

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΩΝ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΜΕ ΙΟΠ (FRP)

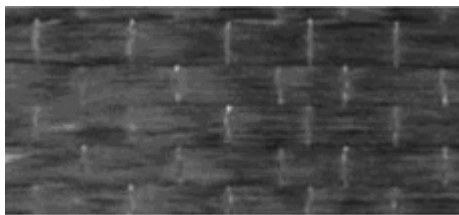
ΠΕΤΡΟΧΕΙΛΟΣ ΣΤΑΥΡΟΣ

Περίληψη

Πολλά ερευνητικά προγράμματα, τις τελευταίες δεκαετίες, με αντικείμενο την εξωτερική ενίσχυση υφιστάμενων δοκών έναντι τέμνουσας με FRP έχουν πραγματοποιηθεί σε αρκετά μέρη ανά τον κόσμο. Διαφορετικές μορφές ενίσχυσης έχουν ερευνηθεί με σκοπό την αποτίμηση, αρχικά, και την μεγιστοποίηση, στην συνέχεια, της αποτελεσματικότητας κάθε μεθόδου. Στην προσπάθειά τους αυτή οι ερευνητές προτείνουν διαφορετικούς τρόπους εξωτερικής εφαρμογής των υφασμάτων από FRP, ακόμα και με την επιβολή επιπλέον αγκύρωσης αυτών, καθώς και συγκεκριμένες εξισώσεις υπολογισμού της συμβολής των σύνθετων υλικών στην ανάληψη τέμνουσας δύναμης. Με αφορμή και την έκδοση του ΚΑΝ.ΕΠΕ., στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια παρουσίασης όλων αυτών των δεδομένων καθώς και σύγκρισης των αποτελεσμάτων τους μεταξύ τους αλλά και με τις αντίστοιχες εξισώσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει συμβάλλει σημαντικά και στο πεδίο του Πολιτικού Μηχανικού με την εμφάνιση νέων υλικών και τεχνικών στον τομέα των κατασκευών αλλά και των ενισχύσεων. Τέτοια υλικά είναι και τα ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ) ή, όπως αναφέρονται στην διεθνή βιβλιογραφία, FRP (fiber reinforced polymers). Τα υλικά αυτά αποτελούνται από ίνες -συνηθέστερα άνθρακα, γυαλιού ή αραμιδίου (CarbonFRP, GlassFRP, AramidFRP)- εμποτισμένες σε κάποιου είδους μήτρα με συνηθέστερη την εποξειδική ρητίνη. Ένα τέτοιο ύφασμα από ίνες άνθρακα φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία.



Σχήμα 1: Κομμάτι υφάσματος CFRP

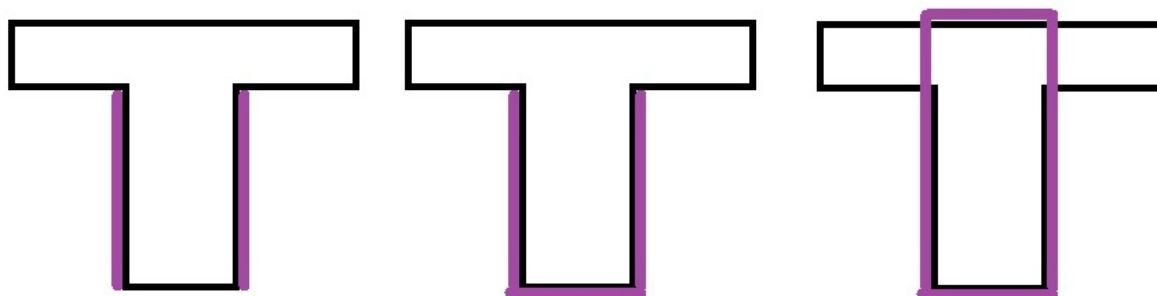
Η χρήση τέτοιων υλικών παρουσιάζει μεγάλη άνοδο τα τελευταία χρόνια καθώς συνδυάζουν αρκετά σημαντικά πλεονεκτήματα όπως η υψηλή εφελκυστική αντοχή (ακόμα και σε συνθήκες κόπωσης), το μικρό βάρος, η μεγάλη αντίσταση στην διάβρωση, η υψηλή δυσκαμψία, η ευκολία στην τοποθέτηση και στην μόρφωση μεγάλων μηκών και οποιουδήποτε σχήματος. Ειδικά στην ενίσχυση δοκών που θέλουμε να πετύχουμε την αύξηση της αντοχής χωρίς την αλλαγή της δυσκαμψίας και χωρίς την προσθήκη νέων νεκρών φορτίων η ενίσχυση με ΙΟΠ γίνεται πολύ ανταγωνιστική έναντι των υπολοίπων τρόπων ενίσχυσης. Τα υλικά αυτά όμως, εμφανίζουν και ορισμένα μειονεκτήματα όπως το υψηλό κόστος, η σχετικά μεγάλη χαλάρωση και η τρωτότητα από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η υπεριώδης ακτινοβολία και η αλκαλικότητα. Σημαντικότερο εμπόδιο όμως στην χρήση τέτοιων υλικών στις κατασκευές είναι η έλλειψη

τεχνογνωσίας και ακριβέστερων προδιαγραφών καθώς και η απουσία εξοικείωσης του μηχανικού με αυτά. Στην προσπάθεια εξάλειψης του τελευταίου παράγοντα πολλά ερευνητικά προγράμματα έχουν διεξαχθεί και συνεχίζουν να διεξάγονται.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια παρουσίασης της γνώσης που υπάρχει στην διεθνή βιβλιογραφία με εμβάθυνση αποκλειστικά στην εξωτερική ενίσχυση δοκών έναντι τέμνουσας. Μετά από μια σύντομη αναφορά στις προτεινόμενες μεθόδους ενίσχυσης, γίνεται αναφορά στις παραμέτρους που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα των σύνθετων υλικών και πως αυτές ποσοτικοποιούνται ώστε να εισαχθούν σε κάποιο υπολογιστικό μοντέλο με σκοπό την διαστασιολόγηση της ενίσχυσης από τον μηχανικό. Στην συνέχεια γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που δίνουν τα, μέχρι σήμερα, γνωστά μοντέλα που έχουν προταθεί από αρκετούς επιστήμονες διεθνώς αλλά και οι αντίστοιχες σχέσεις που έχουν ενσωματωθεί στον Ευρωκώδικα 8 αλλά και στον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

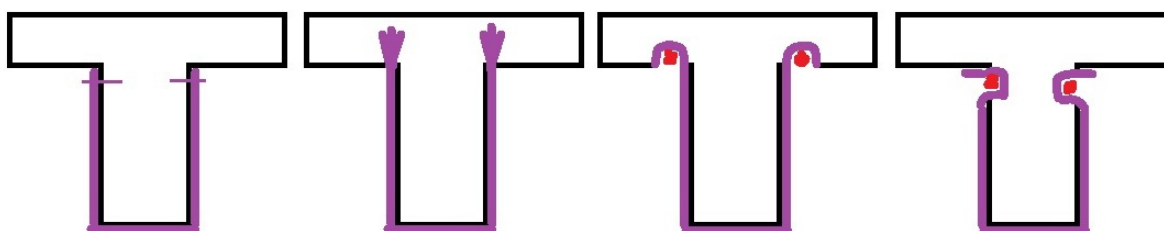
2.ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

Τα σύνθετα υλικά, όπως αναφέρεται και παραπάνω, κυκλοφορούν στο εμπόριο σε διαφορετικές μορφές (υφάσματα, ελάσματα, φύλλα, λωρίδες, πλέγματα) και σε όλες τις επιθυμητές διαστάσεις. Έτσι μπορούν να επικολληθούν εξωτερικά οποιασδήποτε δοκού με την βοήθεια κάποιας κόλλας (εποξειδική ρητίνη) να αποτελέσουν το υλικό ενίσχυσής της. Μερικοί από τους τρόπους επικόλλησης που είναι γνωστοί [1] φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



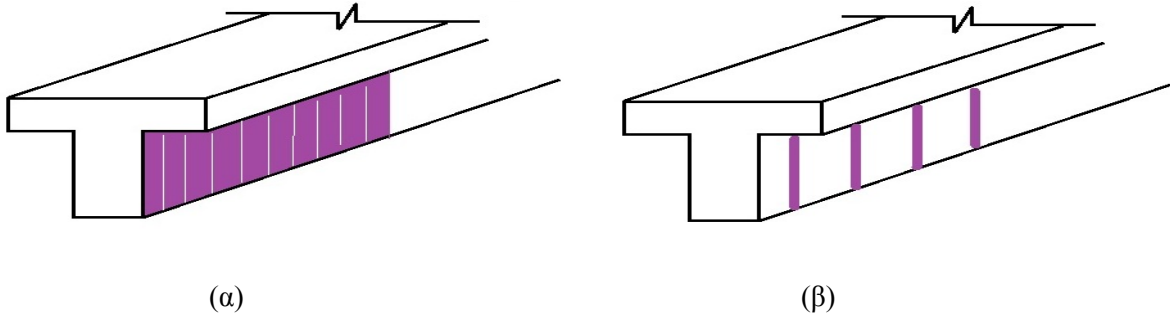
(α) (β) (γ)
Σχήμα 2: Εξωτερική επικόλληση υφάσματος (α) πλευρική S, (β) μορφής U, (γ) κλειστός μανδύας W.

Αν και η πλευρική επικόλληση απαγορεύεται από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. αναφέρεται για λόγους πληρότητας. Προφανές ακόμα είναι ότι ο κλειστός μανδύας σχεδόν πάντα είναι αδύνατο να εφαρμοστεί στην πράξη οπότε συνηθέστερη μορφή ενίσχυσης είναι ο μανδύας U. Επειδή κρίσιμη μορφή αστοχίας στην πλειονότητα των περιπτώσεων είναι η αποκόλληση του υφάσματος προτείνονται διάφοροι τρόποι επιπλέον αγκύρωσης [1,2].



Σχήμα 3: Ενίσχυση με μανδύα μορφής U με επιπλέον διαφορετικούς τρόπους αγκύρωσης.

Επίσης η ενίσχυση μπορεί να γίνει είτε με την μορφή συνεχούς υφάσματος είτε με την μορφή ελασμάτων συγκεκριμένου πλάτους επικολλημένα δίπλα-δίπλα.



Σχήμα 4: Ενίσχυση με την μορφή (α) συνεχούς υφάσματος ή (β) ελασμάτων.

3.ΚΡΙΣΗΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ-ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ

Μια απλουστευτική παραδοχή για τον υπολογισμό της συμβολής του υλικού ενίσχυσης στην ανάλυση τέμνουσας είναι ότι αυτή εξαρτάται αποκλειστικά από το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού (E_{frp}), το πάχος του t_{frp} , τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δοκού (b_w , d), την γωνία (β) που σχηματίζουν οι ίνες του υφάσματος με τον διαμήκη άξονα της δοκού και μία ενεργό τιμή παραμόρφωσης ϵ_{frp} σύμφωνα με τον Triantafillou, 1998 [3] ο οποίος προτείνει την σχέση:

$$V_{frp,d} = \frac{0.9}{\gamma_{frp}} b_w d \rho_{frp} E_{frp} \epsilon_{frp,e} (1 + \cot\beta) \sin\beta \quad (1)$$

όπου $\rho_{frp} = 2t_{frp}/b_w$ και $\epsilon_{frp,e}$ η τιμή της ενεργού παραμόρφωσης εξαρτάται από το γινόμενο $\rho_{frp} E_{frp}$ και δίνεται από την σχέση:

$$\epsilon_{frp} = 0,0119 - 0,0205(\rho_{frp} E_{frp}) + 0,0104(\rho_{frp} E_{frp})^2 \quad (2\alpha) \quad \text{όταν} \quad \rho_{frp} E_{frp} < 1$$

και

$$\epsilon_{frp} = 0,00065(\rho_{frp} E_{frp}) + 0,00245 \quad (2\beta) \quad \text{όταν} \quad \rho_{frp} E_{frp} > 1$$

Στην πράξη όμως για την περίπτωση των μανδύων U ο συνηθέστερος τρόπος αστοχίας τους είναι η αποκόλληση του υφάσματος μαζί με την ρητίνη και μία λεπτή στρώση σκυροδέματος οπότε σημαντικό ρόλο παίζει και η αντοχή του τελευταίου. Έτσι το 2000 οι Triantafillou και Antonopoulos [4] προτείνουν τον υπολογισμό της ενεργού παραμόρφωσης από την σχέση:

$$\epsilon_{frp} = \min \left[0,65 \left(\frac{f_c^2}{\rho_{frp} E_{frp}} \right)^{0,56} * 10^{-3}, 0,17 \left(\frac{f_c^2}{\rho_{frp} E_{frp}} \right)^{0,80} \epsilon_{fu} \right] \quad (3\alpha) \quad \text{για μανδύα U CFRP}$$

και

$$\varepsilon_{f_{FRP}} = 0.17 \left(\frac{f_{FRP}^{\frac{3}{2}}}{\rho_{f_{FRP}} \varepsilon_{f_{FRP}}} \right)^{0.30} \varepsilon_{f_u} \quad (3\beta) \quad \text{για κλειστό μανδύα CFRP}$$

όπου ε_{f_u} η μέγιστη τιμή παραμόρφωσης του σύνθετου υλικού δίνεται από τον κατασκευαστή.

Προχωρώντας σε μια βαθύτερη ανάλυση μπορεί κανείς να διαπιστώσει ότι η συμβολή των ΙΟΠ στην ανάληψη τέμνουσας επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες όπως η εσωτερική ενίσχυση (συνδετήρες) που προϋπάρχει στην δοκό. Αυτό αποδεικνύεται από τους Pellegrino και Modena [5] και τους Boussselham και Chaallal [6] οι οποίοι έπειτα από μια σειρά πειραμάτων καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η συμβολή των ΙΟΠ μειώνεται δραστικά με την αύξηση του ποσοστού των συνδετήρων. Χαρακτηριστικά αναφέρεται στην ανάλυση αποτελεσμάτων των Boussselham και Chaallal [6] ότι ενώ σε δοκό χωρίς συνδετήρες η εξωτερική ενίσχυση αυξάνει κατά 62% την αντοχή σε τέμνουσα στην ίδια δοκό με εσωτερικό οπλισμό το αντίστοιχο ποσοστό είναι περίπου 10-15%. Οι ίδιοι επίσης μελέτησαν και την συμβολή των ΙΟΠ σε σχέση με τον λόγο a/d δηλαδή διατμητικό άνοιγμα προς στατικό ύψος οπλισμού. Αυτός ο λόγος έχει να κάνει με το αν μία δοκός είναι υψίκορμη ή όχι και ποσοτικοποιεί την δράση θόλου που συμβάλλει στην μεταφορά τάσεων. Σε δοκούς σταθερής διατομής αλλάζοντας την απόσταση του φορτίου από την στήριξη πραγματοποίησαν 2 σειρές πειραμάτων. Στην μία, που αντιστοιχεί σε λεπτή δοκό, είχαν $a/d=3$ και στην δεύτερη, που αντιστοιχεί σε υψίκορμη δοκό, είχαν $a/d=1,5$. Έτσι χωρίς συνδετήρες το παραπάνω ποσοστό 62% που αντιστοιχεί σε υψίκορμη δοκό πέφτει στο 50% για λεπτή ενώ το 10-15% πέφτει σχεδόν στο μηδέν. Για την παράμετρο a/d ο γράφων δεν κατάφερε να βρει επιπλέον βιβλιογραφία που να ασχολείται με την προσθήκη αυτού το λόγου στους υπολογισμούς. Αντίθετα για την ποσότητα των συνδετήρων οι Pellegrino και Modena προτείνουν το εξής μοντέλο:

$$V_f = \rho_f b_w 0.9 d R f_{f_u} (\sin \beta + \cos \beta) \quad (4)$$

όπου f_{f_u} η αντοχή του υλικού ενίσχυσης και ο συντελεστής R δίνεται από την μικρότερη εκ των τιμών:

$$R = 0.006 / \varepsilon_{f_u} \quad (5\alpha)$$

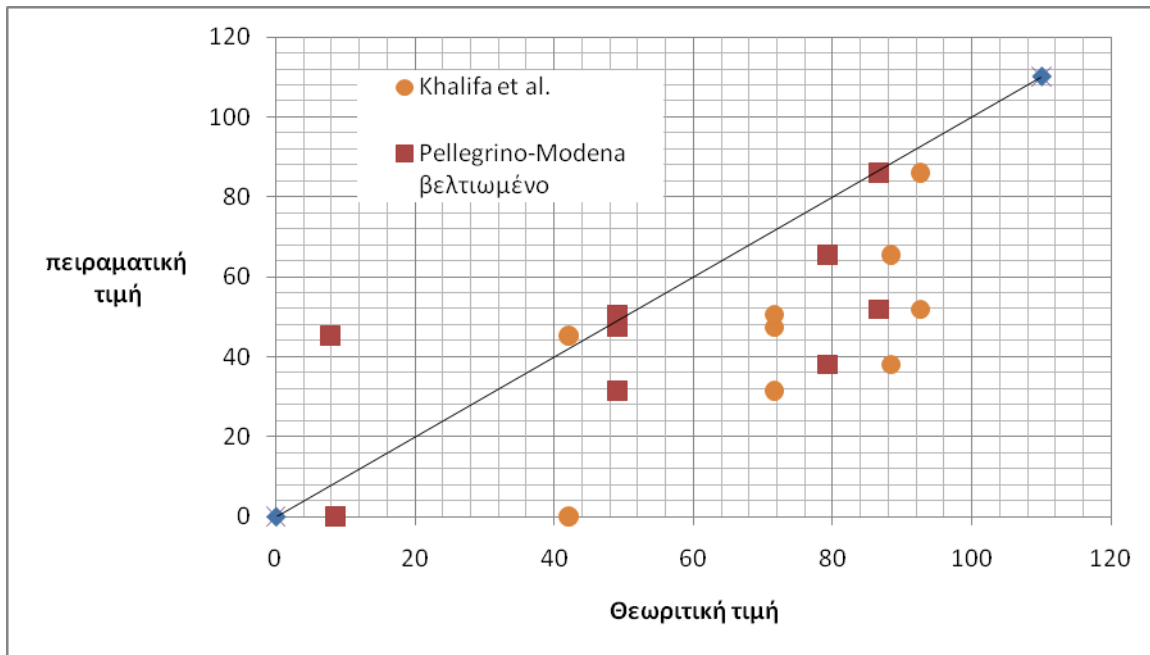
$$R = 0.5622 (\rho_{f_{FRP}} E_{f_{FRP}})^{\frac{2}{3}} - 1.21R (\rho_{f_{FRP}} E_{f_{FRP}}) + 0.77R \quad (5\beta)$$

$$R = R^* \left\{ \frac{0.0042 f_{FRP}^{\frac{3}{2}} w_{f_s}}{[(E_{FRP} \rho_f)^{\frac{2}{3}} \varepsilon_{f_u} d]} \right\} \quad (5\gamma) \quad \text{με } R^* = -0.53 \ln \rho_{s,f} + 0.29 \quad \text{και } 0 \leq R^* \leq 1 \quad \text{με } \rho_{s,f} = \frac{E_s f_{s,u}}{E_f 2 \tau_f s}$$

$$w_{f_s} = d - L_s \text{ για } U \text{ ή } d - 2L_s \text{ για } S \quad \text{και } L_s = e^{6.184 - 0.58 \ln(\tau_f \varepsilon_f)}$$

Σε μια προσπάθεια αξιολόγησης του παραπάνω μοντέλου ο γράφων έκανε μια σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από το μοντέλο των Khalifa et al. 1998,1999 όπως έχουν υπολογιστεί και αναφέρονται από τους Pellegrino και Modena [5] με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το βελτιωμένο μοντέλο που προτείνουν οι τελευταίοι. Η σύγκριση και των δύο μοντέλων με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα φαίνεται στο σχήμα 5. Το

συμπέρασμα που βγαίνει από αυτό είναι ότι η μέθοδος των Pellegrino και Modena που αναφέρεται και παραπάνω δίνει όντως αποτελέσματα πιο κοντά στις αντίστοιχες πειραματικές τιμές.



Σχήμα 5: Σύγκριση αποτελεσμάτων των 2 μοντέλων που χρησιμοποιούνται στην εργασία των Pellegrino και Modena [5].

Ο γράφων όμως δεν κατάφερε να βρει επιπλέον βιβλιογραφία που να ασχολείται με τον συγκεκριμένο παράγοντα και με παραπάνω μοντέλο ως το μόνο διαθέσιμο περαιτέρω αξιολόγηση δεν είναι εφικτή. Το σίγουρο είναι πάντως πως η ενίσχυση με εξωτερική επικόλληση FRP είναι πολύ πιο αποτελεσματική στην περίπτωση απουσίας εσωτερικού σπλισμού διάτμησης.

Ο κρισιμότερος παράγοντας για τον υπολογισμό της συμβολής των FRP στην ανάληψη τέμνουσας δύναμης είναι η τιμή της ενεργού τάσης (ή παραμόρφωσης) που αναπτύσσεται σε αυτά κατά την οριακή κατάσταση αστοχίας. Έτσι οι Chen και Teng προτείνουν τον υπολογισμό αυτής της τάσης από τις σχέσεις:

$$\sigma_{frp,max,d} = 0.315\beta_w\beta_L\sqrt{\frac{E_{frp}}{\epsilon_{frp}}}\sqrt{f_c}\leq f_{frp} \quad (6)$$

όπου $\beta_w = \sqrt{\frac{2-w_{frp}/(s_{frp}\sin\theta)}{1+w_{frp}/(s_{frp}\sin\theta)}}$ και $\beta_L = 1$ για $\lambda > 1$ και $\sin\frac{\pi\lambda}{2}$ για $\lambda < 1$ με

$$\lambda = L_{max}/L_e \text{ με } L_e = \sqrt{\frac{E_{frp}I_f}{f_c}} \text{ και } L_{max}$$

το διαθέσιμο ύψος επικόλλησης του υφάσματος ενώ w_{frp} και s_{frp} είναι, σε περίπτωση λωρίδων, το πλάτος και η απόστασή τους αντίστοιχα. Στην συνέχεια

$$V_{frp,d} = 2 \frac{f_{frp,ed}}{\gamma_{frp}} t_{frp} w_{frp} \frac{h_{frp}(\sin\beta + \cos\beta)}{s_{frp}} \quad (7)$$

με $f_{frp,ed} = D_{frp} \sigma_{frp,max,d}$ όπου $D_{frp} = \frac{2}{\pi\lambda} \frac{1 - \cos\frac{\pi\lambda}{2}}{\sin\frac{\pi\lambda}{2}}$ για $\lambda < 1$ και $D_{frp} = 1 - \frac{\pi-2}{\pi\lambda}$ για $\lambda > 1$.

Οι Monti και Liotta [8] προτείνουν σαν τιμή της τάσης αποκόλλησης :

$$f_{fdd} = \frac{0.80}{\gamma_{f,d}} \sqrt{\frac{2E_f \Gamma_{fk}}{t_f}} \text{ για } l_b > l_e \text{ ενώ } f_{fdd}(l_b) = f_{fdd} \frac{l_b}{l_e} \left(2 - \frac{l_b}{l_e}\right) \text{ για } l_b < l_e \quad (8)$$

όπου $\Gamma_{fk} = 0.03k_B \sqrt{f_{ck} f_{ctm}}$ με $k_B = \sqrt{\frac{2-w_f/s_f}{1+w_f/400}} \geq 1$ και $l_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{2f_{ctm}}}$

και στην συνέχεια για την περίπτωση μανδύα U:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{frp}} 0.9 d f_{fed} 2t_f (\cot\beta + \cot\theta) \frac{w_f}{s_f} \quad (9)$$

με $f_{fed} = f_{fdd} \left[1 - \frac{l_e \sin\beta}{2 \min(0.9d, h_w)}\right]$.

4.ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο EC8 στο κεφάλαιο 3 που είναι σχετικό με ενισχύσεις και επισκευές κτηρίων δίνει κάποιες αντίστοιχες σχέσεις όπως επίσης και ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. Οι σχέσεις αυτές έχουν διαφορές στον τρόπο υπολογισμού της ενεργού τάσης οπότε προκύπτουν και διαφορετικά αποτελέσματα στην υπολογιζόμενη τέμνουσα που παραλαμβάνουν τα FRP. Με την βοήθεια δεδομένων από την βιβλιογραφία στον παρακάτω πίνακα γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές.

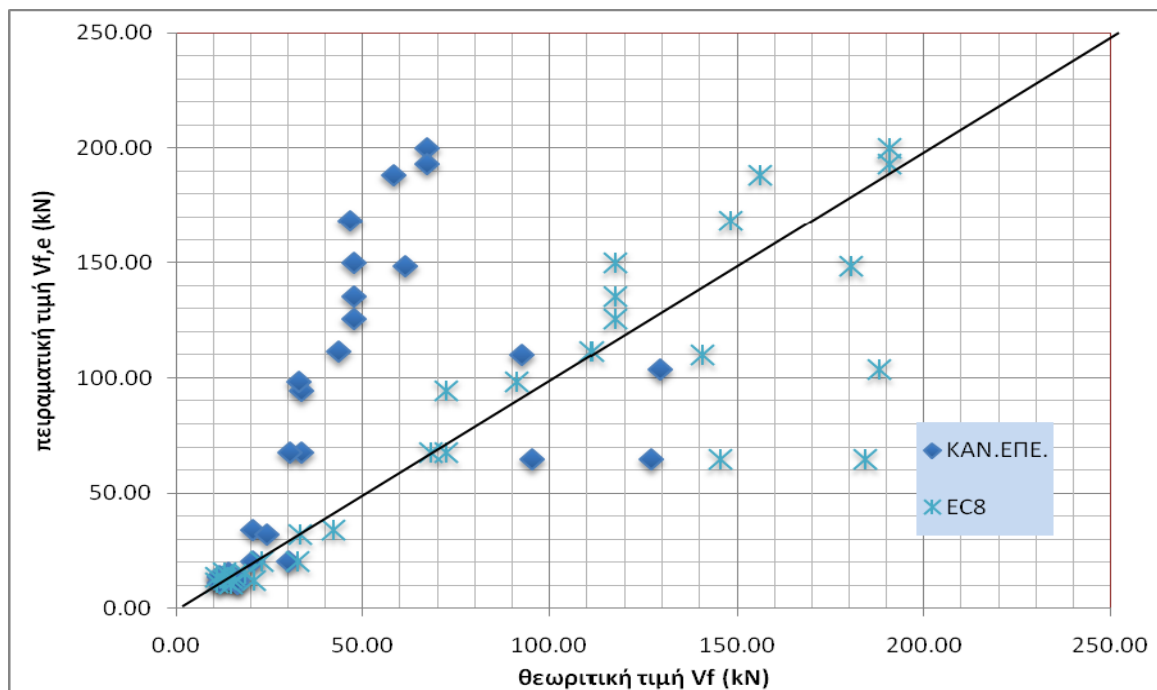
beam	εfrp,e	Vf,e(kN)	Vf(kN)					EC8 [9]	KAN.ΕΠΕ. [10]
			T 1998 [3]	T-A 2000 [4]	M-L 2006 [8]	C-T 2002 [7]			
U (3)	0,005	34,16	32,96	33,69	28,12	21,59	42,11	20,48	
U (5)	0,003	20,50	32,96	18,46	17,46	21,59	23,07	20,48	
U (6)	0,0034	32,23	45,72	26,65	31,68	30,91	33,32	24,41	
U (7)	0,0015	20,60	25,81	26,12	24,19	29,44	32,65	30,10	
O(BS12)	0,0084	135,32	113,32	94,02	63,93	54,05	117,53	47,67	
O(BS24)	0,0062	199,75	120,91	152,74	105,30	74,08	190,93	67,42	
O(BM06)	0,0117	94,24	74,66	57,88	38,46	39,06	72,35	33,71	
O(BM12)	0,0093	149,81	113,32	94,02	63,93	54,05	117,53	47,67	
O(BM18)	0,0078	188,48	125,54	124,88	85,82	65,09	156,10	58,38	
O(BM24)	0,006	193,31	120,91	152,74	105,30	74,08	190,93	67,42	
O(BL06)	0,0084	67,66	74,66	57,88	38,46	39,06	72,35	33,71	
O(BL12)	0,0078	125,65	113,32	94,02	63,93	54,05	117,53	47,67	
O(BMW06)	0,0084	67,66	74,66	54,72	36,18	36,27	68,40	30,70	
O(BMW012)	0,0069	111,15	113,32	88,89	60,19	50,12	111,12	43,42	

O(BMW24)	0,0046	148,20	120,91	144,41	98,55	68,52	180,51	61,40
O(2)	0,012	98,05	86,44	73,02	33,11	38,04	91,28	32,99
O(3)	0,0103	168,31	152,80	118,62	53,96	52,52	148,28	46,66
S2	0,001	64,64	100,38	116,43	80,55	89,25	145,54	95,42
S3	0,0017	109,88	100,38	112,57	76,98	86,76	140,71	92,60
S4	0,0005	64,64	84,80	147,31	91,90	105,89	184,14	126,80
S5	0,0008	103,42	84,80	150,48	94,89	108,05	188,10	129,24
T(S1a)	0,0041	13,36	13,30	8,73	9,27	11,10	10,91	11,59
T(S1b)	0,0034	11,08	13,30	8,73	9,27	11,10	10,91	11,59
T(S2a)	0,0032	15,65	11,03	10,44	10,64	12,78	13,05	14,20
T(S2b)	0,0026	12,71	11,03	10,44	10,64	12,78	13,05	14,20
T(S3a)	0,002	13,04	11,59	11,85	11,59	13,97	14,81	16,39
T(S3b)	0,0016	10,43	11,59	11,85	11,59	13,97	14,81	16,39
T(S1-45)	0,003	13,82	18,80	12,34	20,04	15,68	15,42	11,58
T(S2-45)	0,0022	15,20	15,59	14,75	23,54	18,06	18,44	14,18
T(S3-45)	0,0013	11,98	16,38	16,74	26,20	19,75	20,92	16,37

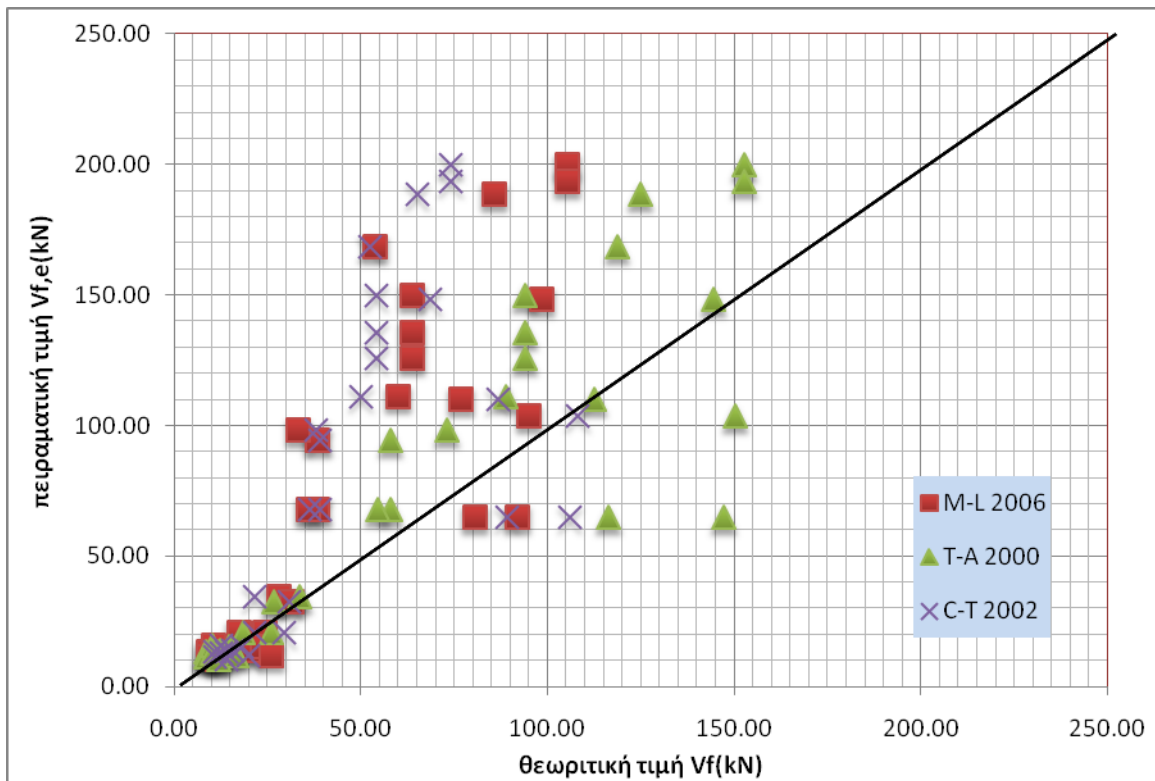
U= Uji, O=Ohuchi et al., S=Sato et al., T= Triantafyllou [3].

Πίνακας 1: Σύγκριση πειραματικών δεδομένων από την βιβλιογραφία με αριθμητικά αποτελέσματα διαφορετικών μοντέλων.

Στον παραπάνω πίνακα τα πειραματικά δεδομένα είναι αντιγραμμένα από τον Triantafyllou [3] ενώ οι θεωρητικές τιμές έχουν υπολογιστεί από τον γράφοντα με βάση τις σχέσεις που προτείνονται στην αντίστοιχη βιβλιογραφία θέτοντας για συντελεστή ασφαλείας $\gamma_{frp}=1$ για να είναι άμεσα συγκρίσιμα με τα πειραματικά αποτελέσματα. Παρακάτω παρουσιάζονται αντίστοιχα γραφήματα που προέκυψαν με βάση τα δεδομένα του Πίνακα 1 και βοηθάνε στην ποιοτική ανάλυση των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 5: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών αναλαμβανόμενης τέμνουσας από ΙΟΠ.

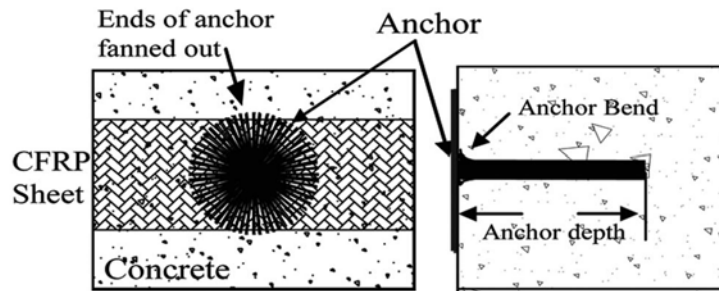


Σχήμα 6: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών αναλαμβανόμενης τέμνουσας από ΙΟΠ.

Η ευθεία που φαίνεται στα παραπάνω σχήματα έχει κλίση 45° οπότε ότι βρίσκεται πάνω από αυτήν είναι από την μεριά της ασφάλειας. Οπότε φαίνεται ξεκάθαρα ότι οι σχέσεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. είναι πολύ συντηρητικές αν λάβουμε κιάλας υπ' όψιν ότι τα αποτελέσματα έχουν υπολογιστεί χωρίς συντελεστή ασφαλείας. Ακόμα μπορούμε να σημειώσουμε ότι οι σχέσεις που προτείνουν οι Monti και Liotta αλλά και οι υπόλοιποι ερευνητές πλησιάζουν περισσότερο τα πειραματικά αποτελέσματα ενώ οι σχέσεις του EC8 κινδυνεύουν να φύγουν από την μεριά της ασφάλειας και να δώσουν τιμές μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες πειραματικές.

5. ΑΓΚΥΡΩΣΕΙΣ

Όπως αναφέρεται και παραπάνω ως συνηθέστερη μορφή ενίσχυσης δοκών έναντι τέμνουσας είναι ο μανδύας τύπου U. Επικρατέστερη μορφή αστοχίας σε αυτή την περίπτωση είναι η αποκόλληση των ΙΟΠ με αποτέλεσμα να εκμεταλλευόμαστε ένα μικρό μόνο ποσοστό της αντοχής του υλικού. Με σκοπό την αύξηση της αποτελεσματικότητας του υλικού ερευνώνται τα τελευταία χρόνια διάφοροι τρόποι αγκύρωσης. Οι Eshwar, Nanni και Ibell [2] εφάρμοσαν σε μια σειρά δοκιμών τους 3 από τους 4 τρόπους αγκύρωσης που φαίνονται στο σχήμα 3 ($1^{ος}$, $3^{ος}$ και $4^{ος}$). Τα αγκύρια που χρησιμοποιούνται είναι και αυτά από ΙΟΠ καθώς μεταλλικά αγκύρια δεν συνίστανται λόγω προβλημάτων οξείδωσης, ηλεκτρικής ασυμβατότητας και συγκέντρωσης τάσεων (ασυμβατότητα μηχανικών ιδιοτήτων με το υλικό ενίσχυσης). Ο $4^{ος}$ τρόπος αγκύρωσης που αναφέρεται παραπάνω χρησιμοποιήθηκε και από τους Orton, Jirsa και Bayrak [11] και είναι αυτός που φαίνεται λεπτομερέστερα στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 7: Αγκύρωση CFRP

Κρίσιμες παράμετροι για την αποτελεσματικότητα της αγκύρωσης είναι η ποσότητα των αγκυρίων, το βάθος έμπηξης τους και η ακτίνα καμπύλωσης που φαίνεται στο σχήμα 7. Οι Eshwar, Nanni και Ibell [2] για την αγκύρωση της 3^{ης} και 4^{ης} μορφής του σχήματος 3 έπειτα από μια σειρά πειραμάτων καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι μπορεί να αυξήσει την ικανότητα ανάληψης τέμνουσας έως και 50%. Επίσης προκύπτει ότι όταν η αγκύρωση με την μπάρα GFRP (φαίνεται με χρώμα κόκκινο στο σχήμα 3) γίνεται μέσα στην πλάκα είναι έως και 40% αποτελεσματικότερη απ' ό,τι όταν γίνεται στην δοκό λόγω συγκέντρωσης τάσεων στην γωνία που κάνουν οι ίνες στην δεύτερη περίπτωση. Ακόμα προτείνεται η διάμετρος της οπής να είναι 1,5 με 2,5 φορές της διαμέτρου της μπάρας GFRP. Στην αγκύρωση της μορφής του σχήματος 7 παρατηρήθηκε αύξηση στην αντοχή από 25 έως και 200% ανάλογα με το πλήθος των αγκυρίων ενώ το βάθος έμπηξης τους δεν φάνηκε να επηρεάζει την απόδοσή τους και απλά προτείνεται ως ελάχιστη τιμή τα 50mm. Αντίθετα οι Orton, Jirsa και Bayrak [11] προτείνουν ως βάθος έμπηξης τα 130-150mm δηλαδή τουλάχιστον 50mm στον πυρήνα της διατομής ώστε να εξασφαλισθεί η μεταφορά τάσεων. Οι ίδιοι μετά από μια σειρά πειραμάτων κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η χρήση αυτών των αγκυρίων όχι μόνο αυξάνει την αντοχή της ενίσχυσης αλλά και την αποτελεσματικότητα του υλικού, δηλαδή την αντοχή προς την ποσότητα που χρησιμοποιείται. Επιπλέον συμπεραίνουν ότι είναι καλύτερο να χρησιμοποιούνται πολλά και μικρά αγκύρια παρά λίγα και μεγάλα και προτείνουν μια απόσταση ανάμεσα σε αυτά περίπου 3,8cm.

Γενικά καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η χρήση επιπλέον αγκύρωσης των FRP αυξάνει όχι μόνο την αντοχή της ενίσχυσης αλλά και την αποτελεσματικότητα του υλικού που μεταφράζεται σε οικονομικό όφελος οπότε προτείνεται ανεπιφύλακτα. Η τεχνική αυτή όμως είναι σε πολύ αρχικό στάδιο ερευνητικά και λόγω έλλειψης επιπλέον δεδομένων δεν είναι εφικτή μια περαιτέρω εμβάθυνση στο θέμα με την πρόταση συγκεκριμένων μεθόδων διαστασιολόγησης και σύγκρισης αυτών.

6.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Αθ. Χ. Τριανταφύλλου, «Ενισχύσεις κατασκευών σκυροδέματος και τοιχοποιίας με σύνθετα υλικά»
- [2] Nagaraj Eshwar, Antonio Nanni, and Timothy James Ibell, «Performance of Two Anchor Systems of Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer Laminates», ACI Materials Journal/January-February 2008, Title no. 105-M09, p 72-80.
- [3] Thanasis C. Triantafyllou, “Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-Bonded FRP Composites”, ACI Structural Journal/March-April 1998, Title no. 95-S11, p107-115

- [4] Thanasis C. Triantafillou and Costas P. Antonopoulos, “DESIGN OF CONCRETE FLEXURAL MEMBERS STRENGTHENED IN SHEAR WITH FRP”, JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION / NOVEMBER 2000, p198-205
- [5] Carlo Pellegrino and Claudio Modena, “Fiber Reinforced Polymer Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Transverse Steel Reinforcement”, JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION / MAY 2002, p104-111
- [6] Abdelhak Bousselham and Omar Chaallal, “Behavior of Reinforced Concrete T-Beams Strengthened in Shear with Carbon Fiber-Reinforced Polymer— An Experimental Study”, ACI Structural Journal/May-June 2006, Title no. 103-S35, p339-347
- [7] J.F. Chen, J.G. Teng, “Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding”, Elsevier Science Ltd. 2002, Construction and Building Materials 17 (2003), p 27–41
- [8] Giorgio Monti, Marc’Antonio Liotta, “Tests and design equations for FRP-strengthening in shear”, 2006 Elsevier Ltd, Construction and Building Materials 21 (2007), p 799–809
- [9] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 3: Strengthening and repair of buildings DRAFT No 4, Revised Final Project Team Draft (pre Stage 49), July 2003, © CEN 2003 Copyright reserved to all CEN members, p1-72
- [10] ΟΜΑΔΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΝΤΑΞΗ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΥ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΑΠΟ ΩΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ, “ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ (ΚΑΝΕΠΕ) ΤΕΛΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΚΕΙΜΕΝΟΥ – 3”, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2009\
- [11] Sarah L. Orton, James O. Jirsa, and Oguzhan Bayrak, “Design Considerations of Carbon Fiber Anchors”, JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION © ASCE / NOVEMBER/DECEMBER 2008, p608-616