμού υλικών με βάση τις ανάγκες που καθορίζουν οι εκάστοτε υψηλών απαιτήσεων εφαρμογές. Δύο ή περισσότερα διακριτά υλικά μπορούν να συνδυαστούν σχηματίζοντας ένα σύνθετο υλικό, το οποίο να κατέχει βελτιωμένες ιδιότητες σε σχέση με τις ιδιότητες των συστατικών υλικών του για ένα συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογών.

Ένας τύπος σύνθετου υλικού είναι τα FRP (Fiber Reinforced Polymers), τα οποία αποτελούνται από μία δέσμη ινών που είναι ενσωματωμένη σε μία μήτρα ρητίνης. Ο όρος FRP περιγράφει μια ομάδα υλικών τα οποία κατασκευάζονται από συνθετικές και οργανικές ίνες συγκολλημένες με ρητίνη. Οι ίνες, οι οποίες αναλαμβάνουν κυρίως εφελκυστικές τάσεις παράλληλα στη διεύθυνση τους, είναι εμποτισμένες με κάποιο θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές (εποξειδική ρητίνη, πολυεστέρας κ.α.). Οι πιο συνηθισμένες κατηγορίες αυτού του σύνθετου υλικού είναι τα FRP από άνθρακα (CFRP), από αραμίδιο (AFRP) και από γυαλί (GFRP). Οι ίνες παρέχουν αντοχή και ακαμψία στο σύνθετο υλικό και γενικά φέρουν τα περισσότερα από τα εφαρμοζόμενα φορτία. Η μήτρα ενεργεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να συνδέει και να προστατεύει τις ίνες καθώς και να φροντίζει για τη μεταφορά της τάσης από ένα σε ένα μέσω διατμητικών τάσεων.

1.2.1 Ίνες.

Τα βασικά συστατικά των σύνθετων υλικών ως σύστημα ενίσχυσης είναι οι ίνες σε πολυμερική μήτρα και η κόλλα για την εφαρμογή τους στις επιφάνειες των μελών προς ενίσχυση. Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες ίνες είναι [παρ.4]:

α) Ίνες γυαλιού

Πάνω από το 90% των ινών που χρησιμοποιούνται στην ενίσχυση είναι ίνες γυαλιού, αφού είναι υλικό φθηνό, εύκολο στην παραγωγή και έχει υψηλή αντοχή και δυσκαμψία. Η μικρή

πυκνότητα του, η ανθεκτικότητα του σε χημικά και η άριστη θερμική και ηλεκτρική μονωτική του ικανότητα καθώς και το γεγονός ότι δεν παρουσιάζει σημαντικές ερπυστικές παραμορφώσεις είναι μερικά από τα κύρια χαρακτηριστικά του.

Υπάρχουν 3 τύποι υαλονημάτων:

- τύπου E με μειονέκτημα τη μείωση της αντοχής στο αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος (Εικ. 1.1)
- τύπου C με μεγάλη αντοχή σε αλκαλικό περιβάλλον
- τύπου S με υψηλή αντοχή και υψηλό μέτρο ελαστικότητας

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



Εικόνα 1.1: Ίνες E-glass [παρ.5]

Πίνακας 1: Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού [παρ.6]

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

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

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

S-glass (S=stiffness): Ακριβότερο υλικό από το E-glass, αλλά με υψηλότερη δυσκαμψία και θερμική αντοχή. Χρησιμοποιείται κυρίως στην αεροπορική βιομηχανία. Όταν περιέχονται μεγάλα ποσοστά SiO₂ (>99,5%) παρατηρούνται αυξημένες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων της ίνας και της μέγιστης θερμοκρασίας χρήσης του συνθέτου. Γι' αυτό το λόγο, σε ειδικές εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλές μηχανικές ιδιότητες κάτω από υψηλή θερμοκρασία, χρησιμοποιούνται ίνες από 100% καθαρή πυριτία.

β) Ίνες άνθρακα.

Οι ίνες άνθρακα (Εικ. 1.2) παρασκευάζονται συνήθως από πολυ-ακρυλο-νιτρίλιο (polyacrylonitrile, PAN) ή πίσσα και χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή και μέτρο ελαστικότητας, χαμηλή πυκνότητα και έχουν διάμετρο 5-8 μm.

Διακρίνονται σύμφωνα με τις χαρακτηριστικές τους ιδιότητες σε ίνες : υψηλής αντοχής (high strength HS), μέσου μέτρου ελαστικότητας (intermediate modulus IM), υψηλού μέτρου ελαστικότητας (high modulus HM) και πολύ υψηλού μέτρου ελαστικότητας. (ultra high modulus UHM). Οι ίνες άνθρακα έχουν την υψηλότερη ειδική δυσκαμψία (δυσκαμψία / πυκνότητα) σε σχέση με τις άλλες ίνες και πολύ υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και θλίψη καθώς επίσης είναι ανθεκτικές σε διάβρωση, ερπυσμό, κόπωση και σε υψηλές θερμοκρασίες. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωριστά ή από κοινού με τις ίνες γυαλιού ως υβρίδιο για να αυξηθεί η ακαμψία ενός δομικού μέλους. Οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητές τους παρουσιάζονται στον Πίν. 2.



Εικόνα 1.2: Ίνες άνθρακα [παρ.7]

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών άνθρακα [παρ.8]

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

Σε οξειδωτική ατμόσφαιρα, η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης των ανθρακονημάτων περιορίζεται στους 500 οC και για τους δύο τύπους ινών. Κατά το σχεδιασμό του συνθέτου πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνεται υπόψη και η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης της μήτρας.

Οι ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων ανθρακονημάτων εξαρτώνται σημαντικά από την αρχιτεκτονική των ινών του PAN (μονοδιευθυντικές ίνες, δισδιάστατο πλέγμα, τρισδιάστατο πλέγμα). Ο τρόπος διεύθησης των ινών αυτών καθορίζει και το βαθμό ανισοτροπίας των ανθρακονημάτων που προκύπτουν και μπορεί να ποικίλλει από την πλήρη ισοτροπία ως την πλήρη ανισοτροπία.

Η δυνατότητα επιλογής, από ένα μεγάλο εύρος τιμών της θερμοκρασίας κάθε σταδίου παραγωγής ανθρακονημάτων, δίνει την ευχέρεια παραγωγής ανθρακονημάτων διαφορετικού βαθμού γραφιλίας και διαφορετικών ιδιοτήτων (οι μηχανικές και οι φυσικές ιδιότητες, όπως η θερμική και η ηλεκτρική αγωγιμότητα, εξαρτώνται από το βαθμό γραφιλίας και το βαθμό ανισοτροπίας). Γενικά, όσο καλύτερα προσανατολισμένες είναι οι ίνες και όσο υψηλότερη περιεκτικότητα σε γραφίτη διαθέτουν τόσο καλύτερες μηχανικές ιδιότητες επιδεικνύουν.

Τέλος, το κόστος παραγωγής των ινών γραφίτη είναι δέκα φορές τουλάχιστον υψηλότερο από το κόστος παραγωγής των ινών γυαλιού.

γ) Ίνες πολυμερούς.

Οι πιο διαδεδομένες ίνες πολυμερούς είναι οι ίνες από Nylon, πολυαιθυλένιο και Kevlar. Τα νήματα Nylon και πολυεστέρα παράγονται με φυγοκεντρική περιδίνηση τήγματος, ενώ ακρυλικά και κυτταρινικά νήματα παρασκευάζονται με φυγοκεντρική περιδίνηση διαλύματος και συνακόλουθες τεχνικές καθίζησης ιζήματος. Η αντοχή τους δεν ξεπερνά τα 10 Pa, ενώ το μέτρο ελαστικότητας πλησιάζει τα 1000 Pa. Παρόλο που από μηχανικής άποψης δεν κατατάσσονται στις ίνες υψηλής απόδοσης, εντούτοις το χαμηλό κόστος παραγωγής τους τις καθιστά δημοφιλείς στην αγορά.

Η πρώτη υψηλής απόδοσης οργανική ίνα αραμιδίου (Εικ. 1.3) παρασκευάστηκε από την DuPont και έγινε γνωστή με την εμπορική ονομασία Kevlar και παράγεται σε τρεις τύπους:

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



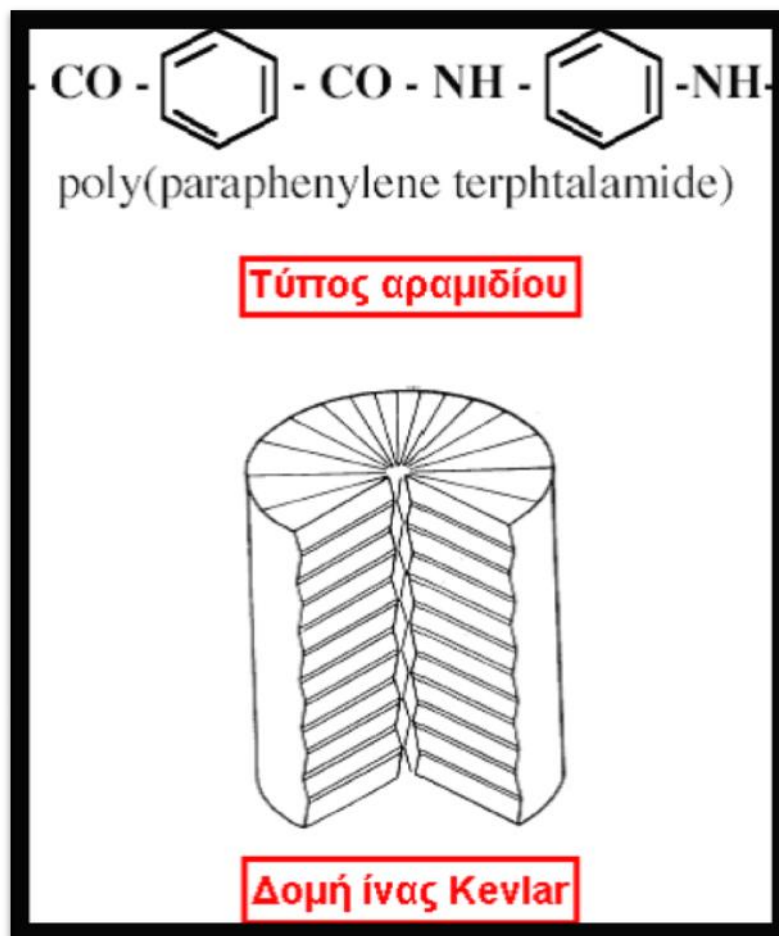
Εικόνα 1.3: Ίνες αραμιδίου [παρ.9]

Η πυκνότητα και των τριών τύπων είναι ίδια (1.45 g/cm^3), ενώ η διαφορετική ελαστικότητα οφείλεται στο γεγονός της βελτιωμένης ευθυγράμμισης των μοριακών αλυσίδων, που αυξάνει την δυσκαμψία στη διεύθυνση του άξονα της ίνας. Στον Πίν. 10 παρατίθενται οι βασικές ιδιότητες των ινών Kevlar.

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικές ιδιότητες των ινών Kevlar [παρ.10]

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

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

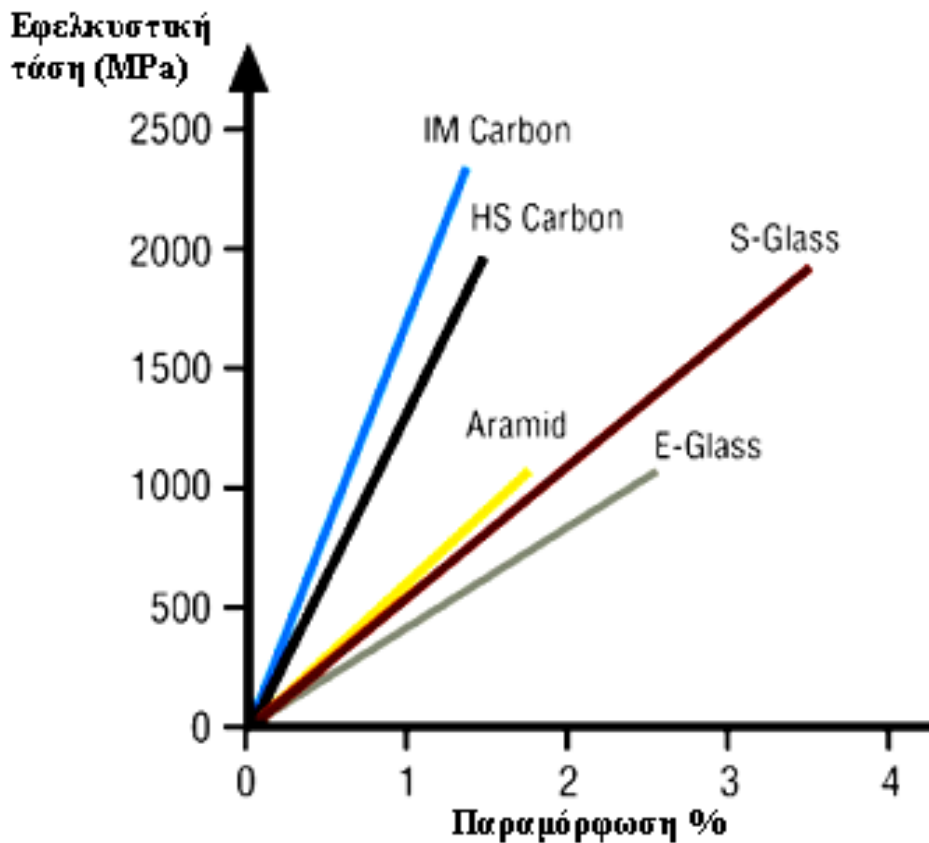


Εικόνα 1.4: Δομή ίνας Kevlar [παρ.11]

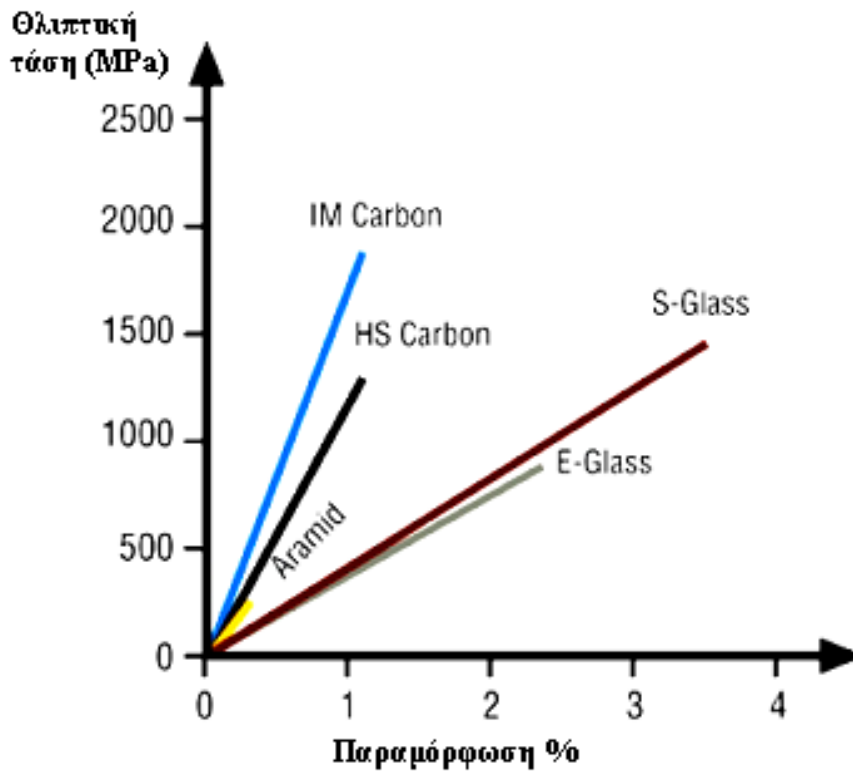
Τέλος υπάρχουν και άλλοι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές πολιτικού μηχανικού και είναι οι ακόλουθες:

- Ίνες γραφίτη: παράγονται όπως οι ίνες άνθρακα με πυρόλυση
- Ίνες βορίου: έχουν την μεγαλύτερη διάμετρο από όλες τις υπόλοιπες ίνες (0.05 - 0.2mm). Η αντοχή και η ακαμψία τους είναι μεγαλύτερες από αυτές των ινών γραφίτη.
- Ίνες από καρβίδιο του πυριτίου: έχουν υψηλή αντοχή σε οξείδωση και ανθεκτικότητα στις υψηλές θερμοκρασίες.

Τα διαγράμματα των Εικ. 12 και 13 απεικονίζουν τη συμπεριφορά των διαφόρων τύπων ινών σε εφελκυσμό και θλίψη.



Εικόνα 1.5: Συμπεριφορά σε εφελκυσμό διαφόρων τύπων ινών [παρ.12]



Εικόνα 1.6: Συμπεριφορά σε θλίψη διαφόρων τύπων ινών [παρ.13]

1.2.2 Μήτρες Συνθέτων Υλικών.

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι πολυμερών που χρησιμοποιούνται ως μήτρες για την παραγωγή σύνθετων υλικών ινών: τα θερμοσκληρυνόμενα και τα θερμοπλαστικά [παρ.14]. Τα θερμοσκληρυνόμενα χρησιμοποιούνται στον κλάδο των οικοδομικών και τεχνικών έργων και είναι οι εποξικές ρητίνες και σπανιότερα ο πολυεστέρας ή βινυλεστέρας. Οι εποξικές ρητίνες υπερέχουν των άλλων τύπων μήτρας λόγω των εξαιρετικών μηχανικών χαρακτηριστικών και της μεγάλης ανθεκτικότητας σε δυσμενείς περιβαλλοντικές επιδράσεις. Προσφάτως έχουν γίνει προσπάθειες αντικατάστασης των πολυμερικών μητρών με υλικά βασισμένα στο τσιμέντο (τσιμεντο-κονιάματα τροποποιημένα με πολυμερή, TRM). Οι μηχανικές ιδιότητες των πολυμερών που χρησιμοποιούνται ως μήτρες σε σύνθετα υλικά συνοψίζονται στον Πίν. 4.

Πίνακας 4: Ιδιότητες ρητινών [παρ.15]

ΕΙΔΟΣ ΡΗΤΙΝΗΣ	ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ Μpa	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ Gpa	ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ (%)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ g/cm ³
ΕΠΟΞΙΚΗ	55-130	2.0-4.5	4.0-14.0	1.2-1.3
ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΗ	35-104	2.1-4.1	< 5.0	1.1-1.46
ΒΙΝΥΛΕΣΤΕΡΙΚΗ	73-81	3.0-3.6	3.5-5.5	1.12-1.32

1.3 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

Μερικές από τις βασικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών όλων των τύπων ινών παρατίθενται παρακάτω [παρ.16]:

- Δεν προσβάλλονται από τα χλωριόντα και έχουν αντοχή σε όξινα περιβάλλοντα
- Βάρος περίπου ίσο με το 1/4 - 1/5 του βάρους των μεταλλικών οπλισμών και προφανώς εξαρτάται από το υλικό των ινών
- Δεν επηρεάζονται από μαγνητικά πεδία και ραδιοσυχνότητες
- Κακοί αγωγοί της θερμότητας και του ηλεκτρισμού

Επιπλέον κάποιες ιδιότητες που αφορούν συγκεκριμένους τύπους ινών είναι:

- Μειωμένη αντοχή των ινών γυαλιού σε αλκαλικό περιβάλλον όπως αυτό του σκυροδέματος
- Πολύ καλή συμπεριφορά των ινών αραμιδίου σε κρουστικά φορτία

1.4 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

1.4.1 Γενικά

Τα FRP χαρακτηρίζονται από μεγάλη εφελκυστική αντοχή της τάξης των 1500- 3000 MPa που είναι 3-10 φορές μεγαλύτερη από αυτή του κοινού χάλυβα S500 (Εικ. 1.5). Οι τιμές αυτές των αντοχών ισχύουν κατά κύριο λόγο για βραχυχρόνια φόρτιση ενώ για μακροχρόνια οι τιμές μειώνονται σημαντικά ανάλογα με το είδος της ίνας. Συγκεκριμένα στις ίνες γυαλιού που το μέτρο ελαστικότητας έχει τη μικρότερη τιμή ≈ 50 GPa και η παραμόρφωση αστοχίας

του έχει μεγαλύτερη τιμή ίση με 3%, η εφελκυστική τους αντοχή σε μακροχρόνια φόρτιση μειώνεται κατά περίπου 80% της αρχικής. Στις ίνες αραμιδίου οι οποίες έχουν μια ενδιάμεση τιμή μέτρου ελαστικότητας (65-120 GPa) και παραμόρφωσης (2-3%) η εφελκυστική αντοχή με το χρόνο μειώνεται μέχρι το 50-65%. Τέλος για τις ίνες άνθρακα που έχουν το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας (35-190 GPa) και τη μικρότερη παραμόρφωση αστοχίας (1-1,5%) η εφελκυστική τους αντοχή μπορεί να μειωθεί μακροχρόνια μέχρι και 75-95%. Από την Εικ. 1.5 παρατηρείται ότι τα σύνθετα υλικά συμπεριφέρονται τελείως πλαστικά μέχρι την αστοχία τους [παρ.17].

1.4.2 Τρόπος προσδιορισμού μηχανικών ιδιοτήτων ΙΟΠ.

Οι ιδιότητες των ινοπλισμένων πολυμερών λαμβάνονται από δοκιμές εφελκυσμού και εξαρτώνται από την ρητίνη επικόλλησης που χρησιμοποιείται καθώς και από τις διαδικασίες που ακολουθούνται κατά την διάρκεια των δοκιμών. Συγκεκριμένα παρασκευάζονται δοκίμια υπό μορφής ελάσματος, χρησιμοποιώντας ίδιες ίνες και ρητίνη με εκείνες που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν καθώς και την ίδια διαδικασία συντήρησης. Στις άκρες τοποθετείται μια μπάρα αλουμινίου. Στην συνέχεια δοκιμάζεται σε μηχανή εφελκυσμού έως την αστοχία του δοκίμιου (ιδανικά με θραύση των ινών).



Εικόνα 1.7: Δείγμα ΙΟΠ για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής του [παρ.18]

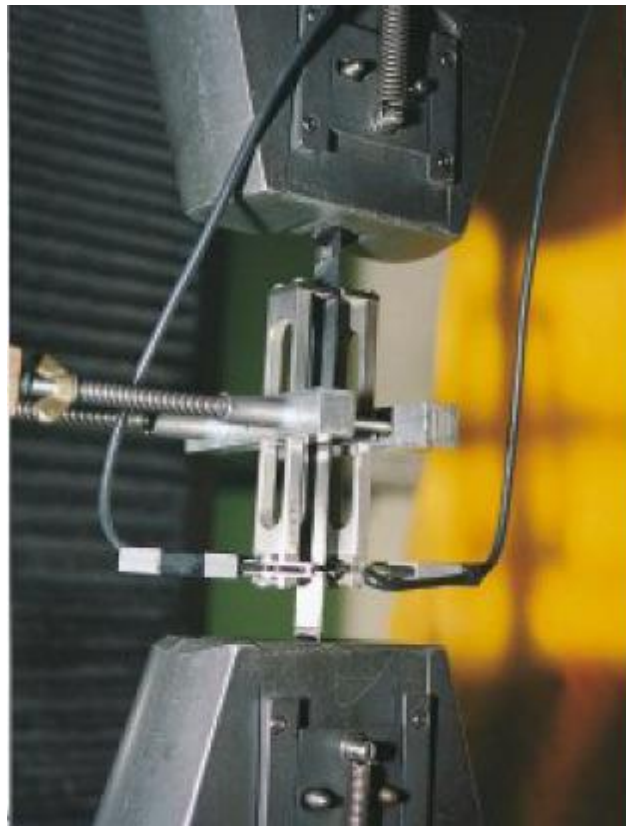
1.5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

1.5.1 Γενικά.

Οι μηχανικές ιδιότητες των ινοπλισμένων πολυμερών αλλάζουν με την έκθεση των υλικών σε επιβλαβές περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα θα εξετάσουμε παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η υπεριώδης ακτινοβολία, η υγρασία, η παρουσία χλωριδίων και η αλκαλικότητα. Οι αλλαγές σε ιδιότητες όπως το μέτρο ελαστικότητας, η εφελκυστική αντοχή καθώς και η αντοχή συνάφειας θα θεωρηθούν ως δείκτες της επίδρασης των παραγόντων αυτών στη συμπεριφορά των υλικών.

Πρέπει όμως να τονισθεί ότι η απουσία ολοκληρωμένων πειραματικών δοκιμών ευρέως αποδεκτών και η διακύμανση των αποτελεσμάτων λόγω των ιδιαίτερων κάθε φορά συνθηκών δυσχεραίνει την βαθύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των υλικών. Ακόμη, οι πειραματικές μέθοδοι προκειμένου να προσομοιάσουν την μακροχρόνια έκθεση των υλικών χρησιμοποιούν επιταχυνμένους μηχανισμούς διάβρωσης υποβάλλοντας τα δοκίμια σε συνθήκες πολύ πιο επιβλαβείς από αυτές που πρόκειται να επιδράσουν στην πραγματικότητα. Ωστόσο είναι αβέβαιο σε ποιο βαθμό τα αποτελέσματα αυτά αντιπροσωπεύουν την συμπεριφορά των υλικών σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον τα

δεδομένα από την εμπειρία χρήσης των FRP σε πραγματικές κατασκευές παραμένουν ελλιπή. Με αυτές τις σκέψεις στο νου θα επιχειρήσουμε μια γενική αποτύπωση της ανθεκτικότητας των FRP [παρ.19].



Εικόνα 1.8: Πραγματοποίηση δοκιμής εφελκυσμού σε δείγματα ΙΟΠ [παρ.20]



Εικόνα 1.9: Αστοχία δείγματος ΙΟΠ [παρ.21]

1.5.2 Επίδραση φωτιάς-θερμοκρασίας.

Αρχικά θα ορίσουμε την έννοια της θερμοκρασίας υαλόδους μετάπτωσης (glass-transition) T_g για τα πολυμερή. Είναι η θερμοκρασία πέραν της οποίας η αυξημένη κινητικότητα των μορίων επηρεάζει καθοριστικά τις ιδιότητες της σκληρυμένης ρητίνης, η οποία αρχίζει να μαλακώνει ενώ παράλληλα μειώνεται δραματικά το μέτρο ελαστικότητάς της και οι μηχανικές της ιδιότητες [παρ.22]. Γενικά οι τιμές της T_g για τις διάφορες ρητίνες ποικίλουν και κυμαίνονται μεταξύ 70-175°C. Συνιστάται η χρήση FRP σε κατασκευές όπου η T_g της ρητίνης είναι τουλάχιστον 30°C υψηλότερη από τη μέγιστη αναμενόμενη θερμοκρασία και σε καμία περίπτωση δεν επιτρέπεται η χρήση τους σε μέλη όπου η ανθεκτικότητά τους υπό την επίδραση φωτιάς είναι καθοριστική για τη δομική ευστάθεια της κατασκευής.

Στις περισσότερες περιπτώσεις ακόμα και σε συνθήκες πυρκαγιάς τα FRP δεν κινδυνεύουν σε αστοχία λόγω καύσης καθώς το σκυρόδεμα τους παρέχει προστασία από την άμεση επαφή με την φωτιά και παράλληλα η απουσία οξυγόνου καθιστά αδύνατη την επέκτασή της μέσα στον δομικό μέλος. Ωστόσο, μέσα στο σώμα του σκυροδέματος αναπτύσσονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες που όταν ξεπεράσουν την τιμή της T_g τα μηχανικά χαρακτηριστικά του FRP μειώνονται δραματικά. Αυτή η απομείωση της αντοχής δεν έχει τόσο σχέση με τις ίνες οι οποίες έχουν καλύτερη απόκριση από τη ρητίνη και είναι ικανές να φέρουν φορτία και σε πιο υψηλές θερμοκρασίες. Έχει όμως σχέση με τη λειτουργία του σύνθετου υλικού καθώς η «μαλακωμένη» πλέον ρητίνη είναι ανίκανη να αναπτύξει την απαιτούμενη συνάφεια τόσο με το σκυρόδεμα όσο και με τις ίνες ώστε να μεταβιβασθούν αποτελεσματικά τα φορτία. Έτσι μειώνεται η καμπτική και η διατμητική αντοχή του μέλους. Ως εκ τούτου μπορεί να παρατηρηθούν εκτεταμένη ρηγματώση και μεγάλα βέλη κάμψης. Ωστόσο, ενδέχεται και ολική κατάρρευση του μέλους αν χαθεί η αγκύρωση του οπλισμού λόγω «μαλακώματος» του FRP ή αν η θερμοκρασία υπερβεί το θερμοκτικό όριο των ινών (ίνες γυαλιού 880°C, αράμιδου 180°C, άνθρακα 1600°C). Για να μην υπάρχει ο κίνδυνος απώλειας αγκύρωσης τα άκρα των μελών θα πρέπει να προστατεύονται κατάλληλα ώστε να αποφευχθεί η έκθεσή τους σε φωτιά [παρ.23].

Σε περίπτωση ωστόσο που τα FRP (κυρίως αυτά με μήτρες από οργανικές ρητίνες) προσβληθούν από φωτιά η συμπεριφορά τους είναι η εξής: ανάφλεξη σε όλη την επιφάνεια του υλικού, απελευθέρωση θερμότητας και αερίων (που μπορεί να είναι και τοξικά ενώ παράλληλα δυσχεραίνουν την επέκταση της φωτιάς στο εσωτερικό του υλικού δημιουργώντας μια μονωτική στρώση στην επιφάνεια) [παρ.24].

Η έκθεση των FRP επίσης σε χαμηλές θερμοκρασίες καθώς και οι θερμοκοί κύκλοι απότομων και έντονων εναλλαγών θερμοκρασίας μπορεί να προκαλέσουν βλάβες στις κατασκευές. Με την πτώση της θερμοκρασίας η μήτρα ρητίνης σκληραίνει και ενδέχεται να προκληθεί μικρορηγματώση και μείωση της συνάφειας μήτρας ρητίνης-ινών. Η επακόλουθη διαστολή και συστολή του υλικού ως αποτέλεσμα των συνεχών θερμοκρασιακών εναλλαγών υποβαθμίζει τις ιδιότητες του υλικού και το καθιστά πιο επιρρεπές στην προσβολή του από άλατα.

1.5.3 Υπεριώδης ακτινοβολία.

Η έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να διαβρώσει τα FRP. Οι υπεριώδεις ακτίνες προκαλούν χημικές αντιδράσεις στο πολυμερές υλικό της μήτρας ρητίνης με επακόλουθη υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του ινοπλισμένου πολυμερούς. Ωστόσο αν τα FRP προορίζονται για χρήση ως εσωτερικός οπλισμός δεν αντιμετωπίζουν πρόβλημα καθώς το σκυρόδεμα τους προσφέρει την απαραίτητη επικάλυψη. Προσοχή πρέπει να δοθεί κατά την αποθήκευση των υλικών FRP και τη χρήση τους στο εργοτάξιο ώστε να μην εκτίθενται άμεσα στην ηλιακή ακτινοβολία [παρ.25].

1.5.4 Υγρασία.

Η επίδραση της υγρασίας σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία και την επιβαλλόμενη φόρτιση μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της αντοχής και της ακαμψίας των υλικών FRP. Η απορρόφηση νερού κυρίως προσβάλλει τη μήτρα ρητίνης εφόσον τα μόρια νερού μπορεί να λειτουργήσουν ως πλαστικοποιητές της ρητίνης και να διαταράξουν τους δεσμούς Van-der-Waals στις πολυμερές αλυσίδες. Ως αποτέλεσμα μπορεί να προκληθούν αλλαγές στο μέτρο

ελαστικότητας, την αντοχή, την ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας, τη σκληρότητα, δημιουργία τάσεων από διόγκωση και επακόλουθη ρηγμάτωση, φαινόμενα υδρόλυσης και απουσία συνάφειας ινών-ρητίνης. Τα φαινόμενα αυτά είναι πιο έντονα σε κορεσμένο περιβάλλον και θερμοκρασίες >60°C. Ωστόσο με κατάλληλη κατεργασία κατά την παραγωγή τους και συνδυασμό των συστατικών τους ουσιών οι ρητίνες μπορεί να αποκτήσουν υψηλή αντοχή στη διάβρωση από την υγρασία.

1.5.5 Διάβρωση από χλωρίδια και αλκάλια.

Γενικά ένα μεγάλο πλεονέκτημα των FRP είναι πως σε αντίθεση με τον χάλυβα δεν διαβρώνονται εύκολα. Οι ράβδοι χάλυβα ως γνωστόν διαβρώνονται, ιδιαίτερα δε με την παρουσία αλάτων και η επακόλουθη αύξηση όγκου του υλικού προκαλεί ρηγμάτωση και αποφλοιώση του σκυροδέματος. Τα FRP είναι πολύ πιο ανθεκτικά, ωστόσο δεν πρέπει να αποκλείεται εντελώς το ενδεχόμενο διάβρωσής τους υπό έκθεση σε πολύ δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα θα αναφερθούμε στην επίδραση των χλωριδίων και των αλκαλίων.

Με βάση πειράματα σε υλικά FRP που εκτέθηκαν σε περιβάλλον σκυροδέματος υπό τη σύγχρονη επίδραση χλωριδίων-υγρασίας, γενικεύοντας μπορούν να ειπωθούν τα εξής: οι ράβδοι CFRP παρουσιάζουν αμελητέα διάβρωση τόσο σε σχέση με το περιβάλλον φόρτισης όσο και με τη θερμοκρασία και το χρόνο. Ωστόσο οι ράβδοι AFRP και GFRP σε κάποιες περιπτώσεις παρουσίασαν μείωση αντοχής και ακαμψίας έως και 50%, χαλάρωση προεντάσεως πάνω από 30% και μείωση ροπής αντοχής πάνω από 20%. Παρόλα αυτά πρέπει να τονισθεί ότι λόγω της φύσης των πειραμάτων δεν είναι σαφές ότι η διάβρωση είναι αποτέλεσμα της δράσης των χλωριδίων αντίθετα μπορεί να οφείλεται σε μεγάλο βαθμό είτε στην απορρόφηση υγρασίας είτε στο αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος [παρ.26].

Τα ινοπλισμένα πολυμερή ως εσωτερικός οπλισμός ενσωματώνονται στο σκυρόδεμα το οποίο «οφείλει» να τα προστατέψει από την επίδραση του εξωτερικού περιβάλλοντος. Ωστόσο το ίδιο σώμα του σκυροδέματος λόγω της αλκαλικότητας του ενοχοποιείται για τη διάβρωση των FRP ιδιαίτερα των GFRP και λιγότερο των AFRP, CFRP. Σημαντικό ρόλο στο βαθμό διάβρωσης παίζει το είδος των ινών γυαλιού καθώς και η ρητίνη που εμποδίζει την προσβολή των ινών από τα αλκάλια. Οι περισσότεροι ερευνητές ισχυρίζονται ότι οι βινυλεστερικές ρητίνες υπερτερούν σαφώς έναντι των άλλων συνήθων ρητινών. Θα πρέπει επίσης να τονισθεί πως στην πλειονότητα των πειραματικών δοκιμών προσομοιάζεται το αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος με αλκαλικά διαλύματα τα οποία όμως είναι πολύ πιο επιβλαβή για το FRP λόγω της κινητικότητας των ιόντων κάτι που ωστόσο απέχει από τις πραγματικές συνθήκες στο σώμα του σκυροδέματος. Έτσι ενδέχεται οι εκτιμήσεις αντοχών βασισμένες στα πειραματικά δεδομένα να είναι πολύ συντηρητικές [παρ.27].

Ενδεικτικά αναφέρονται: για ράβδους GFRP μείωση εφελκυστικής αντοχής έως και 75% , μείωση μέτρου ελαστικότητας υπό σύγχρονο φορτίο ή χωρίς έως και 20%, για ράβδους AFRP υπό την επίδραση αλκαλικών διαλυμάτων υψηλής θερμοκρασίας και υπό εφελκυστικό φορτίο ή χωρίς έως 50% ή 20% αντίστοιχα, για ράβδους CFRP ,αφόρτιστες, μείωση αντοχής και ακαμψίας έως και 20% [παρ.28].

1.6 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΠΟ ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗ.

1.6.1 Ερπυσμός

Ως ερπυσμός ορίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο αυξάνεται η παραμόρφωση με το χρόνο υπό σταθερό φορτίο. Γενικά οι ίνες άνθρακα και γυαλιού δεν έρπουν, ωστόσο οι περισσότερες ρητίνες που είναι βισκοελαστικά υλικά έρπουν και ως εκ τούτου η κατ' όγκο αναλογίες ινών και ρητίνης επηρεάζουν σημαντικά την αντίσταση σε ερπυσμό του σύνθετου υλικού. Υπό την επίδραση σταθερού φορτίου και μετά από την πάροδο ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος (endurance time) η ράβδος FRP μπορεί να αστοχήσει ξαφνικά. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται ερπυστική διάρρηξη (creep rupture) και μπορεί να συμβεί σε οποιοδήποτε υλικό [παρ.29]. Ωστόσο, στις συνήθεις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα με χαλύβδινο οπλισμό σχεδόν ποτέ δεν επηρεάζει τον σχεδιασμό, παρά μόνο στην περίπτωση πυρκαγιάς, όπου πρέπει να ληφθεί υπόψη λόγω της επίδρασης υψηλής θερμοκρασίας .

Αντίθετα τα FRP είναι πιο ευαίσθητα σε φαινόμενα ερπυσμού και γενικά όσο ο λόγος των μόνιμων φορτίων προς την βραχυχρόνια αντοχή του υλικού αυξάνεται τόσο η endurance time μειώνεται. Πειράματα έχουν δείξει ότι δεν υπάρχει κίνδυνος ερπυστικής διάρρηξης (creep rupture) για μόνιμα φορτία μικρότερα του 60% της αντοχής του υλικού που ικανοποιείται σχεδόν πάντα στις συνήθεις εφαρμογές. Ωστόσο ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην περίπτωση προεντάσεως ράβδων FRP. Αυτό είναι ένα μειονέκτημα γιατί ενώ οι ράβδοι FRP γενικά έχουν μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή από αυτές του χάλυβα η προένταση δεν μπορεί να την εκμεταλλευθεί λόγω του φαινομένου της ερπυστικής διάρρηξης. Παράγοντες που επιδεινώνουν το φαινόμενο του ερπυσμού είναι η υψηλή θερμοκρασία (συνήθως πάνω από το 40% του σημείου τήξης), η υπεριώδης ακτινοβολία, το έντονα αλκαλικό περιβάλλον, η υγρασία, συνεχείς και έντονες εναλλαγές θερμοκρασίας [παρ.30].

1.6.2 Κόπωση

Ως κόπωση ορίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο στοιχεία που καταπονούνται από περιοδικώς επαναλαμβανόμενα φορτία αστοχούν χωρίς οι εφαρμοζόμενες εξωτερικές φορτίσεις να έχουν φθάσει το όριο διαρροής ή θραύσεως του υλικού. Η αστοχία σε κόπωση συνδέεται κατά κύριο λόγο με τις αναπόφευκτες μικροσκοπικές ατέλειες και γεωμετρικές ασυνέχειες που είτε προϋπάρχουν είτε συσσωρεύονται στο εσωτερικό του κάθε υλικού. Γενικά τα ινοπλισμένα πολυμερή επιδεικνύουν πολύ καλή αντοχή σε κόπωση, όπως αποδεικνύει πληθώρα πειραματικών δεδομένων αλλά και η ίδια η εμπειρία δεκαετιών χρήσης τους στην αεροναυπηγική [παρ.31].

Ωστόσο, είναι δύσκολος ο επακριβής υπολογισμός του ορίου κοπώσεως λόγω των ποικίλων πιθανών μηχανισμών αστοχίας σε κόπωση , των παραγόντων που την επηρεάζουν και της φύσης των σύνθετων υλικών. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι αστοχία μπορεί να επέλθει λόγω ρηγματώσεως της μήτρας ρητίνης, λόγω θραύσεως των ινών, αποφλοιώσεως κ.α. Σημαντική μπορεί να είναι η επίδραση του περιβάλλοντος (υψηλή θερμοκρασία, υγρασία) στην επιτάχυνση του φαινομένου της κοπώσεως, εφόσον όμως υπάρχει κάποια ασυνέχεια στη μήτρα ρητίνης που θα επιτρέπει τη διάβρωση των ινών. Αύξηση της μέσης τάσης ή του ρυθμού επιβολής της κυκλικής φόρτισης συμβάλει επίσης σε ταχύτερη απομείωση της αντοχής [παρ.32].

Οι ραβδώσεις που εξυπηρετούν κυρίως τους μηχανισμούς συνάφειας αποτελούν παράλληλα και ασυνέχειες υλικού και ως εκ τούτου σημεία συγκέντρωσης τάσεων. Η καταπόνηση σε αυτές τις περιοχές είναι τριαξονική που σημαίνει ότι η αστοχία εξαρτάται από την αντοχή της μήτρας ρητίνης. Υπό κυκλική φόρτιση μπορεί ο ρόλος τους να είναι καθοριστικός για τη συμπεριφορά του μέλους [παρ.33].

1.7 Συμπερασματικές παρατηρήσεις

Στο παρόν κεφάλαιο έγινε μια σύντομη ανασκόπηση των βασικών ιδιοτήτων των συνθέτων υλικών τύπου ΙΟΠ. Οι παράγοντες που επιδρούν στις ιδιότητες των ινών κυρίως επηρεάζουν την εφελκυστική αντοχή και ακαμψία του σύνθετου υλικού, ενώ αυτοί που επιδρούν στις ιδιότητες της μήτρας ρητίνης κυρίως επηρεάζουν την αντοχή σε συνάφεια.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της χρήσης σύνθετων υλικών για σε σχέση με τα συμβατικά υλικά οπλισμού σκυροδέματος είναι τα εξής [παρ.34]:

- Μεγάλη εφελκυστική αντοχή ιδιαίτερα στην διεύθυνση των ινών (μέχρι 3000MPa) και μέτρο ελαστικότητας.
- Έχουν χαμηλό βάρος (1/4 του χάλυβα).
- 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.
- Ευκολία τοποθέτησης λόγω του ότι διατίθενται σε μεγάλα μήκη και έχουν μικρό βάρος
- Είναι αποτελεσματικά στην προστασία από διάβρωση.

Παρ' όλες τις υψηλές προσδοκίες που έχουν καλλιεργηθεί, η χρήση των ΙΟΠ πρέπει να γίνεται με προσοχή καθώς παρουσιάζουν αρκετά μειονεκτήματα μερικά από τα οποία είναι τα παρακάτω [παρ.35]:

- Απότομη πτώση της εφελκυστικής αντοχής, ακαμψίας και ικανότητας απορρόφησης ενέργειας μετά από μακροχρόνια φόρτιση.
- Έχουν ιδιαίτερα υψηλό κόστος (ειδικά το CFRP) περίπου 9 φορές μεγαλύτερο από το κόστος του Fe 360.
- Συμπεριφέρονται πλήρως ελαστικά (έλλειψη πλαστικότητας) μέχρι την αστοχία τους που σημαίνει αδυναμία απορρόφησης ενέργειας.
- Χαμηλό μέτρο ελαστικότητας (ως προς τον χάλυβα) εκτός του CFRP.
- Το GFRP δεν έχει καλά χαρακτηριστικά έναντι κόπωσης.

- Η έκθεση σε περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η υγρασία, η δράση χημικών, οι αυξομειώσεις της θερμοκρασίας και η υπεριώδης ακτινοβολία επιδρά αρνητικά στην απόδοση τους.
- Τα σύνθετα υλικά μπορούν να αναλάβουν φορτία μόνο κατά τη διεύθυνση των ινών τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

2.1 ΡΑΒΔΟΙ ΙΟΠ ΩΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΜΨΗΣ

2.1.1 Γενικά.

Στην ενότητα αυτή θα γίνει μια παρουσίαση των σημαντικότερων σημείων του σχεδιασμού κατασκευών σκυροδέματος με οπλισμό από ΙΟΠ, όπως έχει ως τώρα αναπτυχθεί σύμφωνα με τις υπάρχουσες οδηγίες και κανονισμούς (Αμερικάνικος, Καναδικός, Ιαπωνικός). Σκοπός είναι να γίνει κυρίως μια ποιοτική προσέγγιση ώστε αναδειχθούν συγκριτικά με τον χάλυβα τα κοινά σημεία αναφοράς αλλά και οι ιδιαίτερες ιδιότητες των FRP και πως μπορεί αυτές να ωθήσουν προς νέες αντιλήψεις σχεδιασμού. Η ενότητα βασίζεται στον ACI 440.1R-06 και παράλληλα υπάρχουν και σχετικές αναφορές στις Ιαπωνικές και τις Καναδικές οδηγίες.

2.1.2 Φιλοσοφία του σχεδιασμού έναντι κάμψης.

Ο σχεδιασμός είναι ανάλογος με αυτόν για οπλισμό από χάλυβα, καθώς σύμφωνα με πειραματικά δεδομένα οι θεμελιώδεις παραδοχές που αποτελούν τη βάση του σχεδιασμού σε κάμψη στοιχείων σκυροδέματος οπλισμένα με χάλυβα ισχύουν και για τα FRP [παρ.36].

Η φιλοσοφία σχεδιασμού σε κάμψη με οπλισμό χάλυβα βασίζεται κυρίως στο φαινόμενο της διαρροής του χάλυβα. Συνήθως οι διατομές οπλίζονται με ποσοστό οπλισμού τέτοιο που να εξασφαλίζει ότι ο χάλυβας θα διαρρεύσει πριν την (ψαθυρή) αστοχία του σκυροδέματος. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται πλήρης εκμετάλλευση του οπλισμού και η αναπτυσσόμενη πλαστιμότητα (παραλαβή παραμορφώσεων μετά το σημείο διαρροής) εξασφαλίζει επαρκή προειδοποίηση για την επικείμενη αστοχία.

Τα FRP όμως παρουσιάζουν γραμμικώς ελαστική σχέση τάσεων-παραμορφώσεων έως την αστοχία (Εικ. 1.5 και 1.6) και ως εκ τούτου δεν διαθέτουν πλαστικότητα. Βέβαια μια μικρή ένδειξη της επικείμενης αστοχίας, λόγω του σημαντικά μικρότερου μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με αυτό του χάλυβα, είναι η αναμενόμενη ανάπτυξη μεγαλύτερων παραμορφώσεων για ανάλογα επίπεδα τάσεων. Πάντως η αντίληψη για μη αστοχία του σκυροδέματος πριν τη «διαρροή» του οπλισμού στην περίπτωση των FRP οφείλει να επανεξετασθεί. Ως «αντιστάθμισμα» τα FRP έχουν υψηλότερη εφελκυστική αντοχή από τον χάλυβα και με χρήση σκυροδέματος υψηλής αντοχής ο σχεδιασμός θα μπορούσε να την εκμεταλλευθεί. Ωστόσο το σκυρόδεμα υψηλής αντοχής παρουσιάζει πολύ πιο ψαθυρή συμπεριφορά.

2.1.3 Βασικές παραδοχές.

Έχουν ως εξής [παρ.37]:

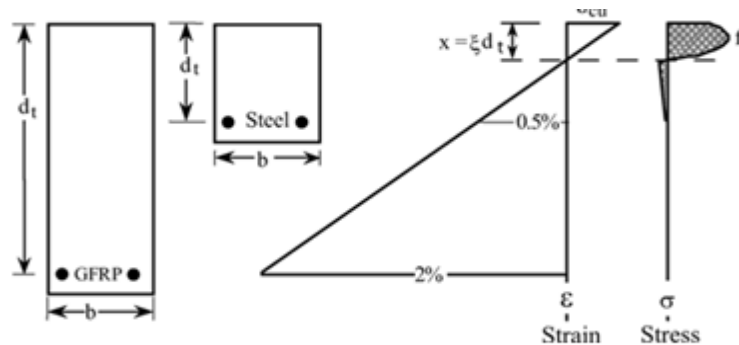
- Οι διατομές παραμένουν επίπεδες και κάθετες στον κεντροβαρικό άξονα (η παραμόρφωση του οπλισμού είναι γραμμική συνάρτηση της απόστασης του από τον ουδέτερο άξονα της διατομής).
- Υπάρχει πλήρης συνάφεια οπλισμού και σκυροδέματος (στα σημεία επαφής τους έχουν ίσες παραμορφώσεις).

- Ως μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση σε θλίψη (όριο θραύσης) του σκυροδέματος θεωρείται το 0,003.
- Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος αμελείται.
- Η συμπεριφορά του FRP σε κάμψη θεωρείται γραμμικώς ελαστική έως την αστοχία (απουσία σημείου διαρροής).

2.1.4 Αντοχή σε κάμψη.

Ο σχεδιασμός σε οριακή κατάσταση αστοχίας βασίζεται στην απαίτηση για ικανοποίηση της εξίσωσης $\varphi \times M_n \geq M_u$, όπου φ συντελεστής ασφαλείας, M_n η ροπή αντοχής και M_u η δρώσα ροπή από τα εξωτερικά φορτία.

Η ροπή αντοχής της διατομής σε κάμψη υπολογίζεται ανάλογα με αυτή του χάλυβα, με βάση την παραδοχή ίσων παραμορφώσεων, την εσωτερική ισορροπία δυνάμεων στη διατομή και τον τρόπο αστοχίας (σκυροδέματος ή FRP). Γενικά πρέπει να παρατηρηθεί ότι σε αντίθεση με τον χάλυβα τα FRP έχουν σημαντικά μεγαλύτερο λόγο (τάση θραύσεως / μέτρο ελαστικότητας). Ως εκ τούτου η θέση του ουδέτερου άξονα αναμένεται να είναι έντονα πιο κοντά στην πιο θλιβόμενη ίνα σκυροδέματος που σημαίνει γενικά πολύ μικρότερο βάθος θλιβόμενης ζώνης και μεγαλύτερες παραμορφώσεις και ρηγμάτωση σε σύγκριση με μια αντίστοιχη διατομή οπλισμένη με χάλυβα (Εικ. 2.1) [παρ.38].



Εικόνα 2.1: Ισορροπία διατομής σκυροδέματος με οπλισμό από ΙΟΠ [παρ39.]

Η αστοχία σε κάμψη της διατομής μπορεί να οφείλεται είτε σε αστοχία σε εφελκυσμό του οπλισμού είτε σε θραύση του σκυροδέματος υπό θλίψη. Για να διακριθεί ο τρόπος αστοχίας συγκρίνεται το μηχανικό ποσοστό οπλισμού ρ της εκάστοτε διατομής με την οριακή τιμή ρ_{fb} (ιδεατής «διατομής ισορροπίας» για ταυτόχρονη αστοχία σκυροδέματος και οπλισμού, που προσδιορίζεται λογίζοντας την τάση θραύσεως του FRP, εφόσον δεν διαρρέει).

Αν $\rho_f < \rho_{fb}$ υπάρχει αστοχία της εφελκυσόμενης ζώνης (υπό-οπλισμένη διατομή). Αντίστοιχα, αν $\rho_f > \rho_{fb}$ υπάρχει αστοχία της θλιβόμενης ζώνης (υπέρ-οπλισμένη διατομή). Στον Πίνακα 2.1 δίνονται κάποιες ενδεικτικές τιμές του ρ_{fb} .

Πίνακας 2.1: Τυπικές τιμές για το ρ_b σε ορθογωνική διατομή με $f'_c = 34.5\text{MPa}$ [παρ.40]

Bar type	Yield Strength F_y or tensile strength F_{fu} Mpa	Modulus of elasticity GPa	ρ_b or ρ_{fb}
Steel	414	200	0.0335
GFRP	552	41.4	0.0078
AFRP	1172	82.7	0.0035
CFRP	2070	152	0.0020

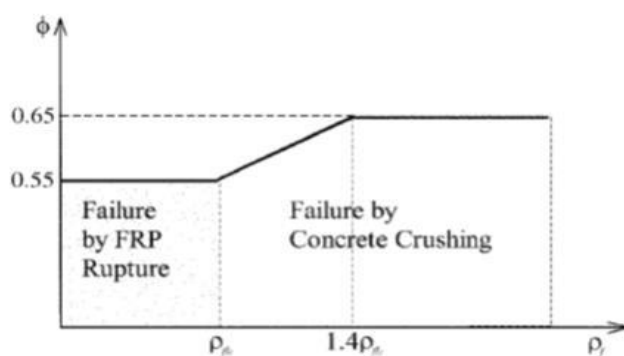
Παρατηρείται ότι οι τιμές για τα FRP είναι σημαντικά μικρότερες από τις αντίστοιχες του χάλυβα (και σε μερικές περιπτώσεις είναι μικρότερες και της τιμής 0,0035 που ορίζει το ελάχιστο απαιτούμενο ποσοστό χάλυβα σε μια διατομή). Αυτό οφείλεται στον λόγο $(E_f/f_{fu}) \ll (E_s/f_{sy})$. Αυτό σημαίνει πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί πολύ λιγότερος οπλισμός FRP για να παραληφθεί η ίδια ροπή. Ωστόσο όσο μικρότερο είναι το ρ τόσο μεγαλύτερες είναι οι τάσεις που αναπτύσσονται στον οπλισμό και αντίστοιχα στη θλιβόμενη ζώνη σκυροδέματος (θα πρέπει να ληφθούν υπόψη σε φαινόμενα ερπυσμού στο σκυρόδεμα), επίσης τόσο μεγαλύτερη είναι και η επακόλουθη ανηγμένη παραμόρφωση του οπλισμού που ίσως οδηγήσει σε πιο έντονη ρηγμάτωση του σκυροδέματος. Από την άλλη πλευρά η επιλογή μεγαλύτερου ρ θέτει υπό εξέταση ζητήματα οικονομικότητας [παρ.41].

Καθώς τα FRP δεν διαθέτουν πλαστιμότητα ο συντελεστής ασφαλείας ορίζεται πιο συντηρητικά από τον αντίστοιχο για σχεδιασμό με οπλισμό από χάλυβα. Έτσι [παρ.42]:

$$\begin{aligned} \phi &= 0,55 && \text{για } \rho_f < \rho_{fb} \\ \phi &= 0,3 + 0,25 \times \rho_f / \rho_{fb} && \text{για } \rho_{fb} < \rho_f < 1,4 \times \rho_{fb} \\ \phi &= 0,65 && \text{για } \rho_f \geq 1,4 \times \rho_{fb} \end{aligned}$$

Οι παραπάνω τιμές του συντελεστή παρουσιάζονται σχηματικά στην Εικ. 2.2.

Σύμφωνα με τις ιαπωνικές οδηγίες ο συντελεστής αυτός μπορεί να λαμβάνεται ίσος με 0,77 [παρ.43].



Εικόνα 2.2: Τιμές του συντελεστή ασφαλείας ϕ για το σχεδιασμό μελών σκυροδέματος με οπλισμό από ΙΟΠ [παρ.44].

Σημειώνεται ότι όταν οπλίζεται μια διατομή με πολλαπλές στρώσεις πρέπει να ληφθεί υπόψη για τον υπολογισμό της ροπής αντοχής πως η τάση είναι διαφορετική σε κάθε στρώση συναρτήσει της απόστασης αυτής από τον ουδέτερο άξονα. Στην περίπτωση των FRP η αστοχία καθορίζεται από την υπέρβαση του ορίου της τάσης στην πλέον εφελκυσόμενη στρώση οπλισμού, δηλαδή σε εκείνη που απέχει περισσότερο από τον ουδέτερο άξονα. Τη στιγμή της αστοχίας, επειδή τα FRP έχουν γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά, όλες οι στρώσεις εξακολουθούν να έχουν διαφορετικά επίπεδα τάσεων σε αντίθεση με τον οπλισμό χάλυβα που συνήθως περισσότερες στρώσεις έχουν διαρρεύσει.

Τέλος, ο σχεδιασμός κατασκευών με οπλισμό FRP δεν πρέπει να στηρίζεται στη θεώρηση πλαστικών αρθρώσεων λόγω της γραμμικώς ελαστικής συμπεριφοράς των FRP έως την αστοχία. Ως εκ τούτου αμφίβολη είναι η δυνατότητα ανακατανομής ροπών.

2.1.5 Θλιβόμενος οπλισμός.

Τα FRP έχουν πολύ χαμηλότερη αντοχή σε θλίψη και δύσκολα προσδιορίσιμη. Στον σχεδιασμό δεν πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Επίσης δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται ως θλιβόμενος οπλισμός σε υποστρώματα αλλά ούτε και σε δοκούς. Ωστόσο σε ορισμένες περιπτώσεις αυτό δεν μπορεί να αποφευχθεί όπως π.χ. για την συγκράτηση των συνδετήρων. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι ράβδοι FRP θα πρέπει να τοποθετούνται με επιμέλεια ώστε να εξασφαλισθούν από τυχόν εκτροπή υπό θλιπτικά φορτία.

2.1.6 Περιορισμοί λειτουργικότητας.

Στις συνήθεις κατασκευές από σκυρόδεμα οπλισμένο με χάλυβα γίνεται έλεγχος ικανοποίησης των κριτηρίων λειτουργικότητας έτσι ώστε να διασφαλίζεται η κανονική χρήση και η ανθεκτικότητα της κατασκευής. Ωστόσο στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι αυτός ο έλεγχος ο κρίσιμος για τον σχεδιασμό (είναι οι οριακές καταστάσεις αστοχίας). Αντίθετα στο σχεδιασμό μελών οπλισμένων με FRP, κυρίως λόγω της πολύ μικρής ακαμψίας που παρουσιάζουν μετά τη ρηγμάτωση, ο περιορισμός του ανοίγματος των ρωγμών και του μεγέθους των βελών προκύπτουν ως παράγοντες καθοριστικοί για τον σχεδιασμό. Γενικά οι διατομές που έχουν σχεδιασθεί για αστοχία από θραύση του σκυροδέματος συνήθως ικανοποιούν και τις απαιτήσεις λειτουργικότητας [παρ.45].

Για την μόνωση των κριτηρίων η φιλοσοφία είναι η ίδια με τον αντιστοίχων για οπλισμό από χάλυβα. Ο περιορισμός του ανοίγματος των ρωγμών για λόγους αισθητικής και όχι μόνο (π.χ. εισχώρηση υγρασίας στο εσωτερικό κ.α.). Ο περιορισμός των παραμορφώσεων ανάλογα με τη χρήση της κατασκευής (π.χ. οικία - αίσθημα ασφάλειας στον χρήστη, βιομηχανικό κτίριο - ικανότητα υποστήριξης μη φερόντων στοιχείων κ.α.). Ειδικότερα λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως το μέτρο ελαστικότητας, η αντοχή συνάφειας και η αντοχή σε διάβρωση.

Σε αντίθεση με τις ράβδους χάλυβα, αυτές από FRP είναι πολύ ανθεκτικές σε διάβρωση επιτρέποντας έτσι ως αποδεκτά μεγαλύτερα εύρη ρωγμών που περιορίζονται μονάχα από λόγους αισθητικής και φαινόμενα διάτμησης.

Ενδεικτικά αναφέρονται σύμφωνα με τους ιαπωνικούς κανονισμούς (JSCE 1997b) επιτρεπόμενο όριο ανοίγματος 0,5mm, με τους καναδικούς (CAN/CSA S806-02) 0,5mm για εξωτερικούς χώρους και 0,7mm για εσωτερικούς. Ενώ για τον χάλυβα το αντίστοιχο όριο

σύμφωνα με τον ACI είναι 0,4mm. Πρέπει να τονισθεί ότι για κατασκευές που εκτίθενται σε έντονα διαβρωτικό περιβάλλον ίσως είναι ανάγκη να ληφθούν πιο συντηρητικές τιμές. Αντίθετα όταν δεν υπάρχει περιορισμός για λόγους αισθητικής αυτός ο έλεγχος μπορεί ακόμη και να αγνοηθεί. Ο ACI 440.1R προτείνει γενικά να λαμβάνονται υπόψη οι τιμές από τον καναδικό κανονισμό [παρ.46].

Γενικά όσο καλύτερη είναι η συνάφεια τόσο μικρότερο είναι το άνοιγμα των ρωγμών καθώς η ράβδος δεν «επιτρέπει» στο σκυρόδεμα να παραμορφωθεί εύκολα.

2.2 ΡΑΒΔΟΙ ΙΟΠ ΩΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

2.2.1 Γενικά

Η αντοχή σε διάτμηση είναι συνάρτηση εσωτερικών μηχανισμών απόκρισης του υλικού η συνεισφορά των οποίων και η αλληλόδρασή τους αποτελούν ακόμη αμφιλεγόμενα ζητήματα. Ωστόσο είναι πλέον γενικά αποδεκτό ότι η αντοχή σε διάτμηση του οπλισμένου σκυροδέματος καθορίζεται κυρίως από την αντοχή σε θραύση της θλιβόμενης ζώνης, τη δράση βλήτρου, τους μηχανισμούς αλληλεμπλοκής και την αντοχή του οπλισμού διάτμησης. Η φιλοσοφία δράσης αυτών των μηχανισμών από την εμπειρία χρήσης του χάλυβα στις κατασκευές είναι κοινή και για τον οπλισμό από FRP, οι διαφορετικές όμως μηχανικές του ιδιότητες του υλικού επηρεάζουν την ανάλυση και την τελική διατμητική αντοχή. Πιο συγκεκριμένα οι γενικά μεγαλύτερες παραμορφώσεις και ανοίγματα ρωγμών λόγω του συγκριτικά μικρού μέτρου ελαστικότητας, η μη δυνατότητα εσωτερικής αναδιανομής των τάσεων λόγω απουσίας πλαστικής συμπεριφοράς και η ανισότροπη φύση του υλικού FRP είναι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη [παρ.47].

2.2.2 Μηχανισμοί αλληλεμπλοκής.

Στην εφελκόμενη ζώνη της διατομής το σκυρόδεμα μπορεί να συνεισφέρει στην παραλαβή και μεταβίβαση διατμητικού φορτίου διαμέσου μηχανικής αλληλεμπλοκής στα χείλη των ρωγμών. Ως γνωστόν για χρήση οπλισμού από FRP αναμένονται συγκριτικά μεγαλύτερες παραμορφώσεις και ανοίγματα ρωγμών και ως εκ τούτου μικρότερη συνεισφορά των μηχανισμών αλληλεμπλοκής [παρ.48].

2.2.3 Δράση βλήτρου.

Η δράση βλήτρου είναι ένας εσωτερικός μηχανισμός παραλαβής διάτμησης που εξαρτάται από την καμπτική και την διατμητική αντοχή του διαμήκους οπλισμού και την αντοχή σε εφελκισμό του σκυροδέματος. Στα μέλη οπλισμένα με διαμήκη οπλισμό από FRP η συνεισφορά της δράσης βλήτρου μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα καθώς λόγω της ανισότροπης φύσης τους η ακαμψία τους σε άξονες κάθετους στον διαμήκη είναι πάρα πολύ μικρή [παρ.49].

2.2.4 Γενικές παρατηρήσεις για τον οπλισμό διάτμησης.

Ο οπλισμός διάτμησης καλείται να παραλάβει τα διατμητικά φορτία όταν εξαντληθεί η αντοχή της διατομής σκυροδέματος. Συνήθως τοποθετούνται κατακόρυφοι συνδετήρες που παραλαμβάνουν και μεταβιβάζουν τις εφελκυστικές τάσεις των κεκλιμένων ρωγμών. Η αντοχή των συνδετήρων από χάλυβα καθορίζεται από το όριο διαρροής τους, για τα FRP όμως που συμπεριφέρονται γραμμικώς ελαστικά έως την αστοχία άλλοι παράγοντες όπως η

μέγιστη παραμόρφωση είναι πιο κρίσιμοι. Ιδιαίτερα έμφαση πρέπει να δίνεται στην αγκύρωση των συνδετήρων καθώς και στα άκρα καμπύλωσής τους.

Είναι λοιπόν σημαντικό να ορισθεί μια ανώτατη τιμή παραμόρφωσης ώστε να διασφαλισθεί πως συνεισφέρουν επαρκώς όλοι οι μηχανισμοί παραλαβής διάτμησης καθώς επίσης πως ισχύει η βασική παραδοχή ότι οι αντοχές του οπλισμού διάτμησης και της διατομής σκυροδέματος μπορούν να αθροισθούν **[παρ.50]**.

Σύμφωνα με τον Canadian Highway Bridge Code (CSA 2000) ως ανώτατο όριο δίνεται η τιμή 0,002 ενώ σύμφωνα με το Eurocrete Project 0,0025. Ωστόσο από τον κανονισμό ACI αυτές οι τιμές θεωρούνται συντηρητικές και προτείνεται ως αποδεκτή παραμόρφωση 0,00275 σε καμία περίπτωση όμως μεγαλύτερη της τιμής 0,004 τιμή στην οποία μειώνεται δραματικά η συνεισφορά των μηχανισμών αλληλεμπλοκής **[παρ.51]**.

Τέλος αναφορικά με την ακτίνα καμπύλωσης, ενώ κατασκευαστικά υπάρχει η δυνατότητα διαμόρφωσης συνδετήρων με πολύ «αιχμηρή» καμπύλωση κάτι τέτοιο πρέπει να αποφεύγεται καθώς μειώνεται δραματικά η αντοχή τους. Η ελάχιστη αποδεκτή τιμή είναι $(r_b / d_b) = 3$ **[παρ.52]**.

2.3 ΠΡΟΕΝΤΑΣΗ ΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΤΕΝΟΝΤΕΣ ΑΠΟ ΙΟΠ.

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει αρχίσει να μελετάται και να βρίσκει εφαρμογή η προένταση φορέων με FRP. Κυρίως λόγω ιδιοτήτων όπως η υψηλή εφελκυστική αντοχή, το μικρό ειδικό βάρος, το μικρό ποσοστό χαλάρωσης καθώς και η ανθεκτικότητα τους σε διάβρωση οι τένοντες από FRP φιλοδοξούν να εγκαινιάσουν ένα νέο πεδίο εφαρμογών στον τομέα της γεφυροποιίας. Παρακάτω θα παρουσιασθούν διάφοροι τύποι τενόντων από FRP καθώς και αντίστοιχα συστήματα αγκύρωσης. Ακόμη θα εξετασθούν οι μειώσεις και οι απώλειες προεντάσεως, η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση τανύσεως καθώς και άλλα θέματα σχεδιασμού πάντα σε σύγκριση με την αντίστοιχη προσέγγιση για προένταση με τένοντες από χάλυβα. Η παρούσα ενότητα βασίζεται στον ACI 440.4R-04 και παράλληλα υπάρχουν και σχετικές αναφορές στις Ιαπωνικές και τις Καναδικές οδηγίες.

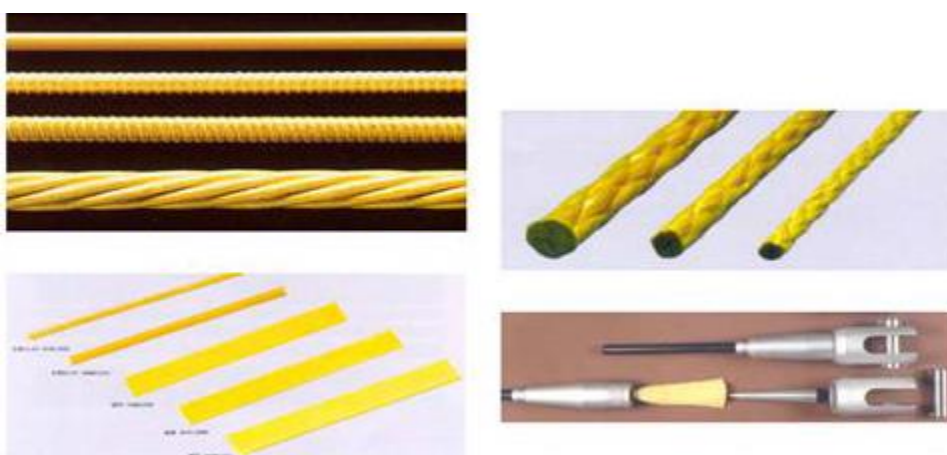
2.3.1 Τένοντες ΙΟΠ.

Στην αγορά είναι διαθέσιμη μια ευρεία γκάμα τενόντων από FRP με ποικίλες μορφές και ιδιότητες ανάλογα με το είδος των ινών και της ρητίνης που έχουν χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή τους (Εικ. 2.3 και 2.4). Ωστόσο ως οπλισμός προέντασης χρησιμοποιούνται κυρίως τένοντες από AFRP και CFRP, καθώς τα GFRP παρουσιάζουν μικρή αντοχή σε ερπυστική διάρρηξη (creep rupture) κάτι που στην περίπτωση της προεντάσεως είναι καθοριστικής σημασίας **[παρ.53]**.

Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι ιδιότητες κάποιων τενόντων από FRP.



Εικόνα 2.3: Μορφές τενόντων από χάλυβα και ΙΟΠ [παρ.54]



Εικόνα 2.4: Τένοντες ΙΟΠ και συστήματα αγκύρωσής τους [παρ.55].

Πίνακας 2.2: Ιδιότητες τενόντων από FRP [παρ.56].

Property	AFRP				CFRP	
	Arapree	FIBRA	Technora	Parafil	Leadline	CFCC
Fiber	Twaron	Kevlar	Technora	Kevlar49	Carbon	Carbon
Resin	Epoxy	Epoxy	Vinyl ester	-	Epoxy	Epoxy
Fiber volume ratio	0.45	0.65	0.65	-	0.65	0.65
Density g/m ³	1.25	1.28	1.3	1.44	1.53	1.5
Longitudinal tensile strength Gpa	1.2 to 1.5	1.25 to 1.4	1.7 to 2.1	1.2 to 1.9	2.25 to 2.55	1.8 to 2.1
Transverse tensile strength Mpa	-	30	-	-	57	-
Longitudinal modulus Gpa	62 to 64	65 to 70	54	120 to 130	142 to 150	137
Transverse Modulus Gpa	-	5.5	-	-	10.3	-
In-plane shear strength Mpa	-	4.9	-	-	71	-
In-plane shear modulus Gpa	-	2.2	-	-	7.2	-
Major Poisson's ratio	0.38	0.34 to 0.6	0.35	-	0.27	-
Minor Poisson's ratio	-	0.02	-	-	0.02	-
Bond strength Mpa	7.7	10 to 13	10 to 16	-	4 to 20	7 to 11
Maximum longitudinal strain %	2.4	2.0 to 3.7	3.7 to 3.8	1.5 to 1.7	1.3 to 1.5	1.57
Maximum transverse strain %	-	-	-	-	0.6	-
Longitudinal compressive strength Mpa	-	335	-	-	1440	-
Transverse compressive strength Mpa	-	158	-	-	228	-
Longitudinal thermal expansion coefficient/°c	2*10 ⁻⁶	2*10 ⁻⁶	3*10 ⁻⁶	-	0.9*10 ⁻⁶	0.5*10 ⁻⁶
Transverse thermal expansion coefficient/°c	50*10 ⁻⁶	60*10 ⁻⁶	-	-	27*10 ⁻⁶	21*10 ⁻⁶
Relaxation ratio at room temperature % loss from jacking str	11 to 14	10 at 103h	8 to 13 at 103h	6 to 9 at 105h	2 to 3	0.5 to 1 at 102h

2.3.2 Αγκυρώσεις τενόντων ΙΟΠ.

Η σωστή αγκύρωση των τενόντων από FRP είναι ιδιαίτερα σημαντική και αποτελεί μείζον θέμα έρευνας, ώστε η προένταση με FRP να αποτελέσει στο μέλλον μια ανταγωνιστική λύση.

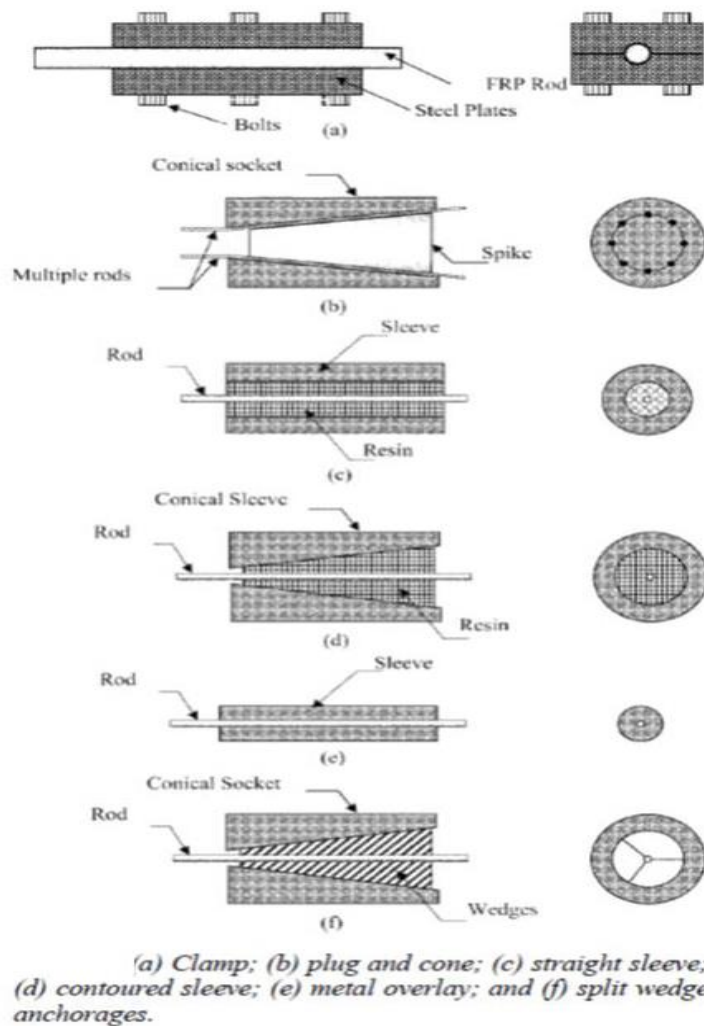
Τα συστήματα αγκυρώσεως που έχουν αναπτυχθεί για χαλύβδινους τένοντες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξίσου για την προένταση με FRP κυρίως λόγω της ανισότροπης φύσης των υλικών αυτών. Πιο συγκεκριμένα τα FRP παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη ακαμψία στη διαμήκη διεύθυνση (σε σχέση με τις κάθετες προς αυτήν) και ως εκ τούτου υπό αξονική τάση έχουν μικρή αντοχή σε εγκάρσια φορτία. Απαιτείται λοιπόν μια επανεξέταση της φιλοσοφίας σχεδιασμού. Γενικά τα συστήματα αγκυρώσεως για FRP που αναπτύσσονται είναι προσαρμοσμένα κάθε φορά στις ιδιαίτερες ιδιότητες του εκάστοτε τένοντα, κάτι που όμως επιβαρύνει την οικονομικότητα της κατασκευής [παρ.57].

Παρακάτω θα αναφερθούν γενικά διάφορα συστήματα αγκυρώσεως που είναι διαθέσιμα για τένοντες από FRP (Εικ. 2.5).



Εικόνα 2.5: Ενδεικτικά συστήματα αγκυρώσεως τενόντων [παρ.58].

Οι βασικοί τύποι συστημάτων αγκυρώσεως για τένοντες από FRP συνοψίζονται στα σκαριφήματα της Εικ. 2.6.



Εικόνα 2.6. Σχηματική αναπαράσταση των βασικών τύπων αγκύρωσης τενόντων ΙΟΠ [παρ.59].

(α) Clamp anchorage.

Η clamp anchorage είναι ένα σύστημα αγκυρώσεως που ο τένοντας τοποθετείται ανάμεσα σε δύο μεταλλικές πλάκες οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους με κοχλίες. Η δύναμη από τον τένοντα στην αγκύρωση μεταφέρεται μέσω τριβής και είναι συνάρτηση της τραχύτητας των επιφανειών των πλακών και των δυνάμεων άντυγας (clamping force) των κοχλιών. Προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση της αγκύρωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας μανδύας μαλακού υλικού που θα περιβάλλει τον τένοντα και θα εξομαλύνει την κατανομή των εγκάρσιων πιέσεων. Το μήκος αγκύρωσης μπορεί να ποικίλει ανάλογα με το υλικό FRP που χρησιμοποιείται και θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να διασφαλίζεται ότι μπορεί να αναληφθεί από την αγκύρωση η δύναμη αντοχής του τένοντα [παρ.60].

(β) Plug and cone anchorage

Στην plug and cone anchor ο μηχανισμός αγκύρωσης είναι παρόμοιος με αυτόν της wedge anchor όπου ο τένοντας συγκρατείται μέσω της θλιπτικής δύναμης που του επιβάλλεται κατά την σφήνωση στην μεταλλική θήκη. Αυτή η εγκάρσια θλιπτική δύναμη παράγει τριβή ανάμεσα στα μέλη της αγκύρωσης η οποία και συγκρατεί τον τένοντα [παρ.61].

(γ) Straight sleeve anchorage

Σε αυτό το σύστημα αγκύρωσης ο τένοντας εμποτίζεται σε ρητίνη η οποία γεμίζει μια μεταλλική θήκη από χάλυβα ή χαλκό. Το υλικό πλήρωσης μπορεί να είναι μη συρρικνούμενο τσιμέντο, με ή χωρίς προσθήκη άμμου ή και διογκούμενο τσιμέντο ή και άλλες εποξικές ρητίνες.

Στην περίπτωση του μη συρρικνούμενου τσιμέντου και των πολυμερών υλικών πλήρωσεως η μεταφορά της δύναμης γίνεται αποκλειστικά μέσω συνάφειας και τριβής μεταξύ των μελών της αγκύρωσης (μεταξύ τένοντα- υλικού πλήρωσης και υλικού πλήρωσης - μεταλλικού περιβλήματος). Για να αυξηθούν οι δυνάμεις συνάφειας και η αποδοτικότητα της αγκύρωσης μπορεί να προστεθούν στην ρητίνη φίλλερ (όπως π.χ. άμμος). Η προσθήκη φίλλερ στη ρητίνη επιπλέον εμποδίζει την περαιτέρω μείωση του όγκου της ρητίνης κατά το στάδιο της σκλήρυνσης. Επίσης η δημιουργία ραβδώσεων στην επιφάνεια του τένοντα συνεισφέρει θετικά την αύξηση της συνάφειας. [παρ.62]

Στην περίπτωση του διογκούμενου τσιμέντου η επιπλέον εγκάρσια πίεση που δημιουργείται από τη διόγκωση του υλικού αυξάνει επιπλέον την αντίσταση σε ολίσθηση του τένοντα.

(δ) Contoured sleeve anchorage

Η contoured sleeve anchorage έχει τα ίδια συστατικά μέλη με την straight sleeve anchorage. Η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο συστημάτων αγκύρωσης είναι ότι στην contoured sleeve η εσωτερική επιφάνεια της μεταλλικής θήκης μπορεί να έχει διατομή που να μεταβάλλεται γραμμικά ή παραβολικά. Η μεταφορά της δύναμης γίνεται μέσω διάτμησης που εξαρτάται από την συνάφεια στην διεπιφάνεια των μελών και από την εγκάρσια θλιπτική τάση, (η οποία είναι συνάρτηση της μεταβολής της διατομής της μεταλλικής θήκης) [παρ.63].

(ε) Metal overlaying

Σε αυτό το σύστημα αγκύρωσης σε κάθε άκρο του τένοντα τοποθετείται ένα μεταλλικό κάλυμμα (metal overlay) μέσω die-molding κατά τη διαδικασία παραγωγής. Έτσι ο τένοντας μπορεί να αγκυρωθεί μέσω μιας τυπικής wedge anchorage όπως οι αντίστοιχοι χαλύβδινοι. Ωστόσο, η χρησιμοποίηση του συγκεκριμένου συστήματος αγκύρωσης είναι γενικά περιορισμένη κυρίως λόγω του ότι απαιτείται να προκαθοριστεί το μήκος του τένοντα ανάμεσα στα άκρα της αγκύρωσης κατά τη διαδικασία παραγωγής. Η μεταφορά του φορτίου επιτυγχάνεται μέσω διάτμησης και εξαρτάται κυρίως από την εγκάρσια θλιπτική τάση και την τριβή που αναπτύσσεται στις διεπιφάνειες των μελών του συστήματος αγκύρωσης [παρ.64].

(στ) Split-wedge anchorage

Οι split-wedge anchorage προτιμούνται κυρίως λόγω της αποτελεσματικότητάς τους, της αξιοπιστίας τους και της ευκολίας στην τοποθέτησή τους. Γενικά μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: σε αυτές που ο τένοντας έρχεται σε άμεση επαφή με τις σφήνες και σε αυτές που υπάρχει ένα περίβλημα ανάμεσα στον τένοντα και τις σφήνες. Οι split-wedge anchorage χρησιμοποιούνται ευρέως στην προένταση με χάλυβα. Για την εφαρμογή τους σε προένταση με FRP πρέπει να αυξηθεί το μήκος του τμήματος της αγκύρωσης έτσι ώστε να μειωθούν οι εγκάρσιες τάσεις στον τένοντα και να ελεγχθεί κατάλληλα η τραχύτητα της εσωτερικής επιφάνειας των σφηνών έτσι ώστε να αποφευχθεί ο τραυματισμός της ράβδου. Στη θήκη

μπορεί να τοποθετούνται 2-6 σφήνες. Γενικά όσο περισσότερες σφήνες χρησιμοποιούνται τόσο πιο ομαλά κατανέμονται οι εγκάρσιες τάσεις. Ο μηχανισμός ανάληψης της διατμητικής δύναμης είναι συνάρτηση της συνάφειας μεταξύ τένοντα, σφηνών και θήκης [παρ.65].

2.3.3 Αστοχία του συστήματος αγκύρωσης.

Οι πιθανοί τρόποι αστοχίας του συστήματος αγκύρωσης είναι οι εξής [παρ.66]:

- Ολίσθηση του τένοντα έξω από την αγκύρωση λόγω ανεπαρκούς ανάληψης της διατμητικής δύναμης μεταξύ τένοντα-περιβλήματος. Η απόδοση του συστήματος αγκύρωσης μπορεί να βελτιωθεί με αύξηση των δυνάμεων τριβής στη διεπιφάνεια των υλικών.
- Ολίσθηση ως προς τις σφήνες του τένοντα μαζί με το περίβλημα. Ένας τέτοιος τρόπος αστοχίας υποδηλώνει ότι η διεπιφάνεια τένοντα - περιβλήματος διαθέτει μεγαλύτερη ικανότητα ανάληψης δύναμης διάτμησης από την αντίστοιχη διεπιφάνεια σφηνών-περιβλήματος. Η απόδοση του συστήματος αγκύρωσης μπορεί να βελτιωθεί όπως πριν.
- Ολίσθηση των σφηνών ως προς την θήκη. Πρόκειται για έναν τρόπο αστοχίας που συμβαίνει σπάνια κυρίως λόγω της γεωμετρικής διαμόρφωσης του συστήματος αγκύρωσης, συνήθως συνοδεύεται και από αστοχία του τένοντα.
- Αστοχία του τένοντα μέσα στο τμήμα της αγκύρωσης Αυτός ο τρόπος αστοχίας οφείλεται στην δημιουργία υψηλής συγκέντρωσης τάσεων μέσα στην αγκύρωση που έχει ως αποτέλεσμα την καταστροφή των ινών. Η απόδοση του συστήματος αγκύρωσης μπορεί να βελτιωθεί με κατάλληλο σχεδιασμό που θα επιτρέπει την ομοιόμορφη κατανομή των φορτίων.
- Αστοχία του τένοντα έξω από το μήκος αγκύρωσης. Πρόκειται για τον πλέον επιθυμητό τρόπο αστοχίας αφού υποδηλώνει επιτυχημένο σχεδιασμό του συστήματος αγκύρωσης.

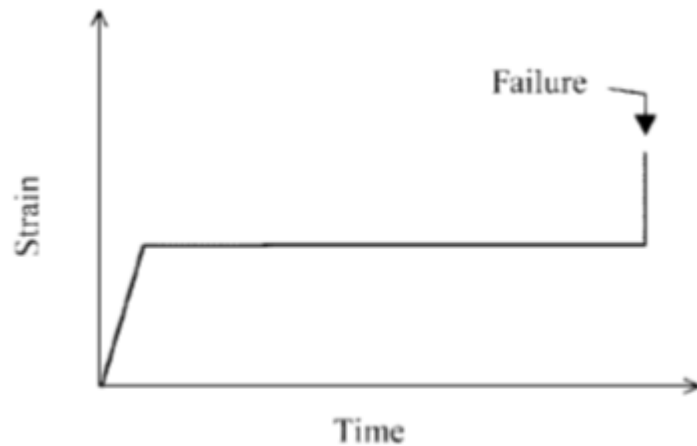
2.3.4 Θέματα σχεδιασμού των τενόντων.

Γενικά η διαδικασία σχεδιασμού φορέων προεντεταμένων με FRP είναι παρόμοια με την αντίστοιχη για προένταση με χάλυβα. Ιδιαίτερης σημασίας είναι ο προσδιορισμός της δύναμης προεντάσεως, ο υπολογισμός των μειώσεων και των απωλειών και τέλος ο έλεγχος των τάσεων στις κρίσιμες διατομές. Παρακάτω προσεγγίζονται τα θέματα αυτά με βάση τις διατάξεις του αμερικάνικου κανονισμού ACI440.4R καθώς και τις καναδικές και ιαπωνικές οδηγίες [παρ.67].

2.3.4.1 Μέγιστη επιτρεπόμενη θλιπτική τάση λόγω προεντάσεως.

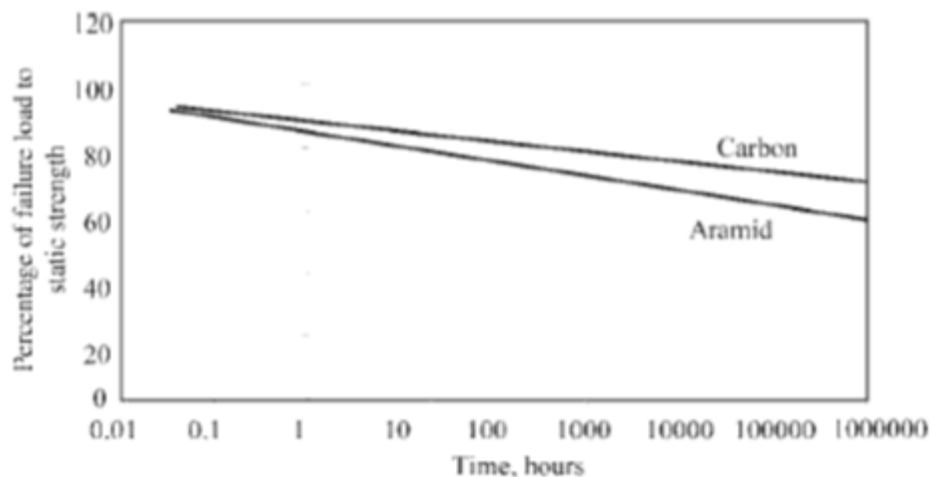
Η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση λόγω προέντασης καθορίζεται από το φαινόμενο της ερπυστικής διάρρηξης των τενόντων από FRP (Εικ. 2.7). Πιο συγκεκριμένα ο ερπυσμός ορίζεται ως η αύξηση της παραμόρφωσης υπό σταθερή τάση με την πάροδο του χρόνου. Η αστοχία από ερπυστική διάρρηξη ενός υλικού επέρχεται όταν η ολική παραμόρφωση αυξανόμενη λόγω ερπυσμού υπερβεί την οριακή της τιμή. Αυτό το φαινόμενο έχει ως

αποτέλεσμα την αστοχία μακροχρόνια σε μικρότερες τιμές τάσης από την αντοχή της διατομής. Οι τένοντες από FRP παρουσιάζουν ευαισθησία σε αστοχία από ερπυστική διάρρηξη. Έτσι πρέπει να ληφθεί υπόψη ένας περιορισμός των επιβαλλόμενων τάσεων προεντάσεως με βάση μειωμένες τιμές της βραχυχρόνιας εφελκυστικής αντοχής. Για τους CFRP τένοντες προτείνεται η μέγιστη τάση προεντάσεως να περιοριστεί στο 60% της εφελκυστικής αντοχής και για τους AFRP στο 50% αντίστοιχα (Εικ. 2.8) [παρ.68]. Αξίζει να τονιστεί ότι το φαινόμενο της ερπυστικής διάρρηξης είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς δεν επιτρέπει παρά μόνο μερική εκμετάλλευση της εφελκυστικής αντοχής των τενόντων από FRP . Συγκριτικά αναφέρεται ότι οι τένοντες από χάλυβα συνήθως τανύονται στο 80-85% της αντοχής τους σε εφελκυσμό.



Carbon creep-rupture curve.

Εικόνα 2.7: Ερπυστική διάρρηξη ΙΟΠ με ίνες άνθρακα [παρ.69].



Εικόνα 2.8: Μείωση της τάσης θραύσης ΙΟΠ με ίνες άνθρακα και αραμιδίου λόγω ερπυσμού [παρ.70].

2.3.4.2 Απώλειες προεντάσεως

Οι μειώσεις προεντάσεως ως γνωστόν οφείλονται κυρίως σε φαινόμενα τριβής και ολίσθησης στη σφήνωση, οι τιμές των οποίων θα πρέπει να παρέχονται από τον κατασκευαστή του αντίστοιχου συστήματος αγκύρωσης. Οι μειώσεις λόγω ελαστικής

βράχυνσης και οι απώλειες λόγω ερπυσμού και συστολής ξηράνσεως του σκυροδέματος μπορούν να υπολογισθούν όπως οι αντίστοιχες για προένταση με χάλυβα λαμβάνοντας υπόψη το μέτρο ελαστικότητας των FRP. Μάλιστα αναμένεται να είναι μικρότερες λόγω του μικρότερου μέτρου ελαστικότητας του FRP [παρ.71].

2.3.4.3 Χαλάρωση.

Ο υπολογισμός των απωλειών λόγω χαλάρωσης στα FRP είναι σύνθετος και ακόμη τα πειραματικά δεδομένα είναι ελλιπή. Γενικά οι απώλειες λόγω χαλάρωσης μπορούν να θεωρηθούν ως συνάρτηση τριών παραγόντων [παρ.72]:

- R_p : χαλάρωση της μήτρας πολυμερούς ρητίνης
- R_s : ευθυγράμμιση των ινών
- R_f : χαλάρωση των ινών

Ο υπολογισμός των συνολικών απωλειών λόγω χαλάρωσης (εκφρασμένες ως ποσοστό της αρχικής μεταβιβαζόμενης τάσης) μπορεί να γίνει υπολογίζοντάς τις απώλειες λόγω του κάθε ενός παράγοντα ξεχωριστά (θεωρώντας τις ανεξάρτητες μεταξύ τους) και έπειτα επαλληλίζοντάς τις, δηλαδή:

$$R_{EL} = R_p + R_s + R_f$$

(α) Χαλάρωση της πολυμερούς μήτρας ρητίνης (R_p):

Κατά την προένταση του τένοντα μέρος του φορτίου μεταβιβάζεται στην μήτρα ρητίνης. Η μήτρα που αποτελείται από βισκοελαστικό υλικό παρουσιάζει χαλάρωση με τον χρόνο και ως εκ τούτου μειώνεται η συνεισφορά της στην παραλαβή φορτίου. Το φαινόμενο αυτό της χαλάρωσης της μήτρας ρητίνης επηρεάζεται κυρίως από δύο παράγοντες [παρ.73]:

- Τον λόγο του μέτρου ελαστικότητας της ρητίνης προς αυτού των ινών, και ορίζεται ως $n_r = (E_r/E_f)$.
- Την κατ' όγκο αναλογία των ινών στον τένοντα v_f , που ορίζεται από τη σχέση $v_f + v_r = 1$, όπου v_r η κατ' όγκο αναλογία της ρητίνης στον τένοντα

Τελικά:

$$R_p = n_r \times v_f$$

(β) Ευθυγράμμιση των ινών (R_s):

Οι ίνες σε μια θερμοσκληρυνόμενη διατομή είναι σχεδόν αλλά όχι απόλυτα ευθύγραμμες. Υπό την επιβολή τάσης ρέουν μέσα στην μήτρα ρητίνης και ευθυγραμμίζονται, το φαινόμενο αυτό στις περισσότερες εφαρμογές χαρακτηρίζεται ως απώλεια λόγω χαλάρωσης. Εξαρτάται δε από τον έλεγχο ποιότητας κατά τη διαδικασία παραγωγής. Ως ποσοστό χαλάρωσης μπορεί να υποθεθεί απώλεια 1-2% της αρχικής τάσης [παρ.74].

(γ) Χαλάρωση των ινών (R_f):

Η χαλάρωση των ινών εξαρτάται από τον τύπο της ίνας. Σύμφωνα με τον ACI 440.4R οι ίνες άνθρακα δεν παρουσιάζουν χαλάρωση επομένως σε αυτή την περίπτωση μπορεί να θεωρηθεί η τιμή του R_f ίση με το μηδέν. Όσον αφορά στις ίνες αραμιδίου, θεωρώντας ότι η εκδήλωση της χαλάρωσης ξεκινά μετά τις πρώτες 24 ώρες ως ποσοστό χαλάρωσης μπορεί να υποτεθεί απώλεια 6-18% της αρχικής τάσης, για σχεδιασμό με διάρκεια ζωής της κατασκευής 100 έτη [παρ.75].

Σύμφωνα με τις καναδικές οδηγίες με βάση τον CAN/CSA-S806-02 ελλείψει άλλων δεδομένων η χαλάρωση των ινών μπορεί να υπολογισθεί από τους παρακάτω τύπους συναρτήσεων του χρόνου t σε μέρες [παρ.76]:

$$\text{CFRP relaxation}(\%) = 0,231 + 0,345 \times \log(t)$$

$$\text{AFRP relaxation}(\%) = 3,38 + 2,88 \times \log(t)$$

2.3.4.4 Απομείωση της εφελκυστικής αντοχής σε μη ευθύγραμμους τένοντες.

Συνήθως οι τένοντες καμπυλώνονται κατά μήκος της δοκού που προεντείνουν. Οι τένοντες από FRP όμως παρουσιάζουν γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά ως την αστοχία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής τους κοντά στα σημεία που κάμπτονται λόγω της επιπλέον παραμόρφωσης στην καμπύλη. Πρέπει λοιπόν να μειωθεί η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση στον γρύλλο ώστε να ληφθεί υπόψη η επαύξηση λόγω της συγκέντρωσης τάσεων στα σημεία καμπύλωσης. Έχει προταθεί στη βιβλιογραφία ο παρακάτω τύπος για τον υπολογισμό αυτής της τάσης επαύξησης [παρ.77]:

$$f_h = (E_f \times R_t) / R$$

όπου E_f είναι το μέτρο ελαστικότητας των ινών, R_t είναι η ακτίνα της διατομής του τένοντα και R είναι η ακτίνα καμπυλότητας στο σημείο εκτροπής.

Έτσι η συνολική τάση ενός τένοντα διατομής A_p στο σημείο εκτροπής λόγω δύναμης προέντασης στον γρύλλο P_j δίνεται από την σχέση [παρ.78]:

$$f = P_j / A_p + (E_f \times R_t) / R$$

Επιπλέον οι καναδικές οδηγίες αναφέρουν πως σύμφωνα με τα πορίσματα μιας έρευνας που διεξήχθη στο πανεπιστήμιο του Waterloo ο παραπάνω τύπος σε κάποιες περιπτώσεις υπερεκτιμά την τάση επαύξησης λόγω της καμπύλωσης. Προτείνεται λοιπόν το R να τίθεται ως η μέγιστη εκ των τιμών της ακτίνας καμπυλότητας στο σημείο εκτροπής και της ακτίνας καμπυλότητας R_n που δίνεται από τον εξής τύπο [παρ.79]:

$$R_n = (r^2 / 2) \times (E_{FRP} \times \pi / (P \times (1 - \cos \theta)))^{(1/2)}$$

Όπου r η ακτίνα του τένοντα, P η δύναμη προέντασης και θ η γωνία εκτροπής.

2.3.4.5 Πλαστιμότητα ή παραμορφωσιμότητα.

Η πλαστιμότητα και η παραμορφωσιμότητα είναι δύο έννοιες οι οποίες πρέπει να διασαφηνιστούν στην περίπτωση των FRP καθώς υπάρχει διακριτή διαφορά μεταξύ τους.

Η πλαστιμότητα ορίζεται ως η ικανότητα παραλαβής πλαστικών παραμορφώσεων και απορρόφησης ενέργειας πριν την αστοχία.

Αντίθετα η παραμορφωσιμότητα εκφράζει το μέγεθος της παραμόρφωσης πριν την αστοχία και μπορεί να οριστεί ως ο λόγος της παραμόρφωσης στη φάση της ρηγμάτωσης προς την συνολική παραμόρφωση κατά την αστοχία.

Μια συνήθης δοκός προεντεταμένη με χάλυβα υπό αυξανόμενο φορτίο παραμορφώνεται ελαστικά ως τη ρηγμάτωση ενώ μετά την διαρροή του χάλυβα ακολουθεί πλαστική παραμόρφωση. Αντίθετα μια δοκός προεντεταμένη με FRP συνεχίζει να παραμορφώνεται ελαστικά μέχρι την αστοχία. Με βάση λοιπόν τον κλασικό ορισμό της πλαστιμότητας τα μέλη από σκυρόδεμα προεντεταμένα με FRP παρουσιάζουν σχεδόν μηδενική πλαστιμότητα. Βέβαια με διάφορες μεθόδους όπως η περίσφυξη του σκυροδέματος ή με συνδυασμό εσωτερικής - εξωτερικής προέντασης μπορεί να ενισχυθεί η πλάσιμη συμπεριφορά του μέλους. Αντίθετα μέλη από σκυρόδεμα προεντεταμένα με FRP παρουσιάζουν σημαντική παραμορφωσιμότητα.

Ως εκ τούτου η παραμορφωσιμότητα μπορεί να χρησιμεύσει ως δείκτης που θα προσδιορίζει την ασφάλεια των κατασκευών που έχουν προενταθεί με FRP, που θα εξασφαλίζει δηλαδή ότι υπάρχει επαρκής προειδοποίηση μέσω παραμόρφωσης πριν την αστοχία του φορέα. Η παραμορφωσιμότητα μπορεί να προσδιοριστεί είτε ως λόγος μετακινήσεων είτε ως λόγος καμπυλοτήτων στη φάση αστοχίας προς τα αντίστοιχα μεγέθη στη φάση λειτουργίας [παρ.80].

Αν η παραμορφωσιμότητα οριστεί ως λόγος μετακινήσεων τότε ανακύπτουν δύο σημαντικά προβλήματα. Πρώτον σε υπερστατικούς φορείς με πολύπλοκη φόρτιση ο ακριβής προσδιορισμός των μετακινήσεων δεν είναι απλός και απαιτεί ανάλυση από κάποιο πρόγραμμα. Δεύτερον είναι πολύ δύσκολος ο υπολογισμός των μετακινήσεων στη φάση αστοχίας κυρίως λόγω της απότομης μείωσης του μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος.

Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο λόγος των καμπυλοτήτων. Αυτή η προσέγγιση είναι πολύ πιο βολική καθώς χρησιμοποιούνται μεγέθη τα οποία έχουν ήδη προσδιοριστεί κατά τον σχεδιασμό. Στη βιβλιογραφία [παρ.81] δίνεται ο παρακάτω τύπος για τον προσδιορισμό της παραμορφωσιμότητας:

$$D_I = ((1-k)/(1-\alpha/(d \times \beta_I))) \times (\epsilon_{pu}/\epsilon_{ps})$$

όπου:

$\alpha = \rho \times d \times f_{pu} / (0.85 \times f'_c)$, το βάθος του ισοδύναμου τετραγώνου των τάσεων κατά τη φάση αστοχίας

d η απόσταση του κέντρου βάρους του τένοντα από την πλέον θλιβόμενη ίνα της διατομής

ϵ_{pu} η συνολική παραμόρφωση του FRP τένοντα

ϵ_{ps} η παραμόρφωση του τένοντα στη φάση λειτουργίας

Με βάση λοιπόν από τον παραπάνω τύπο ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για να αυξηθεί η παραμορφωσιμότητα είναι ο περιορισμός κατά το δυνατόν της αρχικής παραμόρφωσης του τένοντα.

Σύμφωνα με τον ACI 440.4R ο περιορισμός της τάσης στον γρύλλο, σύμφωνα με τις τιμές που έχουν δοθεί παραπάνω, ώστε να μην υπερβαίνουν την μέγιστη επιτρεπόμενη τάση προκειμένου να αποφευχθεί το φαινόμενο της ερπυστικής διάρρηξης εξασφαλίζει και την απαιτούμενη παραμορφωσιμότητα [παρ.82].

Σύμφωνα με τις καναδικές οδηγίες και τον CAN/CSA-S6-06 για ορθογωνικές διατομές ο δείκτης παραμορφωσιμότητας πρέπει να έχει τιμή τουλάχιστον 4 ενώ για διατομές τύπου T τουλάχιστον 6 [παρ.83].

2.3.4.6 Μήκος μεταφοράς και αγκύρωσης.

Στην εσωτερική προένταση η δύναμη προεντάσεως μεταβιβάζεται από τον τένοντα στο σκυρόδεμα που τον περιβάλλει μέσω συνάφειας. Γενικά λόγω της διαφορετικής φύσης του υλικού ο μηχανισμός συνάφειας και επομένως το απαιτούμενο μήκος μεταφοράς και αγκύρωσης διαφέρει για τους τένοντες από χάλυβα και τους αντίστοιχους από FRP αλλά και μεταξύ των διάφορων τύπων τενόντων από FRP. Πιο συγκεκριμένα επηρεάζεται από τους εξής παράγοντες [παρ.84]:

- την εφελκυστική αντοχή του τένοντα
- το μέτρο ελαστικότητας
- το φαινόμενο Hoyer
- το σχήμα της διατομής
- την τραχύτητα της επιφάνειας, την ύπαρξη ή μη ραβδώσεων
- τον τύπο τον ινών και της πολυμερούς ρητίνης και τις κατ' όγκο αναλογίες τους τον τρόπο τάνυσης και το μέγεθος της δύναμης προεντάσεως
- την αντοχή του σκυροδέματος και το πάχος επικάλυψης

Το ελάχιστο απαιτούμενο μήκος μεταφοράς και αγκύρωσης πρέπει να υπολογίζεται ως το άθροισμα του μήκους μεταφοράς και του καμπτικού μήκους αγκύρωσης:

$$L_d = L_t + L_{fb}$$

Το μήκος μεταφοράς ορίζεται ως το μήκος που απαιτείται έτσι ώστε να μεταβιβαστεί πλήρως η δύναμη προεντάσεως από τον τένοντα στο σκυρόδεμα.

Το καμπτικό μήκος αγκύρωσης ορίζεται ως το επιπλέον μήκος πέραν του μήκους μεταφοράς το οποίο απαιτείται έτσι ώστε ο τένοντας να αναπτύξει την πλήρη εφελκυστική του αντοχή.

2.4 ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗ ΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΤΕΝΟΝΤΕΣ ΑΠΟ ΙΟΠ

Ως εξωτερική προένταση ορίζεται εκείνη η μέθοδος προεντάσεως κατά την οποία οι τένοντες διατάσσονται εξωτερικά του μέλους το οποίο προεντείνονται.

Η εξωτερική προένταση είναι προένταση χωρίς συνάφεια. Οι τένοντες αγκυρώνονται στις διαδοκίδες στηρίξεως και συχνά κατά μήκος της χάραξης καμπυλώνονται σε ειδικά διαμορφωμένα σώματα εκτροπής (Εικ. 2.9).



Εικόνα 2.9: Χαρακτηριστική διάταξη τενόντων για εξωτερική προένταση [παρ.85].

Ως κύρια πλεονεκτήματά της αναφέρονται [παρ.86] η δυνατότητα επιθεωρήσεως κατά τη διάρκεια ζωής του έργου, η δυνατότητα επαναρύθμισης της δύναμης προεντάσεως - επανατάυσης, πιθανής αντικατάστασης προβληματικών τενόντων ή και εγκατάσταση νέων όταν αυτό υπαγορεύεται από μια ενδεχόμενη προσαρμογή του σχεδιασμού. Ακόμη καθώς οι τένοντες δεν τοποθετούνται μέσα στο σκυροδέμα γενικά μειώνονται οι διαστάσεις της διατομής και συνεπώς τα φορτία από το ίδιο βάρος, αυξάνεται η αντοχή της αφού δεν υπάρχουν ασυνέχειες του υλικού και μεγαλύτερα εύρη ρωγμών μπορεί να γίνουν ανεκτά καθώς το σκυροδέμα δεν καλείται να παρέχει αντιδιαβρωτική προστασία στους τένοντες.

Ωστόσο, η άμεση έκθεσή τους στις συνθήκες του περιβάλλοντος απαιτεί ειδικά συστήματα αντιδιαβρωτικής προστασίας (επιφανειακές βαφές με ψευδάργυρο ή πολυμερή, προστατευτικά περιβλήματα). Τέλος η χάραξή τους μόνο μερικώς μπορεί να προσαρμοσθεί στις απαιτήσεις των μεγεθών σχεδιασμού και η ειδική διαμόρφωση των σωμάτων εκτροπής και αγκυρώσεως αυξάνει το κόστος.

Η εξωτερική προένταση ιστορικά εμφανίστηκε περίπου το 1930 και αποτέλεσε την πρώτη μέθοδο προεντάσεως [παρ.87]. Ωστόσο αργότερα, γύρω στο 1940 και για περίπου τρεις δεκαετίες σχεδόν εγκαταλείφθηκε και επικράτησε η ιδέα της εσωτερικής προέντασης με κύρια πλεονεκτήματα την «δωρεάν» αντιδιαβρωτική προστασία από το περιβάλλον σκυροδέμα και τη δυνατότητα κατάλληλης προσαρμογής της χαράξεως ως προς την αναμενόμενη ένταση και συνεπώς πλήρη εκμετάλλευση της αντοχής των τενόντων. Από το

1970 και μέχρι σήμερα διαπιστώνεται η επανεμφάνιση και αναγέννηση της εξωτερικής προέντασης τόσο για ενίσχυση υπαρχόντων κατασκευών όσο και για την δημιουργία νέων. Επίσης ενδιαφέρον παρουσιάζει ο συνδυασμός εσωτερικής – εξωτερικής προέντασης καθώς με κατάλληλο σχεδιασμό μπορεί να οδηγήσει σε μια βελτιστοποίηση των μεγεθών ασφάλειας και κόστους.

Με την εμφάνιση των FRP τις τελευταίες δεκαετίες στα έργα πολιτικού μηχανικού και την σταδιακή εξέλιξη της έρευνας ως προς τις ιδιότητές τους γεννήθηκε η ιδέα χρησιμοποίησης τους ως τένοντες προεντάσεως. Ιδιαίτερα η πολύ υψηλή ανθεκτικότητά τους σε διάβρωση παρέχει συγκριτικά πλεονεκτήματα σε ένα σύστημα εξωτερικής προέντασης καθώς μειώνει στο ελάχιστο τις απαιτήσεις αντιδιαβρωτικής προστασίας. Ακόμη στο ελάχιστο μειώνονται και οι δαπάνες συντήρησης κατά τη διάρκεια ζωής του έργου. Τέλος η δυνατότητα ενσωμάτωσης στους τένοντες από FRP συστημάτων bragg grating και η δημιουργία «έξυπνων» κατασκευών ανοίγει νέους ορίζοντες στον κλάδο των κατασκευών [παρ.88].

2.5 Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ FIBER BRAGG GRATING ΣΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.

2.5.1 «Έξυπνα» υλικά – «έξυπνες» κατασκευές.

Οι ολοένα και πιο υψηλές απαιτήσεις των σύγχρονων τεχνικών έργων οδήγησαν τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη των «έξυπνων» υλικών και κατασκευών. Ως «ευφυές σύστημα δομικής παρακολούθησης» νοείται ένα σύστημα ενσωματωμένο σε μια κατασκευή το οποίο μπορεί να ελέγξει τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες αυτής της κατασκευής (όπως π.χ. η θερμοκρασία και η παραμόρφωση) εν λειτουργία. Μπορεί κανείς να παρομοιάσει τη λειτουργία μιας «έξυπνης» κατασκευής με το ανθρώπινο σώμα όπου ο εγκέφαλος μέσω του νευρικού συστήματος αντιλαμβάνεται και αξιολογεί τις μεταβολές στα διάφορα μέλη. Μια «έξυπνη» κατασκευή αποτελείται από υλικά τα οποία μπορούν συνεχώς να ελέγχουν τις φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες και συνεπώς να προειδοποιούν για επικείμενες βλάβες στην στατική συμπεριφορά της κατασκευής. Αυτή η φιλοσοφία σχεδιασμού μπορεί να οδηγήσει σε πιο ασφαλείς και οικονομικές λύσεις και σε αποφυγή μιας πιθανής υπερδιαστασιολόγησης [παρ.89].

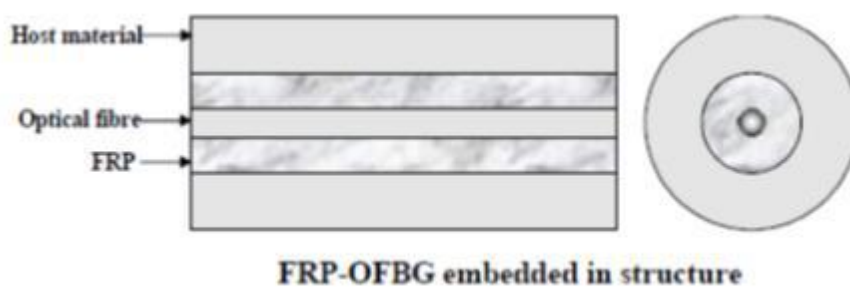
2.5.2 Είδη αισθητήρων

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί πολλά συστήματα αισθητήρων που τοποθετούνται στις κατασκευές προκειμένου να παρακολουθείται η συμπεριφορά τους εν λειτουργία. Οι συνήθεις αυτοί αισθητήρες είναι ηλεκτρικοί και πολλές φορές αντιμετωπίζουν προβλήματα παρεμβολών ενώ συγχρόνως και ειδικά σε μεγάλες κατασκευές απαιτούν περίπλοκα δίκτυα καλωδίων. Μια νέα τεχνολογία αισθητήρων αποτελούν τα λεγόμενα συστήματα FBG (fiber bragg grating). Ως κύρια πλεονεκτήματά τους έναντι των συμβατικών αναφέρονται τα εξής [παρ.90]: μικρές διαστάσεις και βάρος, υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία, μεγάλη ανθεκτικότητα σε διάβρωση και μη αγωγιμότητα σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

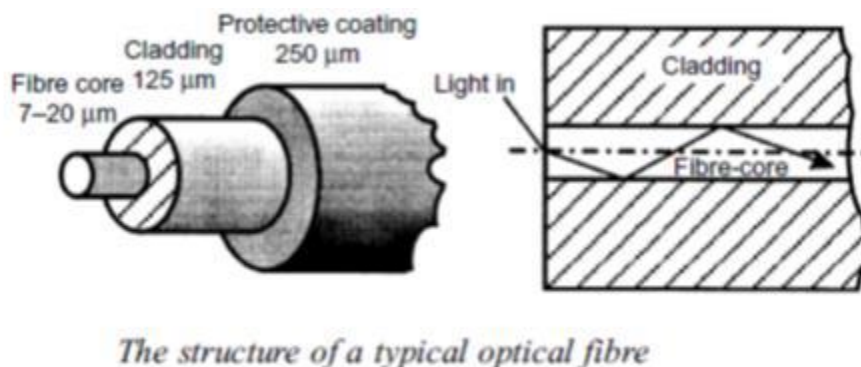
2.5.3 Συστήματα FBG και FRP

Μια πολύ ενδιαφέρουσα εφαρμογή των συστημάτων FBG είναι η ενσωμάτωση τους σε υλικά FRP. Πιο συγκεκριμένα η διαδικασία παραγωγής των μελών από FRP επιτρέπει την ενσωμάτωση αυτών των αισθητήρων μέσα στο σώμα της ράβδου (ή του τένοντα) χωρίς να προσβάλλονται τα μηχανικά και φυσικά χαρακτηριστικά της ενώ παράλληλα

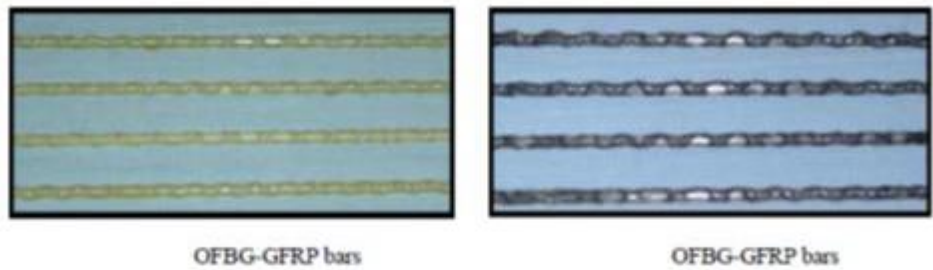
προστατεύονται και οι αισθητήρες από τον κίνδυνο τραυματισμού και φθοράς (Εικ. 2.10 – 2.12). Έτσι ο οπλισμός από FRP στο σκυρόδεμα μπορεί να λειτουργήσει ως ‘έξυπνος’ οπλισμός. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς τα FRP αποτελούν μια νέα συνεχώς αναπτυσσόμενη τεχνολογία και ένα σημαντικό μειονέκτημα που εμποδίζει προς το παρόν την ευρεία χρήση τους ως οπλισμού στο σκυρόδεμα είναι η ανεπαρκής γνώση των ιδιοτήτων τους καθώς η εμπειρία από τις εφαρμογές τους στα έργα πολιτικού μηχανικού είναι ακόμη μικρή. Έτσι η ενσωμάτωση ενός συστήματος FBG μπορεί να παρέχει ένα δίκτυο ασφαλείας έναντι μιας ενδεχόμενης αστοχίας ενώ παράλληλα εμπλουτίζει σημαντικά τη γνώση για τη συμπεριφορά των FRP ως οπλισμού στο σκυρόδεμα (Εικ. 2.13 και 2.14). Τέτοια συστήματα «έξυπνου» οπλισμού FRP-FBG συνεχώς αναπτύσσονται και έχουν βρει εφαρμογή σε πολλές κατασκευές (Εικ. 2.15).



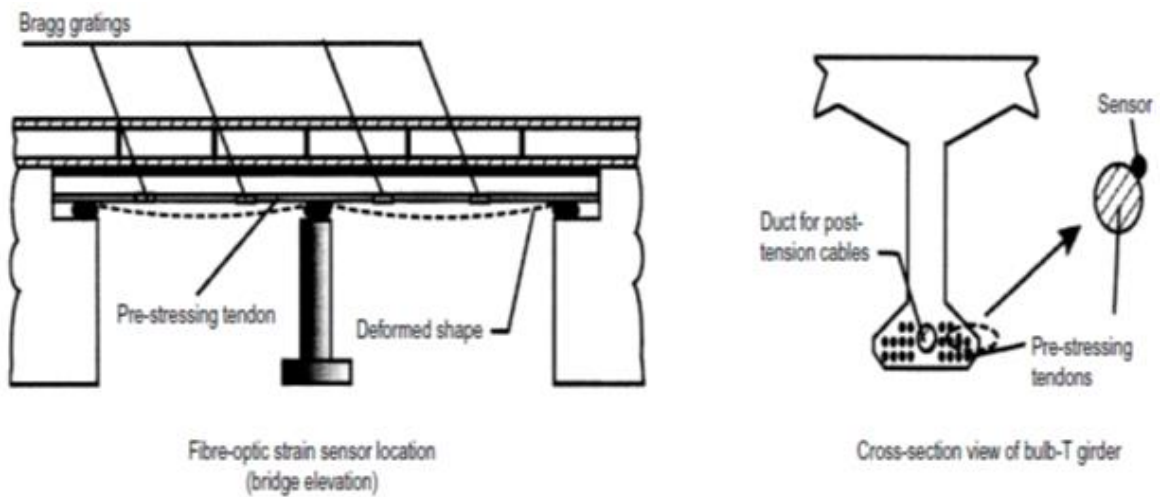
Εικόνα 2.10 Σχηματική αναπαράσταση αισθητήρα FBG ενσωματωμένου σε οπλισμό FRP [παρ.91].



Εικόνα 2.11 Τυπική διατομή οπτικής ίνας που χρησιμοποιείται στα συστήματα FBG [παρ.92].

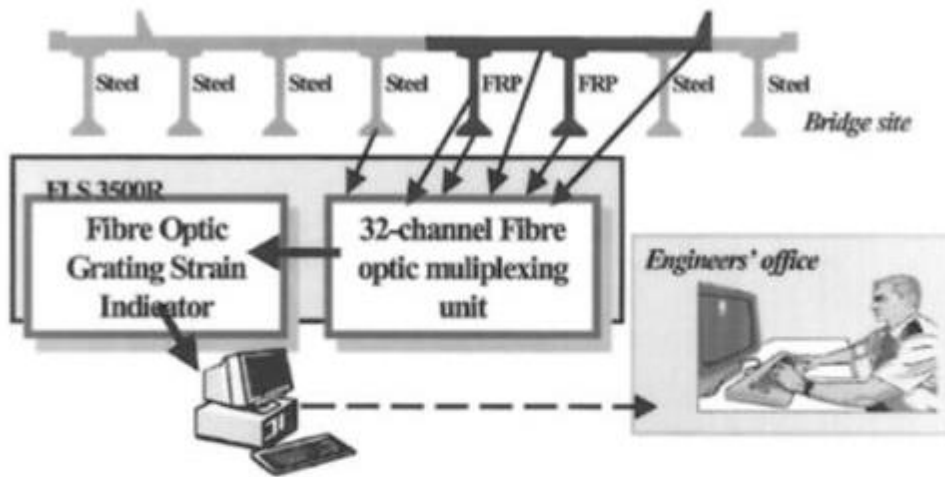


Εικόνα 2.12 Ράβδοι οπλισμού FRP με ενσωματωμένους αισθητήρες τύπου FBG [παρ.93].



Schematic illustration of strain measurements from the Beddington Trail Bridge sensor array

Εικόνα 2.13 Παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας κατασκευής με αισθητήρες FBG ενσωματωμένους σε τένοντες από FRP [παρ.94].



Optical sensing technology.

Εικόνα 2.14 Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας ενόργανης παρακολούθησης με αισθητήρες FBG σε συνδυασμό με FRP [παρ.95].



Installation process of the grating sensors on the girder surface

Εικόνα 2.15 Τοποθέτηση αισθητήρων FBG σε πλέγμα οπλισμού από FRP σε κατάστρομα γέφυρας [παρ.96].

2.6 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΣΕ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ.

Η κυριότερη εφαρμογή των συνθέτων υλικών στο πεδίο του πολιτικού μηχανικού είναι για την ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα. Στην περίπτωση αυτή τα FRP με μορφή ελασμάτων, υφασμάτων ή, σπανιότερα, ράβδων χρησιμοποιούνται ως εξωτερικός, πρόσθετος οπλισμός κάμψης ή περίσφιγξης. Οι διάφορες τεχνικές έχουν β αναλυθεί εκτενώς σε πολλές εργασίες ενώ είναι πλέον ώριμοι και οι σχετικοί Κανονισμοί που αφορούν το σχεδιασμό των επεμβάσεων αυτών. Η χρήση των FRP σε επεμβάσεις δεν αποτελεί κύριο αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Στην ενότητα αυτή αναφέρονται σύντομα κάποια βασικά στοιχεία, κυρίως για την εφαρμογή των υλικών στο έργο.

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.

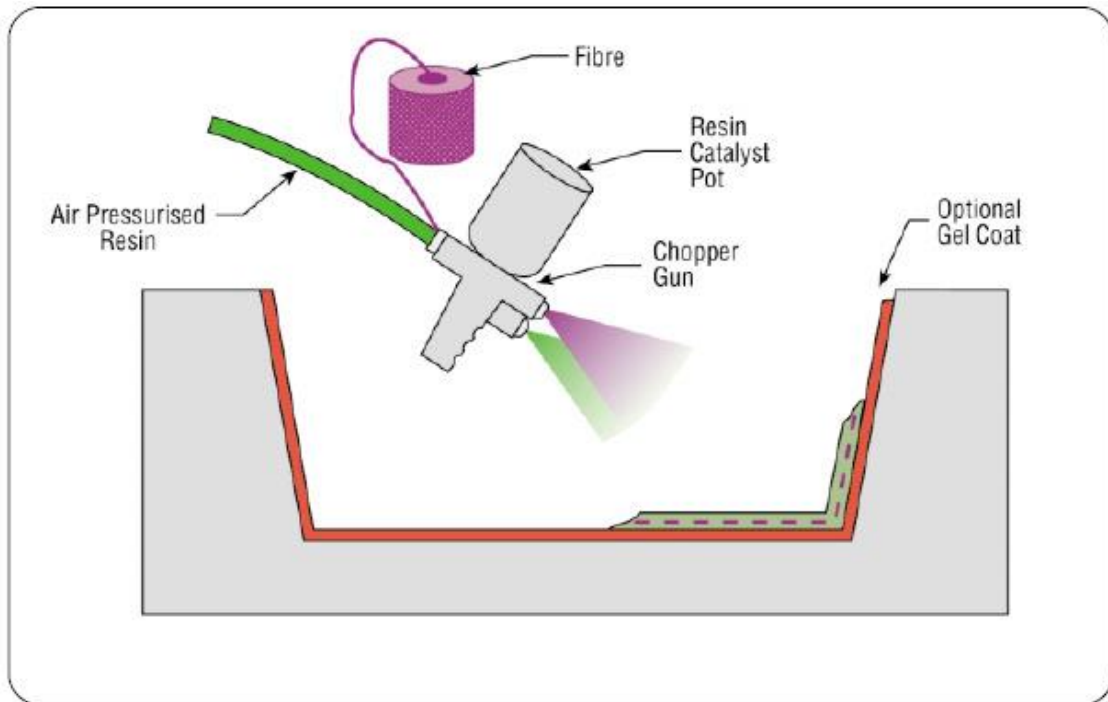
Το χρονικό περιθώριο μεταξύ προετοιμασίας της επιφάνειας και επικόλλησης των συνθέτων υλικών πρέπει να είναι εξαιρετικά μικρό για την αποφυγή πιθανής ενανθράκωσης του σκυροδέματος.

Η διαδικασία εφαρμογής των ΙΟΠ ξεκινά με την επάλειψη της επιφάνειας του δομικού στοιχείου με εποξική, κυρίως, ρητίνη. Στην συνέχεια τοποθετείται η πρώτη στρώση του σύνθετου υλικού και επαναλαμβάνεται η διαδικασία με την τοποθέτηση επιπλέον στρώσεων, σύμφωνα με την μελέτη επισκευής – ενίσχυσης.

Σε πιο σύνθετες διατομές (που μπορεί να συναντήσει κανείς σε έργα υποδομής), οι πιο συνηθισμένες τεχνικές κατασκευής ινοπλισμένων πολυμερών είναι οι παρακάτω **[παρ.98]**:

(α) Εφαρμογή με ψεκασμό:

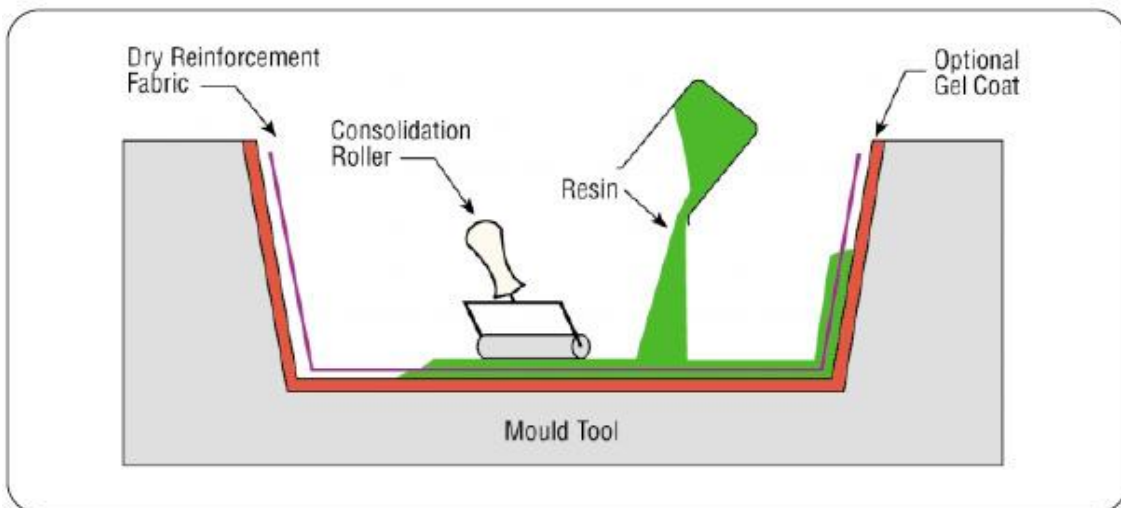
Οι ίνες κόβονται μέσα στο χειροκίνητο «πιστόλι» (Εικ. 2.16) και στην συνέχεια τροφοδοτούνται μέσω της, υπό μορφή σπρέι, ρητίνης κατευθείαν στο καλούπι. Το εναποτεθέν υλικό αφήνεται να ωριμάσει υπό κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες.



Εικόνα 2.16: Εφαρμογή ενισχυτικής στρώσης FRP με ψεκάσμο [παρ.99].

(β) Εφαρμογή με το χέρι:

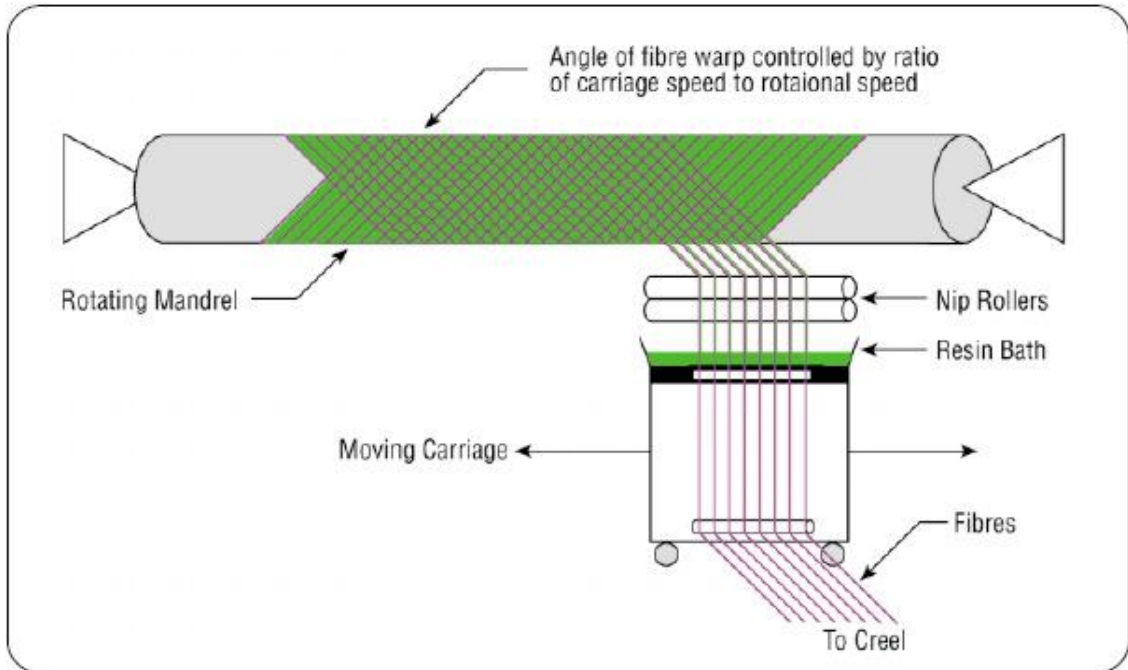
Η ρητίνη εμποτίζεται με το χέρι μεταξύ των ινών, οι οποίες βρίσκονται σε πλεκτή μορφή. Η τελική διαμόρφωση γίνεται με ρολά ή βούρτσες και το προϊόν αφήνεται όπως πριν να ωριμάσει σε κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες (Εικ. 2.17).



Εικόνα 2.17: Εφαρμογή ενισχυτικής στρώσης FRP με το χέρι [παρ.100]

(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 πιν την περιέλιξη πάνω σε έναν άξονα σε διάφορες κατευθύνσεις, ελεγχόμενες από τον μηχανισμό τροφοδοσίας ινών και τον ρυθμό περιστροφής του άξονα.



Εικόνα 2.18: Περιέλιξη ινών σε άξονα κατά την εφαρμογή ενισχυτικής στρώσης FRP [παρ.101]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΛΩΝ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΙΣ ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ACI-440

3.1 ΓΕΝΙΚΑ – ΤΙΜΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Για να υπολογιστεί ο απαιτούμενος οπλισμός από σύνθετα υλικά για ένα μέλος σκυροδέματος είναι απαραίτητο να είναι γνωστά τα χαρακτηριστικά των ράβδων τα οποία λαμβάνονται υπόψη στη διαδικασία, δηλαδή η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας. Τα χαρακτηριστικά αυτά παρέχονται από τον κατασκευαστή καθώς εξαρτώνται από παράγοντες όπως το είδος και ο προσανατολισμός των ινών, ο τύπος της ρητίνης, η διαδικασία κατασκευής και ο ποιοτικός έλεγχος. Επομένως ο κατασκευαστής του οπλισμού οφείλει να παρέχει την εγγυημένη εφελκυστική αντοχή των ράβδων f_{fu}^* , η οποία προκύπτει ως [παρ.102]:

$$f_{fu}^* = f_{fu,ave} - 3\sigma \quad (1)$$

όπου $f_{fu,ave}$ η μέση τιμή από πειράματα σε καθορισμένο αριθμό δοκιμίων και σ η τυπική απόκλιση. Με αντίστοιχο τρόπο καθορίζεται και το μέτρο ελαστικότητας (μέση τιμή). Για τις ανάγκες των κανονισμών απαιτείται τυποποίηση, δηλαδή διάκριση των ράβδων σε κατηγορίες αντοχής. Στον ACI-440 ορίζονται κατηγορίες οπλισμών από F60 ($f_{fu}^* \geq 414 \text{MPa}$) έως F300 ($f_{fu}^* \geq 2069 \text{MPa}$). Επιπλέον για το μέτρο ελαστικότητας δίνονται οι ελάχιστες τιμές ανάλογα με τον τύπο των ινών, οι οποίες είναι 39.3 GPa για ίνες γυαλιού, 68.9 GPa για ίνες αραμιδίου και 110.3 GPa για ίνες άνθρακα [παρ.103].

Σε απόλυτη αντιστοιχία με όσα ισχύουν για τη διαστασιολόγηση του κοινού οπλισμένου σκυροδέματος, οι εγγυημένες τιμές για τις ιδιότητες των ράβδων που διατίθενται από τον κατασκευαστή θεωρούνται αρχικές τιμές, στις οποίες δεν έχει ληφθεί υπόψη η πιθανότητα μακρόχρονης έκθεσης σε επιβλαβή περιβάλλοντα. Επειδή η δράση συγκεκριμένων παραγόντων μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τις μηχανικές ιδιότητες των ράβδων, απαιτείται η μείωση της εγγυημένης εφελκυστικής αντοχής και ο προσδιορισμός της αντοχής σχεδιασμού με βάση την ακόλουθη σχέση [παρ.104]:

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (2)$$

όπου το C_E είναι ο μειωτικός συντελεστής λόγω της επίδρασης των περιβαλλοντικών συνθηκών και είναι αντίστοιχος με τους συντελεστές υλικού γ_m που χρησιμοποιούνται για το κοινό οπλισμένο σκυρόδεμα. Μάλιστα στις Ιαπωνικές συστάσεις, η αντοχή σχεδιασμού ορίζεται ως το πηλίκο της εγγυημένης με κατάλληλο συντελεστή υλικού. Με ανάλογο τρόπο υπολογίζεται και η παραμόρφωση αστοχίας για το σχεδιασμό [παρ.105]:

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (3)$$

όπου η εγγυημένη παραμόρφωση θραύσης ορίζεται με τρόπο αντίστοιχο με την f_{fu} . Το μέτρο ελαστικότητας που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς είναι αυτό που παρέχει ο κατασκευαστής. Για τον συντελεστή C_E οι καναδικές συστάσεις ορίζουν τιμές 0.85 για CFRP και 0.70 για AFRP [παρ.106].

Δεδομένου του προσδιορισμού της χαρακτηριστικής αντοχής με τρόπο ανάλογο με το χάλυβα, η χρήση των τιμών αυτών οδηγεί σε μάλλον ανασφαλή αποτελέσματα. Αυτό φαίνεται εάν γίνει μια σύγκριση με τον ACI-440 που δίνει τις τιμές του πίνακα 3.1, αλλά και με τις Ιαπωνικές συστάσεις όπου ορίζουν $\gamma_m=1.15$, αλλά επιβάλλουν τον προσδιορισμό της εγγυημένης αντοχής όπως αναφέρθηκε παραπάνω, με αποτέλεσμα η πιθανότητα αστοχίας να είναι της τάξης του 10%.

Πίνακας 3.1: Τιμές του μειωτικού συντελεστή C_E (ACI-440) [παρ.107].

Συνθήκες Έκθεσης	Τύπος Ινών	Συνθήκες C_g
Σκυρόδεμα μη-εκτεθειμένο σε εδαφικές-περιβαλλοντικές συνθήκες	Άνθρακας	1.0
	Γυαλί	0.8
	Αραμίδιο	0.9
Σκυρόδεμα εκτεθειμένο σε εδαφικές-περιβαλλοντικές συνθήκες	Άνθρακας	0.9
	Γυαλί	0.7
	Αραμίδιο	0.8

Οι τιμές που προσδιορίζονται από τις εξισώσεις που προηγήθηκαν αφορούν ευθύγραμμες ράβδους. Η κάμψη των ράβδων δημιουργεί αδυναμία στο σημείο που γίνεται. Συνεπώς απαιτείται να υπολογιστεί μια μειωμένη τιμή της εφελκυστικής αντοχής για να χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς, η οποία δίνεται από την ακόλουθη σχέση [παρ.108]:

$$f_{fb} = (0.05 \cdot \frac{r_b}{d_b} + 0.3) f_{fu} \leq f_{fu} \quad (4)$$

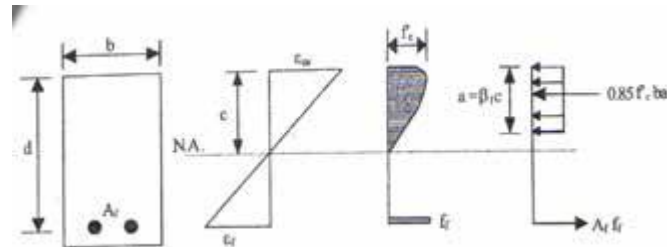
όπου r_b η ακτίνα του καμπτόμενου τμήματος και d_b η διάμετρος της ράβδου. Η ίδια σχέση υιοθετείται και από το καναδικό και το ιαπωνικό πρότυπο.

3.2 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΓΙΑ ΟΡΙΑΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ

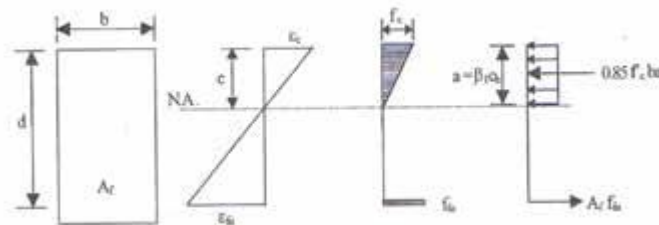
Το πρώτο βήμα της διαδικασίας διαστασιολόγησης είναι ο υπολογισμός της επιθυμητής μορφής αστοχίας του σχεδιαζόμενου μέλους. Στο κοινό οπλισμένο σκυρόδεμα συνήθως επιλέγεται η αστοχία του σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης, αφού προηγηθεί η διαρροή του εφελκυστικού χάλυβα. Με τον τρόπο αυτό το μέλος συμπεριφέρεται πλάστιμα και είναι δυνατή η κατανάλωση ποσότητας ενέργειας μέσω της ανάπτυξης ανελαστικών παραμορφώσεων.

Στην περίπτωση των ράβδων FRP οι πιθανοί μηχανισμοί αστοχίας είναι τρεις: αστοχία σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη, διάρρηξη των ράβδων FRP ή ταυτόχρονη εκδήλωση και των δύο φαινομένων (Εικ. 3.1). Ουσιαστικά οι διαθέσιμες περιπτώσεις είναι οι δύο πρώτες, καθώς η ταυτόχρονη αστοχία σκυροδέματος και οπλισμού, η οποία περιγράφει τη συμπεριφορά της ισοζυγισμένης διατομής είναι δύσκολο να επιτευχθεί και εισάγεται στο κείμενο του ACI-440 για τις ανάγκες του σχεδιασμού. Και οι δύο διαθέσιμοι μηχανισμοί οδηγούν σε ψαθυρή αστοχία του μέλους, δηλαδή δεν αναμένεται πλαστική συμπεριφορά του. Πειραματικές δοκιμές έχουν δείξει ότι η διάρρηξη των ράβδων FRP οδηγεί σε πολύ απότομη αστοχία και κατάρρευση του μέλους. Επομένως η σύνθλιψη του σκυροδέματος θεωρείται πιο επιθυμητή. Παρόλα αυτά και οι δύο περιπτώσεις είναι αποδεκτές, αρκεί να τηρούνται τα κριτήρια αντοχής και λειτουργικότητας που τίθενται. Επειδή όμως η συμπεριφορά του μέλους θα είναι ούτως ή άλλως ψαθυρή, επιλέγεται μεγαλύτερο περιθώριο αντοχής μέσω του μειωτικού συντελεστή Φ [παρ.109].

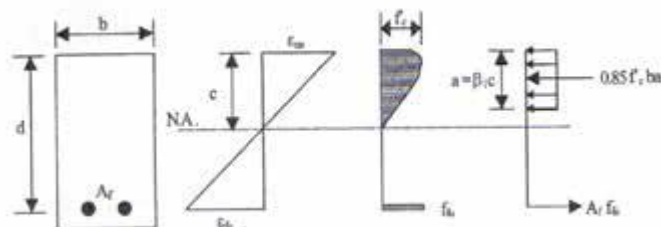
Στα σχήματα που ακολουθούν (Εικ. 3.1) φαίνεται η θεωρητική κατανομή τάσεων και παραμορφώσεων στη διατομή ενός μέλους σκυροδέματος οπλισμένου με ράβδους από σύνθετα υλικά. Οι παραδοχές που γίνονται, βάση των οποίων εξάγονται οι εξισώσεις που παρουσιάζονται στη συνέχεια είναι η διατήρηση της επιπεδότητας της διατομής, μέγιστη παραμόρφωση για το σκυρόδεμα σε θλίψη 0.003, παραλαβή των θλιπτικών τάσεων από το σκυρόδεμα και των εφελκυστικών από τον οπλισμό, γραμμικά ελαστική συμπεριφορά των FRP μέχρι την αστοχία, πλήρης αγκύρωση της ράβδου [παρ.110].



(α) Αστοχία σκυροδέματος



(β) Αστοχία οπλισμού FRP



(γ) Ισοζυγισμένη διατομή

Εικόνα 3.1: Κατανομή τάσεων και παραμορφώσεων στις οριακές συνθήκες [παρ.111].

Για τον προσδιορισμό της καμπτικής ικανότητας του μέλους θα πρέπει να υπολογιστεί η καμπτική αντοχή του, η οποία εξαρτάται από την μορφή αστοχίας. Για δεδομένη ποσότητα οπλισμού, η μορφή αστοχίας καθορίζεται από τη σύγκριση του ποσοστού του με αυτό της ισοζυγισμένης διατομής [παρ.112]:

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} \quad (5)$$

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f_c E_f \varepsilon_{cu}}{f_u E_f \varepsilon_{cu} + f f_u} \quad (6)$$

όπου β_1 το πλάτος του ισοδύναμου μπλοκ ομοιόμορφων τάσεων στο σκυρόδεμα.

Επομένως αν $\rho_f > \rho_{fb}$ αναμένεται αστοχία του σκυροδέματος. Για μεγαλύτερη ασφάλεια έναντι της περισσότερο ψαθυρής θραύσης των FRP λαμβάνεται $\rho_f > 1.4\rho_{fb}$ · οπότε η ροπή αντοχής υπολογίζεται ως εξής [παρ.113]:

$$\left(\sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85\beta_1 f_c'}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu} - 0.5 E_f \varepsilon_{cu}} \right) \leq f_{fu} \quad (7)$$

$$M_n = \rho_f f_f (1 - 0.59 \frac{\rho_f f_f}{f_c'}) \quad (8)$$

Στην περίπτωση που ισχύει $\rho_f < \rho_{fb}$ τότε η αστοχία καθορίζεται από τη θραύση των ράβδων οπλισμού. Η περίπτωση αυτή είναι πιο σύνθετη από πλευράς υπολογισμών καθώς το σκυρόδεμα μπορεί να μην φτάσει στη μέγιστη παραμόρφωση, οπότε δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ισοδύναμη ομοιόμορφη κατανομή τάσεων.

Στην ανάλυση επομένως εισάγονται δύο ακόμα άγνωστα μεγέθη, τα οποία είναι το ύψος της θλιβόμενης ζώνης και η παραμόρφωση του σκυροδέματος στη φάση της αστοχίας.

Επιπλέον οι συντελεστές β_1 και α_1 που αφορούν τις διαστάσεις του ισοδύναμου μπλοκ θλιπτικών τάσεων είναι άγνωστοι. Άρα απαιτείται ανάλυση με σκοπό τον προσδιορισμό των αγνώστων παραμέτρων, οπότε η καμπτική ικανότητα του μέλους προκύπτει ως [παρ.114]:

$$M_n = A_f F_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (9)$$

Η μέγιστη τιμή για την παραπάνω εξίσωση προκύπτει για $\beta_1 c_b$ όπου c_b το ύψος της θλιβόμενης ζώνης της ισοζυγισμένης διατομής. Με βάση αυτή την παραδοχή προκύπτει η παρακάτω απλοποιητική έκφραση για την αντοχή του μέλους [παρ.115]:

$$M_n = 0.8 A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right) \quad (10)$$

Η λογική του σχεδιασμού επιβάλλει, η προσδιοριζόμενη ροπή αντοχής μειωμένη μέσω κατάλληλου συντελεστή να είναι μεγαλύτερη από την ροπή λόγω εξωτερικής φόρτισης. Επειδή και οι δύο μηχανισμοί αστοχίας είναι ψαθυροί, απαιτείται μεγαλύτερο περιθώριο αντοχής σε σχέση με τις κατασκευές με χαλύβδινο οπλισμό, οπότε λαμβάνονται μικρότερες τιμές για το Φ . Ο κανονισμός ACI-318 που αναφέρεται στο κοινό οπλισμένο σκυρόδεμα ορίζει για την περίπτωση της σύνθλιψης του σκυροδέματος $\Phi=0.7$ [παρ.116]. Η τιμή αυτή λογικό είναι να υιοθετείται και από τον ACI-440 που εξετάζεται εδώ για την αντίστοιχη περίπτωση αστοχίας. Αν όμως αναμένεται θραύση των ράβδων από σύνθετα υλικά, η οποία οδηγεί σε πιο απότομη και καταστροφική αστοχία, τότε απαιτείται ακόμα μεγαλύτερο περιθώριο ασφάλειας και υιοθετείται η τιμή $\Phi=0.5$. Τελικά οι τιμές του συντελεστή Φ λαμβάνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις [παρ.117]:

$$\Phi=0.50 \quad \text{για} \quad \rho_f < \rho_{fb}$$

$$\Phi = \frac{\rho_f}{2\rho_{fb}} \quad \text{για} \quad \rho_{fb} < \rho_f < 1.4\rho_{fb}$$

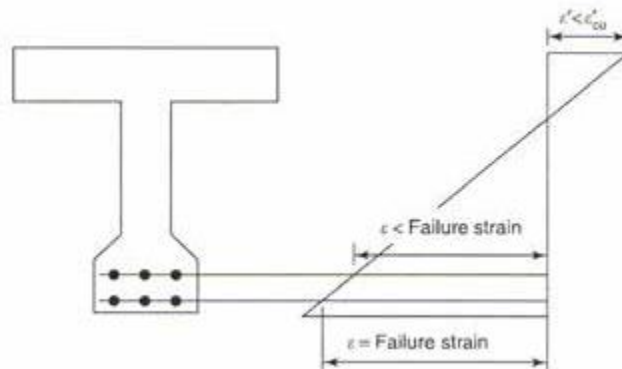
$$\Phi = 0.70 \quad \text{για} \quad \rho_{fb} \geq 1.4\rho_{fb}$$

Στην περίπτωση που το μέλος διαστασιολογείται για αστοχία του FRP απαιτείται ο καθορισμός ενός ελάχιστου ποσοστού οπλισμού, ώστε να αποφευχθεί η αστοχία από ρηγμάτωση του σκυροδέματος, να ισχύει δηλαδή $\Phi M_n \geq M_{cr}$. Ο υπολογισμός του ελάχιστου οπλισμού μπορεί να γίνει με χρήση της εξίσωσης που ισχύει για το κοινό οπλισμένο σκυρόδεμα, με κατάλληλη μετατροπή του συντελεστή εξαιτίας του διαφορετικού Φ που χρησιμοποιείται στα σύνθετα υλικά. Προκύπτει [παρ.118]:

$$A_{f,min} = \frac{5.4\sqrt{f'_c}}{F_{fu}} b_w d \geq \frac{360}{f_{fu}} b_w d \quad (12)$$

Αν η αστοχία δεν οφείλεται σε θραύση των συνθέτων υλικών, τότε η παραπάνω απαίτηση ικανοποιείται αυτομάτως και δεν χρειάζεται περαιτέρω έλεγχος.

Ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει στην περίπτωση της τοποθέτησης των οπλισμών σε πολλαπλές στρώσεις. Στην περίπτωση των χαλύβδινων οπλισμών, όλες οι ράβδοι θεωρούνται ότι φτάνουν στη διαρροή τους, οπότε η ισοδύναμη εφελκυστική δύναμη θεωρείται ότι ασκείται στο κέντρο βάρους του οπλισμού. Στην περίπτωση των FRP, για τα οποία γίνεται η παραδοχή της γραμμικά ελαστικής συμπεριφοράς μέχρι την αστοχία, κάτι τέτοιο δεν ισχύει, καθώς οι τάσεις σε κάθε στρώση είναι διαφορετικές, λόγω της διαφοράς στις παραμορφώσεις. Το φαινόμενο αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό και τον υπολογισμό της καμπτικής αντοχής. Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι για αυτές τις περιπτώσεις η αστοχία αντιστοιχεί στη θραύση της εξωτερικής στρώσης οπλισμού, όπως δείχνει και το σχετικό σχήμα (Εικ. 3.2).



Εικόνα 3.2: Αστοχία διατομής με δύο στρώσεις οπλισμού FRP [παρ.119].

Τέλος η χρήση ράβδων FRP για τον οπλισμό της θλιβόμενης ζώνης συνίσταται από τον ACI-440 να αποφεύγεται, καθώς από τα λίγα πειραματικά στοιχεία που διατίθενται φαίνεται η αδυναμία των υλικών αυτών σε θλίψη. Παρόλα αυτά, εάν η τοποθέτηση οπλισμών FRP στη θλιβόμενη περιοχή δεν μπορεί να αποφευχθεί, τότε είναι απαραίτητη η επιβολή επαρκούς

περίσφιξης ώστε να περιοριστούν φαινόμενα αστάθειας και διόγκωσης ορισμένων τύπων ράβδων [παρ.120].

3.3 ΟΡΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ

Οι οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας έχουν να κάνουν με τον περιορισμό της ρηγμάτωσης και των μετακινήσεων (π.χ. βέλους κάμψης δοκού) ώστε να πληρούν προϋποθέσεις που εισάγονται είτε από αισθητικούς λόγους, είτε από τη λειτουργία της κατασκευής.

Ο περιορισμός της ρηγμάτωσης σε κατασκευές κοινού οπλισμένου σκυροδέματος συνδέεται κυρίως με την προστασία των ράβδων από τη διάβρωση. Η χρήση των ράβδων FRP απαλλάσσει από αυτό το πρόβλημα οπότε είναι δυνατή η εισαγωγή πιο χαλαρών μεγίστων για τις ρωγμές, αφού πλέον πρέπει να καλυφθούν κυρίως αισθητικά κριτήρια. Με αυτό το σκεπτικό εισάγεται στον καναδικό κανονισμό και υιοθετείται στον ACI μέγιστο πλάτος ρωγμής 0.5mm για «εξωτερικά» μέλη και 0.7mm για τα υπόλοιπα [παρ.121]. Βέβαια οι τιμές αυτές μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτικές για κατασκευές εκτεθειμένες σε έντονα διαβρωτικά περιβάλλοντα, ή αν απαιτείται στεγανότητα, όπου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι ιδιαίτερες συνθήκες. Τέλος για κατασκευές με μικρό χρόνο ζωής, στις οποίες ζητούμενο είναι μόνο η αντοχή, ο έλεγχος του πλάτους των ρωγμών μπορεί να παραλείπεται.

Ο υπολογισμός του ανοίγματος ρωγμών γίνεται από την ίδια εξίσωση που χρησιμοποιείται και στο κοινό οπλισμένο σκυρόδεμα, κατάλληλα τροποποιημένη και με την προσθήκη ενός συντελεστή k_b που εκφράζει την διαφορετική συνάφεια των ράβδων FRP με το σκυρόδεμα, σε σχέση με τις χαλύβδινες [παρ.122]:

$$W = \frac{2.2}{E_f} \beta k_b f_f \sqrt[3]{d_c A} \quad (13)$$

Ο συντελεστής k_b παίρνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας για ράβδους με συνάφεια καλύτερη από το χάλυβα. Διαφορετικά οι τιμές είναι μικρότερες της μονάδας. Με τον τρόπο αυτό λαμβάνεται υπόψη ο σχηματισμός μεγαλύτερων (ή μικρότερων) ρωγμών πριν την απώλεια αγκύρωσης της ράβδου, οπότε και αρχίζει να ολισθαίνει. Εάν δεν διατίθενται περισσότερα στοιχεία συνίσταται $k_b = 1.2$ [παρ.123].

Οι παραμορφώσεις του μέλους όπως είναι γνωστό διακρίνονται σε στιγμιαίες και χρόνιες (λόγω ερπυσμού και συστολής ξήρανσης). Για τον προσδιορισμό των στιγμιαίων παραμορφώσεων απαιτείται ο υπολογισμός της ροπής αδράνειας της διατομής, η οποία για ρηγματωμένα μέλη δεν είναι ίση με τη γνωστή I_g . Στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται η ενεργός ροπή αδράνειας I_e με κατάλληλη τροποποίηση της εξίσωσης που εφαρμόζεται στο κοινό οπλισμένο σκυρόδεμα [παρ.124].

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \beta_d I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g \quad (14\alpha)$$

$$\beta_d = a_b \left[\frac{E_f}{E_s} \right] + 1 \quad (14\beta)$$

$$I_{cr} = b d^3 k^3 + n_f A_f d^2 (1 - k^2) \quad (15\alpha)$$

$$K = \sqrt{2\rho_f n_{f+} (\rho_f n_f)^2 - \rho_f n_f} \quad (15\beta)$$

Για το α_b ελλείπει πληρέστερων στοιχείων λαμβάνεται η τιμή 0.5 [παρ.125]. Οι στιγμιαίες παραμορφώσεις, οι οποίες οφείλονται στα φορτία λειτουργικότητας, υπολογίζονται από τις γνωστές εξισώσεις με χρήση όμως της παραπάνω I_e για ρηγματωμένες διατομές. Όσον αφορά τις χρόνιες παραμορφώσεις, πειραματικές δοκιμές έχουν δείξει ότι στα μέλη με οπλισμό FRP είναι μεγαλύτερες μέχρι και τέσσερις φορές σε σχέση με το κοινό οπλισμένο σκυρόδεμα, επομένως πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό. Επιπλέον έχει παρατηρηθεί ότι οι χρόνιες παραμορφώσεις στο οπλισμένο με FRP σκυρόδεμα εκδηλώνονται με τρόπο αντίστοιχο με το κοινό, οπότε για τον υπολογισμό τους υιοθετείται η ίδια μέθοδος με χρήση του συντελεστή ξ [παρ.126]:

$$\Delta_{(cp+sh)} = 0.6\Delta_i \quad (16)$$

3.4 ΘΡΑΥΣΗ ΛΟΓΩ ΕΡΠΥΣΜΟΥ ΚΑΙ ΚΟΠΩΣΗ ΤΩΝ ΡΑΒΔΩΝ

Το φαινόμενο της διάρρηξης των ράβδων από σύνθετα υλικά υπό σταθερό φορτίο με την πάροδο του χρόνου παρουσιάστηκε παραπάνω. Είναι προφανές πως θα πρέπει να εξασφαλίζεται πως η τάση στους οπλισμούς θα περιορίζεται ώστε να μην εκδηλώνεται αυτό το φαινόμενο. Επιπλέον σε περίπτωση που το μέλος υποβάλλεται σε ανακυκλιζόμενες φορτίσεις απαιτείται να λαμβάνεται υπόψη η αναμενόμενη πτώση της αντοχής λόγω του φαινομένου της κόπωσης των οπλισμών που επίσης περιγράφηκε. Συνεπώς προσδιορίζεται η τάση στις ράβδους [παρ.127]:

$$F_{f,s} = M_s \frac{n_f d(1-k)}{I_{cr}} \quad (17)$$

όπου η ροπή M_s προκύπτει από τα επιβαλλόμενα φορτία (λαμβάνονται υπόψη και τα μεταβαλλόμενα). Η τιμή που προκύπτει συγκρίνεται με τη μέγιστη επιτρεπόμενη, η οποία ανάλογα με τον τύπο ινών δίνεται στον παρακάτω Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Οριακές τιμές τάσης για την αποφυγή διάρρηξης λόγω ερπυσμού [παρ.128].

	GFRP	AFRP	CFRP
Μέγιστη τάση $F_{f,s}$	0.20ffu	0.30ffu	0.55ffu

3.5 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

Η διαστασιολόγηση σε διάτμηση ακολουθεί τη λογική της αντίστοιχης διαδικασίας για το κοινό οπλισμένο σκυρόδεμα. Δηλαδή υπολογίζεται η διατμητική δύναμη που αναλαμβάνεται από το σκυρόδεμα και τοποθετούνται συνδετήρες από σύνθετα υλικά, ώστε με τη συμβολή τους να αποφεύγεται η αστοχία του μέλους. Βέβαια για την περίπτωση των συνδετήρων από ράβδους FRP λαμβάνονται υπόψη το μικρό σε σχέση με το χάλυβα μέτρο ελαστικότητας, η υψηλή εφελκυστική αντοχή, η απουσία σημείου διαρροής, η σημαντική μείωση της αντοχής των λυγισμένων ράβδων και η μειωμένη δράση βλητρού [παρ.129].

Για τον προσδιορισμό της διατμητικής δύναμης που αναλαμβάνεται από το σκυρόδεμα θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι εξαιτίας του μικρότερου μέτρου ελαστικότητας των

οπλισμών η ρηγμάτωση του σκυροδέματος είναι εντονότερη, γεγονός που επιδρά αρνητικά στο μέγεθος της τέμνουσας $V_{c,f}$ που μπορεί να παραλάβει. Επιπλέον, αν και δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία για τη συμβολή της δράσης βλήτρου του οπλισμού κάμψης, η μειωμένη αντοχή των ράβδων στη διεύθυνση κάθετα στις ίνες οδηγεί στο συμπέρασμα πως θα είναι μικρότερη από την αντίστοιχη στο κοινό σκυρόδεμα. Οι πιο πάνω σκέψεις συνοψίζονται στην ακόλουθη σχέση [παρ.130]:

$$V_{c,f} = \frac{\rho_f E_f}{90\beta_1 f'_c} V_c \quad (18)$$

Αντίστοιχα με την περίπτωση των χαλύβδινων συνδετήρων, η συμβολή του οπλισμού στην ανάληψη διατμητικών δυνάμεων προκύπτει από την ακόλουθη εξίσωση [παρ.131]:

$$V_f = \frac{A_{FV} f_{FV} d}{s} \quad (19)$$

Η τιμή που προκύπτει από την εξίσωση (19) αθροιζόμενη με αυτή της (18) δίνουν τη συνολική διατμητική αντίσταση ης διατομής. Με βάση αυτή τη λογική η απαιτούμενη ποσότητα συνδετήρων προσδιορίζεται ως εξής [παρ.132]:

$$\frac{A_{FV}}{s} = \frac{(V_u - \Phi V_{cf})}{\Phi F_{FV} d} \quad (20)$$

Η προηγούμενη παραδοχή που έγινε για τις ανάγκες του σχεδιασμού, δηλαδή η άθροιση της διατμητικής αντοχής του σκυροδέματος και του οπλισμού, είναι ακριβής μόνο όταν περιορίζεται το άνοιγμα των διατμητικών ρωγμών, ώστε να αποφεύγεται η αποδιοργάνωση του σκυροδέματος. Για να εξασφαλισθεί αυτό απαιτείται η εισαγωγή κατάλληλου περιορισμού για την τιμή της τάσης στη ράβδου, η οποία συνεπάγεται μείωση των παραμορφώσεων, άρα και του πλάτους των ρωγμών. Στον ACI-440 η μέγιστη αυτή τιμή είναι ίση με $0.004 E_f$ και οπωσδήποτε μικρότερη από την αντοχή της ράβδου σε λυγισμένο τμήμα της [παρ.133].

Για να είναι πλήρης η διαδικασία διαστασιολόγησης ορίζονται και οι ελάχιστες τιμές για τον οπλισμό διάτμησης, ώστε να αποφεύγεται η ψαθυρή διατμητική αστοχία λόγω του απότομου σχηματισμού διατμητικών ρωγμών στο σκυρόδεμα. Ο ελάχιστος οπλισμός διάτμησης δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση [παρ.134]:

$$A_{FV,min} = 0.35 \frac{b_w s}{F_{FV}} \quad (21)$$

Τέλος ενδιαφέρον έχει να αναφερθούν κάποιες κατασκευαστικές διατάξεις οι οποίες αφορούν τους συνδετήρες από ράβδους FRP και καλύπτουν κάποιες αδυναμίες τους. Συγκεκριμένα, είναι γνωστό ότι η μείωση της αντοχής μιας ράβδου FRP εξαρτάται από το πόσο απότομη είναι η αλλαγή στη διεύθυνση των ινών. Για να αποφευχθεί η αστοχία του λυγισμένου τμήματος της ράβδου, η ακτίνα καμπυλότητας της απαιτείται να είναι ίση τουλάχιστον με το τριπλάσιο της διαμέτρου της. Τέλος για να είναι δυνατή η μεταβίβαση των εφελκυστικών τάσεων στο σκυρόδεμα μέσω του αγκίστρου του συνδετήρα, χωρίς ολίσθηση του τελευταίου ορίζεται μια ελάχιστη τιμή του για το μήκος του ίση με $12d_b$. [παρ.135]

3.6 ΑΓΚΥΡΩΣΗ ΤΩΝ ΡΑΒΔΩΝ

Οι παραπάνω υπολογισμοί έγιναν με βάση την παραδοχή της πλήρους αγκύρωσης των οπλισμών στο σκυρόδεμα. Η συνάφεια των οπλισμών FRP με το σκυρόδεμα καθορίζεται από μηχανισμούς αντίστοιχους με αυτούς που καθορίζουν τη συμπεριφορά των χαλύβδινων ράβδων. Εξαρτάται από παράγοντες όπως το είδος των ινών και της ρητίνης, η παραμόρφωση της ράβδου, αλλά και το περιβάλλον και η θερμοκρασία. Η επίδραση των παραγόντων αυτών στην αντοχή συνάφειας των ράβδων δεν είναι σαφώς καθορισμένη και είναι αντικείμενο έντονης έρευνας. Συνεπώς οι υπολογισμοί του μήκους αγκύρωσης που παρουσιάζονται στη συνέχεια είναι μάλλον συντηρητικοί και βασίζονται στη λογική της αγκύρωσης οπλισμών στο κοινό σκυρόδεμα.

Για την μέση τάση συνάφειας ευθύγραμμης ράβδου FRP γίνεται η ίδια παραδοχή με την περίπτωση του χάλυβα, οπότε με αντίστοιχο τρόπο προκύπτει το βασικό μήκος αγκύρωσης από εξισώσεις με την ακόλουθη μορφή [παρ.136]:

$$I_{bf} = K_2 \frac{d_b^2 f_{fu}}{\sqrt{f_c'}} \quad (22)$$

Στον ACI-440 λαμβάνονται υπόψη οι σύγχρονες εξελίξεις στην έρευνα, οπότε για το βασικό μήκος αγκύρωσης προκύπτει η ακόλουθη συντηρητική έκφραση [παρ.137]:

$$I_{bf} = \frac{d_b F_{fu}}{18.5} \quad (23)$$

Το πραγματικό μήκος αγκύρωσης μιας ράβδου προκύπτει από το βασικό με χρήση κατάλληλων συντελεστών, οι οποίοι εκφράζουν την επιρροή της θέσης της ράβδου, της επικάλυψης και της απόστασης των οπλισμών στη συνάφεια. Η θέση της ράβδου αναφέρεται στους οριζόντιους οπλισμούς «άνω πέλματος», των οποίων η απόσταση από τη βάση του μέλους είναι σύμφωνα με τον ACI-440 τουλάχιστον 305mm. Οι ράβδοι αυτές έχουν μειωμένη συνάφεια, συνεπώς απαιτείται μεγαλύτερο μήκος αγκύρωσης και στη σχέση (23) εισάγεται συντελεστής προσαύξησης $k_m=1.3$. Όσον αφορά την επικάλυψη και την απόσταση των ράβδων, αυτές καθορίζουν αν η αστοχία θα προέρθει από εξόλκευση ή λόγω διάρρηξης του σκυροδέματος. Γενικά η δεύτερη συνιστάται να αποφεύγεται, οπότε απαιτείται επικάλυψη και απόσταση των οπλισμών ίση με το διπλάσιο της διαμέτρου της ράβδου τουλάχιστον. Στην περίπτωση αυτή $k_m=1.0$. Για μικρότερες επικαλύψεις ο συντελεστής αύξησης του μήκους αγκύρωσης λαμβάνεται από την παρακάτω σχέση [παρ.138]:

$$k_m = \frac{4b_d - c}{2d_b} \quad \text{για} \quad d_b \leq c \leq 2d_b \quad (24)$$

Σε περίπτωση που δεν υπάρχει ο απαιτούμενος χώρος για ευθύγραμμη αγκύρωση της ράβδου, είναι δυνατή η διαμόρφωση του άκρου σε άγκιστρο, όπως συμβαίνει και με τους χαλύβδινους οπλισμούς. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται το προσδιοριζόμενο απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης, το οποίο, για την περίπτωση του ορθογωνικού άγκιστρου που προβλέπεται από

τον ACI-440, δίνεται ανάλογα με την εφελκυστική αντοχή της ράβδου από τις ακόλουθες σχέσεις [παρ.139]:

$$165 \frac{d_b}{\sqrt{f_{c'}}} \quad \text{για} \quad f_{fu} \leq 520 \text{MPa}$$

$$I_{bhf} = \frac{f_{fu}}{3.1 \sqrt{f_{c'}}} \quad \text{για} \quad 520 \leq f_{fu} \leq 1040 \text{MPa} \quad (25)$$

$$330 \frac{d_b}{\sqrt{f_{c'}}} \quad \text{για} \quad f_{fu} \geq 1040 \text{MPa}$$

Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι η διαμόρφωση σε άγκιστρο επιβάλλει το έλεγχο των ελαχίστων που έχουν ήδη αναφερθεί για τα άγκιστρα των συνδετήρων και αποσκοπούν στην ομαλή μεταβίβαση των τάσεων στο σκυρόδεμα και την αποφυγή της αστοχίας στο λυγισμένο τμήμα.

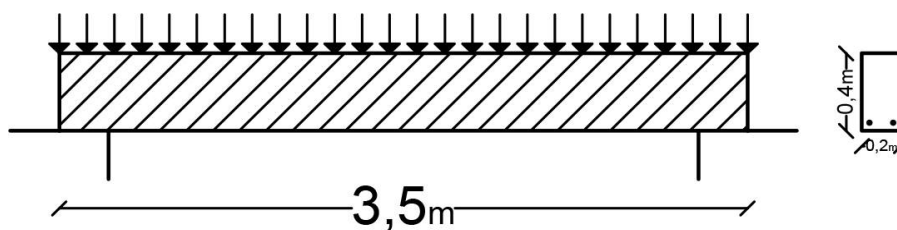
3.7 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας που παρουσιάστηκε προηγουμένως, ακολουθεί μια εφαρμογή της για τον υπολογισμό του απαιτούμενου οπλισμού της δοκού που φαίνεται στο Σχήμα (Εικ. 3.3).

Για τα υλικά δίνεται η θλιπτική αντοχή σχεδιασμού του σκυροδέματος $f_c' = 25 \text{MPa}$, ενώ ο οπλισμός αποτελείται από ράβδους GFRP με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

$$f_{*fu} = 620.6 \text{MPa}, \quad \varepsilon_{*fu} = 0.014 \quad \text{και} \quad E_f = 44.8 \text{GPa}.$$

Η δοκός σχεδιάζεται για να φέρει κινητό φορτίο 5kN/m και επιπλέον μόνιμο φορτίο $g' = 3 \text{kN/m}$.



Εικόνα 3.3: Η δοκός που διαστασιολογείται στο παράδειγμα.

Υπολογισμός φορτίων σχεδιασμού:

$$g = 3 + 0.4 \cdot 0.2 \cdot 25 = 5 \text{KN} / \text{m}$$

$$w = 1.4 + 1.7 \cdot 5 = 15.5 \text{KN/m}$$

$$Mu = \frac{15.5 \cdot 3.5^2}{8} = 23.7 \text{KNm}$$

Εφελκυστική αντοχή σχεδιασμού ράβδων:

$$Ffu = 0.8 \cdot 620.6 = 496 \text{ MPa}$$

Για τοποθέτηση 2Φ16 $\rightarrow Af=400\text{mm}^2$ και $d=0.4-0.04-0.01-0.008=0.342\text{m}$

$$(5) \rightarrow P_f=0.006$$

$$(7) \rightarrow Ff = \frac{\sqrt{44800+0.003^2+0.85 \cdot 0.85 \cdot 25}}{4} \cdot 44800 \cdot 0.003 - 0.5 \cdot 44800 \cdot 0.003 = 568.88 \text{ MPa}$$

$$Mn = 0.006 \cdot 568.88 \left(1 - 0.59 \frac{0.006 \cdot 568.88}{25} \right) 200 \cdot 342 = 73.41 \text{ kNm}$$

Για την ισοζυγισμένη διατομή:

$$(6) \rightarrow \rho_{fb} = 0.85 \frac{25}{496} \cdot 0.85 \frac{44800 \cdot 0.003}{44800 \cdot 0.003 + 496} = 0.0056 \text{ οπότε}$$

$$(11) \rightarrow \Phi = 0.39 \text{ άρα } \Phi M_n = 28.63 > 23.7 \text{ άρα OK}$$

Έλεγχος ανοίγματος ρωγμής:

$$M_{g+q} = 15.31 \text{ kNm}$$

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{44800}{4750\sqrt{25}} = 1.88$$

$$(15\beta) \rightarrow k = \sqrt{(0.006 \cdot 1.88)^2 + 2 \cdot 0.006 \cdot 1.88 - 0.006 \cdot 1.88} = 0.139$$

Οπότε η τάση στις ράβδους θα είναι:

$$Ff = \frac{15.31 \cdot 10^6}{400 \cdot 342 \cdot \left(1 - \frac{0.139}{3} \right)} = 117.35 \text{ MPa}$$

Υπολογίζεται η ισοδύναμη επιφάνεια σκυροδέματος

$$b = \frac{400 - 0.139 \cdot 342}{342(1 - 0.139)} = 1.197$$

$$d_c = 400 - 342 = 58 \text{ mm}$$

$$A = \frac{2 \cdot 58 \cdot 200}{2} = 11600 \text{ mm}^2$$

Οπότε για το πλάτος ρωγμής προκύπτει:

$$(13) \rightarrow \frac{2.2}{44800} 1.197 \cdot 1.2 \cdot 117.35 \cdot \sqrt[3]{58 \cdot 11600} = 0.75 \text{ mm μη αποδεκτό.}$$

Άρα καθοριστική η λειτουργικότητα!

Δοκιμή για 2Φ19 → $A_f=567\text{mm}^2$ και $d=0.341\text{m}$

$$(5) \rightarrow \rho_f = 0.0083$$

$$(7) \rightarrow F_f = 477.78\text{MPa}$$

$$(8) \rightarrow M_n = 0.0083 \cdot 477.78(1 - 0.59)$$

$$[11] \rightarrow \Phi = 0.48 \text{ άρα } \Phi M = 40.33 > 23.7 \text{ άρα OK}$$

$$M_{g+q} = 15.31\text{kNm}$$

$$n_f = 1.88$$

$$(15\beta) \rightarrow \sqrt{(0.0083 \cdot 1.88)^2 + 2 \cdot 0.0083 \cdot 1.88} \cdot 0.006 \cdot 1.88 = 0.162$$

Η νέα τάση στις ράβδους θα είναι:

$$F_f = \frac{15.31 \cdot 10^6}{567 \cdot 341 \cdot \left(1 - \frac{0.162}{3}\right)} = 83.71\text{MPa}$$

Και η ισοδύναμη επιφάνεια σκυροδέματος

$$\beta = \frac{400 - 0.162 \cdot 341}{341(1 - 0.162)} = 1.206$$

$$d_c = 400 - 341 = 59\text{mm}$$

$$A = \frac{2 \cdot 59 \cdot 200}{2} = 11800\text{mm}^2$$

Οπότε για το πλάτος ρωγμής προκύπτει:

$$[13] \rightarrow w = 0.52\text{mm} < 0.7\text{mm} \text{ αποδεκτό.}$$

Έλεγχος για αστοχία FRP λόγω ερπυσμού:

$$M_s = \frac{5 + 0.2 \cdot 5}{10} 15.5 = 9.3\text{kNm}$$

$$(17) \rightarrow \frac{9.3 \cdot 10^6}{567 \cdot 341 \cdot (1 - 0.162/3)} = 50.85\text{MPa} < 0.20 \cdot 496 = 99.2\text{MPa}$$

Υπολογισμός για τέμνουσα:

Ένταση λόγω εξωτερικής φόρτισης:

$$V_d = \frac{15.5 \cdot 3.2}{2} - 15.5 \cdot 0.341 = 21.84\text{kN}$$

$$(18) \rightarrow \frac{0.0083 \cdot 44800}{2} \frac{\sqrt{25}}{6} 200 \cdot 341 = 11.05 \text{KN}$$

Υπολογισμός αντοχής λυγισμένης ράβδου FRP:

$$(4) \rightarrow F_{fb} = (0.05 \cdot 3 = 0.3) \cdot 496 = 223.2 \text{MPa}$$

Μέγιστη επιτρεπόμενη τάση συνδετήρων:

$$(F) F_v = 0.00275 \cdot 44800 = 123.2 < 223.2 \text{MPa}$$

Για συνδετήρες Φ9.5 υπολογίζεται η απόσταση:

$$(20) \rightarrow s = \frac{0.85 \cdot 2 \cdot 71 \cdot 123.2 \cdot 341}{21.84 \cdot 10^3 - 0.85 \cdot 11.05 \cdot 10^3} = 296 \text{mm}$$

Ελάχιστες αποστάσεις

$$\rightarrow s \leq 170.5 \text{mm} \text{ οπότε } \Phi 9.5 / 170$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΟΠΛΙΣΜΩΝ ΙΟΠ ΣΕ ΓΕΦΥΡΕΣ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα FRP έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται στα έργα πολιτικού μηχανικού τις τελευταίες δεκαετίες, ιδιαίτερα στον κλάδο της γεφυροποιίας. Συγκεκριμένα βρίσκουν εφαρμογή στην ενίσχυση υπαρχόντων γεφυρών, στη δημιουργία υβριδικών όπου χρησιμοποιούνται σε συνεργασία με τον χάλυβα και στη δημιουργία νέων κατασκευών με οπλισμό εξ' ολοκλήρου από FRP.

Υπολογίζεται ότι υπέρογκα ποσά (της τάξης των 100 Δισεκατομμυρίων Δολαρίων παγκοσμίως) δαπανούνται κάθε χρόνο για την ενίσχυση ή την επισκευή γεφυρών [παρ.140]. Έτσι τόσο από τις κυβερνήσεις όσο και από τους κατασκευαστές και τους ερευνητές το ενδιαφέρον στρέφεται στο θέμα της ανθεκτικότητας του οπλισμένου σκυροδέματος. Το κύριο πρόβλημα είναι η διάβρωση του οπλισμού όταν λόγω δυσμενών συνθηκών το σκυρόδεμα ρηγματώνεται και δεν μπορεί να παρέχει την απαιτούμενη επικάλυψη. Μια ανταγωνιστική λύση αποτελεί η χρήση των FRP που επιδεικνύουν πολύ υψηλή ανθεκτικότητα σε διαβρωτικό περιβάλλον. Επίσης η έρευνα έχει αποκαλύψει και άλλα συγκριτικά πλεονεκτήματα που ελκύουν το ενδιαφέρον για χρήση τους σε ιδιαίτερες εφαρμογές.

Πιο συγκεκριμένα συγκριτικά με τον χάλυβα τα FRP έχουν σημαντικά μικρότερη μάζα. Πρέπει να παρατηρήσουμε ότι δεν αναμένεται αξιόλογη μείωση του φορτίου σχεδιασμού καθώς το σκυρόδεμα συνεισφέρει αναλογικά πολύ περισσότερο από τον οπλισμό στο βάρος της κατασκευής. Ωστόσο το μικρότερο βάρος οπλισμού μπορεί να μειώσει σημαντικά τις δαπάνες μεταφοράς και εργατικών, να επιταχύνει το χρόνο ολοκλήρωσης των εργασιών και να δώσει έτσι αποδοτικές λύσεις σε περιπτώσεις (ιδιαίτερα στις γέφυρες) όπου το κόστος λόγω διατάραξης ή διακοπής της κυκλοφορίας είναι κρίσιμο ή όπου η πρόσβαση μηχανημάτων και εργατών είναι δυσχερής.

4.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΓΕΦΥΡΩΝ ΠΡΟΕΝΤΕΤΑΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΕΝΟΝΤΕΣ ΑΠΟ FRP

4.2.1 Γέφυρα Heiwei στην επαρχία Huai'an Jiangsu.

Η Γέφυρα Heiwei στην επαρχία Huai'an Jiangsu (Εικ. 4.1) κατασκευάστηκε το 2007 και είναι το πρώτο παράδειγμα οδικής γέφυρας στην Κίνα που έχει γίνει προένταση με τένοντες από FRP (CFRP). Πρόκειται για μια γέφυρα έξι ανοιγμάτων. Συνεχείς δοκοί κιβωτιοειδούς διατομής εσωτερικά προεντεταμένες με χαλύβδινους τένοντες αποτελούν τα τέσσερα κεντρικά ανοίγματα, ενώ στα δύο ακραία μήκους 20m έχουν τοποθετηθεί δοκοί εξωτερικά προεντεταμένες στη μια περίπτωση με χαλύβδινους τένοντες και στην άλλη με τένοντες από CFRP προκειμένου να γίνει συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων (Εικ. 141).



Εικόνα 4.1: Γενική άποψη της Γέφυρας Heiwei στην επαρχία Huai'an Jiangsu [παρ.141].



Εικόνα 4.2: Δοκοί με εξωτερική προένταση με χρήση τενόντων από CFRP στη Γέφυρα Heiwei στην επαρχία Huai'an Jiangsu [παρ.142].

4.2.1.1 Προένταση δοκών στη Γέφυρα Heiwei της με τένοντες από CFRP.

Στην αγορά διατίθενται δύο τύποι τενόντων από CFRP: το CFRP rod και το CFCC (Carbon Fibre Composite Cable). Στην περίπτωση της Γέφυρας Heiwei χρησιμοποιήθηκαν τένοντες τύπου CFCC, ωστόσο στα πλαίσια του σχεδιασμού και για λόγους σύγκρισης έγινε μελέτη και για προένταση με CFRP rod. Στον Πίνακα 4.1 δίνονται οι αντίστοιχες ιδιότητες των τενόντων.



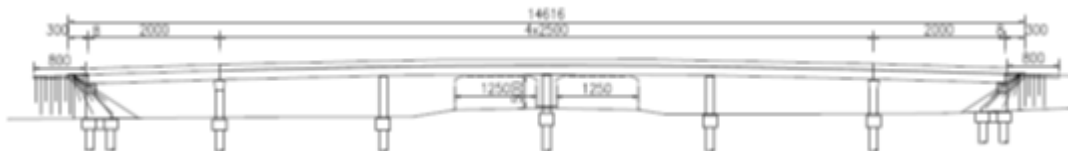
Εικόνα 4.3: Τύποι τενόντων CFRP [παρ.143].

Πίνακας 4.1: Ιδιότητες των τενόντων CFRP για τους οποίους έγιναν υπολογισμοί κατά το σχεδιασμό της Γέφυρας Heiwei [παρ.144].

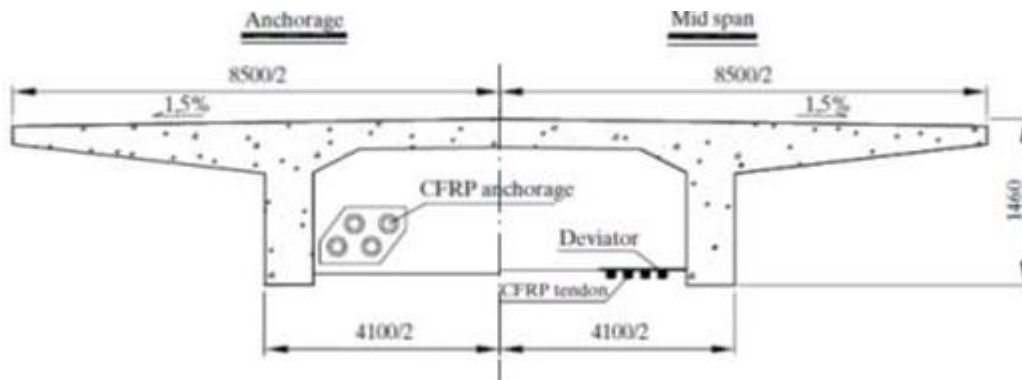
Parameters of CFCC and CFRP rod used as prestressing tendons								
Nominal Diameter (mm)	Effective Cross Section Area	Modulus of Elasticity (Gpa)	Nominal Mass Density (g/m ³)	Elongation (%)	Heat Resistance (°C)	Guaranteed Tensile Strength (MPa)	Fatigue Capacity/Guaranteed Capacity	
CFCC Rod	40	779.4	127	1508	1.6	130	1410	0.55
	10	69.4	120	115	1.5	120	1600	0.60
Coefficient of Friction		Relaxation Ratio (%)	Thermal Expansion Coefficient (×10 ⁻⁶)	Anchor Deformation and Tendon Contraction (mm)	Stress Limited Value/Guaranteed Tensile Strength			
μ (1/rad)	k (1/m)				During Construction		Service Limit State	
					During Prestressing	Immediately after Prestressing		
CFCC Rod	0.3	0	2.3	0.6	1	0.8	0.7	0.7
	0.3	0	3.0	0.7	8	0.8	0.7	0.6

Note: CFCC product is made in Japan, and CFRP rod is made in China.

Για τις εξωτερικά προεντεταμένες δοκούς με CFRP επιλέχθηκε διατομή διπλού T με τις εξής διαστάσεις: πλάτος 850cm, ύψος 146cm και πάχος κορμού 42cm όπως φαίνεται στα σχήματα που ακολουθούν (Εικ. 4.4 και 4.5).



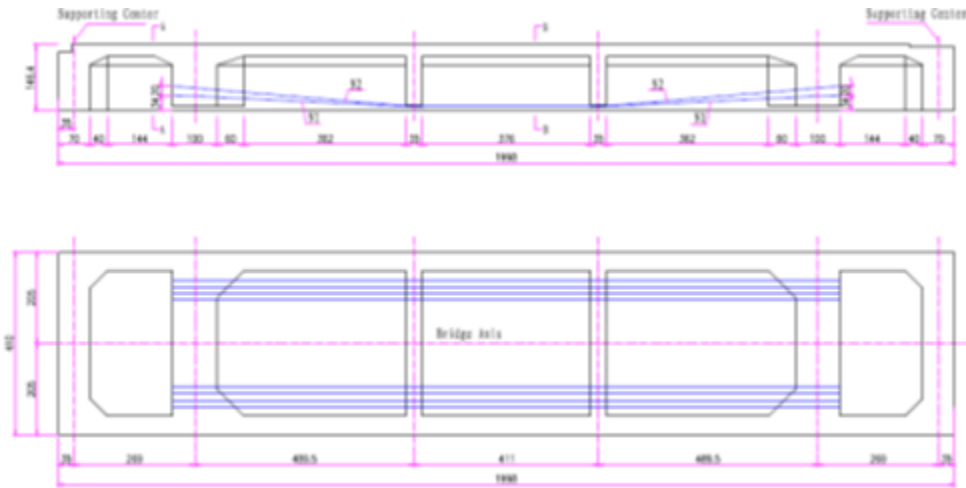
Εικόνα 4.4: Τομή του φορέα ανωδομής της Γέφυρας Heiwei [παρ.145].



Εικόνα 4.5: Διατομή δοκού του φορέα ανωδομής της Γέφυρας Heiwei [παρ.146].

Η επιλογή της διατομής των δοκών έγινε έτσι ώστε να διευκολύνεται ο περιοδικός έλεγχος των τενόντων κατά τη διάρκεια ζωής της γέφυρας καθώς και να εξασφαλίζεται η δυνατότητα μελλοντικής αντικατάστασής τους αν αυτό κριθεί αναγκαίο.

Οι δοκοί συνδέονται μεταξύ τους με συνολικά έξι διαδοκίδες. Οι τένοντες αγκυρώνονται στην δεύτερη και την πέμπτη διαδοκίδα ενώ κάμπτονται σε σώματα εκτροπής τοποθετημένα στη βάση των ενδιάμεσων διαδοκίδων. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη γωνία καμπυλότητας των τενόντων και τελικά σχεδιάστηκε ίση με $4,87^\circ$ (Ει. 4.6) [παρ.147] καθώς για τιμές $>5^\circ$ παρατηρείται σημαντική απομείωση της αντοχής του τένοντα από CFRP.

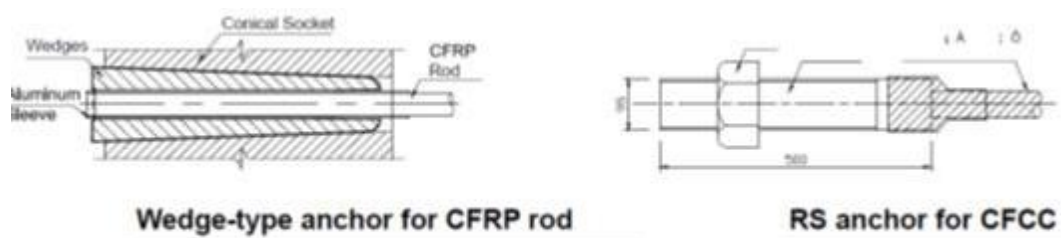


Εικόνα 4.6: Χάραξη τενόντων στη Γέφυρα Heiwei [παρ.148].

4.2.1.2 Αγκύρωση των τενόντων.

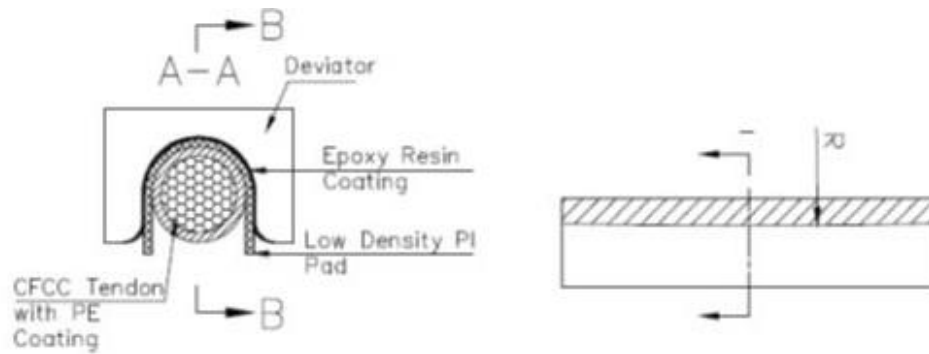
Για την αγκύρωση των CFRP rods σχεδιάστηκε από τους μελετητές το σύστημα αγκυρώσεως που απεικονίζεται στα παρακάτω σχήματα και είναι προσαρμοσμένο στις ιδιαίτερες ιδιότητες των CFRP τενόντων (Εικ. 4.7). Πρόκειται για μια multi-rod wedge anchor που αποτελείται από μια ανοξείδωτη μεταλλική κωνική θήκη και ανοξείδωτες μεταλλικές σφήνες. Ανάμεσα στις σφήνες και τον τένοντα τοποθετείται ένα περίβλημα από αλουμίνιο που εξασφαλίζει ότι ο τένοντας δεν θα τραυματισθεί κατά την επαφή του με τις σφήνες. Ακόμη το μήκος του σώματος της αγκύρωσης είναι μεγαλύτερο από αντίστοιχο για χαλύβδινους τένοντες ώστε να μειωθούν οι τάσεις στην εγκάρσια διεύθυνση. Τέλος η γωνία κλίσης των σφηνών είναι τέτοια που να εξασφαλίζει μια ομαλή κατανομή των ακτινικών τάσεων [παρ.149].

Για την αγκύρωση των CFCC cables χρησιμοποιήθηκε το σύστημα αγκυρώσεως της Tokyo Rope Co Ltd που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Εικ. 4.7).



Εικόνα 4.7: Σύστημα αγκύρωσης των τενόντων στη Γέφυρα Heiwei [παρ.150].

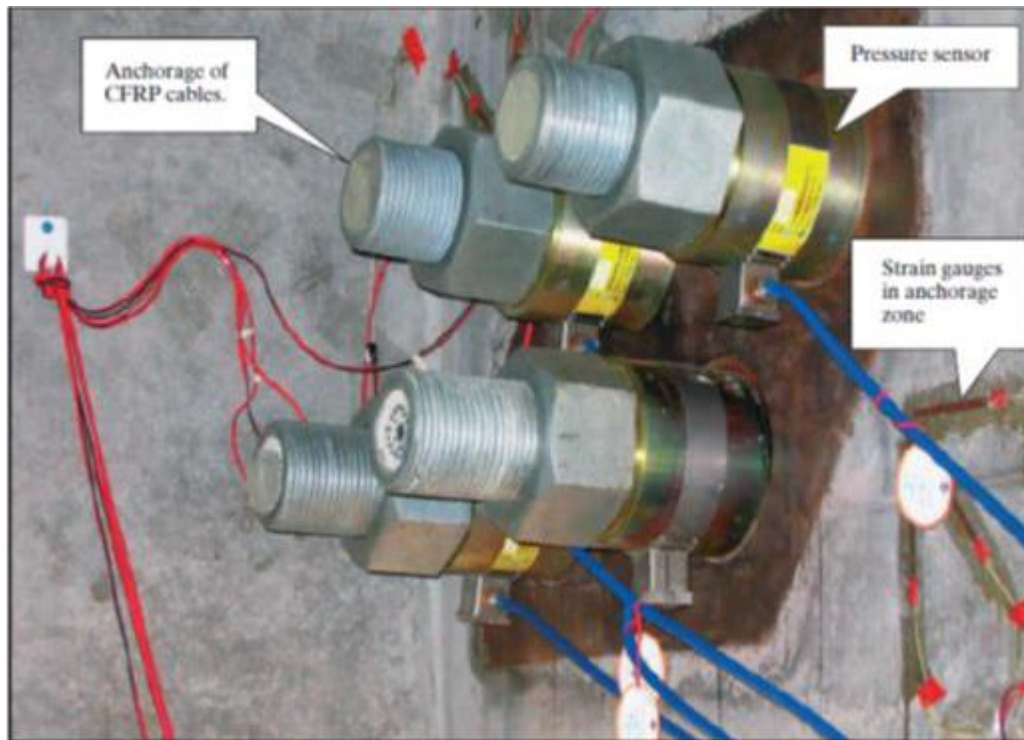
Επίσης ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στα σώματα εκτροπής (Εικ. 4.8) και για τον σχεδιασμό τους λήφθηκαν υπόψη παράγοντες όπως η γωνία καμπυλότητας των τενόντων, η τριβή καθώς και οι μικρομετακινήσεις του τένοντα υπό τα φορτία κυκλοφορίας ή την θερμοκρασία [παρ.151].



Deviator for CFCC tendon

Εικόνα 4.8: Σώματα εκτροπής των τενόντων στη Γέφυρα Heiwei [παρ.152].

Επιπλέον τοποθετήθηκαν αισθητήρες πίεσης και παραμόρφωσης στις δοκούς ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση παραμορφώσεων και τάσεων κατά τη διάρκεια ζωής της γέφυρας προκειμένου να διαπιστωθεί η σχέση των πραγματικών τιμών με τις αντίστοιχες τιμές σχεδιασμού.



Εικόνα 4.9: Θέσεις αισθητήρων στις κεφαλές αγκύρωσης των τενόντων στη Γέφυρα Heiwei [παρ.153].

4.2.1.3 Συμπεράσματα από την εφαρμογή.

- Η σωστή αγκύρωση των τενόντων είναι θεμελιώδους σημασίας. Η αγκύρωση τενόντων από FRP απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. Λόγω της ψαθυρής συμπεριφοράς του υλικού και της μικρής αντοχής του σε φόρτιση σε εγκάρσιο επίπεδο τα τυποποιημένα συστήματα αγκυρώσεως που χρησιμοποιούνται για τους χαλύβδινους τένοντες δεν καλύπτουν τις ανάγκες του σχεδιασμού στην περίπτωση των FRP. Έτσι το σύστημα

αγκύρωσης πρέπει να προσαρμόζεται στις ιδιότητες του εκάστοτε τένοντα κάθε φορά. Αυτό συνεπάγεται βέβαια σημαντική αύξηση του κόστους.

- Η τάση τάνυσης απαιτεί επίσης προσοχή λόγω του φαινομένου της ερπυστικής διάρρηξης. Οι τένοντες από χάλυβα τανύονται συνήθως στο 85% της τάσης διαρροής τους. Αντίθετα σύμφωνα με τις υπάρχουσες κανονιστικές διατάξεις για τα FRP το όριο της τάσης τάνυσης για τους τένοντες από FRP περιορίζεται στο 65-70% της αντοχής τους. Αυτό σημαίνει πως παρά τη σημαντικά μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή των τενόντων από FRP δεν μπορεί να γίνει παρά μόνο μερική εκμετάλλευσή της. Στην περίπτωση της Heiwei Bridge ακολουθήθηκαν τα όρια των κανονισμών και οι ως τώρα μετρήσεις δείχνουν πως δεν έχει παρατηρηθεί αξιόλογος ερπυσμός στους τένοντες ούτε αντίστοιχες παραμορφώσεις στη γέφυρα.
- Ένα σημείο που πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα είναι η σημασία του συντελεστή θερμικής διαστολής στον σχεδιασμό με τένοντες από FRP. Η επιρροή της θερμοκρασίας συνήθως δεν λαμβάνεται υπόψη στην προένταση με χάλυβα καθώς ο συντελεστής θερμικής διαστολής (σ.θ.δ.) του είναι ίσος με $11E-6$ και του σκυροδέματος $10E-6$. Αντίθετα για τους τένοντες από FRP ο σ.θ.δ είναι περίπου ίσος με $0,6E-6$ και αυτή η απόκλιση δημιουργεί τάσεις (με αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει η τάση προεντάσεως με μείωση μειώνεται αντίστοιχα). Αυτή η μείωση υπολογίστηκε κατά τον σχεδιασμό περίπου 5% της αρχικής τάσης προεντάσεως και ως εκ τούτου δεν μπορεί να αμεληθεί.
- Ακόμη δόθηκε προσοχή στην τοποθέτηση των εξωτερικών τενόντων προκειμένου να προστατευθούν από την ηλιακή ακτινοβολία και να αποκλεισθεί ενδεχόμενη έκθεσή τους σε πυρκαγιά.
- Οι απώλειες και οι μειώσεις προεντάσεως είναι ένα πεδίο που απαιτεί επιπλέον έρευνα. Στην περίπτωση της Heiwei Bridge οι άμεσες απώλειες στην αγκύρωση υπολογίστηκαν όπως οι αντίστοιχες για τον χάλυβα αλλάζοντας απλά τις τιμές κάποιων παραμέτρων όπως ο συντελεστής τριβής. Όμοια και οι απώλειες λόγω ερπυσμού και βράχυνσης του σκυροδέματος υπολογίστηκαν όπως για χαλύβδινους τένοντες απλά λαμβάνοντας υπόψη το μέτρο ελαστικότητας του CFRP.

Τέλος συνυπολογίστηκε και η επιρροή της θερμοκρασίας.

Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 4.2) απεικονίζει τα συγκριτικά αποτελέσματα των δύο ακραίων ανοιγμάτων της γέφυρας.

Πίνακας 4.2: Συγκριτικά αποτελέσματα για την προένταση με τένοντες από χάλυβα και CFRP στη Γέφυρα Heiwei [παρ.155].

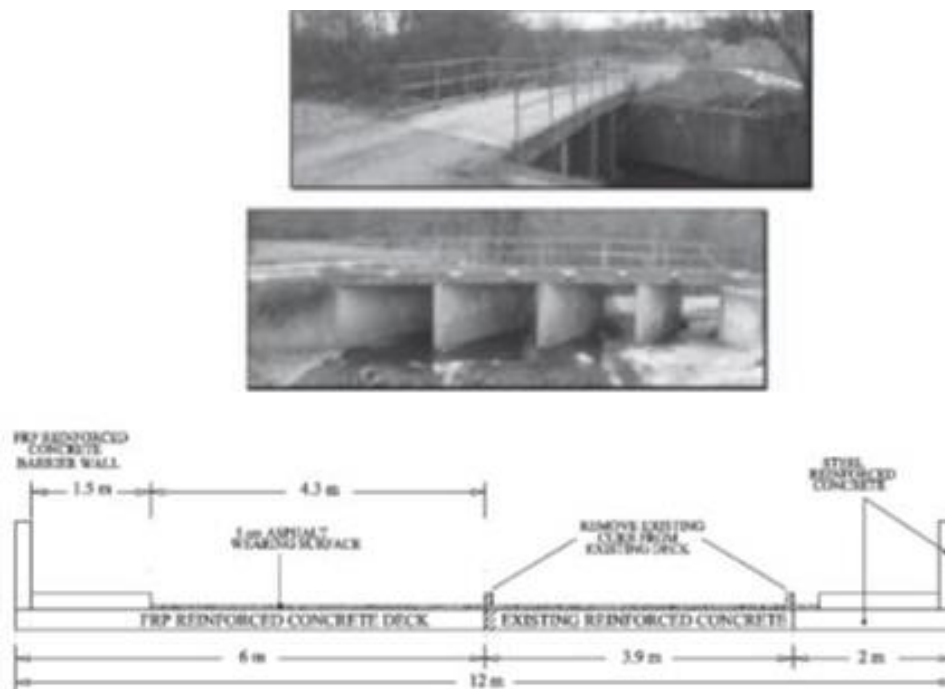
Comparison of material quantities for the side span superstructures							
Design Proposal	Cross-Section	Concrete [m ³]	Steel Bars [kg]	Steel Strand [kg]	CFCC Φ40mm [m]	CFRP Rod Φ10mm [m]	Cost(€)
Ordinary Prestressed	Box-shaped	106.4	24714	2904			350705
CFCC	Double-T	78.9	25800		160.6		1004653
CFRP Rod		78.9	26813			2275.5	581337

Παρατηρούμε ότι για προένταση με FRP χρησιμοποιήθηκε συνολικά 10% λιγότερο σκυρόδεμα, 42% λιγότερος χάλυβας ωστόσο το συνολικό κόστος στην περίπτωση του CFRP τένοντα είναι σημαντικά υψηλότερο κυρίως λόγω του πολύ υψηλού κόστους του τένοντα και της αγκύρωσής του [παρ.156].

Έτσι λοιπόν η υψηλή ανθεκτικότητα και αντοχή των FRP καθώς και το μικρό ειδικό βάρος και το μικρό ποσοστό χαλάρωσης είναι παράγοντες που προσελκύουν το ενδιαφέρον για τον σχεδιασμό προεντάσεως με FRP τένοντες. Ωστόσο ο σχεδιασμός αποδοτικών συστημάτων αγκύρωσης και η μείωση του κόστους των υλικών αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την ευρύτερη χρήση των FRP τενόντων [παρ.157].

4.2.2 Γέφυρα FICO et al. στην πόλη Rolla.

Πρόκειται για μια γέφυρα η οποία κατασκευάστηκε το 2004 προκειμένου να μελετηθεί η χρησιμοποίηση των ράβδων οπλισμού και των τενόντων από FRP σε κατασκευές από σκυρόδεμα. Αποτελείται από μια συνεχή πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος συνολικού μήκους 12m, πλάτους 6m και πάχους 0.25m η οποία στηρίζεται σε τρία τοιχεία από σκυρόδεμα τοποθετημένα ενδιάμεσα στο άνοιγμα της γέφυρας (Εικ. 4.10).



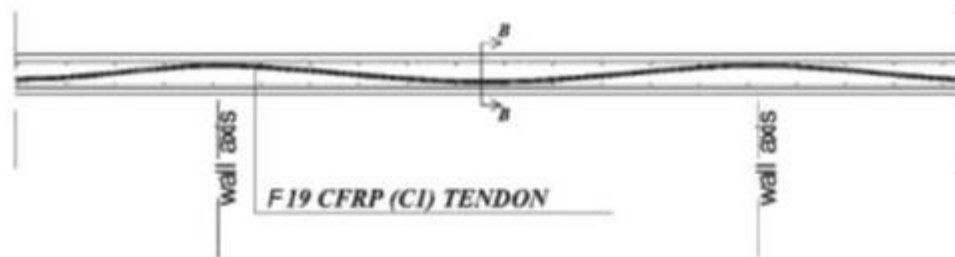
Εικόνα 4.10: Γέφυρα FICO et al. στην πόλη Rolla [παρ.158].

Για τις ιδιότητες των ράβδων και των τενόντων FRP χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που δόθηκαν από τον κατασκευαστή. Για την δημιουργία των φορτίσεων σχεδιασμού ακολουθήθηκε ο AASHTO και για τον υπολογισμό του οπλισμού ο ACI 440.1R-03.

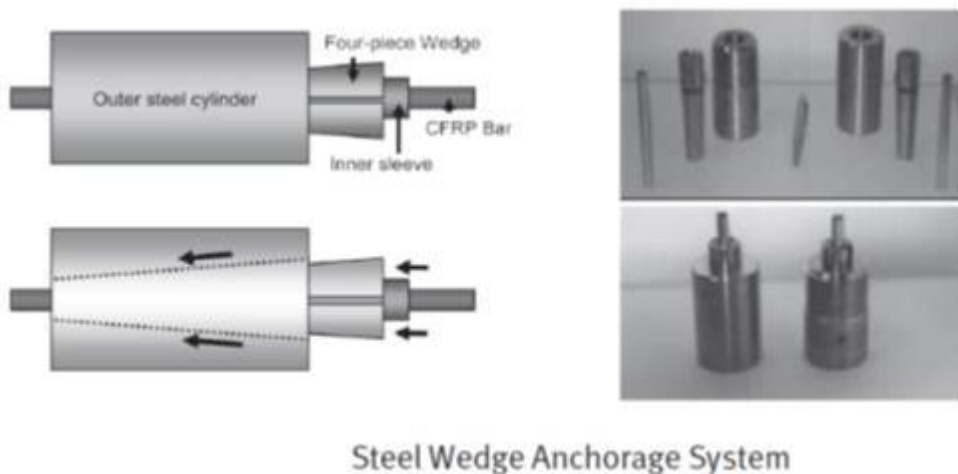
4.2.2.1 Κατασκευαστικά θέματα.

Ως οπλισμός κάμψης και διάτμησης χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι GFRP. Για την προένταση της πλάκας σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν CFRP τένοντες οι οποίοι τοποθετήθηκαν

εσωτερικά κατά μήκος της πλάκας . Η τάνση των τενόντων έγινε μια βδομάδα μετά την σκλήρυνση του σκυροδέματος. Για την αγκύρωση χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα που σχεδιάστηκε στο Πανεπιστήμιο του Waterloo στον Καναδά και περιλαμβάνει μια θήκη από χάλυβα, τέσσερις σφήνες και ένα περίβλημα που τοποθετείται ανάμεσα στους τένοντες και τις σφήνες. Το περίβλημα αυτό είναι από χαλκό ώστε να μπορεί να παραλάβει παραμορφώσεις . Τέλος τοποθετήθηκαν αισθητήρες παραμόρφωσης για να παρακολουθείται η συμπεριφορά της πλάκας κατά τη φάση λειτουργίας της γέφυρας.



Εικόνα 4.11: Χάραξη τενόντων στη Γέφυρα FICO et al. [παρ.159].



Steel Wedge Anchorage System

Εικόνα 4.12: Σύστημα αγκύρωσης τενόντων στη Γέφυρα FICO et al. [παρ.160].

4.2.2.2 Συμπεράσματα από την εφαρμογή .

- Λόγω της προέντασης αυξήθηκε η διατμητική αντοχή της πλάκας πάνω από 70% και ικανοποιούνται όλα τα κριτήρια λειτουργικότητας.
- Η προσέγγιση του ACI440.1R-03 για τον προσδιορισμό της αντοχής διάτμησης είναι αρκετά συντηρητική.
- Η διαδικασία κατασκευής και οι λεπτομέρειες όπλισης όταν χρησιμοποιείται όπλισμός από FRP σε μια πλάκα σκυροδέματος μοιάζουν αρκετά με τις αντίστοιχες για συνήθη όπλισμό από χάλυβα.

4.3 ΟΙ ΠΡΩΤΕΣ ΠΙΛΟΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΜΕ ΟΠΛΙΣΜΟ FRP.

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιήθηκαν ευρέως ως ενίσχυση σε υπάρχουσες γέφυρες και ως οπλισμός σε νέες, στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, την Ιαπωνία και κάποιες Ευρωπαϊκές χώρες. Οι πρώτες γέφυρες που κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας FRP και είχαν το χαρακτήρα πιλοτικών έργων ήταν, λόγω της φύσης της κατασκευής, πεζογέφυρες. Η πρώτη πεζογέφυρα από FRP χτίστηκε στο Ισραήλ το 1975. Η πρώτη οδογέφυρα, στους τένοντες της οποίας χρησιμοποιήθηκαν σύνθετα υλικά οπλισμού, χτίστηκε στη Γερμανία το 1986. Το πρώτο κατάστρωμα γέφυρας οπλισμένο εξ ολοκλήρου από σύνθετα υλικά κατασκευάστηκε στην Κίνα. Η πρώτη πεζογέφυρα εξ ολοκλήρου οπλισμένη από σύνθετα υλικά κατασκευάστηκε το 1992 στο Aberfeldy της Σκωτίας. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, το πρώτο κατάστρωμα γέφυρας, με οπλισμό FRP κατασκευάστηκε το 1996 στο McKinleyville, και ακολούθησε η εξ ολοκλήρου από σύνθετα υλικά κατασκευή της πρώτης οδογέφυρας, (the No-Name Creek Bridge) το 1996, στο Russell του Κάνσας [παρ.162].

(α) Βόρεια Αμερική

Στη Βόρεια Αμερική, οι σημαντικές αυξομειώσεις της θερμοκρασίας, οι κύκλοι πήξης και τήξης, οι κύκλοι υγρασίας και ξηρασίας, τα χημικά προϊόντα που χρησιμοποιούνται ενάντια στον πάγο καθώς επίσης και η χρήση αλατιού για προστασία από το χιόνι, επιδεινώνουν το φαινόμενο της διάβρωσης σε χώρους στάθμευσης και σε καταστρώματα γεφυρών. Στις Ηνωμένες Πολιτείες υπάρχουν περίπου 560.000-600.000 οδογέφυρες [παρ.163]. Ένα ποσοστό, γύρω στο 40% των γεφυρών αυτών, απαιτεί επισκευή λόγω κατασκευαστικών βλαβών. Πολυάριθμες πεζογέφυρες από σύνθετα υλικά κατασκευάστηκαν σε πολιτείες της Αμερικής και σε απομακρυσμένες περιοχές, όπου δεν ήταν δυνατό να μεταφερθεί βαρύς κατασκευαστικός εξοπλισμός ή για να συνδέσουν περιοχές εκατέρωθεν αυτοκινητοδρόμων και σιδηροδρόμων, με αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους μεταφοράς.

Η πρώτη σύνθετη οδογέφυρα, που κατασκευάστηκε στις ΗΠΑ δόθηκε στην κυκλοφορία στα τέλη του 1996 στο Russell του Kansas. Από τότε και άλλες υποδειγματικές μελέτες, στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές γεωμετρικές παραλλαγές των σύνθετων συστημάτων καταστρωμάτων από GFRP, κατασκευάστηκαν σε πολιτείες όπως η Δυτική Virginia, το Delaware, το Ohio, το Idaho, το Maryland και η Νέα Υόρκη [παρ.164].

Η γέφυρα Morristown, η οποία βρίσκεται στο Vermont των Ηνωμένων Πολιτειών, είναι γέφυρα μονού ανοίγματος με χαλύβδινες δοκούς, με απόσταση των βάθρων της ίση με 43.90m (Εικ. 4.13). Το κατάστρωμα αποτελείται από μία συμπαγή συνεχή πλάκα από σκυρόδεμα, η οποία οπλίσθηκε με ράβδους FRP από ίνες γυαλιού (GFRP), σε δύο ανεξάρτητα στρώματα στο επάνω και κάτω τμήμα της. Σε κρίσιμες περιοχές της γέφυρας τοποθετήθηκαν αισθητήρες οπτικών ινών για την παρακολούθηση της μηχανικής συμπεριφοράς της. Το κατάστρωμα της γέφυρας αυτής αποτελεί το πρώτο κατάστρωμα στον κόσμο του μεγέθους και της κατηγορίας του, που είναι εξ' ολοκλήρου οπλισμένο με ράβδους GFRP [παρ.165].



Εικόνα 4.13: Γέφυρα Morrystown στο Vermont των Ηνωμένων Πολιτειών [παρ.165].

Μία άλλη γέφυρα στις Ηνωμένες Πολιτείες, με κατάστρωμα από σκυρόδεμα, που έχει οπλισθεί με FRP, είναι στην πόλη Waurun του Wisconsin (Εικ. 4.14). Η γέφυρα αυτή βρίσκεται στον αυτοκινητόδρομο 151 των Η.Π.Α., που έχει μία μέση ημερήσια κυκλοφορία 18.600 οχημάτων. Είναι μία γέφυρα δύο ανοιγμάτων, μήκους 32.7m το καθένα, και με δύο λωρίδες κυκλοφορίας. Το κατάστρωμα της γέφυρας είναι πλάτους 12.75m και στηρίζεται σε πέντε προεντεταμένες δοκούς των 1.37m από σκυρόδεμα, με μεταξύ τους απόσταση 2.65m. Πρόκειται για τον πρώτο συνδυασμό αυτών των υλικών με ένα διπλής κατεύθυνσης πλέγμα οπλισμού από FRP, επιλεγμένο ώστε να μειώνεται το κόστος κατασκευής. Επιπλέον, αυτή είναι η πρώτη εφαρμογή όπου χρησιμοποιήθηκαν προεντεταμένες δοκοί και όπου απαιτήθηκε «σύνθετη δράση» μεταξύ του καταστρώματος και των δοκών .



Εικόνα 4.14: Γέφυρα στην πόλη Waurun του Wisconsin [παρ.166].

Η αρχική γέφυρα Sierrita de la Cruz Creek στο Potter County του Texas , αντικαταστάθηκε διότι κρίθηκε κατασκευαστικά ανεπαρκής και λειτουργικά απαρχαιωμένη. Η νέα γέφυρα που κατασκευάστηκε από FRP, έχει μήκος 168.6m και κατάστρωμα που αποτελείται από 7 ανοίγματα με μεταξύ τους απόσταση 24.1m.

Η γέφυρα δύο ανοιγμάτων Stormwater Cannel στο Salton Sea , με μήκος 20m και πλάτος 13m, δόθηκε στην κυκλοφορία το 2001. Η γέφυρα αυτή αποτελείται από κατάστρωμα με οπλισμό FRP και δοκούς υποστηριζόμενες από ένα βάθρο με οπλισμό από χάλυβα. Το σύστημα του καταστρώματος κατασκευάστηκε από πλαίσια με ίνες από γυαλί και οι δοκοί στήριξης από ίνες άνθρακα. Αυτή η πειραματική οδογέφυρα εξυπηρετεί την κυκλοφορία (συμπεριλαμβανομένων και βαρέων οχημάτων) από το Μεξικό προς τις Ηνωμένες Πολιτείες.



Εικόνα 4.15: Η αρχική γέφυρα Sierrita de la Cruz Creek στο Potter County του Texas [παρ.167].



Εικόνα 4.16: Η γέφυρα δύο ανοιγμάτων Stormwater Cannel στο Salton Sea [παρ.168].

Τον Οκτώβριο του 2001, η γέφυρα Dickey Creek στη λεωφόρο 601 στο Sugar Grove, δόθηκε επίσημα στην κυκλοφορία. Το μήκος της είναι 11.5 m και σε αυτή χρησιμοποιήθηκαν CFRP στα πλέγματα, ώστε να είναι οι δοκοί πιο οικονομικές.

Η γέφυρα Val-Alain, η οποία διασχίζει τον ποταμό Henri στο Κεμπέκ του Καναδά, είναι τύπου πλάκας σε δοκούς, με λοξό άνοιγμα 20 μοιρών πάνω από ένα μεμονωμένο άνοιγμα μήκους 48.89m και συνολικού πλάτους ίσο με 12.57m. Η πλάκα από σκυρόδεμα στο κατάστρωμα και τα προστατευτικά της γέφυρας, οπλίστηκαν με ράβδους GFRP. Η χρήση τέτοιου μη μεταλλικού οπλισμού, σε συνδυασμό με σκυρόδεμα υψηλής απόδοσης, παρέχει μία αναμενόμενη ζωή λειτουργίας μεγαλύτερη των 75 ετών. Στον Καναδά, άλλες γέφυρες σκυροδέματος, με οπλισμό FRP, κατασκευάστηκαν στο δήμο Sherbrook και στο δήμο Wotton (γέφυρα Wotton).

Joffre Bridge

Sherbrooke, QC

Reconstructed 1997

Deck replaced

FRP rebars used



ISIS Canada Educational Module 5

Εικόνα 4.17: Γέφυρα Joffre [παρ.169].**(β) Ιαπωνία**

Η Ιαπωνία είναι η πρώτη χώρα στον κόσμο σε αριθμό πρακτικών εφαρμογών και σε χρήση των FRP ως οπλισμού σκυροδέματος [παρ.170]. Από τα τέλη της δεκαετίας του 1980, ο ρυθμός χρήσης των FRP ως οπλισμός σκυροδέματος ήταν σταθερά αυξανόμενος. Ειδικά, μετά τα τέλη της δεκαετίας του 1990, τα φύλλα FRP εφαρμόστηκαν σε πολλές κατασκευές, για τη βελτίωση της αντισεισμικής τους συμπεριφοράς και της ανθεκτικότητάς τους στο χρόνο. Ο μεγάλος σεισμός Hanshin ήταν το κίνητρο για αυτές τις εργασίες.

Στη Ιαπωνία, η εφαρμογή των ράβδων οπλισμού σκυροδέματος από FRP στην πράξη άρχισε από το 1987. Ο συνολικός αριθμός εφαρμογών μέχρι σήμερα, ανέρχεται περίπου στις 180, ενώ το συνολικό μήκος των χρησιμοποιούμενων ράβδων FRP ανέρχεται στα 900.000m. Ο αριθμός των εφαρμογών μειώνεται σταθερά από το 1996, παρόλα αυτά, ο όγκος των χρησιμοποιούμενων συνθέτων υλικών δε μειώθηκε ιδιαίτερα.

Στην Ιαπωνία, η πρώτη πεζογέφυρα από FRP κατασκευάστηκε στην Okinawa το 2000, με μήκος ανοιγμάτων 19.7 και 17.2m (Εικ. 4.18). Η Okinawa είναι μία περιοχή, όπου οι κατασκευές υφίστανται την σοβαρότερη διάβρωση, λόγω του υφάλμυρου περιβάλλοντος. Η τοπική αυτοδιοίκηση κατασκεύασε παραθαλάσσιους χώρους ψυχαγωγίας κατά μήκος του αγροτικού δρόμου Ikei-Tairagawa, κατασκευασμένου σε αβαθή νερά ανάμεσα στα νησιά Okinawa Main και Henza. Η γέφυρα αυτή επιτρέπει στους επισκέπτες να διασχίζουν με ασφάλεια τον δρόμο. Το περιβάλλον είναι έντονα διαβρωτικό, αφού το νησί Okinawa Main βρίσκεται στο πέραςμα τυφώνων και επιπλέον ο δρόμος περιβάλλεται από θάλασσα. Γι' αυτό το λόγο είναι απαραίτητο να λαμβάνονται μέτρα ενάντια στη φθορά λόγω αλατιού στις κατασκευές από σκυρόδεμα και χάλυβα στην περιοχή της Okinawa. Προκειμένου να αποφευχθεί μεγάλη φθορά της γέφυρας λόγω του αλατιού, επιλέχθηκαν ως κύρια

κατασκευαστικά υλικά τα FRP. Η κατασκευή πεζογέφυρας με οπλισμό από GFRP είναι μία κατασκευαστική επιλογή η οποία δεν απαιτεί τέτοια μέτρα.



Εικόνα 4.18: Πεζογέφυρα Okinawa [παρ.171].

(γ) Ευρώπη

Η πρώτη γέφυρα, η οποία ενισχύθηκε από FRP ήταν η γέφυρα Ibach στη Lucerne της Ελβετίας (Εικ. 4.19). Το μεσαίο άνοιγμα μήκους 39m της δοκού με κιβωτοειδή διατομή, είχε καταστραφεί. Το άνοιγμα είχε πλάτος 16 m και είχε ένα μέσο διαμήκη κορμό. Η ζημιά προέκυψε από το χωρισμό ενός προεντεταμένου τένοντα στο εξωτερικό πλέγμα. Η επισκευή περιέλαβε την εφαρμογή φύλλων FRP από άνθρακα πάχους 2mm και πλάτους 150mm το καθένα. Η επισκευή ήταν επιτυχής και συνέβαλε, ενδεχομένως, στην περαιτέρω χρήση των FRP από άνθρακα για επισκευή γεφυρών.

Η γέφυρα Nossa Senhora da Guia στο Ponte de Lima της Πορτογαλίας ενισχύθηκε με FRP από άνθρακα (Εικ. 4.20). Η οδογέφυρα από οπλισμένο σκυρόδεμα, με δοκό διπλής κιβωτοειδούς διατομής, αποτελείται από ανοίγματα των 50m. Ένα λάθος στο σχεδιασμό οδήγησε στην ανεπάρκεια του καμπτικού οπλισμού, που είχε ως αποτέλεσμα τη διαμήκη ρηγμάτωση της άνω πλάκας. Χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα προέντασης προκειμένου να αναπτυχθεί αρνητική ροπή στη γέφυρα, έτσι ώστε να κλείσουν οι ρωγμές. Κατόπιν, τοποθετήθηκαν ελάσματα FRP στο κατώτατο σημείο της πλάκας. Η εφαρμογή της προέντασης διατηρήθηκε για αρκετές μέρες, κατά τις οποίες η εποξική ρητίνη «διόρθωνε» τις ζημιές (2001).



Εικόνα 4.19: Γέφυρα Ibach στη Lucerne της Ελβετίας [παρ.172].



Εικόνα 4.20: Γέφυρα Nossa Senhora da Guia στο Ponte de Lima της Πορτογαλίας [παρ.173].

Η γέφυρα Pontresina συνδέει τις όχθες του ποταμού Flaz στην Pontresina, η οποία βρίσκεται στις Ελβετικές Άλπεις, σε υψόμετρο 1790m (Εικ. 4.21). Η γέφυρα έχει προσωρινό χαρακτήρα, αφού χρησιμοποιείται κυρίως κατά τη διάρκεια του χειμώνα εξυπηρετώντας το χειμερινό τουρισμό. Απαιτείται απομάκρυνσή της κατά την άνοιξη, λόγω της υψηλής στάθμης του νερού του ποταμού και επανεγκατάστασή της το φθινόπωρο. Με ημερομηνία κατασκευής το 1997, είχε εγκατασταθεί και απομακρυνθεί 8 φορές μέχρι το καλοκαίρι του 2005. Όλα τα κατασκευαστικά μέρη τη γέφυρας αποτελούνται από GFRP.



Εικόνα 4.21: Γέφυρα Pontresina [παρ.174].

4.4 ΓΕΦΥΡΕΣ ΜΕ ΦΟΡΕΑ ΑΠΟ FRP.

Ένα άλλο πεδίο εφαρμογής των FRP στην γεφυροποιία, πέρα από τη χρήση τους ως τένοντες προεντάσεως σε δοκούς σκυροδέματος, είναι η κατασκευή των ίδιων των δοκών εξ' ολοκλήρου από FRP. Για σχετικά μικρά ανοίγματα 20-50m ίσως στο μέλλον μπορεί να αποτελέσει μια ανταγωνιστική λύση.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι η ανθεκτικότητά των δοκών από FRP σε διάβρωση με συνεπαγόμενη μείωση του κόστους συντήρησης κατά τη διάρκεια ζωής της γέφυρας. Επίσης το μικρό ίδιο βάρος τους καθώς και η δυνατότητα προκατασκευής τους σε μεγάλο βαθμό διευκολύνει σημαντικά τις διαδικασίες μεταφοράς και τοποθέτησής τους μειώνοντας έτσι τον συνολικό χρόνο κατασκευής και τα αντίστοιχα κόστη. Μάλιστα σε οδικές γέφυρες η συντομότερη αποκατάσταση της κυκλοφορίας είναι ιδιαίτερος σημαντική. Ακόμη σε περίπτωση σεισμικής φόρτισης οι δυνάμεις αδρανείας μειώνονται (λόγω του μικρού ίδιου βάρους) επίσης μειώνονται τα φορτία που καλείται να παραλάβει η θεμελίωση.

Κάποια παραδείγματα τέτοιων γεφυρών είναι τα εξής: γέφυρα Asturias (2004, Εικ. 4.22), γέφυρες M111 (2007, Εικ. 4.23), πεζογέφυρα Canary Islands (2010, Εικ. 4.24), πεζογέφυρα Almunecar (2010, Εικ. 4.25), πεζογέφυρα Cuenca (2011, Εικ. 4.26) [παρ.175]. Πρόκειται για γέφυρες που κατασκευάστηκαν στην Ισπανία τα τελευταία χρόνια. Τα συμπεράσματα από αυτές τις εφαρμογές είναι τα εξής: με βάση κριτήρια οικονομικότητας είναι προτιμότερη η χρήση ανοιχτών διατομών δοκών αντί για κλειστές ώστε μετά την κατασκευή να αφαιρεθούν τα καλούπια, επίσης για την κατασκευή των δοκών είναι προτιμότερη η ανάμιξη ινών γυαλιού και άνθρακα καθώς έτσι μπορούν να παραχθούν πιο φθηνά διατομές με σχεδόν τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες με εκείνες που προκύπτουν όταν χρησιμοποιούνται ίνες εξ' ολοκλήρου από άνθρακα. Τέλος προτιμάται ως μέθοδος παραγωγής προτιμάται η μέθοδος εμποτισμού ρητίνης.



(a)



(b)

(a) View of the FRP girders of the Asturias bridge; (b) Positioning of one of the FRP girders during the construction phase.

Εικόνα 4.22: Γέφυρα Asturias [παρ.176].



(a)



(b)

(a) View of the deck soffit of one the M111 bridges; (b) Positioning of one of the girder.

Εικόνα 4.23: Γέφυρες M111 [παρ.177].



(a)



(b)



(c)

(a) Transportation of the FRP girder of the Canary Island footbridge; (b)(c) Two phases of the manufacturing of the FRP girder by resin infusion.

Εικόνα 4.24: Πεζογέφυρα Canary Islands [παρ.178].



(a) View of the Almuñecar footbridge; (b) Installation of the FRP girder.

Εικόνα 4.25: Πεζογέφυρα Almunecar [παρ.179].



(a) View of the Cuenca footbridge; (b) View of the footbridge just after the FRP cable launching

Εικόνα 4.26: Πεζογέφυρα Cuenca [παρ.190].

Ακόμη τα FRP έχουν βρει εφαρμογή και στη δημιουργία πεζογεφυρών. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν η γέφυρα Fiber Line στην Δανία ,η γέφυρα Lleida στην Ισπανία ,η All-FRP γέφυρα Pontresina, η τοξωτή πεζογέφυρα ArATeCH στη Ρωσία (Εικ. 4.27, 4.28) και άλλες.



Εικόνα 4.27: Η τοξωτή πεζογέφυρα ArATeCH [παρ.191].



Εικόνα 4.28: Φάσεις κατασκευής της τοξωτής πεζογέφυρα ArATeCH [παρ.192].

Επιπλέον τα FRP δεν είναι αγωγοί της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, χαρακτηριστικό που τα καθιστά ιδιαίτερα δημοφιλή σε έργα σύγχρονων σιδηροδρομικών κατασκευών (Εικ. 4.29) αλλά και σε άλλες εφαρμογές όπου ο θόρυβος στη μετάδοση σήματος είναι κρίσιμος, για παράδειγμα στις τηλεπικοινωνίες στους σταθμούς μετάδοσης και λήψης. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κατασκευές που βρίσκονται κοντά στο πεδίο εκπομπής έντονης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας όπως γέφυρες κοντά σε σιδηροδρόμους ή εργοστάσια [παρ.193].



Εικόνα 4.29: Χρήση των FRP σε σύγχρονα σιδηροδρομικά έργα [παρ.194].

Τέλος τα FRP συχνά χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του καταστρώματος των γεφυρών ή για τοπική ενίσχυση σε σημεία που έχουν υποστεί διάβρωση και μείωση της αντοχής.

4.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ

Από τα στοιχεία της σχετικής βιβλιογραφίας μέχρι το έτος 2005, ένας σχετικά μεγάλος αριθμός καταστρωμάτων από FRP βρίσκονται ήδη σε λειτουργία, και διάφορα άλλα ήταν

προγραμματισμένο να εγκατασταθούν στο αμέσως επόμενο διάστημα. Ωστόσο, υπάρχει η ανάγκη να αποσαφηνιστούν και να διερευνηθούν τα παρακάτω: η ανάπτυξη προτύπων σχεδιασμού και οδηγιών, η συμπεριφορά των πλαισίων και των συνδέσεων στην κόπωση, τα χαρακτηριστικά αντοχής κάτω από τη δράση μηχανικών και περιβαλλοντικών φορτίων, οι μηχανισμοί αστοχίας και η οριακή αντοχή, συμπεριλαμβανομένων τοπικών και παγκόσμιων μοντέλων κάμψης και η αποδοτικότητα και η αντοχή των επιστρώσεων. Μετά από τέσσερα χρόνια ερευνών από το ISIS CANADA είναι πλέον αποδεδειγμένο ότι τα νέα FRP είναι πολύ πιο ανθεκτικά σε συνθήκες πυρκαγιάς από ότι στο παρελθόν [παρ.195]. Επιπρόσθετα, η κατάλληλη τοποθέτηση των διαπιστωμένα ασφαλών κιγκλιδωμάτων παραμένει ένα ανοιχτό θέμα, εάν λάβουμε υπόψη μας την ποικιλία των μορφών των καταστροφών. Αναμένεται ότι με τη μελλοντική έρευνα, η αξιοπιστία των ράβδων GFRP ως οπλισμός σε καταστώματα γεφυρών από σκυρόδεμα θα ελεγχθεί, οδηγώντας σε ανακούφιση της κατασκευής, βελτίωση της ανθεκτικότητας των καταστροφών, και μείωση των δαπανών συντήρησής τους.

Το καθεστώς της βιομηχανίας των καταστροφών γεφυρών από FRP δεν είναι διαφορετικό από εκείνο που αντιμετώπισαν οι προγενέστερες βιομηχανίες, όπως αυτή του χάλυβα και του σκυροδέματος, με συνέπεια την είσοδο νέων υλικών σε μία καλά οχυρωμένη αγορά. Ίσως τα μελλοντικά καταστώματα από FRP, να εξελιχθούν έτσι ώστε να εκμεταλλεύονται περισσότερο τις ιδιότητες και τις μεθόδους κατασκευής των υλικών τους, ως αποτέλεσμα της εμπειρίας και της ευχέρειας που θα υπάρχει με την παραγωγή τέτοιων υλικών.

Το κόστος των ράβδων GFRP αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα αναφορικά με τη χρήση τους. Το 2002, η Υπηρεσία Μεταφορών του Vermont (VTtrans) διενήργησε μία συγκριτική ανάλυση κόστους μεταξύ του GFRP και του επενδυμένου με εποξική ρητίνη χαλύβδινου οπλισμού στη γέφυρα Morristown. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής έδειξαν ότι η χρήση ράβδων GFRP κόστισε 50.000 δολάρια (Ηνωμένες Πολιτείες), περισσότερο από το κόστος της χρήσης χαλύβδινου οπλισμού επενδυμένου με εποξική ρητίνη. Όταν λάβουμε το κόστος του οπλισμού ως ποσοστό του συνολικού κόστους κατασκευής της γέφυρας (1,4 εκατ. δολάρια - Ηνωμένες Πολιτείες), θα διαπιστώσουμε πως η πραγματική αύξηση στο συνολικό κόστος κατασκευής είναι μόνο το 3.57% [παρ.196].

Η κατασκευή ενός καταστώματος γέφυρας οπλισμένου με υλικά FRP, αυτού της οδογέφυρας στο Waupun του Wisconsin των Ηνωμένων Πολιτειών, χρησιμοποιώντας συμβατική κατασκευαστική τεχνολογία και εργασία, πραγματοποιήθηκε με εξοικονόμηση της τάξης του 57% στις εργασίες κατασκευής συγκριτικά με την αντίστοιχη κατασκευή ενός καταστώματος με χαλύβδινο οπλισμό, ενώ το κόστος των υλικών ήταν κατά 60% μεγαλύτερο. Φαίνεται πως, δεδομένης της εξοικονόμησης χρόνου κατασκευής και των μακροπρόθεσμων ενδεχόμενων πλεονεκτημάτων, ο οπλισμός των καταστροφών γεφυρών με FRP, θα μπορούσε να διασφαλίζει εξοικονόμηση κόστους, παρόλα τα τωρινά αρχικά τους κόστη. Ταυτόχρονα, οι ράβδοι από GFRP είναι χαμηλότερου κόστους σε σύγκριση με τις άλλες διαθέσιμες μορφές ράβδων FRP (άνθρακα και αραμιδίου). Το υψηλότερο κόστος μπορεί να αποσβεσθεί κάτω από ορισμένες συνθήκες, ειδικότερα όταν απαιτείται πλήρης επανακατασκευή, λόγω της απουσίας μιας εναλλακτικής λύσης ελαφρύτερου καταστώματος. Απομένει να προσδιοριστεί εάν το υψηλό αρχικό κόστος των καταστροφών από FRP μπορεί να δικαιολογηθεί, λαμβάνοντας υπόψη και τους υπόλοιπους οικονομικούς παράγοντες που διέπουν μία κατασκευή. Επιπρόσθετα, η χρήση μεγαλύτερων προκατασκευασμένων πλεγμάτων από FRP προς αντικατάσταση των ράβδων FRP, μπορεί να οδηγήσει σε ακόμα μεγαλύτερη εξοικονόμηση εργασίας και χρόνου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η χρήση των Ινοπλισμένων Πολυμερών φαίνεται πως είναι η λύση στα προβλήματα που εμφανίζονται από τη χρήση χάλυβα. Παρ' όλα αυτά, όταν χρησιμοποιούνται σαν κύριος οπλισμός δομικών μελών σκυροδέματος υπάρχουν αρκετοί περιβαλλοντολογικοί περιορισμοί. Ανάλογα με τα υλικά των ινών και των μητρών που χρησιμοποιούνται, τα ινοπλισμένα πολυμερή σαν οπλισμός μπορούν να δημιουργήσουν πρόβλημα στην πρόβλεψη και στην αντιμετώπιση των αστοχιών.

Επιπλέον, απαιτείται προσοχή και στη διαστασιολόγηση. Λόγω του ότι τα στοιχεία με κύριο οπλισμό από ινοπλισμένα πολυμερή παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες στην αντιμετώπιση της κάμψης και της διάτμησης, χρησιμοποιείται διαφορετική φιλοσοφία στις θέσεις των ράβδων ώστε να αποτραπούν τυχών αστοχίες.

Όμως, μέσω της διαδικασίας διαστασιολόγησης του οπλισμού ενός δομικού στοιχείου σκυροδέματος, προκύπτουν διαφορές στους συντελεστές της συμβατικής διαδικασίας διαστασιολόγησης. Και αυτό γιατί τα FRP χαρακτηρίζονται από διαφορετικές ιδιότητες και συμπεριφορές σε σχέση με το συμβατικό οπλισμό από χάλυβα. Φαίνεται πως η χρήση αυτών δίνει τη δυνατότητα ενός πιο ελεύθερου υπολογισμού του οπλισμού, αρκεί να ληφθούν υπ' όψιν οι ιδιαιτερότητες και οι αστοχίες του κάθε είδους ινοπλισμένου πολυμερούς.

Πρακτικά, η εφαρμογή των FRP ξεκίνησε με την ενίσχυση των ήδη υπαρχουσών γεφυρών και μετά πέρασε στον εξ' ολοκλήρου οπλισμό των φορέων. Κατά τη διαδικασία αυτή, διαπιστώθηκε πως παρότι σαν υλικό είναι πολύ πιο ακριβό σε σχέση με το χάλυβα, αν η αξία του συμψηφιστεί με τη μείωση κόστους λόγω μικρότερης ποσότητας υλικών, λιγότερου χρόνου κατασκευής κ.ο.κ., τελικά η οικονομική διαφορά στο σύνολο είναι μικρή και υπάρχει πιθανότητα με τη μελλοντική έρευνα να μειωθεί περισσότερο .

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Εικόνα εξωφύλλου: Οπλισμός καταστρώματος γέφυρας στον αυτοκινητόδρομο I635 στο Kansas με ράβδους ΙΟΠ (http://aslanfrp.com/Resources/IMG_1963.jpg)
- [1-3] Courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf
- [4-15] sp guide to composites
- [16] lee.civil.ntua.gr/pdf/mathimata/eidika_themata/simeioseis/kefalaio6_sector1.pdf
- [17-20] ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΔΡΙΤΣΟΣ 'Επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών απο οπλισμένο σκυρόδεμα', ΠΑΤΡΑ 2005
- [25] Federation International du Beton, fib bulletin no 40 'FRP reinforcement in RC structures
- ACI 440.1R-06 'Οδηγός για το σχεδιασμό και την κατασκευή του Δομικού Σκυροδέματος ενισχυμένο με FRP Bars'
- [26-28] Federation International du Beton, fib bulletin no 40 'FRP reinforcement in RC structures
- [29-30] Federation International du Beton, fib bulletin no 40 'FRP reinforcement in RC structures
- [31-33] ACI 440.1R-06 'Οδηγός για το σχεδιασμό και την κατασκευή του Δομικού Σκυροδέματος ενισχυμένο με FRP Bars'
- [53] Isis Educational module 9 'Προεντεταμένες κατασκευές από σκυρόδεμα με πολυμερή ενισχυμένα με ίνες (Prestressing concrete structures with fibrereinforced polymers)
- [54-55] ACI 440.4R-04 Προεντεταμένες κατασκευές από σκυρόδεμα με τένοντες από FRP (Prestressing concrete structures with frp tendons).
- [89] K.-T. Lau 'Fibre-optic sensors and smart composites for concrete applications' Magazine of Concrete Research, 2003, 55, No. 1, February
- [90] Yanlei Wang, Qingduo Hao, Jinping Ou 'Experimental testing of a self-sensing FRP-concrete composite beam using FBG Sensors' Proc. of SPIE Vol. 7292 72923T-1
- [99-100] SP Guide to composites.
- [129,130] Yanlei wang, qingduo hao, jinping ou 'experimental testing of a self-sensing frp-concrete composite beam using fbg sensors' proc. of spie VOL. 7292 72923T-1
- [102-139] Μπαρος Δημήτριος <<χρήση ραβδών FRP ως μέσο όπλισης κατασκευών σκυροδέματος: διαδικασίες διαστασιολόγησης-σύγχρονες αντιλήψεις>>, Μεταπτ.εργασια Πανεπ.Πατρών.
- [145-147] Hanshan ding, rui zhang, yigui zhang, wenjun xia, jiang huang, Μια γέφυρα στην Κίνα προεντεταμένη εξωτερικά από κατασκευαστικές τεχνικές ενισχυμένες με ίνες άνθρακα κατασκευαστικές μηχανές (a bridge in china externally prestressed by carbon fiber reinforced polymer tendons' structural engineering international).
- [149-154] Huang Jian, Xia Wengjun, Zhang Yigui, Zhang Rui, Wang Peng and Ding Hanshan ' Χρήση εξωτερικού προεντεταμένου CFRP στη γέφυρα Hwei Στην Κίνα (Use Of External CFRP Prestressing In Hwei Bridge In China).
- [158-159] R. Fico, N. Galati, A. Prota, and A. Nanni 'Design and Construction of a Bridge Deck using Mild and Post-Tensioned FRP Bars.
- [176-191] Mauricio Areiza Hurtado Anurag Bansal Carlo Paulotto Stefano Primi 'FRP girder bridges: lessons learned in Spain in the last decade' CICE 2012
- [192] www.apatch.ru
- [194] Federation International du Beton, fib bulletin no 40 'FRP reinforcement in RC structures'
- [195] Davalos, J. F., Qiao, P. Z., Xu, X. F., Robinson, J., and Barth, K. E.,
- [196] Benmokrane B., El-Salakawy E., El-Ragaby A., and Lackey T., March-

April 2006, “Designing and Testing of Concrete Bridge Decks Reinforced with Glass FRP Bars”, Journal of Bridge Engineering ASCE, pp. 217-229

2001, “Modeling and characterization of fiber-reinforced plastic honeycomb sandwich panels for highway bridge applications”, J. Compos. Constr., 52 (3-4), pp. 441-452.

Harik, I., et al.1999, “Static testing on FRP bridge deck panels”, Proc., 44th Int. SAMPE Symposium and Exhibition, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, Covina, Calif., Vol. 2, pp. 1643–1654.