

بررسی عملکرد تیرهای بتن آرمه تقویت شده با ورقهای FRP تحت بارهای استاتیکی و تکراری

علیرضا رهایی^{۱*}، آرش زمردیان^۲

۱- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

* تهران، صندوق پستی ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵

rahai@aut.ac.ir

(دریافت مقاله: اردیبهشت ۱۳۸۳، پذیرش مقاله: خرداد ۱۳۸۴)

چکیده- بسیاری از اعضای بتن مسلح به دلیل نقائص طراحی یا اجرا، از مقاومت کافی در برابر بارهای وارده برخوردار نیستند. به منظور برطرف کردن این نقیصه، در سالهای اخیر، به کارگیری روشهای مختلف مقاوم سازی از جمله استفاده از الیاف پلیمری مرکب، زمینه توجه فراوان قرار گرفته است. هدف از این تحقیق، بررسی عملکرد اجزای تقویت شده بتنی با ورقهای پلیمری مرکب تحت بارهای استاتیکی و تکراری است. در این پژوهش، ابتدا تعدادی نمونه استوانه‌ای استاندارد ساخته و در سنین مختلف زمینه آزمایش قرار داده شد. سپس ۱۶ تیر بتنی از نوع بتن معمولی و بتن با کیفیت بالا ساخته و نیمی از آنها با ورقهای کامپوزیت FRP به صورت خمشی تقویت شد. کامپوزیت مورد استفاده، متشکل از الیاف شیشه و چسب اپوکسی به منظور اشباع و چسباندن آن بوده است. نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد و تیرهای تقویت شده و شاهد، تحت بارگذاری استاتیکی و تکراری آزمایش شدند که ضمن تهیه نمودار نیرو-تغییر مکان، مقدار بار گسیختگی آنها مشخص و مطالعه شد. نتایج مطالعات آزمایشگاهی و مطالعات نظری نیز بررسی و مقایسه شده است. بر اساس نتایج حاصل، استفاده از ورقهای FRP موجب افزایش ظرفیت خمشی، سختی تیرها، کاهش تعداد ترکها و میزان بازشدگی آنها و تمرکز خرابی در محل پارگی ورق می‌شود. بعلاوه بررسی نمودارهای نیرو و تغییر مکان، نمایانگر عملکرد مطلوب تیرهای تقویت شده در بارگذاری تکراری و هماهنگی مناسب بین روابط تئوریک و آزمایشگاهی است.

کلید واژگان: تیر، بتن، ورق پلیمری مرکب.

۱- مقدمه

استفاده از روشهای مختلف مقاوم سازی و ایمن سازی با توجه به نقایص موجود در طراحی و اجرای سازه‌ها بسیار متداول است. یکی از روشهایی که در چند سال اخیر مورد توجه قرار گرفته، ترمیمی و تقویت اعضای ضعیف و آسیب دیده بتن مسلح با ورقهای متشکل از الیاف

پلیمری مرکب است. استفاده از این مصالح مزایای متعددی دارد که از آن می‌توان به افزایش مقاومت در برابر خوردگی، بهبود مشخصات مکانیکی و باربری، سبکی و سهولت اجرا اشاره کرد. تقویت تیر بتن مسلح از طریق چسباندن ورقهای FRP در وجه کششی تیر، باعث بهبود ظرفیت باربری آن می‌شود.

در بخشی از این آزمایشها به منظور بررسی افزایش ظرفیت خمشی تیرها، ۱۶ تیر بتنی با استفاده از لایه‌های مختلف کامپوزیت (یک‌لایه، سه‌لایه و پنج‌لایه) ساخته و آزمایش شدند که افزایش مقاومت خمشی آنها کاملاً مشهود بود.

اکثر آزمایشهای انجام شده روی تیرهای تقویت شده با ورقهای FRP تحت بارگذاری تکراری روی تیرهای کوچک انجام شده است.

در سال ۱۹۹۳ دیورینگ و همکاران [۵] تیرهای تقویت شده با CFRP را تحت بار خستگی آزمایش و نتایج کار خود را منتشر کردند. از این تحقیق مشخص شد که ورق FRP می‌تواند بعد از گسیختگی آرماتورهای طولی، سیکلهای بیشتری را نیز تحمل کند.

در سال ۱۹۹۳ شیچی و راکسیان [۶] نشان دادند که عمر خستگی تیرهای تقویت شده با FRP، سه بار بیش از تیرهای تقویت نشده، مشابه نیست. مقاومت خستگی (۱۵ تا ۳۰) درصد افزایش پیدا کرد و خیز وسط دهانه نیز ۴۰ درصد کاهش یافت. مقدار بازشدگی بزرگترین ترک و گسترش ترکها نیز بسیار کمتر شد. همچنین مقاومت استاتیکی بعد از بارگذاری سیکلی با افزایش تعداد سیکلها با روند کندتری نسبت به تیرهای تقویت نشده کاهش یافت.

در سال ۱۹۹۹ شاهوی و همکاران [۷] آزمایشهایی بر روی تیرهای بتنی تقویت شده با ورقهای CFRP در بارگذاریهای استاتیکی و خستگی انجام دادند. متغیرهای آزمایشهای استاتیکی شامل مقاومت بتن، تعداد لایه‌های تقویت با ورقهای CFRP و موقعیت چسباندن ورقها بر روی تیر بود. آزمایش خستگی روی تیرهایی با تعداد مختلف لایه‌های FRP انجام شد. همچنین یک تیر تقویت نشده را ابتدا تا اواسط عمر خود، بارگذاری خستگی کرده و بعد از تقویت دوباره، بارگذاری خستگی را ادامه دادند. مقایسه بین

اگرچه اطلاعات زیادی در زمینه عملکرد اعضای تقویت شده با ورقهای FRP و رفتار کوتاه مدت آنها در دست است اما در باره رفتار درازمدت و دوام آنها در تماس با بتن، اطلاعات چندانی در دست نیست. به‌ویژه آنکه عملکرد اجزای تقویت شده در بارگذاریهای تکراری باید شناخته شود تا بتوان از آنها در تقویت پلها و سازه پارکینگها- که در معرض بارگذاری تکراری و سائل نقلیه هستند- استفاده کرد.

سوابق مطالعات انجام شده در زمینه تیرهای تقویت شده با ورقهای FRP در بارگذاریهای استاتیکی و تکراری نشان می‌دهد که:

آزمایشهای بسیاری در زمینه عملکرد اجزای تقویت شده با ورقهای FRP در بارگذاری استاتیکی انجام شده است. برخی از این آزمایشها توسط ترایتفیلو در سال ۱۹۹۸ [۱]، چاجز ۱۹۹۵ [۲] و راس ۱۹۹۲ [۳] بر روی تیرهای تقویت شده در خمش انجام شده است. در تمامی موارد فوق، نتایج آزمایش محققان حاکی از افزایش مقاومت تیرها است.

در سال ۲۰۰۰ محمود مهیلمی و همکاران روش تحلیل تیرهای تقویت شده خمشی را با استفاده از روابط تعادل نیروها و سازگاری کرنشها در مقطع در حالتیهای مختلف ارائه کردند و روش خود را با نتایج آزمایشگاهی محققان دیگر مقایسه کرده و نتیجه گرفتند که اختلاف نتایج تئوری و آزمایشگاهی به‌طور متوسط فقط ۶/۹ درصد است [۴].

در سال ۱۳۸۱ نیز آزمایشهایی توسط مؤلفان بر روی عملکرد اجزای تقویت شده بتنی تحت بارگذاری استاتیکی انجام شد. در این آزمایشها ورقهای GFRP با استفاده از مصالح موجود در کشور ساخته و برای تقویت استفاده شد.

فشاری $32/6$ MPa و میلگردهای سری یک و در گروه دوم از بتن با مقاومت $45/9$ و میلگردهای سری دو استفاده شده است. تیرها از نظر برشی به گونه‌ای با خاموت تقویت شدند تا در حالت خمشی شکسته شوند.

مشخصات بتن و میلگردهای فولادی در جداول ۱ و ۲ آورده شده است. هر گروه هشت تایی شامل چهار زیرگروه دوتایی و هر یک از زیر گروه‌ها به ترتیب عبارت بودند از:

- نمونه‌های شاهد: بدون تقویت

- نمونه‌های تقویت شده: با یک، دو و سه لایه تقویتی از دو تیر موجود در هر زیرگروه دوتایی، یک تیر در حالت استاتیکی و تیر دیگر به صورت تکراری بارگذاری شده است. جزئیات آرماتورگذاری تیرها در شکل ۱ آورده شده است. ورقهای کامپوزیت از الیاف شیشه 600 گرم در مترمربع و رزین اپوکسی با مدول الاستیسیته $278/9$ MPa و مقاومت کششی $7/6$ MPa ساخته شد. ورقهای کامپوزیت به کمک چسب اپوکسی با مدول الاستیسیته 4300 MPa، مقاومت برشی 30 MPa و مقاومت کششی $(15\sim 20)$ MPa به تیرها چسبانده شد.

در جدول ۳ مشخصات مکانیکی ورقهای تقویتی تیرها آورده شده است.

کدگذاری مدل تیرها به شرح زیر انجام شده است. حرف F نشان دهنده آزمایشهای خمشی، رقم و حرف L نشان دهنده تعداد لایه‌های تقویتی FRP، دو رقم بعدی نشان دهنده مقاومت بتن تیر و حروف C یا M نیز به ترتیب نشان دهنده نحوه بارگذاری تکراری و یا مونوتونیک است. به عنوان مثال F-1L-33-C نشان دهنده تیر ساخته شده با مقاومت فشاری بتن 33 مگاپاسکال است که با یک لایه FRP تقویت و به صورت تکراری بارگذاری شده است.

نمونه‌ها نشان می‌دهد که تقویت با ورقهای CFRP باعث افزایش عمر خستگی، سختی و ظرفیت خمشی تیرها می‌گردد.

در سال ۲۰۰۱ کریستوس و همکاران [۸] تحقیقاتی را به منظور بررسی تأثیر تقویت با ورقهای GFRP در مقاومت خستگی تیرهای بتن مسلح انجام دادند. او آزمایشهایی را بر روی تیرهای بتن مسلح تقویت نشده و تقویت شده با ورقهای GFRP انجام داد. نتایج تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که در بارگذاری تکراری مشابه، عمر خستگی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با ورقهای GFRP بیش از عمر خستگی تیرهای تقویت نشده، بوده است. جالب توجه اینکه اگرچه ورقهای GFRP عمر خستگی تیرها را افزایش می‌دهد اما سازوکار تخریب خستگی در تیرهای تقویت شده و تقویت نشده یکسان بوده و در هر دو، گسیختگی بعد از گسیختگی میلگردهای طولی در اثر خستگی رخ می‌دهد. در نتیجه با استفاده از مدل‌های خستگی موجود، عمر خستگی تیرهای تقویت شده را در بارگذاری تکراری می‌توان پیش‌بینی کرد.

با ارزیابی تحقیقات انجام شده در کشور و به منظور ادامه برنامه‌های علمی و تحقیقاتی، یک برنامه آزمایشگاهی برای بررسی مقاومت خستگی و رفتار المان‌های بتن آرمه تقویت شده با ورقهای GFRP تدوین شد.

۲- برنامه آزمایش

۲-۱- ساخت نمونه‌های آزمایشی و

جزئیات آنها

به منظور بررسی اثر ورقهای پلیمری مرکب بر ظرفیت خمشی، ۱۶ تیر با ابعاد $200 \times 300 \times 200$ سانتیمتر ساخته شد. این تیرها در دو گروه مساوی دسته‌بندی شد، که در گروه اول از بتن با مقاومت

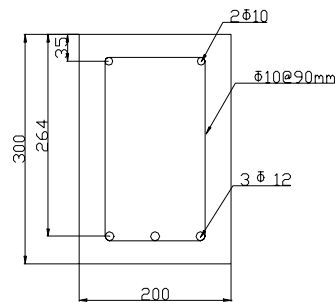
جدول ۱ مشخصات بتن‌های مصرفی

شماره طرح	مقاومت بتن (MPa)	شن Kg/m ³	ماسه Kg/m ³	آب Kg/m ³	سیمان Kg/m ³	می‌کروسیلیس Kg/m ³	فوق روان کننده Kg/m ³
۱	۳۲/۶	۹۴۴	۸۰۱	۱۸۰	۴۵۰	۰	۰
۲	۴۵/۹	۹۴۴	۶۴۵	۱۹۵	۵۴۳/۷	۴۷/۳	۵/۴۳

قرارگیری تغییر مکان سنجها در شکل مشخص است.

بارگذاری تیرها به دو صورت استاتیکی و تکراری انجام شد. بارگذاری تکراری به صورت کنترل تغییر مکان با افزایش خیز وسط دهانه تیر در گامهای ۳ میلیمتری اعمال شد.

در پایان هر دور، بارگذاری، چند ثانیه متوقف و اطلاعات مربوط به نیرو و تغییر مکانها بر روی فلاپی در دستگاه ثبت اطلاعات ذخیره می‌شد.



شکل ۱ جزئیات آرماتورگذاری تیرها

جدول ۲ مشخصات میلگردهای فولادی

سری دو	سری یک	
۱۲	۱۲	قطر میلگرد
۴۵۱.۱	۵۵۳.۳	f_y (MPa)
۵۷۶.۲	۶۴۵	f_{UL} (MPa)

۳- نتایج آزمایش ۳-۱- الگوی ترک خوردگی

شکلهای ۱-۳ و ۲-۳ ترک خوردگی تیر شاهد F-0L-33-C و تیر تقویت شده F-3L-33-C را برای نمونه نشان می‌دهد.

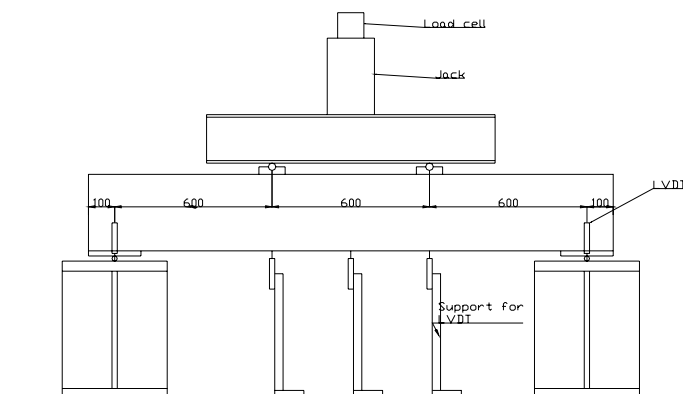
بر اساس نتایج آزمایشها، روند ترک خوردگی تیرهای شاهد و تیرهای تقویت شده مشابه است اما تعداد ترکهای قائم و میزان بازشدگی آنها در گروه شاهد بیشتر بود. در تیرهای تقویت شده بر خلاف تیرهای شاهد، ترکها باز نمی‌شد. با تغییر شکل بیشتر و نزدیک شدن به خیز نهایی، ترکهای ریزی در وسط دهانه و در مجاورت ترکهای اولیه ایجاد شده و ورق کامپوزیت شروع به تغییر حالت و تغییر رنگ می‌کرد سپس ورق کامپوزیت در محل یکی از ترکهای قائم اولیه در محل وسط دهانه پاره شده و فقط در همان محدوده دهانه ترکها باز می‌شد و با تغییر شکل بیشتر، ورق FRP در امتداد ترکهای افقی از بتن جدا می‌شد.

جدول ۳ مشخصات مکانیکی ورقهای تقویتی تیرها

تعداد لایه‌ها	ضخامت ورق (mm)	تنش نهایی (MPa)	کرنش نهایی %
یک لایه	۱/۰۷	۱۴۶/۲۳	۲/۴
دو لایه	۱/۷۵	۱۸۱/۵۵	۲/۶۲
سه لایه	۲/۴۶	۲۱۱/۶۷	۲/۸۶

۲-۲- نحوه بارگذاری و مشخصات دستگاههای آزمایش

نمونه‌ها در قاب فولادی مطابق شکل ۲ آزمایش شدند. نیرو توسط جک ۱۰۰ تنی به تیرها اعمال شده و تغییر مکان تیر توسط ۵ دستگاه LVDT با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. موقعیت



شکل ۲ مشخصات قاب فولادی و نمونه‌ها در حالت آزمایش



شکل ۱-۳ تیر F-0L-33-C



شکل ۲-۳ تیر F-3L-33-C

۲-۳- رفتار نیرو- تغییر مکان

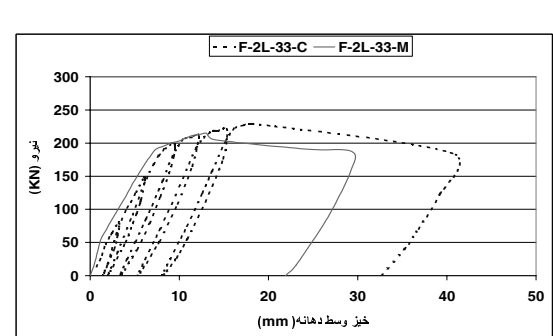
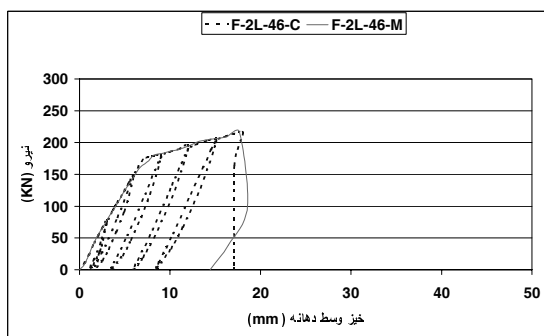
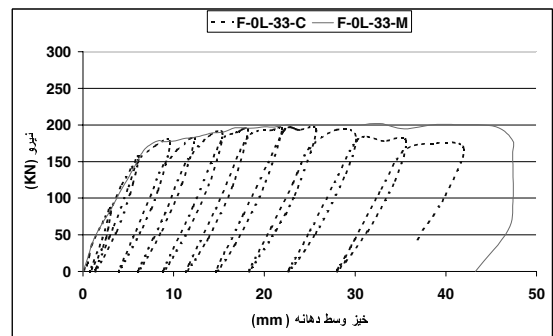
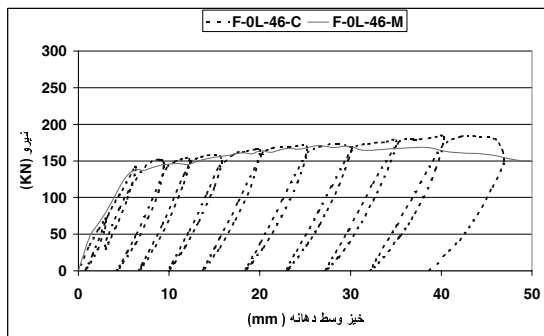
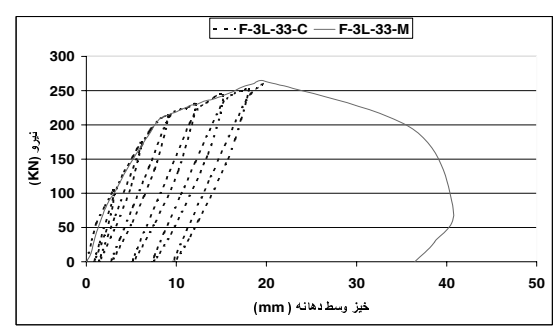
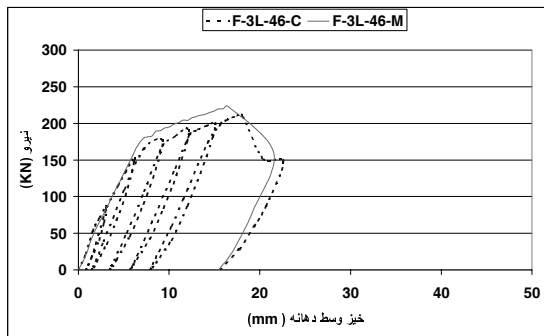
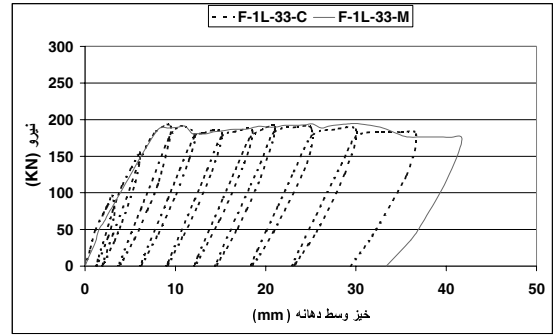
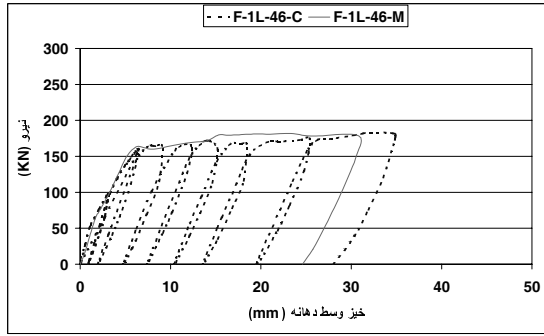
در شکل ۴ نمودارهای نیرو- تغییر مکان تیرهای گروه F-nL-33 نشان داده شده است.

به طوری که در نمودارها مشاهده می‌شود در تمامی موارد منحنی نیرو- تغییر مکان در بارگذاری استاتیکی پوش منحنی نیرو- تغییر مکان بارگذاری تکراری است که بیانگر عملکرد خوب تیرها در بارگذاری تکراری است.

نمودارهای نیرو- تغییر مکان گروه F-nL-46 نیز وضع مشابهی داشت (شکل ۵).

روند شکست تیرها در نمودارهای نیرو تغییر مکان (شکل‌های ۴ و ۵) کاملاً روشن است. بر اساس این نتایج در تیرهای شاهد به ازای حدود ۲ میلی‌متر تغییر مکان، بتن کششی ترک خورده و سختی تیر و شیب منحنی نیرو- تغییر مکان کاهش می‌یابد، سپس تا مرز تسلیم آرماتورها (خیز حدود ۶ میلیمتر) شیب منحنی ثابت مانده و پس از آن با به تسلیم رسیدن میلگردها، سختی به شدت کاهش می‌یابد. در مرحله بعد، به دلیل سخت شدگی مجدد میلگردها، مقدار نیرو اندکی افزایش پیدا می‌کند و در نهایت با خرد شدن بتن فشاری، نیرو کاهش می‌یابد.

۳-۳- روند شکست تیرها و کاهش سختی



شکل ۵ نمودارهای نیرو-تغییر مکان تیرهای گروه F-nL-46

شکل ۴ نمودارهای نیرو-تغییر مکان تیرهای گروه F-nL-33

۳-۴- خیز نهایی و شکل پذیری

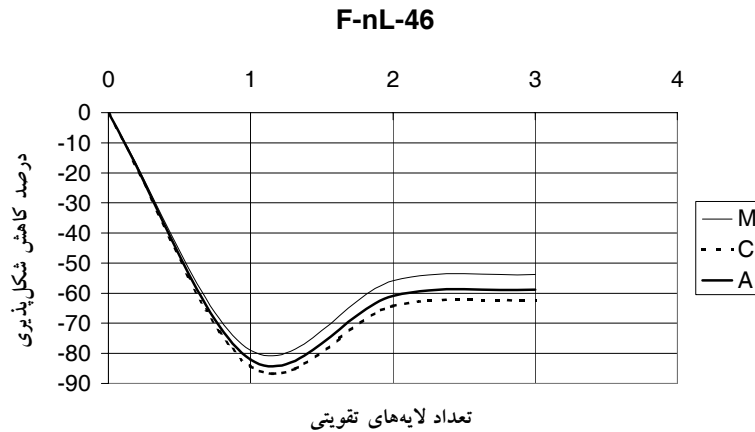
در جدول ۴ و شکل ۶ شکل پذیری تیرها و مقادیر خیزهای نظیر تسلیم، پارگی ورق و بار بیشینه آورده شده است. در این نمودارها، M نشانه بارگذاری استاتیکی، C بارگذاری تکراری و A خط میانگین است.

بر اساس این نمودارها مشاهده می‌شود که در گروه F-nL-33 شکل پذیری در زیرگروه یک لایه تقویتی نسبت به گروه شاهد، ابتدا کاهش یافته اما با افزایش لایه‌ها دوباره شکل پذیری تا میزان ۳۰ درصد افزایش یافته است. در گروه F-nL-46 نیز شکل پذیری ابتدا در زیر گروه یک لایه کاهش یافته و سپس با افزایش لایه‌ها شکل پذیری به میزان ۲۵ درصد افزایش یافته است.

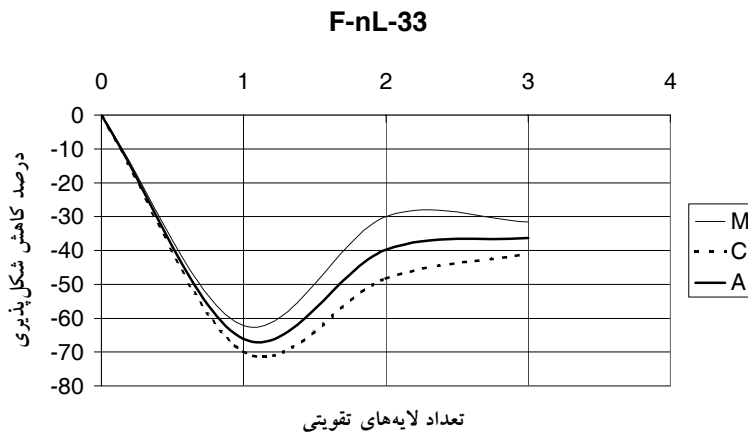
ارزیابی منحنی نیرو-تغییر مکان تیرهای تقویت شده نشان می‌دهد که این منحنیها دارای سه شیب متفاوت هستند. بخش اول منحنی مربوط به حد فاصل نقاط مربوط به تغییر مکان صفر تا ترک خوردن بتن به ازای خیز حدود ۲ میلیمتر است که در این مرحله، سختی تیر بسیار زیاد بوده و منحنی نیرو-تغییر مکان تیرهای شاهد و تقویت شده بر هم منطبق است. بخش دوم مربوط به حد فاصل بین نقاط شروع ترک خوردن بتن کششی تا هنگام تسلیم آرماتورها به ازای خیز حدود ۶ میلیمتر است که نسبت به خط اول سختی تیر کاهش یافته است و بخش سوم منحنی مربوط به حد فاصل بین نقاط تسلیم آرماتورها تا پارگی ورق است که با افزایش تعداد لایه‌های ورق تقویتی، سختی و خیز تیر در لحظه پارگی ورق، افزایش می‌یابد.

جدول ۴ خیز نهایی و شکل پذیری تیرها

نام نمونه	تغییر مکان نظیر بار تسلیم (mm)	تغییر مکان نظیر پارگی ورق (mm)	تغییر مکان نظیر بار بیشینه (mm)	شکل پذیری μ	درصد کاهش شکل پذیری %
F-0L-33-M	۷/۰۲		۲۵	۳/۵۶	۰
F-1L-33-M	۸/۲	۱۱/۰۵	۲۵/۱۸	۱/۳۵	-۶۲
F-2L-33-M	۷/۳	۱۸/۲	۱۸/۲	۲/۴۹	-۳۰
F-3L-33-M	۸/۰۵	۱۹/۶	۱۹/۶	۲/۴۳	-۳۱٫۶
F-0L-33-C	۶/۰۶		۲۵/۷	۴/۲۴	۰
F-1L-33-C	۸/۴۳	۱۰/۷۶	۲۴/۳	۱/۲۷	-۶۹/۹
F-2L-33-C	۸/۳	۱۸/۲	۱۸/۲	۲/۱۹	-۴۸/۲۹
F-3L-33-C	۷/۸۳	۱۹/۶	۱۹/۶	۲/۵	-۴۰/۹
F-0L-46-M	۶/۲		۳۰	۴/۸۴	۰
F-1L-46-M	۶/۱	۶/۲	۲۳/۳	۱/۰۲	-۷۹
F-2L-46-M	۷/۶۲	۱۶/۲۵	۱۶/۲۵	۲/۱۳	-۵۵/۹
F-3L-46-M	۷/۱۶	۱۶	۱۶	۲/۲۳	-۵۳/۸
F-0L-46-C	۶/۳۶		۴۲/۱۶	۶/۶۳	۰
F-1L-46-C	۶/۲	۶/۴۵	۳۲/۳	۱/۰۴	-۸۴/۳
F-2L-46-C	۷/۶۲	۱۸/۰۵	۱۸/۰۵	۲/۳۷	-۶۴/۲۷
F-3L-46-C	۷/۲۳	۱۸/۰۸	۱۸/۰۸	۲/۵	-۶۲/۳۱



شکل ۱-۶ روند درصد کاهش شکل‌پذیری تیرهای تقویت شده نسبت به تیرهای شاهد F-0L-33



شکل ۲-۶ روند درصد کاهش شکل‌پذیری تیرهای تقویت شده نسبت به تیرهای شاهد F-0L-46

بتن فشاری و افزایش تغییر شکل تیر تا قبل از گسیختگی ورق FRP است.

افزایش شکل‌پذیری در هر دو گروه F-nL-33, F-nL-46 نیز مشاهده می‌شود اما در گروه F-nL-33 به دلیل مقاومت کمتر بتن، بتن فشاری سریعتر خرد شده و شکل‌پذیری تیرها با افزایش لایه‌های تقویتی بیشتر افزایش یافته است. به طوری که مشاهده می‌شود روند افزایش شکل‌پذیری نیز در تیرهای تقویت شده ابتدا سریع بوده و سپس کند می‌شود.

شکل‌پذیری μ با محاسبه نسبت تغییر مکان نظیر پارگی ورق Δ_{II} به تغییر مکان نظیر تسلیم میلگردها Δ_y به دست آمده است. بر اساس مقادیر جدول ۴ تیر F-1L-46 دارای شکل‌پذیری ۱ است یعنی تسلیم آرماتورها و پارگی ورق به طور همزمان روی داده است. این موضوع به علت ضخامت بسیار کم ورق FRP در حالت یک لایه تقویتی بوده و با افزایش تعداد لایه‌ها شکل‌پذیری دوباره افزایش یافته است.

دلیل افزایش شکل‌پذیری با بالا رفتن تعداد لایه‌ها، افزایش نیروی کششی ورق تقویتی و در نتیجه خرد شدن بیشتر

۳-۵- جذب انرژی

جدول ۵ مقدار انرژی جذب شده تیرها

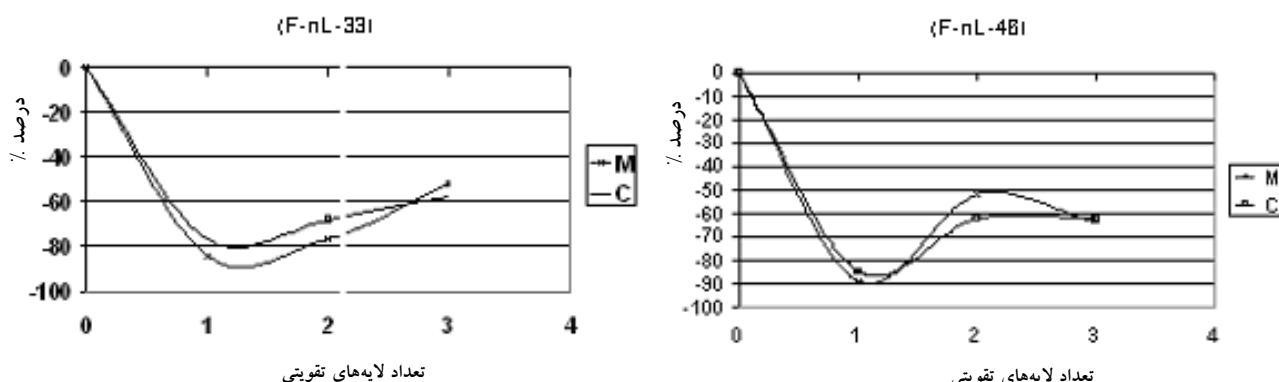
درصد اختلاف انرژی جذب شده تا نقطه پارگی ورق (%)	انرژی جذب شده تا نقطه بار بیشینه (KN.mm)	انرژی جذب شده تا نقطه پارگی ورق (KN.mm)	نام نمونه
۰	۷۹۲۲		F-0L-33-M
-۸۴	۴۰۹۲	۱۲۶۸	F-1L-33-M
-۷۷	۱۸۴۴	۱۸۴۴	F-2L-33-M
-۵۲	۳۷۹۸	۳۷۹۸	F-3L-33-M
۰	۶۲۶۲		F-0L-33-C
-۷۷	۵۲۶۲	۱۴۳۴	F-1L-33-C
-۶۸	۲۰۰۰	۲۰۰۰	F-2L-33-C
-۵۷	۲۶۵۶	۲۶۵۶	F-3L-33-C
۰	۵۵۵۷		F-0L-46-M
-۸۹	۳۴۷۷	۶۰۴	F-1L-46-M
-۵۲	۲۶۶۰	۲۶۶۰	F-2L-46-M
-۶۴	۲۰۱۵	۲۰۱۵	F-3L-46-M
۰	۶۱۵۳	۶۱۵۳	F-0L-46-C
-۳۳	۴۱۲۸	۹۴۳	F-1L-46-C
-۶۲	۲۳۱۳	۲۳۱۳	F-2L-46-C
-۶۲	۲۳۱۵	۲۳۱۵	F-3L-46-C

در جدول ۵ مقدار انرژی جذب شده تا نقطه گسیختگی ورق مربوط به تیرهای تقویت شده و انرژی جذب شده تا لحظه خرد شدن بتن فشاری مربوط به تیرهای شاهد آورده شده است. انرژی جذب شده با محاسبه سطح زیر منحنی های نیرو- تغییر مکان بدست آمده است.

در شکل ۷ درصد اختلاف جذب انرژی نمونه های تقویت شده نسبت به نمونه های شاهد در بارگذاریهای تکراری (C) و استاتیکی (M) تا نقطه گسیختگی ورق رسم شده است.

در این نمودارها مشاهده می شود که در وضعیت استفاده از یک لایه تقویتی، انرژی جذب شده نسبت به نمونه های شاهد حدود ۹۰ درصد کاهش یافته است در حالی که در تیرهای دارای دو و سه لایه تقویتی انرژی جذب شده حدود (۴۰ تا ۶۰) درصد کاهش یافته است.

کاهش انرژی جذب شده در تیرهای تقویت شده به علت سازوکار خرابی موضعی در محل پارگی ورق و تسلیم و کشیدگی موضعی میلگردهای طولی در محدوده پارگی ورق کامپوزیت است؛ زیرا در تیرهای شاهد در یک محدوده وسیع تیر ترک می خورد و میلگردها به حد تسلیم می رسند در حالی که در تیرهای تقویت شده میلگردها فقط در محل پارگی ورق کامپوزیت تغییر شکل داده و انرژی جذب می کنند.



شکل ۷ درصد اختلاف انرژی جذب شده نمونه های تقویت شده نسبت به نمونه های شاهد

و تکراری همراه با منحنی میانگین ارائه شده است. باید توجه کرد که در تیرهای تقویت شده، نیروی وارد بر تیر در لحظه پارگی ورق و در تیرهای شاهد، نیروی وارد شده در لحظه خرد شدن بتن فشاری، به عنوان مقاومت نهایی تعریف شده است.

به طوری که در شکلها مشاهده می شود، نیروی تسلیم تیرها با افزایش لایه های FRP به طور متوسط در یک لایه (۱۵ تا ۲۰) درصد، در دو لایه ۲۵ درصد و در سه لایه (۲۵ تا ۳۰) درصد نسبت به نمونه های شاهد افزایش یافته است. همچنین با افزایش تعداد لایه ها بار نهایی تیرها به میزان ۲۲ درصد افزایش یافته است.

باید توجه کرد که کاهش نیروی نهایی تیرهای تقویت شده با یک لایه ورق نسبت به تیرهای شاهد به معنی کاهش مقاومت تیرهای تقویت شده نسبت به تیرهای شاهد نیست، بلکه به علت تعریف نیروی وارده شونده بر تیر در لحظه پارگی ورق به عنوان مقاومت نهایی است.

با وجود این با افزایش تعداد لایه ها و افزایش بار و تغییر شکل تیرهای تقویت شده در هنگام پارگی ورق، میزان جذب انرژی نیز دوباره افزایش یافته است. چنانچه روند افزایش تعداد لایه ها ادامه یابد، جذب انرژی تا لحظه پارگی ورق باز هم افزایش خواهد یافت.

در ضمن به علت پارگی زود هنگام ورق تقویتی تیرهای تقویت شده با یک لایه ورق تقویتی، زیرگروه مذکور از کمترین ظرفیت جذب انرژی برخوردار بوده است.

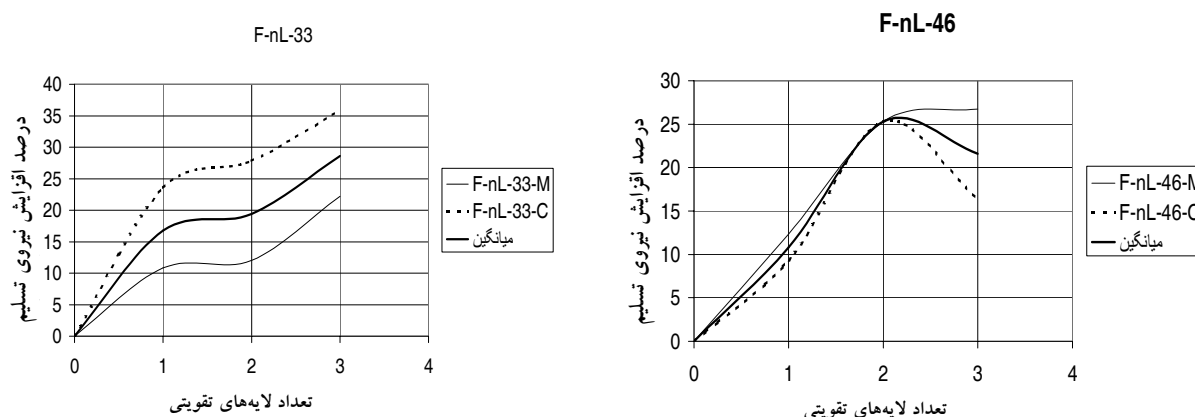
۳-۶- مقایسه مقاومت تیرهای شاهد با تیرهای تقویت شده

نتایج مقاومت تیرهای مورد آزمایش در جدول ۶ آورده شده است.

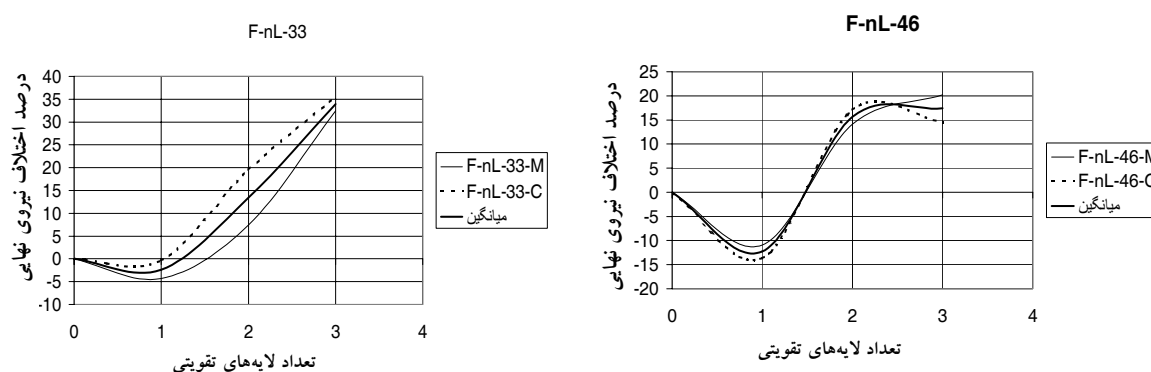
به منظور ارزیابی مشخصات مکانیکی، روند افزایش مقاومت تسلیم و نهایی تیرها نسبت به تیرهای شاهد در شکل های ۸ و ۹ رسم شده است. در این شکلها منحنیهای مربوط به بارگذارهای استاتیکی

جدول ۶ نتایج مقدار بار نهایی و بار تسلیم تیرها در آزمایش

نام نمونه	$P_{Y_{exp}} (KN)$	$P_{U_{exp}} (KN)$	نام نمونه	$P_{Y_{exp}} (KN)$	$P_{U_{exp}} (KN)$
F-0L-33-M	۱۶۹/۸۳	۱۹۹/۷	F-0L-46-M	۱۳۷/۸۷	۱۷۰/۲
F-0L-33-C	۱۴۹/۰۹	۱۹۱/۹	F-0L-46-C	۱۴۱/۷۸	۱۸۳/۲۶
F-1L-33-M	۱۸۸/۲	۱۹۱/۰۸	F-1L-46-M	۱۵۹/۳	۱۶۳/۲
F-1L-33-C	۱۸۴/۲۸	۱۹۱/۲۹	F-1L-46-C	۱۵۵/۰	۱۵۸/۲۷
F-2L-33-M	۱۹۰/۲۳	۲۱۴/۵۴	F-2L-46-M	۱۷۷/۶۵	۲۰۹/۱۱
F-2L-33-C	۱۹۰/۵۷	۲۲۹/۵	F-2L-46-C	۱۷۷/۶	۲۱۴/۶۷
F-3L-33-M	۲۰۷/۵۷	۲۶۴/۵	F-3L-46-M	۱۷۹/۶۹	۲۲۰/۳۲
F-3L-33-C	۲۰۲/۵۵	۲۶۰	F-3L-46-C	۱۶۵/۰۷	۲۰۹/۹۳



شکل ۸ درصد افزایش نیروی تسلیم تیرهای تقویت شده نسبت به تیرهای شاهد



شکل ۹ درصد اختلاف نیروی نهایی تیرهای تقویت شده نسبت به تیرهای شاهد

تیرهای تقویت شده در لحظه پارگی ورق، نسبت به مقاومت خمشی حداکثر تیرهای شاهد افزایش یابد. تعیین ضریب اطمینان فوق نیاز به تحلیلهای غیرخطی و همچنین آزمایشهای بیشتری دارد. اما با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق پیشنهاد می‌شود که نسبت فوق در هنگام طراحی بزرگتر از ۱/۵ در نظر گرفته شود.

نسبت نیروی ورق FRP به نیروی سخت شدگی میلگردها در جدول ۷ نشان آورده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود با افزایش نسبت نیروی نهایی ورق به نیروی سخت شدگی میلگردها، ظرفیت نهایی تیرها نیز نسبت به تیر شاهد افزایش یافته است.

لازم است ذکر شود که در این زیر گروه، بعد از پارگی ورق و پس از سخت شدگی مجدد میلگردها نیروی وارد شونده بر تیر به میزان مقاومت نهایی تیرهای شاهد قابل افزایش است. افزایش نیروی نهایی نسبت به بار تسلیم در تیرهای شاهد ناشی از سخت شدگی مجدد میلگردهای فولادی است. اما در تیرهایی که با یک لایه تقویت شده‌اند، افزایش نیروی کششی ورق FRP، $(A_{frp} \cdot f_{frp})$ کمتر از افزایش نیروی سخت شدگی میلگردها، $((f_u - f_y) \cdot A_s)$ در تیرهای شاهد بوده است. بنابراین در طراحی تیرهای تقویت شده باید به این موضوع توجه شود که همواره نسبت $A_{frp} \cdot f_{frp} / ((f_u - f_y) \cdot A_s)$ دارای ضریب اطمینانی بزرگتر از یک باشد تا مقاومت خمشی

۴- مقایسه نتایج مطالعات نظری و آزمایشگاهی

در شرایط مختلف از نظر درصد فولاد و سطح مقطع ورق FRP لنگر مقاوم نهایی تیرها براساس روابط سازگاری کرنشها و شرایط تعادل نیروها در مقطع قابل محاسبه است.

در شکل ۱۰ شرایط مربوط به حالت شکست کششی در خمش ارائه شده است. در این حالت ابتدا فولاد جاری شده و پس از خرد شدن بتن فشاری و گسیختگی ورق FRP، تیر فرو می‌ریزد.

در این شرایط لنگر مقاوم نهایی تیرها در حالت حدی نهائی توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$M_n = \frac{M_u}{\Phi} = 0.85f'_c b d_f \left(d_f - \frac{a}{2} \right) - A_s f_y (d_f - d) + A'_s f_y (d_f - d')$$

جدول ۸ مقایسه مطالعات نظری و میانگین نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

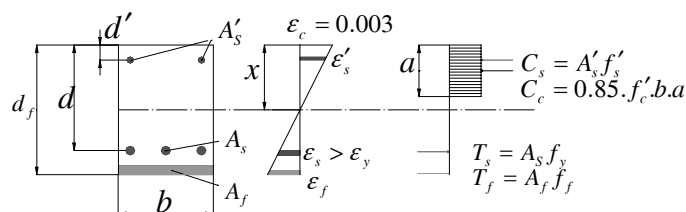
براساس این نتایج، میانگین افزایش و کاهش مقاومت نمونه‌های آزمایش شده نسبت به نتایج تئوری به ترتیب ۵/۵۸ و ۵/۸۱ درصد و در حد مطلوب است.

جدول ۷ نسبت نیروی نهایی ورق FRP به نیروی سخت شدگی میلگردها

$(P_{U_{nl}} / P_{U_{L}} - 1) * 100$	$A_f \cdot f_{fu} / ((f_U - f_Y) \cdot A_s)$	f_{fu} MPa	f_U MPa	f_Y MPa	A_f (mm ²)	A_s (mm ²)	
-۲/۳۶	۱/۰۰۴	۱۴۶	۶۴۵	۵۵۳/۳	۲۱۴	۳۳۹/۳	F-1L-33
۱۳/۳۹	۲/۰۳۶	۱۸۱/۵	۶۴۵	۵۵۳/۳	۳۵۰	۳۳۹/۳	F-2L-33
۳۳/۹۴	۳/۳۴۷	۲۱۱/۷	۶۴۵	۵۵۳/۳	۴۹۲	۳۳۹/۳	F-3L-33
-۹/۰۵۴	۰/۷۳۶	۱۴۶	۵۷۶/۲	۴۵۱/۱	۲۱۴	۳۳۹/۳	F-1L-46
۱۹/۹۱	۱/۴۹۳	۱۸۱/۵	۵۷۶/۲	۴۵۱/۱	۳۵۰	۳۳۹/۳	F-2L-46
۲۱/۷۲	۲/۴۵۳	۲۱۱/۷	۵۷۶/۲	۴۵۱/۱	۴۹۲	۳۳۹/۳	F-3L-46

جدول ۸ اختلاف نتایج نظری با میانگین نتایج آزمایش

	$P_{Y_{exp}}$ (KN)	$P_{U_{exp}}$ (KN)	$P_{Y_{cal}}$ (KN)	$(P_{Y_{exp}} / P_{Y_{cal}} - 1) * 100$
F-0L-33	۱۵۹/۴۶	۱۹۵/۸	۱۵۴/۶	۳/۱۴
F-1L-33	۱۸۶/۲۴	۱۹۱/۱۸	۱۷۶	۵/۸
F-2L-33	۱۹۰/۴	۲۲۲/۰۲	۱۹۱/۹۴	-۰/۸
F-3L-33	۲۰۵/۰۶	۲۶۲/۰۲	۲۰۵/۵۷	-۰/۲۴
F-0L-46	۱۳۹/۸۲	۱۷۶/۷۳	۱۲۹/۷	۷/۸
F-1L-46	۱۵۷/۱۵	۱۶۰/۷۳	۱۷۷	-۹/۲
F-2L-46	۱۷۷/۶۵	۲۱۱/۹۱	۱۸۴/۶	-۳/۷۶



شکل ۱۰ شرایط کرنش در حالت گسیختگی کششی

$$\rho = \rho_{\max} = 0.75\rho_b, \rho = \rho_{\min} = \frac{14}{f_y}, \rho = 0$$

شده و همراه با درصد فولاد استفاده شده در تیرهای آزمایش ρ_{exp} در جدول ۹ نشان داده شده است.

در شکلهای ۱۱-۱ و ۱۱-۲، درصد افزایش لنگر مقاوم نهایی تیرهای تقویت شده نسبت به تیر شاهد در حالت‌های مختلف برحسب درصد آرماتور طولی ارائه شده است.

به طوری که در نمودارها مشاهده می‌شود با کاهش درصد آرماتور طولی، لنگر مقاوم نهایی تیرهای شاهد کاهش یافته و لنگر مقاوم نهایی تیرهای تقویت شده با روند سریعتری افزایش می‌یابد. در نمودار مربوط به شرایط $\rho = 0$ مشاهده می‌شود که لنگر مقاوم نهایی تیر تقویت شده با یک لایه، هیچ تفاوتی با تیر شاهد ندارد که دلیل آن کوچکتر بودن لنگر مقاوم تیر تقویت شده نسبت به لنگر ترک خوردگی تیر شاهد است.

مطالعات انجام شده در زمینه مقاومت تیرها نشان می‌دهد که در تمامی موارد به استثنای گروه F-1L-46 شکست از نوع کششی بوده است؛ بعلاوه در زمینه این زیر گروه، محاسبات انجام شده نیز نشان می‌دهد که به دلیل کوچک بودن سطح مقطع ورق FRP، گسیختگی ورق قبل از جاری شدن میلگردها روی خواهد داد که از هر نظر با نتایج آزمایش‌های انجام شده مطابقت دارد.

۵- تأثیر درصد میلگرد کششی بر روند افزایش مقاومت تیرهای تقویت شده

به منظور بررسی تأثیر مقدار میلگرد کششی بر روند افزایش مقاومت خمشی تیرهای تقویت شده، مقدار لنگر مقاوم نهایی تیرهای شاهد و تقویت شده در ۳ حالت مختلف درصد فولاد،

جدول ۹ لنگر مقاوم نهایی تیرها با درصد آرماتورهای طولی متفاوت

لنگر مقاوم نهایی (KN.m)					
(ρ_{\max})	(ρ_{cal})	(ρ_{exp})	(ρ_{\min})	$(\rho=0)$	
۱۰۶	۴۶/۴	۴۷/۸	۱۹/۰	۱۰/۸	F-0L-33
۱۰۶	۵۲/۸	۵۵/۹	۲۸/۵	۱۰/۸	F-1L-33
۱۰۸	۵۷/۶	۵۷/۱	۳۶/۹	۱۸/۷	F-2L-33
۱۰۹	۶۱/۷	۶۱/۵	۴۲/۵	۳۰/۶	F-3L-33
۱۴۲	۳۸/۹	۳۸/۹	۱۹/۲	۱۲/۸	F-0L-46
۱۴۳	۵۳/۱	۴۷/۱	۲۸/۵	۱۲/۸	F-1L-46
۱۴۵	۵۵/۴	۵۳/۳	۳۶/۴	۱۸/۸	F-2L-46
۱۴۶	۶۰/۹	۵۱/۷	۴۶/۶	۳۰/۶	F-3L-46

۱- تقویت تیرها با ورقهای کامپوزیت سبب کاهش تعداد ترک تیرها و میزان بازشدگی آنها شده و گسیختگی عمومی در محل پارگی ورق روی می‌دهد.

۲- نمودار نیرو-تغییرمکان مربوط به بارهای استاتیکی و تکراری نشان می‌دهد که در تمامی موارد، منحنی بارگذاری استاتیکی، پوش منحنی نیرو-تغییرمکان بارگذاری تکراری می‌باشد که این موضوع بیانگر عملکرد مناسب تیرها در بارگذاری با دفعات تکرار محدود است.

۳- در تیرهای تقویت شده، با افزایش تعداد لایه‌های ورق تقویتی، تغییر شکل تیر در لحظه گسیختگی ورق تقویتی و شکل‌پذیری آن افزایش می‌یابد.

۴- در تیرهای تقویت شده، با افزایش تعداد لایه‌ها به دلیل افزایش نیرو و تغییرشکل تیرها، میزان جذب انرژی افزایش می‌یابد.

۵- نتایج آزمایشهای انجام شده نشان می‌دهد که به‌منظور افزایش مقاومت خمشی تیرهای تقویت شده در لحظه پارگی ورق نسبت به مقاومت خمشی تیرهای شاهد باید نسبت $A_{frp} \cdot f_{fu} / ((f_u - f_y) \cdot A_s)$ بزرگتر از یک باشد.

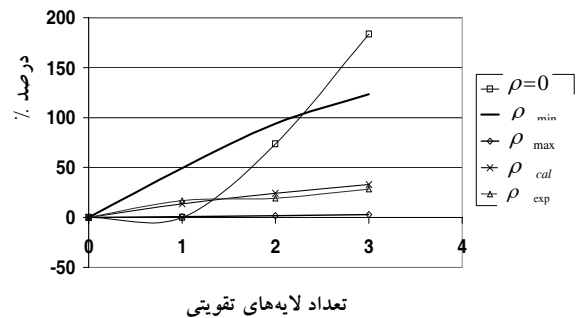
۶- میانگین افزایش و کاهش مقاومت نمونه‌های آزمایش شده نسبت به روابط نظری به ترتیب ۵/۵۸ و ۵/۸۱- درصد و در حد مطلوب است. با اطمینان خاطر می‌توان از این روابط در طراحی استفاده کرد.

۷- کاهش درصد آرماتور طولی، موجب کاهش لنگر مقاوم نهایی تیرهای شاهد و تسریع روند افزایش لنگر مقاوم تیرهای تقویت شده با افزایش تعداد لایه‌های تقویتی می‌شود.

۷- منابع

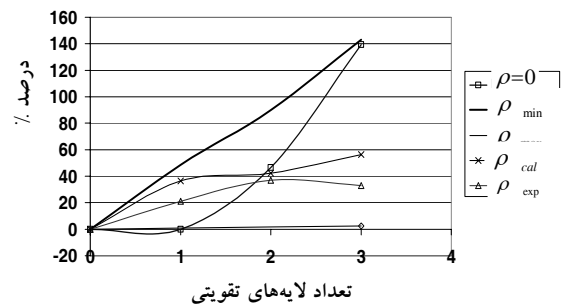
[1] Triantafillou, T.C. (1998), "Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites", ACI Structural Journal, 95:107-115.

F-nL-33



شکل ۱۱-۱ درصد افزایش لنگر مقاوم نهایی تیرهای تقویت شده نسبت به تیر شاهد در گروه F-nL-33

F-nL-46



شکل ۱۱-۲ درصد افزایش لنگر مقاوم نهایی تیرهای تقویت شده نسبت به تیر شاهد در گروه F-nL-46

در نمودارها مشاهده می‌شود که تقویت برای تیرهای با درصد فولاد کمتر ($\rho = \rho_{min}, \rho = 0$)، مؤثرتر بوده و کمترین تأثیر در حالت ($\rho = \rho_{max}$) حاصل می‌شود. همچنین مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نمودارهای مربوط به روابط نظری نشان می‌دهد که نتایج آزمایشگاهی در حد فاصل حدود نظری قرار دارد.

۶- نتیجه‌گیری

استفاده از ورقهای FRP برای تقویت اجزای سازه‌های بتن آرمه با توجه به وزن ناچیز آنها، سرعت عمل در اجرا و راندمان مکانیکی قابل ملاحظه بسیار مفید است. بر مبنای نتایج آزمایشها و بررسیهای انجام شده در این پژوهش نتایج زیر حاصل شده است:

[6][6] Shijie W. and Ruixian Z. (1993), "The study of fiber composite plates for strengthening reinforced bridges" Proceeding 9th int .Conf. Composite Materials, Madrid July 1993, pp. 224-231.

[7] Shahawy and Beitelman T.E (2000), "Static and fatigue performance of RC beams strengthened with CFRP laminates", Struct. Res. Ctr, Florida Department of Transportation.

[8] Christos G Papakon Stan Tinou (2001), "Fatigue behavior of RC beams strengthened with GFRP sheets", Journal of composites for construction 5(4), 246-260.

[2] Chajes, M.J., Januszka, T.F., Mertz, D.R., Thomson, T.A., and Finch, W.W. (1995), "Shear strengthening of reinforced concrete beams using externally applied composite fabrics", ACI Structural Journal, 92: 295-303.

[3] Ross, C.A., Jerome, D .M., Tedesco, J. W, and Hughes, M.L. (1999), "Strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composite laminates", ACI struct, J,96 (2), 212-220.

[4] Mahmoud T.EI-Mihilmy and Joseph W.Tedesco (2000), "Analysis of reinforced concrete beams strengthened with FRP laminates", J. Struct Eng. 126(6), 684-691.

[5] Meier U, Deuring M, Meier H and Schwegler G (1993a), "CFRP bonded sheets", in *Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures*, Proc. Int. Symposium, eds A Nanni and C W Dolan, Vancouver, 1993, ACI Special Publication No. 138