

مقایسه‌ی تجربی و عددی ترمیم اتصال تیر به ستون کناری بتن مسلح با استفاده از الیاف بسپاری (FRP)

اصغر وطنی اسکویی (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه شهید رجایی

در این نوشتار ترمیم اتصال تیر به ستون کناری آسیب‌دیده از بارهای رفت‌وبرگشتی (همچون زلزله) با استفاده از الیاف بسپاری مورد مطالعه‌ی آزمایشگاهی و عددی قرار گرفته است. بارهای رفت‌وبرگشتی به انتهای تیر نمونه‌ی آزمایشگاهی با مقیاس کامل اعمال شده است. بارگذاری تا رسیدن نمونه به ظرفیت خود ادامه یافته است، و سپس نمونه با استفاده از الیاف بسپاری ترمیم شده و نمونه‌ی ترمیم‌شده مجدداً تحت بارگذاری دورویی قرار گرفته است. برای مطالعات عددی، نمونه‌ی آزمایشگاهی به روش اجزاء محدود ساخته شده است. مدل عددی با توجه به مقادیر ثبت‌شده توسط ابزار اندازه‌گیری تعبیه‌شده بر روی نمونه‌ی آزمایشگاهی، اصلاح شده است. برای بررسی تأثیر آرایش الیاف بسپاری پنج مدل غیرخطی با چیدمان متفاوت الیاف تحت بارگذاری شبیه نمونه‌ی آزمایشگاهی قرار داده شده و مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج آزمایش نشان داد که مقاومت و جذب انرژی نمونه‌ی آسیب‌دیده با کاربرد الیاف بسپاری اصلاح شده است، گرچه تغییرات در سختی نمونه‌ی ترمیم‌شده قابل توجه نیست. همچنین مقایسه‌ی بین ظرفیت نمونه‌های عددی که با آرایش و چیدمان مختلف الیاف بسپاری ترمیم شده‌اند ارائه شده است.

voskouei@bhrc.ac.ir

واژگان کلیدی: زلزله، آسیب، اتصال، تیر - ستون، بهسازی، بتن مسلح، مقاوم‌سازی، ترمیم، الیاف پلیمری، FRP.

مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از الیاف بسپاری (FRP) در ساختمان‌های بتن مسلح به‌منظور بالابردن ظرفیت اجزا و کل سیستم‌های کاربردی گسترده‌ی یافته است. افزایش ظرفیت عناصر سازه‌ی به‌علاوه مختلف نظیر افزایش بارهای اعمالی، یا آسیب‌دیدگی عضو بر اثر رخداد زلزله مورد نیاز است. با تولید انبوه و ارز شدن الیاف بسپاری (FRP) در کنار بارزترین مزایای این مصالح، نسبت مقاومت بالا به وزن و اجرای ساده و سریع آن باعث کاربرد روزافزون این مصالح شده است.

استفاده از الیاف بسپاری روشی نو و جدید نیست، اما استفاده از آن در اتصال تیر به ستون موردی است که کم‌تر به آن پرداخته شده است.^[۱] تحقیقات انجام‌گرفته بیشتر معطوف اتصالات تیر به ستون بتن مسلح بوده که برحسب معیارهای آیین‌نامه‌های قدیمی، که گره اتصال با جزئیات لرزیمی مناسبی نداشتند ساخته شده است.^[۱] محققین دو نمونه از اتصال تیر به ستون کناری را که در محل اتصال آن میل‌گردهای برشی کار گذاشته نشده بود با استفاده از الیاف شیشه‌ی (GFRP) تقویت و سپس مورد آزمایش قرار دادند.^[۲] نتایج حاصله حاکی از آن بود که علاوه بر افزایش ظرفیت برشی گره اتصال، جایگاه رخداد مفصل خمیری نیز از گره اتصال به تیر تغییر محل داده است.

در مطالعه‌ی دیگر، محققین نمونه‌ی را که طبق معیارهای آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌های بتنی سال‌های ۱۹۶۰ ساخته شده بود با الیاف بسپاری تقویت و مورد آزمایش قرار دادند.^[۳] نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از الیاف باعث افزایش مقاومت برشی ۲۵ درصدی اتصال شد.

از سوی دیگر، سه نمونه‌ی آزمایشگاهی ساخته‌شده برحسب معیارهای قبل از ۱۹۷۰ که در محل اتصال آن میل‌گرد برشی وجود نداشت با الیاف بسپاری تقویت و آزمایش شدند.^[۴] نتایج حاصله حاکی از آن بود که ظرفیت تحمل بار نمونه‌ی تقویت‌شده نسبت به نمونه‌ی شاهد ۵۲٪ افزایش یافته و ظرفیت جذب انرژی نمونه ۶ برابر بیشتر شده است. همچنین، تعداد زیادی نمونه (۱۸ عدد) که مثل نمونه‌های محققین قبلی بدون میل‌گرد برشی مناسب در گره اتصال و بدون سقف بوده با آرایش مختلف الیاف کربنی مورد آزمایش قرار گرفت^[۵] و نشان داده شد که اتصال و آرایش مناسب الیاف باعث افزایش مقاومت برشی گره اتصال به‌میزان حدود ۳٪ و افزایش جذب انرژی حدود ۵٪ (در مقایسه با نمونه‌ی شاهد) شده است.

در تحقیقی دیگر، نمونه‌های ساخته‌شده بر مبنای معیارهای طراحی سال‌های ۱۹۶۰ با مقیاس ۱/۳ مورد آزمایش قرار گرفت.^[۶] ابتدا دو عدد از نمونه‌ها طوری

جدول ۱. مشخصات میل‌گرد به‌کار رفته.

قطر میل‌گرد (mm)	$F_y(N/mm^2)$	$F_u(N/mm^2)$	$\epsilon_u(\%)$
۱۸	۴۱۲٫۵	۴۹۸	۰٫۱۳
۱۸	۴۲۱	۵۰۴	۰٫۱۲۵
۱۰	۲۸۸	۴۸۰	۰٫۱۴۲
۱۰	۲۷۵	۴۴۴	۰٫۱۴

جدول ۲. مشخصات مکانیکی نمونه بتن استوانه استاندارد استفاده‌شده در اتصال.

وزن نمونه (Kg)	نیروی گسیختگی (kN)	مقاومت فشاری (N/mm ²)
۱۲٫۵۴	۴۲۵	۲۴
۱۲٫۷۷	۳۷۳	۲۱
۱۳٫۰۲	۴۴۵	۲۵
۱۲٫۸۰	۴۷۰	۲۶

جدول ۳. مشخصات مکانیکی فیبرهای کربنی استفاده‌شده.

ضخامت (mm)	وزن مخصوص (g/m ³)	ضریب کشسانی (N/mm ²)	کرنش نهایی	مقاومت کششی (N/mm ²)
۰٫۱۲	۲۲۰	۲۳۱۰۰۰	۰٫۰۱۷	۴۱۰۰

مشخصات مصالح

مشخصات فولاد به‌کار رفته

برای تعیین ویژگی‌های میل‌گرد به‌کار رفته، آزمایش کشش بر روی نمونه‌های فولاد صورت گرفت که نتایج آزمایش در جدول ۱ داده شده است.

مشخصات بتن به‌کار رفته

زمان بتن‌ریزی نمونه‌ی آزمایشگاهی، چهار استوانه با ابعاد ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متر (نمونه‌ی استاندارد) که در سه مرحله پر شده بود نیز مورد استفاده قرار گرفت. در روز آزمایش بارگذاری نمونه‌ی اتصال، نمونه‌های استوانه‌ی نیز مورد آزمایش قرار گرفتند (جدول ۲) تا مقاومت بتن استفاده‌شده نیز به دست آید.

مشخصات الیاف بسپاری مورد استفاده در ترمیم اتصال

آسیب‌دیده

الیاف کربنی مورد استفاده برای ترمیم نمونه‌ی آزمایشگاهی از جنس CFRP-Wrap و از نوع Sika Wrap-Hex230c است. مشخصات این نوع فیبر کربنی در جدول ۳ داده شده است. برای اتصال الیاف کربنی (CFRP) به بتن از رزین با مشخصات داده‌شده در جدول ۴ استفاده شده است.

انجام آزمایش

طبق معیارهای موجود^[۱] در صورتی که مقدار بار محوری اعمال‌شده بر ستون کم‌تر از $0.1 A_g f'_c$ باشد عضو را می‌توان تحت کشش فرض کرد. در آزمایش انجام‌شده بر روی اتصال تیر به ستون به غیر از وزن خود اجزاء تشکیل‌دهنده هیچ نیروی محوری به ستون اعمال نشده است. نیروی محوری از عوامل مؤثر در افزایش مقاومت برشی گره

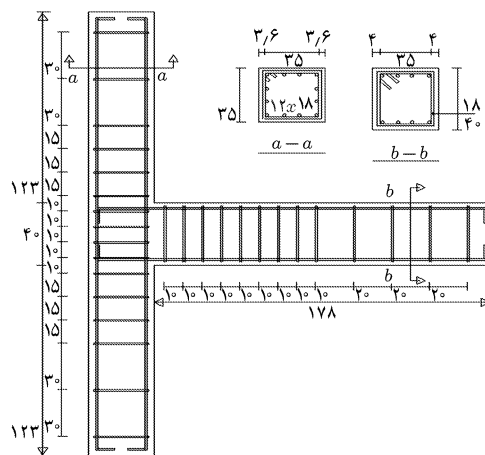
بارگذاری شدند که امکان ترمیم ترک‌خوردگی‌ها وجود داشته باشد. یکی از نمونه‌ها با الیاف شیشه (GFRP)، و دیگری با الیاف کربن ترمیم شد و مجدداً تحت بارگذاری قرار گرفت. شکل‌پذیری و مقاومت نمونه‌ها به ترتیب حدود ۴۲ و ۵۳ درصد نسبت به نمونه‌ی اصلی افزایش داشت. در مدل‌های رایجی که پیرامون اتصال بتن مسلح کناری که دارای معیارهای لرزه‌ی نیست تحقیقاتی صورت گرفته^[۱]، استفاده از الیاف بسپاری و آرایش مناسب الیاف در اطراف گره اتصال باعث افزایش ۳۷ درصدی مقاومت نسبت به نمونه مشاهده شده و بیان داشته‌اند که در صورت عدم استفاده از آرایش و اتصال صحیح الیاف جذاشدگی الیاف از سطح بتن رخ خواهد داد.

اگرچه بیشتر مطالعات محققین بر روی نمونه‌های اتصال تیر به ستونی که جزئیات لرزه‌ی مناسبی ندارند صورت گرفته، در این تحقیق نمونه‌ی که بر حسب معیارهای جدید طراحی لرزه‌ی ساختمان‌های بتن مسلح طراحی شده‌اند^[۱۰،۱۱] مورد آزمایش و تحلیل قرار گرفته است. در طراحی با معیارهای آیین‌نامه‌های جدید فرض می‌شود که سیستم دارای سختی، مقاومت و شکل‌پذیری مناسب است. ترمیم این اتصال بر این باور انتخاب شده است که در معیارهای طراحی لرزه‌ی ساختمان بتن مسلح در حد نهایی، تحت اثر زلزله‌ی با احتمال وقوع ۱۰٪ در طول عمر مفید سازه (۵۰ سال)، ایجاد ترک و دیگر آسیب‌هایی که امکان ترمیم آن وجود داشته باشد اجازه داده می‌شود.

معرفی مدل آزمایشگاهی

معرفی ابعاد

اتصال تیر به ستون دارای ستونی با مقطع ۳۵۰×۳۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۸۶۰ میلی‌متر است. سطح مقطع تیر ۳۵۰×۴۰۰ میلی‌متر و طول آن ۱۷۸۰ میلی‌متر است. علت انتخاب طول ستون بر این فرض استوار بوده که نقطه‌ی عطف طبقه، در حدود وسط ستون است. آرماتور طولی تیر و ستون به ترتیب $۸\Phi 18$ و $۱۲\Phi 18$ است. آرماتورگذاری عرضی در کل تیر و ستون به‌گونه‌ی است که ضوابط آیین‌نامه‌های موجود را برآورده می‌سازد (شکل ۱).



شکل ۱. هندسه‌ی مدل و نحوه‌ی آرماتورگذاری (ابعاد به سانتی‌متر).

جدول ۴. مشخصات رزین استفاده شده.

مقاومت کششی (N/mm ²)	مقاومت خمشی (N/mm ²)	ضریب الاستیسیته (N/mm ²)	مقاومت کششی (N/mm ²)	وزن مخصوص kg/l	ضریب انبساط گرمایی	دها در زمان اجرا (درجه‌ی سیلسیوس)
۱۵ ~ ۲۰	۳۰ ~ ۴۰	۴۳۰۰	۶۰ ~ ۷۰	۱٫۶۵	۵٫۰۰ E-۰۵	۱۰ ~ ۳۰

— طبق معیار آیین‌نامه — برسد. از همین بارگذاری در مدل‌های تحلیلی نیز استفاده شده است.

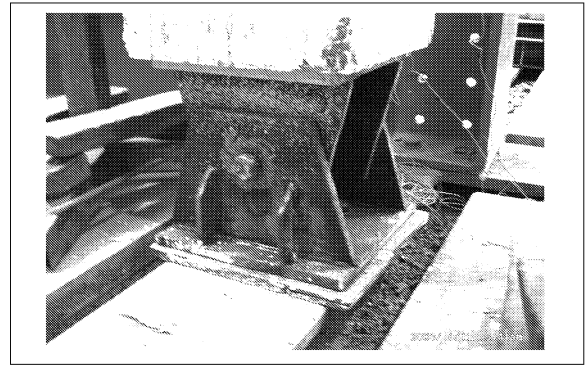
ابزر و تجهیزت اندازه‌گیری و ثبت داده‌ها

برای ثبت داده‌های آزمایشگاهی از دو نوع ابزار استفاده شد. برای نمونه‌ی اصلی از ۱۶ تغییر مکان‌سنج (LVDT) با طول مختلف و ۸ عدد کرنش‌سنج که در میل‌گردهای طولی تیر و ستون (نزدیک گره اتصال) در دو وجه نمونه نصب شده بود استفاده شد (شکل ۵). در نمونه‌ی ترمیم‌شده از ۱۹ کرنش‌سنج علاوه بر مقادیر فوق برای نصب بر روی الیاف استفاده شده است (شکل ۶). نحوه‌ی قرارگیری نمونه و جک‌های بارگذاری بر روی کف قوی در شکل ۷ داده شده است.

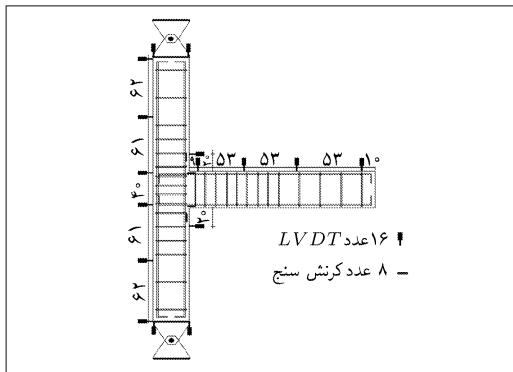
بررسی نتایج آزمایش بر روی نمونه اصلی

در نمونه اصلی اولین ترک خوردگی در دوره دوم بارگذاری در یاری معادل ۱۵/۳۰ kN به وجود آمد. اولین ترک در محل اتصال تیر به ستون رخ داد (شکل ۸). ترک ایجاد شده دارای پهنای کم و به صورت مویی بوده است. این ترک به طرف هسته‌ی اتصال ادامه

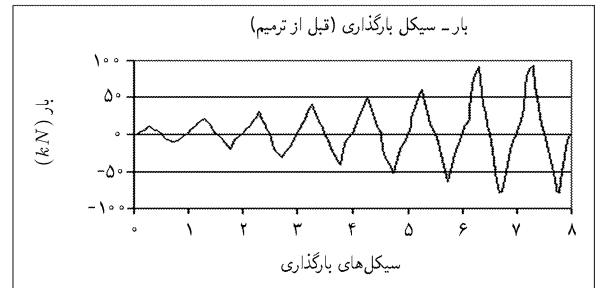
اتصال تیر به ستون در محدوده‌ی ارتجاعی است. با وقوع ترک خوردگی یا خردشدگی در بتن گره اتصال نیروی محوری ممکن است باعث کم‌اندامش میل‌گردها در ناحیه‌ی اتصال شود. با فرض این که نقاط عطف ستون، در وسط ارتفاع طبقه است در آزمایش در ابتدا و انتهای ستون از تکیه‌گاه مفصلی استفاده شده است (شکل ۲). نمونه‌ی آزمایشی تحت بارگذاری رفت‌و برگشتی به وسیله‌ی جک‌های بارگذاری که در پایین و بالا، در انتهای تیر قرار داده شده بود انجام گرفت. بار وارده به دو صورت «کنترل نیرو» و «کنترل تغییر مکان» انجام گرفت که روند بارگذاری در نمونه‌ی اصلی به صورت شکل ۳ و در نمونه‌ی ترمیم‌شده به صورت شکل ۴ ارائه شده است. بارگذاری در نمونه‌ی اصلی تا حدی انجام گرفت که نمونه به بیشینه‌ی مقاومت



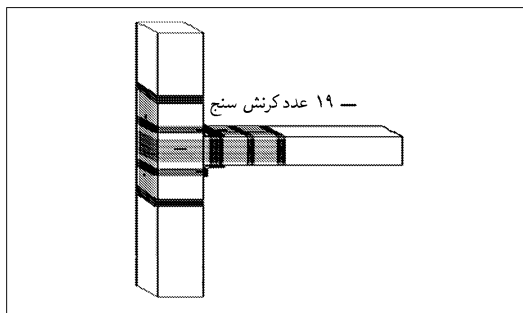
شکل ۲. مفصل دورانی ابتدا و انتهای ستون.



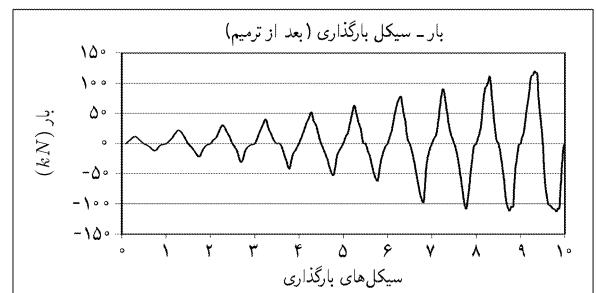
شکل ۵. ابزر و تجهیزت جهت ثبت داده‌ها در نمونه‌ی اصلی.



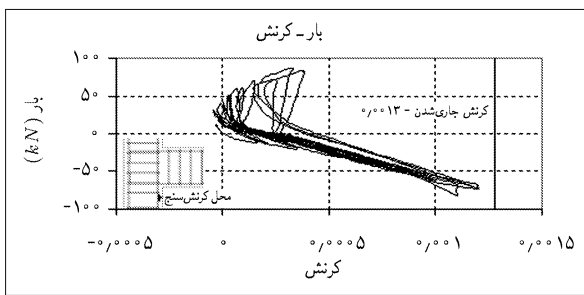
شکل ۳. منحنی بارگذاری در نمونه اصلی.



شکل ۶. کرنش‌سنج‌های نصب‌شده روی الیاف در نمونه‌ی ترمیمی.



شکل ۴. منحنی بارگذاری در نمونه‌های ترمیم‌شده.



شکل ۱۱. کرنش در میلگرد طولی ستون.

کرنش‌های ایجادشده در میلگردهای تیر بیان‌گر این واقعیت است که میلگردها جاری شده‌اند (شکل ۱۰) در صورتی که در میلگردهای طولی ستون کرنش‌ها در محدوده‌ی کشسانی باقی مانده‌اند (شکل ۱۱).

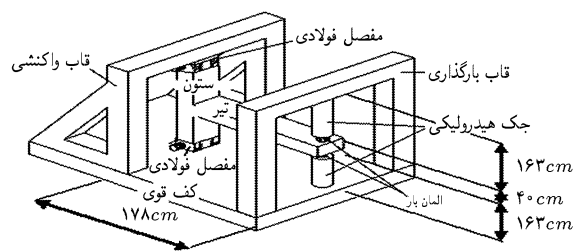
ترمیم اتصال آسیب‌دیده

بعد از این که بارگذاری بر روی نمونه به بیشترین مقدار خود رسید (زمانی که منحنی بار- تغییرمکان حالت افقی به خود گرفت) آزمایش قطع و نسبت به ترمیم نمونه‌ی آسیب‌دیده اقدام شد. در این نمونه برای ترمیم و پرکردن ترک‌های ایجادشده از تزریق اپوکسی استفاده نشد. گرچه تزریق اپوکسی علاوه بر بالابردن سختی و مقاومت اتصال باعث می‌شود که پیوستگی بین بتن و میلگرد که بر اثر ترک‌خوردگی از بین رفته مجدداً برقرار شود. با مطالعه‌ی کرنش‌های ایجادشده در نمونه مشخص می‌شود که پیوستگی بین بتن و میلگرد تا حدودی از بین رفته است. ترمیم نمونه در گام‌های زیر عملی شد:

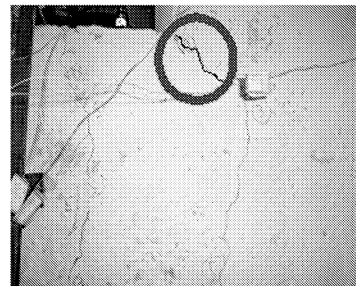
۱. گوشه‌های قسمت‌های آسیب‌دیده‌ی تیر و ستون برای جلوگیری از تمرکز تنش گرد شد (شعاع گردشدگی حدود ۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شد).
۲. تمامی سطح با استفاده از بادگیری عاری از گرد و غبار شد.
۳. سطح روی ترک‌ها با اپوکسی پوشانده شد.
۴. الیاف کربن با مشخصات داده‌شده در جدول ۳ به‌اندازه‌های لازم بریده شد.
۵. سطح بتن از رزین با مشخصات داده‌شده در جدول ۴ مالیده شد.
۶. الیاف بریده‌شده به سطح رزین آغشته و چسبانده شد. در این مرحله باید نسبت به تمهیدات شرکت‌های تولیدکننده‌ی رزین و فاصله‌ی زمانی لازم بین مالیدن اپوکسی و چسباندن الیاف بسپاری FRP دقت کرد. برای جلوگیری از کماتش ورق‌های بالا و پایین و همچنین جلوگیری از ترک‌های قطری و بالابردن ظرفیت برشی اتصال از دو عدد دورپیچ با پهنای ۵ سانتی‌متر استفاده شد (شکل ۶). مقدار الیاف و طراحی نمونه‌ی ترمیم‌شده در کار انجام‌شده توسط نگارنده تعیین و ارائه شده است.^[۱۷]

۷. با استفاده از غلتک دستی و غلتاندن آن با فشار بر روی الیاف سعی شد تمامی الیاف به رزین آغشته شود.

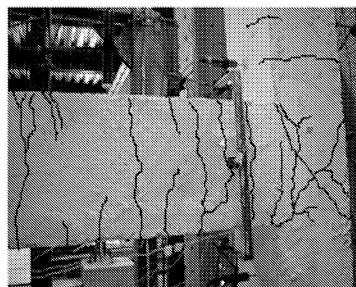
۸. برای انتقال نیرو از الیاف موجود بر وجوه تیر به ستون از دو عدد نبشی $۱۰۰ \times ۱۰۰ \times ۱۰۰$ میلی‌متری در قسمت بالا و پایین اتصال تیر به ستون استفاده شده است. برای این که تیزی گوشه‌های نبشی باعث بریده‌شدن الیاف بسپاری نشود در انتهای آن یک‌چهارم لوله‌ی فولادی با قطر ۲٫۵ سانتی‌متر



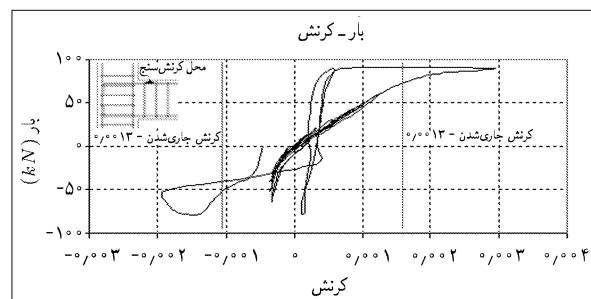
شکل ۷. برقراری روند انجام آزمایش.



شکل ۸. محل وقوع اولین ترک در نمونه‌ی اصلی.



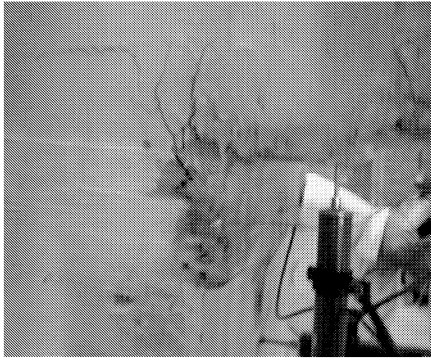
شکل ۹. وضعیت ترک‌های ایجاد شده در انتهای آزمایش.



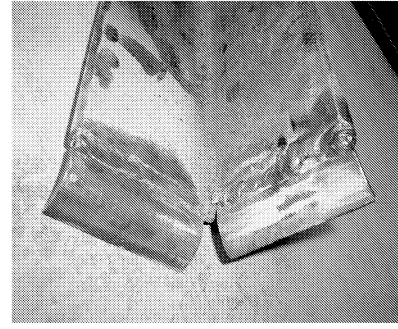
شکل ۱۰. کرنش در میلگرد طولی بالایی تیر.

پیدا کرد. وضعیت ترک‌خوردگی نمونه در انتهای بارگذاری در شکل ۹ داده شده است.

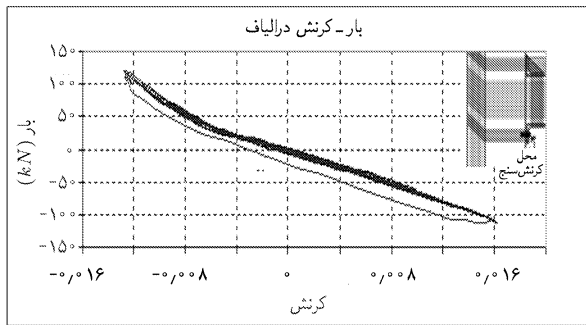
با توجه به معیار آیین‌نامه‌ی و ابعاد تیر، بیشینه‌باری که می‌توان به انتهای تیر اعمال کرد $۶۲٫۳۱$ کیلونیوتن است، اما در این نمونه در حالت رو به پایین بیشینه بار اعمالی $۹۲٫۴۸$ کیلونیوتن و تغییر مکان انتهای تیر $۱۱۰٫۷۵$ mm بوده است و در حالت رو به بالا $۷۸٫۳۷$ کیلونیوتن و تغییر مکان انتهای تیر $۱۱۴٫۳۳$ mm ثبت شده است.



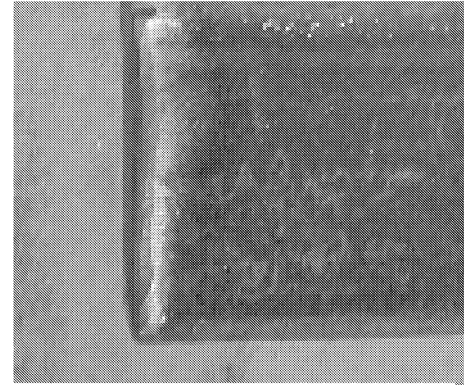
شکل ۱۴. پاره‌شدن الیاف بر اثر تیزی نبشی.



شکل ۱۲. جوش یک‌چهارم لوله در انتهای نبشی.



شکل ۱۵. کرنش ایجاد شده در الیاف قسمت تیزی نبشی.

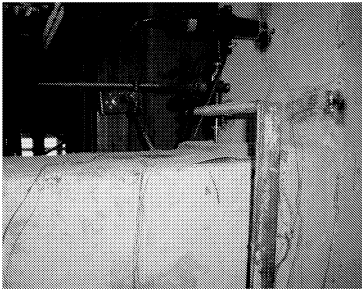


شکل ۱۳. پچ‌کردن یک انتهای نبشی به‌جای جوش یک‌چهارم لوله.

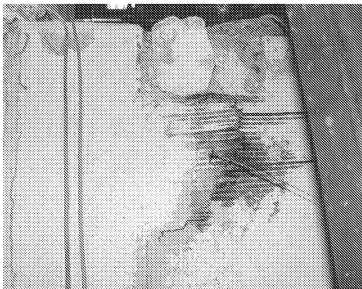
مقایسه‌ی نتایج در نمونه‌ی اصلی و نمونه‌ی ترمیمی

نتایج ثبت‌شده‌ی حاصل از آزمایش در نمونه‌ی اصلی که هنوز عملیات ترمیم بر روی آن صورت نگرفته حاکی از آن است که تحت بار ۹۲٫۴۸ کیلو نیوتن (جهت مثبت)، تغییر

جوش داده شده است (شکل ۱۲). فقط در یکی از گوشه‌ها از لوله استفاده نشده و به‌جای آن با پچ‌کردن سعی در کاهش تیزی گوشه شده است (شکل ۱۳). آن قسمت از نبشی که در انتهای آن یک‌چهارم لوله‌ی فولادی کار گذاشته نشده در قسمت پایین تیر و در سمت راست قرار داده شد.



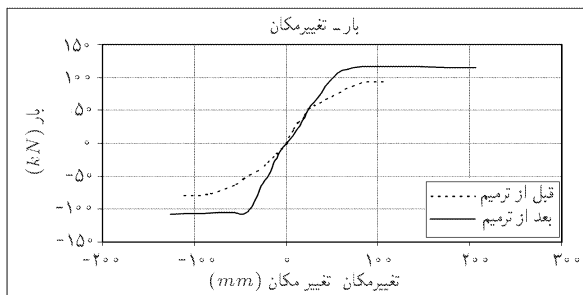
شکل ۱۶. جدا شدگی و کمانش در ورقه‌های CFRP.



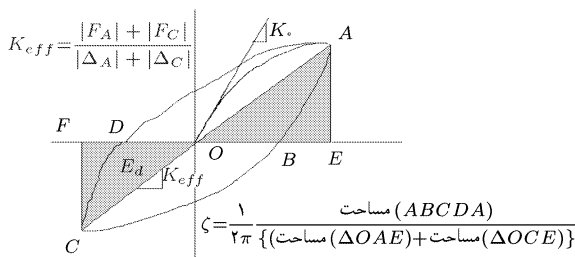
شکل ۱۷. عدم کارکرد یک‌پارچه‌ی الیاف به‌علت آغشته‌نشدن مناسب.

آسیب‌های ایجاد شده در نمونه‌ی ترمیمی

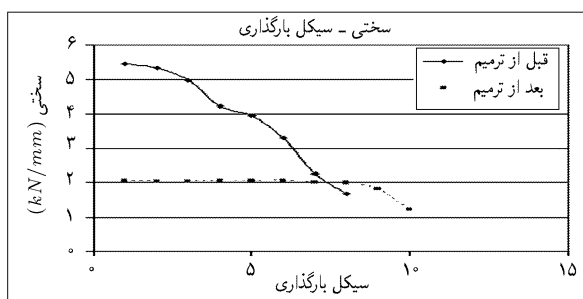
۱. در قسمتی از نبشی که از پخی استفاده شده است به‌علت تیزی گوشه در الیاف بسیاری پارگی ایجاد شد. این مورد با توجه به مقدار کرنش فراتر شده از کرنش سنج نصب‌شده بر روی الیاف در محل تیزی گوشه‌ی نبشی نیز مشخص است (شکل ۱۴ و ۱۵).
۲. بر اثر بارهای دوره‌ی، قسمت بالایی و پایینی تیر تحت تأثیر نیروهای فشاری و کششی قرار خواهند گرفت. زمانی که CFRP تحت تنش‌های فشاری قرار می‌گیرد باعث می‌شود که لایه‌ی بسیاری به‌علت وقوع کمانش از سطح بتن کنده شود (شکل ۱۶). برای این منظور لازم است در فاصله‌های کم‌تری به‌وسیله‌ی عناصر مکانیکی یا نزدیک‌کردن فاصله نوارهای دورپیچ، طول مؤثر لایه CFRP را کم کرد.
۳. آغشته‌نشدن مناسب الیاف و یک‌پارچه‌کار نکردن الیاف و پاره‌شدن تک‌تک الیاف (شکل ۱۷).
۴. از بین رفتن پیوستگی بین سنگ‌دانه و سیمان که در قسمت پوشش عناصر بتنی وجود دارد باعث کنده‌شدن قسمتی از بتن همراه با CFRP می‌شود (شکل ۱۸).
۵. پاره شدن CFRP به‌علت تلاش‌های برشی و کششی ناشی از خمش (شکل ۱۹).



شکل ۲۰. رابطه‌ی بار - تغییر مکان در نمونه‌ی اصلی و ترمیم‌شده‌ی آزمایشگاهی.



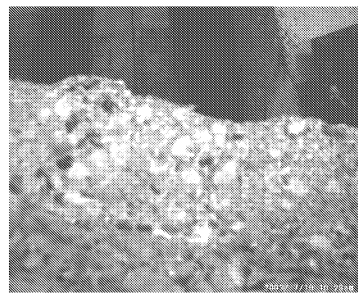
شکل ۲۱. پارامترهای مقایسه‌ی بی.



شکل ۲۲. مقایسه‌ی سختی اولیه در نمونه‌ی اصلی و ترمیمی.

بنابراین مؤثر سختی مؤثر نمونه‌ی ترمیم‌شده در گام اول برابر نمونه‌ی اصلی است و همان‌گونه که در شکل‌ها نیز مشخص است در دوره‌های بارگذاری مقدار سختی نمونه‌ی ترمیم‌شده تقریباً ثابت است مگر در گام آخر، که در نمونه‌ی گسیختگی به وجود می‌آید. ولی در نمونه‌ی اصلی مقادیر سختی در دوره‌های بارگذاری دارای یک سیر نزولی است. سختی مؤثر در نمونه‌ی اصلی دارای مقادیر کم‌تری نسبت به سختی نمونه‌ی اولیه است در صورتی که سختی مؤثر در نمونه‌ی ترمیم‌یافته بیشتر از سختی نمونه است.

همچنین نسبت میرایی (ξ) نمونه‌ها که در شکل ۲۱ معرفی شد بین نمونه‌ها مقایسه شده است (شکل ۲۴). فرمول ارائه‌شده در این نوشتار با فرمول‌های ارائه‌شده در تحقیقات انجام‌شده قبلی^[۲۱] متفاوت است. در تحقیقات یادشده فقط مثلث بالایی در نظر گرفته شده است و مثلث OAE مینا قرار داده شده است. همچنین برای به دست آوردن میرایی، چهار برابر مثلث فوق در مخرج محاسبه شده است. در آنجا فرض بر این است که دو مثلث OCF و OAE با هم‌دیگر مساوی‌اند. با توجه به آزمایش صورت‌گرفته بر روی عناصر بتنی عملکرد متفاوت تحت بارهای رفت و برگشتی دو مثلث OAE و OCF در نظر گرفته شده است که به نظر می‌رسد جواب‌های معقولانه‌تری ارائه دهد. در نمونه‌ی ترک‌نخورده در گام اول، مقدار ضریب میرایی ۹/۴۴٪ به دست آمده است.



شکل ۱۸. آسیب‌دیدگی ناشی از بین رفتن پیوستگی بین سنگ‌دانه و سیمان.

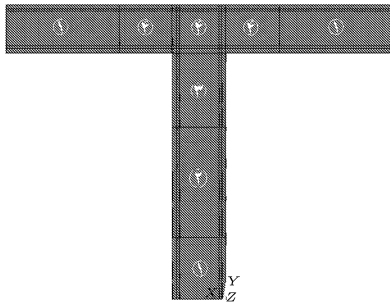


شکل ۱۹. پارگی ناشی از برش و خمش در ورقه‌های CFRP.

مکان ایجادشده در قسمت انتهایی تیر $5/110$ mm و تحت بار $37/78$ کیلو نیوتن (جهت منفی)، تغییر مکان ایجادشده در قسمت انتهایی تیر $33/114$ - بوده است. بعد از این مقادیر منحنی بار - تغییر مکان تقریباً یک خط افقی را طی کرده و اصطلاحاً نمونه به بیشترین مقاومت خود رسیده است. در صورتی که در نمونه‌ی ترمیم‌شده که در شکل ۲۰ ارائه شده است در جهت بارگذاری رو به سمت پایین بیشینه نیرویی که نمونه تحمل می‌کند $26/115$ کیلو نیوتن، و تغییر مکان ایجادشده $5/206$ mm، و زمانی که نیرو به سمت بالا باشد تحت بار $46/108$ کیلو نیوتن، تغییر مکان $7/126$ mm ثبت شده است. در مقایسه‌ی دو نمونه (آسیب‌نپذیر و ترمیم‌شده) در جهت مثبت، بار $24/1$ برابر زیادتر شده است در صورتی که در راستای منفی مقدار نیروی اضافه‌شده $4/138$ است. تغییر مکان‌ها به ترتیب $3/187$ و $3/180$ برابر بیشتر شده است.

در این قسمت، با تجزیه و تحلیل پارامترهای مؤثر بر عملکرد اتصال، مقایسه‌های لازم صورت خواهد گرفت. در شکل ۲۱ تعریف پارامترها نشان داده شده است. در مقایسه‌ی بین سختی‌های اتصال (شیب ابتدای بارگذاری K_0 در شکل ۲۱) قبل از ترک‌خوردگی و بعد از ترک‌خوردگی، سختی اتصال در دوره‌ی اول بارگذاری در نمونه‌ی اولیه (قبل از ترک‌خوردگی) $5/4528$ kN/mm و در نمونه‌ی ترمیم‌شده (بعد از ترک‌خوردگی) $24/2024$ kN/mm به دست آمده است (شکل ۲۲). این نتایج بیان‌گر این واقعیت است که در گام اول بارگذاری و در نمونه‌ی ترمیم‌شده سختی اولیه نسبت به نمونه‌ی اصلی به اندازه‌ی $5/3705$ کاهش یافته است. در تمام گام‌های بارگذاری سختی نمونه‌ی ترمیم‌شده از سختی نمونه‌ی اصلی کم‌تر بوده است مگر در گام آخر (دوره‌ی ۸) که سختی نمونه‌ی ترمیم‌شده بیشتر از سختی نمونه‌ی اصلی است (شکل ۲۲).

بعضاً در طراحی سیستم و عناصر سازه‌ی به‌جای استفاده از سختی اولیه، سختی سکانتی یا سختی مؤثر K_{eff} (در شکل ۲۱) استفاده می‌شود. در مقایسه‌ی بین سختی مؤثر در هر دو حالت (شکل ۲۳) مشاهده می‌شود که مقدار سختی در نمونه‌ی اصلی و بدون ترک‌خوردگی $67/237767$ kN/mm و در نمونه‌ی ترمیم‌شده



شکل ۲۶. قطعه‌بندی نمونه با توجه به ترک‌های ایجاد شده.

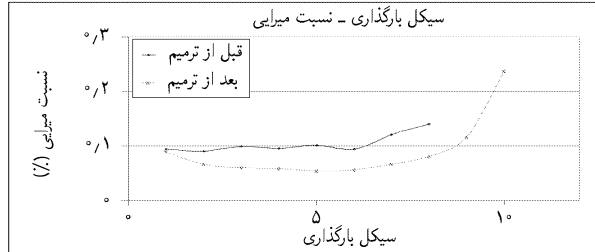
با استفاده از کاهش سختی سیستم، نمونه‌ی آسیب‌دیده مدل‌سازی شده. برای این منظور با توجه به مقدار ترک و آسیب ایجادشده در اتصال تیر به ستون، نمونه به هشت ناحیه تقسیم (شکل ۲۶)، و در این نواحی مشخصات مختلفی برای فولاد و بتن در مدل تعریف شده است. با سعی و خطاهای فراوان در انتخاب مقادیر و پارامترهای مکانیکی، سعی بر آن است که مدلی شبیه مدل آزمایشگاهی ساخته شود. با توجه به مقدار ترک‌خوردگی و پهنای ترک، و با مقایسه‌ی مقادیر ثبت‌شده توسط ادوات نصب‌شده بر نمونه‌ی آزمایشگاهی، هشت ناحیه‌ی تقسیم‌بندی‌شده از لحاظ مقادیر مختلف ضریب کشسانی، ضریب یواسون، مقاومت نهایی کششی و فشاری به چهار ناحیه محدود شد. مشخصات مکانیکی برای نواحی مختلف در جدول ۵ ارائه شده است.

مدل رایانه‌ی ساخته‌شده از اتصال مذکور که بیان‌گر نمونه‌ی آسیب‌دیده است به‌وسیله‌ی الیاف کربنی، با آرایش مدل آزمایشگاهی، و با همان مشخصات مکانیکی تحت بارهای رفت‌وبرگشتی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل رایانه‌ی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد و بعد از کالیبره‌کردن نتایج حاصل از نرم‌افزار، با حذف تدریجی لایه‌های الیاف به بررسی میزان تأثیر این لایه‌ها بر عملکرد ترمیم اتصال می‌پردازیم. شکل ۲۷ نشان‌دهنده‌ی محل، ابعاد و تعداد لایه‌های الیاف کربنی بر نمونه‌ی بتنی آسیب‌دیده است. به‌منظور قراردادن فولاد طولی به‌صورت حجمی در محل‌های موردنظر، از ۱۷۶ حجم برای نمونه استفاده شده است. برای مدل‌کردن نمونه‌ی اول رایانه‌ی، از ۱۱۶ حجم برای مدل‌کردن لایه‌های CFRP استفاده شده است. فولادهای عرضی در مدل انتخاب‌شده برای بتن (Solid 65) به‌صورت درصدی از حجم بتن ارائه شده است. در نمونه‌های رایانه‌ی، بین سطح بتن و ورق‌های CFRP پیوستگی کامل وجود دارد. برای مدل‌کردن الیاف کربنی از المان Solid 45 استفاده شد.

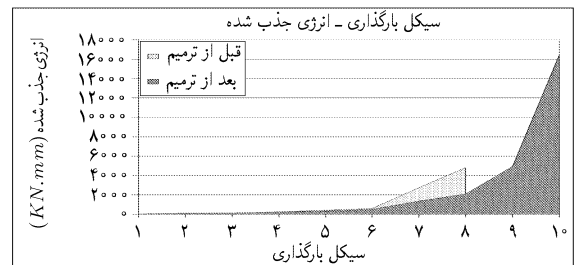
نمونه‌ی تحلیلی ایجادشده تحت بارگذاری شبیه به بارگذاری نمونه‌ی آزمایشگاهی قرار گرفت. برای جلوگیری از تمرکز تنش، بارگذاری در انتهای تیر بر روی ۸۸ گره اعمال شد. منحنی بار-تغییر مکان نمونه‌ی رایانه‌ی و آزمایشگاهی در شکل ۲۸ داده شده است. تحت بار اعمال‌شده در جهت مثبت بعد از دوره‌ی نهم و تحت بارگذاری رز به بالا در دوره‌ی دهم، بین دو مدل جداسازی به وجود آمد. در نمونه‌ی رایانه‌ی نیز، با ایجاد ترک در تیر و در خارج از محدوده‌ی ترمیم‌شده با الیاف کربنی آسیب ایجاد می‌شود؛ اگرچه در نمونه‌ی آزمایشگاهی علاوه بر مورد فوق آسیب‌های دیگری نیز به وجود آمده است که در مدل رایانه‌ی به‌علت بعضی فرضیات به وجود نیامد. در نمونه‌ی رایانه‌ی با توجه به وقوع ترک و رشد آن در ارتفاع تیر و کاهش سختی عضو به صفر، از تقسیم عدد بر صفر مقدار بی‌نهایت به دست می‌آید که باعث متوقف‌شدن برنامه‌ی رایانه‌ی می‌شود. در روند تحلیل، زمانی که در یک المان ترک‌خوردگی یا خردشدگی رخ می‌دهد، منول کشسانی در راستای ترک‌خورده (و در



شکل ۲۳. مقایسه‌ی سختی مؤثر در نمونه‌ی اصلی و ترمیمی.



شکل ۲۴. مقایسه‌ی میرایی در نمونه‌های اصلی و ترمیمی.



شکل ۲۵. مقایسه‌ی جذب انرژی در نمونه‌های اصلی و ترمیمی.

اما در نمونه‌ی آسیب‌دیده این مقدار معادل ۸۰٪ است. درگام آخر، در نمونه‌ی اولیه ۱۵٪ و در نمونه‌ی ترمیمی ۲۳٪ ثابت و محاسبه شده است. در تمام گام‌های بارگذاری به‌جز گام نهایی ضریب میرایی نمونه‌ی اصلی بیشتر از نمونه‌ی ترمیمی است (شکل ۲۴). در مقایسه‌ی مقدار انرژی‌های جذب‌شده در نمونه‌ها (شکل ۲۵)، مقدار انرژی جذب‌شده درگام اول، در نمونه‌ی اولیه (ترک‌خورده) $147537 \text{ kN}\cdot\text{mm}$ و در نمونه‌ی ترمیمی 437452 است که حدود ۲۹۹ برابر نمونه‌ی اولیه است. بیشینه مقدار انرژی جذب‌شده در نمونه‌ی ترمیم‌نشده $480747 \text{ kN}\cdot\text{mm}$ درگام هشتم و در نمونه‌ی ترمیم‌شده مقدار انرژی جذب‌شده درگام آخر $16432515 \text{ kN}\cdot\text{mm}$ به دست آمده است. گرچه درگام هشتم مقدار انرژی جذب‌شده $2092795 \text{ kN}\cdot\text{mm}$ است. مقدار انرژی جذب‌شده در نمونه‌ی ترمیمی بیشتر از نمونه‌ی اصلی است.

بررسی نمونه‌های تحلیلی

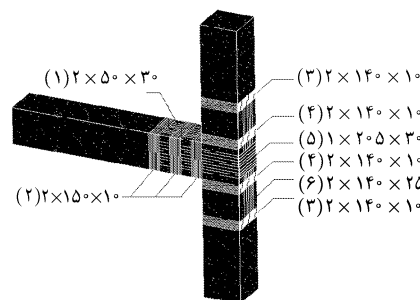
با توجه به مشکلات انجام آزمایش، برای پی‌بردن به آثار آرایش مختلف الیاف بر رفتار اتصال تیر به ستون سعی شده است با استفاده از نرم‌افزارهای موجود و با استفاده از تحلیل اجزای محدود پارامترهای مختلف مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گیرد. در این قسمت مدل اجزای محدود اتصال تیر-ستون کناری بتنی که در قسمت قبل مورد آزمایش قرار گرفت تهیه شد. با توجه به این که در نرم‌افزار استفاده‌شده برای مدل‌کردن ترک‌های ایجادشده و جاری‌شدن فولاد امکاناتی موجود نیست، لذا

جدول ۵. مشخصات مصالح بکار رفته در نواحی مختلف نمونه‌های ترمیمی.

شماره نواحی	بتن			فولاد			E _{stl} (ضریب کشسانی فولاد)	ضریب ضریب	مقاومت نهایی	مدول کشسانی
	مقاومت فشاری (Mpa)	مقاومت کششی نهایی (Mpa)	مقاومت کششی پواسون نهایی (Mpa)	وزن مخصوص (Kg/cm ³)	ضریب ضریب پواسون	وزن مخصوص				
ناحیه ۱	۲۵۰۰۰	۲۵	۴	۰٫۲۲	۲۵۰۰	۲۱۰۰۰۰	۴۲۰	۰٫۳	۴۲۰۰۰	
ناحیه ۲	۹۰۰۰	۲۵	۴	۰٫۲۲	۲۵۰۰	۱۳۵۰۰۰	۳۵۰	۰٫۳	۳۰۰۰۰	
ناحیه ۳	۱۲۵۰	۱۲٫۵	۱٫۵	۰٫۲۲	۲۵۰۰	۳۰۰۰۰	۱۵۰	۰٫۳	۸۰۰۰	
ناحیه ۴	۴۰۰۰	۲۰	۲٫۵	۰٫۲۲	۲۵۰۰	۹۵۰۰۰	۴۰۰	۰٫۳	۳۰۰۰۰	

جدول ۶. مقایسه‌ی مقادیر بار- تغییر مکان مدل‌های تحلیلی.

نمونه‌ی ترمیم شده	بار محتمل (kN)		بیشینه‌ی تغییر مکان (mm)	
	رو به پایین	رو به بالا	رو به پایین	رو به بالا
نمونه‌ی اول	۹۰۰	-۱۰۰۰	۶۵٫۴۱	-۷۱٫۸۲
نمونه‌ی دوم	۸۷۰	-۸۰۰	۵۲٫۲۳	-۴۹٫۴۸
نمونه‌ی سوم	۷۶۳	-۷۰۰	۴۳٫۰۸	-۴۰٫۹۳
نمونه‌ی چهارم	۷۰۰	-۷۰۰	۴۸٫۱۴	-۴۴٫۸۷
نمونه‌ی پنجم	۴۰۰	-۳۰۰	-۲۲٫۸۷	-۱۵٫۳۶



شکل ۲۷. نحوه‌ی قرارگیری و ابعاد ورق‌های FRP در نمونه‌ی اول که شبیه نمونه‌ی آزمایشگاهی است.

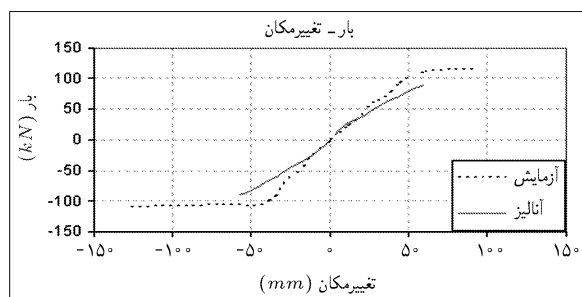
نمونه‌های اول، دوم و سوم متوجه می‌شویم که با وجود کاستن از لایه‌های الیاف کربنی در دو نمونه‌ی اخیر، سختی اولیه‌ی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی اول تغییر چندانی نداشته است. این در حالی است که بار مقاوم نهایی نمونه‌ها کاهش یافته؛ و میزان این کاهش در مدل سوم (یعنی مدلی که دورپیچ‌های ستون در آن حذف شده است) بیشتر بود تا در نمونه‌ی دوم که دو لایه‌ی الیاف کربنی نوار پشت ستون را نداشت. در جدول ۶ مقایسه‌ی بین بیشینه‌ی نیروها و تغییر مکان‌های متحمل از طرف نمونه‌های ترمیم‌شده‌ی رایانه‌ی ارائه شده است.

دورپیچ‌های ستون (نمونه‌ی دوم) تأثیر بیشتری بر عملکرد کلی اتصال نسبت به لایه‌های پشت ستون (نمونه‌ی سوم) دارند. نکته‌ی قابل ذکر دیگر این که علی‌رغم کم کردن مقدار الیاف کربنی، کاهش در سختی اولیه‌ی مدل ایجاد نشد؛ اگرچه میزان تأثیر در بار مقاوم نهایی اتصال تغییر اندکی داشته است.

با حذف دورپیچ‌های قرار داده شده در بالا و پایین ستون (نمونه‌ی سوم)، به جای تیر در ستون آسیب ایجاد شده است. این موضوع نیز بر تأثیر مثبت این دورپیچ‌ها روی عملکرد کل سیستم صحنه می‌گذارد. اگر در نمونه‌ی دوم نیز شکست در ستون رخ داد می‌توان علت آن را عدم استفاده از الیاف کربنی در پشت ستون ذکر کرد.

در نمونه‌ی چهارم ترمیم‌یافته، بعد از گام بارگذاری هشتم نمونه‌ی چهارم در انتهای تیر با تغییر مکان‌های بیشتری نسبت به نمونه‌ی اول ترمیم‌یافته به وجود آمد. همچنین اختلاف این دو نمونه در محل گسیختگی اتصال بود؛ گسیختگی در نمونه‌ی اول بین تیر و محلی که پوشش الیاف کربنی روی تیر ادامه نیافته به وجود آمد، در حالی که در نمونه‌ی چهارم با حذف الیاف کربنی روی هسته‌ی اتصال، شکست از تیر به هسته‌ی اتصال انتقال پیدا کرده و گسیختگی اتصال از محل هسته‌ی اتصال به وجود آمد، که علت تأثیر الیاف کربنی دور ستون بر افزایش مقاومت برشی گره اتصال است.

در نمونه‌ی پنجم ترمیم‌یافته که فقط در تیر و در محل رخداد مفصل خمیری با الیاف کربنی و دورپیچ ترمیم‌یافته، سختی به شدت کاهش یافته و نمونه به شدت در گام بارگذاری هفتم آسیب دیده است. در نمونه‌ی پنجم قبل از وقوع شکست در هسته‌ی اتصال، در محل اتصال تیر به ستون شکست رخ داد.



شکل ۲۸. مقایسه‌ی رابطه‌ی بار-تغییر مکان نمونه‌ی ترمیمی رایانه‌ی و آزمایشگاهی.

سه راستا برای المان خرد شده) صفر منظور می‌شود. در نرم‌افزار یاد شده برای بررسی رفتار چندمحوری بتن، معیار ویلیام - وارنک به کار برده شده است.

بعد از نمونه‌ی اولیه‌ی رایانه‌ی، چهار نمونه‌ی رایانه‌ی دیگر با آرایش الیاف بسیاری متفاوت ساخته شد که عبارت‌اند از:

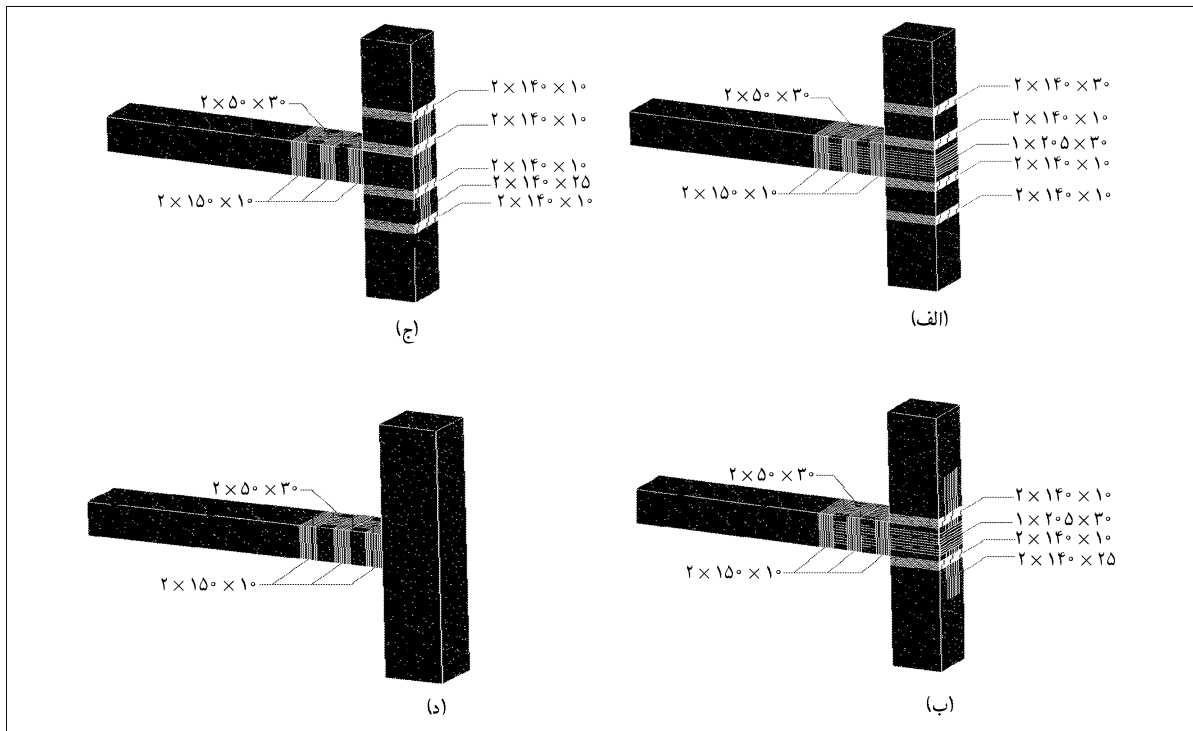
نمونه‌ی دوم: فقط الیاف قرار داده شده در پشت ستون نسبت به نمونه‌ی آزمایشگاهی حذف شد (شکل ۲۹ الف)؛

نمونه‌ی سوم: الیاف نواری قرار داده شده در ستون بالایی و پایینی نسبت به نمونه‌ی آزمایشگاهی حذف شد (شکل ۲۹ ب)؛

نمونه‌ی چهارم: الیاف اطراف تیر که گره اتصال را نیز دور می‌زند نسبت به نمونه‌ی آزمایشگاهی حذف شد (شکل ۲۹ ج)؛

نمونه‌ی پنجم: الیاف ستون نسبت به نمونه‌ی آزمایشگاهی حذف شد و فقط الیاف تیر باقی ماند (شکل ۲۹ د).

مقایسه‌ی نتایج تحلیلی بار- تغییر مکان نمونه‌های مختلف در شکل ۳۰ داده شده است. با مقایسه‌ی منحنی‌های بیشینه‌ی نیرو- جابه‌جایی در دوره‌های بارگذاری



شکل ۲۹. آرایش متفاوت الیاف در نمونه‌های ترمیمی رایانه‌یی.

۴. استفاده از الیاف کربنی به منظور ترمیم باعث تغییر محل وقوع مفصل خمیری از گره اتصال به سمت ایجاد در تیر می‌شود و بنابراین افزایش شکل‌پذیری سیستم را بدنبال خواهد داشت.

۵. با استفاده از الیاف کربن می‌توان از شکست ترد برشی سیستم جلوگیری کرد.

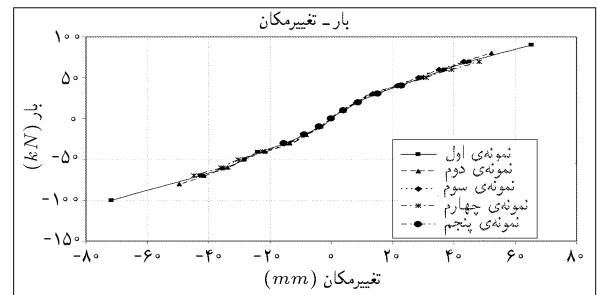
۶. آرایش و چیدمان الیاف در گره اتصال نه تنها باعث تغییر در مقدار سختی سیستم، بلکه باعث افزایش مقاومت سیستم می‌شود. استفاده از الیاف کربنی در تیر بدون ترمیم گره اتصال و ستون عملکرد مناسبی نخواهد داشت. گرچه در نمونه‌ی آزمایشگاهی و نمونه‌های عددی آسیبی در الیاف کربنی استفاده‌شده در محل اتصال و ستون به وجود نیامده، ترمیم این قسمت‌ها به علت افزایش مقاومت برشی گره اتصال تأثیر به‌سزایی در رفتار اتصال دارد.

۷. ترمیم ستون و هسته‌ی اتصال باعث جلوگیری از ایجاد مفصل خمیری در این نواحی و کاهش تغییر مکان انتهای تیر می‌شود.

۸. نمونه‌ی ترمیم‌شده توسط الیاف عملکرد تقریباً خطی تا حد نهایی داشته و سپس عملکرد کاملاً خمیری داشته است و منحنی بار-تغییر مکان شبیه خط افقی است.

تشکر و قدردانی

این نوشتار قسمتی از پروژه تحقیقاتی «راهکارهای ترمیم ساختمان‌های بتن مسلح آسیب‌دیده از زلزله» می‌باشد که در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن انجام شده است. بدینوسیله از اعضای بخش، آزمایشگاه سازه و دوستانی که در انجام آزمایش کمک نموده‌اند و همچنین از جناب آقای دکتر تسنیمی و سرکار خانم دکتر پرهیزگار به خاطر راهنمایی و حمایت‌هایشان تقدیر و تشکر می‌شود.



شکل ۳۰. مقایسه‌ی بیشینه‌ی مقدار بار تغییر مکان نمونه‌های تحلیلی.

نتیجه‌گیری

استفاده از الیاف بسیاری به علت سهولت در اجرا بدون بزرگ‌کردن ابعاد گره اتصال، می‌تواند با تسریع اجرا مشکلات دیگر روش‌های ترمیم اتصال تیر به ستون را در بتن مسلح برطرف سازد.

۱. در بیشتر تحقیقات انجام‌گرفته، سختی نمونه‌ی ترک‌خورده ۰٫۳۲ سختی نمونه‌ی اصلی^[۱۲]، یا بین ۰٫۳۰ الی ۰٫۵۰ سختی نمونه‌ی اصلی^[۱۲] ذکر شده است. در این نمونه نسبت سختی ترک‌خورده به نمونه‌ی اصلی ۰٫۳۰۸ ($K_{Intal}/K_{Firat} = ۰٫۳۰۸$) به دست آمده که در بین مقادیر موجود معتبر بوده است.

۲. استفاده از الیاف کربنی باعث تغییرات کمی در سختی نمونه‌ی اتصال ترمیم‌یافته ایجاد کرده است. این مقدار ۱٫۲۳ برابر سختی آخرین گام نمونه‌ی اصلی است. گرچه این مقدار در سختی مؤثر ۱٫۴۸ برابر آخرین گام بارگذاری بوده است.

۳. تأثیر الیاف بر مقاومت، جذب انرژی و شکل‌پذیری گره اتصال زیاد است.

منابع

1. Office of Critical Infrastructure Protection and Emergency Preparedness, "Seismic hazard, building codes and mitigation options for canadian buildings", Government of Canada (2001).
2. Engindeniz, M.; Kahn, L.F. and Zureich, A. "Repair and strengthening of reinforced concrete beam-column joints: state of the art", *ACI Journal*, (2) (2005).
3. Ghobareh, A. and Said, A., "Seismic rehabilitation of beam-column joints using FRP laminates", *Journal of Earthquake Engineering*, 5(1), (2001).
4. Pantelides, C.P.; Clyde, C. and Reaveley, L.D., "Rehabilitation of R/C building joints with FRP composites", 12WCEE, New Zeland (2000).
5. El-Amoury T. and Ghobarah A., "Seismic rehabilitation of beam-column joints using CFRP sheets", *Engineering Structure*, 24 (2002).
6. Antonopoulos, C.P. and Triantafillou, T.C., "Experimental investigation of FRP-strengthened RC beam-column joints", *Journal of Composites for Construction*, (2003).
7. Mosallam, A.S., "Strength and ductility of reinforced concrete moment frame connections strengthened with quasi-isotropic laminates", *Composites: Part B31* (2000).
8. Parvin, A., Granta, P., "Investigation on the effects of fiber composites at concrete joints", *Composites: Part B31*, (2000).
9. ABA. "Iranian concrete code", first revision, Tehran, (2000).
10. ACI-Committee 318, "Building code requirement for structural concrete (ACI 318)", Michigan, USA, (1995).
11. Vatani Oskoue, A. "Guidelines for repairing reinforced concrete structures damaged by earthquake (with emphasize on exterior beam-column connection", Bulding and Housing Research Center, (2006).
12. Chopra, K.A. "Dynamic of structure", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632, ISBN 0-13-855214-2, (1995).
13. NZS. "Design of concrete structures", NZS 3101:1995, Standards Association of New Zealand, Wellington, New Zealand (1995).
14. Paulay, T., and Priestley, M.J.N. "Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings", New York, John Wiley & Sons, (1992).