



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΩΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΧΡΗΣΗ ΜΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΩΠΛΙΣΜΩΝ ΣΕ ΓΕΦΥΡΕΣ**

ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΥ ΚΑΛΛΙΟΠΗ



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΙΩΑΝΝΗΣ ΣΙΓΑΛΑΣ

ΑΘΗΝΑ 2013





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΩΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΧΡΗΣΗ ΜΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΩΠΛΙΣΜΩΝ ΣΕ  
ΓΕΦΥΡΕΣ**

ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΥ ΚΑΛΛΙΟΠΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΙΩΑΝΝΗΣ ΣΙΓΑΛΑΣ

ΑΘΗΝΑ 2013



## Ευχαριστίες...

Κατ' αρχήν ευχαριστώ ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Ιωάννη Σιγάλα για την πολύ όμορφη και εποικοδομητική συνεργασία που είχαμε, για την βοήθεια του κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα ολοκληρώνοντας έτσι με τον καλύτερο τρόπο τον κύκλο των σπουδών μου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Χρήστο Γιαννέλο για την βοήθεια του κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής.

Τέλος οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για την αμέριστη υποστήριξη που μου προσφέρει πάντα σε κάθε μου προσπάθεια όλα αυτά τα χρόνια.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ
  - 1.1. ΓΕΝΙΚΑ
  - 1.2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ
  - 1.3. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
  - 1.4. ΤΑ FRP ΩΣ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
2. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ- ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ (FRP)
  - 2.1. ΓΕΝΙΚΑ
  - 2.2. ΙΝΕΣ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ
    - 2.2.1. ΓΕΝΙΚΑ
    - 2.2.2. ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ
    - 2.2.3. ΙΝΕΣ ΑΡΑΜΙΔΙΟΥ
    - 2.2.4. ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ
  - 2.3. ΜΗΤΡΑ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ
    - 2.3.1. ΓΕΝΙΚΑ
    - 2.3.2. ΘΕΡΜΟΣΚΛΗΡΥΝΟΜΕΝΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ
      - 2.3.2.1. ΕΠΟΞΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ
      - 2.3.2.2. ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ
      - 2.3.2.3. ΒΙΝΥΛΕΣΤΕΡΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ
    - 2.3.3. ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ
  - 2.4. ΦΙΛΛΕΡ ΚΑΙ ΠΡΟΣΘΕΤΑ
  - 2.5. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ
  - 2.6. ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΥΛΙΚΑ FRP ΣΤΗΝ ΑΓΟΡΑ
3. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ FRP
  - 3.1. ΓΕΝΙΚΑ
  - 3.2. ΜΙΚΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ
  - 3.3. ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ
    - 3.3.1. ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ
    - 3.3.2. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ
  - 3.4. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ
    - 3.4.1. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΠΟ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ
    - 3.4.2. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΠΟ ΘΛΙΠΤΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ
    - 3.4.3. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ
    - 3.4.4. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ
  - 3.5. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΠΟ ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗ
    - 3.5.1. ΕΡΠΥΣΜΟΣ
    - 3.5.2. ΚΟΠΩΣΗ
  - 3.6. ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ-ΔΙΑΒΡΩΣΗ-ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ FRP
    - 3.6.1. ΓΕΝΙΚΑ
    - 3.6.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ-ΦΩΤΙΑ
    - 3.6.3. ΥΠΕΡΙΩΔΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

- 3.6.4. ΥΓΡΑΣΙΑ
- 3.6.5. ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΑΠΟ ΧΛΩΡΙΔΙΑ ΚΑΙ ΑΛΚΑΛΙΑ
- 3.6.6. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
- 4. ΤΑ FRP ΩΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΜΨΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ
  - 4.1. ΓΕΝΙΚΑ
  - 4.2. ΤΑ FRP ΩΣ ΡΑΒΔΟΙ ΟΠΛΙΣΜΟΥ-ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΚΑΜΨΗΣ
    - 4.2.1. ΓΕΝΙΚΑ
    - 4.2.2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ
    - 4.2.3. ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ
    - 4.2.4. ΤΡΟΠΟΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ
    - 4.2.5. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ
    - 4.2.6. ΠΟΛΛΑΠΛΕΣ ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ
    - 4.2.7. ΑΝΑΚΑΤΑΝΟΜΗ ΡΟΠΩΝ
    - 4.2.8. ΩΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΘΛΙΨΗΣ
    - 4.2.9. ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ
      - 4.2.9.1. ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΡΩΓΜΩΝ
  - 4.3. ΤΑ FRP ΩΣ ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ-ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ
    - 4.3.1. ΓΕΝΙΚΑ
    - 4.3.2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΛΛΗΛΕΜΠΛΟΚΗΣ
    - 4.3.3. ΔΡΑΣΗ ΒΛΗΤΡΟΥ
    - 4.3.4. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
- 5. ΠΡΟΕΝΤΑΣΗ ΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΤΕΝΟΝΤΕΣ ΑΠΟ FRP
  - 5.1. ΓΕΝΙΚΑ
  - 5.2. ΤΕΝΟΝΤΕΣ ΑΠΟ FRP
  - 5.3. ΑΓΚΥΡΩΣΕΙΣ
    - 5.3.1. CLAMP ANCHORAGE
    - 5.3.2. PLUG AND CONE ANCHORAGE
    - 5.3.3. STRAIGHT SLEEVE ANCHORAGE
    - 5.3.4. CONTOURED SLEEVE ANCHORAGE
    - 5.3.5. METAL OVERLAYING
    - 5.3.6. SPLIT-WEDGE ANCHORAGE
    - 5.3.7. ΤΡΟΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ
  - 5.4. ΘΕΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ
    - 5.4.1. ΓΕΝΙΚΑ
    - 5.4.2. ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΗ ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΛΟΓΩ ΠΡΟΕΝΤΑΣΕΩΣ
    - 5.4.3. ΑΠΩΛΕΙΕΣ-ΜΕΙΩΣΕΙΣ ΠΡΟΕΝΤΑΣΕΩΣ
    - 5.4.4. ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ
      - 5.4.4.1. ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΛΟΓΩ ΧΑΛΑΡΩΣΗΣ
      - 5.4.4.2. ΑΠΟΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΗ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΥΣ ΤΕΝΟΝΤΕΣ
      - 5.4.4.3. ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ ή ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑ
    - 5.4.5. ΘΕΜΑΤΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗΣ
  - 5.5. ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗ ΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΤΕΝΟΝΤΕΣ ΑΠΟ FRP



6. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ FIBER BRAGG GRATING
  - 6.1. 'ΕΞΥΠΝΑ' ΥΛΙΚΑ - 'ΕΞΥΠΝΕΣ' ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ
  - 6.2. ΕΙΔΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ
  - 6.3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ FBG ΚΑΙ FRP
7. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ FRP ΣΕ ΓΕΦΥΡΕΣ
  - 7.1. ΓΕΝΙΚΑ
  - 7.2. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΓΕΦΥΡΩΝ ΠΡΟΕΝΤΕΤΑΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΕΝΟΝΤΕΣ ΑΠΟ FRP
    - 7.2.1. HEIWEI BRIDGE IN HUAI'AN JIANGSU PROVINCE
      - 7.2.1.1. ΔΟΚΟΙ ΠΡΟΕΝΤΕΤΑΜΕΝΕΣ ΜΕ FRP
        - 7.2.1.1.1. ΥΛΙΚΑ
        - 7.2.1.1.2. ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
        - 7.2.1.1.3. ΑΓΚΥΡΩΣΗ
      - 7.2.1.2. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ
    - 7.2.2. FICO et al. bridge in the City of Rolla
      - 7.2.2.1. ΓΕΝΙΚΑ
      - 7.2.2.2. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ
      - 7.2.2.3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ
    - 7.2.3. ΑΛΛΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ FRP ΣΕ ΓΕΦΥΡΕΣ
8. ΕΦΑΡΜΟΓΗ- ΓΕΦΥΡΑ ΠΡΟΕΝΤΕΤΑΜΕΝΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΜΕ ΤΕΝΟΝΤΕΣ ΑΠΟ CFRP
  - 8.1. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ
    - 8.1.1 ΚΥΡΙΕΣ ΔΟΚΟΙ και ΔΙΑΔΟΚΙΔΕΣ
    - 8.1.2 ΤΕΝΟΝΤΕΣ
  - 8.2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ
  - 8.3 ΑΓΚΥΡΩΣΗ-ΣΩΜΑΤΑ ΕΚΤΡΟΠΗΣ
  - 8.4 ΦΟΡΤΙΑ
  - 8.5 ΠΡΟΕΝΤΑΣΗ
  - 8.6 ΑΠΩΛΕΙΕΣ-ΜΕΙΩΣΕΙΣ
  - 8.7 ΕΛΕΓΧΟΙ - ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΕΣ ΤΑΣΕΙΣ
  - 8.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τον τελευταίο αιώνα στον τομέα των κατασκευών έχει κυριαρχήσει ευρέως η χρήση του οπλισμένου σκυροδέματος (σκυρόδεμα οπλισμένο με χάλυβα) ως δομικού υλικού. Ωστόσο τις τελευταίες δεκαετίες έχει αρχίσει να αναδύεται η χρήση νέων σύνθετων υλικών των ινοπλισμένων πολυμερών FRP. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν στην αεροναυπηγική και τους αμυντικούς εξοπλισμούς όμως σιγά σιγά κερδίζουν έδαφος και στα έργα πολιτικού μηχανικού τόσο για ενίσχυση υπαρχόντων στοιχείων όσο και για τη δημιουργία νέων κατασκευών.

Πιο συγκεκριμένα, λόγω των ξεχωριστών τους ιδιοτήτων όπως η πολύ υψηλή τους αντοχή, το μικρό ειδικό βάρος, η ανθεκτικότητα σε διάβρωση και η μη αγωγιμότητα σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον της βιομηχανίας των κατασκευών και της έρευνας. Πιθανά πεδία που βρίσκουν εφαρμογή είναι π.χ. κατασκευές κοντά σε θαλάσσιο ή ιδιαίτερα διαβρωτικό περιβάλλον όπως λιμενικά έργα, γέφυρες, κατασκευές κοντά σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία, ή κατασκευές που υποστηρίζουν εξοπλισμό MRI (magnetic resonance imaging) κ.α.. Κύρια μειονεκτήματά τους είναι η ψαθυρή συμπεριφορά τους, η ευαισθησία τους στην ηλιακή ακτινοβολία και την φωτιά.

Τα FRP (ινοπλισμένα πολυμερή) είναι σύνθετα υλικά τα οποία δημιουργούνται από μια δέσμη ινών υψηλής αντοχής και μέτρου ελαστικότητας συγκολλημένες σε μια σκληρυμένη μήτρα ρητίνης. Οι ίνες λειτουργούν ως οπλισμός για την παραλαβή των φορτίων (όπως ο χάλυβας στο οπλισμένο σκυρόδεμα) ενώ η μήτρα ρητίνης προσδίδει συνοχή στο σύνθετο υλικό, μεταβιβάζει τα φορτία στις ίνες και παράλληλα τις προστατεύει από την επίδραση του περιβάλλοντος. Η μήτρα ρητίνης είναι υλικό πολυμερούς φύσεως ενώ ως ίνες χρησιμοποιούνται κυρίως ίνες γυαλιού, αραμιδίου και άνθρακα.

Τα frp μπορεί να έχουν τη μορφή ταινιών, πάνελ, ράβδων, καλωδίων και τενόντων και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως οπλισμός κάμψης, διάτμησης, για την τοπική ενίσχυση δομικών στοιχείων, για προένταση φορέων, ή και για την εξ' ολοκλήρου μόρφωση δομικών μελών όπως δοκοί και επιφανειακά στοιχεία π.χ. καταστρώματα γεφυρών.

## 1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ [1],[2],[3]

Η ιδέα χρησιμοποίησης ινών γυαλιού για όπλιση του σκυροδέματος έχει τις ρίζες της γύρω στο 1930. Ωστόσο οι αρχές της ανάπτυξης της βιομηχανίας των frp εντοπίζονται δύο δεκαετίες αργότερα μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο. Κυρίως λόγω της υψηλής τους αντοχής και ανθεκτικότητας σε συνδυασμό με το μικρό τους ειδικό βάρος άρχισαν να χρησιμοποιούνται στην κατασκευή αεροσκαφών. Έτσι λοιπόν η πρόοδος της αεροναυπηγικής στα

πλαίσια του αμυντικού εξοπλισμού κατά τη διάρκεια του ψυχρού πολέμου έδωσαν ώθηση στην τεχνολογία των frp. Παράλληλα η γοργά αναπτυσσόμενη οικονομία των Η.Π.Α. αναζητούσε οικονομικές μεθόδους μαζικής παραγωγής προϊόντων προκειμένου να καλύψει τις ανάγκες της αγοράς και η τεχνολογία της εξέλασης αποτελούσε μια αρκετά αποτελεσματική λύση. Έτσι διευρύνθηκε η χρήση των σύνθετων υλικών.

Όστόσο δεν ήταν παρά έως το 1960 που ξεκίνησε να εξετάζεται σοβαρά η ιδέα ενδεχόμενης χρήσης τους ως οπλισμός σκυροδέματος. Η αλματώδης ανάπτυξη των έργων συγκοινωνιακής υποδομής (των μεγάλων αυτοκινητοδρόμων και κυρίως των οδικών γεφυρών) κατά τη διάρκεια της δεκαετίας 50'-60' είχε πλέον ως αποτέλεσμα την απαίτηση πολύ υψηλών δαπανών για την συντήρησή τους. Κύρια αιτία ήταν η διάβρωση των οπλισμών από χάλυβα λόγω ρηγματώσεως του σκυροδέματος και προσβολής τους από το αλάτι που χρησιμοποιούνταν για το λιώσιμο του πάγου που συσσωρεύονταν στο κατάστρωμα κατά τους χειμερινούς μήνες. Αρχικά αναζητήθηκαν λύσεις για την προστασία του χάλυβα όπως η κάλυψή του με μανδύες υλικού όπως εποξικές ρητίνες κ.α. Η εναλλακτική επιλογή ράβδων frp εκείνη την περίοδο βρισκόταν ακόμη σε ερευνητικό στάδιο και η χρήση τους έγινε δυνατή μετά το 1980 όταν άρχισε η εμπορική παραγωγή τους. Το πρώτο πιλοτικό πρόγραμμα 'Transfer of Composite Technology to Design and Construction of Bridges' έλαβε χώρα το 1983 και χρηματοδοτήθηκε από το U.S.Department of Transportation.

Αρχικά είχε μελετηθεί το ενδεχόμενο δημιουργίας πολυμερούς σκυροδέματος που όμως απορρίφθηκε λόγω της ασυμβατότητας του συντελεστή θερμικής διαστολής με αυτόν του χάλυβα. Έτσι προέκυψε η ιδέα της δημιουργίας των πρώτων ράβδων από frp . Η Marshall-Vega Inc. ήταν η πρώτη εταιρία που ανέπτυξε τις πρώτες ράβδους από GFRP στις Η.Π.Α. Αργότερα μαζί με την International Grating Inc. αποτέλεσαν τους δύο πόλους προόδου της έρευνας γύρω από την τεχνολογία των frp στην Αμερική .

Γύρω στο 1980 η αγορά άρχισε να ωθεί προς την κατεύθυνση δημιουργίας μη μεταλλικών υλικών για χρησιμοποίησή τους σε πιο εξειδικευμένες εφαρμογές όπως στην κατασκευή εργαστηρίων που χρησιμοποιούσαν εξοπλισμό που εξέπεμπε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, βάσεις αντιδραστήρων, λιμενικά έργα κ.α. Τέλος η διάβρωση του χάλυβα παρά τα πρόσθετα μέτρα προστασίας εξακολουθούσε να αποτελεί σημαντικό πρόβλημα και η δημιουργία ράβδων οπλισμού και τενόντων από frp άρχισε πλέον να εξετάζεται πιο συστηματικά.

Παράλληλα στην Ευρώπη και πιο συγκεκριμένα στην Γερμανία ήδη από το 1970 είχε ξεκινήσει η έρευνα για την δημιουργία τενόντων από GFRP. Το 1978 μάλιστα δύο γερμανικές εταιρίες οι Strabag-Bau και η Bayer σε συνεργασία ανέπτυξαν τους πρώτους τένοντες από GFRP και το απαιτούμενο

σύστημα για την αγκύρωσή τους, οι τένοντες αυτές χρησιμοποιήθηκαν σε πολλές γέφυρες που κατασκευάστηκαν στην Γερμανία και την Αυστρία εκείνη την περίοδο. Ακόμη το National Bureau of Standards το 1976 δημιούργησε ένα σύστημα αγκύρωσης για σύνθετα υλικά. Μετά το 1980 το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη μη μεταλλικών τενόντων συνέχισε να αυξάνεται και το 1983 δύο ολλανδικές εταιρίες η AKZO και η HBG σε συνεργασία ανέπτυξαν τους πρώτους τένοντες από αράμιδο AFRP.

Ταυτόχρονα στην Ιαπωνία διεξάγεται σημαντική έρευνα για τη χρήση υλικών από frp που υποστηρίζεται σημαντικά με κρατικά κονδύλια.

Από το 1990 κι έπειτα άρχισαν να αναπτύσσονται και τα πρώτα κανονιστικά πλαίσια για την εφαρμογή των frp στις κατασκευές πολιτικού μηχανικού. Πιο συγκεκριμένα αρχικά στην Ιαπωνία το 1993 η JSCE (Japanese Society of Civil Engineers) εξέδωσε τις πρώτες οδηγίες, έπειτα ακολούθησαν το 1996 οι Αμερικάνικες ACI440R-96 από το American Concrete Institut και οι Καναδικές το 2000 CAN/CSA S6-00 και CAN/CSA S806-02 από την Canadian Standards Association. Στην Ευρώπη η ανάπτυξη οδηγιών πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια ενός ερευνητικού προγράμματος που ξεκίνησε το 1997 με τον τίτλο 'Development of Guidelines for the Design of Concrete Structures, Reinforced, Prestressed or Strengthened with Advanced Composites' και διεκπεραιώνεται από το 'ConFiber-Crete Network' ένα δίκτυο έρευνας που αποτελείται από τη συνεργασία 11 συνολικά ερευνητικών ομάδων από διάφορες χώρες τις Ευρώπης .

### 1.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ [1],[2],[3]

Ως σήμερα τα frp έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλές κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα ανά τον κόσμο είτε ως ράβδοι οπλισμού είτε ως τένοντες προεντάσεως.

Πιο συγκεκριμένα ως τα μέσα της δεκαετίας του 90 στην Ιαπωνία μόνο αναφέρονται πάνω από 100 έργα που χρησιμοποιήθηκε οπλισμός από frp ενώ και η Κίνα έχει αρχίσει να αναπτύσσει ιδιαίτερη δραστηριότητα σε αυτόν τον κλάδο.



*Birdie Bridge, Mito City, Japan*

EIKONA 1.1 [1]



*Shinmiya Bridge, Japan*

EIKONA 1.2 [1]



*Floating bridge, Japan*

ΕΙΚΟΝΑ 1.3 [1]



*Hexagon marine structure, Kanagawa, Japan*

ΕΙΚΟΝΑ 1.4 [1]

Στην Ευρώπη τα πρώτα παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών εντοπίζονται στην Γερμανία. Το 1986 κατασκευάστηκε η πρώτη οδική γέφυρα προεντεταμένη με τένοντες frp ενώ η Marienfelde Bridge στο Βερολίνο που ολοκληρώθηκε το 1988 αποτελεί την πρώτη γέφυρα μετά το 1945 που εφαρμόστηκε εξωτερική

προένταση (χωρίς συνάφεια). Το 1991 στο Ludwingshafen κατασκευάστηκε η BASF bridge όπου χρησιμοποιήθηκαν τένοντες από CFRP. Τα τελευταία χρόνια η έρευνα και οι νέες εφαρμογές με οπλισμό frp στην Ευρώπη αναπτύσσονται κυρίως στα πλαίσια του προγράμματος EUROCRETE.



*The first concrete footbridge in Europe with only FRP reinforcement (EUROCRETE project,*

#### ΕΙΚΟΝΑ 1.5 [6]

Στον Καναδά το 1993 κατασκευάστηκε στο Calgary μια γέφυρα με τένοντες από CFRP στους οποίους ήταν ενσωματωμένοι οπτικοί αισθητήρες (Rizkalla and Tadros 1994). Έτσι γίνεται δυνατή η παρακολούθηση της συμπεριφοράς του οπλισμού κατά τη διάρκεια λειτουργίας της γέφυρας. Πρόκειται για τον λεγόμενο έξυπνο οπλισμό και η γέφυρα αυτή αποτελεί ένα από τα πρώτα παραδείγματα εφαρμογής του. Το 1997 κατασκευάστηκε η Headingley Bridge στην Manitoba όπου χρησιμοποιήθηκαν σε συνδυασμό τένοντες από CFRP και GFRP.



*Bridge at Calgary, Canada*

#### ΕΙΚΟΝΑ 1.6 [1]

Στις Η.Π.Α. ένα παράδειγμα αποτελεί η Bridge Street στο Southfield του Michigan που ολοκληρώθηκε το 2001 και χρησιμοποιήθηκαν τένοντες CFRP με συνάφεια και χωρίς συνάφεια τόσο στην διαμήκη όσο και στην εγκάρσια διεύθυνση.



*Composite prestressed bridge at Rapid City, South Dakota*

ΕΙΚΟΝΑ 1.7 [1]



*Waterfront structure, Port Hueneme, California*

ΕΙΚΟΝΑ 1.8 [1]



#### 1.4 ΤΑ FRP ΩΣ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

Σήμερα τα frp ως οπλισμός στο σκυρόδεμα αποτελούν μια τεχνολογία που συνεχώς εξελίσσεται μέσα από την ανάπτυξη της έρευνας και την εμπειρία που έχει κερδηθεί από την εφαρμογή τους σε κατασκευές τις περασμένες δεκαετίες. Ωστόσο κυρίως λόγω του υψηλού τους κόστους δεν αποτελούν ακόμη ευρέως μια ανταγωνιστική λύση ως προς τα αντίστοιχα προϊόντα από χάλυβα παρά μόνο σε κατασκευές που τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους αποτελούν κρίσιμο παράγοντα σχεδιασμού. Πράγματι στις περισσότερες περιπτώσεις η δημιουργία κατασκευών με οπλισμό από frp υποστηρίζεται από κρατικά ή άλλα κονδύλια. Όπως συμβαίνει με κάθε νέο υλικό άλλωστε απαιτείται χρόνος ώστε να τυποποιηθούν οι μέθοδοι παραγωγής τους, να πιστοποιηθούν τα χαρακτηριστικά τους, να κερδηθεί η εμπιστοσύνη της αγοράς, να διευρυνθεί το πεδίο εφαρμογών και να πέσουν οι τιμές.

Σε αντίθεση με τον χάλυβα κάθε προϊόν από frp ανάλογα με τη διαδικασία παραγωγής του έχει τα δικά του ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, κάτι που αποτελεί πλεονέκτημα γιατί μπορεί να οδηγήσει σε βελτιστοποίηση του σχεδιασμού ωστόσο δυσχεραίνει σημαντικά την ανάπτυξη τυποποιημένων δοκιμών πιστοποίησης, ενιαίου αναλυτικού πλαισίου κανονισμών ,συστημάτων αγκύρωσης αν πρόκειται για τένοντες και απαιτεί από τους μηχανικούς πολύ καλή γνώση των ιδιοτήτων του υλικού και του τρόπου παραγωγής του.

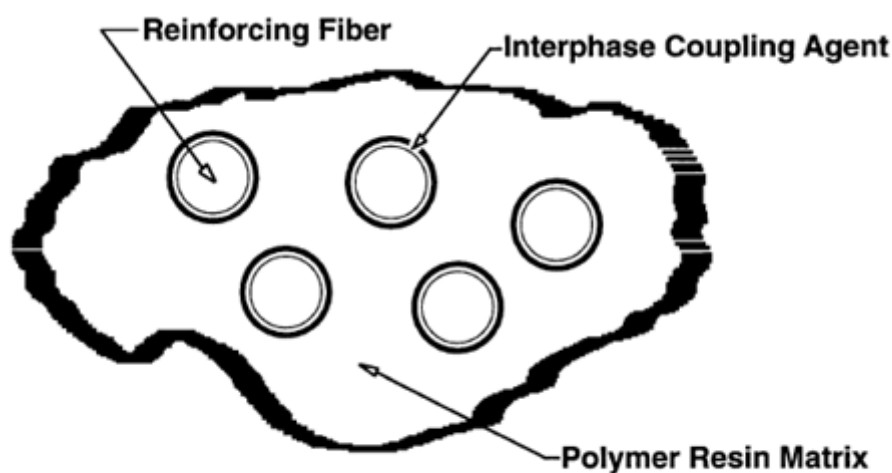
Τέλος θα πρέπει να τονιστεί ότι ο σχεδιασμός λόγω αδράνειας και προσκόλλησης στις αντιλήψεις που χρησιμοποιούνται για δεκαετίες στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα τείνει προς μια λογική αντικατάστασης του χάλυβα από τα frp. Με την πρόοδο όμως της έρευνας σταδιακά γίνεται δυνατή μια πιο ολοκληρωμένη γνώση των χαρακτηριστικών των υλικών αυτών. Θα πρέπει λοιπόν σιγά σιγά να αρχίσει να αναθεωρείται η φιλοσοφία του σχεδιασμού έτσι ώστε να είναι δυνατή η κατά τον βέλτιστο τρόπο εκμετάλλευση των ιδιοτήτων των frp.

## 2 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ- ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ

### 2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ως σύνθετο υλικό ορίζεται ο συνδυασμός δύο ή περισσότερων μηχανικά διακριτών υλικών (συστατικά), που διαφέρουν σε μοριακό επίπεδο, και αναμιγνύονται σκοπίμως προκειμένου να δημιουργηθεί ένα νέο υλικό με βελτιωμένες ιδιότητες, διαφορετικές από αυτές των συστατικών του υλικών.

Τα FRP (ινοπλισμένα πολυμερή) είναι σύνθετα υλικά τα οποία όπως έχει ήδη αναφερθεί δημιουργούνται από μια δέσμη ινών υψηλής αντοχής και μέτρου ελαστικότητας συγκολλημένες σε μια σκληρυμένη μήτρα ρητίνης.



ΕΙΚΟΝΑ 2.1 [1]

### 2.2 ΙΝΕΣ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

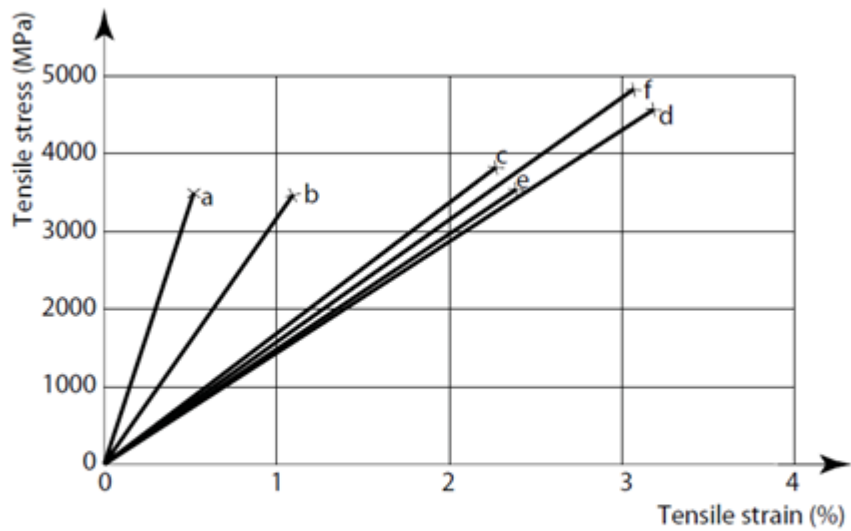
#### 2.2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι ίνες αποτελούν τον 'οπλισμό' του σύνθετου υλικού frp με κατ' όγκο αναλογία που ποικίλει μεταξύ 30-70%. Κύρια λειτουργία τους είναι η παραλαβή των φορτίων. Γενικά οι ίνες είναι επιθυμητό να έχουν τις εξής ιδιότητες:

- μεγάλο μέτρο ελαστικότητας
- υψηλή εφελκυστική αντοχή και μικρή διακύμανση αυτής της τιμής μεταξύ των ξεχωριστών ινών
- μικρή διακύμανση της διατομής και της επιφάνειάς μεταξύ των ξεχωριστών ινών
- σκληρότητα, ανθεκτικότητα

- κατά το δυνατόν σταθερότητα των χαρακτηριστικών τους κατά την επεξεργασία τους για την παραγωγή του σύνθετου υλικού
- δυνατότητα παραγωγής τους στην επιθυμητή μορφή και με τις επιθυμητές ιδιότητες
- αποδεκτό κόστος [6]

Για την παραγωγή των *frp* χρησιμοποιούνται κυρίως ίνες από γυαλί, αράμιδο και άνθρακα.



*Stress-strain curves of typical reinforcing fibres: a) carbon (high modulus); b) carbon (high strength); c) aramid (Kevlar 49); d) S-glass; e) E-glass; f) Basalt*

ΕΙΚΟΝΑ 2.2 [6]

## 2.2.2 ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ



ΕΙΚΟΝΑ 2.3 [1]

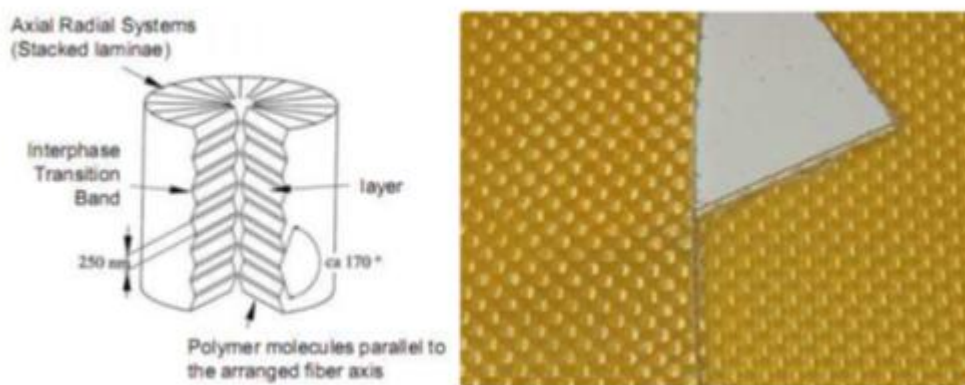
Οι ίνες γυαλιού είναι οι πιο δημοφιλείς ως συστατικό των FRP κυρίως λόγω του βέλτιστου συνδυασμού χαρακτηριστικών αντοχής και κόστους. Παράγονται με ειδική κατεργασία υγρού γυαλιού το οποίο μπορεί να πάρει τη μορφή νήματος. Συνήθως κατά τη διαδικασία παραγωγής οι ίνες γυαλιού καλύπτονται (coated) με ειδικά διαλύματα (agents) έτσι ώστε να βελτιωθεί η συμπεριφορά τους κατά τον εμποτισμό τους από τη ρητίνη. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η συνάφεια μεταξύ των δύο υλικών και μειώνονται τα κενά στο τελικό προϊόν, το σύνθετο υλικό frp. [6]

Οι πιο συνήθεις τύποι ινών γυαλιού είναι οι εξής:

- E-glass: είναι ο πιο φθηνός τύπος ινών και χρησιμοποιείται ευρέως
- S-glass: έχει μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας ωστόσο δεν προτιμάται λόγω του υψηλού κόστους
- Alkali-resistant glass: παράγονται με την προσθήκη zirconium και είναι ανθεκτικές στο αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος που γενικά διαβρώνει τις ίνες γυαλιού. [6]

Τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα των ινών γυαλιού είναι το σχετικά χαμηλό μέτρο ελαστικότητας, η χαμηλή ανθεκτικότητα σε υγρό και αλκαλικό περιβάλλον, καθώς και η χαμηλή μακροχρόνια αντοχή λόγω του φαινομένου της ερπυστικής διάρρηξης (stress rupture). [2],[6]

### 2.2.3 ΙΝΕΣ ΑΡΑΜΙΔΙΟΥ



ΕΙΚΟΝΑ 2.4 [www.the-rc.com]

Οι ίνες αραμιδίου παράγονται με κατάλληλη κατεργασία ενός διαλύματος αρωματικού πολυαμιδίου. Στην αγορά διατίθενται διάφοροι τύποι όπως οι Kevlar(DuPont), Technora(Teijin), Twaron(Akzo Nobel) και οι SVM που παράγονται στη Ρωσία. [6]

Έχουν πολύ υψηλή αντοχή σε κόπωση υπό στατικά και δυναμικά φορτία καθώς και πολύ υψηλή αντοχή σε κρουστικά φορτία. Τα μειονεκτήματά τους είναι η χαμηλή θλιπτική αντοχή, η μειωμένη μακροχρόνια αντοχή λόγω του φαινομένου της ερπυστικής διάρρηξης (stress rupture) καθώς και η ευαισθησία τους στην επίδραση της υπεριώδους ακτινοβολίας UV. [2],[6]

### 2.2.4 ΙΝΕΣ ΑΝΘΑΚΑ



ΕΙΚΟΝΑ 2.5 [www.wheelsofitaly.com]

Οι ίνες άνθρακα παράγονται από πολυακρυλονιτρίλιο, πίσσα (υποπροϊόν της διύλισης του πετρελαίου) ή ρεγιόν με πυρόλυση σε πολύ υψηλή θερμοκρασία (συχνά έως 3000°C).

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα τους είναι η πολύ μεγάλη αντοχή και ακαμψία, η διατήρηση της αντοχής τους με την αύξηση της θερμοκρασίας καθώς και η ανθεκτικότητά τους σε διαβρωτικό περιβάλλον.

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα είναι το πολύ υψηλό τους κόστος που οφείλεται κυρίως στο πολύ υψηλό κόστος των πρώτων υλών και της διαδικασίας παραγωγής. Επίσης είναι εγγενώς ανισότροπα υλικά. [2],[6]

## 2.3 ΜΗΤΡΑ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

### 2.3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Μήτρα του frp είναι το υλικό της ρητίνης μαζί με τις διάφορες προσμίξεις που έχει πλέον μετά από κατεργασία αποκρυσταλλώσει την οριστική του δομή και είναι πολυμερές υλικό. Αποτελεί περίπου το 30-60% κατ' όγκο του frp . Η χημική του σύνθεση και οι ιδιότητες του καθορίζουν τη συμπεριφορά του σύνθετου υλικού. Η συμβατότητα του με τις ίνες και η δυνατότητα της από κοινού λειτουργίας τους επηρεάζουν τον τρόπο αστοχίας του μέλους. [6]

Οι κυριότερες λειτουργίες του είναι οι εξής:

- Συγκρατεί σε ενότητα τις ίνες και καθορίζει τη γεωμετρική τους κατανομή
- Μεταβιβάζει τα φορτία στις ίνες κυρίως μέσω μηχανισμών τριβής
- Προσφέρει ακαμψία και το επιθυμητό σχήμα στο δομικό μέλος frp
- Προστατεύει τις ίνες από τον κίνδυνο διάβρωσης από το περιβάλλον
- Απομονώνει τις ίνες ώστε να λειτουργούν χωριστά συμβάλλοντας έτσι σημαντικά στην επιβράδυνση επέκτασης πιθανών ρωγμών
- Διαμορφώνει την επιφάνεια σύνδεσης του μέλους
- Καθορίζει την διατμητική αντοχή του μέλους για φόρτιση κάθετη στην κύρια διεύθυνση των ινών
- Σε θλιπτική καταπόνηση προσφέρει πλευρική στήριξη στις ίνες ώστε να μην αστοχήσουν σε τοπικό λυγισμό

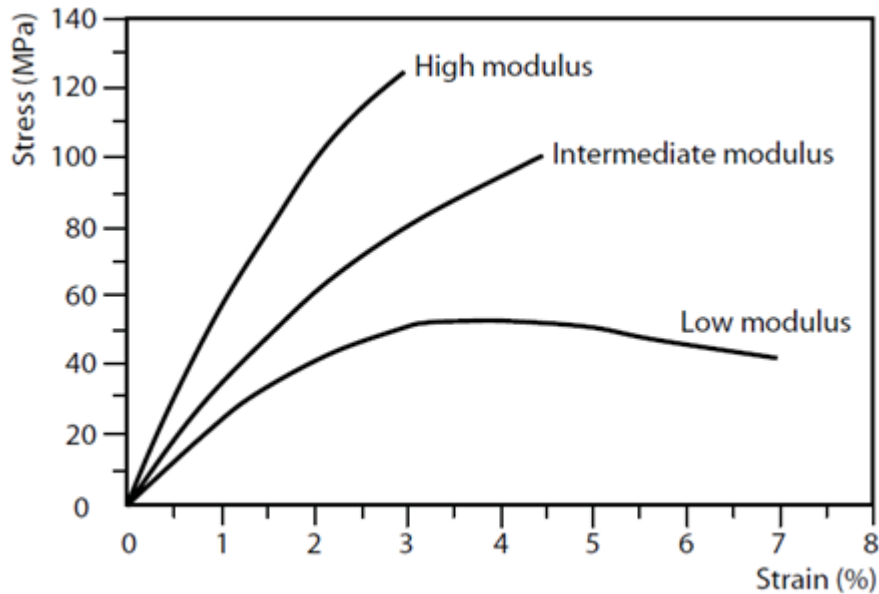
Δύο είναι οι κύριες κατηγορίες ρητινών που χρησιμοποιούνται στα frp, οι θερμοσκληρυνόμενες (thermosetting) και οι θερμοπλαστικές (thermoplastic resins). [6]

### 2.3.2 ΘΕΡΜΟΣΚΛΗΡΥΝΟΜΕΝΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ

Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες προτιμούνται στην παραγωγή των FRP κυρίως επειδή είναι εύκολη η κατεργασία τους (κυρίως λόγω του χαμηλού ιξώδους) και έχουν σχετικά χαμηλό κόστος. Πρόκειται για πολυμερή τα οποία αναπτύσσουν πολύ ισχυρούς μοριακούς δεσμούς και ένα τρισδιάστατο δίκτυο πολυμερούς αλυσίδας το οποίο τους προσφέρει σταθερή εσωτερική δομή και σχήμα. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι, αντίθετα με τις θερμοπλαστικές ρητίνες, μετά την οριστική σκλήρυνσή τους δεν λιώνουν ούτε αλλάζουν σχήμα υπό την επίδραση της θερμοκρασίας παρά μόνο όταν φτάσουν το όριο της θερμικής τους αποσύνθεσης. Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες έχουν ψαθυρή συμπεριφορά. Προσφέρουν στο σύνθετο υλικό μεγάλη ακαμψία, σταθερότητα σχήματος, μικρότερο συντελεστή θερμικής διαστολής, μεγάλη αντοχή στην επίδραση διαλυτών και άλλων χημικών ουσιών. Πρέπει ωστόσο να ληφθεί υπόψη η προκύπτουσα ογκομετρική συρρίκνωση των ρητινών κατά την σκλήρυνσή τους (η οποία κυμαίνεται από 4% για τις εποξικές έως 8% για τις πολυεστερικές ρητίνες) και μπορεί να προκαλέσει την ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων κυρίως στη διεπιφάνεια με τις ίνες. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι θερμοσκληρυνόμενων ρητινών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των FRP είναι οι εποξικές, οι πολυεστερικές και οι βινυλεστερικές. [6]

#### 2.3.2.1 ΕΠΟΞΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ

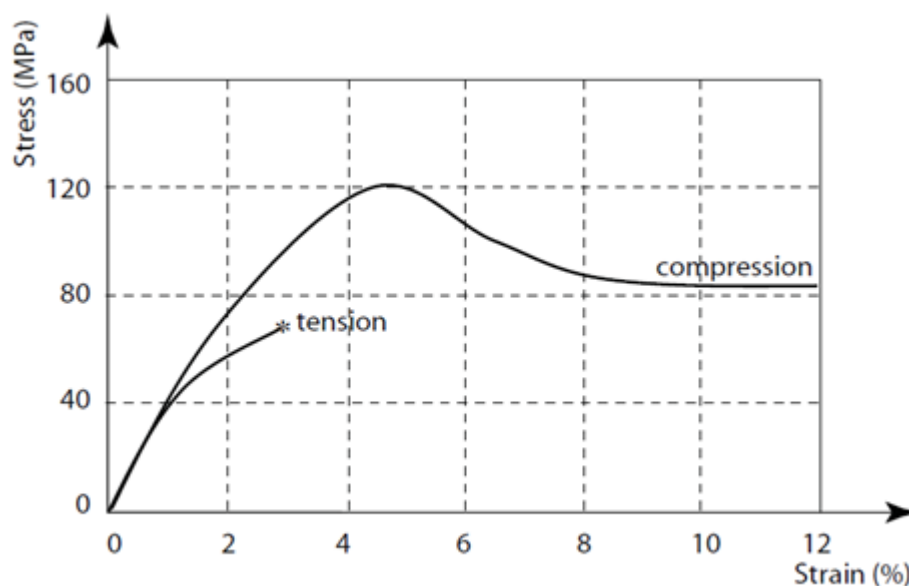
Οι εποξικές ρητίνες χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα στην αεροναυπηγική. Έχουν πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, είναι εύκολες στην κατεργασία, παρουσιάζουν μικρό ποσοστό ογκομετρικής συρρίκνωσης κατά την σκλήρυνσή τους και γενικά έχουν καλή συγκολλητική ικανότητα με τα περισσότερα είδη ινών. Επίσης παρουσιάζουν υψηλή ανθεκτικότητα σε διάβρωση και σε σχέση με άλλες ρητίνες είναι πιο ανθεκτικές στην επίδραση του νερού και της θερμοκρασίας. Το σημαντικότερο τους μειονέκτημα είναι το υψηλό τους κόστος συγκριτικά με τις πολυεστερικές και τις βινυλεστερικές και το μεγάλο χρονικό διάστημα που απαιτείται για την σκλήρυνση τους. Γενικά ανάλογα με την κατεργασία κατά την παραγωγή τους και τις χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται κάθε φορά ποικίλουν οι μηχανικές τους ιδιότητες, προσφέρεται έτσι η δυνατότητα επιλογής από μια γκάμα εποξικών ρητινών με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. [6]



ΕΙΚΟΝΑ 2.6 [1]

### 2.3.2.2 ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ

Οι πολυεστερικές ρητίνες είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες από τη βιομηχανία παραγωγής σύνθετων υλικών. Γενικά αν και οι ιδιότητες τους είναι κατώτερες των εποξικών ρητινών μπορούν να βελτιωθούν σημαντικά με την ανάμιξη πρόσθετων (additives) κατά την κατεργασία τους. Λόγω της ανθεκτικότητας τους στην υπεριώδη ακτινοβολία UV και της δυσάρεστης οσμής τους συχνά βρίσκουν εφαρμογή σε εξωτερικές χρήσεις. Το σημαντικότερο μειονέκτημά τους είναι το μεγάλο ποσοστό ογκομετρικής συρρίκνωσης κατά την σκλήρυνσή τους ωστόσο μπορεί να μειωθεί αν αναμιχθούν με θερμοπλαστικά συστατικά. [6]





## ΕΙΚΟΝΑ 2.7 [6]

### 2.3.2.3 ΒΙΝΥΛΕΣΤΕΡΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ

Οι βινυλεστερικές ρητίνες λόγω της χημικής τους σύνθεσης είναι πιο εύκαμπτες από τις πολυεστερικές. Γενικά παρουσιάζουν κάποια από τα πλεονεκτήματα των εποξικών ρητινών όπως η υψηλή εφελκυστική αντοχή και η ανθεκτικότητα σε χημική διάβρωση και των πολυεστερικών όπως το μικρό απαιτούμενο χρονικό διάστημα σκλήρυνσης. Είναι επίσης εξαιρετικά ανθεκτικές στα οξέα, τα αλκάλια, τους διαλύτες και τα υπεροξείδια. [6]

### 2.3.3 ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ

Οι θερμοπλαστικές ρητίνες είναι δύσκολες στην κατεργασία κυρίως λόγω του μεγάλου ιξώδους που δυσχεραίνει την καλή ενσωμάτωση των ινών. Αφότου σκληρύνουν μπορούν να ρευστοποιηθούν ξανά υπό την επίδραση της θερμοκρασίας, να μορφοποιηθούν στο επιθυμητό σχήμα ή και να επιδιορθωθούν και έπειτα να σκληρύνουν εκ νέου. Πρόκειται για όλκιμα υλικά, σκληρότερα από τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή. Ωστόσο έχουν γενικά μικρότερη ακαμψία και αντοχή, μικρή ανθεκτικότητα σε ερπυστικά φαινόμενα υπό υψηλές θερμοκρασίες και στη δράση διαλυτών. Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες είναι οι PEEK (polyether ether ketone), PPS(polyphenylene sulphide), PSUL(polysulfone). [6]

## 2.4 ΦΙΛΛΕΡ ΚΑΙ ΠΡΟΣΘΕΤΑ

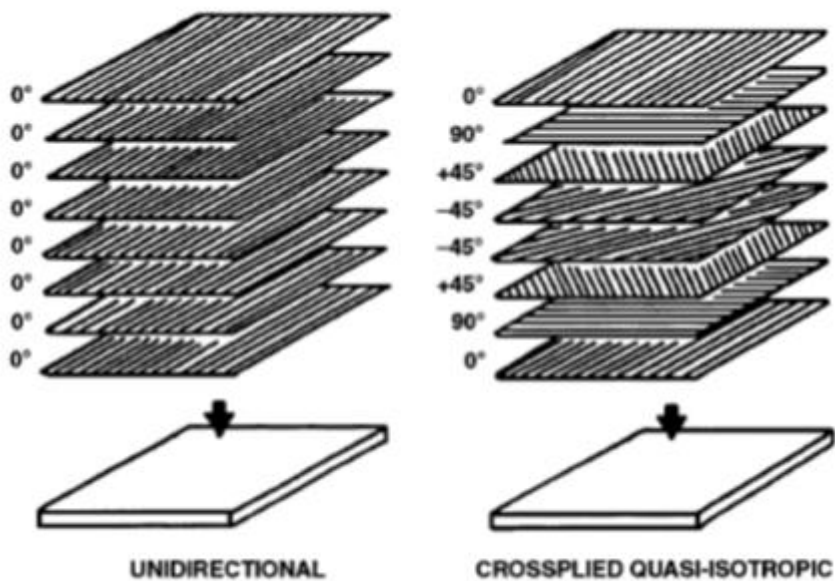
Τα φίλλερ είναι υλικά που προστίθενται για να 'γεμίσει' η τελική διατομή με τη χρησιμοποίηση μικρότερων ποσοτήτων υλικών μήτρας έτσι ώστε να μειωθεί το τελικό κόστος. Επίσης μπορούν να συμβάλλουν στην πιο αποτελεσματική μεταβίβαση των φορτίων και να μειώσουν τη ρηγμάτωση σε μη ενισχυμένες περιοχές. Πιο ευρεία χρήση έχουν το ανθρακικό ασβέστιο, ο καολινίτης και το οξείδιο του αλουμινίου.

Τα πρόσθετα είναι ουσίες που προστίθενται στη μήτρα έτσι ώστε να αλλάξουν κάποιες ιδιότητες του σύνθετου υλικού, να βελτιωθεί η συμπεριφορά του και οι μηχανικές του ιδιότητες. Μπορεί να είναι καταλύτες, χρωστικές, επιβραδυντές φλόγας και κυρίως αυξάνουν την ανθεκτικότητα του υλικού σε διάβρωση υπό την επίδραση φωτιάς και γενικότερα κατά την έκθεση σε επιβλαβή περιβάλλοντα, μειώνουν τη συστολή ξηράνσεως.

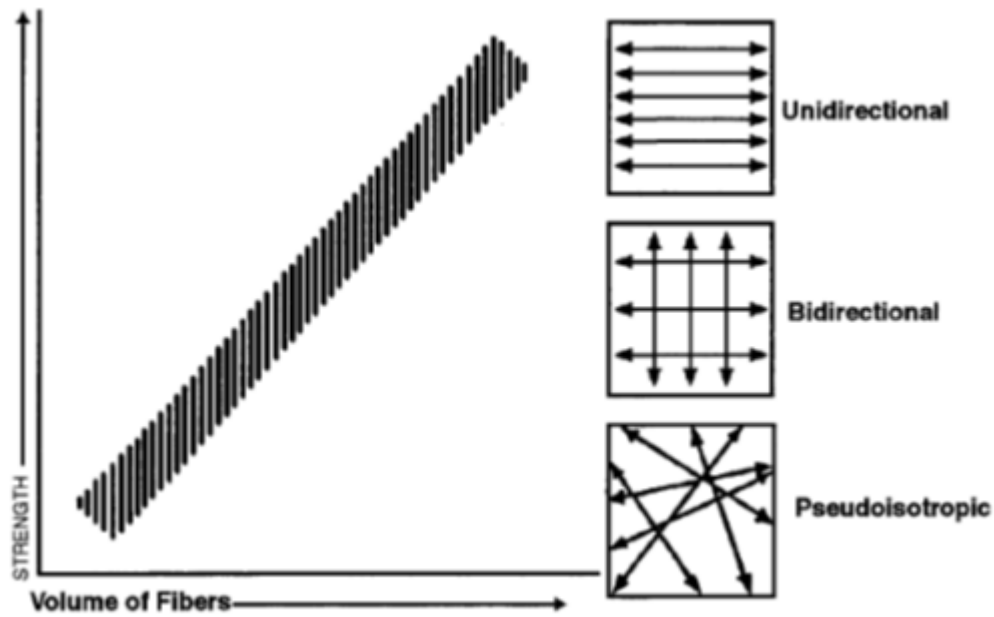
## 2.5 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ του ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Τα σύνθετα υλικά μπορούν να φέρουν μεγαλύτερα επίπεδα τάσεων από ότι τα συστατικά στοιχεία τους χωριστά καθώς η μήτρα ρητίνης και οι ίνες αλληλεπιδρούν και αναδιανέμουν εσωτερικά τις τάσεις που προκαλούνται από τα εξωτερικά φορτία. Ωστόσο αυτή η δυνατότητα εσωτερικής αναδιανομής των τάσεων εξαρτάται από τη συνάφεια των δύο υλικών (όπως συμβαίνει

άλλωστε και στο οπλισμένο σκυρόδεμα μεταξύ σκυροδέματος-χάλυβα). Η συνάφεια ινών-μήτρας ρητίνης εξαρτάται από χημικούς και μηχανικούς παράγοντες. Ειδικές ουσίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ενισχύσουν τους χημικούς δεσμούς και τη συγκολλησιμότητα των δύο υλικών. Για την αποτελεσματικότερη λειτουργία του σύνθετου υλικού ουσιαστικής σημασίας είναι επίσης η συμβατότητα των μηχανικών παραμέτρων των δύο υλικών. Για παράδειγμα υπό εφελκυσμό η συμπεριφορά του σύνθετου υλικού στη διεύθυνση των ινών είναι σχεδόν γραμμικώς ελαστική και η αντοχή καθορίζεται από την αντοχή των ινών. Έτσι για να μην έχουμε πρόωρη ρηγματώση και να αναπτυχθεί η πλήρης εφελκυστική αντοχή η μήτρα θα πρέπει να έχει μεγαλύτερη ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας από τις ίνες. Υπό θλιπτικά φορτία ωστόσο απαιτείται μια ελάχιστη ακαμψία της μήτρας έτσι ώστε να παρέχει επαρκή πλευρική στήριξη και αποφευχθεί ο λυγισμός των ινών. Επίσης σημαντικός είναι ο ρόλος της γεωμετρίας των ινών, της κατανομής τους στο χώρο, της γωνίας μεταξύ τους αλλά και με τη διεύθυνση της φόρτισης. Η βέλτιστη συμπεριφορά επιτυγχάνεται για σταθερή φόρτιση παράλληλα στη διεύθυνση των ινών (και οι ίνες τοποθετημένες σε μια κύρια διεύθυνση).



ΕΙΚΟΝΑ 2.8 [1]



ΕΙΚΟΝΑ 2.9 [1]

## 2.6 ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΥΛΙΚΑ FRP ΣΤΗΝ ΑΓΟΡΑ

Η χρήση των frp σε εφαρμογές πολιτικού μηχανικού ξεκίνησε περίπου το 1950 με τη δημιουργία του πρώτου σπλισμού GFRP. [6] Ως σήμερα η βιομηχανία παραγωγής σύνθετων υλικών έχει αναπτυχθεί και διατίθεται μια ευρεία γκάμα προϊόντων για χρήση ως εσωτερικός ή εξωτερικός σπλισμός προεντεταμένος ή μη. Τυπικά προϊόντα είναι [6] :

- μανδύες υλικού (κυρίως για ενισχύσεις)
- τένοντες (για εφαρμογές προεντάσεως)
- ράβδοι κεκκαμένες ή μη με ραβδώσεις ή χωρίς (χρήση ως σπλισμός κάμψης και διάτμησης)
- καλώδια (για τη στατική ευστάθεια γεφυρών)
- πάνελ διάφορων τύπων (κυρίως για καταστρώματα γεφυρών)



ΕΙΚΟΝΑ 2.10 [6]

Γενικά καθώς τα *fpr* είναι νέα υλικά η έρευνα για τις δυνατότητες και τις ιδιότητες τους συνεχώς εξελίσσεται παράλληλα εξελίσσεται σταδιακά και η βιομηχανία παραγωγής τους. Ωστόσο οι καθιερωμένες αντιλήψεις σχεδιασμού και μορφής των υλικών είναι προσαρμοσμένες κυρίως στον χάλυβα που κυριαρχεί στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα. Έτσι είναι λογικό πως τα πρώτα βήματα που έγιναν βασίστηκαν στην ήδη υπάρχουσα γνώση και έτσι τα μοντέλα και οι διατομές μιμήθηκαν κυρίως τα αντίστοιχα χαλύβδινα. Όσο όμως εμπλουτίζεται με το χρόνο η εμπειρία της χρήσης των *fpr* θα αναπτύσσονται και νέες μορφές υλικών και στατικών συστημάτων που θα εκμεταλλεύονται κατά βέλτιστο τρόπο τις ιδιαίτερες ιδιότητες των *fpr* προσφέροντας εναλλακτικές λύσεις σχεδιασμού.

### 3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ FRP

#### 3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα σύνθετα υλικά έχουν μοναδικές ιδιότητες που ποικίλουν ανάλογα με την επιλογή των συστατικών τους στοιχείων και την κατεργασία κατά την παραγωγή τους. Παρακάτω θα παρουσιάσουμε κάποιες γενικευμένες ιδιότητες των frp και τον τρόπο με τον οποίο αυτές επηρεάζονται από το περιβάλλον και τη φόρτιση, ωστόσο όταν πρόκειται για σχεδιασμό τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των υλικών θα πρέπει να παρέχονται από τον κατασκευαστή. Ιδιαίτερα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι μέθοδοι πιστοποίησης των προϊόντων βρίσκονται ακόμη στο στάδιο έρευνας και δεν έχουν τυποποιηθεί ευρέως.

Τα ινοπλισμένα πολυμερή είναι υλικά ανισότροπα (σε αντίθεση με τον χάλυβα) και ο κύριος ισχυρός άξονας είναι αυτός παράλληλα στη διεύθυνση των ινών. Ακόμη οι μηχανικές τους ιδιότητες τους μπορεί να παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις ανάλογα με τις κατ' όγκο αναλογίες των ινών και της ρητίνης, τη γεωμετρία των ινών, τις διαστάσεις και τον κατάλληλο ποιοτικό έλεγχο κατά την παραγωγή τους, ενώ στον χάλυβα η διαδικασία παραγωγής και οι ιδιότητες των προϊόντων είναι πολύ πιο τυποποιημένα. Τέλος πρέπει να ληφθεί υπόψη η επίδραση παραγόντων όπως η ιστορία φόρτισης, η διάρκεια φόρτισης, η θερμοκρασία και η υγρασία στην απόκριση των υλικών. [2],[6]

#### 3.2 ΜΙΚΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ [6]

Στη μικρομηχανική ανάλυση λαμβάνεται υπόψη η γεωμετρία της μικροδομής και τα χαρακτηριστικά των συστατικών μερών (εν προκειμένω των ινών και της μήτρας ρητίνης). Ως όγκος αναφοράς ορίζεται ο μικρότερος δυνατός όγκος στον οποίο μπορεί να θεωρηθεί ότι περιέχονται όλες οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού.

Ορισμοί συμβόλων :

-c (composite) σύνθετο υλικό	-ρ πυκνότητα	
-m (matrix) μήτρα ρητίνης	-v όγκος	-V κλάσμα όγκου
-f (fiber) ίνες	-m μάζα	-M κλάσμα μάζας

#### 3.3 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

##### 3.3.1 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ

Ένα από τα πλεονεκτήματα των frp είναι η μικρή τους πυκνότητα (περίπου το ένα έκτο έως ένα τέταρτο αυτής του χάλυβα =  $7,8\text{g/cm}^3$ ). [2] Έτσι διευκολύνεται σημαντικά ο χειρισμός των υλικών στο εργοτάξιο και μειώνεται το κόστος μεταφοράς τους, επίσης μειώνονται τα φορτία από το ίδιο βάρος.

Η πυκνότητα τους μπορεί να υπολογισθεί χρησιμοποιώντας τον νόμο της σύνθεσης “rule of mixtures” από τη σχέση :  $\rho_c = \rho_m * V_m + \rho_f * V_f$  [6] και γενικά κυμαίνεται μεταξύ 1,25-2,1 g/cm<sup>3</sup> .[2]

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1 ΤΥΠΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΡΑΒΔΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ(g/cm<sup>3</sup>) [2]

Steel	GFRP	CFRP	AFRP
7.90	1.25 to 2.10	1.50 to 1.60	1.25 to 1.40

### 3.3.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής λαμβάνει διαφορετικές τιμές στον διαμήκη άξονα, στον οριζόντιο και στον κατακόρυφο (σε αντίθεση με τον χάλυβα που είναι ισότροπο υλικό και ο συντελεστής θερμικής διαστολής έχει κοινή τιμή σε όλες τις διευθύνσεις). Εξαρτάται από το είδος των ινών και της ρητίνης καθώς και από τις κατ’ όγκο αναλογίες τους. Ο σ.θ.δ. στη διεύθυνση του διαμήκη άξονα εξαρτάται από τις ιδιότητες των ινών, ενώ στις κάθετες σε αυτήν διευθύνσεις εξαρτάται από τις ιδιότητες της ρητίνης. Παρακάτω δίνονται οι αντίστοιχες τιμές στον πίνακα. Να σημειωθεί ότι οι αρνητικές τιμές του συντελεστή υποδηλώνουν ότι το υλικό συστέλλεται με αύξηση της θερμοκρασίας. [2]

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2 ΤΥΠΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ ΓΙΑ ΡΑΒΔΟΥΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ [2]

DIRECTION	CTE X 10 <sup>-6</sup> /°C			
	Steel	GFRP	CFRP	AFRP
Longitudinal, $\alpha_L$	11.7	6.0 to 10.0	-9.0 to 0.0	-6.0 to -2.0
Transverse, $\alpha_T$	11.7	21.0 to 23.0	74.0 to 104.0	60.0 to 80.0

Όταν τα frp χρησιμοποιούνται ως οπλισμός σκυροδέματος πρέπει να ληφθεί υπόψη για τη συμπεριφορά του σύνθετου υλικού (οπλισμένου σκυροδέματος) υπό την επίδραση της θερμοκρασίας η αλληλόδραση των συντελεστών θερμικής διαστολής του σκυροδέματος και του frp. Καθώς είναι πιθανή η δημιουργία τάσεων κυρίως στη διεπιφάνεια των δύο υλικών [12] λόγω της απόκλισης των σ.θ.δ στον διαμήκη άξονα ή ακόμη μείωση της συνάφειας λόγω απόκλισης των σ.θ.δ στον κατακόρυφο άξονα. Αξίζει να σημειωθεί ότι στις κατασκευές από σκυρόδεμα οπλισμένο με χάλυβα συνήθως δεν δινόταν έμφαση σε αυτό το φαινόμενο καθώς οι σ.θ.δ χάλυβα (11,7\*10<sup>-6</sup>/°C) και

σκυροδέματος ( $7,2 \cdot 10^{-6} - 10,8 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ) δεν διαφέρουν σημαντικά και είναι κοινοί σε όλες τις διευθύνσεις. [2]

### 3.4 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

#### 3.4.1 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΠΟ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ

Τα ινοπλισμένα πολυμερή έχουν εφελκυστική αντοχή μεγαλύτερη από αυτή του χάλυβα (τιμές δίνονται ενδεικτικά στον πίνακα). Ωστόσο πρέπει να τονισθεί ιδιαίτερα ότι κατά τη φόρτιση η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων είναι γραμμικώς ελαστική έως την αστοχία, δηλαδή τα frp δεν παρουσιάζουν σημείο διαρροής.[2]

Η ανάληψη του εφελκυστικού φορτίου γίνεται κυρίως από τις ίνες οπότε η κατ' όγκο αναλογία των ινών επηρεάζει σημαντικά την αντοχή του σύνθετου υλικού. Επίσης η διαδικασία παραγωγής, ο σωστός ποιοτικός έλεγχος καθώς και ο βαθμός σκλήρυνσης της μήτρας ρητίνης είναι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη.[2]

Ιδιαίτερα πρέπει να τονισθεί ότι σε αντίθεση με τον χάλυβα η εφελκυστική αντοχή των ινοπλισμένων πολυμερών ποικίλει ανάλογα με τη διάμετρο.[2] Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι οι ράβδοι GFRP από τρεις διαφορετικούς κατασκευαστές παρουσιάζουν μείωση της αντοχής τους πάνω από 40% για αύξηση της διαμέτρου από 9,5-22,2mm (Faza and GangaRao 1993b).

Οι ράβδοι από frp δεν μπορούν να καμφθούν μετά την παραγωγή τους (ιδιαίτερα αυτές με μήτρα θερμοσκληρυνόμενης ρητίνης).[2] Υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής κεκκαμένων ράβδων ωστόσο παρατηρείται σημαντική μείωση της αντοχής τους, της τάξεως του 40-50% σε σχέση με τις ευθύγραμμες, μείωση που οφείλεται κυρίως σε συγκεντρώσεις τάσεων και λυγισμό των ινών (Nanni et al. 1998).

Η ακριβής τιμή της εφελκυστικής αντοχής των ράβδων frp πρέπει να παρέχεται από τον κατασκευαστή καθώς και οι πειραματικές μέθοδοι που ακολουθήθηκαν για τον έλεγχο των δοκιμίων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3 ΣΥΝΗΘΕΙΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΡΑΒΔΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ [2]

	Steel	GFRP	CFRP	AFRP
Nominal yield stress MPa	276 to 517	N/A	N/A	N/A
Tensile strength MPa	483 to 690	483 to 1600	600 to 3690	1720 to 2540
Elastic modulus *10 <sup>3</sup> GPa	200.00	35.0 to 51.0	120 to 580	41.0 to 125
Yield strain%	0.14 to 0.25	N/A	N/A	N/A
Rupture strain %	6.0 to 12.0	1.2 to 3.1	0.5 to 1.7	1.9 to 4.4

### 3.4.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΠΟ ΘΛΙΠΤΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ

Γενικά τα ινοπλισμένα πολυμερή παρουσιάζουν πολύ χειρότερη απόκριση σε θλιπτικά φορτία σε σχέση με τα εφελκυστικά. Δεν θα πρέπει να σχεδιάζονται ως στοιχεία για παραλαβή θλίψης καθώς αμφίβολη είναι η ακριβής τιμή της θλιπτικής τους αντοχής καθώς η αστοχία κάθε φορά μπορεί να οφείλεται σε διαφορετικούς μηχανισμούς και δεν υπάρχει κάποια δοκιμή θλίψης που να δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα (καθώς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την γεωμετρία του κάθε δοκιμίου και τη διάταξη του πειράματος). Ωστόσο η θλιπτική τους αντοχή δεν πρέπει να αμελείται. [2]

Η αντοχή σε θλίψη των frp εξαρτάται κυρίως από το είδος των ινών και της ρητίνης και τις κατ' όγκο αναλογίες τους και δύσκολα μπορεί να προσεγγισθεί με θεωρητικά μοντέλα. Η αστοχία μπορεί να οφείλεται σε λυγισμό των ινών, σε διατμητική αστοχία των ινών, σε αστοχία σε εφελκυσμό στο κάθετο επίπεδο από αυτό της φόρτισης λόγω παραμόρφωσης Poisson. Γενικά ράβδοι με μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή αναμένεται να έχουν και μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή.[2]

Η θλιπτική τους δυσκαμψία είναι μικρότερη από την εφελκυστική και διαφέρει από ράβδο σε ράβδο ανάλογα με τα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά και τον τρόπο παραγωγής της. [2] Ο κατασκευαστής θα πρέπει να παρέχει τις σχετικές πληροφορίες.

### 3.4.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

Τα ινοπλισμένα πολυμερή παρουσιάζουν πολύ μικρή αντοχή σε διάτμηση (σε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση των ινών). Αυτό συμβαίνει γιατί οι ίνες δεν αντιστέκονται στην διάτμηση και τη φόρτιση καλείται να παραλάβει εξ' ολοκλήρου η μήτρα ρητίνης που έχει μικρή αντοχή και επιπλέον οι διατομές



των ινών λειτουργούν σαν ασυνέχειες υλικού προκαλώντας συγκεντρώσεις τάσεων. Γενικά η συμπεριφορά σε διάτμηση μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με την προσθήκη ινών και σε άλλες διευθύνσεις. [2] Οι σχετικές πληροφορίες για κάθε ράβδο θα πρέπει να παρέχονται από τον κατασκευαστή.

#### 3.4.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ

Η συνάφεια σκυροδέματος-fpr εξαρτάται από τον σχεδιασμό, τη διαδικασία παραγωγής, τις μηχανικές ιδιότητες της ράβδου και τις συνθήκες περιβάλλοντος [2] (Al-Dulaijan et al. 1996; Nanni et al. 1997; Bakis et al. 1998b; Bank et al. 1998; Freimanis et al. 1998).

Οι μηχανισμοί που αναπτύσσονται κατά την αγκύρωση των ράβδων για τη μεταβίβαση της δύναμης από το σκυρόδεμα στον οπλισμό είναι οι εξής :

- ο η 'αντίσταση' στη διεπιφάνεια λόγω χημικών δεσμών (adhesion resistance)
- ο η αντίσταση τριβής στη διεπιφάνεια έναντι ολίσθησης
- ο η μηχανική αλληλεμπλοκή λόγω τραχύτητας των επιφανειών

Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι μηχανισμοί συνάφειας λειτουργούν παράλληλα και για τη μεταβίβαση του φορτίου της ράβδου fpr από τη μήτρα ρητίνης στις ίνες.[2]

Όπως και στον χάλυβα, παράγονται ράβδοι fpr με ραβδώσεις για καλύτερη ανάπτυξη συνάφειας. Περισσότερα για τη συνάφεια και τα απαιτούμενα μήκη αγκύρωσης θα διατυπωθούν στη συνέχεια.

### 3.5 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΠΟ ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗ

#### 3.5.1 ΕΡΠΥΣΜΟΣ

Ως ερπυσμός ορίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο αυξάνεται η παραμόρφωση με το χρόνο υπό σταθερό φορτίο. [6]

Γενικά οι ίνες άνθρακα και γυαλιού δεν έρπουν ωστόσο οι περισσότερες ρητίνες που είναι βισκοελαστικά υλικά έρπουν [6] 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 fpr μπορεί να αστοχήσει ξαφνικά. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται ερπυστική διάρρηξη (creep rupture) και μπορεί να συμβεί σε οποιοδήποτε υλικό. Ωστόσο στις συνήθεις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα με χαλύβδινο οπλισμό σχεδόν ποτέ δεν επηρέαζε τον σχεδιασμό παρά μόνο στην περίπτωση πυρκαγιάς έπρεπε να ληφθεί υπόψη λόγω της επίδρασης υψηλής θερμοκρασίας.[2]

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.[6] 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.[6]

### 3.5.2 ΚΟΠΩΣΗ

Ως κόπωση ορίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο στοιχεία που καταπονούνται από περιοδικώς επαναλαμβανόμενα περιοδικά 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.

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 ρηγμάτωσης της μήτρας ρητίνης, λόγω θραύσης των ινών, αποφλοίσωσης κ.α.[6] 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. [2] Αύξηση της μέσης τάσης ή του ρυθμού επιβολής της κυκλικής φόρτισης συμβάλει επίσης σε ταχύτερη απομείωση της αντοχής. [2]

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.[2] Υπό κυκλική φόρτιση μπορεί ο ρόλος τους να είναι καθοριστικός για τη συμπεριφορά του μέλους.

### 3.6 ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ-ΔΙΑΒΡΩΣΗ-ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ FRP

#### 3.6.1 ΓΕΝΙΚΑ

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 μηχανικές 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 συνήθως προκειμένου να προσομοιάσουν την μακροχρόνια έκθεση των υλικών χρησιμοποιούν επιταχυμένους μηχανισμούς διάβρωσης υποβάλλοντας τα δοκίμια σε συνθήκες πολύ πιο επιβλαβείς από αυτές που πρόκειται να επιδράσουν στην πραγματικότητα. Ωστόσο είναι αβέβαιο σε πιο 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.

#### 3.6.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ-ΦΩΤΙΑ

Αρχικά θα ορίσουμε την έννοια της θερμοκρασίας αλλαγής φάσεως (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.[6] Γενικά οι τιμές της  $T_g$  για τις διάφορες ρητίνες ποικίλουν και κυμαίνονται μεταξύ 70-175°C . Συνίσταται 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.[6]

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  $f_{fr}$  μειώνονται δραματικά.[2] 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.[6] Έτσι μειώνεται η καμπτική και η διατμητική αντοχή του μέλους. Ως εκ τούτου μπορεί να παρατηρηθούν εκτεταμένη ρηγματώση και μεγάλα βέλη κάμψεως ωστόσο ενδέχεται και ολική κατάρρευση του μέλους αν χαθεί η αγκύρωση του οπλισμού λόγω 'μαλακώματος' του  $f_{fr}$  ή αν η θερμοκρασία υπερβεί το θερμικό όριο των ινών (ίνες γυαλιού 880 °C, αράμιδου 180 °C, άνθρακα 1600 °C).[6] 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.

Σε περίπτωση ωστόσο που τα  $f_{fr}$  (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). [6]

Η έκθεση των  $f_{fr}$  επίσης σε χαμηλές θερμοκρασίες καθώς και οι θερμικοί 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.[6]

### 3.6.3 ΥΠΕΡΙΩΔΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Η έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να διαβρώσει τα  $f_{fr}$ . Οι υπεριώδεις ακτίνες προκαλούν χημικές αντιδράσεις στο πολυμερές υλικό της μήτρας ρητίνης με επακόλουθη υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του ινοπλισμένου πολυμερούς. Ωστόσο αν τα  $f_{fr}$  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  $f_{fr}$  και τη χρήση τους στο εργοτάξιο ώστε να μην εκτίθενται άμεσα στην ηλιακή ακτινοβολία. [2],[6]

### 3.6.4 ΥΓΡΑΣΙΑ

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 πολυμερής αλυσίδες [Bank and Gentry(1995)]. 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 [Hayes et al. (1998)]. Τα φαινόμενα αυτά είναι πιο έντονα σε κορεσμένο περιβάλλον και θερμοκρασίες >60°C.[6] 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.

### 3.6.5 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΑΠΟ ΧΛΩΡΙΔΙΑ ΚΑΙ ΑΛΚΑΛΙΑ

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 αποφλοίωση 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%.[6] 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.[6]

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 συνηθών 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.[2]

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 [Takewaka and Khin 1996; Rostasy 1997; Sen et al. 1998b], για ράβδους CFRP ,αφόρτιστες, μείωση αντοχής και ακαμψίας έως και 20% [Takewaka and Khin 1996]. [2]

### 3.6.6 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Προσεγγίσθηκε γενικά η ανθεκτικότητα των frp υπό την επίδραση διαφόρων παραγόντων. Στην πραγματικότητα όμως η σύγχρονη αλληλόδρασή τους, η ταυτόχρονη καταπόνηση του μέλους και φαινόμενα μακροχρόνιας φόρτισης επηρεάζουν επίσης τη συμπεριφορά του υλικού, ωστόσο δεν λήφθηκαν υπόψη.

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.

## 4 ΤΑ FRP ΩΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΜΨΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

### 4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Θα γίνει μια παρουσίαση των σημαντικότερων σημείων του σχεδιασμού όπως έχει ως τώρα αναπτυχθεί σύμφωνα με τους 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. Το κεφάλαιο βασίζεται στον ACI 440.1R-06 [2] και παράλληλα υπάρχουν και σχετικές αναφορές στις Ιαπωνικές και τις Καναδικές οδηγίες.

### 4.2 ΤΑ FRP ΩΣ ΡΑΒΔΟΙ ΟΠΛΙΣΜΟΥ-ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΚΑΜΨΗΣ

#### 4.2.1 ΓΕΝΙΚΑ

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 [Faza and GangaRao 1993a; Nanni 1993b; GangaRao and Vijay 1997a].

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 και ως εκ τούτου δεν διαθέτουν πλαστιμότητα. 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.

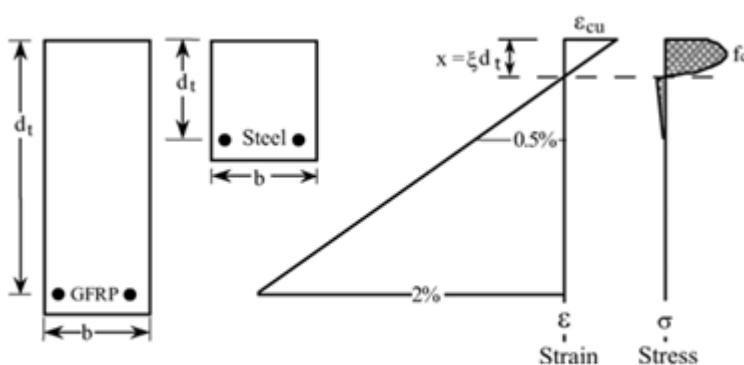
#### 4.2.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

- 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  $f_{tr}$  σε κάμψη θεωρείται γραμμικώς ελαστική έως την αστοχία (απουσία σημείου διαρροής)

#### 4.2.3 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ

Ο σχεδιασμός σε οριακή κατάσταση αστοχίας βασίζεται στην απαίτηση για ικανοποίηση της εξίσωσης  $\phi^* M_n \geq M_u$ , όπου  $\phi$  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  $f_{tr}$ ). Γενικά πρέπει να παρατηρηθεί ότι σε αντίθεση με τον χάλυβα τα  $f_{tr}$  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.



ΕΙΚΟΝΑ 4.1 [6]

#### 4.2.4 ΤΡΟΠΟΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

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  $\rho$  της εκάστοτε διατομής με την οριακή τιμή  $\rho_{fb}$  (ιδεατής 'διατομής ισορροπίας' για ταυτόχρονη αστοχία σκυροδέματος και οπλισμού, που προσδιορίζεται λογίζοντας την τάση θραύσεως του  $f_{fr}$ , εφόσον δεν διαρρέει).

Αν  $\rho_f < \rho_{fb}$  υπάρχει αστοχία της εφελκόμενης ζώνης (υπό-οπλισμένη διατομή) αντίστοιχα αν  $\rho_f > \rho_{fb}$  υπάρχει αστοχία της θλιβόμενης ζώνης (υπέρ-οπλισμένη διατομή). Στον παρακάτω πίνακα δίνονται κάποιες ενδεικτικές τιμές του  $\rho_{fb}$ .

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 ΤΥΠΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΟ  $\rho_b$  ΣΕ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΜΕ  $f'_c = 34.5\text{MPa}$  [2]

Bar type	Yield Strength $f_y$ or tensile strength $f_{tu}$ MPa	Modulus of elasticity GPa	$\rho_b$ or $\rho_{fb}$
Steel	414	200	0.0335
GFRP	552	41.4	0.0078
AFRP	1172	82.7	0.0035
CFRP	2070	152	0.0020

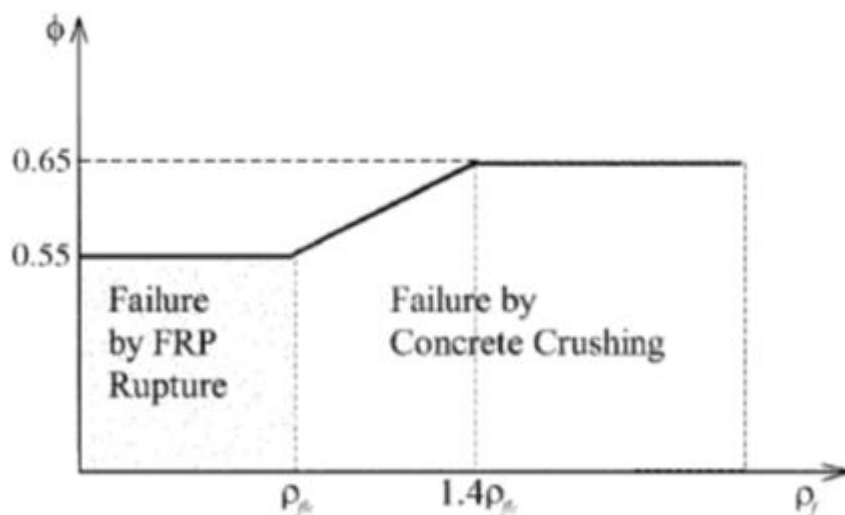
Παρατηρείται ότι οι τιμές για τα  $f_{fr}$  είναι σημαντικά μικρότερες από τις αντίστοιχες του χάλυβα (και σε μερικές περιπτώσεις είναι μικρότερες και της τιμής 0,0035 που ορίζει το ελάχιστο απαιτούμενο ποσοστό χάλυβα σε μια διατομή!). Αυτό οφείλεται στον λόγο  $E_f / f_{tu} < E_s / f_{sy}$ . Αυτό σημαίνει πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί πολύ λιγότερος οπλισμός  $f_{fr}$  για να παραληφθεί η ίδια ροπή. Ωστόσο όσο μικρότερο είναι το  $\rho$  τόσο μεγαλύτερες είναι οι τάσεις που αναπτύσσονται στον οπλισμό και αντίστοιχα στη θλιβόμενη ζώνη σκυροδέματος (θα πρέπει να ληφθούν υπόψη σε φαινόμενα ερπυσμού στο σκυροδέμα), 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  $\rho$  θέτει υπό εξέταση ζητήματα οικονομικότητας.

#### 4.2.5 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Καθώς τα  $f_{fr}$  δεν διαθέτουν πλαστιμότητα ο συντελεστής ασφαλείας ορίζεται πιο συντηρητικά από τον αντίστοιχο για σχεδιασμό με οπλισμό από χάλυβα.

- 0,55 για  $\rho_f \leq \rho_{fb}$
- Έτσι  $\varphi = 0,3 + 0,25 * \rho_f / \rho_{fb}$  για  $\rho_{fb} < \rho_f < 1,4 * \rho_{fb}$
- 0,65 για  $\rho_f \geq 1,4 * \rho_{fb}$

Σύμφωνα με τις ιαπωνικές οδηγίες ο συντελεστής αυτός μπορεί να λαμβάνεται ίσος με 0.77.



ΕΙΚΟΝΑ 4.2 [2]

#### 4.2.6 ΠΟΛΛΑΠΛΕΣ ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ

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 εφελκόμενη 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.

#### 4.2.7 ΑΝΑΚΑΤΑΝΟΜΗ ΡΟΠΩΝ

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.

#### 4.2.8 ΩΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ ΘΛΙΨΗΣ

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 υποστυλώματα 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 ffr θα πρέπει να τοποθετούνται με επιμέλεια ώστε να εξασφαλισθούν από τυχόν εκτροπή υπό θλιπτικά φορτία.

#### 4.2.9 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ

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 ffr ,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 [Nanni 1993a; GangaRao and Vijay 1997a; Theriault and Benmokrane 1998].

Για την μόρφωση 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 θα ληφθούν υπόψη παράγοντες όπως το μέτρο ελαστικότητας, η αντοχή συνάφειας και η αντοχή σε διάβρωση.

#### 4.2.10 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΡΩΓΜΩΝ

Σε αντίθεση με τις ράβδους χάλυβα ,αυτές από ffr 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.

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

### 4.3 ΤΑ FRP ΩΣ ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ-ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

#### 4.3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η αντοχή σε διάτμηση είναι συνάρτηση εσωτερικών μηχανισμών απόκρισης του υλικού η συνεισφορά των οπείων 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 .

#### 4.3.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΛΛΗΛΕΜΠΛΟΚΗΣ

Στην εφελκυσμένη 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.

#### 4.3.3 ΔΡΑΣΗ ΒΛΗΤΡΟΥ

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 εφελκυσμό του σκυροδέματος. Στα μέλη οπλισμένα με διαμήκη οπλισμό από frp η συνεισφορά της δράσης βλήτρου μπορεί να θεωρηθεί αμεληταία καθώς λόγω της ανισότροπης φύσης τους η ακαμψία τους σε άξονες κάθετους στον διαμήκη είναι πάρα πολύ μικρή. [Kanakubo and Shindo (1997), Tottori and Wakui (1993)].

#### 4.3.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

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.

Σύμφωνα με τον CANADIAN HIGHWAY BRIDGE CODE (CSA2000) 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 (Pristley et al. 1996).

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  $r_b / d_b = 3$

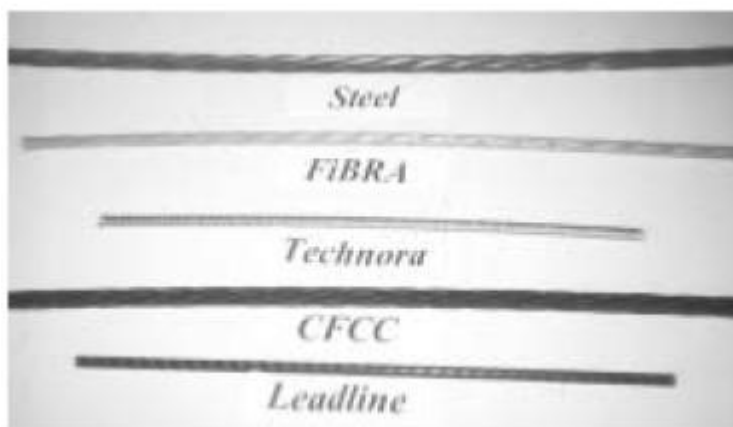
## 5 ΠΡΟΕΝΤΑΣΗ ΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΤΕΝΟΝΤΕΣ ΑΠΟ FRP

### 5.1 ΓΕΝΙΚΑ

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 [3] 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. Το κεφάλαιο βασίζεται στον ACI 440.4R-04 [3] και παράλληλα υπάρχουν και σχετικές αναφορές στις Ιαπωνικές και τις Καναδικές οδηγίες.

### 5.2 ΤΕΝΟΝΤΕΣ ΑΠΟ FRP

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. 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. [3]



ΕΙΚΟΝΑ 5.1 [3]

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ενδεικτικά οι ιδιότητες κάποιων τενόντων από frp.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΕΝΟΝΤΩΝ ΑΠΟ FRP [3]

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 <sup>3</sup>	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 <sup>-6</sup>	-2*10 <sup>-6</sup>	-3*10 <sup>-6</sup>	-	-0.9*10 <sup>-6</sup>	0.5*10 <sup>-6</sup>
Transverse thermal expansion coefficient/°C	50*10 <sup>-6</sup>	60*10 <sup>-6</sup>	-	-	27*10 <sup>-6</sup>	21*10 <sup>-6</sup>
Relaxation ratio at room temperature % loss from jacking stress	11 to 14	12 at 103h	8to13 at 103h	6 to 9 at 105h	2 to 3	0.5 to 1 at 102h



ΕΙΚΟΝΑ 5.2 [4]

### 5.3 ΑΓΚΥΡΩΣΕΙΣ

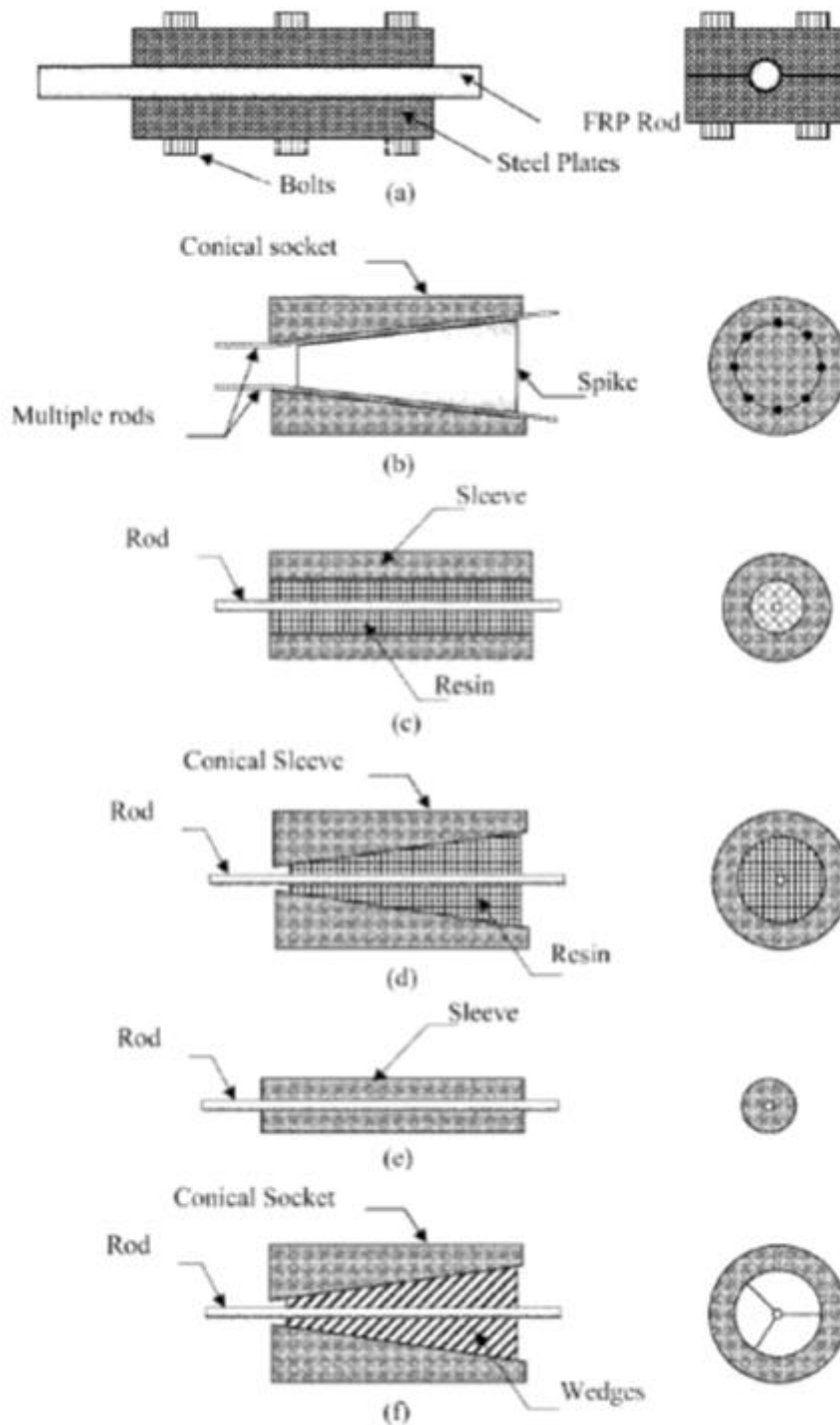
Η σωστή αγκύρωση των τενόντων από frp είναι ιδιαίτερα σημαντική και αποτελεί μείζον θέμα έρευνας ώστε η προένταση με frp να αποτελέσει στο μέλλον μια ανταγωνιστική λύση. Τα συστήματα αγκυρώσεως που έχουν αναπτυχθεί για χαλύβδινους τένοντες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξίσου για την προένταση με frp 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.[4] Απαιτείται λοιπόν μια επανεξέταση της φιλοσοφίας σχεδιασμού. Γενικά τα συστήματα αγκυρώσεων για frp που αναπτύσσονται είναι προσαρμοσμένα κάθε φορά στις ιδιαίτερες ιδιότητες του εκάστοτε τένοντα, κάτι που όμως επιβαρύνει την οικονομικότητα της κατασκευής. Παρακάτω θα αναφερθούν γενικά διάφορα συστήματα αγκυρώσεως που είναι διαθέσιμα για τένοντες από frp.





ΕΙΚΟΝΑ 5.3 [4]

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι βασικοί τύποι συστημάτων αγκύρωσης για τένοντες από frp.



*(a) Clamp; (b) plug and cone; (c) straight sleeve; (d) contoured sleeve; (e) metal overlay; and (f) split wedge anchorages.*

ΕΙΚΟΝΑ 5.4 [4]

### 5.3.1 CLAMP ANCHORAGE [3],[4]

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.

### 5.3.2 PLUG AND CONE ANCHORAGE [3],[4]

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.

### 5.3.3 STRAIGHT SLEEVE ANCHORAGE [3],[4]

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.

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

#### 5.3.4 CONTOURED SLEEVE ANCHORAGE [3],[4]

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).

#### 5.3.5 METAL OVERLAYING [3],[4]

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 προκαθορισθεί 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.

#### 5.3.6 SPLIT-WEDGE ANCHORAGE [3],[4]

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.

### 5.3.7 ΤΡΟΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΓΚΥΡΩΣΗΣ [3]

Οι πιθανοί τρόποι αστοχίας του συστήματος αγκύρωσης είναι οι εξής:

- 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 επιτρέψει 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.

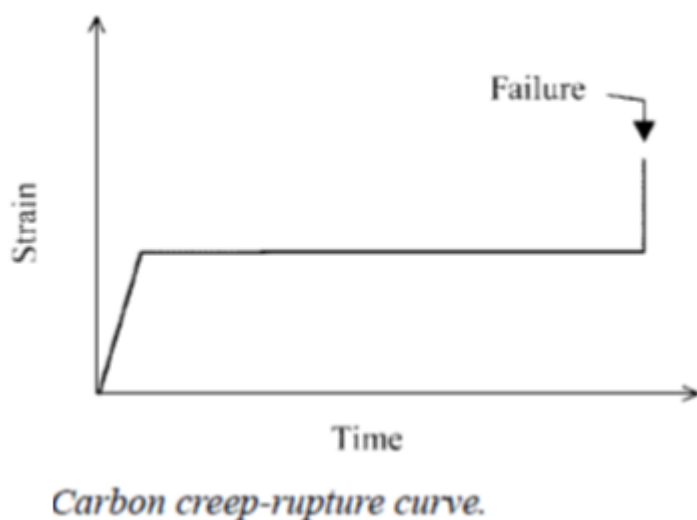
## 5.4 ΘΕΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

### 5.4.1 ΓΕΝΙΚΑ

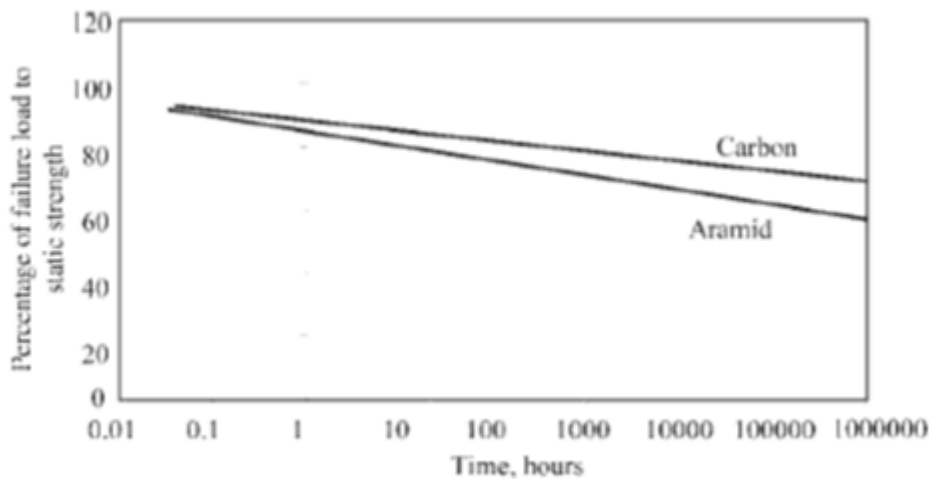
Γενικά η διαδικασία σχεδιασμού φορέων προεντεταμένων με frp είναι παρόμοια με την αντίστοιχη για προένταση με χάλυβα. Ιδιαίτερης σημασίας είναι ο προσδιορισμός της δύναμης προεντάσεως, ο υπολογισμός των μειώσεων και των απωλειών και τέλος ο έλεγχος των τάσεων στις κρίσιμες διατομές. Παρακάτω προσεγγίζονται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

#### 5.4.2 ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΗ ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΛΟΓΩ ΠΡΟΕΝΤΑΣΕΩΣ [3],[4]

Η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση λόγω προέντασης καθορίζεται από το φαινόμενο της ερπυστικής διάρρηξης των τενόντων από  $f_{pr}$ . 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  $f_{pr}$  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. Σύμφωνα με τους Burke and Dolan (2001) για τους CFRP τένοντες η μέγιστη τάση προεντάσεως πρέπει να περιοριστεί στο 60% της εφελκυστικής αντοχής και για τους AFRP στο 50% αντίστοιχα [4]. 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  $f_{pr}$ . Συγκριτικά αναφέρεται ότι οι τένοντες από χάλυβα συνήθως τανύονται στο 80-85% της αντοχής τους σε εφελκυσμό.



ΕΙΚΟΝΑ 5.5 [3]



ΕΙΚΟΝΑ 5.6 [3]

#### 5.4.3 ΑΠΩΛΕΙΕΣ-ΜΕΙΩΣΕΙΣ ΠΡΟΕΝΤΑΣΕΩΣ

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.

#### 5.4.4 ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ

##### 5.4.4.1 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΛΟΓΩ ΧΑΛΑΡΩΣΗΣ [3] , [4]

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 :

- $R_p$ : 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 τες ανεξάρτητες μεταξύ τους) και έπειτα επαλληλίζοντάς τες, δηλαδή :

$$REL = R_p + R_s + R_f$$

### 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 :

- ο 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

$$R_p = n_r * v_r$$

### 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.

### Χαλάρωση των ινών ( $R_f$ ) :

Η χαλάρωση των ινών εξαρτάται από τον τύπο της ίνας.

Σύμφωνα με τον ACI 440.4R [3] 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 υποθεθεί απώλεια 6-18% της αρχικής τάσης, για σχεδιασμό με διάρκεια ζωής της κατασκευής 100 έτη (Dolan 1989).

Σύμφωνα με τις καναδικές οδηγίες [4] με βάση τον CAN/CSA-S806-02 ελλείψει άλλων δεδομένων η χαλάρωση των ινών μπορεί να υπολογισθεί από τους παρακάτω τύπους συναρτήσεως του χρόνου  $t$  σε μέρες :

- ο CFRP relaxation(%) =  $0.231 + 0.345 * \log(t)$
- ο AFRP relaxation(%) =  $3.38 + 2.88 * \log(t)$

#### 5.4.4.2 ΑΠΟΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΜΗ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΥΣ ΤΕΝΟΝΤΕΣ [3]

Συνήθως οι τένοντες καμπυλώνονται κατά μήκος της δοκού που προεντείνουν. Οι τένοντες από  $f_{fr}$  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. Οι Dolan et al. (2000) πρότειναν τον παρακάτω τύπο για τον υπολογισμό αυτής της τάσης επαύξησης:  $f_h = (E_f * R_t) / R$

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 :

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

Επιπλέον οι καναδικές οδηγίες [4] αναφέρουν πως σύμφωνα με τα πορίσματα μιας έρευνας που διεξήχθη στο πανεπιστήμιο του Waterloo (Quayle 2005) 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:

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

Όπου  $r$  η ακτίνα του τένοντα,  $P$  η δύναμη προέντασης και  $\theta$  η γωνία εκτροπής.

#### 5.4.4.3 ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ ή ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΟΤΗΤΑ [3]

Η πλαστιμότητα και η παραμορφωσιμότητα είναι δύο έννοιες οι οποίες πρέπει να διασαφηνιστούν στην περίπτωση των  $f_{fr}$  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  $f_{fr}$  συνεχίζει να παραμορφώνεται ελαστικά μέχρι την αστοχία. Με βάση λοιπόν τον κλασσικό ορισμό της πλαστιμότητας τα μέλη από σκυρόδεμα προεντεταμένα με  $f_{fr}$  παρουσιάζουν σχεδόν μηδενική πλαστιμότητα. Βέβαια με διάφορες μεθόδους όπως η περίσφυξη του



σκυροδέματος ή με συνδυασμό εσωτερικής-εξωτερικής προέντασης μπορεί να ενισχυθεί η πλάστιμη 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.

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. Οι Dolan and Burke 1996 έδωσαν τον παρακάτω τύπο για τον προσδιορισμό της παραμορφωσιμότητας:

$$DI = ((1-k)/(1-\alpha/(d*\beta_1))) * (\epsilon_{pu}/\epsilon_{ps})$$

Όπου

$-\alpha = \rho * d * f_{pu} / (0.85 * f'_c)$  , το βάθος του ισοδύναμου τετραγώνου των τάσεων κατά στη φάση αστοχία

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

$-\epsilon_{pu}$  η συνολική παραμόρφωση του *frp* τένοντα

$-\epsilon_{ps}$  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. Σύμφωνα με τις καναδικές οδηγίες [4] 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.

#### 5.4.5 ΘΕΜΑΤΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗΣ

##### BOND AND TRANSFER LENGTH [3]

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 bond and transfer length 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:

- 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 των ινών και της πολυμερούς ρητίνης και τις κατ' όγκο αναλογίες του στυν τρόπου τάνυσης και το μέγεθος της δύναμης προεντάσεως
- την αντοχή του σκυροδέματος και το πάχος επικάλυψης

Το ελάχιστο απαιτούμενο bond and transfer length πρέπει να υπολογίζεται ως το άθροισμα του transfer length και του flexural bond length:

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

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

Το flexural bond length ορίζεται ως το επιπλέον μήκος πέραν του transfer length το οποίο απαιτείται έτσι ώστε ο τένοντας να αναπτύξει την πλήρη εφελκυστική του αντοχή.

## 5.5 ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗ ΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΤΕΝΟΝΤΕΣ ΑΠΟ FRP



ΕΙΚΟΝΑ 5.7 [3]

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

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.

Ως κύρια πλεονεκτήματά της αναφέρονται η δυνατότητα επιθεωρήσεως κατά τη διάρκεια ζωής του έργου, η δυνατότητα επαναρύθμισης της δύναμης προεντάσεως-επαναάνυσης, 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 σκυρόδεμα δεν καλείται να παρέχει αντιδιαβρωτική προστασία στους τένοντες.

Ωστόσο η άμεση έκθεσή τους στις συνθήκες του περιβάλλοντος απαιτεί ειδικά συστήματα αντιδιαβρωτικής προστασίας (επιδερμικές 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. 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 σκυρόδεμα 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.

## 6 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ FIBER BRAGG GRATING

### ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

#### 6.1 'ΕΞΥΠΝΑ' ΥΛΙΚΑ - 'ΕΞΥΠΝΕΣ' ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Οι ολοένα και πιο υψηλές απαιτήσεις των σύγχρονων τεχνικών έργων οδήγησαν τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη των 'έξυπνων' υλικών και κατασκευών. Ως 'smart structural health monitoring system' 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.[37] Αυτή η φιλοσοφία σχεδιασμού μπορεί να οδηγήσει σε πιο ασφαλείς και οικονομικές λύσεις και σε αποφυγή μιας πιθανής υπερδιαστασιολόγησης.

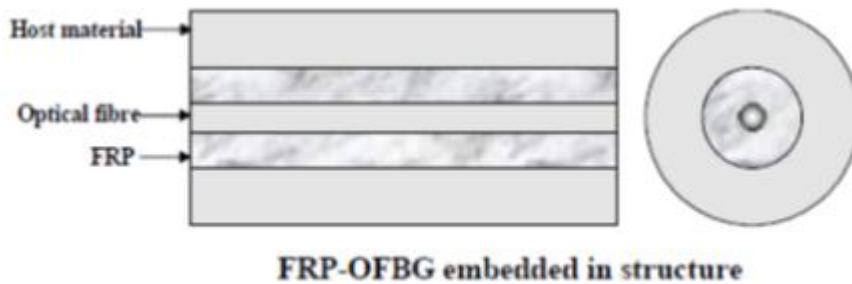
#### 6.2 ΕΙΔΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

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 : μικρές διαστάσεις και βάρος, υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία, μεγάλη ανθεκτικότητα σε διάβρωση και μη αγωγιμότητα σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία.[40]

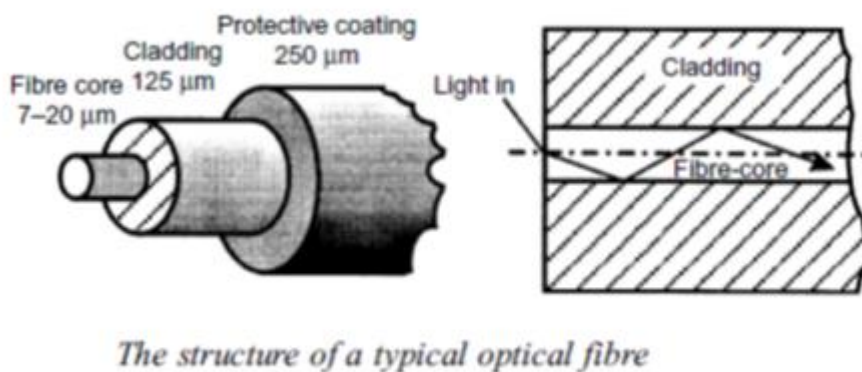
#### 6.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ FBG ΚΑΙ FRP

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.[40] Έτσι ο σπλισμός από frp στο σκυρόδεμα μπορεί να λειτουργήσει ως 'έξυπνος' σπλισμός. 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 σπλισμού στο σκυρόδεμα

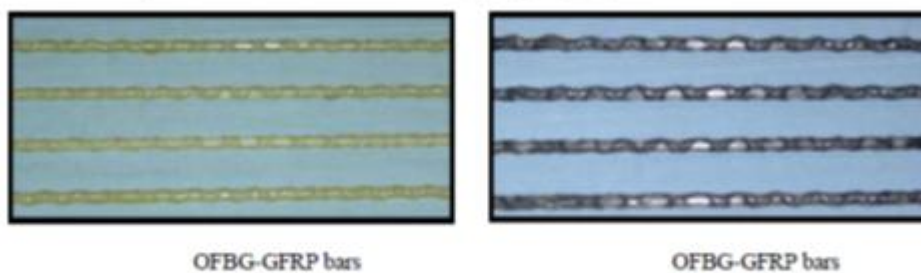
είναι η ανεπαρκής γνώση των ιδιοτήτων τους καθώς η εμπειρία από τις εφαρμογές τους στα έργα πολιτικού μηχανικού είναι ακόμη μικρή. Έτσι η ενσωμάτωση ενός συστήματος FBG μπορεί να παρέχει ένα δίκτυ ασφαλείας έναντι μιας ενδεχόμενης αστοχίας ενώ παράλληλα εμπλουτίζει σημαντικά τη γνώση για τη συμπεριφορά των FRP ως οπλισμού στο σκυρόδεμα. Τέτοια συστήματα 'έξυπνου' οπλισμού FRP-FBG συνεχώς αναπτύσσονται και έχουν βρει εφαρμογή σε πολλές κατασκευές.



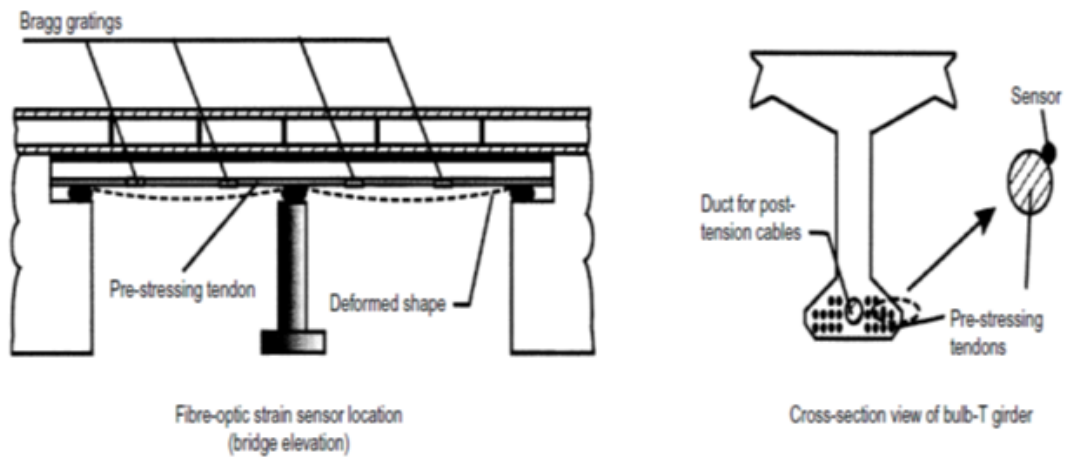
ΕΙΚΟΝΑ 6.1 [35]



ΕΙΚΟΝΑ 6.2 [37]



ΕΙΚΟΝΑ 6.3 [34]



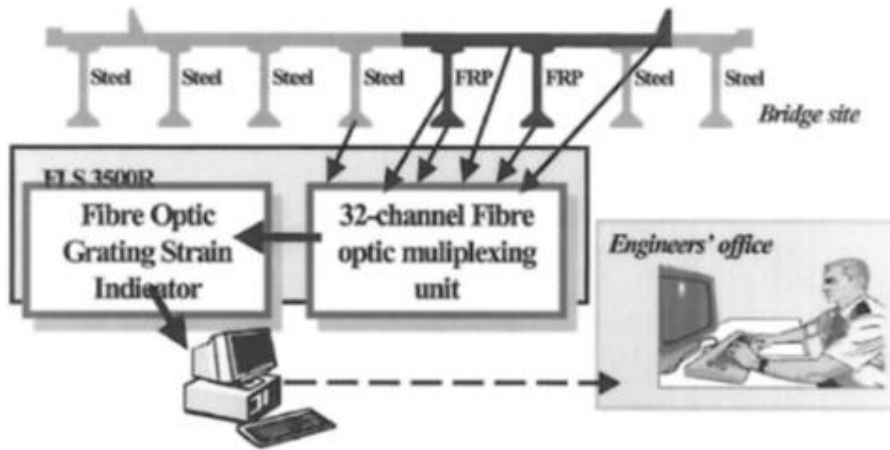
*Schematic illustration of strain measurements from the Beddington Trail Bridge sensor array*

EIKONA 6.4 [37]



*Installation process of the grating sensors on the girder surface*

EIKONA 6.5 [37]



*Optical sensing technology.*

EIKONA 6.6 [38]



## 7 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ FRP ΣΕ ΓΕΦΥΡΕΣ

### 7.1 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 [6]. 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.

### 7.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΓΕΦΥΡΩΝ ΠΡΟΕΝΤΕΤΑΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΕΝΟΝΤΕΣ ΑΠΟ FRP

#### 7.2.1 HEIWEI BRIDGE IN HUAI'AN JIANGSU PROVINCE [20] , [31]

Η Heiwei Bridge in Huai'an Jiangsu Province 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 κιβωτωειδούς 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.



ΕΙΚΟΝΑ 7.1 [20]



ΕΙΚΟΝΑ 7.2 [20]

#### 7.2.1.1 ΔΟΚΟΙ ΠΡΟΕΝΤΕΤΑΜΕΝΕΣ ΜΕ FRP

##### 7.2.1.1.1 ΥΛΙΚΑ

Στην αγορά διατίθενται δύο τύποι τενόντων από CFRP : το CFRP rod και το CFCC(carbon fibre composite cable), στην περίπτωση της Heiwei Bridge χρησιμοποιήθηκαν τένοντες τύπου CFCC, ωστόσο στα πλαίσια του

σχεδιασμού και για λόγους σύγκρισης έγινε μελέτη και για προένταση με CFRP rod. Στους παρακάτω πίνακες δίνονται οι αντίστοιχες ιδιότητες των τενόντων. [31]



a) CFCC Cable



b) CFRP Rod

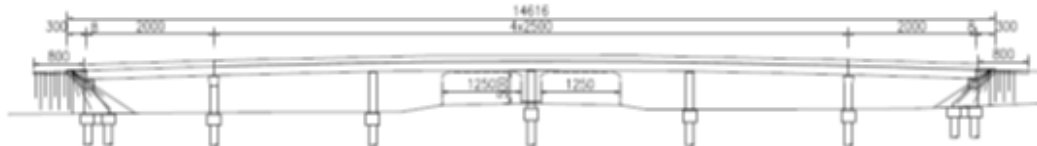
Parameters of CFCC and CFRP rod used as prestressing tendons

Nominal Diameter (mm)	Effective Cross Section Area	Modulus of Elasticity (Gpa)	Nominal Mass Density (g/m <sup>3</sup> )	Elongation (%)	Heat Resistance (°C)	Guaranteed Tensile Strength (MPa)	Fatigue Capacity/ Guranteed Capacity	Stress Limited Value/Guaranteed Tensile Strength			
								During Construction	Immediately after Prestressing	Service Limit State	
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 <sup>-6</sup> )	Anchor Deformation and Tendon Contraction (mm)	Stress Limited Value/Guaranteed Tensile Strength						
$\mu$ (1/rad)	$k$ (1/m)				During Construction	Immediately after Prestressing	Service Limit State				
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			

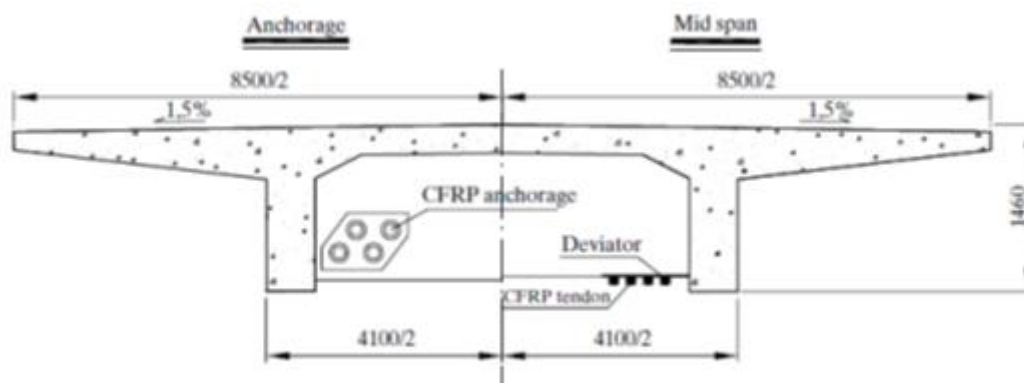
Note: CFCC product is made in Japan, and CFRP rod is made in China.

### 7.2.1.1.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

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.



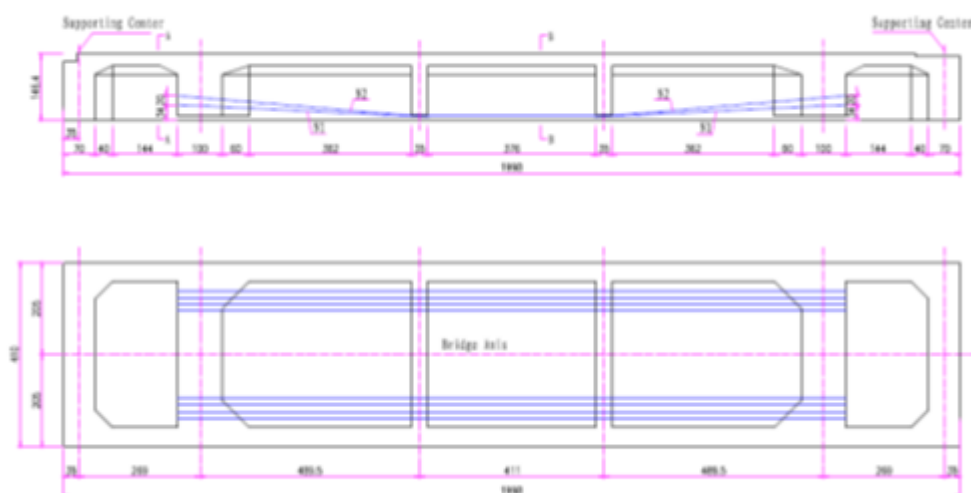
ΕΙΚΟΝΑ 7.4 [31]



ΕΙΚΟΝΑ 7.5 [31]

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  $4,87^\circ$  καθώς για τιμές  $>5^\circ$  παρατηρείται σημαντική απομείωση της αντοχής του τένοντα από CFRP.

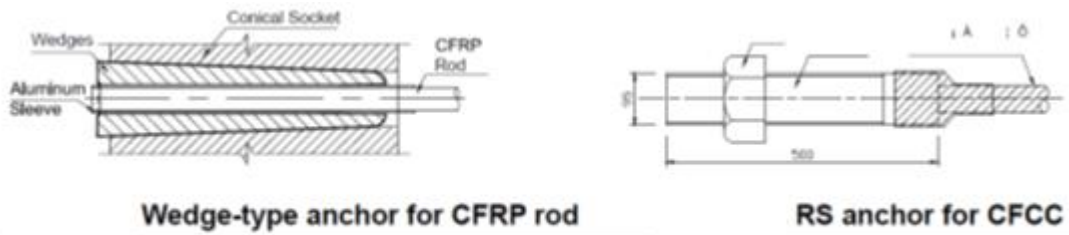


ΕΙΚΟΝΑ 7.6 [31]

### 7.2.1.1.3 ΑΓΚΥΡΩΣΗ

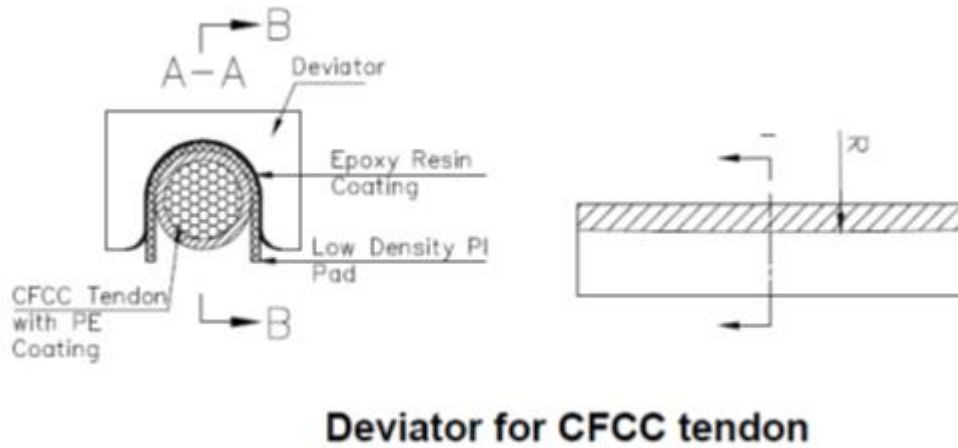
Για την αγκύρωση των CFRP rods σχεδιάστηκε από τους μελετητές το σύστημα αγκυρώσεως που απεικονίζεται στα παρακάτω σχήματα και είναι προσαρμοσμένο στις ιδιαίτερες ιδιότητες των CFRP τενόντων. Πρόκειται για μια multi-rod wedge anchor που αποτελείται από μια ανοξείδωτη μεταλλική κωνική θήκη και ανοξείδωτες 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 σφηλών είναι τέτοια που να εξασφαλίζει μια ομαλή κατανομή των ακτινικών τάσεων.

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



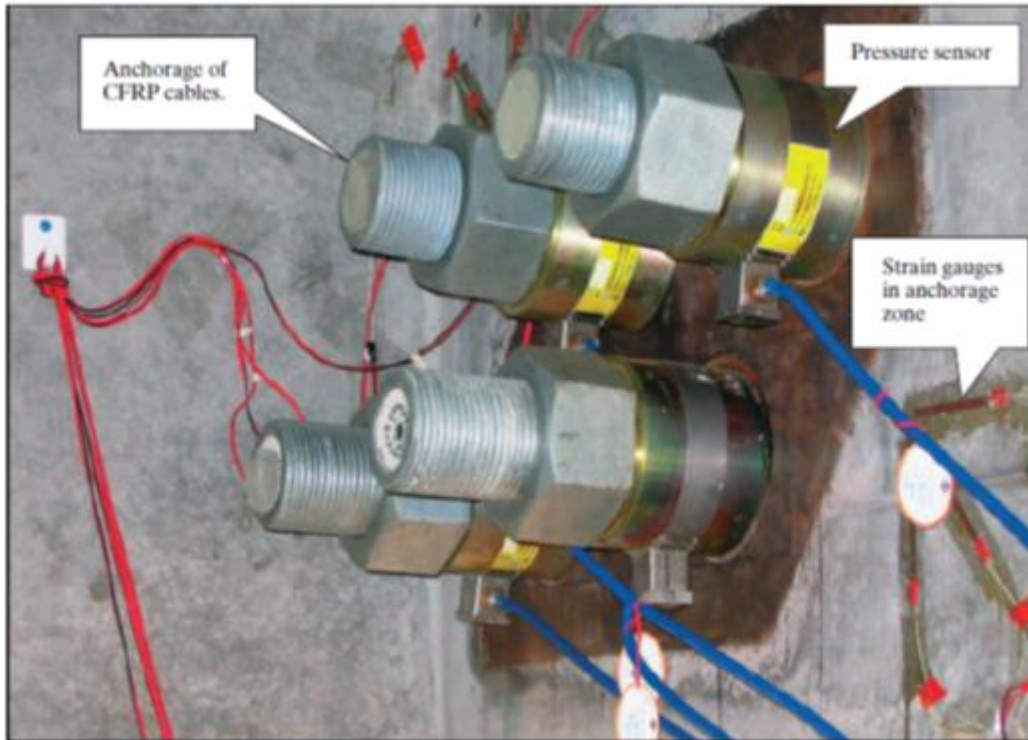
ΕΙΚΟΝΑ 7.7 [31]

Επίσης ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στα σώματα εκτροπής 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.



ΕΙΚΟΝΑ 7.8 [31]

Επιπλέον τοποθετήθηκαν strain and pressure sensors 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.



ΕΙΚΟΝΑ 7.9 [20]

#### 7.2.1.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- 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 σ.θ.δ του είναι ίσος με  $11E-6$  και του μπετού  $10E-6$ . 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 υπολογίσθηκε 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 υπολογίσθηκαν 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 υπολογίσθηκαν όπως για χαλύβδινους τένοντες απλά λαμβάνοντας υπόψη το μέτρο ελαστικότητας του CFRP. Τέλος συνυπολογίσθηκε και η επιρροή της θερμοκρασίας.

Ο παρακάτω πίνακας απεικονίζει τα συγκριτικά αποτελέσματα των δύο ακραίων ανοιγμάτων της γέφυρας.[31]

**Comparison of material quantities for the side span superstructures**

Design Proposal	Cross-Section	Concrete [m <sup>3</sup> ]	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

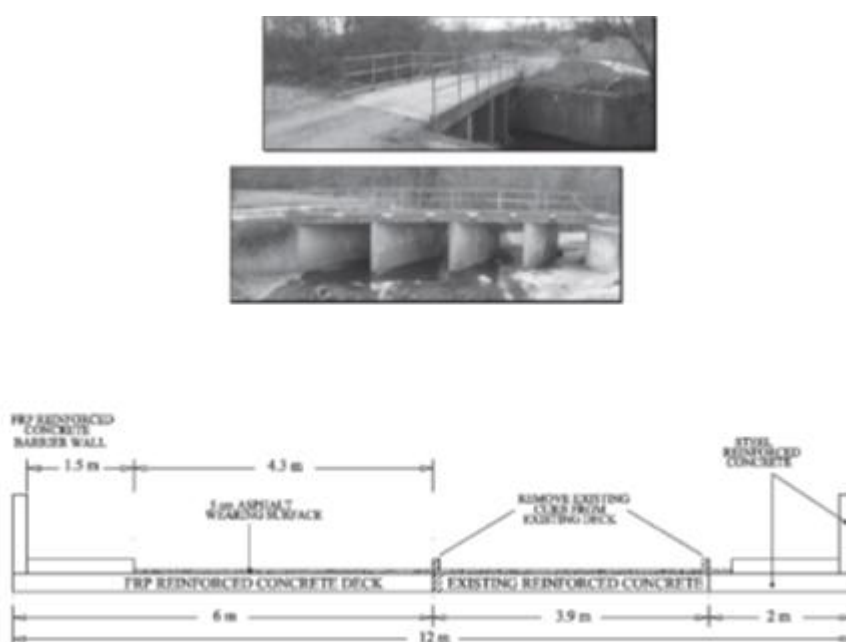
Παρατηρούμε λοιπόν ότι για προένταση με frp χρησιμοποιήθηκε συνολικά 10% λιγότερο μπετό 42% λιγότερος χάλυβας ωστόσο το συνολικό κόστος στην περίπτωση του CFRP τένοντα είναι σημαντικά υψηλότερο κυρίως λόγω του πολύ υψηλού κόστους του τένοντα και της αγκύρωσής του.

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.

## 7.2.2 FICO et al. bridge in the City of Rolla (Southview Drive on Carter Creek) [27]

### 7.2.2.1 ΓΕΝΙΚΑ

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 τοιχία από σκυρόδεμα τοποθετημένα ενδιάμεσα στο άνοιγμα της γέφυρας.



ΕΙΚΟΝΑ 7.10 [27]

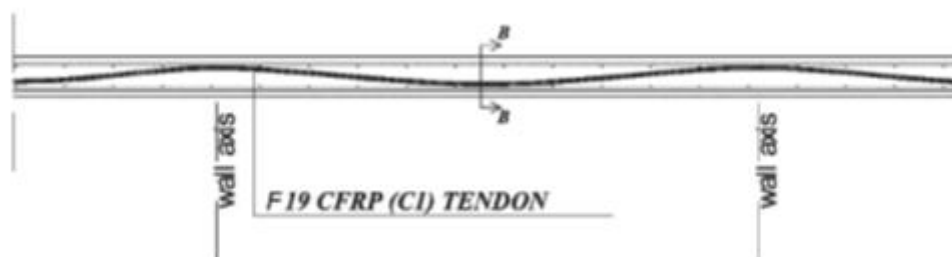
Για τις ιδιότητες των ράβδων και των τενόντων frp χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που δόθηκαν από τον κατασκευαστή. Για την δημιουργία των φορτίσεων σχεδιασμού ακολουθήθηκε ο AASHTO και για τον υπολογισμό του οπλισμού ο ACI 440.1R-03.

### 7.2.2.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ

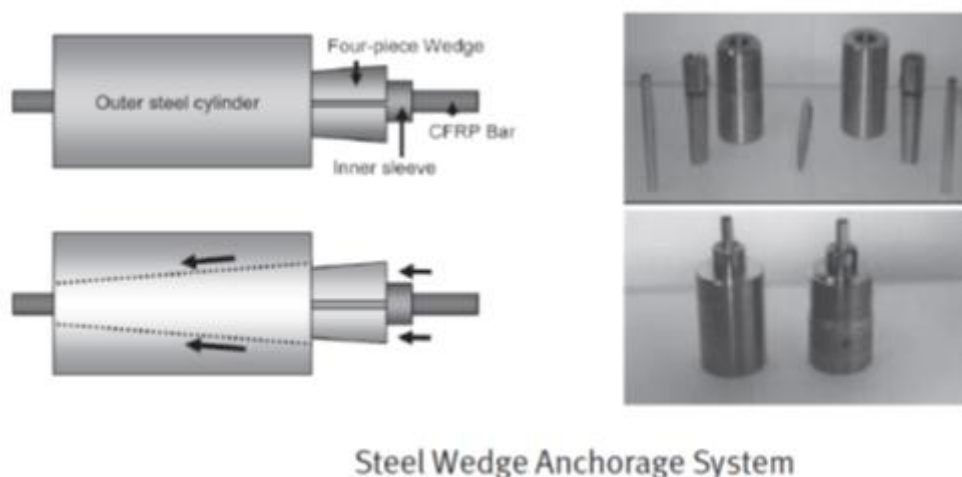
Ως οπλισμός κάμψης και διάτμησης χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι GFRP. Για την προένταση της πλάκας σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν CFRP τένοντες οι οποίοι τοποθετήθηκαν εσωτερικά κατά μήκος της πλάκας. Η τάνυση των τενόντων έγινε μια βδομάδα μετά την σκλήρυνση του σκυροδέματος. Για την αγκύρωση χρησιμοποιήθηκε 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 strain gauges για να παρακολουθείται η συμπεριφορά της πλάκας κατά τη φάση λειτουργίας της γέφυρας.



ΕΙΚΟΝΑ 7.11 [27]



ΕΙΚΟΝΑ 7.12 [27]

### 7.2.2.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Λόγω της προέντασης αυξήθηκε η διατμητική αντοχή της πλάκας πάνω από 70% και ικανοποιούνται όλα τα κριτήρια λειτουργικότητας.
- Η προσέγγιση του AC1440.1R-03 για τον προσδιορισμό της αντοχής διάτμησης είναι αρκετά συντηρητική, αντίθετα η προσέγγιση των Tureyen and Frosh είναι πιο κοντά στις πραγματικές μετρήσεις.
- Η διαδικασία κατασκευής και οι λεπτομέρειες όπλισης όταν χρησιμοποιείται οπλισμός από frp σε μια πλάκα σκυροδέματος μοιάζουν αρκετά με τις αντίστοιχες για συνήθη οπλισμό από χάλυβα.

### 7.2.3 ΑΛΛΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ FRP ΣΕ ΓΕΦΥΡΕΣ

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 ιδιαίτερως 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 : Asturias Bridge (2004), M11 Bridges (2007), Canary Islands footbridge (2010), Almunecar footbridge (2010), Cuenca footbridge (2011) ,πρόκειται για γέφυρες που κατασκευάστικαν 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 χρησιμοποιούνται ίνες εξ' ολοκλήρου από άνθρακα. Τέλος προτιμάται ως μέθοδος παραγωγής η resin infusion instead of hand lay up. [21]



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

ΕΙΚΟΝΑ 7.13 [21]



(a)



(b)

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

EIKONA 7.14 [21]



(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.

EIKONA 7.15 [21]



(a)



(b)

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

EIKONA 7.16 [21]



(a)



(b)

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

### ΕΙΚΟΝΑ 7.17 [21]

Ακόμη τα frp έχουν βρει εφαρμογή και στη δημιουργία πεζογεφυρών. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν η Fiber Line Bridge στην Δανία ,η Lleida Bridge στην Ισπανία ,η All-FRP Pontresina Bridge, η ApATeCH arched footbridge στη Ρωσία και άλλες.



ApATeCh arched footbridge

### ΕΙΚΟΝΑ 7.18 [www. apatech. ru]



Installation of the footbridge

ΕΙΚΟΝΑ 7.19 [www.apatech.ru]

Επιπλέον τα ftr δεν είναι αγωγοί της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, χαρακτηριστικό που τα καθιστά ιδιαίτερα δημοφιλή σε έργα σύγχρονων σιδηροδρομικών κατασκευών 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. [6]



*Magnetic Levitation Railway System in Japan*

ΕΙΚΟΝΑ 7.20 [6]

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.

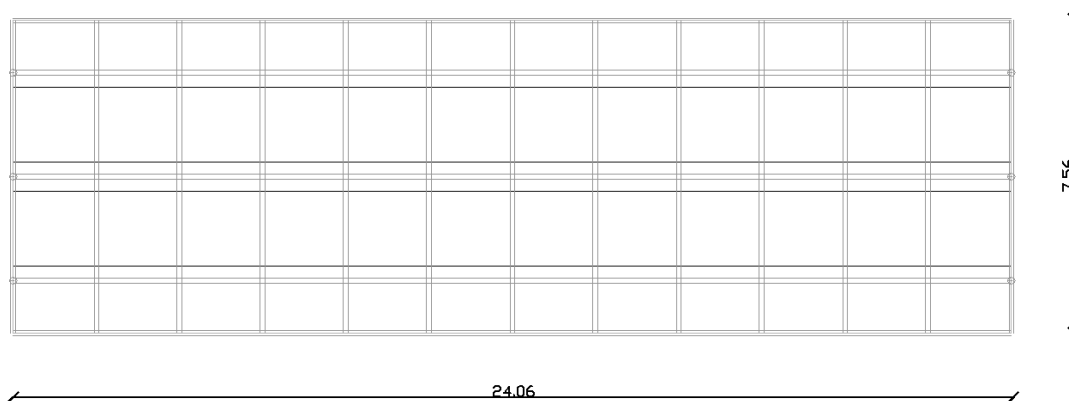
## 8 ΕΦΑΡΜΟΓΗ

### ΓΕΦΥΡΑ ΠΡΟΕΝΤΕΤΑΜΕΝΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΜΕ ΤΕΝΟΝΤΕΣ ΑΠΟ CFRP

Η γέφυρα προσομοιώθηκε και μελετήθηκε με το πρόγραμμα sofistik.

#### 8.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

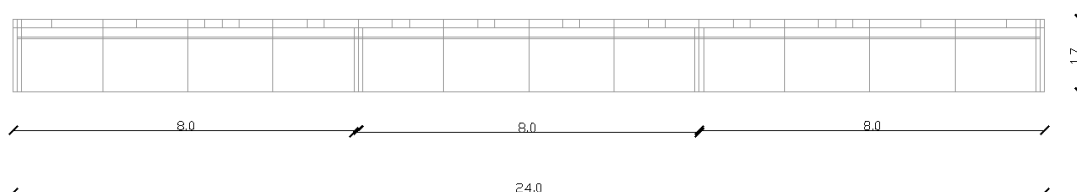
Στην εφαρμογή που παρουσιάζεται παρακάτω μελετήθηκε η χρήση CFRP τενόντων για την εξωτερική προένταση των δοκών μιας γέφυρας. Πιο συγκεκριμένα πρόκειται για μια απλή αμφιέριστη γέφυρα ανοίγματος 24,0 μέτρων και πλάτους 7,50 μέτρων.



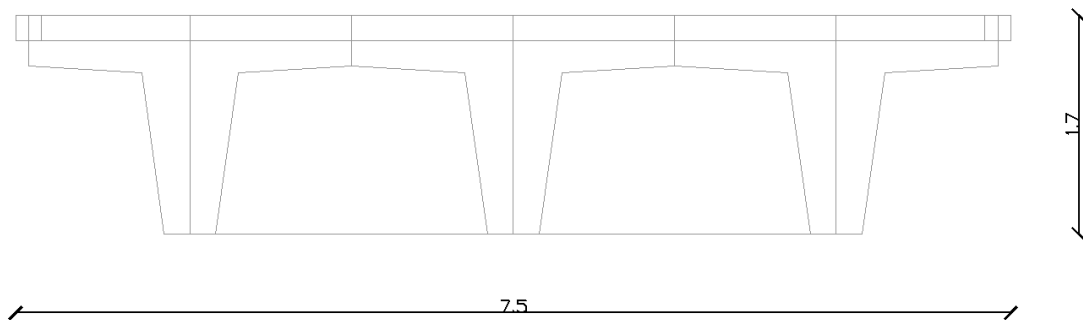
ΚΑΤΟΨΗ ΓΕΦΥΡΑΣ

##### 8.1.1 ΚΥΡΙΕΣ ΔΟΚΟΙ και ΔΙΑΔΟΚΙΔΕΣ

Το κατάστρωμα στηρίζεται σε τρεις προεντεταμένες δοκούς διατομής τύπου T με πλάτος 2,5m και ύψος 1,7m η κάθε μια. Ακόμη κατά μήκος του ανοίγματος έχουν τοποθετηθεί συνολικά τέσσερις διαδοκίδες, δύο ακραίες και δύο ενδιάμεσες ανά 8,0m, οι οποίες συνδέουν εγκάρσια τις τρεις κύριες δοκούς.

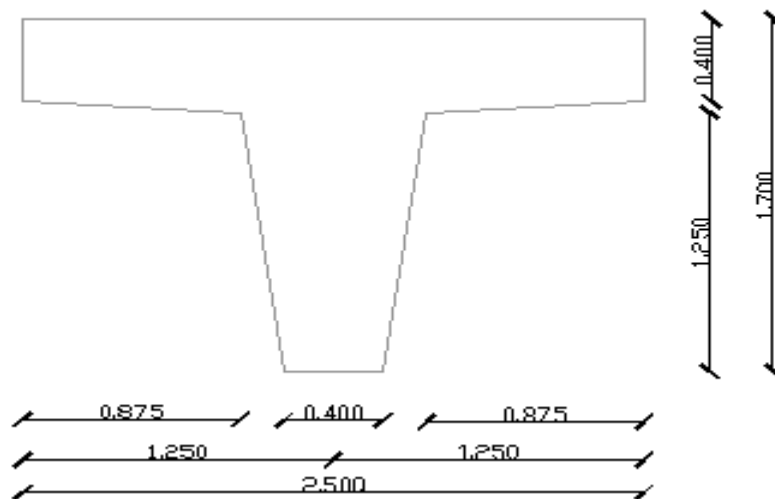


ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΟΨΗ



ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΟΨΗ

Αναλυτικά οι διαστάσεις της κύριας δοκού φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:

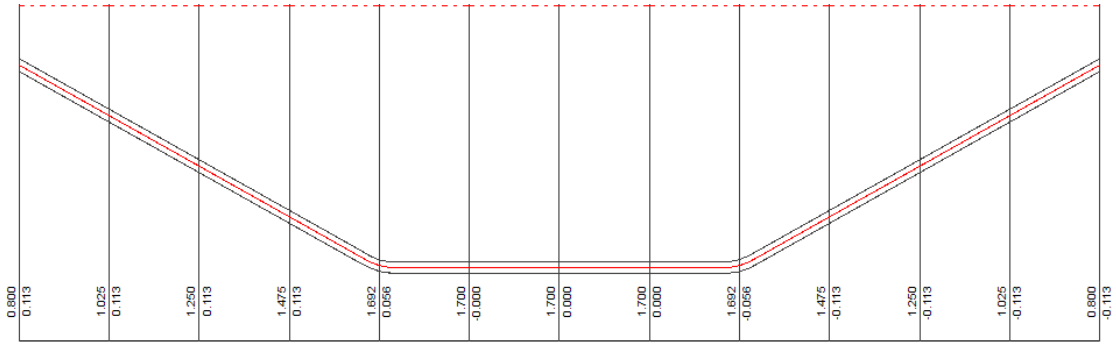


### 8.1.2 ΤΕΝΟΝΤΕΣ

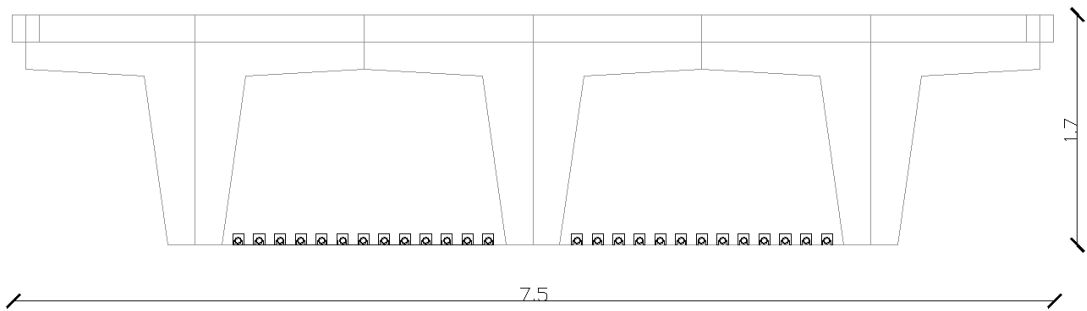
Οι τένοντες έχουν τοποθετηθεί εξωτερικά ως προς τις κύριες δοκούς, διατρέχουν όλο το μήκος της γέφυρας, καμπυλώνονται στα κατάλληλα διαμορφωμένα σώματα εκτροπής στις ενδιάμεσες διαδοκίδες και αγκυρώνονται στις ακραίες διαδοκίδες.

Η χάραξη τους ακολουθεί πολυγωνική μορφή, η εκκενρότητα τους στις ακραίες διατομές ως προς την άνω ίνα της διατομής είναι  $e=0.8\text{m}$  ενώ στις ενδιάμεσες  $e=1.7\text{m}$ .



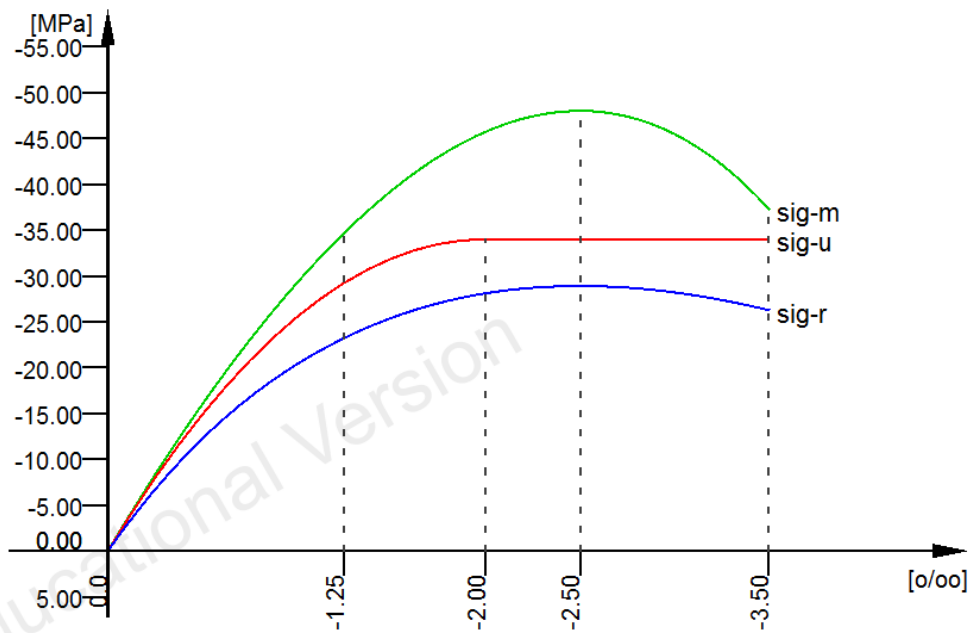


Έχουν τοποθετηθεί συνολικά 26 τένοντες με τη διάταξη του σχήματος:



## 8.2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

- Τύπος σκυροδέματος C 40



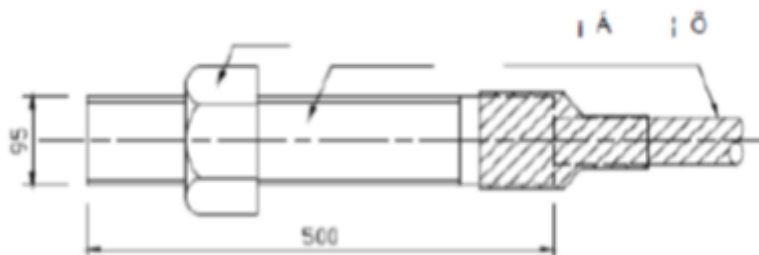
- Τύπος υλικού τενόντων CFRP

Ιδιότητες CFRP τενόντων:

CFCC	Nominal Diameter (mm)	Effective Cross Section Area	Modulus Of Elasticity (GPa)	Nominal Mass Density g/m	Guaranteed Tensile Strength MPa
	40	798.7	127	1508	1410
CFCC	Heat resistance	Fatigue Capacity	Thermal Expansion Coefficient (*10 <sup>-6</sup> )	Relaxation ratio	Elongation %
	130	0.55	0.6	2.3	1.6

### 8.3 ΑΓΚΥΡΩΣΗ-ΣΩΜΑΤΑ ΕΚΤΡΟΠΗΣ

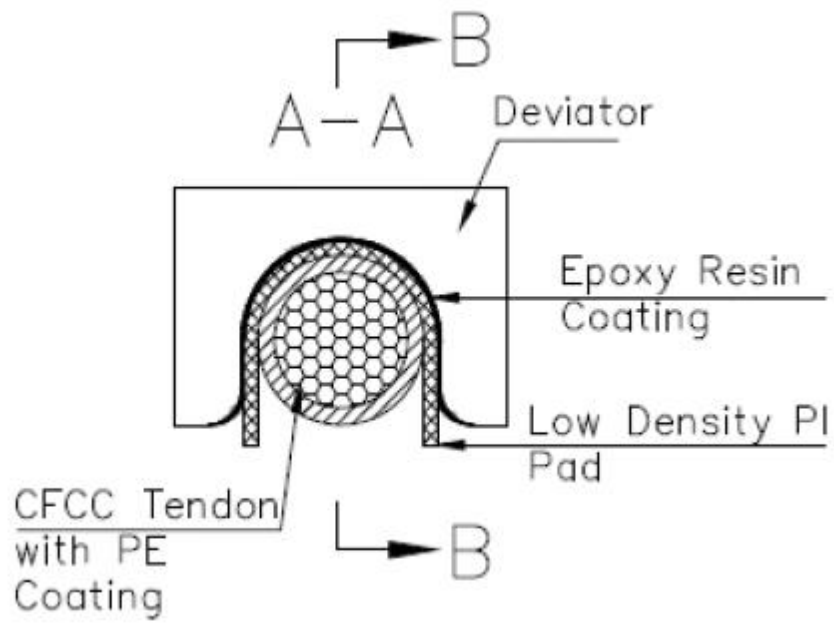
Για την αγκύρωση των CFCC cables χρησιμοποιήθηκε το σύστημα αγκυρώσεως της Tokyo Rope Co Ltd που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Χαρακτηριστικά της αγκύρωσης :

- $\mu$  (1/rad) = 0.3
- $k$  (1/m) = 0
- anchor deformation and tendon contraction (mm) = 1.0

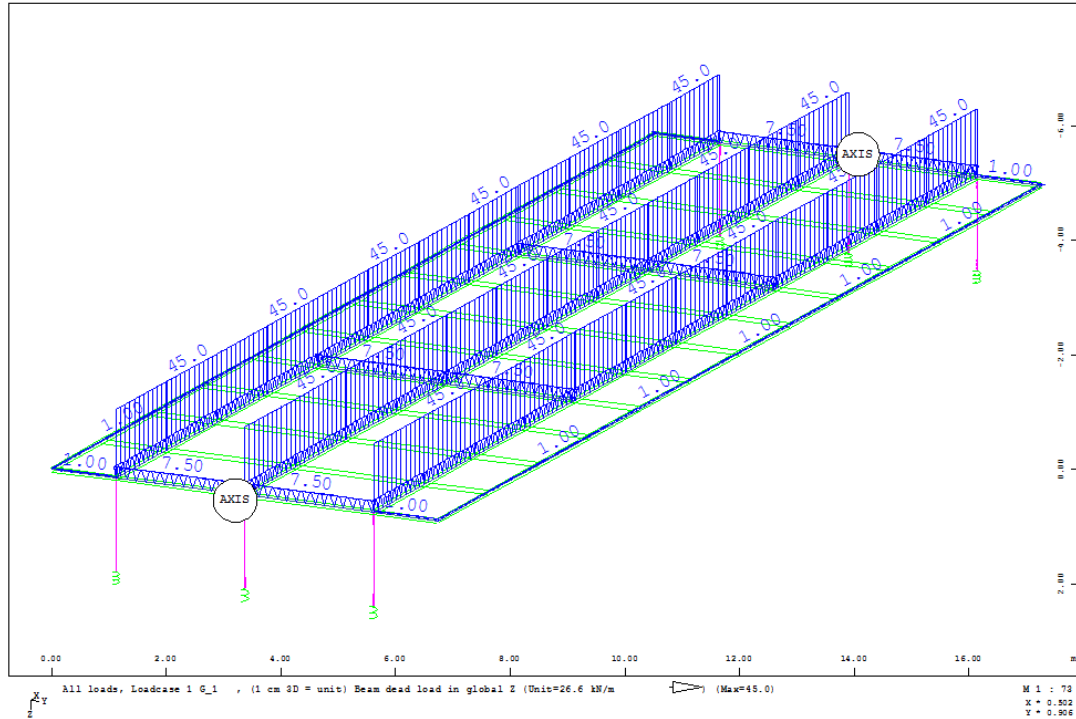
Η καμπύλωση των τενόντων στις ενδιάμεσες διαδοκίδες έγινε στα ειδικά διαμορφωμένα σώματα εκτροπής που παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:



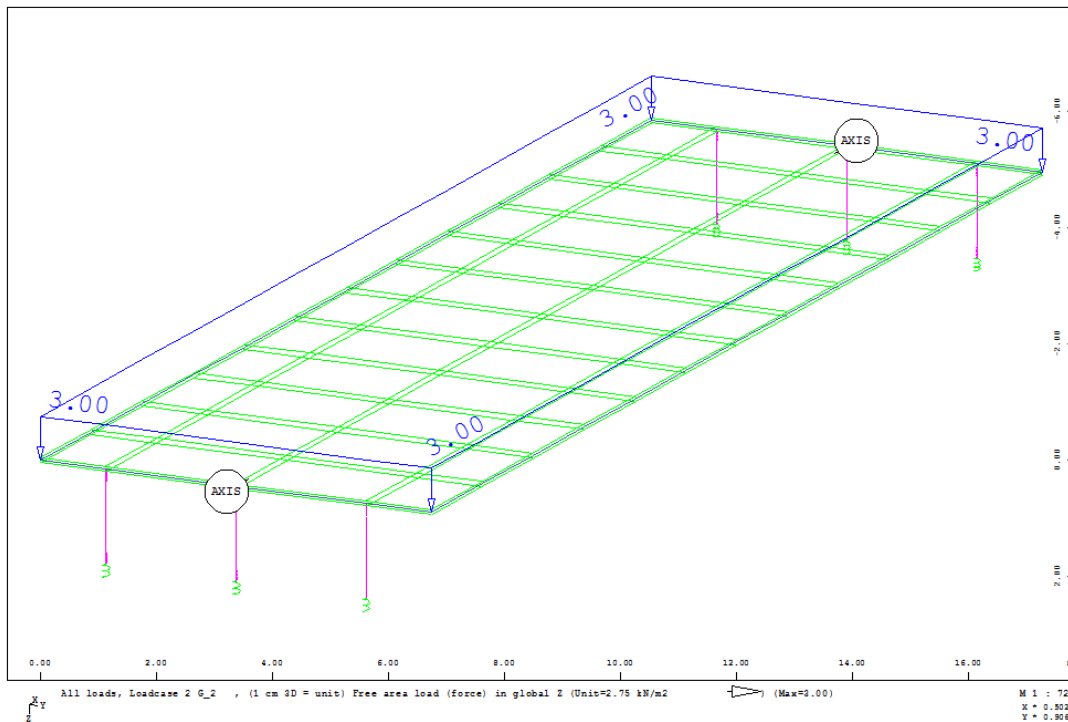
## 8.4 ΦΟΡΤΙΑ

Για τον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών λήφθηκαν υπόψη τα εξής φορτία:

- ο ίδιο βάρος κατασκευής



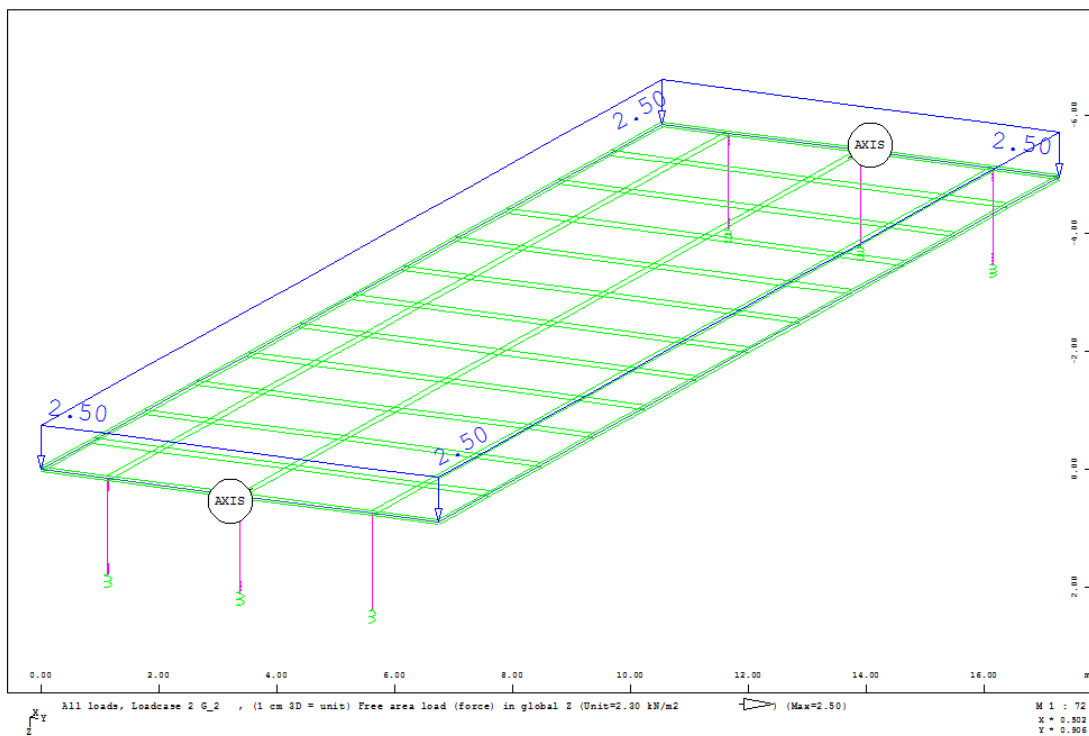
- ο πρόσθετα μόνιμα φορτία :  $g=3,0\text{kN/m}^2$

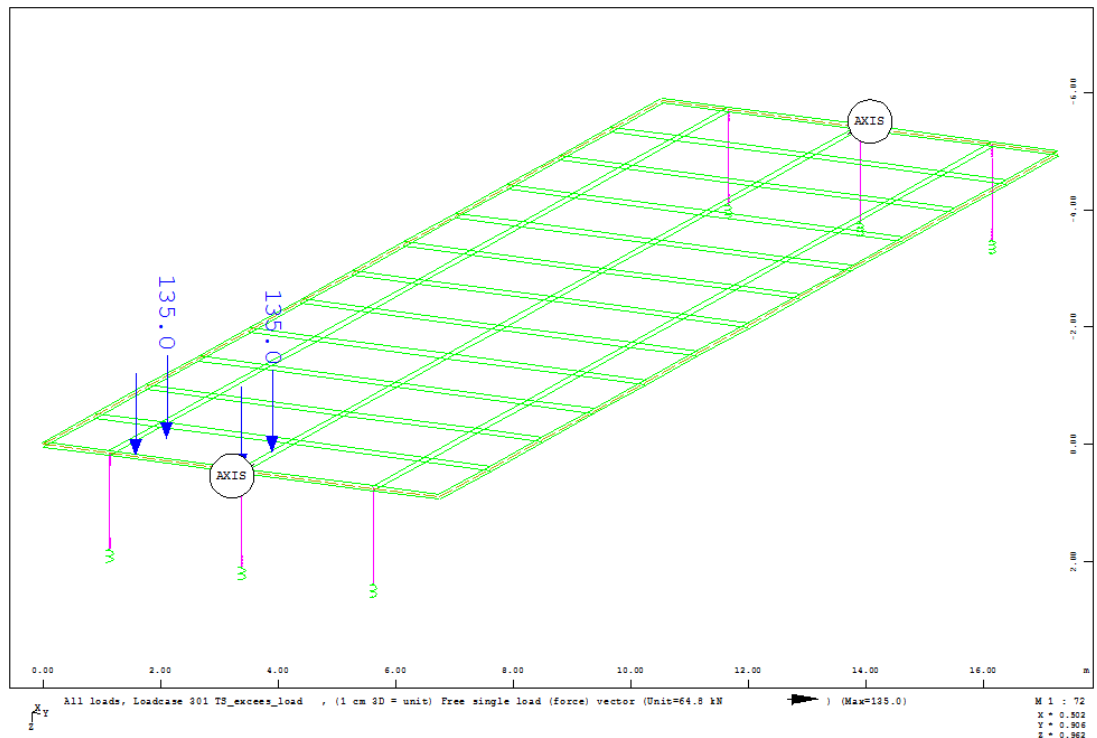
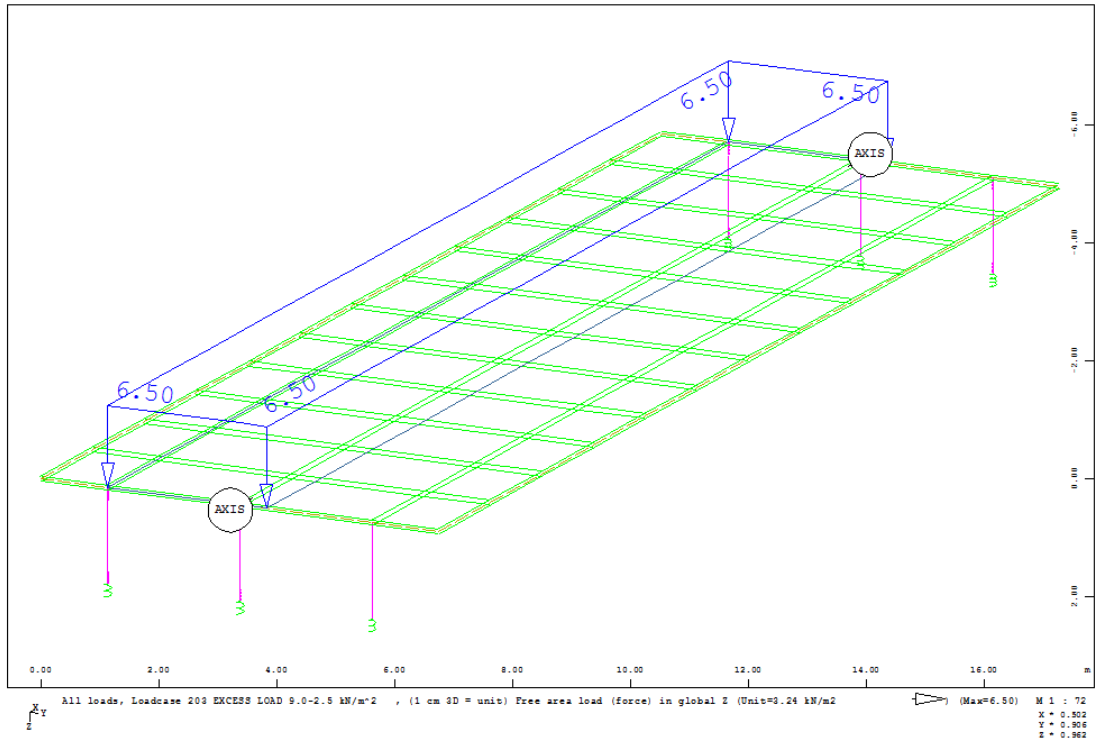


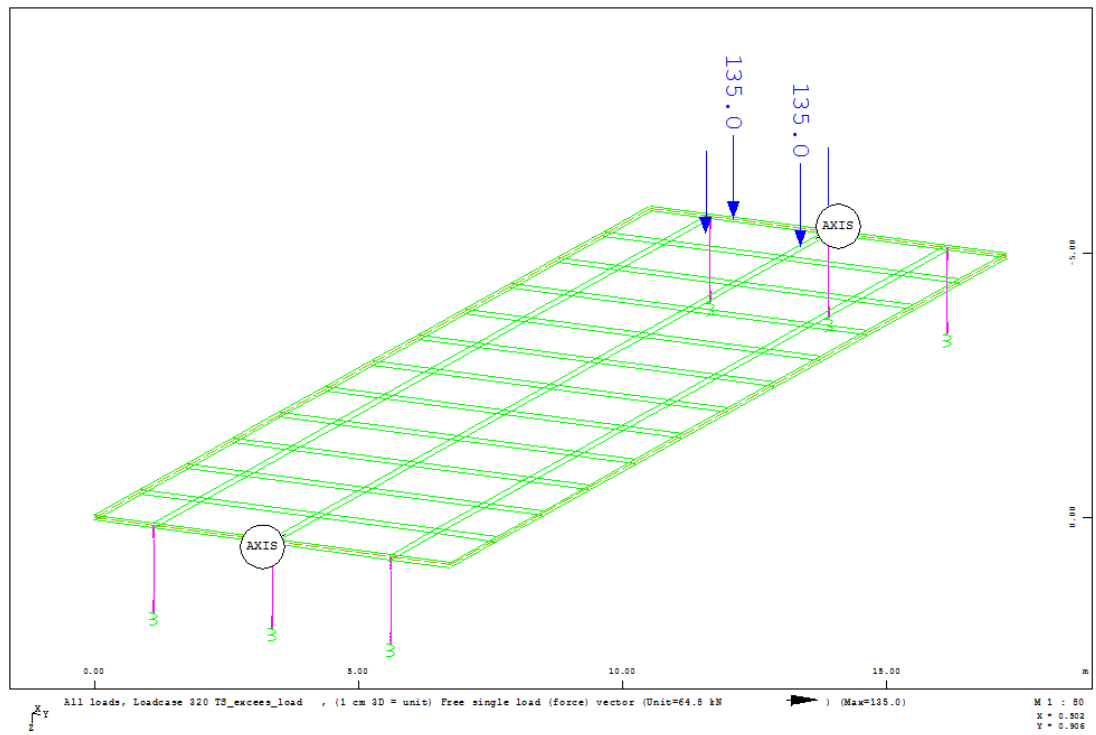
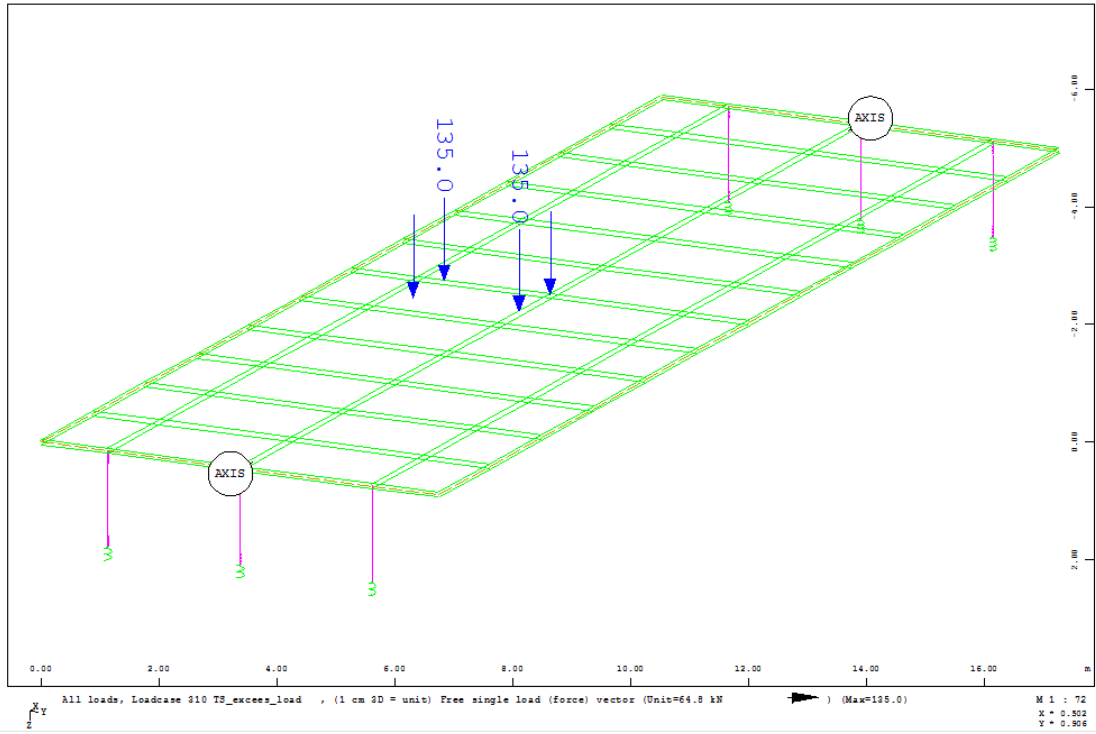
- ο κινητά φορτία : λωρίδες κυκλοφορίας σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα

Πλάτος οδοστρώματος  $w=7,50-2*1,25=5,00m < 5,40m$  άρα υπάρχει μια ιδεατή λωρίδα κυκλοφορίας πλάτους 3,00m η οποία φορτίζεται με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο  $q=9,0kN/m^2$  με συντελεστή  $\alpha=1,0$  και συγκεντρωμένο  $Q=300kN$  ανά άξονα με συντελεστή  $\alpha=0,9$  και η εναπομένουσα επιφάνεια  $7,50-3,00=4,50m$  φορτίζεται με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο  $q=2,5kN/m^2$  με συντελεστή  $\alpha=1,0$

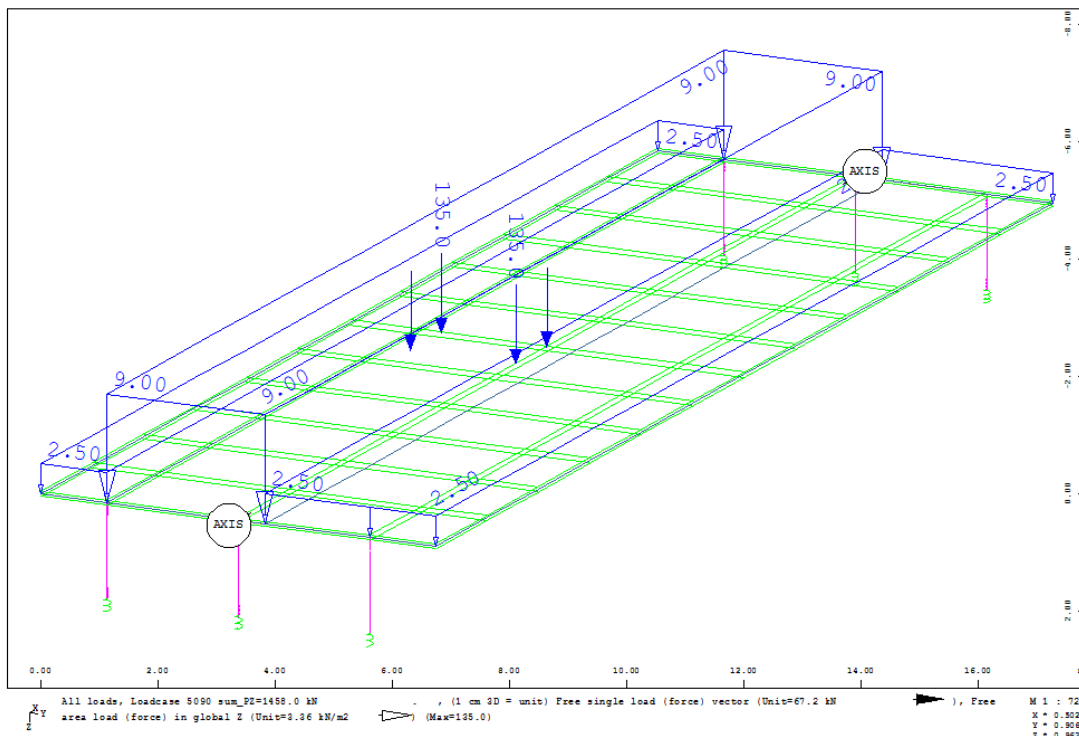
Έγιναν οι απαιτούμενοι πιθανοί συνδυασμοί φορτίσεως για τον υπολογισμό της περιβάλλουσας των εντατικών μεγεθών. Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι κύριες φορτίσεις.





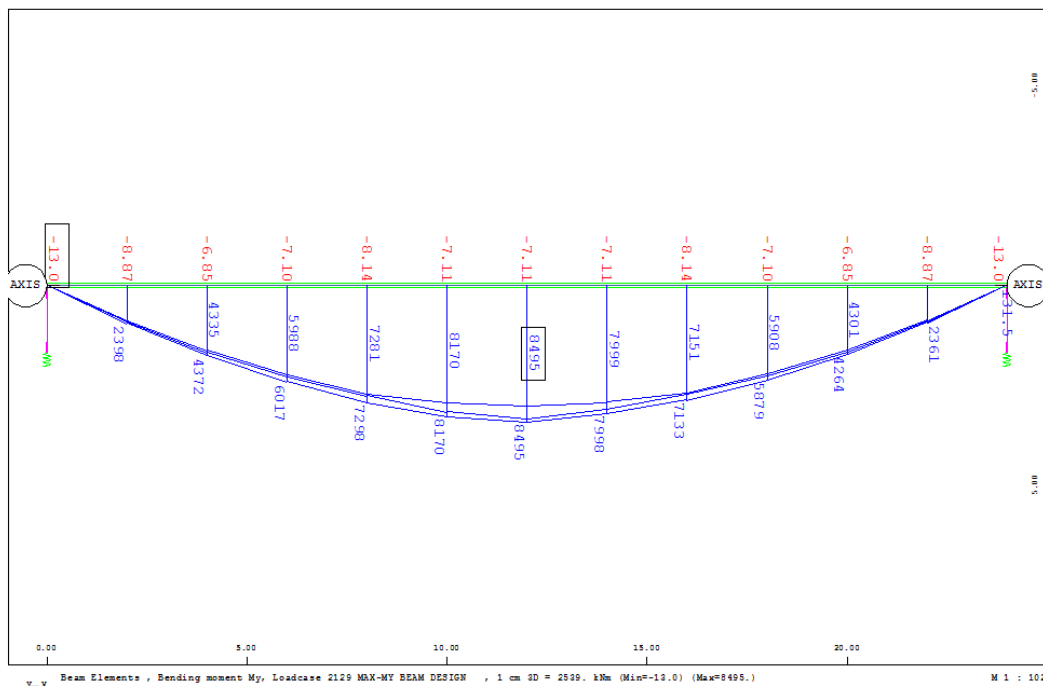


- Η κρίσιμη φόρτιση



Η μέγιστη τιμή της ροπής, όπως ήταν αναμενόμενο, υπολογίσθηκε στο μέσο του ανοίγματος των ακραίων δοκών ίση με :

$$M_{max} = 8495 \text{ kNm}$$





## 8.5 ΠΡΟΕΝΤΑΣΗ

Τοποθετήθηκαν συνολικά 26 τένοντες εμβαδού  $A_p = 800\text{mm}^2$  ο καθένας.

Η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση προεντάσεως για αποφυγή φαινομένων ερπυστικής διάρρηξης λαμβάνοντας υπόψη τις αμερικάνικες, τις καναδικές και τις ιαπωνικές οδηγίες για τένοντες από CFRP θεωρήθηκε ίση με  $f_{pi} = 0.6f_{pu}$

Η δύναμη προέντασης  $P = 0.6f_{pu}A_p = 0.6 \cdot 1410 \cdot 800 = 686\text{kN}$  ανά τένοντα

## 8.6 ΑΠΩΛΕΙΕΣ-ΜΕΙΩΣΕΙΣ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο υπολογισμός των μειώσεων και των απωλειών της προέντασης για τένοντες από frp ακόμη βρίσκεται σε στάδιο έρευνας. Σύμφωνα με τον αμερικάνικο, τον καναδικό κανονισμό και τις ιαπωνικές οδηγίες οι μειώσεις και οι απώλειες λόγω ερπυσμού και συστολής ξηράνσεως μπορούν να υπολογισθούν ικανοποιητικά με τρόπο όμοιο με τις αντίστοιχες για χαλύβδινους τένοντες λαμβάνοντας όμως υπόψη το μέτρο ελαστικότητας του frp. Ωστόσο οι απώλειες λόγω χαλάρωσης για τένοντες frp διαφέρουν αρκετά στον τρόπο υπολογισμού.

Με βάση τα παραπάνω οι μειώσεις της προέντασης λόγω τριβής και ολίσθησης στη σφήνωση υπολογίσθηκαν από το πρόγραμμα δεδομένων των χαρακτηριστικών της αγκύρωσης.

Όμοια υπολογίσθηκαν και οι απώλειες λόγω ερπυσμού και συστολής ξηράνσεως του σκυροδέματος.

Οι απώλειες λόγω χαλάρωσης των τενόντων θεωρήθηκαν ίσες με

$$\Delta f_{rel} = 0.03 f_{pi} \text{ σύμφωνα με τον ACI 440.4R}$$

Οι απώλειες λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών δεν εξετάστηκαν.

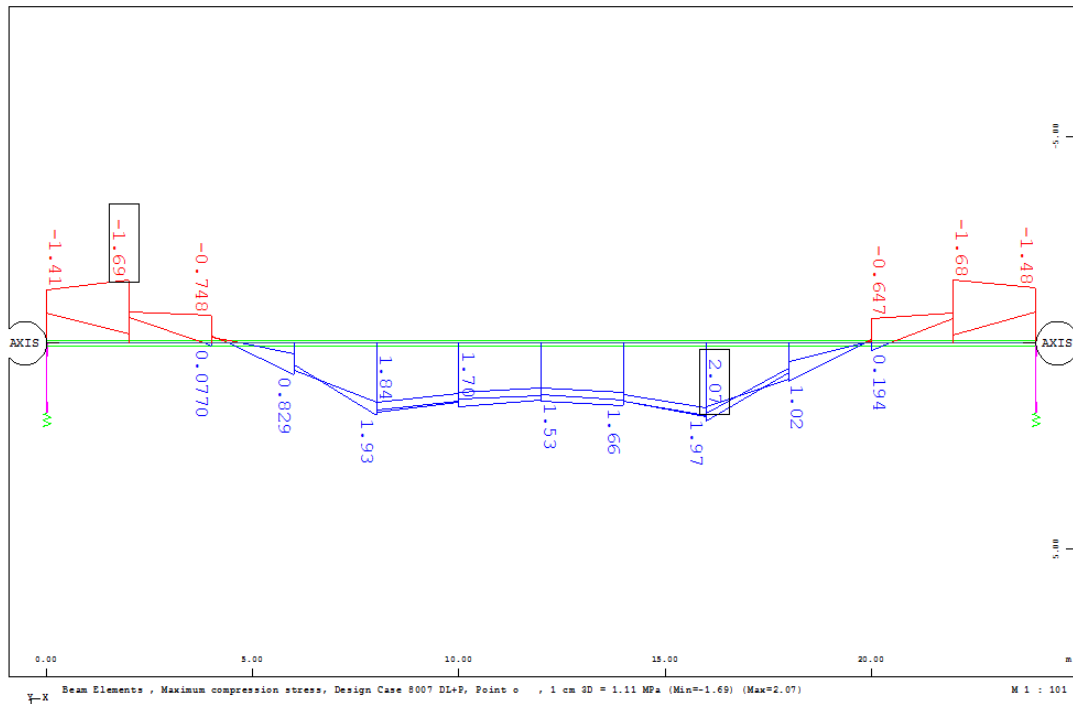
## 8.7 ΕΛΕΓΧΟΙ - ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΕΣ ΤΑΣΕΙΣ

Θα γίνει περιορισμένη προένταση. Έξι είναι οι κύριοι έλεγχοι που θα εξετασθούν αν ικανοποιούνται:

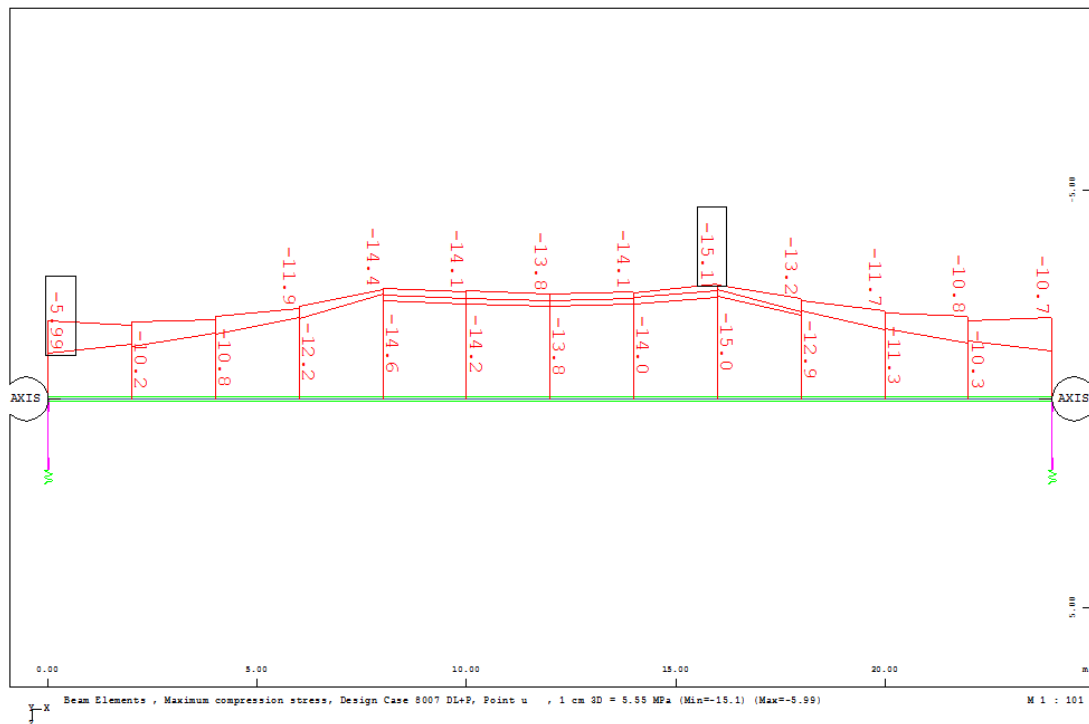
- Αμέσως μετά την προένταση
  - Να μην εμφανίζεται εφελκυστική τάση στην άνω ίνα (πλέον εφελκυστική τάση της διατομής) ή τουλάχιστον να είναι μικρότερη της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος (για C40  $f_{ct0.05}=2.4\text{MPa}$ )
  - Η θλιπτική τάση στην κάτω ίνα (πλέον θλιβόμενη ίνα της διατομής) να μην υπερβαίνει την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή  $\sigma_c^*$  ( $\sigma_c^* = 0.4f_{ck}=0.4*40=16\text{MPa}$  για C40)
- Κατά τη λειτουργία υπό πλήρες φορτίο
  - Η θλιπτική τάση στην άνω ίνα (πλέον θλιβόμενη ίνα της διατομής) να μην υπερβαίνει την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή  $\sigma_c^*$  ( $\sigma_c^* = 0.4f_{ck}=0.4*40=16\text{MPa}$  για C40)
  - Να μην εμφανίζεται εφελκυστική τάση στην κάτω ίνα (πλέον εφελκυστική τάση της διατομής) ή τουλάχιστον να είναι μικρότερη της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος (για C40  $f_{ct0.05}=2.4\text{MPa}$ )
- Κατά τη λειτουργία θεωρώντας τα μισά κινητά φορτία
  - Η θλιπτική τάση στην άνω ίνα (πλέον θλιβόμενη ίνα της διατομής) να μην υπερβαίνει την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή  $\sigma_c^*$  ( $\sigma_c^* = 0.4f_{ck}=0.4*40=16\text{MPa}$  για C40)
  - Να μην εμφανίζεται εφελκυστική τάση στην κάτω ίνα (πλέον εφελκυστική τάση της διατομής)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα-διαγράμματα τάσεων κατά μήκος του φορέα :

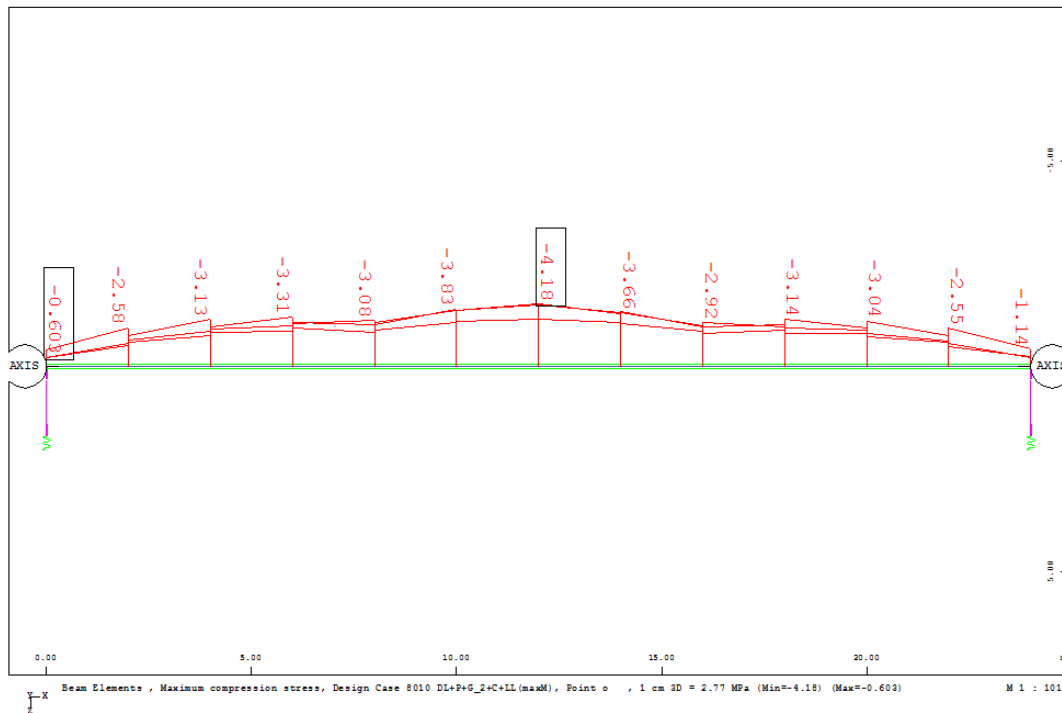
- Αμέσως μετά την προένταση
  - Στην άνω ίνα (πλέον εφελκόμενη ίνα της διατομής) εμφανίζεται εφελκυστική τάση μικρότερη όμως του  $f_{ct0.05}=2.4\text{MPa}$   
 $\sigma_{\max} = 2.07 < f_{ct0.05}=2.4\text{MPa}$



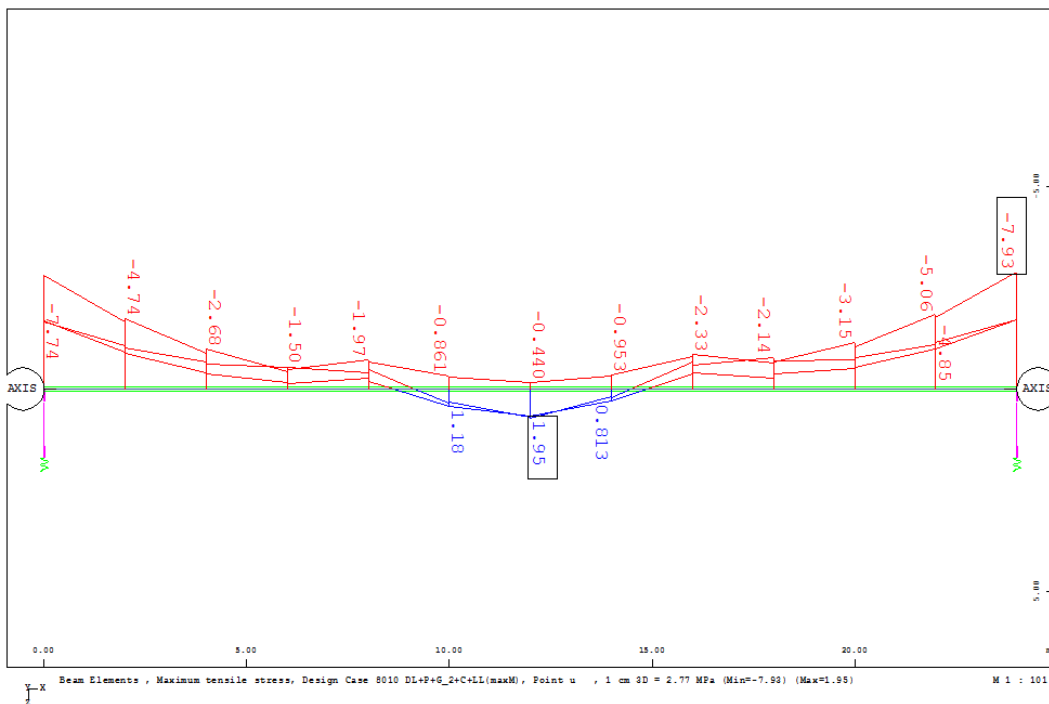
- Η κάτω ίνα (πλέον θλιβόμενη ίνα της διατομής) τελεί παντού υπό θλίψη και  $\sigma_{\min} = -15.1 \text{ MPa} < -\sigma_c^* = -16\text{MPa}$



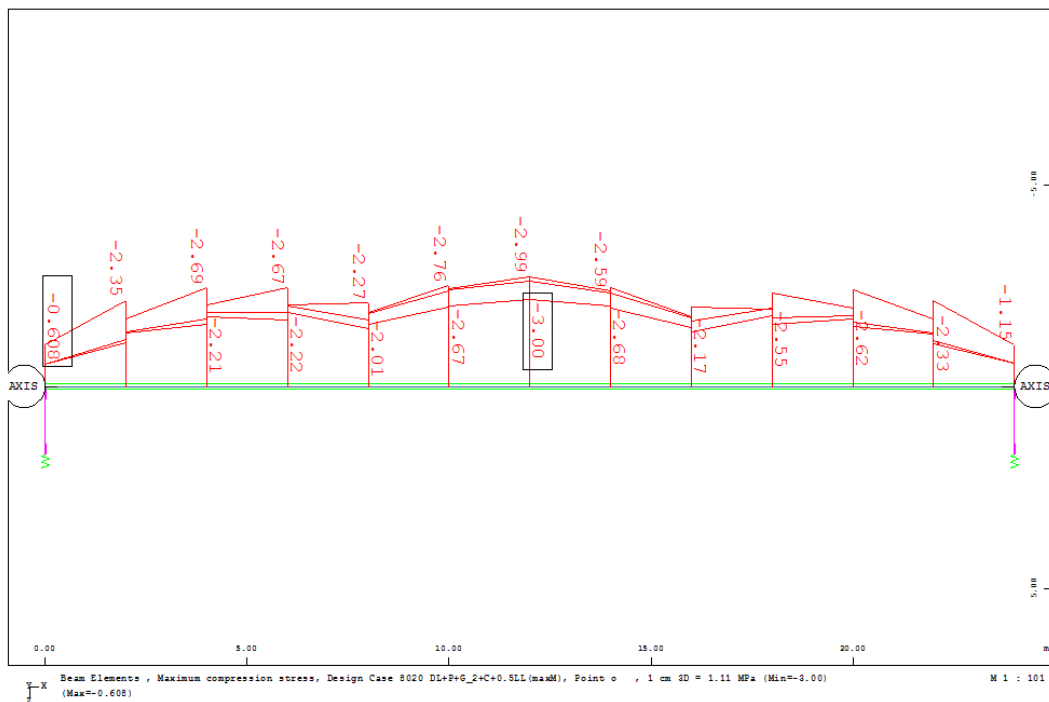
- Κατά τη λειτουργία υπό πλήρες φορτίο
  - Η άνω ίνα (πλέον θλιβόμενη ίνα της διατομής) τελεί παντού υπό θλίψη και  $\sigma_{\min} = -4.18\text{MPa} < -\sigma_c^* = -16\text{MPa}$



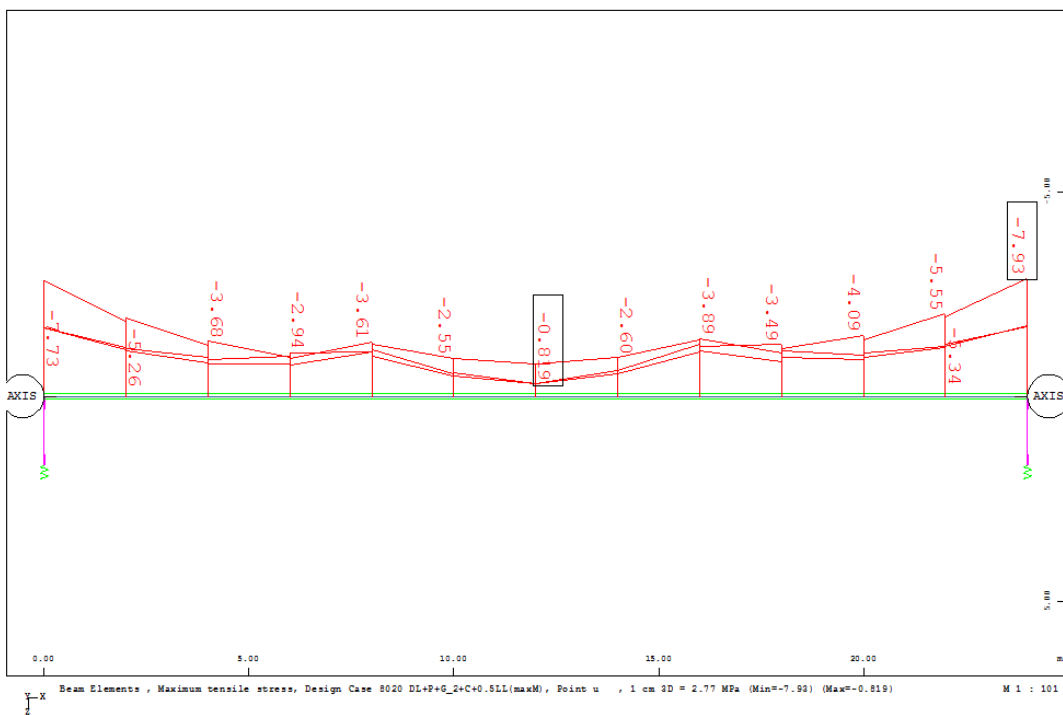
- Η κάτω ίνα (πλέον εφελκυσμένη ίνα της διατομής) είναι σχεδόν σε όλο τον φορέα υπό θλίψη, μόνο στην πιο κρίσιμη διατομή εμφανίζεται ένας εφελκυσμός  $\sigma_{\max} = 1.95\text{ MPa} < f_{ct0.05}=2.4\text{MPa}$



- Κατά τη λειτουργία θεωρώντας τα μισά κινητά φορτία
  - Η άνω ίνα (πλέον θλιβόμενη ίνα της διατομής) τελεί παντού υπό θλίψη και  $\sigma_{\min} = -3.00\text{MPa} < -\sigma_c^* = -16\text{MPa}$



- Η κάτω ίνα (πλέον εφελκυσμένη ίνα της διατομής) είναι σχεδόν σε όλο τον φορέα υπό θλίψη και  $\sigma_{\max} = -0.819\text{MPa} < 0$



Συνεπώς όλοι οι έλεγχοι ικανοποιούνται.

## 8.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Γενικά η φιλοσοφία σχεδιασμού για την προένταση των δοκών της γέφυρας με τένοντες από FRP ακολούθησε τη συνήθη όπως για προένταση με τένοντες από χάλυβα.

Πιο συγκεκριμένα :

- Λόγω του φαινομένου της ερπυστικής διάρρηξης των τενόντων και σύμφωνα με τις υπάρχουσες οδηγίες και κανονισμούς η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση τανύσεως περιορίστηκε στο 60% της αντοχής των τενόντων σε εφελκυσμό ενώ για τένοντες από χάλυβα συνήθως περιορίζεται κοντά στο 80% της αντοχής τους.
- Γενικά οι απώλειες και οι μειώσεις προεντάσεως υπολογίσθηκαν ως συνήθως απλά λαμβάνοντας υπόψη τους διαφορετικούς συντελεστές στο σύστημα προέντασης και τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των τενόντων (κυρίως το μέτρο ελαστικότητας E).
  - Ωστόσο ο υπολογισμός των απωλειών λόγω χαλάρωσης είναι πιο σύνθετος στην περίπτωση των FRP και σύμφωνα με τον ACI 440.4R θεωρήθηκαν ίσες με  $\Delta f_{rel} = 0.03 f_{pi}$ .
  - Ακόμη για προένταση με τένοντες από FRP λόγω της διαφοράς στους συντελεστές θερμικής διαστολής σκυροδέματος και FRP ενδέχεται να υπάρχουν και απώλειες λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών, στην παρούσα εφαρμογή αμελήθηκαν.
- Το σύστημα αγκύρωσης και τα σώματα εκτροπής σχεδιάστηκαν από τον κατασκευαστή ώστε να είναι ειδικά προσαρμοσμένα στις ιδιότητες των συγκεκριμένων τενόντων.
- Δεν απαιτήθηκαν ιδιαίτερα συστήματα αντιδιαβρωτικής προστασίας όπως στην περίπτωση της εξωτερικής προέντασης με χάλυβα καθώς οι τένοντες από CFRP έχουν πολύ μεγάλη ανθεκτικότητα σε διάβρωση.
  - Ωστόσο κατά την κατασκευή της γέφυρας πρέπει να δοθεί προσοχή ώστε να μην εκτεθούν στην ηλιακή ακτινοβολία και
  - Επίσης πρέπει να ληφθούν μέτρα ώστε σε περίπτωση πυρκαγιάς να αποκλεισθεί το ενδεχόμενο άμεσης έκθεσης τους στη φωτιά.
- Στους τένοντες ενσωματώθηκε σύστημα bragg grating ώστε να παρακολουθείται η συμπεριφορά τους κατά τη διάρκεια ζωής της γέφυρας.
  - Αξίζει να σημειωθεί πως η δυνατότητα αυτή ενσωμάτωσης συστημάτων bragg grating σε τένοντες από FRP είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς πρόκειται για νέα υλικά που η γνώση των χαρακτηριστικών τους βρίσκεται σε στάδιο έρευνας και τα πειραματικά δεδομένα είναι ακόμη ελλιπή.

- Έτσι εμπλουτίζεται η γνώση για την απόκριση των τενόντων από την ενώ παράλληλα προσφέρεται και ένα δίκτυο προστασίας από μια ενδεχόμενη ξαφνική αστοχία τους.
- Σημαντικό μειονέκτημα ωστόσο ακόμη αποτελεί το ζήτημα του κόστους τόσο των τενόντων όσο και του συστήματος αγκύρωσης .

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] ACI 440R-96 '*State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*'
- [2] ACI 440.1R-06 '*Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*'
- [3] ACI 440.4R-04 '*Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons*'
- [4] ISIS Educational Module 9 '*Prestressing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers*'
- [5] Concrete Library Of JSCE NO. 31, JUNE 1998 '*Recommendation For Design And Construction Of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials (Construction)*'  
'*Quality Specifications For Continuous Fiber Reinforcing Materials*'  
(JSCE-E 131-1995)  
'*Test Methods For Continuous Fiber Reinforcing Materials*'  
(Translation from the CONCRETE LIBRARY No.88 published by JSCE, September 1996)
- [6] Federation International du Beton, fib bulletin no 40 '*FRP reinforcement in RC structures*'
- [7] Charles W. Dolan H.R. Hamilton III Charles E. Bakis Antonio Nanni '*Design Recommendations for Concrete Structures Prestressed with FRP Tendons*' FHWA CONTRACT DTFH61-96-C-00019
- [8] Thomas Keller '*material-tailored use of frp composites in bridge and building construction*' Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, EPFL Composite Construction Laboratory CCLab, CH-1015 Lausanne, Switzerland
- [10] Sami H. Rizkalla and Amr A Abdelrahman '*FRP FOR THE 21st CENTURY*'
- [11] Fabio Matta , Antonio Nanni , Ahmad Abdelrazaq , Doug Gremel , Ryan Koch '*Externally post-tensioned carbon FRP bar system for deflection control*' Construction and Building Materials 23 (2009) 1628–1639
- [12] Hota V.S. GangaRao, Ph.D., P.E. P.V. Vijay, Ph.D., P.E. '*feasibility review of frp materials for structural applications*' Constructed Facilities Center Dept. of Civil & Env. Engineering College of Engineering and Mineral Resources West Virginia University, Morgantown, WV-26506
- [13] Si Hwan Park, Ian N. Robertson, H. Ronald Riggs '*A Primer for FRP Strengthening of Structurally Deficient Bridges*' Research Report UHM/CE/02-03



- [14] ASCE Committee on Composite Construction Task Group on Steel-FRP Composite Construction *STEEL-FRP 'COMPOSITE STRUCTURAL SYSTEMS'*
- [15] Halvard E. Nystrom; Steve E. Watkins; Antonio Nanni, P.E.,M.ASCE; and Susan Murray, P.E. '*Financial Viability of Fiber-Reinforced Polymer .FRP. Bridges*'
- [16] Irene Scott and Ken Wheeler '*Application of fibre reinforced polymer composites in bridge construction*'
- [17] Danielle Stone, Steve Watkins, Halvard Nystrom And Antonio Nanni '*Investigation Of Frp Materials For Bridge Construction*' (Stone, D., S. Watkins, H. Nystrom And A. Nanni, "Investigation Of FRP Materials For Bridge Construction," Proc., 5th National Workshop On Bridge Research In Progress, C.K. Shield And A.E. Schultz, Eds., U. Minnesota, Twin Cities, Oct. 8-10, 2001, Pp. 145-150)
- [18] FRP International Vol-8-No-3-July-2011
- [19] Prof. Björn Täljsten Denmark Technical University '*Use Of FRP In Construction In Scandinavia – Experiences And A Verification Test*' Composites & Polycon 2007 American Composites Manufacturers Association
- [20] Hanshan Ding, Rui Zhang, Yigui Zhang, Wenjun Xia, Jiang Huang, '*A Bridge in China Externally Prestressed by Carbon Fiber Reinforced Polymer Tendons*' Structural Engineering International
- [21] Mauricio Areiza Hurtado Anurag Bansal Carlo Paulotto Stefano Primi '*FRP GIRDER BRIDGES : lessons learned in Spain in the last decade*' CICE 2012
- [22] Shoichi Saeki Kazuo Yamashiro Nobuhiko Kitayama, Iton Chou, Naoki Yamamoto Seishi Meiarashi '*First GFRP Pedestrian Bridge in Japan*'
- [23] David Kendall '*Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composite Bridges*' National Composites Network (NCN)
- [24] Theresa A. Hoffard L. Javier Malvar Technical Memorandum TM-2384-SHR '*Fiber-Reinforced Polymer Composites In Bridges: A State-Of-The-Art Report*' Naval Facilities Engineering Service Center (NAVFAC)
- [25] Sami Rizkalla and Gamil Tadros '*FRP for Prestressing of Concrete Bridges in Canada*'

- [26] David A. Dieter, Joshua S. Dietsche, Lawrence C. Bank, Michael G. Oliva, Jeffrey S. Russell 'Concrete Bridge Decks Constructed with FRP Stay-in-Place Forms and FRP Grid Reinforcing'
- [27] R. Fico, N. Galati, A. Prota, and A. Nanni 'Design and Construction of a Bridge Deck using Mild and Post-Tensioned FRP Bars'
- [28] Adam C. Berg, Lawrence C. Bank, Michael G. Oliva, Jeffrey S. Russell 'Construction and cost analysis of an FRP reinforced concrete bridge deck' Construction and Building Materials 20 (2006) 515–526
- [29] Giovanni Pietro Terrasi 'Prefabricated Thin-walled Structural Elements Made from High Performance Concrete Prestressed with CFRP Wires' Journal of Materials Science Research; Vol. 2, No. 1; 2013
- [30] Thomas J. Winkelman 'Fiberglass Reinforced Polymer Composite Bridge Deck Construction In Illinois' Construction Report Physical Research Report No. 145 September 2002 Illinois Department of Transportation
- [31] Huang Jian, Xia Wengjun, Zhang Yigui, Zhang Rui, Wang Peng and Ding Hanshan 'Use Of External CFRP Prestressing In Hewei Bridge In China'
- [32] Robin Hutchinson, Gamil Tadros, Jadwiga Kroman, Sami Rizkalla 'Use of Externally Bonded FRP Systems for Rehabilitation of Bridges in Western Canada'
- [33] Casadei, P. Galati, N., Boschetto, G., Tan, K.Y., Nanni, A. Galecki, G. 'Strengthening of Impacted Prestressed Concrete Bridge I-Girder Using Prestressed Near Surface Mounted C-FRP Bars' Federation International Du Beton (Fib) Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Congress June 5-8 2006 Naples Italy
- [34] OU Jinping, ZHOU Zhi. 'Techniques of optical fiber Bragg grating smart sensors and intelligent monitoring systems of infrastructures' The First international Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology, Hawaii, USA, June 23-23, 2003
- [35] Zhi Zhou, Jilong LI, Jinping Ou. 'Mechanical theory of Encapsulated FBG Strain sensors used for structural health monitoring'. The Eighth International Symposium on Structural Engineering for Young Experts, August 20-23 2004, Xi'an, China:310-319
- [36] Zhi Zhou and Jinping OU. 'Development of FBG sensors for Structural Health Monitoring in civil infrastructures'. Proceeding of North American Euro-Pacific Workshop "Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring", 2004, Waikiki Beach, Oahu, Hawaii, USA

- [37] K.-T. Lau 'Fibre-optic sensors and smart composites for concrete applications' Magazine of Concrete Research, 2003, 55, No. 1, February
- [38] Dr. Sami H. Rizkalla 'FRP For Innovative Structures' The University of Manitoba
- [39] Hiroshi Tsuda , Jung-Ryul Lee 'Strain and damage monitoring of CFRP in impact loading using a fiber Bragg grating sensor system' Composites Science and Technology 67 (2007)
- [40] 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
- [41] Yingxiang Luo 'Study of Optical Fiber Grating Sensor Systems and Its Applications in Civil Engineering' 2012 International Conference on Education Technology and Management Engineering *Lecture Notes in Information Technology, Vols.16-17*
- [42] Stefan Käseberg & Klaus Holschemacher 'Smart CFRP systems – Fiber Bragg gratings for Fiber Reinforced Polymers' CICE 2010 - The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering September 27-29, 2010 Beijing, China
- [43] M. Mahdikhani and Z. Bayati 'Application And Development Of Fiber Optic Sensors In Civil Engineering' The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China
- [44] Ezzeldin Y. Sayed-Ahmed 'Single- And Multi-Strand Steel Anchorage Systems For CFRP Tendons / Stays' 4th Structural Speciality Conference of the Canadian Society for Civil Engineering
- [45] Jacob W. Schmidt , Anders Bennitz , Bjorn Taljsten , Per Goltermann , Henning Pedersen 'Mechanical anchorage of FRP tendons – A literature review' Construction and Building Materials 32 (2012)
- [46] Burong Zhang, Brahim Benmokrane, Member, ASCE, Adil Chennouf, Phalguni Mukhopadhyaya, and Adel El-Safty 'Tensile Behavior Of FRP Tendons For Prestressed Ground Anchors' Journal Of Composites For Construction / May 2001
- [47] D Ďurech, F Girgle, D Horák, I Laníková, P Štěpánek 'Anchoring Method For Prestressing Of FRP Reinforcement' 35th Conference on Our World In Concrete & Structures: 25 - 27 August 2010, Singapore
- [48] Khaled Soudki 'Evaluation of Anchors for CFRP tendons' Center for Infrastructure Engineering Studies/UTC program University of Missouri - Rolla

