



بررسی آزمایشگاهی تاثیر بار ثابت بر روی رفتار خمشی تیرهای بتن آرمه تقویت شده به وسیله پلیمرهای مسلح الیافی (FRP)

رضا مرشد*، مهرداد برزگر، احسان توسلی
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۹ مردادماه ۱۳۹۶
بازنگری: ۱ دی ماه ۱۳۹۶
پذیرش: ۵ دی ماه ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۱۳ دی ماه ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

بار ثابت
تقویت خمشی
پلیمرهای مسلح به الیاف
تیر بتن آرمه
ورق های الیاف کربن
EBR، EBRIG

چکیده: بهسازی سازه های بتن آرمه با استفاده از پلیمرهای مسلح الیافی امروزه به عنوان یک شیوهی کارآمد در سراسر جهان مورد استفاده می باشد. از جمله مهم ترین کاربردهای این پلیمرهای الیافی، تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه است. معمولا در صورت امکان تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه بوسیله پلیمرهای مسلح الیافی (FRP) پس از باربرداری از روی تیر مورد نظر انجام می شود. در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی تاثیر تقویت اعضای خمشی پس از قرار گرفتن تحت بار اولیه، با باربرداری قبل از تقویت و یا تقویت با حفظ بار پرداخته شده است. به این منظور، ۱۱ عدد تیر بتن آرمه با ابعاد $200 \times 200 \times 1700$ میلی متر مکعب ساخته شده و بغیر از نمونه های شاهد بقیه تحت بار اولیه با دو سطح مختلف که منجر به ایجاد ترک خوردگی در تیرها گردید، قرار گرفتند. سپس تقویت خمشی با یک لایه ورق CFRP یک جهته با روش EBR و EBRIG، با یا بدون باربرداری انجام گرفت. نتایج آزمایش حاکی از تاثیر بیشتر تقویت خمشی تحت بار ثابت (در حد بار سرویس که در محدوده رفتار الاستیک باقی بماند) بود.

۱- مقدمه

تغییر کاربری سازه، تغییر آیین نامه ها، فرسودگی سازه در طول زمان و غیره اشاره کرد [۲].

از آن جایی که جایگزین نمودن سازه های موجود با سازه های جدید در اغلب موارد از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست لذا یافتن راه حل مناسبی جهت ترمیم و تقویت سازه ها اهمیت شایانی پیدا می کند. در مقایسه با ساختن یک سازه جدید، تقویت سازه ی موجود می تواند پیچیده تر باشد. علاوه بر این همواره دسترسی به نواحی که نیاز به تقویت دارند ساده نیست. از سوی دیگر انتخاب غلط یک شیوهی نامناسب تعمیر یا تقویت، می تواند عملکرد سازه را بدتر هم بکند. روش های سنتی استفاده شده به عنوان تکنیک های مقاوم سازی نظیر انواع مختلف پوشش های مسلح، شاتکریت، کابل های پس تنیده شده در خارج از سازه و استفاده از صفحات فولادی مقید شده به سازه، معمولا نیاز به فضای زیادی دارند و اغلب در برابر شرایط محیطی آسیب پذیر می باشند. از این رو مصالح FRP^۱ جهت مقاوم سازی و تقویت سازه های بتن آرمه به عنوان یک فناوری نوین در مهندسی سازه مورد توجه قرار گرفته است. ویژگی های کلیدی که این مصالح

امروزه می توان از بتن مسلح به عنوان یکی از مهم ترین مواد ساختمانی موجود با کاربردی فراگیر در بسیاری از ساختمان های کوچک و بزرگ، پل ها، سدها، کانال ها، مخازن، تونل ها، لوله ها، سازه های ساحلی، سکوه های نفتی، روسازی راه ها و غیره نام برد. این تمایل روزافزون به ساخت و ساز با بتن مسلح را می توان ناشی از دسترسی آسان به شن و ماسه و سیمان، عدم نیاز به نیروی کار بسیار ماهر در ساخت و ساز بتن آرمه و برتری اقتصادی بتن آرمه در مقایسه با سایر مصالح ساختمانی دانست [۱]. به علاوه، شمار دیگری از مزایای بتن از جمله مقاومت فشاری نسبتاً بالا، مقاومت بسیار خوب در برابر آتش سوزی، صلبیت بالا، هزینه نگهداری پایین و غیره، موجب موفقیت قابل توجه آن نسبت به سایر مصالح ساختمانی شده است. با این وجود، در سراسر دنیا سازه های بتنی زیادی وجود دارند که از لحاظ مهندسی غیر ایمن و غیر قابل استفاده تلقی شده و نیاز به تقویت دارند. دلایل زیادی را می توان برای ضرورت انجام تقویت برشمرد که به طور خلاصه می توان به مواردی نظیر خطاهای محاسباتی، ضعف در اجراء

مرسی و همکاران تاثیر پیش بارگذاری و ایجاد آسیب اولیه در تیر را روی رفتار تیرهای تقویت شده مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. هرچند با افزایش پیش بارگذاری کاهش اندکی در مقاومت تیرهای تقویت شده مشاهده گردید ولی در مجموع آنان تاثیر پیش بارگذاری را در رفتار تیرهای تقویت شده ناچیز دانستند. از سوی دیگر معمولاً در زمان مقاوم سازی تیرها به روش های مرسوم، سعی می شود تا حد امکان بار وارده به تیر را کاهش دهند (مثلاً حذف بار زنده) و یا کاملاً حذف نمایند (جک زدن). البته حذف کامل بار در بسیاری از موارد امکان پذیر نیست.

تحقیق آزمایشگاهی در زمینه مقاوم سازی اعضای خمشی باید با در نظر گرفتن موارد فوق باشد. ایجاد ترک مصنوعی در تیر پیشنهاد مناسبی به نظر نمی رسد، زیرا وضعیت واقعی تنش و کرنش در بتن و آرماتور شبیه سازی نمی شود.

نوآوری که در این تحقیق بکار رفته است، انجام تقویت خمشی در حین پیش بارگذاری تیر است. میزان این پیش بارگذاری می تواند به گونه ای تنظیم شود که تنشها از محدوده رفتار الاستیک خارج نشود و یا میزان آن افزایش یابد بگونه ای که تنش های غیرخطی در بتن و آرماتور اتفاق افتاده و باز شدگی محسوس ترک ها رخ دهد. ضمناً این بارگذاری اولیه می تواند قبل از انجام تقویت برداشته شده یا بصورت ثابت در هنگام تقویت باقی بماند. در این تحقیق تاثیر بارگذاری اولیه با در نظر گرفتن موارد فوق روی رفتار بعد از تقویت مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان دهنده بهبود نسبی تاثیر تقویت در حضور بار ثابت است.

۲- برنامه ریزی آزمایش ها

برنامه ریزی آزمایش ها بگونه ای صورت گرفت که نمونه های تیر پس از پیش بارگذاری و ایجاد ترک اولیه تقویت و آزمایش شوند. رعایت این مسئله به منظور شبیه سازی کامل تقویت خمشی در سازه های واقعی صورت پذیرفت. از آنجا که در تقویت تیرها در سازه های واقعی معمولاً هر دو امکان باربرداری قبل از تقویت یا حفظ بار در هنگام تقویت وجود دارد، این دو حالت نیز با یکدیگر مقایسه گردید. ضمناً میزان پیش بارگذاری اولیه به دو صورت پیش بارگذاری در مرحله رفتار الاستیک و پیش بارگذاری تا شروع رفتار پلاستیک در نظر گرفته شد. نصب ورقه های FRP نیز به دو روش EBR و EBRIG صورت گرفت. انتخاب ابعاد و آرماتور گذاری و نحوه آزمایشات بر اساس امکانات آزمایشگاهی موجود صورت گرفته است. البته سعی شده است که تا حد امکان تناسب موجود در تیرهای واقعی رعایت گردد. به همین علت نسبت آرماتور کمی کمتر از یک درصد و نسبت طول دهانه به ارتفاع موثر حدود ۹ در نظر گرفته شد.

را برای مقاوم سازی مناسب می سازد، طبیعت مقاوم در برابر خوردگی و مقاومت بالا نسبت به وزن کم است [۳]. مصالح FRP به اشکال گوناگونی از قبیل ورق، تسمه، میلگرد و پروفیل تولید می شوند که هرکدام با توجه به کاربرد و نیاز، مورد استفاده قرار می گیرند.

یکی از مهم ترین ظرفیت های تیر بتنی، ظرفیت خمشی آن است که برای تقویت آن به وسیله پلیمرهای مسلح الیافی، معمولاً ورقه های FRP را به وجه کششی تیر می چسبانند. برای چسباندن ورق های FRP ساده ترین روش، روش EBR^۱ است که پس از آماده سازی ساده سطح بتن اقدام به چسباندن الیاف می شود. تحقیقات آزمایشگاهی جدید نشان می دهد که اگر تقویت تیر به وسیله چسباندن ساده ورق های FRP به بدنه تیر انجام شود (روش EBR)، سه حالت گسیختگی از جمله گسیختگی خمشی، برشی و جداسازی زودرس برای تیر محتمل خواهد بود [۵]. به منظور بالا بردن تاثیر تقویت تیرهای بتن آرمه توسط الیاف FRP تحقیقات زیادی انجام شده است. در سال ۲۰۱۰ مستوفی نژاد و محمودآبادی روش شیار زنی را پیشنهاد کردند تا بتوانند با به تاخیر انداختن جداسازی زودرس ورقه تقویتی، ظرفیت خمشی تیرهای بتن آرمه را بالاتر برند [۴]. در سال ۲۰۱۱ مستوفی نژاد و شاملی روش جدیدی را با الهام گرفتن از ایده شیار زنی با نام EBRIG ابداع کردند. این روش به صورت کامل از جداسازی زودرس کامپوزیت FRP جلوگیری کرد [۶]. در سال ۲۰۱۳ مستوفی نژاد و حاج رسولی ها تاثیر عمق شیار را بررسی کردند و عمق مناسب شیار را پیشنهاد دادند [۵]. مستوفی نژاد و حسینی در سال ۲۰۱۳ و مستوفی نژاد و مقدسی در سال ۲۰۱۴ روش شیار زنی EBROG را در مقایسه با روش EBR برای تقویت تیرها مورد بررسی قرار دادند. آن ها دریافتند که اگر تیر پس از تسلیم آرماتور کششی با روش EBROG تقویت شود تاثیر بیشتری در میزان مقاومت نهایی و میزان جذب انرژی تیر دارد [۷ و ۸]. در سال ۲۰۱۵ مستوفی نژاد و خزایی تاثیر الگوی شیار زنی را بر روی روش EBRIG بررسی کردند. آنها دریافتند که برای هر تعداد لایه از ورق FRP الگوی خاصی می تواند مقدار مقاومت نهایی بهینه را منجر شود [۹]. استفاده از روش های نوین آماده سازی و نصب مثل شیار زنی توام با هدایت ورقه الیافی به داخل شیار (EBRIG^۲) احتمال جداسازی ورقه های FRP از سطح بتن را بشدت کاهش می دهد و در این تحقیق نیز از این روش برای نصب FRP استفاده شده است.

با توجه به اینکه بحث مقاوم سازی سازه ها توسط پلیمرهای مسلح الیافی معمولاً پس از شروع استفاده از سازه مطرح می شود، احتمالاً سازه مورد نظر در زمان مقاوم سازی بصورت ترک خورده خواهد بود که البته شدت ترک خوردگی بسته به میزان بار وارده به سازه متفاوت است.

1 Externally Bonded Reinforcement

2 Externally Bonded Reinforcement In Groove

۲-۱- نمونه‌های تیر بتن آرمه

EBR-E: نمونه تقویت شده (EBR) پس از ترک خوردگی در ناحیه الاستیک و باربرداری

EBR-E-C: نمونه تقویت شده (EBR) پس از ترک خوردگی در ناحیه الاستیک با بار ثابت

EBR-P: نمونه تقویت شده (EBR) پس از ترک خوردگی در ناحیه پلاستیک و باربرداری

EBR-P-C: نمونه تقویت شده (EBR) پس از ترک خوردگی در ناحیه پلاستیک با بار ثابت

2-Ref-S: نمونه مرجع تقویت شده (EBRIG) بدون هیچ گونه بار و ترک اولیه

EBRIG-E: نمونه تقویت شده (EBRIG) پس از ترک خوردگی در ناحیه الاستیک و باربرداری

EBRIG-E-C: نمونه تقویت شده (EBRIG) پس از ترک خوردگی در ناحیه الاستیک با بار ثابت

EBRIG-P: نمونه تقویت شده (EBRIG) پس از ترک خوردگی در ناحیه پلاستیک و باربرداری

EBRIG-P-C: نمونه تقویت شده (EBRIG) پس از ترک خوردگی در ناحیه پلاستیک با بار ثابت

۳- مراحل انجام آزمایش

مراحل انجام آزمایش‌ها شامل بارگذاری اولیه، آماده‌سازی، تقویت و بارگذاری نهایی بوده است (شکل ۱).

۳-۱- آماده‌سازی

به منظور اعمال تقویت خمشی توسط کامپوزیت‌های FRP بر روی همه تیرهای بتن آرمه مراحل زیر انجام گرفت:

در ابتدا با توجه به این که باید FRP بر روی وجه کششی تیر اعمال می‌شد، تیرها برعکس شدند، به صورتی که وجه کششی تیر به سمت بالا قرار گرفت. سپس با استفاده از سنگ فرز و صفحه سنگ ساب وجه کششی تیر به میزان حدود ۲ میلی‌متر سایش داده شد تا شیره رویه بتن حذف شده و سنگدانه‌های بتن آشکار شوند.

هم‌چنین بر روی وجه کششی تیرهایی که قرار بود با روش EBRIG تقویت شوند توسط سنگ فرز با صفحه سنگ برشی، ۳ شیار به عرض و عمق ۱۰ میلی‌متر ایجاد شد.

در آخر پس از تمیز کردن و خشک شدن سطح نمونه‌ها رزین اپوکسی مطابق دستورالعمل به سطح اعمال شده و ورقه‌های FRP با ابعاد مورد نظر چسبانده شدند.

به منظور انجام این آزمایش تعداد ۱۱ تیر بتن مسلح در ابعاد ۲۰۰×۲۰۰×۱۷۰۰ میلی‌متر مکعب ساخته شد. آرماتور تیرها ثابت و بصورت ۲ عدد میلگرد ۱۲ آجدار در قسمت کششی (پایین) و ۲ عدد میلگرد ۱۲ آجدار در بالای مقطع استفاده شد. برای خاموت‌ها از میلگرد شماره ۸ آجدار به ابعاد ۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر مربع و با فاصله نصف ارتفاع موثر مقطع یعنی ۸۰ میلی‌متر استفاده گردید. مقدار پوشش بتن از همه وجه‌ها برابر با ۲۵ میلی‌متر و مقاومت فشاری بتن برابر با ۲۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. طرح اختلاط بتن مصرفی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. طرح اختلاط بتن مصرفی Concrete mixing plan

مقاومت فشاری (MPa)	W/C	سیمان (kg)	آب (kg)	ماسه (kg)	شن (kg)
۲۵	۰/۵	۴۰۰	۲۰۰	۹۰۰	۹۰۰

۲-۲- کامپوزیت FRP

ورق‌های FRP مصرف شده در این آزمایش از نوع الیاف کربن (CFRP) است که با نام تجاری C۲۰۰ Quantum Wrap و ساخت کشور انگلستان است. چسب رزین اپوکسی استفاده شده به این منظور با نام تجاری Quantum EPR ۳۳۰۱ مورد استفاده قرار گرفت. این الیاف به صورت تک لایه و با عرض ۱۶۵ میلی‌متر و طول ۱۵۰۰ میلی‌متر بر روی وجه کششی تیر چسبانده شد. مشخصات الیاف و چسب رزین اپوکسی مصرفی در جدول ۲ آمده است. ۵ نمونه از تیرهای ساخته شده در شرایط مختلف بارگذاری بوسیله ورق FRP به روش EBRIG تقویت شدند.

جدول ۲. مشخصات الیاف و چسب رزین اپوکسی مصرفی Specifications of fiber and adhesive epoxy resin used

کرنش پارگی (%)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	ضخامت هر لایه (mm)	Quantum Wrap C۲۰۰
۱/۵	۲۴۰	۴۹۵۰	۰/۱۱۱	
مدول خمشی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	ضخامت هر لایه (mm)	Quantum EPR ۳۳۰۱
۳۰۰۰	۳/۵	۴۵	۰/۴	

نام‌گذاری تیرها به صورت زیر صورت گرفته است:

Ref: نمونه مرجع تقویت نشده

1-Ref-S: نمونه مرجع تقویت شده (EBR) بدون هیچ گونه بار و

ترک اولیه



شکل ۱. تیر تحت بار ثابت (نمونه EBRIG-E-C)
Beam under constant load (sample EBRIG-E-C)

۳-۳- تقویت نمونه‌ها تحت بار ثابت با روش EBR
در این مرحله نیز ۲ تیر مورد آزمایش قرار گرفت که همگی با روش EBR توسط کامپوزیت FRP تقویت شدند. این تیرها با دو میزان بار متفاوت (ناحیه الاستیک و ناحیه خمیری) بارگذاری شده و ضمن ثابت نگه داشتن بار اعمالی تقویت شدند.

الف - بارگذاری در ناحیه الاستیک

نمونه تیر EBR-E-C پس از فرار گرفتن بر روی تکیه گاه با اعمال بار ۳۹ کیلونیوتن در ناحیه رفتار الاستیک ترک خورده و پس از علامت‌گذاری ترک‌ها جک مکانیکی ساخته شده به منظور نگه‌داشتن بار ثابت در کنار جک هیدرولیکی قرار داده شد و محکم گردید تا بتوان با حفظ بار تقویت را انجام داد. سپس کامپوزیت FRP به روش EBR اعمال شد و تیر پس از یک هفته تا شکست مورد ادامه بارگذاری قرار گرفت. جزئیات بیشتر در بخش ۳-۵ ارائه شده است.

ب- بارگذاری در ناحیه رفتار خمیری

در تقویت نمونه EBR-P-C تمامی مراحل مشابه تقویت تیر EBR-E-C است فقط در اینجا بار تا رسیدن به ناحیه رفتار خمیری اعمال و ثابت نگه داشته شد و سپس تقویت اعمال گردید.

۳-۴- تقویت نمونه‌ها با روش EBRIG

مراحل تقویت نمونه‌ها با روش EBRIG مشابه تقویت نمونه‌ها با روش EBR است که در فوق تشریح شد فقط برای حذف احتمال جداشدگی، روش تقویت اصلاحی مورد استفاده قرار گرفت. در این مرحله نیز پنج نمونه تیر مورد تقویت و آزمایش قرار گرفته است.

۳-۵- مراحل انجام آزمایش و تقویت تحت بار ثابت

به منظور درک بهتر روش بارگذاری ثابت جهت تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه بوسیله FRP، مراحل این روش به صورت شماتیک و در شکل ۲ ارائه شده است.

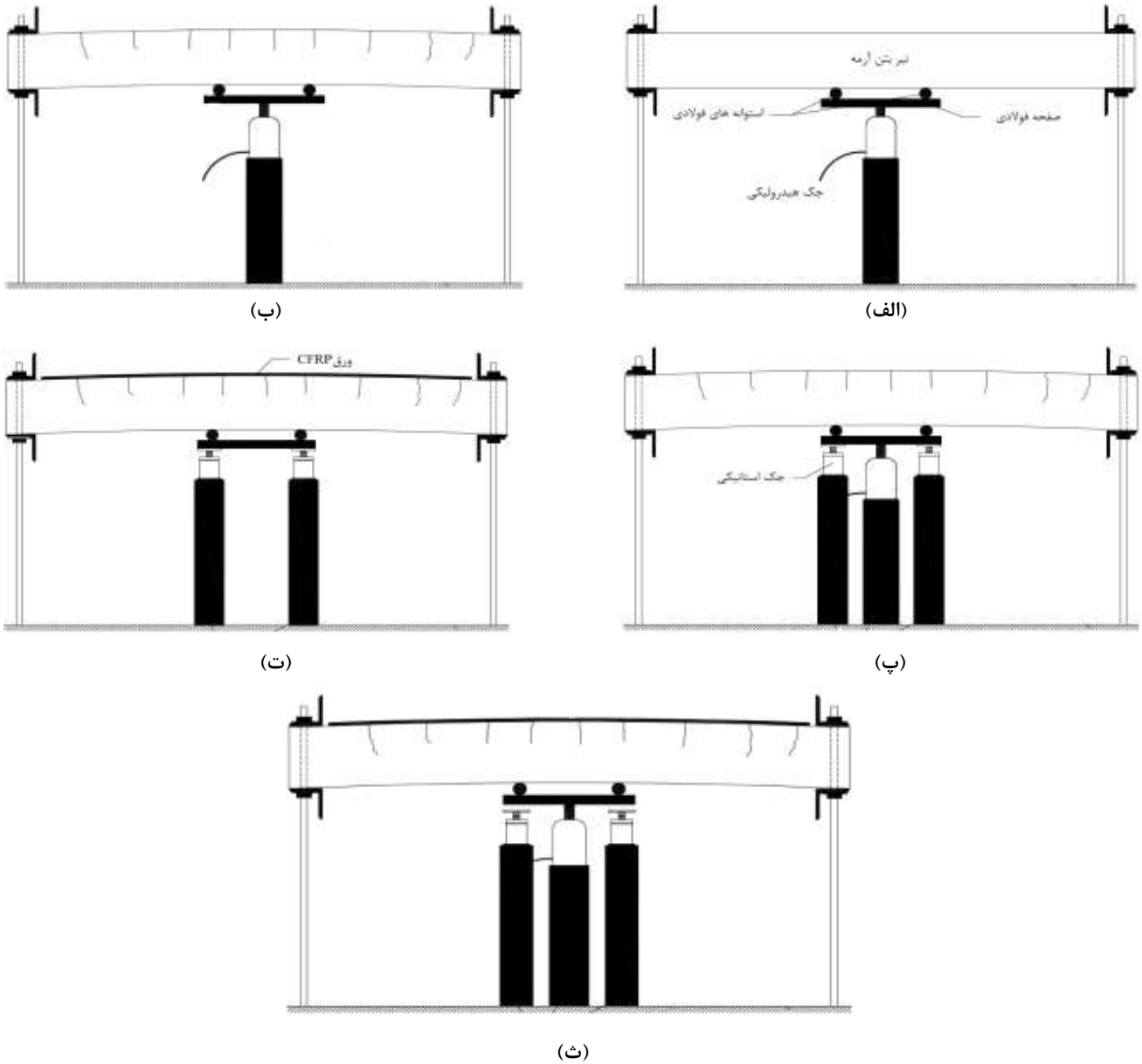
۳-۲- تقویت نمونه‌ها پس از بار برداری با روش EBR
در این مرحله ۲ تیر مورد آزمایش قرار گرفت که همگی با روش EBR توسط کامپوزیت FRP تقویت شدند. این تیرها با دو میزان بار متفاوت (در محدوده رفتار الاستیک و یا رفتار خمیری) پیش بارگذاری شده و پس از بار برداری تقویت شدند.

الف - پیش بار در ناحیه الاستیک

این تیر قبل از تقویت تحت پیش بار توسط جک هیدرولیکی قرار گرفت. با توجه به خصوصیات مقطع و بتن و مشخصات آرماتور مصرفی و نیز با ارزیابی تجربی نیروی لازم برای ایجاد تنش تسلیم در آرماتور در حدود ۵ کیلونیوتن برآورد گردید. به همین جهت پیش بار اعمالی برای عدم ایجاد رفتار پلاستیک کمتر و برابر ۳۹ کیلونیوتن در نظر گرفته شد. البته این نیرو از نیروی لازم برای ترک خوردگی تیر بیشتر بوده و تیر در ناحیه رفتار الاستیک دچار ترک خوردگی شد. سپس ترک‌های ایجاد شده علامت‌گذاری شدند و بار از روی تیر برداشته شد. با توجه به اینکه بار در ناحیه رفتار الاستیک اعمال شده بود، پس از برداشتن بار از روی تیر تمامی ترک‌ها بسته شدند. سپس کامپوزیت FRP به روش EBR با یک لایه الیاف C200 به عرض ۱۶/۵ سانتی متر و طول ۱۵۰ سانتی متر نصب شد. پس از ۷ روز و سخت شدن کامل تقویت، این تیر تا شکست بارگذاری و رابطه بار-تغییر مکان اندازه‌گیری گردید.

ب- پیش بار در ناحیه رفتار خمیری

در اینجا تمامی مراحل همانند تقویت تیر EBR-E بود با این تفاوت که پیش بار اعمالی کمی از ۵ کیلو نیوتن بیشتر بوده است. در این مرحله پس از بار برداری مقداری از ترک‌ها باز مانده بود که به دلیل ایجاد مختصر تغییر شکل خمیری و ماندگار در تیر بود.



شکل ۲. مکانیزم سیستم تقویت تحت بار ثابت؛ (الف) استقرار نمونه در محل بارگذاری و قرارگیری صفحه بارگذاری و جک هیدرولیکی، (ب) اعمال بار اولیه (تا ناحیه الاستیک یا پلاستیک) بر روی تیر، (پ) قرار گرفتن جک استاتیکی در زیر تیر، (ت) آزاد کردن جک هیدرولیکی و چسباندن ورق CFRP و (ث) اعمال بارگذاری نهایی تا شکست تیر به وسیله جک هیدرولیکی

The mechanism of the reinforcement system under constant load; (a) Placement of the sample at the site of loading and positioning of the loading plate and hydraulic jack; (b) Initial load (up to the elastic and plastic area) on the beam; (c) Static jacking under the beam; (d) Hydraulic jack release and CFRP sheet bonding; (e) Apply the final loading to the failure by the hydraulic jack

۴- نتایج و بحث

مجدد نمونه‌ها است و به همین جهت بخش اولیه نمودارها انطباق ندارند (نمودار تا قبل از ثابت شدن بار در بارگذاری اولیه) کاملاً مشابه نمودار نمونه Ref است).

خلاصه نتایج بدست آمده در جدول ۳ ارائه شده و مقایسه نتایج به کمک شکل‌های ۳ تا ۱۱ صورت گرفته است. لازم به ذکر است که نمودار تمامی نمونه‌های تقویت شده تحت بار ثابت، نمودار پس از بارگذاری

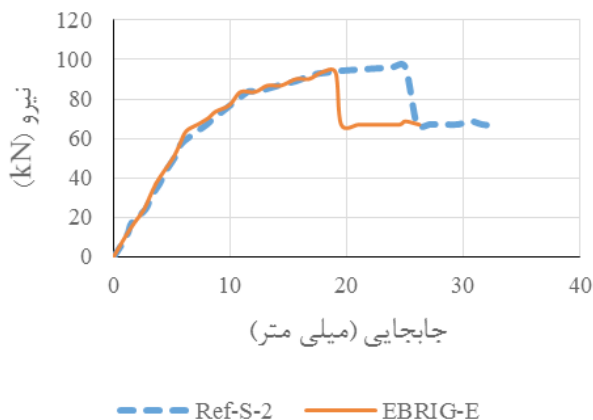
جدول ۳. نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها

Results obtained from experiments

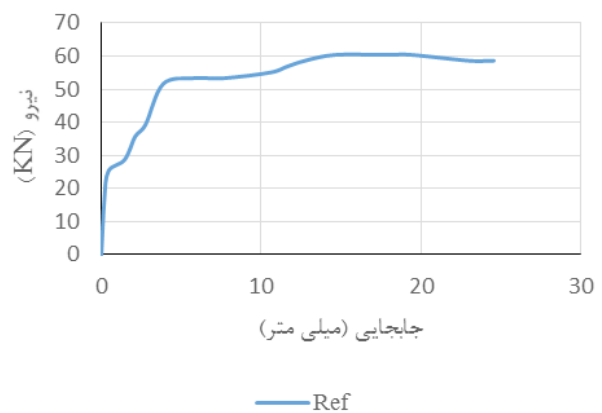
روش مقاوم سازی	پیش بارگذاری	نام تیر	جابجایی متناظر با افت ناگهانی مقاومت (mm)	قابلیت اتلاف انرژی تا لحظه افت مقاومت (kN-mm)	نیروی اعمالی حداکثر (kN)	رفتار FRP
ندارد	بدون	Ref	۲۵	۱۲۴۰	۶۰/۴	-
EBR	پیش	۱-Ref-S	۱۲/۶	۸۱۰	۸۱/۵	جداشدگی FRP
EBRIG	بارگذاری	۲-Ref-S	۲۵	۱۵۵۰	۹۶/۱	گسیختگی ورق FRP
EBR	الاستیک	EBR-E	۱۰/۶	۵۰۰	۷۸	جداشدگی FRP
		EBR-E-C	۹/۷	۶۳۰	۸۳/۱	جداشدگی FRP
	پلاستیک	EBR-P	۱۵	۷۵۷	۷۰/۸	جداشدگی FRP
		EBR-P-C	۱۱/۹	۷۸۶	۷۶	جداشدگی FRP
EBRIG	الاستیک	EBRIG-E	۱۹	۱۱۵۰	۹۳/۵	گسیختگی ورق FRP
		EBRIG-E-C	۱۷/۶	۱۳۹۵	۱۰۳	گسیختگی ورق FRP
	پلاستیک	EBRIG-P	۱۵	۸۶۸	۹۰/۲	گسیختگی ورق FRP
		EBRIG-P-C	۱۴/۹	۱۱۸۰	۹۶/۸	گسیختگی ورق FRP

شکل ۳ نمودار نیرو-جابجایی تیر شاهد با نام Ref را نشان می‌دهد که بدون هیچگونه تقویت و به منظور بدست آوردن منحنی رفتاری تیر قبل از تقویت تحت بارگذاری قرار گرفته است. در شکل ۴ مقایسه ای بین رفتار تیر پیش بارگذاری نشده (ترک نخورده) تقویت شده، ۲-Ref-S، با تیر ترک خورده باربردی شده، EBRIG-E، صورت گرفته است. ظرفیت باربری تیر ۲-Ref-S، مقدار اندکی حدود ۳ درصد بیشتر از ظرفیت باربری تیر EBRIG-E است. این در حالی است که میزان تغییر مکان متناظر با پارگی FRP در مرکز تیر در نمونه ۲-Ref-S به میزان قابل توجهی و در حدود ۲۸٪ بیشتر از نمونه EBRIG-E است. توزیع ترک در این دو نمونه نیز متفاوت بوده است. بر اساس مشاهدات تعداد ترک‌ها در نمونه پیش بارگذاری نشده بیشتر بوده و توزیع یکنواخت‌تری داشته است. به همین جهت تمرکز کرنش‌های کششی در ورق FRP

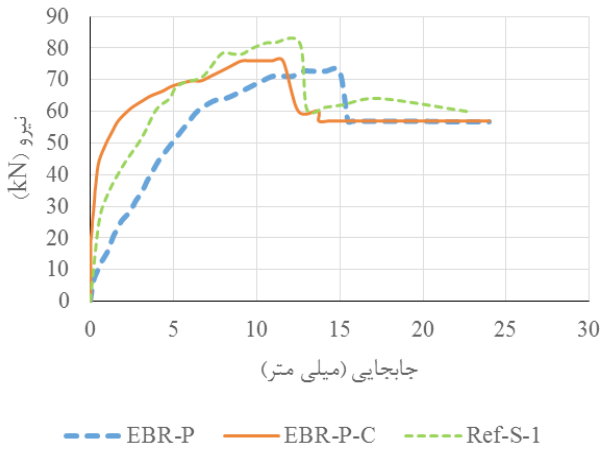
در محل ترکها در نمونه ۲-Ref-S کمتر بوده و ورق دیرتر دچار پارگی شده است. ضریب شکل پذیری (نسبت جابجایی نهایی یا شکست به جابجایی تسلیم) و قابلیت اتلاف انرژی (سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان تا لحظه شکست) نیز در تیر پیش بارگذاری شده کمتر بوده است. در بررسی شکل پذیری و اتلاف انرژی، افت ناگهانی مقاومت روی نمودار بار-تغییر مکان به میزان ۲۰ درصد مقاومت حداکثر معادل شکست فرض شده است و جابجایی متناظر با آن به عنوان جابجایی نهایی در نظر گرفته شده است [۱۱]. جابجایی تسلیم در بررسی ضریب شکل پذیری نیز بصورت قراردادی با معادل سازی سطح زیر نمودار بار-تغییر مکان با یک نمودار دوخطی الاستوپلاستیک بدست آمده است. شکست قراردادی محاسبه شده است.



شکل ۴. نمودار مقایسه دو نمونه تیر EBRIG-E و ۲-Ref-S
Comparison chart of two beam (EBRIG-E and Ref-S-2)

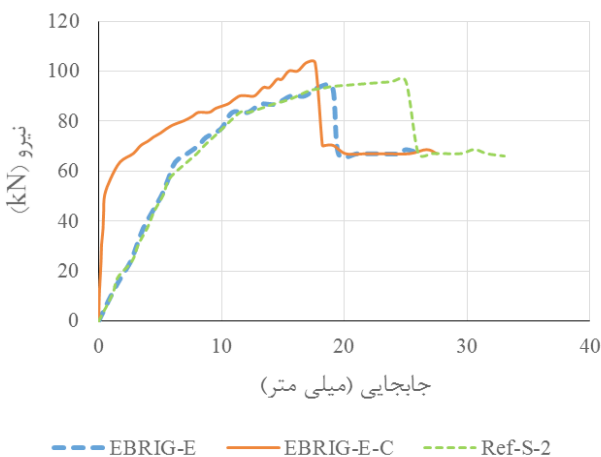


شکل ۳. نمودار نیرو-جابجایی نمونه شاهد Ref
Load displacement chart of control beam Ref



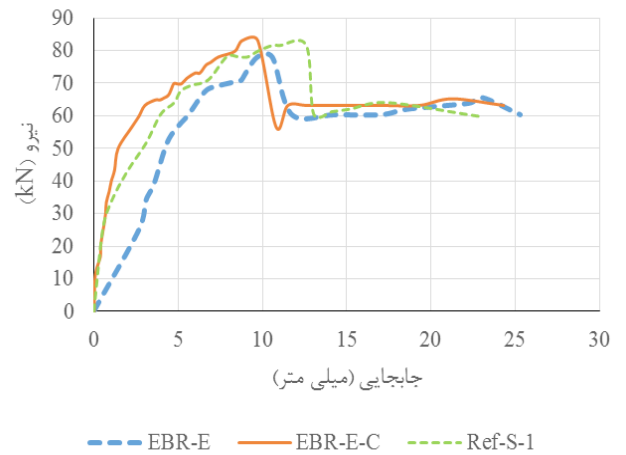
شکل ۶. نمودار مقایسه سه نمونه تیر EBR-P-C و EBR-P و Ref-S-1
Comparison chart of three beam (EBR-P-C, EBR-P and Ref-S-1)

در شکل ۷ مقایسه‌ای بین رفتار تیرهای پیش‌بارگذاری شده در محدوده الاستیک، تقویت تحت بار و تقویت پس از باربرداری، صورت گرفته است. ظرفیت باربری تیر تحت بار ثابت، EBRIG-E-C، ۱۰٪ بیشتر از ظرفیت باربری تیر EBRIG-E است. این در حالی است که میزان تغییر مکان متناظر با شکست FRP مرکز تیر در نمونه EBRIG-E تنها اندکی بیشتر از نمونه EBRIG-E-C است ولی در عوض تغییر مکان تسلیم آن به مقدار قابل ملاحظه‌ای کمتر است. مقایسه دو نمودار در شکل ۷ نشان‌دهنده مقاومت، جذب انرژی و شکل‌پذیری بهتر نمونه تحت بار ثابت است. البته نتایج نمونه بدون پیش‌بارگذاری و آسیب اولیه (۲-Ref-S) بویژه از نظر تغییر مکان و جذب انرژی بهتر بوده است.



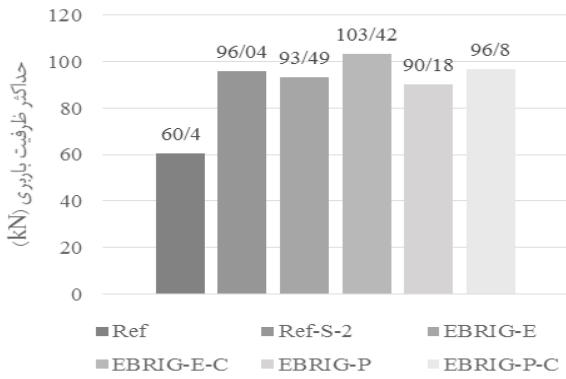
شکل ۷. نمودار مقایسه سه نمونه تیر Ref-S-2 و EBRIG-E و EBRIG-E-C
Comparison chart of three beam (EBRIG-E, EBRIG-E-C and Ref-S-2)

در شکل ۵ مقایسه‌ای بین رفتار تیرهای پیش‌بارگذاری شده در محدوده الاستیک، تقویت تحت بار و تقویت پس از باربرداری، صورت گرفته است. ظرفیت باربری تیر تحت بار ثابت، EBR-E-C، ۵/۶٪ بیشتر از ظرفیت باربری تیر EBR-E است. این در حالی است که میزان تغییر مکان متناظر با شکست FRP مرکز تیر در نمونه EBR-E تنها اندکی بیشتر از نمونه EBR-E است. مقایسه دو نمودار در شکل ۵ نشان‌دهنده مقاومت و جذب انرژی بهتر نمونه تحت بار ثابت است. در کنار این دو نمودار تیر تقویت شده بدون پیش‌بارگذاری و آسیب اولیه نیز رسم شده است که رفتار اندکی بهتر داشته است.



شکل ۵. نمودار مقایسه سه نمونه تیر EBR-E-C و EBR-E و Ref-S-1
Comparison chart of three beam (EBR-E, EBR-E-C and Ref-S-1)

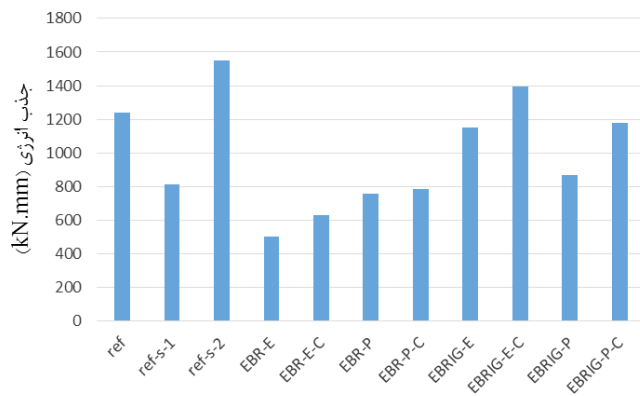
در شکل ۶ مقایسه‌ای بین تیرهای پیش‌بارگذاری شده تا مرحله رفتار پلاستیک صورت گرفته است. در این نمونه‌ها تغییر مکان متناظر با جداشدگی ورق FRP تقریباً مشابه بوده است اما نمونه تحت بار ثابت EBR-P-C نسبت به نمونه باربرداری شده قبل از تقویت حدود ۴ درصد ظرفیت باربری بیشتر و هم‌چنین جذب انرژی نسبتاً بهتری داشته است. البته جابجایی شکست نمونه باربرداری شده قدری بیشتر بوده است اما از آنجا که جابجایی تسلیم هم بیشتر بوده است در مجموع از باربرداری قبل از تقویت، شکل‌پذیری بهتری حاصل نشده است.



شکل ۱۰. مقایسه حداکثر ظرفیت باربری تیرهای آزمایش شده با روش EBRIG

Comparison of the maximum bearing capacity of the tested beams with EBRIG reinforcement

در شکل ۱۱ جذب انرژی ۱۱ نمونه تیر مورد آزمایش بر اساس محاسبه سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان تا لحظه افت مقاومت مورد ارزیابی قرار گرفته است. بیشترین جذب انرژی مربوط به نمونه تقویت شده بدون پیش بارگذاری و سپس مربوط به نمونه تقویت شده تحت بار ثابت در محدوده رفتار خطی بوده است. در مقایسه نیز نمونه‌های تحت بار از نمونه‌های بار برداری شده قبل از تقویت جذب انرژی بیشتری داشته‌اند.



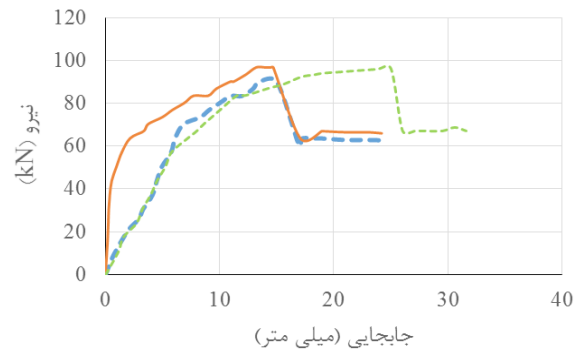
شکل ۱۱. مقایسه جذب انرژی تیرهای مورد آزمایش

Comparison of energy absorption of tested beams

۶- نتیجه گیری

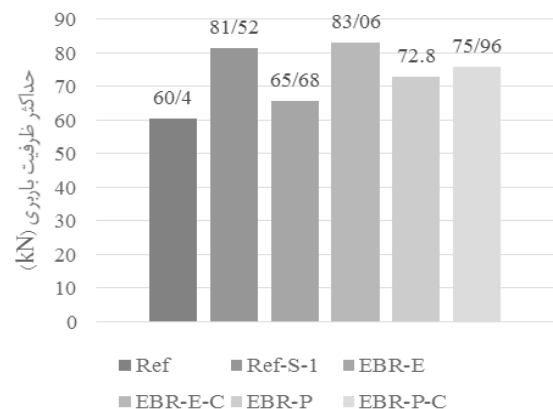
این تحقیق در آزمایشگاه سازه دانشگاه یزد و بر روی ۱۱ نمونه تیر بتنی تحت بارگذاری خمشی در نقطه‌ای در وسط دهانه انجام پذیرفت. ۵ نمونه در شرایط مختلف از نظر بارگذاری و ترک خوردگی قبل از تقویت با یک لایه CFRP به روش EBR و ۵ نمونه به روش EBRIG تقویت شدند. نوآوری این تحقیق استفاده از یک سیستم ابتکاری به منظور حفظ بارگذاری اولیه نمونه‌ها در هنگام تقویت خمشی بود که منجر به

در شکل ۸ مقایسه‌ای بین تیرهای پیش بارگذاری شده تا مرحله رفتار پلاستیک صورت گرفته است. در این نمونه‌ها تغییر مکان متناظر با پارگی ورق FRP تقریباً مشابه بوده است اما نمونه تحت بار ثابت EBRIG-P-C نسبت به نمونه بار برداری شده قبل از تقویت حدود ۷ درصد ظرفیت باربری بیشتر و هم‌چنین شکل پذیری و جذب انرژی بهتری داشته است. نمونه بدون آسیب اولیه در اینجا هم جذب انرژی و قابلیت تغییر شکل بیشتری نشان داده است.



شکل ۸. نمودار مقایسه سه نمونه تیر Ref-S-2 و EBRIG-P و EBRIG-P-C
Comparison chart of three beam (EBRIG-P, EBRIG-P-C and Ref-S-2)

شکل‌های ۹ و ۱۰ مقایسه‌ای بین ۱۱ تیر مورد آزمایش از نظر ظرفیت باربری حداکثر نشان می‌دهند. تمامی نمونه‌های تقویت شده با روش EBR دچار جداشدگی زود هنگام ورق تقویت شدند در حالی که در تمامی نمونه‌های تقویت شده با روش EBRIG ورق‌های تقویتی بدون جداشدگی تا لحظه پارگی مقاومت کردند. البته بیشترین مقاومت در هر دو روش مربوط به نمونه‌هایی است که تحت بار ثابت، در حد بار سرویس در ناحیه رفتار خطی، و بدون بار برداری تقویت شده بودند.



شکل ۹. مقایسه حداکثر ظرفیت باربری

تیرهای آزمایش شده با تقویت EBR

Comparison of the maximum bearing capacity of the tested beams with EBR reinforcement

of flexural strengthening on behavior of beams retrofitted by CFRP sheets, civil engineering department, IUT, (2010).

[3] M.Esfahani and M.Bani jamli, Investigation of flexural strengthening techniques on FRP strengthened Beams, civil engineering and Sustainable Development, Mashhad, Iran , (2013).

[4] D.Moštofnejad and E.Mahmoudabadi, Grooving as Alternative Method of Surface Preparation to Postpone Debonding of FRP Laminates in Concrete Beams, Journal of Composites for Construction, 14(6) (2010)804-811.

[5] D.Moštofnejad and M. J. Hajrasouliha, Performance Of Grooving Method To Postpone Debonding Of FRP Sheets In Strengthened Concrete Beams, IJST, Transactions of Civil Engineering, 37(2013) 219-232.

[6] D.Moštofnejad, Shameli, M. „Performance of EBROG Method under Multilayer FRP Sheets for Flexural Strengthening of Concrete Beams,” Procedia Engineering, 14 (2011) 3176-3182 .

[7] D.Moštofnejad and A.Moghaddasi, Bond efficiency of EBR and EBROG methods in different flexural failure mechanisms of FRP strengthened RC beams, Construction and Building Materials, Volume 54,(2014) 605-614.

[8] A. Hosseini and D. Moštofnejad, Experimental Investigations into bond behavior of CFRP sheets attached to concrete using EBR and EBROG techniques, Composites Part:B, V. 51(2013) 130-139.

[9] D.Moštofnejad and K.Khazaei, Effect of GM patterns on ductility and debonding control of FRP sheets in RC strengthened beams, Construction and Building Materials, 93(2015) 110-120.

[10] A. M. Morsey, E. M. El-Tony and M. El-Naggar, Flexural Strengthening of Pre-Damaged Beams Using Embedded CFRP Rods, Alexandria Eng. Journal, Elsevier, 54(2015) 1175-1179.

[11] ASTM E2126-09 , Standard Test Methods for Cyclic Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for Buildings, ASTM International, 11(2018).

کسب نتایج ارزشمندی گردید. رفتار نمونه‌های تیر تا لحظه شکست ارزیابی و مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج بدست آمده به شرح زیر است: تمامی نمونه‌های تقویت شده به روش EBR دچار جداسازی ورق تقویتی قبل از رسیدن به حداکثر مقاومت ورق FRP شدند. این مسئله نشان دهنده نیاز به روش مناسب‌تری برای چسباندن ورقه‌های پلیمری بود. با استفاده از روش نصب EBRIG این مشکل برطرف گردید و تمامی ورقه‌های پلیمری نصب شده بدون جداسازی تا مرحله گسیختگی پیش رفتند. البته این مسئله با توجه به تحقیقات قبلی تا حدی قابل انتظار بوده است.

بهترین نتایج از نظر جذب انرژی و قابلیت تحمل تغییر شکل مربوط به نمونه‌های بدون پیش بارگذاری و آسیب و ترک اولیه بوده است. از آنجا که این نحوه تقویت غیر واقعی است، تاثیر آن در طراحی آزمایش‌ها تقویت باید مورد توجه قرار گیرد و گرنه به نتایج غیر محافظه کارانه منجر می‌گردد. با پیش بارگذاری تیر و ایجاد ترک اولیه قبل از تقویت و سپس باربرداری قبل از تقویت، کاهش اندکی در مقاومت حداکثر تیر تقویت شده ایجاد گردید. این تاثیر کاهشی در مورد تغییر مکان متناظر با مقاومت حداکثر و نیز شکل پذیری تیر قابل توجه‌تر بود.

عدم باربرداری و حفظ بار اولیه اعمالی در هنگام تقویت نمونه‌ها منجر به افزایش مقاومت در نمونه‌های تقویت شده حداکثر تا ۱۰ درصد شده است. این تاثیر در نمونه‌های بارگذاری شده در محدوده الاستیک بیشتر بوده است. ثابت نگه داشتن بار در هنگام تقویت و عدم باربرداری روی تغییر مکان متناظر با بار حداکثر تاثیر قابل توجهی نداشته است ولی شکل پذیری و جذب انرژی را بهبود بخشیده است.

وجود بار اولیه ثابت، بخصوص اگر از حد رفتار خطی فراتر نرود، رفتار اعضای خمشی تقویت شده را از نظر شکل پذیری، جذب انرژی و مقاومت بهبود بخشیده است و به همین جهت توصیه می‌شود اعضای خمشی بتن آرمه تحت بار سرویس مقاوم سازی شوند و از بار برداری قبل از تقویت خودداری گردد.

مراجع

[1] D. Moštofnejad, , Reinforce Concrete Structure, Esfahan, Arkan Publishers, 1 (2015).

[2] M.Eftekhari, Structural PhD Thesis, Investigation on influence

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



Please cite this article using:

R. Morshed , M. Barzegar, E.Tavasoli, Experimental investigation on flexural behavior of concrete beams strengthened under constant load by CFRP sheets ,*Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(2)(2019)221-229.

DOI: 10.22060/ceej.2018.13303.5370