ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΚΑΙ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΟΚΩΝ Ο/Σ ΜΕ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΜΕ ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ (CFRP)

ΚΑΤΣΑΜΑΚΑΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

Προπτυχιακός φοιτητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., akatsama@civil.auth.gr ΜΥΛΩΝΑΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ-ΙΩΑΝΝΗΣ

Προπτυχιακός φοιτητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., <u>mylonasa@civil.auth.gr</u> ΨΥΡΡΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Προπτυχιακός φοιτητής Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., gpsyrras@civil.auth.gr

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία εζετάζεται το φαινόμενο της καμπτικής και διατμητικής ενίσχυσης δοκών από Ο/Σ με τη χρήση πολυμερών οπλισμένων με ίνες άνθρακα (CFRP). Αρχικά, παρουσιάζεται μία εκτενής θεωρητική διερεύνηση των ινοπλισμένων πολυμερών (FRP) με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία και αναλύονται τα πλεονεκτήματα των συγκεκριμένων υλικών σε σχέση με τις διάφορες μεθόδους ενίσχυσης κατασκευών. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι πιθανές μορφές αστοχίας των δοκών Ο/Σ που έχουν ενισχυθεί με τα σύνθετα αυτά υλικά. Προκειμένου να μελετηθεί η συνεισφορά των ινοπλισμένων πολυμερών (FRP) στην ενίσχυση των δοκών πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε τρία (3) δοκίμια δοκών από Ο/Σ, στο εργαστήριο Πειραματικής Αντοχής Υλικών και Κατασκευών του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θ. Η πρώτη δοκός από Ο/Σ χρησιμοποιήθηκε ως δοκός ελέγχου και δεν ενισχύθηκε. Η δεύτερη δοκός από Ο/Σ ενισχύθηκε σε κάμψη με CFRP, ενώ η τρίτη δοκός από Ο/Σ ενισχύθηκε σε κάμψη και διάτμηση με CFRP. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες διατάζεις του Κανονισμού Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.), του Ευρωκώδικα 8-3 (ΕΝ1998-3) και του Αμερικανικού Ινστιτούτου Σκυροδέματος (ΑCI440). Τέλος, παρουσιάζονται αριθμητικές προσομοιώσεις των πειραμάτων με το πρόγραμμα ανάλυσης διατομών AnySection. Μέσω της παραπάνω εργασίας τεκμηριώνεται τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά η αζιοπιστία και η αποτελεσματικότητα των πολυμερών οπλισμένων με ίνες άνθρακα (CFRP) ως υλικά επισκευής και ενίσχυσης των δοκών Ο/Σ και κατ επέκταση των κατασκευών.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Τα ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ-FRP) είναι υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται στη δομική βιομηχανία κυρίως τα τελευταία 25 χρόνια [1][2]. Χρησιμοποιούνται κυρίως για την επισκευή και την ενίσχυση κατασκευών από Ο/Σ, ενώ έχουν χρησιμοποιηθεί και ως υλικό κατασκευής ράβδων διαμήκους οπλισμού [3] και τενόντων προέντασης [4]. Παράγονται είτε σε μορφή λάμας είτε σε μορφή φύλλων [5]. Τα ΙΟΠ αποτελούν μία από τις πιο σύγχρονες τεχνικές στη δομική ενίσχυση και αποκατάσταση των κατασκευών. Αποτελούνται από ενισχυτικές ίνες πολύ υψηλής αντοχής εμποτισμένες μέσα σε οργανικές ή ανόργανες μήτρες (εποξικές, τσιμεντοειδείς) και χαρακτηρίζονται ως σύνθετα υλικά. Καθοριστικής σημασίας στην αντοχή των ΙΟΠ είναι οι ενισχυτικές ίνες οι οποίες μπορεί να είναι από άνθρακα (CFRP), γυαλί (GFRP) ή αραμίδιο (AFRP). Πιο πρόσφατα έχουν αναπτυχθεί ίνες από χάλυβα υψηλής αντοχής (SFRP) [2], τα οποία παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα (π.χ αυξημένη πλαστιμότητα) σε σύγκριση με τα παλαιότερα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί για τον ίδιο σκοπό. Πιο συγκεκριμένα, τα κυριότερα πλεονεκτήματα είναι [2][5][6] :

- Ιδιαίτερα υψηλή αντοχή.
- Υψηλό μέτρο ελαστικότητας.
- Παραμορφώσεις αντίστοιχες με του Ο/Σ.

- Ταχύτητα και ευκολία τοποθέτησης.
- Χαμηλό (αμελητέο) βάρος.
- Ανθεκτικότητα σε διάβρωση.
- Διαθεσιμότητα σε μεγάλες διαστάσεις.
- Γραμμική-ελαστική συμπεριφορά μέχρι τη θραύση.

Ενώ αντίστοιχα, τα μειονεκτήματά τους είναι:

- Χαμηλή πλαστιμότητα καθώς αστοχούν ψαθυρά.
- Είναι εύφλεκτα.
- Ευαισθησία στην υπεριώδη ακτινοβολία.
- Απώλεια της αντοχής (15% 60%) υπό τη δράση μόνιμων φορτίων.
- Υψηλό κόστος.
- Συχνή αστοχία λόγω απώλειας συνάφειας και αποκόλλησης.
- Αδυναμία αξιοποίησης ολόκληρης της αντοχής τους σε περίπτωση αποκόλλησης.

Το κόστος των υλικών αυτών (FRP) παρόλο που είναι ακόμα υψηλό σε σχέση με τα παραδοσιακά υλικά που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές από Ο/Σ, παρουσιάζει σταθερή μείωση τα τελευταία χρόνια αυξάνοντας έτσι τη δυνατότητα χρήσης του. Στην συνέχεια, αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε υλικού που χρησιμοποιείται ως όπλιση των FRP. Πρέπει να σημειωθεί πως οι παρακάτω πληροφορίες αφορούν αποκλειστικά τις ίνες ως υλικό και όχι το αντίστοιχο σύνθετο ύλικό FRP [2].

<u>Ίνες Άνθρακα</u>

Οι ίνες άνθρακα παρασκευάζονται συνήθως από πολυ-ακριλο-νιτρίλιο (polyacrylonitrile, PAN) ή πίσσα και χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή και μέτρο ελαστικότητας, χαμηλή πυκνότητα και έχουν διάμετρο 5-8 μm. Διακρίνονται σύμφωνα με τις χαρακτηριστικές τους ιδιότητες σε ίνες: υψηλής αντοχής (high strength HS), μέσου μέτρου ελαστικότητας (intermediate modulus IM), υψηλού μέτρου ελαστικότητας (high modulus HM) και πολύ υψηλού μέτρου ελαστικότητας. (ultra high modulus UHM) [2].



Εικόνα 1 : Ίνες άνθρακα [2]

Ίνες Γυαλιού

Μέχρι πρόσφατα το μεγαλύτερο ποσοστό των ινών που χρησιμοποιούνται στην ενίσχυση είναι ίνες γυαλιού, αφού ήταν υλικό πιο οικονομικό σε σχέση με τις ίνες άνθρακα, εύκολο στην παραγωγή και με υψηλή αντοχή και δυσκαμψία. Η μικρή πυκνότητα του, η ανθεκτικότητα του σε χημική διάβρωση και η άριστη θερμική και ηλεκτρική μονωτική του ικανότητα , καθώς και το γεγονός ότι δεν παρουσιάζει σημαντικές ερπυστικές παραμορφώσεις είναι μερικά από τα κύρια χαρακτηριστικά του [2].



Εικόνα 2 : Ίνες γυαλιού [2]

<u>Ίνες Αραμιδίου</u>

Οι ίνες αραμιδίου παρασκευάζονται από αρωματικά πολυαμίδια (μακριές πολυμερικές αλυσίδες με αρωματικούς δακτυλίους). Προσφέρουν καλές μηχανικές ιδιότητες σε χαμηλή πυκνότητα. Χαρακτηρίζονται από υψηλή εφελκυστική αντοχή, υψηλό μέτρο ελαστικότητας και χαμηλό βάρος. Η πυκνότητα των ινών αραμιδίου είναι μικρότερη από αυτή των ινών γυαλιού και άνθρακα. Έχουν υψηλή ανθεκτικότητα τόσο σε πυρκαγιά όσο και σε υψηλές θερμοκρασίες, καθώς επίσης είναι απρόσβλητες από οργανικούς διαλύτες. Η πιο επιτυχής οργανική ίνα που παρασκευάστηκε βιομηχανικά είναι εκείνη με την επωνυμία Kevlar[2].



Εικόνα 3 : Ίνες αραμιδίου (Kevlar) [2]

Μεγαλύτερο ενδιαφέρον, όμως, παρουσιάζουν οι μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού (FRP), δηλαδή του πολυμερούς το οποίο έχει ενισχυθεί με τις παραπάνω κατηγορίες ινών. Οι ιδιότητες αυτές αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα [6]. Εναλλακτικές τιμές για τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών παρουσιάζονται στον πίνακα [6]. Οι διακυμάνσεις αυτές οφείλονται στην διαφορετική σύσταση των εκάστοτε ινοπλισμένων πολυμερών. Οι ακριβείς τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων του εκάστοτε ινοπλισμένου πολυμερούς πιστοποιούνται από τον κατασκευαστή.

	Ίνες Υάλου	Ίνες Άνθρακα	Ίνες Αραμιδίου	Ίνες Χάλυβα
Εφελκυστική αντοχή (MPa)	1300-3400	2000-5600	2500-3620	1500-3500
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	22-62	150-325	48-76	185-210
Μέγιστη Παραμόρφωση (mm/mm)	0.03-0.05	0.01-0.015	0.02-0.036	0.04
Συντελεστής θερμικής διαστολής (10-6m/m/°K)	5.5	0.0	-0.5	6.5
Σημείο Τήξης (°C)	1100	310	420	1300
Πυκνότητα (gr/cm ³)	2.5-2.6	1.7	1.4	7.9

Πίνακας 1 : Μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών διακριτοποιημένες με βάση των τύπο ινών [2]

Material	Elastic modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Failure deformation (%)	Loss of strength under permanent load (%)
Glass-FRP	50	1700-2100	3	60
Aramid-FRP	65-120	1700-2100	2–3	50
Carbon-FRP	165-600	1400-3000	0.5-1.7	15
Steel	200	220-400	0.2 ^a	

^a Yield deformation.

Πίνακας 2 : Εναλλακτικές τιμές για τις μηχανικές ιδιότητες των FRP [6]

Παρατηρούμε, λοιπόν, πως το υψηλό μετρο ελαστικότητας των FRP τους δίνει την δυνατότητα να παραλάβουν σημαντικές τάσεις, ακόμα και για μικρές παραμορφώσεις (παραπλήσιες με του O/Σ). Στο παρακάτω διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων δίνεται σχηματικά το μέτρο ελαστικότητας των διαφόρων ειδών ινοπλισμένων πολυμερών [6].



Σχήμα 1 : Διάγραμμα ροής FRP και σύγκριση με τον τυπικό δομικό χάλυβα [6]

Με βάση όλα τα παραπάνω , σχηματίζεται ο παρακάτω πίνακας ποιοτικής αποτίμησης της κάθε κατηγορίας FRP ανάλογα με το εκάστοτε κριτήριο [6].

	Behaviour		
Criteria	CFRP	GFRS	AFRP
Tensile strength	Very good	Very good	Very good
Compressive strength	Very good	Poor	Very good
E-module	Very high	Medium	Low
Fatique	Excellent	Good	Acceptable
Creep	Good	Acceptable	Poor
Resistance to alkaline enviroment	Very good	Good	Poor
Durability	Very good	Good	Acceptable
Resistance to fire	Poor	Poor	Poor

Πίνακας 3 : Ποιοτική αποτίμηση της συμπεριφοράς των CFRP , GFRP , AFRP [6]

2. ΠΙΘΑΝΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΔΟΚΟΥ Ο/Σ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗΣ ΜΕ CFRP

Μια προκαταρκτική μελέτη των Meier et al. (1991) [7][8] ασχολήθηκε με τρία διαφορετικά σενάρια αστοχίας ενισχυμένων δομικών στοιχείων με ΙΟΠ. Αυτά περιγράφονται παρακάτω:

1. Αστοχία των ινών του υφάσματος από υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής τους.

2. Τυπική αστοχία της θλιβόμενης ζώνης του σκυροδέματος.

3. Αποκόλληση των ινών των ΙΟΠ από το δομικό στοιχείο του σκυροδέματος.

Ο πρώτος τρόπος αστοχίας περιγράφεται ψαθυρός , αλλά είναι πολύ εύκολα και με

ασφάλεια προβλέψιμος. Είναι ένας από τους επιθυμητούς τρόπους αστοχίας.

Στη συνέχεια οι Meier et al. (1992) προέκτειναν τους πιθανούς τρόπους αστοχίας σε εννέα. Οι έξι που προστέθηκαν περιγράφονται ακολούθως:

4. Απόσχιση του σκυροδέματος μέσω εφελκυστικών εντάσεων.

5. Αστοχία της διεπιφάνειας μέσα στο πάχος του ΙΟΠ.

6. Αστοχία των οπλισμών δομικού χάλυβα.

7. Αστοχία συνάφειας στο πάχος της μήτρας.

8. Αστοχία συνάφειας μεταξύ ινών και μήτρας.

9. Αστοχία συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και μήτρας.

Οι τελευταίοι τρεις τύποι δεν παρατηρήθηκαν και περιγράφονται ως "θεωρητικά πιθανά σενάρια".

3. ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Για να διαπιστωθεί η ευεργετική επίδραση της ενίσχυσης της δοκού Ο/Σ με το CFRP χρησιμοποιήθηκαν ο EN1992-1-1, ο EN1998-3, ο KAN.ΕΠΕ.,ο ACI440 και ο ACI318. Στις παρακάτω σχέσεις χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα τα υλικά των πειραμάτων, τα οποία περιγράφονται αναλυτικότερα στη συνέχεια. Συνοπτικά, αναφέρονται τα παρακάτω:

Πλάτος διατομής δοκού: 10 cm

Ύψος διατομής δοκού: 15 cm

Κατηγορία σκυροδέματος: C20/25

Κατηγορία χάλυβα : B500C

Διαμήκης οπλισμός: 2Φ10 (άνω ίνα) και 2Φ10 (κάτω ίνα)

Οπλισμός διάτμησης: Φ4/150mm στις κρίσιμες περιοχές και Φ4/200 στο μέσο της δοκού Πάχος φύλλου CFRP : 0,131 mm

Μέτρο ελαστικότητας και όριος θράυσης CFRP : 230 GPa και 1,4 % αντίστοιχα .

3.1 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΟΥ ΕΝ1992-1-1

Προκειμένου να διαπιστωθεί η αναμενόμενη αντοχή της μητρικής δοκού σε κάμψη και διάτμηση χρησιμοποιήθηκαν οι διατάξεις του ΕΝ1992-1-1 για τον σχεδιασμό φορέων από σκυρόδεμα [9].

3.1.1 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΚΑΤΑ ΕΝ1992-1-1

 $ω = (A_s f_{yd}) / (b_w df_{cd})$ $μ = M_d / (b_w d^2 f_{cd}), όπου :$





 A_s εμβαδόν διαμήκους εφελκυόμενου οπλισμού (m2) f_{yd} αντοχή σχεδιασμού χάλυβα οπλισμού (KPa) b_w ελάχιστο πλάτος της διατομής στην εφελκυόμενη ζώνη (m) d στατικό ύψος (m) f_{cd} αντοχή σχεδιασμού σκυροδέματος (KPa) M_d αναλαμβανόμενη ροπή (kNm)

Επομένως, με εφαρμογή των σχέσεων για τα δ	εδομένα του πειράματος:
M _d	8,76 kNm

3.1.2 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΚΑΤΑ ΕΝ1992-1-1

Με βάση τον ΕΝ1992-1-1, η διατμητική δύναμη που παραλαμβάνεται από το σκυρόδεμα , $V_{\text{Rd,c}}$, υπολογίζεται ως [9]:

 $V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} k (100 \ \rho_1 \ f_{ck})^{1/3} + k_1 \ \sigma_{cp}] \ b_w d \qquad , \ \mu\epsilon \ \epsilon \lambda \acute{\alpha} \chi \mbox{isth} \tau \ t \mu \acute{\eta} \ \tau \ \eta \nu :$

 $V_{Rd,c} = (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d$, ópou :

$$f_{ck} \sigma \epsilon MPa$$

k =
$$1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \le 2,0 \ \mu\epsilon \ d \ \sigma\epsilon \ mm$$

$$\rho_1 = \frac{A_{\rm sl}}{b_{\rm w}d} \le 0,02$$

- b_w είναι το ελάχιστο πλάτος της διατομής στην εφελκυόμενη ζώνη [mm]
- $\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c < 0.2 \ f_{cd} \ [MPa]$
- N_{Ed} είναι η αξονική δύναμη στη διατομή [N] (N_{Ed}>0 για θλίψη). Η επιρροή των επιβεβλημένων παραμορφώσεων στη N_E μπορεί να αγνοείται.
- A_C είναι το εμβαδόν της διατομής του σκυροδέματος [mm²]

 $V_{Rd,c} \sigma \epsilon [N]$

Για στοιχεία με κατακόρυφο οπλισμό διάτμησης, η αντοχή σε τέμνουσα, V_{Rd} λαμβάνεται ως η μικρότερη τιμή που προκύπτει από τις σχέσεις:

$$V_{\rm Rd,s} = \frac{A_{\rm sw}}{s} z \, f_{\rm ywd} \, \cot\theta$$

και

 $V_{Rd,max} = \alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd} / (cot\theta + tan\theta)$

 \mathbf{A}_{sw} είναι το εμβαδόν της διατομής του οπλισμού διάτμησης

s είναι η απόσταση των συνδετήρων

- f_{ywd} είναι η τιμή σχεδιασμού του ορίου διαρροής του οπλισμού διάτμησης
- ν1 είναι δείκτης μείωσης της αντοχής για σκυρόδεμα ρηγματωμένο λόγω
 διάτμησης
- α_{cw} είναι συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την εντατική κατάσταση στη θλιβόμενη διαγώνιο

Επομένως, με εφαρμογή των σχέσεων για τα δεδομένα του πειράματος:

$V_{Rd,c}$	9 kN
V _{Rds}	25,1 kN

3.2 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΟΥ ΕΝ1998-3

3.2.1 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΚΑΤΑ ΕΝ1998-3

Ο Ευρωκώδικας 8-3 (EN1998-3) [11] θεωρεί ότι τα εξωτερικά επικολλημένα ΙΟΠ συμπεριφέρονται σαν πρόσθετος οπλισμός διάτμησης παρόμοια με τους εσωτερικούς συνδετήρες. Αυτό επιτυγχάνεται κάνοντας την υπόθεση ότι τα ΙΟΠ μεταφέρουν μόνο αξονικές τάσεις στη βασική διεύθυνση των ινών και επίσης ότι έως την διατμητική αστοχία τα ΙΟΠ παραμορφώνονται λιγότερο από τη μέγιστη δυνατή (ιδεατή) παραμόρφωση. Σύμφωνα με τον EN1998-3 η τέμνουσα αντοχής σχεδιασμού λόγω οπλισμού διάτμησης V_{Rd3} υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$V_{\rm Rd\,3} = V_{\rm cd} + V_{\rm wd} + V_{\rm fd}$$

,όπου : V_{cd} είναι η τέμνουσα που παραλαμβάνεται από το σκυρόδεμα κατά τον EN1992-1-1, V_{wd} η τέμνουσα που παραλαμβάνεται από τους συνδετήρες κατά τον EN1992-1-1 και $V_{rd,f}$ η τέμνουσα που παραλαμβάνει το ΙΟΠ, η οποία υπολογίζεται βάση των ακόλουθων σχέσεων: Για κλειστού τύπου περιτύλιξη και για επικόλληση τύπου U, η αντοχή του FRP σε διάτμηση δίνεται ως:

$$V_{rd,f} = 0,9d \cdot f_{fdd,e} \cdot 2 \cdot t_f \cdot \left(\frac{w_f}{s_f}\right)^2 \cdot \left(\cot\theta + \cot\beta\right) \cdot \sin\beta$$

d είναι το στατικό ύψος

θ είναι η γωνία κλίσης των θλιβόμενων διαγωνίων σκυροδέματος (θλιπτήρων)

 $f_{fdd,e}$ είναι η αντοχή σχεδιασμού του FRP σε αποκόλληση, η οποία εξαρτάται από τη διαμόρφωση της ενίσχυσης.

Για μανδύες μορφής U (δηλαδή ανοιχτούς), η αντοχή σχεδιασμού των FRP σε αποκόλληση μπορεί να λαμβάνεται:

$$f_{\rm fdd,e,U} = f_{\rm fdd} \cdot \left[1 - k \frac{L_{\rm e} \sin \beta}{z} \right]$$

 t_f είναι το πάχος της λωρίδας του φύλλου ή του υλικού FRP (σε μία πλευρά)

β είναι η γωνία μεταξύ της (ισχυρής) κατεύθυνσης των ινών στη λωρίδα, το φύλλο ή το υλικό FRP και του άξονα του μέλους,

 w_f είναι το πλάτος της λωρίδας ή φύλλου FRP, μετρούμενο κάθετα προς την (ισχυρή) κατεύθυνση των ινών

 s_f είναι η απόσταση (κεντρικά) μεταξύ των λωρίδων FRP, μετρούμενη κάθετα προς την (ισχυρή) κατεύθυνση των ινών.

z = 0.9d είναι ο εσωτερικός μοχλοβραχίονας

$$k = \left(1 - \frac{2}{\pi}\right)$$

$$f_{\rm fdd} = \frac{1}{\gamma_{\rm fd}} \sqrt{0.6 \frac{E_{\rm f} f_{\rm ctm} k_{\rm b}}{t_{\rm f}}}$$

- γ_{fd} τον επιμέρους συντελεστή για την αποκόλληση του FRP ($\gamma_{fd} = 1,5$)
- $E_{\rm f}$ το μέτρο ελαστικότητας των φύλλων / στρώσεων FRP
- f_{ctm} η μέση εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος

 $k_{\rm b} = \sqrt{1.5 \cdot (2 - w_{\rm f}/s_{\rm f})/(1 + w_{\rm f}/100 \text{ mm})}$ L_e είναι το ενεργό μήκος σύνδεσης: $L_{\rm e} = \sqrt{\frac{E_{\rm f} \cdot t_{\rm f}}{\sqrt{4 \cdot \tau_{\rm max}}}} \qquad (\mu \text{ovάδες: N, mm})$

είναι ο συντελεστής επικάλυψης

 $\tau_{max} = 1.8 f_{ctm} k_b$ η μέγιστη αντοχή σύνδεσης (συνάφειας)

Επομένως, με εφαρμογή των σχέσεων για τα δεδομένα του πειράματος:

K_b	1,173
L _e	230 mm
f_{fdd}	398 MPa
$\mathrm{f}_{\mathrm{fdd},\mathrm{e},\mathrm{U}}$	114 MPa
$V_{rd,f}$	26 kN
$V_{ m Rd,c}$	9 kN
V _{Rds}	25,1 kN
V _{Rd3}	60,1 kN

3.3 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΟΥ ΚΑΝ.ΕΠΕ. 3.3.1 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΚΑΤΑ ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Σύμφωνα με τις διατάξεις του Κανονισμού Επεμβάσεν [12][13],η αστοχία αναμένεται ως πρόωρη αποκόλληση του υλικού ενίσχυσης λόγω ανεπάρκειας της σύνδεσης κατά μήκος του στοιχείου. Υπολογίζεται - κατά όμοιο τρόπο με την ενίσχυση σε διάτμηση - η τιμή σχεδιασμού του νέου οπλισμού σ_{jd} και η πρόσθετη ροπή ΔM_{do} που καλείται να αναλάβει η ενισχυμένη διατομή

Οι παρακάτω όροι, όμως, διαφοροποιούνται της διάτμησης:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_j t_j}{2f_{ctm}}} \text{ (MPa,mm)}$$

 $\beta_{w} = \sqrt{\frac{2 - b_{j} / b_{w}}{1 + b_{j} / b_{w}}} ,$ συντελεστής επιρροής πλάτους οπλισμού ενίσχυσης b_{j} το πλάτος του υλικού ενίσχυσης b_{w} το πλάτος του εφελκυόμενου πέλματος του

δομικού στοιχείου επί του οποίου επικολλάται το υλικό ενίσχυσης

 $\beta_L = \sin\left(\frac{\pi \lambda}{2}\right) \cong \lambda (2 - \lambda)$ συντελεστής επιρροής του διατιθέμενου

μήκους αγκύρωσης, όπου $\lambda = \frac{L_{av}}{L_{e}} < 1,0$ και L_{av} το διατιθέμενο μήκος αγκύρωσης του οπλισμού ενίσχυσης όταν $\lambda \ge 1,0$.

$$\beta_L = 1,0$$
 ór

 $\begin{array}{l} \lambda = L_{av} \ / \ L_{e} \\ \beta = \beta_{w} \ \beta_{L} \\ E \pi i \pi \lambda \acute{e} ov, \ \sigma_{j,max} = \beta \ f_{ck} \ L_{e} \ / \ t_{j} \\ \sigma_{j,crit} = k_{v} \ \sigma_{j,max} \end{array}$

 $\sigma_{jd} = \sigma_{j,crit} / \gamma_{Rd}$

Τελικά, προκύπτει η ροπή που μπορεί να αναλάβει η ταινία CFRP για την ενίσχυση σε κάμψη της δοκού:

 $\Delta M_{do} = A_j z \sigma_{jd}$, ópou :

z είναι ο μοχλοβραχίονας των εσωτερικών δυνάμεων (ο οποίος μπορεί να ληφθεί ίσος με $0,9d_j$)

 d_j είναι το στατικό ύψος της διατομής, μετρούμενο από την στάθμη του εξωτερικού οπλισμου A_j το εμβαδόν του ινοπλισμένου πολυμερούς,

Aj	200 mm^2
Le	107,23 mm
λ	0,8088
k _v	0,602
β	0,595
σ _{j,max}	638,19 MPa
σ _{j,crit}	384,22 MPa
σ _{jd}	320,18 MPa
$\Delta M_{ m do}$	8,65 kNm

3.3.2 ΑΝΤΟΧΉ ΣΕ ΔΙΑΤΜΉΣΗ ΚΑΤΑ ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Η τέμνουσα που αναλαμβάνει ο νέος οπλισμός διάτμησης δίνεται ως [12]:

 $V_{jd} = \sigma_{jd} \rho_j b_w h_{j,ef} (\cot\theta + \cot\alpha) (\sin a)^2$, $\dot{\sigma} = \sigma_{jd} \sigma_j b_w h_{j,ef} (\cot\theta + \cot\alpha) (\sin a)^2$

 $\rho_j = 2A_j/(s_j b_w sina)$

 $A_j = t_j w_j$ το εμβαδό διατομής CFRP

si αξονική απόσταση των ταινιών ΙΟΠ

 b_w πλάτος δοκού

α γωνία ινών εξωτερικού οπλισμού διάτμησης ως προς τον διαμήκη άξονα h_{i} , e_{f} το ενεργό ύψος της ενίσχυσης για την ανάληψη τέμνουσας (= 2/3 d)

Η αστοχία που αναμένεται είναι η πρόωρη αποκόλληση του υλικού ενίσχυσης λόγω ανεπαρκούς αγκύρωσης των άκρων του. Έναντι αυτής της αστοχίας πρέπει:

$$\begin{split} &\sigma_{j,crit} = k_v \sigma_{j,max} \\ &\kappa_v = 0,40 + 0,25\lambda \leq 0,65 \ (\lambda = L_{av}/L_e) \\ &L_{av} = h_{j,ef} \\ &L_e = (E_j \ t_j)/(2 \ f_{ctm})^{1/2} \\ &\sigma_{j,max} = \beta \ \tau_{b,a\pio\kappa} L_e/t_j \ , \ \mu\epsilon \ \tau_{b,a\pio\kappa} = f_{ctm} \\ &\kappa \alpha \iota \ o \ \delta \iota o \rho \theta \omega \tau \iota \kappa \delta \varsigma \ \sigma \upsilon v \tau \epsilon \lambda \epsilon \sigma \tau \eta \varsigma \ \beta = \beta_w \ \beta_I \ \mu\epsilon : \end{split}$$

ενίσχυσης, ίσος με $\sqrt{2}/2\gamma$ ια ενίσχυση με συνεχή φύλλα ή υφάσματα

$$\beta_L = \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right) \cong \lambda(2-\lambda)$$
, συντελεστής επιρροής διατιθέμενου

μήκους αγκύρωσης ότα
ν $~\lambda \leq \! 1,0$

Τελικά, η τέμνουσα για γωνία διατμητικών ρηγμάτων $\theta=22^{\circ}$ που μπορεί να αναλάβουν οι 6 ταινίες CFRP είναι:

A _i	100 mm^2
Sj	80 mm
b_{w}	100 mm
а	90°
ρ _i	0,025
h_{j}, e_{f}	86,667 mm
w _j	50 mm
λ	0,268
L_{av}	86,67 mm
L _e	323,33 mm.
k _v	0,467
$\beta_{ m w}$	0,919
$eta_{ m L}$	0,464
β	0,427
$\sigma_{j,max}$	151,88 MPa
σ _{j,crit}	70,92932
σ_{id}	59,1078
θ	22°
V _{id}	31,7 kN

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

3.4 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΟΥ ΑCΙ440 ΚΑΙ ΤΟΥ ΑCΙ318

Ta μηχανικά χαρακτηριστικά των FRP που δίνονται από τους κατασκευαστές ($f_{fu}^*, \epsilon_{fu}^*, E_f$) δεν λαμβάνουν υπόψιν την μακροχρόνια έκθεση τους σε περιβαλλοντικές συνθήκες, εκτός και αν αυτό επισημαίνεται από την εταιρία κατασκευής [14][15][16]. Για αυτόν τον λόγο, ο ACI 318 ορίζει τους περιβαλλοντικούς συντελεστές απομείωσης C_E για διαφορετικούς τύπους FRP και συνθήκες έκθεσης. Οι συντελεστές αυτοί κάνουν μια συντηρητική εκτίμηση για την απομείωση της εφελκυστικής αντοχής, της αντοχής ερπυσμού και κόπωσης των FRP και μπορούν να αγνοηθούν αν χρησιμοποιηθεί προστατευτικός μανδύας.

Άρα, η τάση θράυσης σχεδιασμού και η αντίστοιχη παραμόρφωση δίνονται από τις σχέσεις

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad \varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad E_f = f_{fu} / \varepsilon_{fu}$$

3.4.1 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΚΑΤΑ ΑCΙ440 ΚΑΙ ΑCΙ318

Ο κανονισμός ACI318 ορίζει την μεθοδολογία για την εύρεση της καμπτικής και διατμητικής αντοχής διατομών οπλισμένου σκυροδέματος που υπόκεινται σε κάμψη και διάτμηση.

Η καμπτική αντοχή ορθογωνικής διατομής προκύπτει από την εξίσωση :

$$M_n = bd^2 \left[1 - \frac{\rho f_y}{1.7f_c'} \right] \rho f_y$$

ópou ρ : to posostó tou eqelkuómenou oplismoú , b : to plátoc the dokoú , d : to statikó

ύψος, f_c': η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος και f_y: η τάση διαρροής του χάλυβα. Η εξωτερική ενίσχυση με FRP στην επιφάνεια εφελκυσμού ενός καμπτικού μέλους από οπλισμένο σκυρόδεμα έχει παρουσιάσει αύξηση αντοχής μέχρι και σε ποσοστό 160% (Meier and Kaiser 1991 ; Ritchie et al. 1991 ; Sharif et al. 1994) [7][8]. Ωστόσο , αν συνυπολογισθούν οι περιορισμοί που ορίζει ο ACI318 για προστασία από κατάρρευση της κατασκευής και ο επιθυμητός βαθμός πλαστιμότητας , το ποσοστό ελαττώνεται σε πιο λογικά επίπεδα της τάξεως των 40%. Παρόμοιοι συντελεστές ασφαλείας φ και ψ_f ορίζονται από τον ACI για την ονομαστική καμπτική αντοχή του δομικού μέλους M_n και την επιπρόσθετη αντοχή των FRP M_{nf} αντίστοιχα. Η προτεινόμενη τιμή από τον κανονισμό για το ψ_f είναι 0.85, ενώ ο συντελεστής απομείωσης αντοχής φ υπολογίζεται από διάγραμμα συναρτήσει της παραμόρφωσης του εφελκυόμενου χάλυβα ε_t στην οριακή κατάσταση. Προκειμένου να αποφευχθεί μία ενδιάμεση αστοχία προκαλούμενη από ρωγμές εξαιτίας της αποκόλλησης του FRP, η παραμόρφωση σχεδιασμού του FRP ε_{fd} πρέπει να ελλατωθεί στο σημείο που υπάρχει πιθανότητα να συμβεί αυτό σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \le 0.9 \varepsilon_{fu}$$

, όπου : f_c η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος , n ο αριθμός στρώσεων FRP και t_f το πάχος για μία στρώση ινοπλισμένου πολυμερούς. Είναι σημαντικό πρωτού υπολογισθεί η ενεργή παραμόρφωση του FRP ε_{fe} , να μην παραλείψουμε την αρχική παραμόρφωση ε_{bi} που έχει το δομικό μέλος εξαιτίας του ίδιου βάρους του ή προέντασης. Επομένως , η παραμόρφωση του FRP στην οριακή κατάσταση που καθορίζεται είτε από την θραύση της θλιβόμενης ζώνης , την θράυση του ινοπλισμένου πολυμερούς ή την αποκόλληση του από την διεπιφάνεια ισούται με :

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \le \varepsilon_{fd}$$

, όπου : ε_{cu} η οριακή παραμόρφωση του σκυροδέματος (ε_{cu} = 0.003), d_f το στατικό ύψος της εξωτερικής ενίσχυσης και c το ύψος της θλιβόμενης ζώνης. Είναι προφανές ότι η τάση που παραλαμβάνει το FRP σε αυτήν την παραμόρφωση ,δεδομένης της πλήρους ελαστικής συμπεριφοράς του ,είναι ίση με :

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$$

Η παραμόρφωση του χάλυβα που αντιστοιχεί στην $ε_{fe}$ και η παραμόρφωση του σκυροδέματος $ε_c$ από ανάλυση της διατομής υπολογίζεται ως εξής :

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d-c}{d_f - c}\right) \qquad \varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{c}{d_f - c}\right)$$

και η αντίστοιχη τάση στον οπλισμό είναι :

$$f_s = E_s \varepsilon_s \le f_y$$

, όπου γίνεται φανερό ότι η μέγιστη τιμή που λαμβάνεται είναι η τάση διαρροής του. Ακόμη, όσον αφορά στο σκυρόδεμα , το μέτρο ελαστικότητας του βρίσκεται από την σχέση :

$$E_c = 57,000 \sqrt{f_c'}$$

και η παραμόρφωση του ε'c από τον τύπο :

$$\varepsilon_c' = \frac{1.7f_c'}{E_c}$$

Το ύψος της θλιβόμενης ζώνης c που προαναφέρθηκε επαληθεύεται από την σχέση :

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f_c' \beta_1 b}$$

,όπου b το πλάτος της δοκού, A_s το εμβαδόν του εφελκυόμενου οπλισμού , A_f το εμβαδόν του ινοπλισμένου πολυμερούς και α_1 , β_1 προσεγγιστικοί συντελεστές έντασης που βασίζονται στην παραβολική σχέση τάσης - παραμόρφωσης του σκυροδέματος και δίνονται από τους τύπους :

$$\alpha_1 = \frac{3\varepsilon_c' \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1 {\varepsilon_c'}^2} \qquad \beta_1 = \frac{4\varepsilon_c' - \varepsilon_c}{6\varepsilon_c' - 2\varepsilon_c}$$

Τελικά , η συνεισφορά του ινοπλισμένου πολυμερούς στην κάμψη M_{nf} είναι :

ε _{fu}	0.0133
Ec	21.17 GPa
A _{sf}	157.08 mm ²
A _f	200 mm^2
WDL	0.375 kN/m
M _{DL}	0.04 kNm
ε _{bi}	0.00002
ε _{fd}	0.0027
С	92 mm
ε _{fe}	0.001873
ε _c	0.003
f_{fe}	430.69 MPa
ε	0.001607
β_1	0.9414
α_1	0.7488
M_{nf}	9.19 kNm

$$M_{nf} = A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

3.4.2 ΑΝΤΟΧΉ ΣΕ ΔΙΑΤΜΉΣΗ ΚΑΤΑ ΑCΙ440 ΚΑΙ ACI318

Η ονομαστική διατμητική αντοχή ορθογωνικής διατομής σκυροδέματος με εγκάρσιο οπλισμό υπολογίζεται ως το άθροισμα της αντοχής που προσδίδει το μπετόν V_c και της αντοχής των συνδετήρων V_s :

$$V_s = \frac{A_v f_{vt} d}{s} \qquad \qquad V_c = 2\sqrt{f_c'} b_w d$$

,όπου : \mathbf{A}_v το εμβαδόν του οπλισμού διάτμησης και s η απόσταση μεταξύ των συνδετήρων. Για εφαρμογή σε σχήμα U των διατμημτικών FRP , το ενεργό μήκος ενίσχυσης δίνεται από την σχέση :

$$L_e = \frac{23,300}{\left(n_f t_f E_f\right)^{0.58}}$$

Το επίπεδο παραμόρφωσης που μπορεί να επιτευχθεί ε_{fe} προκύπτει από το γινόμενο ενός μειωτικού ισοδύναμου συντελεστή κ_v, που είναι συνάρτηση της αντοχής σκυροδέματος, του τύπου εφαρμογής των ινοπλισμένων πολυμερών και της δυσκαμψίας των λωρίδων FRP με την παραμόρφωση θραύσης που έχει υπολογιστεί:

$$\varepsilon_{fe} = \kappa_v \varepsilon_{fu} \le 0.004$$

, όπου :

$$\kappa_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11,900 \varepsilon_{fu}} \le 0.75$$

Οι συντελεστές k_1 και k_2 εκφράζουν την επιρροή της αντοχής σκυροδέματος και του τύπου εφαρμογής αντίστοιχα και βρίσκονται από τις σχέσεις :

$$k_1 = \left(\frac{f'_c}{27}\right)^{2/3} \qquad \qquad k_2 = \begin{cases} \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} & \text{for U-wraps} \\ \frac{d_{fv} - 2L_e}{d_{fv}} & \text{for two sides bonded} \end{cases}$$

Εν τέλει , η αντοχή που προσδίδει το ινοπλισμένο πολυμερές σε διάτμηση εκφράζεται με τον τύπο :

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_{fv}}{s_f}$$

Le	12.105 m
\mathbf{k}_1	0.81867
k_2	0.8492
κ _v	0.0795
$\epsilon_{ m fe}$	0.00106
A_{fv}	100 mm^2
f _{fe}	243.14 MPa
V _f	36.47 kN

	Κάμψη	Διάτμηση
Δοκίμιο 1	9.19 kNm	31.32 kN
Δοκίμιο 2	18.38 kNm	31.32 kN
Δοκίμιο 3	18.38 kNm	57.79 kN

4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΑΝΥSECTION

Πραγματοποιήθηκε ανάλυση των διατομών με το λογισμικό AnySection στον Η/Υ [17][18]. Συγκεκριμένα, οι διατομές των στοιχείων προσομοιώθηκαν στο περιβάλλον του λογισμικού

"24° Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών 2018" Πάτρα, Φεβρουάριος 2018 προκειμένου να υπολογιστεί η καμπτική τους αντοχή. Οι διατομές καθώς και τα αποτελέσματα της ανάλυσης περιγράφονται παρακάτω.



Εικόνα 4 : Προσομοίωση της μητρικής δοκού από Ο/Σ



Εικόνα 5 : Προσομοίωση της δοκού ενισχυμένης με καμπτικό CFRP



Εικόνα 6 : Προσομοίωση της δοκού ενισχυμένης με καμπτικά και διατμητικά CFRP

Αξίζει να σημειωθεί πως με βάση το λογισμικό το διατμητικό CFRP που τοποθετήθηκε στις παρειές της δοκού συνεισφέρει στην καμπτική αντοχή της δοκού, σε μικρό βέβαια ποσοστό και μόνο στις διατομές στις οποίες τοποθετήθηκε. Για τον λόγο αυτόν θεωρήθηκε ως μηδενική η συνεισφορά του σε κάμψη προς την πλευρά της ασφάλειας. Τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό αναφέρονται παρακάτω.

Δοκίμιο	Μέγιστη καμπτική αντοχή
Δοκός 1	9,5 kNm
Δοκός 2	18,17 kNm
Δοκός 3	18,17 kNm

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Με σκοπό την πειραματική διερεύνηση της ενίσχυσης δοκών Ο/Σ με CFRP σε κάμψη και διάτμηση, δημιουργήθηκαν στο εργαστήριο Πειραματικής Αντοχής Υλικών και Κατασκευών του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θ. τρεις δοκοί από Ο/Σ. Οι τρεις αυτές δοκοί ήταν όμοιες, με μοναδική διαφοροποίηση την εξωτερική ενίσχυσή τους με CFRP. Αναλυτικότερα η πρώτη δοκός χρησιμοποιήθηκε ως πρότυπη και δεν ενισχύθηκε με CFRP. Η δεύτερη δοκός ενισχύθηκε με ένα συνεχές φύλλο CFRP σε κάμψη, στην κάτω παρειά της. Το φύλλο αυτό εκτεινόταν μέχρι και τις ακραίες διατομές της δοκού, δημιουργώντας συνθήκες αγκύρωσης. Η τρίτη και τελευταία δοκός ενισχύθηκε σε κάμψη και διάτμηση. Η καμπτική της ενίσχυση ήταν όμοια με της δεύτερης δοκού. Η διατμητική της ενίσχυση επετεύχθει με φύλλα CFRP τύπου U τα οποία επικολλήθηκαν εξωτερικά στις κρίσιμες περιοχές της. Το CFRP που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις είχε όμοιο πάχος και μηχανικές ιδιότητες. Το CFRP παράχθηκε από την εταιρία Sika[19]. Η συγκολλητική ουσία που χρησιμοποιήθηκε ήταν η εποξειδική ρητίνη εμποτισμού δύο συστατικών Sikadur-330 [19]. Τα τρία αυτά δοκίμια υποβλήθηκαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων. Λεπτομέρειες για τα υλικά και σκαριφήματα παρουσιάζονται παρακάτω:

Κατηγορία Σκυροδέματος	C20/25
Κατηγορία Χάλυβα	B500C

"24° Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών 2018" Πάτρα, Φεβρουάριος 2018

Μήκος δοκιμίων	1 m
Πλάτος διατομής δοκιμίων	10 cm
Ύψος διατομής δοκιμίων	15 cm
Μήκος μεταξύ των φορτίων της διάταξης	30 cm
Πάχος CFRP	0,131 mm
Μέτρο ελαστικότητας CFRP	230 GPa
Παραμόρφωση θραύσης CFRP	1,4 %
Πάχος επικάλυψης σκυροδέματος	1,5 cm
Πλάτο καμπτικού CFRP	10 cm
Μήκος διατμητικού CFRP	5 cm
Απόσταση μεταξύ διαδοχικών διατμητικών	3 cm
CFRP (από παρειά σε παρειά)	







Εικόνα 7 : Μητρική δοκός υποβληθείσα σε κάμψη τεσσάρων σημείων



Εικόνα 8 : Δοκός ενισχυμένη με καμπτικό CFRP σε κάμψη τεσσάρων σημείων



Εικόνα 9 : Δοκός ενισχυμένη με καμπτικά και διατμητικά CFRP σε κάμψη τεσσάρων σημείων

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Οι δοκοί που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα υποβλήθηκαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων μέχρι την αστοχία τους. Τα αποτελέσματα των τριών αυτών πειραμάτων καθώς και η σύγκρισή τους με τις αναμενόμενες αντοχές από τους κανονισμούς, οι οποίες υπολογίστηκαν και αναλύθηκαν αρχικά, αναλύονται στη συνέχεια.

6.1 ΔΟΚΙΜΙΟ 1⁰- ΜΗΤΡΙΚΗ ΔΟΚΟΣ

Η πρώτη δοκός που ελέγχθηκε ήταν η δοκός ελέγχου η οποία δεν ήταν ενισχυμένη με CFRP και η οποία χρησιμοποιήθηκε ως μέτρο σύγκρισης για την επιπλέον αντοχή που προσδίδει το CFRP στα δύο επόμενα δοκίμια.Η δοκός αυτή αστόχησε λόγω κάμψης σε φορτίο μηγανικής διάταξης ίσο με 6,1 tn δηλαδή 61 kN το οποίο αντιστοιγεί σε καμπτική φόρτιση ίση με 9,15 kNm και διατμητική φόρτιση ίση με 30,5 kN. Δημιουργήθηκαν σημαντικά καμπτικά και διατμητικά ρήγματα, ωστόσο τα κυριότερα, τα οποία και οδήγησαν στην τελική αστοχία, ήταν τα κατακόρυφα καμπτικά ρήγματα στην κάτω, εφελκυόμενη, ίνα της δοκού.

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα αναγράφονται παρακάτω.

	Πειραματικό Αποτέλεσμα	Καμπτική αντοχή			Διατμητική αντοχή		
		AnySection	EC2	ACI	EC2	ΚΑΝ.ΕΠΕ	ACI
Δοκίμιο 1°	9,15 kNm	9,5 kNm	8,76 kNm	9,19 kNm	34,1 kN	34,1 kN	31,32 kN
Αντίστοιχο φορτίο διάταξης	6,1 tn	6,33 tn	5,84 tn	6,12 tn	6,82 tn	6,82 tn	6,26 tn

6.2 ΔΟΚΙΜΙΟ 2⁰- ΔΟΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗ ΜΕ ΚΑΜΠΤΙΚΟ CFRP

Με δεδομένο ότι η πρώτη δοκός αστόγησε σε κάμψη και με στόγο την επιβεβαίωση της καμπτικής αντοχής που προσδίδει στη δοκό η ενίσχυσή της με καμπτικό CFRP, επιλέχθηκε η ενίσχυση της κάτω ίνας της δοκού. Λεπτομέρειες σχετικά με την ενίσχυση αναγράφονται στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η δεύτερη αυτή δοκός αστόχησε καθαρά διατμητικά με έντονα διατμητικά ρήγματα κοντά στις στηρίξεις για φορτίο μηχανικής διάταξης ίσο με 7,2 tn το οποίο αντιστοιχεί σε διατμητική δύναμη ίση με 36 kN και καμπτική ροπή ίση με 10,8 kNm. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα αναγράφονται παρακάτω.

	Πειραματικό Αποτέλεσμα	Καμπτική αντοχή			Διατμητική αντοχή		
		AnySection	KAN.EIIE	ACI	EC2	ΚΑΝ.ΕΠΕ	ACI
Δοκίμιο 1°	36 kN	18,17 kNm	17,41 kNm	18,38 kNm	34,1 kN	34,1 kN	31,32 kN
Αντίστοιχο φορτίο διάταξης	7,2 tn	12,11 tn	11,61 tn	12,25 tn	6,82 tn	6,82 tn	6,26 tn

6.3 AOKIMIO 3°-AOKO Σ ENI $\Sigma XYMENH$ ME KAMIITIKO KAI AIATMHTIKO CFRP

Η τρίτη και τελευταία δοκός ενισχύθηκε τόσο καμπτικά όσο και διατμητικά με CFRP. Περισσότερες λεπτομέρειες για την ενίσχυση υπάρχουν στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Το δοκίμιο υποβλήθηκε, όπως και τα προηγούμενα σε κάμψη τεσσάρων σημείων. Η αστοχία επήλθε για φορτίο μηχανικής διάταξης ίσο με 12 th δηλαδή 120 kN. Η αστοχία οφείλεται σε τυπική αστοχία της θλιβόμενης ζώνης του σκυροδέματος της δοκού, στην άνω ίνα της. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα αναγράφονται παρακάτω.

	Πειραματικό Αποτέλεσμα	Καμπτική αντοχή			Διατμητική αντοχή		
		AnySection	KAN.EIIE	ACI	EC8	ΚΑΝ.ΕΠΕ	ACI
Δοκίμιο 1°	120 kN	18,17 kNm	17,41 kNm	18,38 kNm	60,1 kN	65,8 kN	57,8 kN
Αντίστοιχο φορτίο διάταξης	12 tn	12,11 tn	11,61 tn	12,25 tn	12,02 tn	13,16 tn	11,56 tn

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνολικά , γίνεται προφανές από τις κανονιστικές διατάξεις και τα πειραματικά αποτελέσματα η επάρκεια της μεθόδου των CFRP για καμπτική και διατμητική ενίσχυση δοκών από O/Σ. Χαρακτηριστικά , η μητρική δοκός αύξησε την αντοχή της σε κάμψη περίπου σε ποσοστό (18,17 - 9,15) / 9,15 = 98% με εφαρμογή των ινοπλισμένων πολυμερών στην κάτω εφελκυόμενη ίνα , ενώ η διατμητική ενίσχυση απέδωσε σε βαθμό (60,1 - 34) / 34 = 77%. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και από τους τρεις κανονισμούς (EC , KAN.EΠΕ. , ACI) ήταν ικανοποιητική και επιβεβαίωσε τα πειραματικά συμπεράσματα. Η χρήση των ινοπλισμένων πολυμερών συνιστά μια εξαιρετικά αποτελεσματική μέθοδο για ενισχύσεις και επισκευές κατασκευών. Ωστόσο, θα ήταν λάθος να θεωρήσουμε ότι αποτελεί πανάκεια για κάθε περίπτωση κατασκευής προς ενίσχυση, αφού αυτό είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων. Τέλος, περισσότερα ερευνητικά αποτελέσματα θα οδηγήσουν σε πιο εκτεταμένη χρήση των FRP , εξέλιξη των ιδιοτήτων τους και ακόμα πιο μεγάλη συνεισφορά στον τομέα των ενισχύσεων και επισκευών των κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Konstantinos B. Katakalos, 'Strengthening of R/C structures under high cycle fatigue loadings'

LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, ISBN: 978-3-8465-8418-7

[2] Κωνσταντίνος Β. Κατάκαλος «Πειραματική και αριθμητική διερεύνηση της συμπεριφοράς δοκών Ο/Σ διατμητικά ενισχυμένων με αγκυρωμένες ή μη ανοιχτές λωρίδες ινοπλισμένων πολυμερών άνθρακα ή χάλυβα όταν υποβάλλονται σε μονότονες ή ανακυκλιζόμενες σεισμικού τύπου φορτίσεις» (2013), Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ. Τομέας Επιστήμης και Τεχνολογίας των Κατασκευών

[3] M.Kiari, T.Stratford, L.Bisby "New Design of Beam FRP reinforcement for Fire Performance", University of Edinburgh (2017)

[4] Andri Gunnarsson, Eyflór Rafn fiórhallsson and Jónas fiór Snæbjörnsson

"Bearing capacity of prestressed BFRP reinforced concrete beams

Experimental testing & Finite element simulations",

School of Science and Engineering, Reykjavik University

[5] Α.Κατσαμάκας, Α.Ι. Μυλωνάς "Ενίσχυση Δοκών Οπλισμένου Σκυροδέματος σε Κάμψη με FRP» 230 Συνέδριο Επισκευών και Ενισχύσεων Κατασκευών, Πάτρα (2017)

[6] George G. Penelis and Gregory G. Penelis "Concrete Buildings in Seismic Regions", (2014) CRC Press Taylor & Francis Group.

[7] Meier, U. and Kaiser, H.P. (1991) "Strengthening of Structures with CFRP Laminates", Proceedings of Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures, ASCE Specialty Conference, pp. 224-232

[8] Meier, U. (1995) "Strengthening of Structures Using Carbon Fibre/Epoxy Composites" Construction and Building Materials, Elsevier Science Publishers Ltd., London, UK, Vol.9, No. 6, pp.341-351

[9] EN1992-1

[10]Narayanan, R. and Beeby, A.(2005). Designers' Guide to EN 1992-1-1 and EN 1992-1-2. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Thomas Telford Ltd, London.

[11] EN1998-3

[12] KAN.ЕПЕ.

[13] Γ. Μιτολίδης, Θ. Σαλονικιός, Ανδρέας Κάππος,

«Καμπτική και Διατμητική Ενίσχυση Δοκών Ο/Σ στις Στηρίξεις με Πολυμερή Οπλισμένα με Χάλυβα (SRP) και Άνθρακα (CFRP)», 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 21-23/10/ 2009, Πάφος, Κύπρος

[14] ACI440

[15]ACI318

[16] ACI, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-08)", in ACI 440.2R-08. 2008,

American Concrete Institute: Farmington Hills. p. 45.

[17] V.K.Papanikolaou «Analysis of arbitrary composite sections in biaxial bending and axial load" March 2012,Computers & Structures

[18] V.K.Papanikolaou "AnySection : Software for the analysis of arbitrary composite sections in biaxial bending and axial load (v4.0.6)", January 2015

[19] <u>www.sika.gr</u>