

بررسی عملکرد خمشی تیرهای فولادی تقویت شده با پلیمر الیاف کربن تحت تحلیل غیرخطی

سیدفتح اله ساجدی^۱، سیدحمید هاشمی^۲، غلام عباس بهرامی نیا^۳، سیدمحسن کالوندی^۴

^۱ دانشیار گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

^۲ دانشجوی دکتری عمران، گرایش مهندسی و مدیریت ساخت، واحد قشم، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران

^۳ دانشجوی دکتری عمران، گرایش مهندسی و مدیریت ساخت، واحد قشم، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران

^۴ دانشجوی دکتری عمران، گرایش مهندسی و مدیریت ساخت، واحد قشم، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران

نام نویسنده مسئول:

سید حمید هاشمی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۱۲/۱۵

چکیده

سازه های بزرگ و ساختمان ها در اثر گذر زمان و عوامل محیطی، با مشکلاتی نظیر زنگ زدگی و پوسیدگی مواجه هستند. از آنجایی که این عوامل تاثیر به سزایی در کاهش مقاومت، کاهش ظرفیت باربری و ایجاد نقص در اعضای سازه دارند، نیاز به تمهیدات و اقدامات لازم برای بهبود عملکرد آن ها می باشد. در این تحقیق به منظور بررسی تاثیر پلیمر تقویت شده الیاف کربن^۱ بر مقاوم سازی تیر فولادی دارای نقص، ۱۷ تیر برای مدل سازی با نرم افزار آباکوس مورد مطالعه قرار گرفتند. شایان ذکر است که در همه این تیر ها در ناحیه بال کششی میانه تیر، نقص اولیه به صورت یک طرفه و دو طرفه ایجاد شده و اندازه و نحوه قرارگیری ورق های الیاف پلیمری تقویت شده با کربن برای بهبود عملکرد تیر، بررسی شدند. نتایج حاصل از پژوهش عملکرد مناسب ورق های الیاف پلیمری تقویت شده با کربن در بالا بردن ظرفیت باربری و جلوگیری از گسترش ترک در تیر فولادی را نمایان می سازد. همچنین جدا شدگی موضعی در ورق های CFRP حاصل از نقص، باعث افزایش ناگهانی تنش چسب و متعاقبا لغزش ورق الیاف تقویت شده با کربن می شود. با افزایش مقدار بار، کرنش ورق الیاف تقویت شده با کربن در ناحیه نقص و کرنش جدا شدگی قابل ملاحظه است.

واژگان کلیدی: مقاوم سازی، ظرفیت باربری، تیر فولادی، نقص عضو، پلیمر الیاف کربن، تحلیل غیرخطی

¹ Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)

مقدمه

با وجود اینکه الیاف تقویت شده $(FRP)^2$ مصالح نسبتاً جدیدی است و کاربرد آن هنوز فراگیر نشده است، تحقیقات گسترده‌ای روی آن صورت گرفته است. با این حال اغلب تحقیقات گذشته معطوف به مطالعه بر روی سازه‌های بتنی بوده و هم‌چنان نیز در حال انجام است. لورنزو^۳ در سال ۱۹۸۶ بیان می‌شود که صفحات الیاف تقویت شده با کربن با ویژگی‌های حساس خستگی در عضو فلزی می‌تواند باعث افزایش مقاومت و طول عمر خستگی شوند. خواص مکانیکی و خستگی برتر الیاف پلیمرهای مسلح شده به الیاف کربن می‌توانند آنها را به عنوان بهترین انتخاب برای تعمیر و مقاوم سازی شاه تیرهای فولادی پل‌ها معرفی کند. ورق‌های الیاف تقویت شده با کربن تضمین کننده یک میلیون چرخه از بارگذاری خستگی و رنج تنش برابر ۱/۵ برابر مقاومت نهایی می‌باشند [۱]. توکلی زاده و سعادت‌منش در سال ۲۰۰۳ نتایج یک تحقیق را روی تعمیر تیرهای فولادی شکاف دار با قطعه‌های الیاف تقویت شده با کربن برای بارگذاری خستگی، با چرخه متوسط $(R=0.1)$ ارائه دادند [۲]. یک مجموعه از ۲۱ نمونه از تیرهای فولادی ساخته شده از $S127, 4/5, A36$ آزمایش شدند. تیرهای تقویت نشده به عنوان نمونه‌های آزمایش شد. تیرهای فولادی تحت چهار نقطه خمشی با نسبت بارگذاری بین ۵ و ۱۰ هرتز آزمایش گردیدند. تنش ثابت در دامنه متغیر ۶۹ و ۳۷۹ مگاپاسکال در نظر گرفته شدند. طول و ضخامت قطعه‌ها، برای همه نمونه‌های تعمیر شده یکسان در نظر گرفته شدند. به علاوه، تعداد چرخه‌های گسیختگی، تغییرات در سختی و بازگشایی ترک و گسترش آن در طول هر نمونه نیز مد نظر قرار گرفتند. نتایج نشان داد که قطعه الیاف تقویت شده با کربن نه تنها تمایل دارد عمر خستگی یک جزء را بیش تر از سه ساعت تمدید کند، بلکه سرعت گسترش ترک را به طور چشم گیری کاهش می‌دهد. اهمیت ترمیم عمر و تعویق در خراب شدن سازه‌های فولادی محقق‌ها را برای پیشرفت آسان و مفید فنون توان بخشی سازه‌ها تحریک می‌کند. یکی از شیوه‌های توسعه در حال حاضر شامل؛ چسباندن ورق‌های الیاف تقویت شده پلیمری به بال تیرهای فولادی است.

کلومبی و همکاران^۴ در سال ۲۰۰۳، آنالیز ترک در عضوهای فلزی مقاوم سازی شده با وصله‌های کامپوزیت پیش تنیده و شکست خستگی انجام دادند. آن‌ها از شیوه مدل سه لایه برای مطالعه گسترش ترک در سیستم فلزی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که در نمونه‌های ورق جداسازی حالت غالب نیست و استفاده از ورق‌های فلزی خیلی سخت، افزایش قابل توجهی در اثر بخشی مقاوم سازی ندارد. اندازه‌های متفاوتی از ورق‌های الیاف تقویت شده با کربن برای رسیدن به طول بهینه در مدل سازی استفاده گردید. در این تحقیق از اثرات گسترش ترک صرف نظر گردیده است. اندازه‌های متفاوتی از ورق‌های الیاف تقویت شده با کربن برای رسیدن به طول مناسب و هم چنین اندازه متفاوت نقص در مدل سازی استفاده شد. در این تحقیق نقص با طول و عرض متفاوت در نظر گرفته شده و تاثیر ابعاد نقص در ظرفیت باربری بررسی گردید [۳]. کیم و هریس^۵ در سال ۲۰۱۱ رفتار خمشی تیر فلزی آسیب دارای نقص که با ورق‌های الیاف تقویت شده با کربن مقاوم سازی شده بود را مورد بررسی قرار دادند. این آسیب در ناحیه بال کششی ایجاد شد. به منظور ارزیابی خستگی تیر تعمیر شده با تاکید بر ناحیه خمیری شش تیر مورد آزمایش قرار گرفت. مقدار تنش در گسترش آسیب، عمر خستگی و کرنش خمیری در تیرهای تعمیر شده بهبود یافت. مقدار پاسخ خستگی مشاهده شده در سطح تماس الیاف تقویت شده با کربن و تیر، با تعداد چرخه‌های خستگی و تنش اعمال شده در ارتباط است. به جز در ناحیه آسیب، که تمرکز کرنش به طور قابل ملاحظه است، کرنش در طول ورق الیاف تقویت شده با کربن به طور تدریجی افزایش می‌یابد. عمر خستگی، درجه آسیب تحت تاثیر رنج و مقدار تنش نبود و با افزایش چرخه‌های خستگی، درجه آسیب تحت تاثیر مقدار تنش قرار می‌گیرد. در جان تیر، تا عمر خستگی به اندازه $(40-50)\%$ گسترش ترک عمودی قابل ملاحظه نبود، اما با افزایش عمر خستگی به شدت افزایش یافت و ناگهان یک پارگی شکنده در جان اتفاق افتاد [۴].

غفوری و همکاران در سال ۲۰۱۲، رفتار تیر دارای آسیب مقاوم سازی شده با دو نوع الیاف تقویت شده با کربن، پیش تنیده شده و بدون پیش تنیدگی را مورد بررسی قرار گرفته است. اثرات بارهای خستگی، رطوبت و آب بروی الیاف تقویت شده و فلز مورد توجه بود. در سیستم $(PBR)^6$ که برای چسباندن الیاف تقویت شده با کربن از چسب استفاده شد. کرنش موضعی بر ورق‌ها الیاف تقویت شده با کربن به صورت متمرکز بود در حالی که در سیستم $(PUR)^7$ کرنش موضعی منظمی در طول ورق الیاف تقویت شده مشاهده شد. و همچنین میتواند عملکرد خستگی بهتری را با درجه بالای پیش تنیدگی نشان داد که گسترش تنش در طول الیاف تقویت شده با کربن بصورت منظم بود. تیر دارای آسیب مقاوم سازی شده با سیستم PUR و PBR دارای ظرفیت باربری تقریباً یکسانی بودند در حالی که حالت‌های شکست در دو سیستم متفاوت بود. تیر مقاوم سازی شده با الیاف تقویت شده با کربن دارای پیش تنیدگی حدود ۵ برابر عمر خستگی بیش تری

² Fiber Reinforced Polymers (FRP)

³ Lorenzo

⁴ Colombi et al.

⁵ Kim & Harries

⁶ Prestressed bonded reinforcement

⁷ Prestressed un-bonded reinforcement

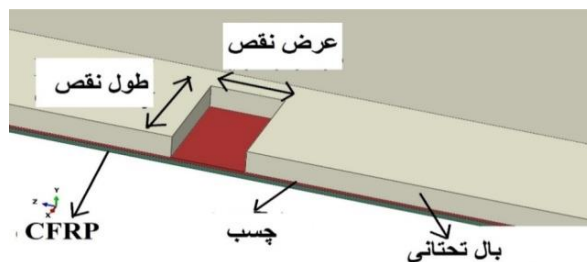
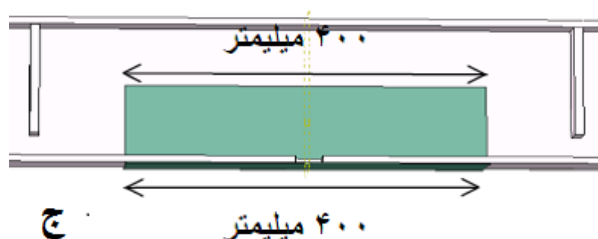
داشت. حالت های مختلف ترک که شامل مجهول، نیمه فعال و فعال معرفی شد. مادامی که ترک به صورت مجهول است تاثیر قابل توجه ای روی رفتار سازه ای ندارد. در حالت نیمه فعال با افزایش لنگر خمشی خارجی، سختی خمشی شروع به کاهش یافتن می کند تا اینکه بصورت ناگهانی ترک به حالت فعال تبدیل می شود [۵].

نادری و اسمعیلی زاده در سال ۱۳۹۵، مقاومت نهایی تیرهای بتنی تقویت شده با CERF انعطاف پذیر و سخت، در دمای بالا و یخ زدگی بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصله نشان می دهد که پارگی ورق های CFRP در دمای اتاق ناشی از ترک های خمشی و در دماهای بالا و پایین، ناشی از تنش های برشی بوده است. به نظر می رسد تغییرات دمایی موجود علاوه بر تاثیرش بر مقاومت چسبندگی بین ورق های الیاف تقویت شده با کربن، بر خواص مصالح نیز تاثیر جدی داشته باشد. بررسی مقاومت نهایی تیر های تقویت شده نیز بیانگر آنست که با رسیدن چسب به دمای گذار شیشه ای (T_g) کاهش مقاومت نهایی، قابل توجه است [۶].

در تحقیقی افتخاری و یعقوبی در سال ۱۳۹۱، به بررسی امکان جایگزینی روش جدید سوراخزنی به جای آماده سازی سطحی در تقویت خمشی تیرهای بتنی با ورق های الیاف تقویت شده با کربن پرداخته شده و همچنین تلاش شده است که پارامترهای مختلف این روش مورد بررسی قرار گیرد. نمونه های آزمایشگاهی استفاده شده در این تحقیق شامل ۱۲۰ نمونه ی منشوری به ابعاد $۱۰۰ \times ۱۰۰ \times ۵۰۰$ میلی متر می باشد که تحت بارگذاری خمشی ۴ نقطه ای قرار گرفته اند. نمونه های مذکور در گروه های مختلف طبقه بندی شده اند و به روش های مختلف با کامپوزیت های CFRP تقویت شده اند. چند نمونه نیز به صورت تقویت نشده مورد آزمایش قرار گرفته اند. روش های استفاده شده برای نمونه های تقویت شده شامل بدون آماده سازی سطحی، با آماده سازی سطحی، سوراخزنی، سوراخزنی با میخ گذاری و سوراخزنی با مهار ورق در سوراخ های انتهایی می باشد. نتایج آزمایش ها حاکی از این است که آماده سازی سطحی، سوراخزنی، سوراخزنی با میخ گذاری و سوراخزنی با مهار ورق استفاده از روش سوراخزنی به جای آماده سازی سطحی باعث افزایش بار گسیختگی نهایی می گردد. همچنین با استفاده از شیوه های تکمیلی میخ گذاری و مهار ورق تقویتی در سوراخ های انتهایی، علاوه بر افزایش چشم گیر بار گسیختگی نهایی، مود گسیختگی نیز از حالت جداشدگی به پارگی ورق های الیاف تقویت شده با کربن مبدل می گردد [۷].

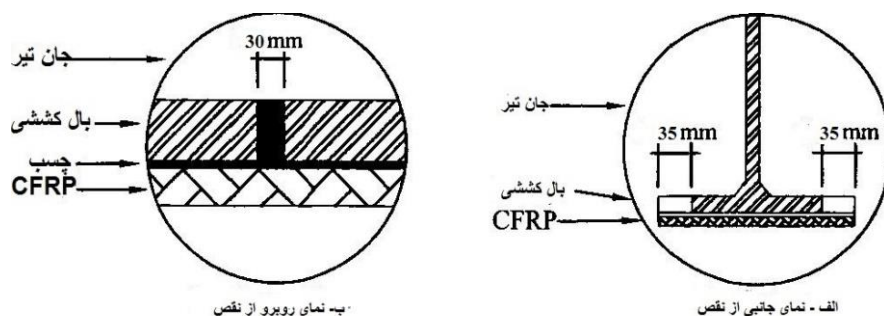
۱. مشخصات مصالح و نمونه ها

در این پژوهش از ابعاد نقص متفاوت استفاده شده است. در ابتدا برای رسیدن به طول الیاف تقویت شده با کربن مناسب از نقص به اندازه ۳۰×۲۰ میلی متر مربع استفاده شد. برای نمونه های دیگر ابعاد بزرگتر نقص ۳۰×۳۰ ، ۳۵×۳۰ ، ۳۰×۳۵ ، ۳۷×۳۰ میلی متر مربع به صورت دو طرفه و نقص با ابعاد ۳۰×۳۰ میلی متر مربع به صورت یک طرفه مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۲: نمونه تیر با نقص یک طرفه مقاوم سازی شده با دو طول CFRP

شکل ۱: مشخصات هندسی نقص تیر



ب-نمای روبرو از نقص

الف-نمای جانبی نقص

شکل ۳: نقص ایجاد شده در بال کششی

۱-۱. مشخصات تیر فولادی انتخابی

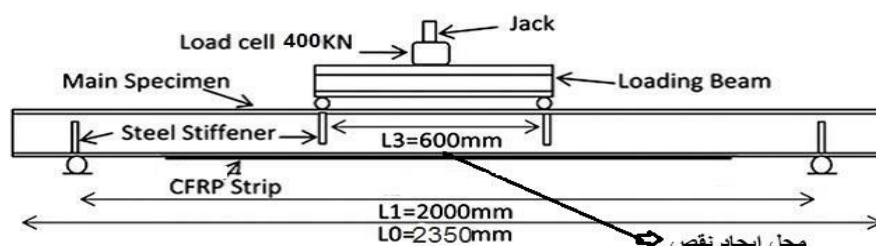
تیر فولادی IPE160 با طول ۲۳۵۰ میلی‌متر و با مقاومت نهایی ۳۷۰ مگاپاسکال و کرنش نهایی ۱۳/۵٪ و به صورت غیرخطی در نرم‌افزار مدل شده است. شکل هندسی تیر در شکل ۴ ارائه شده است. در جدول ۱ مشخصات تیر فولادی، ارائه گردیده است.

جدول ۱: ابعاد و خصوصیات تیر فولادی

ابعاد تیر IPE160 (mm)				ضریب ارتجاعی (MPa)	تنش‌ها (MPa)		کرنش‌ها (٪)	
عرض	ارتفاع	ضخامت بال	ضخامت جان	۲۰۰۰۰	تنش جاری شدن (Fy)	تنش نهایی (Fu)	کرنش جاری شدن (εy)	کرنش نهایی (εu)
۸۲	۱۶۰	۷/۴	۵		۲۵۰	۳۷۰	۱۲	۱۳/۵

۱-۲. مشخصات کامپوزیت الیاف تقویت شده با کربن

جهت تقویت تیر فولادی تحت خمش خالص، از کامپوزیت های کربنی CFRP با ضریب ارتجاعی ۲۱۰۰۰۰ مگاپاسکال و ضخامت نوار ۱/۴ میلی‌متر و نسبت پواسون ۰/۱۲ به صورت همگن استفاده شده است. منحنی تنش-کرنش این مواد، رفتار ارتجاعی خطی تا مرحله گسیختگی را بدون هیچ نقطه جاری شدن مشخص نشان می‌دهد و در مدل‌سازی، رفتاری غیرخطی از خود نشان نداد؛ به همین دلیل تنها کافی است خصوصیات مکانیکی کشسان این مواد در نرم‌افزار داده شود. خصوصیات کامپوزیت های کربنی در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۴: مشخصات هندسی و تکیه گاهی تیر دارای نقص مورد استفاده در این پژوهش

۱-۳. خصوصیات چسب

چسب مسیر انتقال برش بین سطح فولاد و مواد کامپوزیت را تأمین و عملکرد همسان کامپوزیت و تیر را سبب می‌شود. نوارهای الیاف تقویت شده با کربن با استفاده از اپوکسی مخصوص به ضخامت یک میلی‌متر و ضریب ارتجاعی ۱۱۵۲۰ مگاپاسکال به تیر فولادی چسبانده می‌شوند. در جدول ۳ مشخصات چسب مورد استفاده داده شده است.

جدول ۲: ابعاد و خصوصیات ورق تقویتی CFRP

ابعاد (mm)			ضریب ارتجاعی (MPa)	کرنش نهایی %
عرض	ضخامت	طول		
۸۲	۱/۴	۱۷۰۰ تا ۳۰۰	۲۱۰۰۰۰	۱/۳۵

جدول ۳: خصوصیات رزین اپوکسی

ضریب پواسون	مقاومت برشی (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	ضریب ارتجاعی (MPa)	کرنش نهایی %
۰/۲	۳۱/۷	۲۲/۷	۱۱۵۲۰	۰/۹

۱-۴. نمونه های تیر

در ابتدا نقص با ابعاد (۳۰×۲۰ میلی متر) به صورت دو طرفه، با ورق الیاف تقویت شده با کربن با مدول متوسط (۲۴۰۰ گیگاپاسکال)، ضخامت (۱/۴ میلی متر) و طول های مختلف (۴۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰، ۱۰۰۰ میلی متر) برای تعیین طول مناسب مورد بررسی قرار می گیرند. در نهایت طول ۴۰۰ میلی متر به عنوان طول مناسب انتخاب می شود. سپس طول ورق الیاف تقویت شده با کربن (۴۰۰ میلی متر)، برای ابعاد بزرگتر نقص دو طرفه (۳۰×۳۰، ۳۵×۳۰، ۳۷×۳۰ و ۳۰×۳۵ میلی مترمربع) و برای تیر با نقص یک طرفه از ابعاد نقص ۳۰×۳۰ میلی متر مربع مورد استفاده و بررسی قرار می گیرند. قابل توجه است که در نمونه ها عدد اول طول و عدد دوم عرض نقص می باشد (شکل ۱).

۲. مدل سازی و تحلیل با نرم افزار

برای مدل سازی از نرم افزار ABAQUS استفاده شد که در آن تیر فولادی ورق های سخت کننده، ورق های الیاف تقویت شده با کربن و چسب به صورت سه بعدی و SOLID و با المان TET (۱۰ گرهی) مدل سازی و برای رسیدن به حالت شکست تحلیل استاتیکی غیر خطی استفاده شد. هم چنین خواص خطی و غیر خطی مواد اعمال گردیده است. به منظور رسیدن به طول مناسب از ورق الیاف تقویت شده با کربن، ابعاد نقص (۳۰×۲۰ میلی مترمربع)، با نوار الیاف تقویت شده با کربن با مدول متوسط (۲۴۰۰ گیگاپاسکال)، ضخامت (۱/۴ میلی متر) و طول های مختلف (۴۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰، ۱۰۰۰ میلی متر) مدل شدند. شکل ۷ نشان می دهد که نقص ایجاد شده در تیر بدون نقص باعث کاهش ظرفیت باربری به اندازه ۳۰٪ می شود. به جهت ترمیم و رسیدن به ظرفیت باربری تیر سالم که همان تیر کنترل است، طول های ۴۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰، ۱۰۰۰ میلی متر، از نوارهای الیاف تقویت شده با کربن با ضخامت ۱/۴ استفاده شدند که به ترتیب افزایش ۳۷٪، ۳۴٪، ۳۲٪، ۳۰٪ و ۲۸٪ به دست آمد. می توان دریافت که طول ۴۰۰ میلی متر، بعنوان بهترین انتخاب جهت تعمیر نقص، به طوری که عملکردی مانند تیر سالم داشته باشد می باشد و برای نمونه های تیر با نقص بزرگتر نیز پیشنهاد می شود. هم چنین در شکل ۱۰ حالت شکست نمونه تیر مقاوم سازی شده در ناحیه نقص نشان شده است. که تمرکز کرنش روی چسب، وقوع پدیده جداشدگی در انتهای ورق الیاف تقویت شده با کربن و تمرکز تنش در ناحیه نقص دیده می شود.

جدول ۴: مشخصات نمونه های تیر فولادی دارای نقص مقاوم سازی شده با ورق CFRP

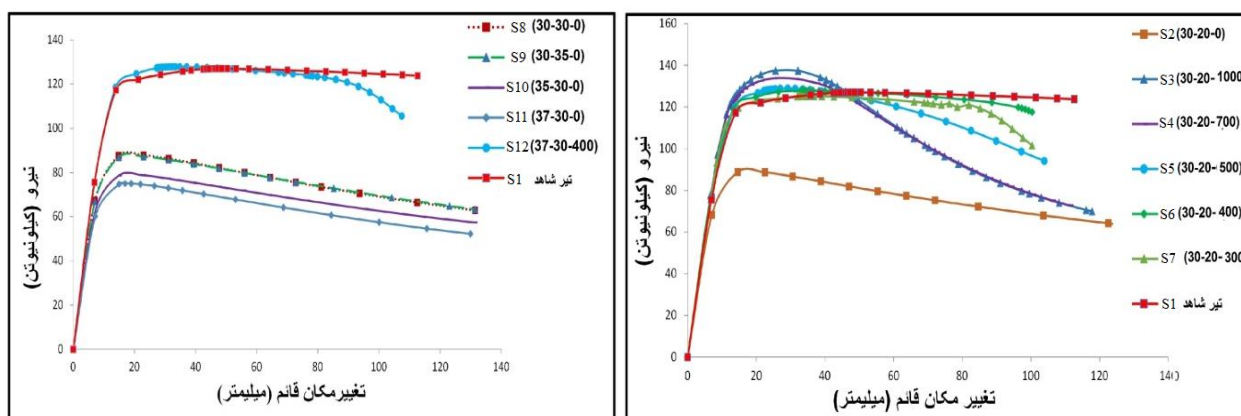
شماره نمونه	نام نمونه	طول CFRP (mm)	ابعاد نقص (mm ²)	ظرفیت باربری	
				مقدار بار (kN)	افزایش/کاهش (%)
۱	S ₁	ندارد	ندارد	۱۲۷	ندارد
۲	S ₂	ندارد	۳۰×۲۰	۸۹	-۳۰
۳	S ₃	۱۰۰۰		۱۳۷	+۷
۴	S ₄	۷۰۰		۱۳۳	+۴
۵	S ₅	۵۰۰		۱۲۹	+۲

۶	S_6	۴۰۰		۱۲۷	ندارد
۷	S_7	۳۰۰		۱۲۵	-۲
۸	S_8	ندارد	۳۰×۳۰	۸۷	-۳۲
۹	S_9	ندارد	۳۰×۳۵	۸۷	-۳۲
۱۰	S_{10}	ندارد	۳۵×۳۰	۷۸	-۳۹
		ندارد	۳۷×۳۰	۷۵	-۴۰
		۴۰۰		۱۲۷	ندارد
		ندارد	نقص یک طرفه ۳۰×۳۰	۱۰۹	-۱۵
		۴۰۰		۱۲۷	ندارد
		۵۰۰		۱۲۹	+۲
		۶۰۰		۱۳۱	+۳
		$۴۰۰ + ۴۰۰^*$		۱۲۷	ندارد

* در نمونه های تیر دارای نقص یک طرفه، عدد اول بیانگر طول ورق پوششی CFRP در زیر بال کششی و عدد دوم نیز بیانگر طول ورق پوششی در جان، در سمت ناحیه نقص می باشد (شکل ۲)

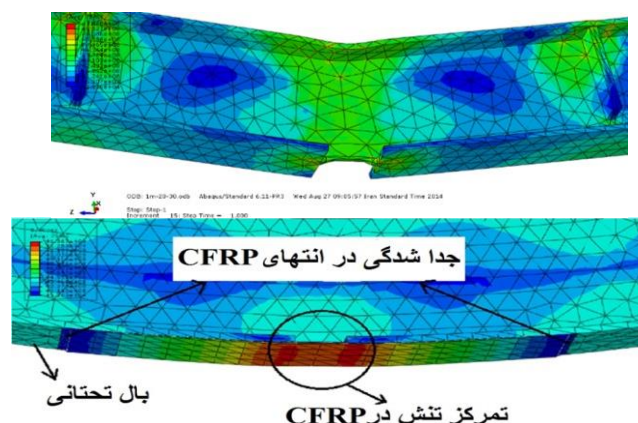
۱-۲. اثرات ابعاد نقص

اثرات ابعاد نقص بر روی ظرفیت باربری نمونه های S_8 ، S_9 ، S_{10} ، S_{11} و S_{12} که دارای ابعاد نقص، ۳۰×۳۰ میلی متر مربع، ۳۵×۳۰ میلی متر مربع، ۳۰×۳۵ میلی متر مربع و ۳۷×۳۰ میلی متر مربع (عدد اول ارتفاع نقص و عدد دوم عرض نقص می باشد) هستند بررسی شد. گسترش نقص در تیر مقاوم سازی نشده سریع اتفاق افتاد، اگرچه که گسترش نقص تحت تاثیر مقدار نیرو است ولی در شکل ۸ با ابعاد نقص ۳۰×۳۰ میلی متر مربع، کاهش ظرفیت باربری به اندازه ۳۲٪ که مقداری برابر با کاهش در ابعاد نقص ۳۰×۳۵ میلی متر مربع، مشاهده شد. این نشان می دهد افزایش عرض نقص به اندازه ۵ میلی متر، تاثیری در ظرفیت باربری نهایی تیر ندارد. در حالی که با افزایش ارتفاع نقص به اندازه ۵ میلی متر، در نمونه S_{16} ، با ابعاد نقص ۳۵×۳۰ میلی متر مربع، کاهش ۳۹٪ ظرفیت نهایی بار که ۷٪ بیش تر از ابعاد نقص S_{14} ، با ابعاد ۳۰×۳۵ میلی متر مربع است مشاهده شد. برای تحقیق بیشتر مقدار ارتفاع نقص را از ۳۵ میلی متر به ۳۷ میلی متر افزایش داده شد که با این مقدار کاهش ۴۰٪ بدست آمد. هم چنین این مقدار افزایش ارتفاع باعث پارگی بال تیر شده که این امر در کاهش بار نهایی و عملکرد تاثیر به سزایی دارد (شکل ۹). آنچه که مشخص است این که با افزایش ارتفاع نقص و نزدیک شدن به جان تیر تاثیر قابل توجهی در کاهش ظرفیت باربری قابل مشاهده است. برای مقاوم سازی نمونه تیر S_{19} ، که حالت بحرانی دارد از نوار CFRP با ضخامت $۱/۴$ میلی متر و طول ۴۰۰ میلی متر بطور مناسب استفاده شد. با مقاوم سازی، سطح تنش در گسترش نقص و کرنش خمیری در تیر تعمیر شده با ورق CFRP بهبود یافت و مقدار کبمود در ظرفیت بار نهایی جبران شد.



شکل ۷: تغییر مکان قائم در وسط دهانه برای تیر دارای نقص (۳۰×۲۰ میلی متر مربع) شکل ۸: مطالعه تاثیر ابعاد نقص بر نمودار نیرو-

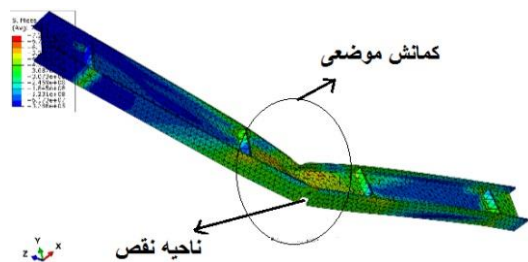
تغییر مکان تیر



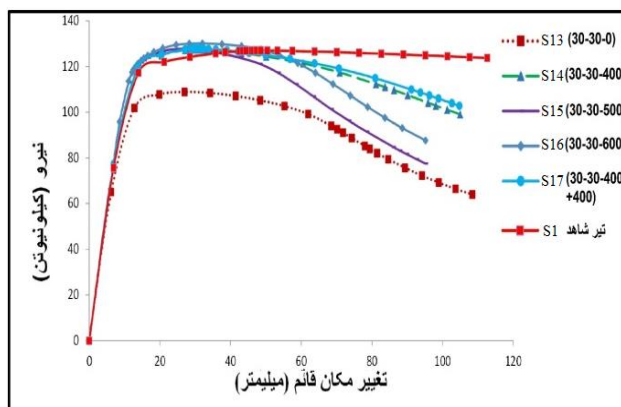
شکل: پارگی در بال کششی نمونه تیر S11 با افزایش ارتفاع نقص شکل ۱۰: تمرکز کرنش روی چسب، وقوع پدیده جداشدگی در انتهای ورق CFRP و تمرکز تنش در ناحیه نقص

۳-۱. اثرات ناحیه نقص (نقص یک طرفه)

برای مطالعه نقص یک طرفه در بال کششی نمونه تیرهای S13، S14، S15، S16 و S17 با ابعاد نقص ۳۰×۳۰ میلی متر مربع، مورد مطالعه قرار گرفتند. در نمونه S26، نقص یکطرفه باعث کاهش ظرفیت باربری به اندازه ۱۵٪ شد که در مقایسه با تیر دارای نقص دوطرفه با همین ابعاد، به مقدار نصف می باشد (شکل ۱۱). هم چنین تیر دارای نقص یک طرفه دارای کماتش موضعی می باشد (شکل ۱۲). مقاوم سازی با ورق CFRP به طول های ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۴۰۰+۴۰۰ میلی متر انجام شد. استفاده از طول کوتاه تر باعث یک جداشدگی ناقص و استفاده از طول بلندتر شکل پذیری بیش تر را نتیجه می دهد. اگرچه طول های ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ میلی متر باعث جبران ظرفیت باربری می شوند (شکل ۱۳)، اما به دلیل کماتش حاصل از نقص یک طرفه نمونه S32 با دو نوار CFRP که در زیر بال کششی ۴۰۰ میلی متر و در جان تیر در سمت ناحیه نقص از طول ۴۰۰ میلی متر استفاده شد (شکل ۲) که طول ۴۰۰+۴۰۰ میلی متر برای مقاوم سازی بهبود ظرفیت باربری و جلوگیری از کماتش بطور مناسبی عمل می کند (شکل ۱۴).



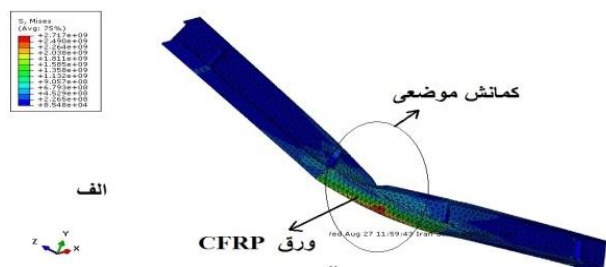
شکل ۱۲: کمانش موضعی تیر دارای نقص یک طرفه و بدون مقاوم سازی



شکل ۱۱: تغییر مکان قائم برای نقص یک طرفه با ابعاد ۳۰×۳۰ میلی متر مربع



شکل ۱۴: تیر با نقص یک طرفه با دوطول ۴۰۰+۴۰۰ میلی متر CFRP



شکل ۱۳: تیر با نقص یک طرفه با طول ۶۰۰ میلی متر

نتایج و پیشنهادات

در این مقاله به منظور مقاوم سازی و بالا بردن ظرفیت باربری تیر فولادی که دارای نقص در میانه ناحیه کششی بال است از طول های متفاوت ورق های CFRP با ضریب ارتجاعی متوسط استفاده شد. نتایج نمودارهای نیرو - تغییر مکان به دست آمده از روش اجزای محدود بر روی نمونه های مطالعه شده نشان داد که استفاده از این ورق ها تاثیر به سزایی در بهبود عملکرد تیر دارای نقص دارد، به گونه ای که در نمونه های بهسازی شده مقاومت خمشی و ظرفیت باربری تیر به طور کامل بازیابی شده است. هم چنین استفاده از ورق های CFRP تاثیر زیادی در کاهش تنش های ناحیه نقص تیر دارد و از گسترش نقص جلوگیری می کند. جدا شدگی موضعی در ورق های CFRP حاصل از نقص، باعث افزایش ناگهانی تنش چسب و متعاقبا لغزش ورق الیاف تقویت شده با کربن می شود. با افزایش مقدار بار، کرنش ورق الیاف تقویت شده با کربن در ناحیه نقص و کرنش جدا شدگی قابل ملاحظه است. از آنجایی که اکثر پل ها و سازه ها فلزی هستند و با گذشت زمان دچار فرسودگی و نقص می شوند و هزینه های ایجاد سازه جدید و تعویض عضو به میزان زیاد و زمان بر است، لذا استفاده از این مصالح به طور قابل توجهی باعث کاهش زمان و هزینه های مصرفی می گردد و لذا از این دیدگاه به عنوان بهترین مصالح برای تعمیر تیر دارای نقص پیشنهاد می شود.

منابع و مراجع

- [1] Lorenzo, L., and Hahn, H. T, (1986), "Fatigue Failure Mechanisms in Unidirectional Composites, Composite Materials, Fatigue and Fracture," American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 210-232.
- [2] Tavakkolizadeh M, Saadatmanesh H., (2008), " Strengthening of steel-concrete composite girders using carbon fiber reinforced polymers sheets" , Journal of Structural Engineering.
- [3] Colombi P, Bassetti A, Nussbaumer A., (2003), "Analysis of cracked steel members reinforced by pre-stress composite patch, "Fatigue Fracture of Engineering Materials Structures, Vol26, pp59-66.
- [4] Kim, Y.J., & Harries, K.A., (2011), "Fatigue behavior of damaged steel beams repaired with CFRP strips," Engineering Structures Vol33, pp1491-1502.
- [5] Ghafoori, E., Motavalli, M., Botsis, J., Herwig, A., & Galli, M., (2012), "Fatigue strengthening of damaged metallic beams using prestressed unbonded and bonded CFRP plates," International Journal of Fatigue, Vol44, pp303-315.
- [۶] نادری، م، اسمعیلی زاده، س، (۱۳۹۵)، مقاومت نهایی تیر ها بتنی تقویت شده با CFRP انعطاف پذیر و سخت، در دمای بالا و یخ زدگی، نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر- مهندسی عمران و محیط زیست، دوره ۴۸، شماره ۱، صص ۳۹-۵۲.
- [۷] افتخاری، م ر، یعقوبی، م، (۱۳۹۱)، سوراخ زنی به عنوان روشی جایگزین برای آماده سازی سطح در تیرهای بتنی تقویت شده با کامپوزیت های CFRP پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان.