مهندسی عمران شریف
دوره‌ی ۲-۲۷، شماره‌ی ۱، ص. ۱۵-۱۹

ارزیابی تیرهای فلزی تقویت‌شده با الیاف بسپاری (پلیمری) مرکب

علیرضا رهایی (استاد)
سیدحامد غفاری (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

با توجه به موفقیت کاربرد الیاف بسپاری مرکب در تقویت و مرمت سازه‌های بتنی، ایده‌ی کاربرد آنها در سازه‌های فولادی نیز در چند سال اخیر با انجام آزمایش‌ها و تحقیقات گسترده توسعه یافته است. هدف از این تحقیق، بررسی عملکرد تیرهای فولادی خمشی تقویت‌شده با ورق‌های کامپوزیت است. در این تحقیق تیرهای فلزی با مقطع I به‌طول ۲۰۰۰ میلی‌متر مورد آزمایش قرار گرفتند. از ۶ تیر مورد نظر ۲ نمونه در تمام طول خود و ۲ نمونه‌ی دیگر فقط در بخشی از طول خود با ورق‌های کامپوزیتی تقویت شدند و ۲ نمونه تیر نیز بدون تقویت به‌عنوان تیرهای شاهد تحت بارگذاری قرار داده شد. تیرهای شاهد و تقویت‌شده تحت بارگذاری استاتیکی قرار گرفتند که ضمن تهیه‌ی نمودار نیرو ـ تغییر مکان، مقدار بار حد تسلیم تیرها و میزان بارگسیختگی ورق‌های کامپوزیتی مشخص و مطالعه شد. به‌منظور اعتبارسنجی نتایج، یک مدل از تیرهای آزمایشی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS مدل‌سازی و به‌روش اجزاء محدود تحلیل شد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که ظرفیت خمشی تیرهای تقویت‌شده با ورق کامپوزیت افزایش می‌یابد، و مقاومت تیرهایی که در تمام طول خود تقویت شده‌اند نسبت به تیرهایی که فقط در میانه‌ی طول خود مورد تقویت قرار گرفته‌اند نیز افزایش قابل توجهی داشته است.

واژگان کلیدی: مقاوم‌سازی، تیر فلزی، الیاف بسپاری مرکب(FRP).

rahai@aut.ac.ir
s_hamed_ghaffari@yahoo.com

۱. مقدمه

استفاده از روش‌های مختلف برای ایمن‌سازی و بهسازی لرزه‌یی سازه‌ها با توجه به نقایص موجود در طراحی و اجرای آنها بسیار متداول است. در نقاط مختلف دنیا تعداد زیادی از سازه‌های فلزی ــ نظیر پل‌ها، سکوهای ساحلی، تجهیزات فلزی و ساختمان‌ها ــ نیاز به مقاوم‌سازی دارند. روش‌های ترمیم و مقاوم‌سازی سازه‌های فلزی موجود، عمدتاً مشتمل بر جداکردن عضو و جایگذاری عضو جدید یا نصب صفحه‌ی فلزی اضافی بر روی عضو آسیب دیده است، اما عموماً این صفحات بزرگ و سنگین‌اند و نصب و اجرای آن‌ها مشکلات بسیاری دارد. بنابراین استفاده از ورق‌های کامپوزیتی یک روش جایگزین و مناسب برای تقویت سازه‌های فولادی است که علاوه بر این، بهبود دوام تیرهای تقویت‌شده را در مقابل شرایط مختلف محیطی به‌همراه خواهد داشت.

استفاده از ورق کامپوزیتی FRP از مزایای متعددی برخوردار است که از آن‌جمله می‌توان به افزایش مقاومت در برابر خوردگی، بهبود مشخصات مکانیکی، بهبود مشخصات باربری، سبکی و سهولت در اجرا اشاره کرد. البته در کنار مزایای موجود، این روش نیز مانند روش‌های دیگر دارای یک سری کاستی‌هایی است که می‌توان به وابستگی زیاد عملکرد و کارآیی الیاف به نحوه‌ی اجرا، ناهمسانگرد بودن ورق کامپوزیتی FRP و لزوم طراحی بهینه‌ی این سیستم اشاره کرد.[۱]

تجربیات اخیر در آمریکا، ژاپن و سوئیس نشان داده است که استفاده از ورق کامپوزیت تأثیر زیادی در بهبود عملکرد سازه‌های فلزی دارد.[۲]

آزمایش‌های زیادی در زمینه‌ی بررسی نحوه‌ی اتصال اجزاء تقویت‌شده با ورق FRP انجام شده است. برخی از این آزمایش‌ها در سال ۲۰۰۵ انجام شده است که نتایج حاصله‌نشان‌گر اتصال مناسب بین فولاد و ورق کامپوزیتی است.[۳] در این مطالعات یک مدل تحلیلی مناسب برای درک بهتر اتصال بین فولاد و ورق کامپوزیت نیز ارائه شده است.

در سال ۲۰۰۶، در تحقیق دیگری که به‌منظور کاهش میزان تنش در انتهای ورق FRP صورت گرفت، محققین با استفاده از روابط نظری و اثبات آنها توسط آزمایش‌های انجام‌گرفته به یک طول پوششی مناسب برای قطع ورق کامپوزیت دست یافتند.[۴]

در سال ۲۰۰۶ نیز تحقیقاتی در زمینه‌ی مقاوم‌سازی مقاطع توخالی مستطیلی انجام شد.[۵] این مقاطع که غالباً در برش ضعیف‌اند با ورق FRP تقویت شد و نتایج قابل تأمل و جالبی به دست آمد.

درخصوص تقویت خمشی اعضای فلزی، پیش‌تر بررسی‌هایی در جهت تقویت

تاریخ: دریافت ۱۳۸۷/۷/۲۹، اصلاحیه ۱۳۸۷/۱۱/۷، پذیرش ۱۳۸۸/۱۰/۲۹.

Archive of SID
www.SID.ir

تیر خمشی کامپوزیتی (تیر فلزی ـ بتنی) انجام شده که این تحقیقات علاوه بر بارگذاری استاتیکی، شامل بارگذاری دینامیکی و حتی انجام آزمایش‌های مربوط به خستگی نیز هست، که تماماً نشان‌گر رفتار مناسب این سازه‌ها در کنار تقویت با مصالح کامپوزیتی است. درمورد تیرهای فلزی ـ خمشی نیز تحقیقاتی انجام شده است:

در سال ۲۰۰۱، در یکی از دانشگاه‌های آمریکا، آزمایشی بر روی تیری با مقطع W۱۲ × ۱۴ ، با طول ۲۷۴۰ میلی‌متر انجام شد. برای اِعمال شرایط خوردگی، در قسمتی از تیر شکافی (NOTCH) در ناحیه‌ی کششی ایجاد شده بود.[۶]

در این آزمایش «شکست در نمونه‌های تقویت‌شده» به‌دلیل جداشدن ورق FRP گزارش شده است. در یکی از نمونه‌ها جداشدن ورق FRP از محل شکاف در وسط تیر شروع و در طول تیر ادامه یافت و به انتهای ورق FRP رسید. در نمونه‌ی دیگر ورق FRP تماماً و یک‌باره از تیر جدا شد. جداشدگی به‌دلیل تمرکز تنش در محل شکاف بوده است.

در سال ۲۰۰۵ در آزمایش دیگری، تیرهایی با مقطع جعبه‌یی با ورق کامپوزیت تقویت شدند. هدف از این آزمایش بررسی عملکرد و اثر تقویت تیرهای ضعیف‌شده با دو نوع ورق FRP مختلف بود. بدین‌منظور محققان تیرهایی به‌طول ۱۸۰۰ میلی‌متر با تکیه‌گاه‌هایی ساده در نظر گرفتند.[۷]

برخی از این تیرها با ورق کامپوزیتیِ با مدول کشسانی بالا، و برخی دیگر با مدولِ کشسانی معمولی تقویت شده بودند. تیرهای دیگر مشابه دو مورد قبل تقویت شدند، با این تفاوت که ورق تقویتی آن‌ها فقط در انتهای عضو نبود بلکه جداره‌ی مقطع را نیز پوشانده بود. برمبنای نتایج به دست آمده، در تیر اول گسیختگی در بار ۴۵ کیلو نیوتن و در محل خمش خالص و در ورق FRP متمرکز شده بود. تیر دوم، در مقایسه با تیر اول، رفتار شکل‌پذیرتری از خود نشان داد و بیشترین نیرویی که تحمل کرد ۵۰ کیلو نیوتن بود. تیرهای سوم و چهارم در مقایسه با نمونه‌های اولیه، شکل‌پذیری کم‌تری از خود نشان دادند.

آزمایش دیگری در سال ۲۰۰۵ بر روی تیرهایی با مقطع H انجام شد که هدف از آن بررسی عملکرد تیر فلزی تقویت‌شده با ورق FRP با دو نوع چسبِ مختلف بود. همچنین در این آزمایش، عملکرد تیر تقویت‌شده با دو لایه ورق کامپوزیت نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است.[۸] طول تیرهای تقویت‌شده ۲۵۰۰ میلی‌متر بود که تیرها در ۲۰۰۰ میلی‌متری وسط دهانه تقویت شده بودند. برمبنای نتایج این آزمایش، مقاومت تیر تقویت‌شده به‌میزان ۹/۲ درصد افزایش یافته بود. همچنین در نمونه با دو لایه‌ی تقویت ورق FRP، علاوه بر این که هیچ جداشدگی در طول آن گزارش نشده، از نظر مقاومت نیز نسبت به نمونه‌های قبلی افزایش قابل توجهی داشته است.

با ارزیابی تجربیات انجام‌شده‌ی قبلی و به‌منظور ادامه‌ی برنامه‌های علمی و تحقیقاتی در داخل کشور یک برنامه‌ی مطالعاتی تحلیلی و آزمایشگاهی برای بررسی تیرهای فلزی تقویت‌شده با ورق FRP تدوین شد که نتایج آن در این نوشتار ارائه می‌شود.

۲. برنامه‌ی آزمایشگاهی

۱.۲. نمونه‌های آزمایشی و جزئیات آنها

به‌منظور بررسی اثر ورق‌های کامپوزیتی بر ظرفیت خمشی تیرهای فلزی، ۶ تیر فلزی از نوع IPE۱۴ با طول ۲۰۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. در هر گروه تعداد تیرها ۲ عدد بوده که چنین دسته‌بندی می‌شوند:

- نمونه‌های شاهد (CG)[۱]: این نمونه‌ها در هیچ قسمتی از طول خود تقویت نشده و فقط برای مقایسه‌ی نتایج مورد بارگذاری قرار گرفتند.
- نمونه‌های تقویت‌شده‌ی گروه اول (RG۱): این نمونه‌ها تنها در ۱۰۰۰ میلی‌متری دهانه توسط ورق FRP مورد تقویت قرار گرفتند.
- نمونه‌های تقویت‌شده‌ی گروه دوم (RG۲): این نمونه‌ها در طول ۱۷۰۰ میلی‌متری دهانه با ورق FRP تقویت شدند.

ورق‌های FRP از نوع لمینیت کربن بودند که مشخصات آنها در جدول ۱ ارائه شده است. براساس مطالعات انجام‌شده چسب به‌کار رفته در این آزمایش برای اتصال لمینیت‌ها به تیرهای فلزی از نوع سیکا در نظرگرفته شد. مشخصات این نوع چسب در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین در این آزمایش جنس فولاد مصرفی از نوع ST۳۷ بود.

با توجه به مقررات ملی ساختمانی ایران، نظر به این که طول تیرها ۲۰۰۰ میلی‌متر و فاصله‌ی بین تکیه‌گاه‌ها ۱۸۰۰ میلی‌متر است، لذا این تیرها در رده‌ی تیرهای بدون اتکای جانبی قرار می‌گیرند.

$$L_c = \min \begin{cases} \frac{۶۳۵ b_f}{\sqrt{F_y}} \\ \frac{۱۴ \times ۱۰^۵}{\left[\frac{d}{A_f}\right] \times F_y} \end{cases} \quad \rightarrow L_c = ۹۵۰ mm$$

$$L_b = ۱۸۰۰ mm$$

L_c طول مهرنشده، L_b فاصله بین دو تکیه‌گاه جانبی، b_f پهنای بال فشاری، d ارتفاع کلی نیم‌رخ، A_f سطح مقطع بال فشاری و F_y حد جاری‌شدن فولاد.

جدول ۱. مشخصات مکانیکی ورق لمینت.

Laminates CFK ۱۵۰/۲۰۰۰	
مدول کشسانی (GPa)	> ۱۵۰
مقاومت کششی (MPa)	۲۵۰۰
عرض (mm)	۵۰
ضخامت (mm)	۱/۴

جدول ۲. نتایج آزمایش.

نام نمونه	بیشترین بار تحمل شده (kN)	میزان تغییر مکان متناظر با بار بیشینه (mm)	بار جدایش FRP (kN)	میزان تغییر مکان در لحظه‌ی جدایش FRP (kN)
CG-۰	۸۸/۹	۱۶/۱۷	—	—
CG-۱	۸۸/۳	۱۶/۱۲	—	—
RG۱-۱	۹۸/۴۲	۳۰/۷۸	۹۸/۲۸	۳۰/۷۸
RG۱-۲	۹۷/۵	۲۹/۷	۹۹/۱۲	۳۱/۵
RG۲-۱	۱۰۶/۶	۲۷/۵	۹۸/۸	۴۵/۸۸
RG۲-۲	۱۰۶/۷	۲۸/۸	۹۸/۸۲	۴۵/۹۸

Archive of SID

www.SID.ir

اعمال شرایط بارگذاری به تیرها به‌گونه‌یی بود که تیرها به‌صورت با اتکا مورد ارزیابی قرار گیرند. بدین‌منظور، در دو نقطه صفحاتی به تکیه‌گاه اتصال داده شد تا با رعایت فاصله‌ی مناسب از بال تیر، از پیچش جانبی آن جلوگیری کند (شکل ۱).

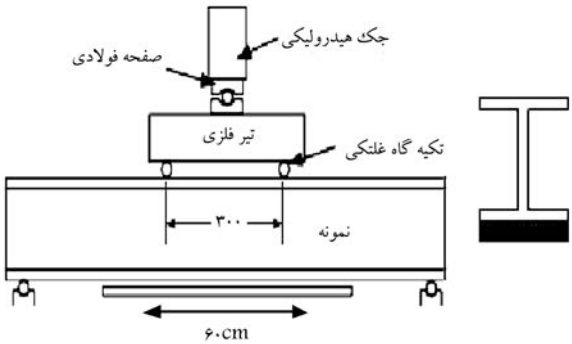
۳. نحوه‌ی بارگذاری

نمونه‌ها در قاب فولادی آزمایشگاه سازه دانشگاه صنعتی امیرکبیر آزمایش شدند. نیرو توسط جک ۱۰۰۰ کیلونیوتنی به تیرها اعمال شد و تغییر مکان‌ها توسط تغییر مکان‌سنج (LVDT) قرائت شدند. LVDTها یکی در میانه‌ی تیر و دیگری در یک سوم دهانه‌ی تیر قرار داده شده بودند. بارگذاری تیرها به‌صورت استاتیکی انجام شد.

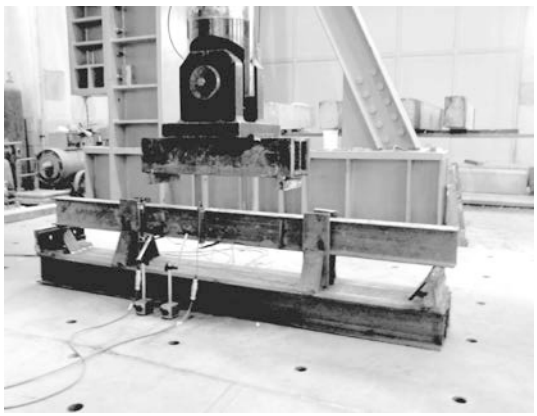
از طرف دیگر با توجه به نحوه‌ی بارگذاری و رعایت استاندارد مقررات ملی ساختمانی ایران به‌منظور جلوگیری از جاری‌شدن جان، یک سری سخت‌کننده، با توجه به ضوابط موجود در طراحی، برای جایگذاری در جان تیرها طراحی و اجرا شد.(شکل ۲)

۴. تحلیل مدل

در این تحقیق، به‌منظور بررسی صحت نتایج به دست آمده در آزمایشگاه، یک مدل‌سازی در نرم‌افزار ANSYS انجام شد. مدل‌سازی به‌صورت سه‌بعدی و طبق شرایط نمونه‌های آزمایشگاهی در نرم‌افزار مورد ارزیابی قرارگرفت. در این مدل‌سازی از المان Solid۴۵ استفاده شد و نوع مصالح برای تیر فلزی به غیرخطی و برای چسب و ورق FRP به خطی تعریف شد. با توجه به شرایط بارگذاری در آزمایشگاه، الگوی بارگذاری در نرم‌افزار به‌صورت الگوی نیروی یک‌سویه‌ی افزایشی در نظرگرفته شد.



شکل ۱. نحوه‌ی جلوگیری از پیچش جانبی تیر.



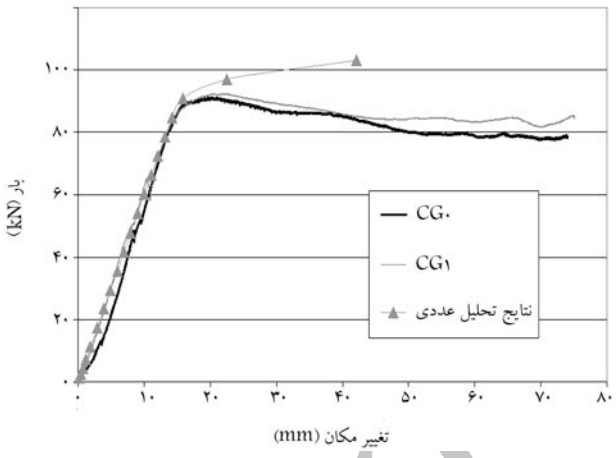
شکل ۲. نحوه‌ی بارگذاری تیر در قاب.

۵. نتایج

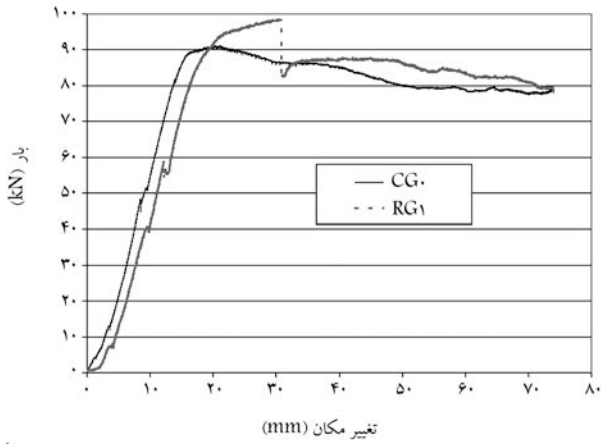
ابتدا نمونه‌های شاهد (CG) مورد آزمایش قرارگرفتند. نتایج نمودار بار ـ تغییرمکان نمونه‌های شاهد، مشتمل بر مطالعات عددی و آزمایشگاهی، در شکل ۳ ارائه شده است. چنان که مشاهده می‌شود، نمونه‌ی شاهد در بار ۸۸٫۹ کیلونیوتن جاری شد و سپس بارگذاری ادامه داده شد تا شرایط تسلیم به‌طورکامل انجام شود. نمودار فوق همچنین بیان‌گر مطابقت‌خوبِ نتایج آزمایشگاهی و عددی است.

در مرحله‌ی بعد تیر تقویت‌شده با طول ورق کامپوزیتی ۱۰۰۰ میلی‌متر، مورد بارگذاری قرارگرفت. در شکل ۴ نمودار بار ـ تغییر مکانِ یکی از این تیرها (RG۱) به‌همراه نمونه‌ی شاهد (CG) برای مقایسه‌ی نتایج ارائه می‌شود.

براساس این نمودار در تیر تقویت‌شده شیب ناحیه‌ی خطی مشابه تیر تقویت‌نشده است، اما چنان که مشاهده می‌شود افزایش مقاومت مناسبی ایجاد شده است.



شکل ۳. نمودار بار ـ تغییر مکان و نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی نمونه‌ی شاهد (CG).



شکل ۴. نمودار بار ـ تغییر مکانِ نمونه‌ی شاهد (CG) و نمونه‌ی تقویت شده (RG۱).

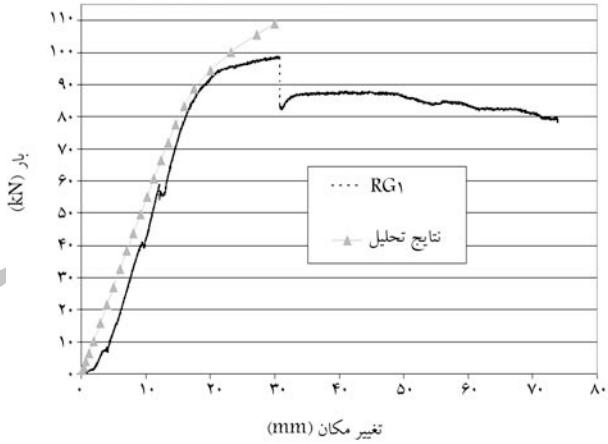
www.SID.ir

بیشترین بار ثبت‌شده برای این نمونه ۹۸ کیلونیوتن است که در حدود ۱۲ درصد افزایش ظرفیت داشته است.

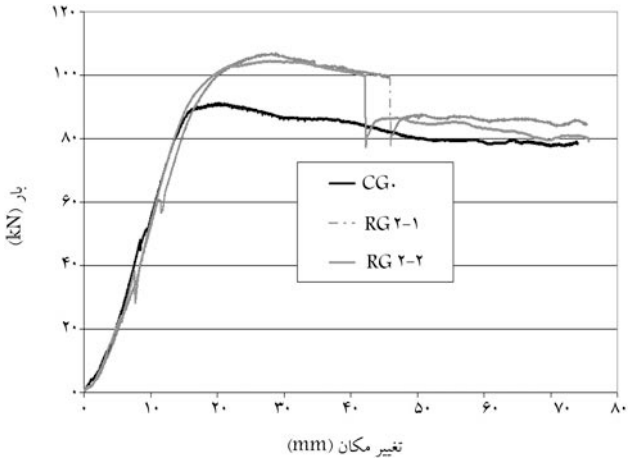
چنان‌که در نمودار مشخص است بعد از جداشدن ورق کامپوزیت از تیر، کاهش شدیدی در روند بارگذاری اتفاق افتاده است. شکل ۵ نتایج تحلیل عددی مدل را نشان می‌دهد.

در شکل ۶ نمودار بار ـ تغییر مکان تیر با طول ورق تقویتی ۱۷۰۰ میلی‌متر مشاهده می‌شود. در این نمودار برای مقایسه، نمودار نمونه‌ی شاهد نیز ارائه شده است. مشابه نمونه قبلی هیچ تغییری در شیب نمودار دیده نمی‌شود؛ علاوه بر این، بیشترین باری که نمونه تحمل کرده است معادل ۱۰۶٫۶ کیلونیوتن بوده و نسبت به نمونه‌ی شاهد در حدود ۲۰ درصد افزایش ظرفیت داشته است.

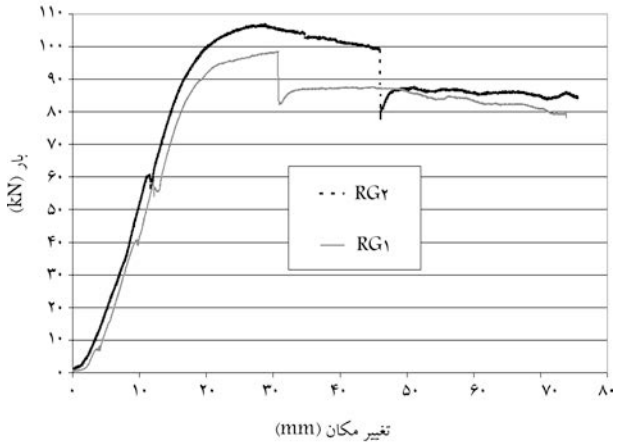
نکته‌ی مهمی که از این آزمایش نسبت به نمونه‌ی قبلی استنتاج می‌شود این است که در این حالت تیر به‌همراه ورق کامپوزیت وارد ناحیه‌ی غیرخطی شده و در حالی که افزایش تغییر مکان داشته، ورق کامپوزیت از آن جدا شده است. اما این روند در نمونه‌ی (RG۱) مشهود نیست به‌طوری که بعد از ورود تیر به ناحیه‌ی غیرخطی در مدت زمان کم‌تری بعد از افزایش تغییر مکان، ورق کامپوزیت از تیر جدا شده است (شکل ۷). در نمونه (RG۲) افزایش ظرفیت نسبت به نمونه قبلی در حدود ۹ درصد است.



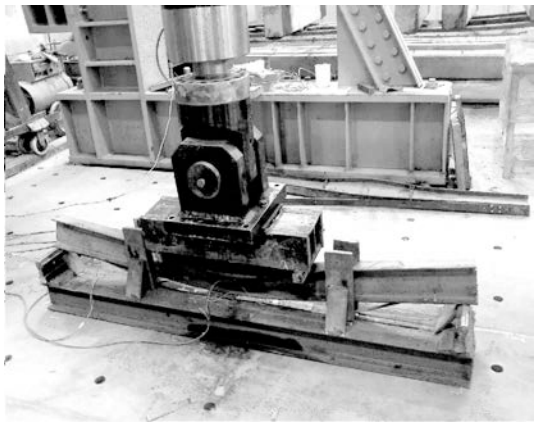
شکل ۵. نمودار بار ـ تغییر مکان نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی نمونه‌ی تقویت شده (RG۱).



شکل ۶. نمودار بار ـ تغییر مکانِ نمونه‌ی شاهد (CG) و نمونه‌ی تقویت‌شده (RG۲).



شکل ۷. نمودار بار ـ تغییر مکانِ نمونه‌های تقویت‌شده‌ی RG۱ و RG۲.



شکل ۸. تیر بارگذاری‌شده.

علاوه بر این، نمودار یادشده نشان می‌دهد که افزایش طول ورق کامپوزیت باعث به تعویق افتادن جدایش می‌شود؛ همچنین باعث خواهد شد که ورق کامپوزیت در تغییر مکان بزرگ‌تری جدا شود و این بدان‌معناست که در لحظه‌ی گسیختگی رفتار شکل‌پذیرتری قابل انتظار است.

علاوه بر نمودارهای فوق، نتایج آزمایش در جدول ۲ ارائه شده است. چنان که مشخص است در نمونه‌ی RG۱ میزان تغییر مکان متناظر با بار بیشینه، با میزان تغییر مکان در لحظه‌ی جدایش برابر است. این بدان معناست که لحظه‌ی جدایش زمانی است که تیر در حال تحمل بیشترین میزان باربری خود است. اما در نمونه‌ی RG۲ این دو پدیده هم‌زمان نیستند به‌طوری که تغییر مکان در لحظه‌ی جدایش ۱٫۵ برابر بزرگ‌تر از تغییر مکان متناظر با بار بیشینه است که نشان‌گر رفتار شکل‌پذیر این نمونه است. در ادامه در شکل ۸ نمونه‌یی از تیر بارگذاری شده در انتهای آزمایش ارائه می‌شود.

۶. نتیجه‌گیری

استفاده از ورق FRP به‌منظور تقویت اعضای فولادی با توجه به وزن ناچیز آنها، سرعت عمل بالا در اجرا و کارایی مکانیکی بسیار مفید است.

نتایج آزمایش‌ها و بررسی‌های انجام‌شده در این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از ورق FRP تأثیر چندانی بر افزایش سختی در نمونه‌های فلزی ایجاد نمی‌کند.

Archive of SID
www.SID.ir

علاوه براین، با افزایش طول ورق FRP می‌توان به نتایج بهتری از لحاظ مقاومت در هنگام گسیختگی دست یافت، به‌طوری که برمبنای مشاهدات در آزمایش‌ها، در نمونه‌ی RG۱ جدایش در ابتدا و انتهای ورق FRP بود، زیرا در این نمونه انتهای ورق کامپوزیت در نزدیکی محل خمش بیشینه واقع شده بود. از طرف دیگر، با توجه به این که انتهای ورق FRP محل اصلی تمرکز تنش است، تنش به‌سرعت افزایش می‌یابد و ورق FRP زودتر جدا می‌شود. اما در نمونه‌ی RG۲ جدایش ورق FRP از وسط تیر بود، زیرا در این نمونه ورق کامپوزیت تا نزدیکی تکیه‌گاه ادامه داده شده بود و انتهای آن از ناحیه‌ی خمش بیشینه دور بود. همچنین چسبندگی مناسب کامپوزیت‌های کربنی باعث شد در تیرهای تقویت‌شده افزایش ۲۰ درصدی در مقاومت مشاهده شود.

پانوشت

1. Control Group

منابع

1. Cadi, J.M.C. and Stratford, T.J., *Strengthening Metallic Structures Using Externally Bonded Fiber-Reinforced Composites,* London, CIRIA (2004).
2. Zhao, X.L. "State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures", *Engineering Structure, ELSEVIER* (29), pp.1808-1823 (2007).
3. Fawsia, S. and Zhao, X.L. "Investigation into the bonded between CFRP and steel tubes", *In The Second International Conference on FRP Composites in Civil Engineering,* (2005).
4. Al-Mahaidi, R. and Fawsia, S. "Bonded characteristics between CFRP and steel plates in double strap joints", *Advances in Steel Construction-An International Journal,* **1** (2) pp. 17-28 (2005).
5. Zhao, X.L. and Fernando, D. "CFRP strengthened RHS subjected to transverse end bearing force", *Engineering Structure, ELSEVIER,* (28) pp.1555-1565 (2006).
6. Photiou, N.K.; Hollaway, L.C. and Chryssanthopoulos, M.K. "Strengthening of an artificially degraded steel beam utilizing a carbon/glass composite system" *ELSEVIER, Construction and Building Materials,* **20**, pp. 11-21 (2006).
7. LIU, X. and Silva, P. "Rehabilitation of steel bridge members with FRP composite materials", *Composites in Construction,* Porto, Portugal, pp. 613-617 (2001).
8. Pierluigi Colombi, Carlo Poggi. An experimental, analytical and numerical study of the static behavior of steel beams

Archive of SID

www.SID.ir