Archive of SID

مطالعه آزمایشگاهی مقاوم سازی برشی تیرهای فولادی با استفاده از نوارهای CFRP

محبوبه جوشنگ ریگی[۱]، کامبیز نرماشیری[۲*]

۱-کارشناس ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زاهدان، زاهدان، ایران
۲-استادیار سازه، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زاهدان، زاهدان، ایران

چکیده

سازه های فولادی یکی از رایج ترین نوع سازه ها هستند. ممکن است که برخی از سازه های فولادی به دلایل مختلف نیاز به مقاوم‌سازی داشته باشند. روشهای مختلفی برای مقاوم سازی این گونه سازه ها وجود دارد. مقاوم سازی سازه های فولادی با استفاده از پلیمرهای مسلح شده به فیبر (FRP) در سالهای اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه به بررسی مقاوم سازی برشی تیرهای فولادی با استفاده از پلیمرهای مسلح شده به فیبر کربن (CFRP) با چیدمان های مختلف آنها در یک یا دو طرف جان و با زاویه های متفاوت و تاثیر آنها بر ظرفیت تیر پرداخته می شود. ۵ عدد نمونه به صورت آزمایشگاهي مورد مطالعه قرار گرفت. روش انجام آزمایش، خمش چهار نقطه ای بود. به این صورت که یک بار متمرکز توسط جک هیدرولیکی روی یک تیر واسط قرار گرفته به روی تیر اصلی، بار اعمال نموده و بار توسط تکیه گاههای تیر واسط، به صورت دو بار متمرکز مساوی به تیر اصلی وارد می گردید. دو تکیه گاه ساده نیز در دو سر تیر اصلی وجود داشت. بارگذاری نیز از نوع استاتیکی تدریجی بود. ابعاد تیرها به گونه ای انتخاب شده بود که به صورت برشی عمل کنند. بدین معنی که گسیختگی آنها توسط تنش های برشی اتفاق بیافتد. یک نمونه تیر بدون مقاوم سازی، دو نمونه تیر دارای مقاوم سازی عمودی در ناحیه برشی به صورت یک طرفه و دو طرفه و دو نمونه تیر دارای مقاوم سازی مورب به صورت یک طرفه و دو طرفه بررسی شدند. نتایج این پژوهش نشان دهنده عملکرد مناسب ورق هاي CFRP در بالا بردن ظرفیت باربري بود. نحوه مقاوم سازی برشی به صورت مورب و در هر دو طرف جان بهترین افزایش ظرفیت را نشان داد.

کلمات کلیدی: مقاوم سازی، تیر فولادی، برشی، ظرفیت باربری، CFRP

*نویسنده مسئول: کامبیز نرماشیری
پست الکترونیکی: narmashiri@iauzah.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

تاریخ دریافت مقاله: ۰۰/۰۰/۰۰۰۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۰۰/۰۰/۰۰۰۰

۱- مقدمه

عوامل زیادی وجود دارند که باعث از دست دادن یا کاهش ظرفیت اعضای سازه ای می شوند. به عنوان مثال خراب شدن مواد توسط عوامل خورنده محیط، افزایش اندازه و تکرار بارهای وارد بر سازه، اشتباهات طراحی و ساخت، عدم نگهداری مناسب، آسیب های ناشی از خستگی و تغییر کاربری یا آیین نامه ها. هزینه مقاوم سازی اغلب به مراتب کمتر از هزینه جایگزینی کل سازه است. علاوه بر این، مقاوم سازی معمولا زمان ساخت کمتر همراه با کاهش قطع خدمات را دارا می باشد.

روش‌های مختلفی برای مقاوم‌سازی سازه‌های فولادی وجود دارد. از جمله این روشها بکار بردن قطعه‌های فولادی اضافه، قطعه‌های پیش تنیده خارجی و کم کردن یا پل زدن فاصله‌ی بین تکیه‌گاه‌ها هستند. این روش‌ها نیازمند هزینه و وقت قابل توجهی است. اخیراً استفاده از پلیمرهای مسلح شده به فیبر (FRP) برای مقاوم‌سازی سازه‌های فولادی به طور چشمگیری افزایش یافته می باشند. در مقایسه با آن‌ها؛ FRP دارای مقاومت بالا، وزن کم، مقاومت در برابر خوردگی و مناسب برای ارتقای سطح بهره‌برداری سازه‌های فولادی می‌باشد. طی سال‌های گذشته از پلیمرهای مسلح شده به فیبر کربن (CFRP) ، برای افزایش بهره‌وری در سازه‌های بتنی استفاده می‌گردید، اما اخیراً در سازه‌های فولادی نیز با توجه به شناخت خصوصیات مکانیکی بالای این مصالح بخصوص در مقاومت‌های بالا، نصب آسان و هزینه‌های ویژه نسبت به عملیات جوشکاری، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

عمده تحقیقات بر روی مقاوم سازی سازه های فولادی با استفاده از CFRP در دو دهه اخیر انجام شده است که باعث شناخت قابلیت هاي این محصول در مقاوم سازی سازه های فولادی گردیده است.

برای بررسی مقاوم سازی خمشی تیرهای فولادی و پل‌ها، با استفاده از مصالح FRP تحقیقات متعددی انجام گردیده است. یکی از این تحقیقات نشان داد که رفتار چسبندگی FRP در سازه‌های فولادی کاملاً متفاوت از سازه‌های بتنی در هنگام گسیختگی می‌باشد. نتایج آزمایش همچنین نشان داد، که در مقاوم سازی پل‌ها و سازه‌های فولادی با این نوع مصالح، تنش‌های چسبندگی خیلی زیادی اتفاق می‌افتد [1]. تحقیقاتی برای بررسی عملکرد تیرهاي فولادي تقويت شده با ورق CFRP نشان داد که استفاده از لايه هاي CFRP و چسب هاي مختلف اپوكسي مي تواند افزايش ۲۰ درصدي ظرفيت خمشي تيرها را به وجود آورد [2-4]. همچنین تحقیقاتی به روی پل های آمریکا نشان داد که می توان از CFRP برای مقاوم سازی پل های فولادی با چسباندن ورق CFRP روي بال كششي آنها استفاده نمود [5]. در تحقیقی دیگر، استفاده از ورق های CFRP در تقویت خمشی تیرهای فولادی مورد مطالعه قرار گرفت. تقویت تیر مرکب توسط نصب ورقهای CFRP بر روی بال کششی تیر فولادی و نیز جان تیر انجام شد. میزان تاثیر تقویت ورق های CFRP در ضخامت های مختلف و ابعاد متفاوت و همچنین چسبندگی بین ورق و تیر فولادی به کمک معیار کرنش در ورق با استفاده از بارگذاری متمرکز مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت [6].تحقیقات تکمیلی نشان داد که يكي ازمشكلات مقاوم سازي تيرهاي فولادي با استفاده ازنوارهاي CFRP كرنش زيادي است كه در انتهاي نوار CFRP بوجود مي اید و باعث جدا شدگي نوار مي گردد (Debonding). دراين تحقيقات ابتدا يك تير فولادي مقاوم سازي شده با CFRP با استفاده ازنرم افزار ANSYS11 مدلسازي و نتايج آن با نتايج ازمايشگاهي مقايسه گرديد پس ازاطمينان ازصحت مدلسازي نمونه های مختلف كه داراي طول و ضخامت هاي مختلف CFRP بودند توسط نرم افزارANSYS مدلسازي شده وبه صورت آزمايشگاهی نيز مورد بررسی قرار گرفتند و تاثير طول و ضخامت بر روي كرنش انتهايي نوارCFRP و ساير پارامترهای مقاوم سازي تيرفولادي بررسي شد. نتايج نشان داد افزايش طول و ضخامت CFRP باعث كاهش كرنش درانتهاي نوار CFRP ميگردد همچنين افزايش ضخامت CFRP باعث افزايش ظرفيت خمشي تير مي گردد [7-8].

تحقیقات دیگری بر روی سخت کننده‌های موضعی تیرهای I شکل فولادی با استفاده از نوارهای CFRP، انجام شد. یکی از مشکلاتی که ممکن است برای مقاطع فولادی اتفاق بیافتد، تغییر شکل موضعی بزرگ تحت بارهای نقطه‌ای می‌باشد. برای مطالعه اثرات بکار بردن CFRP برای سخت کننده‌های موضعی، چهار تیر فولادی I شکل انتخاب و برای گسیختگی آزمایش گردیدند. اولین تیر، در زیر بار نقطه‌ای فاقد سخت کننده بود و به عنوان تیر کنترل استفاده شد. دومین تیر دارای سخت کننده فولادی، لیکن با استفاده از نوار CFRP مقاوم‌سازی نگردیده بود. سومین و چهارمین تیر نیز فاقد سخت کننده فولادی در زیر بار نقطه‌ای بود و

www.SID.ir

Archive of SID

صرفاً روی بال فشاری با استفاده از دو نوار CFRP طولی، مقاوم‌سازی شده‌اند. همین نمونه‌های سوم و چهارم در روی جان با استفاده از نوارهای CFRP در انواع ناپیوسته و پیوسته، مقاوم‌سازی شدند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بکار بردن CFRP روی بال و جان، ظرفیت تحمل بار را افزایش و تغییر شکل‌های موضعی و تغییر شکل کل تیر را به طور مناسبی کاهش می‌دهد. همچنین، پوشش کل جان بهترین نوع مقاوم‌سازی جان بود [9].

در رابطه با مقاوم سازی برشی تیرهای فولادی با استفاده از CFRP، مطالعاتی محدود انجام شده است. مطالعه ای به بررسی اثر مقاوم سازي برشي و خمشي در تيرهاي فولادي با كمك پوشش هاي CFRP پرداخت. برای مقاوم سازی برشی ۳ نمونه تیر فولادی را مورد آزمایش قرار دادند. ابعاد تیرهای فولادی به این صورت بود، عرض بال ۲۵۴ mm ،ضخامت بال ۱۲,۷ mm ،ارتفاع جان ۳۳۰ mm ، و ضخامت جان ۳,۲ mm و طول تیر ۳۵۵,۵ mm است و بار به صورت نقطه ای در وسط دهانه اعمال شد. نمونه کنترل بدون ورق تقویت و دو نمونه دیگر دارای ورق تقویتی CFRP که به صورت عرضی در جان تیر قرار گرفتند. با اعمال بار کمانش تیر اتفاق افتاده و جوش ها در جایی که به جان به بال متصل می شدند گسیخته شدند و این باعث به وجود آمدن خرابی پیش از موعد شد. ست که ورق های CFRP به صورت پوسته پوسته کنده شده است. در نتيجه در تيرهايي که تحت آزمايش براي مقاوم سازي خمشي با استفاده از CFRP بر روي دو بال كششي قرار گرفتند ، افزايش ۳۰ درصد در ظرفيت باربري مشاهده شد. همچنين براي بررسي اثر برش،ورق هاي CFRP در جان تير قرار گرفت. نتايج اوليه افزايش قابل توجه مقاومت برای هر دو تیرهای مقاوم سازی شده در خمش و برش را نشان داد. افزایش مشاهده شده در مقاومت برشی تیرها ۶۲٪ بود در حالیکه افزایش در مقاومت برای تیرهای آزمایش شده در خمش ۱۵٪ بود. شکست تیر فلزی مقاوم سازی شده در برش تدریجی است در مقایسه با تیر فولادی مقاوم سازی شده در خمش که دچار شکست ناگهانی و منجره شد [10].

از CFRP برای تقویت برشی تیر فولادی استفاده نمودند. در این تحقیق ۵ نمونه انتخاب شد که نمونه اول به عنوان مدل مبنا بود و نمونه دوم و سوم در دو طرفCFRP چسبانده شد و در نمونه چهارم و پنجم در یک طرف با CFRP تقویت شد . این تحقیق به صورت مدلسازی و آزمایشگاهی انجام شد و نتایج نشان داد که در این روش تا ۵۱٪ افزایش ظرفیت بار و کاهش تغییر شکل را داشتند. دو نوع مود شکت اتفاق می فتاد. اولین حالت شکست وقتی بارها به سمت نقطه بحرانی می رفت CFRP به صورت طولی از تیر جدا شدند. شکست حالت دوم به دلیل تنش های زیاد انتهای CFRP ازتیر جدا شدند. در این تحقیق فقط از نوارهای عمودی استفاده شده بود [11].

اخیرا، تحقیقی به بررسی اثر میزان استفاده از ورق های CFRP و نوع چیدمان آنها در یک یا دو طرف جان بر ظرفیت برشی نمونه های تیر ورق ها ، در سه گروه با ارتفاع های ۱۵۰ mm، ۳۰۰ و ۶۰۰ و همچنین اثر زاویه ورق ها نسبت به افق در یک گروه با ارتفاع ۳۰۰ mm پرداختند. نتایج حاصل از آنالیز عددی نشان داد که علاوه بر میزان ورق هاي تقويتي ، نوع چيدمان نيز در ميزان ظرفيت باربري قطعه فولادي موثر مي باشد. در بررسي اثر زاويه ورق هاي تقويت بر ظرفيت باربري و رفتار برشي قطعه تير ورق هاي داراي سخت كننده ، ملاحظه شد كه به ازاي ۳۶,۸٪ تقويت برشي جان در تمام مدل ها در ۵ زاويه مورد بررسي بين ۳۰ تا ۴۰ درصد افزايش ظرفيت باربري نسبت به مدل بدون تقويت باعث می شود. با استفاده از این تکنیک مقاوم سازی، ظرفیت باربری تیر ورق ها را می توان تا حد قابل توجهی افزایش داد [12].

در این تحقیق به بررسی اثر بخشی مقاوم سازی برشی تیرهای فولادی با استفاده از نوارهای CFRP به صورتهای عمودی و مورب در یک طرف یا دو طرف جان تیر پرداخته می شود. مطالعه به آزمایشگاهی با استفاده از دستگاه بارگذاری خمش چهار نقطه ای است.

۲- مصالح و روشها

یکی از مهمترین و موثرترین روشها برای بررسی ظرفیت باربری اعضای سازه ای، استفاده از آزمایش است. در این تحقیق ۵ نمونه به صورت آزمایشگاهی بررسی شده اند. نمونه های تیر فولادی IPE180 و به طول ۱۳۰۰mm بوده که دارای سخت کننده در جان در محل های زیر بار و تکیه گاهها بودند. بارها به صورت متمرکز در دو نقطه در طول تیر اعمال می شوند. یک نمونه به عنوان نمونه کنترل بدون ورق های تقویتی مدل شده است. در ۴ مدل دیگر از ورق تقویتی استفاده شده است. ورق های تقویتی در دو

www.SID.ir

Archive of SID

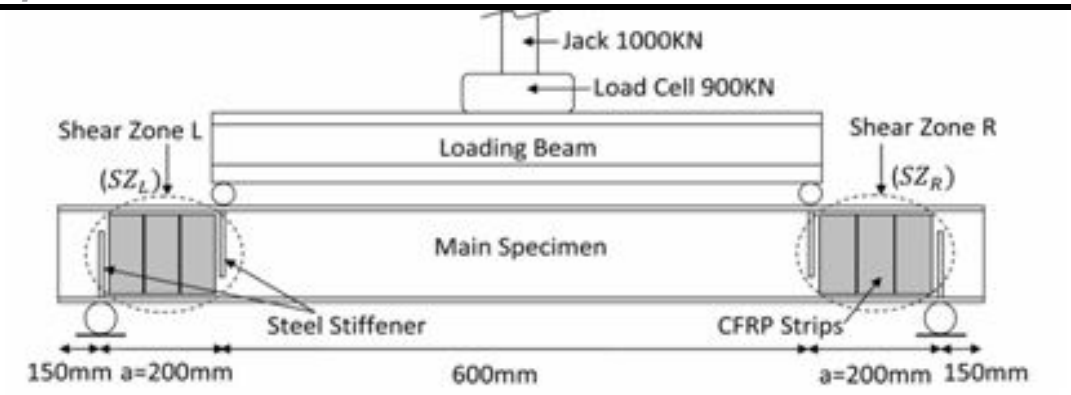
مدل به صورت عمودی و در دو مدل دیگر به صورت زاویه دار با زاویه حدود ۴۵ درجه در جان تیر در ناحیه برشی (Shear Zone) قرار گرفته اند.

۱-۲- مصالح

مشخصات مصالح تیر فولادی، نوارهای CFRP و چسب به ترتیب در جداول ۱ تا ۳ آورده شده اند. قابل ذکر است که این مشخصات توسط کارخانه سازنده آنها ارائه شده است. مشخصات هندسی، نحوه بارگذاري و شرایط تکیه گاهی تیر تقویت شده با ورق های CFRP در شکل شماره یک نشان داده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱: مشخصات هندسی تیر، نحوه بارگذاری و شرایط تکیه گاهی تیر تقویت شده با ورق های عمودی

۲-۲- روش آماده سازی نمونه ها

در این بخش، به نحوه آماده سازی نمونه ها، شامل آماده سازی تیرهای فولادی، چسب، و نصب CFRP و مراحل انجام آزمایش پرداخته می شود.

۲-۲-۱- تیر فولادی

تیر آهن IPE180 تهیه شده در آزمایشگاه به نمونه هایی با طول ۱۳۰۰ میلی متر با استفاده از هوا برش، برش داده شده و سپس سخت کننده ها با ابعاد ۱*۸*۱۴ با استفاده از جوش قوس الکتریکی با الکترود E6013 به جان تیر آهن جوش شدند. در شکل ۲ مراحل برشکاری و جوشکاری تیر های فولادی نشان داده شده است.

بعد از جوشکاری، نوبت به آماده سازی سطوح برای نصب CFRP است. به این منظور باید سطوح فولادی سند بلاست گردند. واژه سندبلاست (SANDBLAST) یک واژه انگلیسی است، به معنی سیلیس پاشی- ماسه پاشی یا پرتاب ماسه و شن با فشار بسیار زیاد هوا است. به این صورت که ماسه های ساینده که عمدتا از جنس سیلیس و اکسید فلزات هستند با استفاده از فشار باد کمپرسور شتاب گرفته و بر روی سطح قطعه پاشیده می شود. استفاده از سندبلاست برای زنگ زدایی –ماسه زدایی و رنگ برداری سطوح داخلی و خارجی قطعات و آماده کردن سطوح قطعات جهت انجام انواع آبکاریهای صنعتی، زدودن و بر طرف نمودن جرم های خارجی و زنگ زدایی سطح فلز و ایجاد سطح صاف و مناسب برای چسبندگی بهتر ورق های تقویتی انجام می شود. بر اساس دستورالعمل کارخانه سازنده ورقهای CFRP و چسب، سطوح فولادی باید برای چسباندن ورقها از قبل سندبلاست گردند. درجه سندبلاست بر اساس استاندارد سوئد ۲,۵ می باشد. در ضمن این سطوح باید عاری از هرگونه مواد اضافی خارجی و کاملا تمیز باشند.

۲-۲-۲- ورقهای CFRP

از ورق‌های CFRP معمولا جهت تعمیر و تقویت سازه‌ها استفاده می‌شود. ورق ها در ضخامت و عرض های مختلف یافت می شوند. برای استفاده از آنها، باید به اندازه مناسب برش داده شوند. برای برش از دستگاه فرز استفاده شد. در ۴ نمونه که دارای ورق تقویتی CFRP هستند CFRP ها به دو صورت برش داده شده اند که در مدل اول و دوم ورق ها به صورت عمودی و در مدل های سه و چهار به صورت زاویه دار با زاویه ° ۴۵ برش داده شده اند. علت زاویه دار نصب نمودن ورقها، توزیع تنش های برشی حداکثر دارای زاویه حدودا ۴۵ درجه می باشد. در شکل ۳ دو نمونه که ورق های آنها به صورت عمودی و زاویه دار در ناحیه برشی نصب گردیده اند نشان داده شده است. بعد از برش ورق ها، سطوح آنها توسط استون صنعتی تمیز می گردند.

۲-۲-۳-چسب

برای چسباندن ورق های تقویتی به جان تیر فولادی از چسب مخصوص (Sikadur® -30) استفاده می شود. چسب های انتخاب شده از نوع دو جزیی هستند. برای چسباندن این چسب ها، ابتدا باید هر کدام از آنها جداگانه توسط مته مخصوص هم زده شوند.

www.SID.ir

Archive of SID

سپس، دو جز با همدیگر طبق درصد وزنی ارائه شده کارخانه سازنده، مخلوط و هم زده می شوند تا مخلوط یکنواخت و یک رنگی به وجود آید.

چسب با ضخامت دلخواه (۱ میلی متر) و به صورت یکنواخت بر روی نوار CFRP قرار می گیرد. بعد از قرارگیری چسب بر روی نوارهای CFRP، سپس سطح تیر در ناحیه جان را با استن تمیز و سپس با کاردک یک لایه نازک چسب کشیده شده و نوار CFRP که یک طرف آن آغشته به چسب شده در محل نصب قرار می گیرد و با غلطک روی آن فشار یکنواخت وارد می شود.

۴-۲-۲- آماده سازی نمونه ها برای انجام آزمایش

نمونه ها در آزمایشگاه سازه دانشگاه آزاد اسلامی واحد زاهدان مورد آزمایش قرار گرفت. در این آزمایشگاه انواع تست کشش میلگرد ،تست بتن، و تست برش و خمش فولاد انجام می شود.

برای اندازه گیری نیروی اعمالی، از جک هیدرولیک به نمونه ها از یک لودسل با ظرفیت ۴۵۰ کیلو نیوتن استفاده شده است. نیرو و سرعت بار اعمالی از جک هیدرولیک به تیرهای فولادی توسط دستگاه کنترل کننده جک تنظیم می گردد. برای اینکه بار اعمالی از جک هیدرولیک به صورت ۲ نقطه ای به تیر وارد گردد، از یک تیر رابط که دارای ۲ تکیه گاه است، استفاده می گردد (شکل ۴). این تیر باید به اندازه ای قوی باشد که در آن مشکلاتی نظیر کمانش موضعی اتفاق نیافتد. به این منظور از نیمرخ ریل راه آهن استفاده شد.

الف ب

شکل ۲: مراحل ساخت تیرهای فولادی (الف) برشکاری و (ب) جوشکاری

الف ب

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۳: مقاوم سازی ناحیه برشی با ورقهای (الف) به صورت عمودی و (ب) به صورت مورب

شکل ۴: آماده سازی انجام آزمایش شامل جک هیدرولیکی، تیر بارگذاری، نمونه تیر آزمایشگاهی و تکیه گاههای غلطکی

برای اندازه گیری تغییر مکانهای افقی و عمودی، از دو عدد LVDT (Linear Variable Differential Transformer) در میانه تیر استفاده شده است LVDT یک نوع مبدل (transducer) الکترو-مکانیکی است که میتواند حرکت یا جابجایی خطی را به سیگنال الکتریکی تبدیل کند و جابجایی های بسیار کوچک از چند میلیونیم اینچ تا چند اینچ اندازه گیری نمایند.

لود سل، کلیه LVDT ها و تمامی کرنش سنج ها به ۲ دستگاه دیتالاگر (Data Logger) متصل شدند. دیتالاگر یا ثبت کننده داده یا داده نگار ، دستگاهی الکترونیکی است که به حسگر یا حسگرهایی مجهز است یا می تواند به حسگر ها متصل شود و داده هایی که از حسگر ها (Sensor) خوانده می شود را به صورت دیجیتال در می آورد. این داده ها می تواند در حافظه خود دستگاه ذخیره شود یا آنها را به صورت آنلاین به یک رایانه یا ایستگاه مانیتورینگ مخابره کند. دیتالاگر اطلاعات خام را مخابره می کند و در رایانه عملیات تبدیل صورت می پذیرد .

زمانی که در آزمایشگاه نمونه ای ساخته و مورد بررسی قرار می گیرد، دسته ای از نتایج در اختیار قرار گرفته می شود. گرچه بعضی از آن نتایج ممکن است همراه با خطا باشند، لیکن کلیت این نتایج به عنوان مبنایی برای استنتاج های بعدی مورد توجه و استفاده قرار می گیرد.

درمقابل، در یک تحلیل کامپیوتری اولین سوال اساسی در برخورد با هر نتیجه ای آن است که چگونه و تا چه حد به صحت این نتایج می توان اطمینان داشت. در هر تحقیق برای آنکه بتوانیم نتایج تحلیل های کامپیوتری را مبنایی برای نتیجه گیری ها و مقایسه های بعدی قرار داد، لازم است ابتدای توانمندی برای مدل سازی به اثبات برسد.

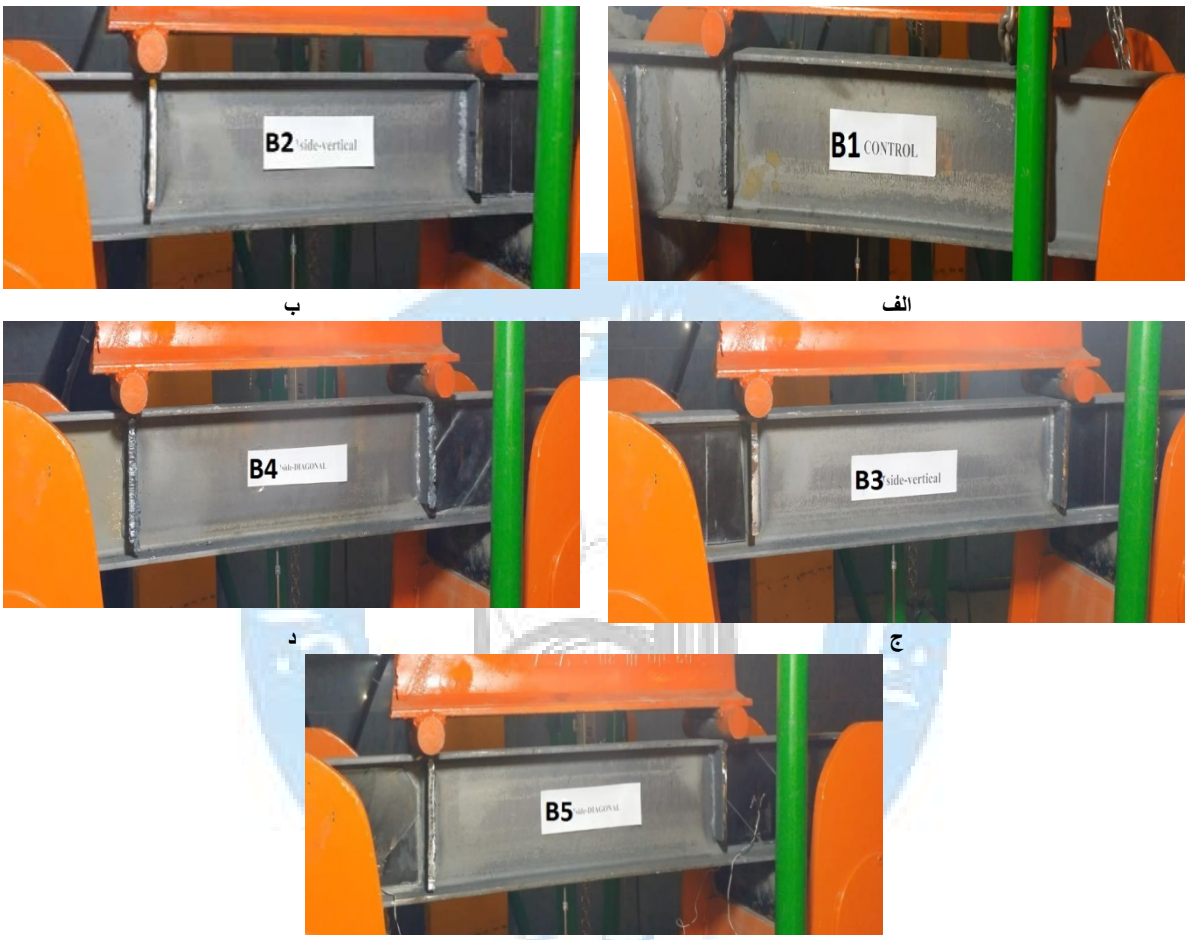
۳- تحلیل نتایج و بحث

در این پژوهش، ۵ نمونه تیر فولادی با بارگذاری خمش چهار نقطه ای مورد آزمایش قرار گرفتند. بدین منظور، نمونه تیر B1 ، تیر ساده و بدون مقاوم سازی و به عنوان نمونه کنترل انتخاب شد (شکل ۵-الف). نمونه تیر B2، تیر مقاوم سازی شده با استفاده از نوارهای CFRP عمودی فقط در یک سمت جان می باشد (شکل ۵-ب). نمونه تیر B3، تیر مقاوم سازی شده با استفاده از نوارهای CFRP عمودی در هر دو سمت جان می باشد (شکل ۵-ج). در نمونه های B4 و B5 تیرها با استفاده از نوارهای CFRP

www.SID.ir

Archive of SID

به صورت مورب مقاوم سازی شده اند، که به ترتیب دارای مقاوم سازی در یک طرف و در هر دو طرف جان می باشند (شکل های ۵-ج و ۵-د). در همه نمونه ها، از یک نوع چسب و نوار CFRP برای مقاوم سازی ناحیه برشی استفاده شده است. ناحیه ی برشی تیر، بین سخت کننده محل تکیه گاه و سخت کننده محل بار گذاری را شامل می شود. مشخصات نمونه ها در شکل ۵ و جدول ۴ ارائه شده است. همچنین نمودار نیرو تغییر مکان نمونه ها در شکل شماره ۶ نشان داده شده است. نتایج نمونه ها، در قالب حداکثر ظرفیت باربری، نمودار نیرو- تغییر مکان و مودهای گسیختگی بررسی می شود.



الف ب ج د ه

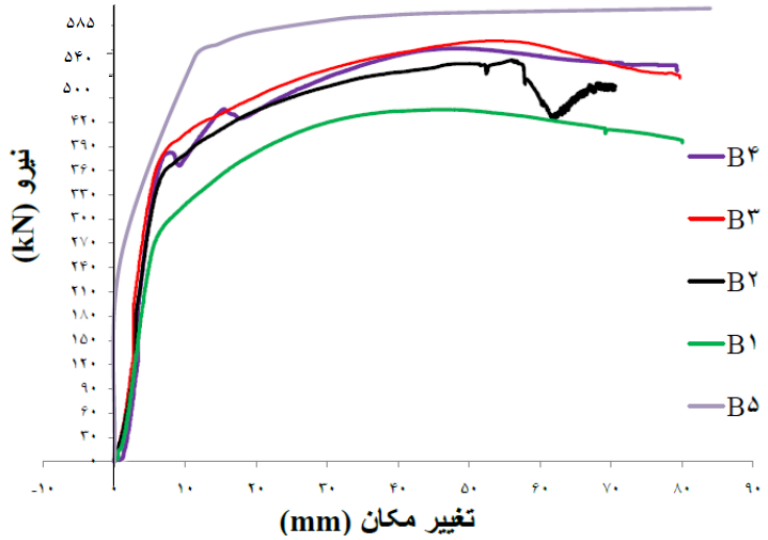
شکل ۵- نمونه های تیرهای آزمایشگاهی (الف) کنترل، (ب) مقاوم سازی با ورقهای عمودی در یک سمت جان، (ج) مقاوم سازی با ورقهای عمودی در دو سمت جان، (د) مقاوم سازی با ورقهای مورب در یک سمت جان، (ه) مقاوم سازی با ورقهای مورب در دو سمت جان

جدول مشخصات و نتایج حاصل از آزمایش نمونه ها

نام نمونه	ورق CFRP			ظرفیت باربری (kN)	درصد افزایش ظرفیت باربری
	جهت قرار گرفتن CFRP	ناحیه برشی چپ تیر (SZL)	ناحیه برشی راست تیر(SZR)		
B1	-	-	-	۴۳۵	-
B2	قائم	یک سمت جان	یک سمت جان	۴۹۰	۱۳٪
B3	قائم	دو سمت جان	دو سمت جان	۵۴۰	۲۴٪
B4	مورب	یک سمت جان	یک سمت جان	۵۰۰	۱۵٪
B5	مورب	دو سمت جان	دو سمت جان	۵۸۵	۳۵٪

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۶: نمودار نیرو– تغییر مکان محوری نمونه ها

۳-۱- نمونه شاهد

با توجه به جدول ۴ و شکل ۶، نمونه تیر کنترل B1 بدون مقاوم سازی دارای ظرفیت باربری برابر ۴۳۵ کیلو نیوتن می باشد که کمترین ظرفیت باربری در بین نمونه ها می باشد. در خصوص مودهای گسیختگی، در شکل ۷ مشاهده می گردد که اعمال بارگذاری باعث ایجاد کمانش قطري در ناحیه برشی تیر(حد فاصل بین سخت کننده در محل تکیه گاه و سخت کننده محل بارگذاری) شده است. این کمانش قطري تاثیر زیادی در افزایش مقاومت پس کمانشی دارد.

۳-۲- مقاوم سازی برشی با نوار های CFRP عمودی در یک و دو سمت جان

گسیختگی های تیر کنترل نشان داد که در ناحیه برشی، تنش و کرنش (تغییر شکل) قابل توجهی در جان به وجود می آید. به همین علت نوارهای CFRP که از نوع یکطرفه بودند، به صورت موازی جان (عمودی) در یک یا دو سمت جان نصب شدند. لازم به ذکر است که با توجه به نوع تنش های به وجود آمده جهت فیبر های نوارهای CFRP موازی جان در نظر گرفته شد.

برای افزایش سختی برشی در نمونه تیر های B2 و B3 در جهت قائم و به ترتیب به صورت یک طرفه و دو طرفه از نوار های CFRP استفاده شد. نمونه تیر B2 تحت بار گذاری ، ظرفیت باربری ۴۹۰ کیلو نیوتن را نشان داد که نسبت به نمونه بدون مقاوم سازی B1 افزایش ۵۵ کیلو نیوتن را داشت.

مودهای گسیختگی در این نمونه، ابتدا افزایش تنش و کرنش در ناحیه برشی حاصل از بارگذاری و متعاقب آن بوجود آمدن پدیده های شکاف خوردن نوار CFRP (Splitting) در جهت عمودی و همچنین جدا شدگی CFRP (Debonding) از روی سطح نصب شده می شود (شکل ۸). پس از جدا شدگی نوارهای CFRP کمانش های قطری در جان شبیه به نمونه کنترل اتفاق می افتد (شکل ۹).

نمونه تیر B3 ، ظرفیت باربری برابر ۵۲۰ کیلونیوتن داشت که نسبت به نمونه بدون مقاوم سازی تیر کنترل، باعث افزایش ظرفیت باربری به میزان حدود ۲۰٪ شد. تیر B2 بعد از بارگذاری در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در تیر B3، استفاده از نوار های CFRP در جهت قائم به صورت دو طرفه (دو سمت جان)، باعث افزایش سخت برشی جان به صورت مناسبی شده است. این افزایش سختی باعث افزایش ظرفیت باربری تیر شد.

در این تیر، نیز همانند تیر B2 ابتدا افزایش تنش و کرنش در ناحیه برشی حاصل از بارگذاری و متعاقب آن بوجود آمدن پدیده های شکاف خوردن نوار CFRP (Splitting) در جهت عمودی و همچنین جدا شدگی CFRP (Debonding) از

www.SID.ir

Archive of SID

روی سطح نصب شده مشاهده شد (شکل ۱۱). بعد از گسیختگی های نوارهای CFRP، تیر مقاوم سازی شده نظیر یک تیر بدون مقاوم سازی گسیخته می شود. به این صورت که کمانش قطری در جان به وجود می آید که در ابتدا با افزایش مقاومت پس کمانشی، به عملکرد سازه کمک نموده و سپس از همان ناحیه گسیخته می شود. همچنین با بررسی نمودار نیرو-تغییر مکان (شکل ۶) مشاهده می شود که استفاده از نوارهای CFRP در هر دو سمت جان بیشترین افزایش ظرفیت باربری را سبب می شود.

شکل ۷: کمانش قطري نمونه شاهد در ناحیه برشی

شکل ۸: جداشدگی (Debonding) و شکاف خوردن (Splitting) در CFRP در تیر B2

شکل ۹: ایجاد کمانش قطری در ناحیه برشی پس از جدا شدن نوارهای CFRP در تیر B2

www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۱۰: نمونه تیر B3 بعد از بارگذاری

شکل ۱۱: جداشدگی (Debonding) و شکاف خوردن (Splitting) درCFRP در نمونه تیر B3

۳-۳- مقاوم سازی برشی با نوار های CFRP مورب در یک و دو سمت جان

گسیختگی های تیر کنترل (شکل ۷) نشان داد که در ناحیه برشی، کمانش قطری در جان به وجود می آید. به همین علت، این ایده برای نویسندگان این تحقیق متبادر شد که وجود نوارهای CFRP به صورت مایل و درست عمود بر جهت کمانش قطری می تواند به صورت مناسبی باعث افزایش مقاومت گردد.

برای مقاوم سازی با استفاده از نوارهای CFRP در جهت مورب، دو تیر B4 وB5 به ترتیب با مقاوم سازی یک سمت و دو سمت جان، مورد بررسی قرار گرفتند. نمونه تیر B4، ظرفیت باربری 480 کیلو نیوتن را از خود نشان داد و نمونه تیر B5 نیز که در هر دو سمت جان مقاوم سازی شده بود به دلیل سختی بیشتر جان، در مقایسه با نمونه B4، ظرفیت باربری بیشتر و برابر با 510 کیلو نیوتن را نشان داد.

در نمونه های B4 و B5 به دلیل افزایش تنش بین لایه های چسب و جان تیر و چسب و ورق CFRP، ورق بزرگتر CFRP که در مرکز ارتفاع جان به صورت مورب نصب شده بود دچار جدا شدگی (Debonding) شده و ورق های کوچکتر مثلثی و ذوزنقه ای شکل دچار ترک خوردگی (Splitting) شدند (شکل های ۱۲ و ۱۳).

با بررسی نمودار نیرو-تغییر مکان (شکل ۶) مشاهده می شود که استفاده از نوارهای CFRP مورب در هر دو سمت جان بیشترین افزایش ظرفیت باربری را سبب می شود. بطور کلی مقاوم سازی برشی بوسیله الیاف CFRP باعث کاهش تنش ها و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری و سختی جان می شود. در بین مدل های بررسی شده به صورت آزمایشگاهی، نمونه تیر

www.SID.ir

Archive of SID

مقاوم سازی شده به صورت مورب در دو طرف جان بهترین عملکرد را از خود نشان داده و ظرفیت باربری بیشتری را نسبت به نمونه های دیگر داشت.

شکل ۱۲: وقوع پدیده جدا شدگی ورق CFRP در نمونه تیر B4

شکل ۱۳: جداشدگی (Debonding) و شکاف خوردن (Splitting) درCFRP در نمونه تیر B5

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش ۵ نمونه تیر فولادی IPE180 به طول ۱,۳۰ متر به صورت آزمایشگاهی تحت بارگذاری استاتیکی خمش چهار نقطه ای قرار گرفتند. ابعاد نمونه ها ثابت بوده و به شکلی انتخاب شدند که نمونه ها به صورت برشی عمل کنند. نمونه B1 تیر بدون مقاوم سازی برشی (نمونه کنترل) بود. تیر B2 نمونه دارای مقاوم سازی با استفاده از نوارهای CFRP در جهت قائم و در یک سمت جان بود. نمونه B3 تیر با مقاوم سازی در جهت قائم در هر دو سمت جان بود. نمونه های B4 و B5 نمونه های با مقاوم سازی مورب و به ترتیب در یک سمت و در هر دو سمت جان بودند. نتایج این تحقیق نشان داد که مقاوم سازی برشی جان تیرهای فولادی با استفاده ار نوارهای CFRP به صورت مناسبی باعث کاهش تنش ها و تغییر شکل های جان شده و سبب افزایش سختی جان و در نهایت افزایش ظرفیت باربری تیرها می شوند. مقاوم سازی دو سمت جان باعث افزایش بیشتر ظرفیت باربری تیرهای مقاوم سازی شده گردید. همچنین استفاده از نوارهای CFRP به صورت مورب در جان عملکرد مناسب تری را نشان داد. نوارهای CFRP استفاده شده در جان ایرهای فولادی از گسیختگی هایی نظیر پدیده جدا شدگی (Debonding) و شکاف خوردگی (Splitting) رنج می برند.

تشکر و قدردانی

www.SID.ir

Archive of SID

این تحقیق توسط دانشگاه آزاد اسلامی واحد زاهدان و سازمان نظام مهندسی ساختمان استان سیستان و بلوچستان حمایت شده است. نویسندگان تشکر و قدردانی خود را بابت این حمایت اعلام می دارند.

مراجع

[1] Schnerch, D., Stanford, K., Sumner, E., Rizkalla, S. (2005). Bond behavior of CFRP strengthened steel bridges and structures. *International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005)*. International Institute for FRP in Construction.
[2] Linghoff, D., Al-Emrani, M. (2009). Performance of steel beams strengthened with CFRP laminate– Part 2: FE analyses. *Composites: Part B: Engineering*, 41(7), 516-522.
[3] Linghoff, D., Haghani, R., Al-Emrani, M. (2009). Carbon-fibre composites for strengthening steel structures. *Thin-Walled Structures*, 47(10), 1048-1058.
[4] Linghoff, D., Al-Emrani, M., Kliger, R. (2010). Performance of steel beams strengthened with CFRP laminate– Part 1: Laboratory tests. *Composites Part B: Engineering*, 41(7), 509-515.
[5] Salama, T., Abd-El-Meguid, A. (2010). *Strengthening Steel Bridge Girders Using CFRP*. UTCA Report Number 06217.
[6] Narmashiri, K., Jumaat, M.Z. (2011). Reinforced steel I-beams: A comparison between 2D and 3D simulation. *Simulation Modeling Practice and Theory*, 19, 564-585.
[7] Narmashiri, K., Ramli Sulong, N.H., Jumaat, M.Z. (2011). Flexural strengthening of steel I-beams by using CFRP strips. *International Journal of the Physical Science*, 6(7), 1620-1627.
[8] Narmashiri, K., Ramli Sulong, N.H., Jumaat, M.Z. (2012). Failure analysis and structural behavior of CFRP strengthened steel I-beams. *Construction and Building Materials*, 30, 1-9.
[9] Narmashiri, K., Jumaat, M.Z., Ramli Sulong, N.H. (2011). Local stiffening of steel I-beams by using CFRP materials. *Advanced Materials Research*, 163-167, 3833-3843.
[10] Patnaik, A., Bauer, C.L., Srivatsan, T.S. (2008). The extrinsic influence of carbon fibre reinforced plastic laminates to strengthen steel structures. *Sadhana*, 33, 261–272.
[11] Narmashiri, K., Jumaat, M.Z., Ramli Sulong, N.H. (2010). Shear strengthening of steel I-beams by using CFRP strips. *Scientific Research and Essays*, 5(6), 2155-2168.
[12] Azizi, S., Narmashiri, K., Mehmandoost Kotlar, H. (In Press). Shear strengthening of plate girders using carbon-fibre-reinforced polymer composites. *Proceeding of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, http://dx.doi.org/10.1680/jcoma.16.00078.

www.SID.ir