

# شیار طولی به عنوان شیوهی جایگزین آماده سازی سطحی در نصب کامپوزیت های CFRP برای تقویت خمشی تیرهای بتنی

داود مستوفی نژاد\* (استاد)

احسان محمودآبادی (کارشناس ارشد)  
دانشکده ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

یکی از متداول ترین روش های موجود برای مقاوم سازی سازه های بتن آرمه، استفاده از ورقه های کامپوزیتی FRP (پلاستیک های مسلح به الیاف) است. یکی از مسائل مهم در تقویت خمشی تیرهای بتن آرمه به کمک کامپوزیت های FRP، جدایش ورقه ها از سطح بتن است که منجر به شکست زودرس عضو سازه یی می شود. ازدلائل گسیختگی زودرس، می توان به آماده نبودن سطح بتن به منظور اتصال مناسب بین سطح و ورق کامپوزیتی اشاره کرد. از آنجا که آماده سازی سطحی بتن به طور متعارف با مشکلاتی نظیر هزینه ی بالای عملیات، آلودگی زیست محیطی و... مواجه است، دست یابی به روش های جایگزین آماده سازی سطحی بسیار مفید خواهد بود. در این تحقیق ضمن بررسی تأثیر آماده سازی سطحی بتن قبل از نصب ورقه های FRP در تقویت خمشی تیرها، ایجاد شیارهای طولی و پرکردن آن با چسب اپوکسی به عنوان شیوهی نوین و جایگزین آماده سازی متعارف ارائه می شود. نتایج این تحقیق حاکی از افزایش بارگسیختگی نهایی در نمونه های با شیار طولی نسبت به نمونه های آماده سازی شده ی سطحی است.

واژگان کلیدی: آماده سازی سطحی، جدایشگی، مقاوم سازی، ورقه های کامپوزیتی FRP.

## ۱. مقدمه

از دیرباز تقویت و مرمت سازه ها یکی از زمینه های پویا در کارهای ساختمانی محسوب شده است. ضرورت انجام تقویت از دو جنبه ی اساسی مورد توجه قرار می گیرد: ۱. افزایش ظرفیت باربری یا بهبود شرایط بهره برداری بدون تغییر در آیین نامه ها؛ ۲. تغییرات در آیین نامه ها و استانداردهای ساختمانی.<sup>[۱]</sup>

یکی از مصالحی که در سال های اخیر در بهسازی و تقویت سازه های مختلف کاربرد فراوان داشته است، کامپوزیت های FRP (پلاستیک های مسلح به الیاف) هستند. مزایای گوناگون این نوع کامپوزیت -- نظیر مقاومت بالا، وزن کم، سهولت نصب، مقاومت در مقابل خوردگی و تغییرات جزئی در هندسه و شکل سازه های تقویت شده -- کاربرد این نوع الیاف در تقویت و مرمت انواع سازه ها به خصوص سازه های بتن آرمه را موجه ساخته است.<sup>[۲]</sup>

تقویت خمشی «تیرهای بتن آرمه با تکیه گاه های ساده» با استفاده از کامپوزیت های FRP، و عموماً از طریق اتصال ورق FRP به وجه کششی تیر انجام می شود. این تقویت می تواند به شکل ساده و معمول یا با اعمال پیش کشیدگی در ورق FRP

\* نویسنده مسئول

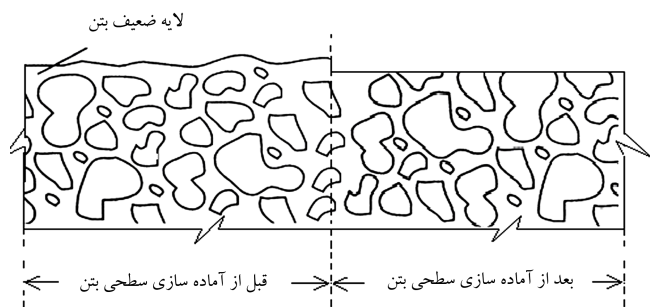
تاریخ: دریافت ۱۳۸۸/۴/۸، اصلاحیه ۱۳۸۹/۵/۲۴، پذیرش ۱۳۸۹/۹/۲.

dmostofi@cc.iut.ac.ir  
ehsan\_mahmoudabadi@cv.iut.ac.ir

قبل از اتصال آن به سطح تیر، یا با فراهم آوردن مهار لازم (مثل نوارهای U شکل در انتهای ورق) برای کاهش احتمال گسیختگی جدایشگی ورق از سطح تیر انجام شود. معمولاً نوع مرسوم تقویت خمشی تیرها، استفاده از ورق ساده ی FRP است (شکل ۱). در این روش از سه شیوه برای چسباندن ورق به وجه کششی تیر استفاده می شود: ۱. اتصال ورق های FRP پیش ساخته؛ ۲. روش درجا؛ ۳. روش تزریقی چسبی.

در شیوه ی نخست، ورق های FRP پیش ساخته را به قطعاتی با ابعاد مورد نیاز بریده و به وجه کششی تیر متصل می کنند. این حالت به لحاظ کنترل کیفیت از بقیه ی روش ها بهتر، و به لحاظ یکنواختی نیز از درجه ی بهتری برخوردار است. شیوه ی درجا و نیز شیوه ی تزریقی از معمول ترین شیوه های اتصال ورق های FRP به وجه کششی تیر بتن آرمه، و از بقیه ی روش ها ارزان ترند.

برخی از محققین انواع گسیختگی تیر بتنی تقویت شده با FRP را بیش از ۳۰ مورد عنوان کرده اند.<sup>[۲]</sup> در یک تقسیم بندی کلی، گسیختگی به سه دسته: خمشی، برشی و جدایشگی تقسیم می شود. هر یک از این دسته ها خود به حالات گسیختگی جزئی تری تقسیم می شوند:<sup>[۳]</sup>



شکل ۲. شمای کلی آماده‌سازی سطحی.



شکل ۱. تیر بتن آرمه‌ی تقویت شده با ورق ساده‌ی FRP در وجه کششی.

الف) گسیختگی خمشی با پارگی FRP؛

ب) گسیختگی خمشی با خردشدگی بتن؛

ج) گسیختگی برشی؛

د) جداشدگی پوشش بتن؛

و) جداشدگی بین سطحی ورق انتهایی؛

هـ) جداشدگی بین سطحی ناشی از ترک میانی خمشی؛

ی) جداشدگی بین سطحی ناشی از ترک برشی - خمشی.

شیوه‌های مربوطه، مقیاس و سطح مورد نظر، دسترسی به مواد و تجهیزات مورد نیاز، و نیز سلامت و ایمنی روش مربوطه از جمله‌ی این عوامل هستند.

چنان که در شکل ۲ نیز مشاهده می‌شود، آماده‌سازی سطحی بتن با هدف از بین بردن لایه‌ی ضعیف خارجی و نیز آلودگی‌های پنهان در سطح -- که باعث ایجاد اتصالی ضعیف و نامناسب می‌شود -- صورت می‌گیرد. بنابراین برای انجام این آماده‌سازی، لایه‌ی ضعیف برداشته می‌شود تا سطحی با دانه‌های نمایان ظاهر شود. این کار سبب ایجاد چسبندگی مناسب و کافی بین سطح بتن و کامپوزیت FRP می‌شود. یادآور می‌شود برداشتن لایه‌ی ضعیف باید به‌گونه‌ی انجام شود که از ایجاد ترک‌های ریز در سطح بتن ممانعت شود، چرا که ایجاد این ترک‌ها منجر به شکل‌گیری سطحی ضعیف و در نتیجه کاهش مقاومت اتصال خواهد شد. اجرای صحیح و اصولی ممکن است باعث انتقال مناسب تنش برشی موجود بین سطح بتن و کامپوزیت FRP شود.<sup>[۴]</sup>

مراحل اولیه در آماده‌سازی سطحی بتن عبارت است از:<sup>[۵]</sup>

- از بین بردن هرگونه بتن آسیب‌دیده و پایین‌تر از سطح استاندارد، و جایگزین کردن آن با مصالحی با کیفیت مطلوب.

- از بین بردن شیره‌ی بتن موجود بر روی سطح، چرا که باعث ایجاد ضعف و نقصان در اتصال خواهد شد. برای از بین بردن شیره‌ی بتن از سنگ فرز و صفحه‌ی برش سنگ استفاده می‌شود. این کار باید با دقتی خاص صورت گیرد تا از ایجاد هرگونه ناهمواری موضعی در سطح بتن جلوگیری شود.

- مضرس کردن سطح بتنی موجود با استفاده از روش‌های مختلف، نظیر استفاده از سیستم پاشش آب یا ماسه‌پاشی.

- از بین بردن گرد و خاک موجود روی سطح نمونه توسط برس‌های مخصوص.

مراحل تکمیلی در آماده‌سازی سطحی بتن عبارت‌اند از:<sup>[۵]</sup>

- تمیز کردن سطح با حلال‌های مناسب برای از بین بردن هرگونه آلودگی باقی‌مانده.

- خشک کردن سریع سطح برای اجرای اتصال (البته اگر نصب سریع لازم باشد).

- استفاده از هرگونه اپوکسی مناسب برای ترمیم سطح.

در مورد آماده‌سازی کامپوزیت FRP باید گفت اگرچه کامپوزیت‌های پلیمری که در کارخانه‌های تولید مصالح مهندسی عمران تولید می‌شوند غالباً با هر نوع چسبی سازگارند، بهتر است قبل از استفاده از اپوکسی، سازگاری آن با کامپوزیت FRP بررسی شود. علاوه بر این که کامپوزیت FRP باید عاری از هرگونه آلودگی و گرد و خاک باشد، اپوکسی مصرفی نیز لازم است از لحاظ تمیزی و عاری بودن از هرگونه آلودگی خارجی مورد بررسی قرار گیرد.<sup>[۵]</sup>

برقراری پیوستگی بین ورق FRP و سطح بتن اگرچه بدون آماده‌سازی کامپوزیت FRP امکان‌پذیر است، عدم آماده‌سازی باعث وجود آلودگی‌هایی نظیر گرد و خاک

چنانچه انتهای ورق تقویتی به‌صورت مناسب مهار شود، ظرفیت نهایی خمشی تیر با پارگی ورق FRP یا خردشدگی بتن در ناحیه‌ی فشاری قابل دست‌یابی است. همچنین ممکن است تیرهای بتن آرمه در حالت گسیختگی برشی، به‌صورت ترد گسیخته شوند. در تیرهای بتن آرمه‌ی تقویت‌شده با ورقه‌های FRP، به‌دلیل جداشدگی ناگهانی ورق ممکن است پیش از رسیدن به ظرفیت نهایی تیر گسیختگی‌های زودرس ایجاد شود. رایج‌ترین نوع جداشدگی ناگهانی ورق، جدا شدن ورق FRP به‌همراه پوشش بتنی روی آرماتور است. این حالت گسیختگی از یک انتهای -- یا در نزدیکی یک انتهای -- ورق شروع شده و به سمت وسط تیر پیش‌روی می‌کند.

نوع دیگر جداشدگی ناگهانی ورق، جداشدگی بین چسب و تیر است که از انتهای ورق شروع می‌شود. در این گسیختگی لایه‌ی نازکی از بتن به سطح ورق متصل است. جداشدگی ممکن است در یک ترک خمشی یا در یک ترک ترکیبی خمشی - برشی در ناحیه‌ی دور از انتهای ورق شروع، و سپس به سمت یکی از دو انتهای ورق انتشار یابد. در این حالت نیز مقداری از بتن به سطح ورق چسبیده است. مهم‌ترین دلیل گسیختگی زودرس، آماده نبودن سطح بتن برای ایجاد سطح تماسی مناسب برای نصب کامپوزیت FRP است.<sup>[۴]</sup>

از جمله مسائلی که در نصب کامپوزیت‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد، فراهم آوردن بستری مناسب برای اتصال کامپوزیت و سطح مورد نظر است. آماده‌سازی این وجه با برداشتن لایه‌ی سطحی بتن ضعیف، نمایان‌سازی دانه‌های شن و ماسه برای توسعه‌ی چسبندگی بیشتر، و فراهم آوردن سطحی هموار صورت می‌گیرد که در ادامه به تفصیل بیان خواهد شد. آماده‌سازی سطح بتن -- که خود شامل مراحل مختلفی است -- باعث پیوستگی بیشتر در اتصال شده و گسیختگی را به تأخیر می‌اندازد. تمیز بودن سطح، عملکرد پوشش آستر، و مقاومت بتن از جمله عوامل مؤثر بر خصوصیات پیوند بین بتن و چسب اپوکسی هستند. لذا قبل از اتصال مذکور، آماده‌سازی مورد نیاز صورت می‌یابد؛ چرا که تنش کششی به‌وسیله‌ی تنش‌های مماسی درون چسب از بتن به ورق FRP انتقال داده می‌شود.

سطح صفحات بتنی قبل از نصب ورق FRP باید به‌نحوی آماده شود، چرا که آماده‌سازی سطحی نقش عمده‌ی در مقاومت گسیختگی نهایی دارد. انتخاب شیوه‌ی مناسب آماده‌سازی سطح بتن به عوامل مختلفی بستگی دارد که هزینه‌ی

جداشدگی ورق با کاهش اختلاف تغییر مکان دو طرف ترک، و نیز افزایش مقاومت مذکور با افزایش طول ورق تقویت همراه است.<sup>[۹]</sup>

در سال ۲۰۰۸، محققین تحقیقات آزمایشگاهی خود را به منظور بررسی نوع جداشدگی ورق FRP از سطح تیرهای تقویت شده با CFRP ناشی از ترک میانی انجام دادند. به منظور نیل به اهداف خود، تعداد ۶ نمونه بتن آرمه‌ی پیش کشیده به طول ۹/۱۴ متر را توسط کامپوزیت‌های CFRP تقویت و تحت بارگذاری خمشی قرار دادند. در آزمایش این تیرها، ۴ تیر به علت جداشدگی ورق از سطح بتن بر اثر ایجاد ترک میانی و ۱ تیر با پارگی ورق گسیخته شده‌اند. یک نمونه‌ی باقی‌مانده بدون تقویت برای بررسی بار شکست تیر بتنی مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصله نشان می‌داد که در اعضای بتنی خمشی پیش‌کشیده با دهانه‌ی بلند که به کمک CFRP تقویت شده‌اند، شکست معمول ناشی از ایجاد ترک میانی (IC) بوده است. همچنین استفاده از نوارهای U شکل به منظور جلوگیری از شکست زودرس، ۲۰ درصد مقاومت گسیختگی نهایی را افزایش داده است.<sup>[۱۰]</sup>

در تمامی تحقیقات مورد اشاره، محققین تنها به بررسی تقویت تیرهای بتن آرمه توسط کامپوزیت‌های FRP در ناحیه‌ی لنگر مثبت پرداخته‌اند، و فقط عده‌ی معدودی از آنان اثرات آماده‌سازی سطحی بتن در نصب ورق را نیز مورد بررسی قرار داده‌اند. در تحقیقات یادشده، هیچ‌گونه مطالعه‌ی برای ایجاد شیوه‌ی جایگزین آماده‌سازی سطحی که بتواند مشکلات موجود در آماده‌سازی سطحی را برطرف سازد، ملاحظه نشده است. همین‌جاء زمینه‌ی تحقیق حاضر را فراهم آورده است.

در تحقیق حاضر به‌عنوان جایگزین آماده‌سازی سطحی متعارف، شیوه‌های مختلف مانند کاربرد نوارهای U شکل در انتهای دهانه، و نیز کاربرد انواع شیارها (نظیر شیار عرضی، قطری و طولی) مورد بررسی قرار گرفت. از این میان، شیار طولی به‌عنوان مناسب‌ترین شیوه برای انجام آزمایش مورد استفاده قرار گرفت.

## ۲. تحقیقات آزمایشگاهی

در این قسمت از تحقیق ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی موجود، شامل نمونه‌های بتنی و کامپوزیت‌های FRP است، تبیین می‌شود. همچنین طرح اختلاط نمونه‌های بتنی یادشده ارائه خواهد شد. در ادامه، تقسیم‌بندی نمونه‌ها به‌منظور انجام آزمایش بررسی می‌شود؛ و در نهایت توضیح مختصری راجع به نحوه‌ی آزمایش و دستگاه مورد استفاده ارائه خواهد شد.

### ۱.۲. ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی و طرح اختلاط مربوطه

نمونه‌های موجود شامل ۲۶ نمونه‌ی بتنی منشوری به ابعاد  $100 \times 100 \times 500$  میلی‌متر به‌صورت غیرمسلح است. هدف از اختلاط نمونه‌های یادشده، رسیدن به مقاومت فشاری ۳۵ MPa است. برای رسیدن به مقاومت فشاری مذکور، مقدار ریزدانه‌ی مصرفی (۵-۰ mm) برابر ۹۷۴ کیلوگرم بر متر مکعب، درشت‌دانه‌ی مصرفی (۱۲-۵ mm) ۷۳۶ کیلوگرم بر متر مکعب، سیمان ۴۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب و آب ۲۰۷ کیلوگرم بر متر مکعب است. ورقه‌های کامپوزیتی از نوع CFRP با مدول کشسانی ۲۳۱ GPa و کرنش نهایی ۱/۷ درصد است که برای تقویت خمشی نمونه‌های موجود به ابعاد  $12 \times 10 \times 36$  میلی‌متر تهیه شدند. در کنار

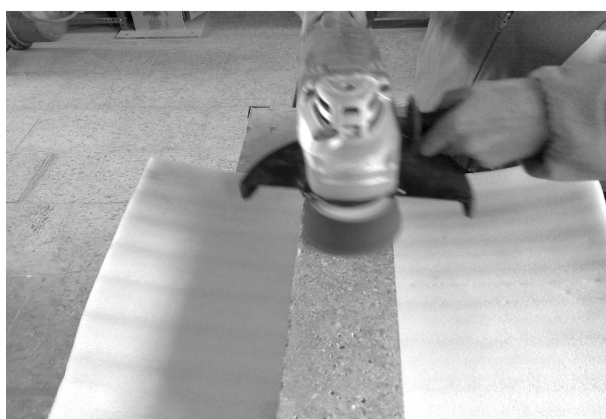
بر روی سطح می‌شود که کاهش مقاومت پیوستگی را در بر خواهد داشت. بنابراین از بین بردن آلودگی‌ها یک امر الزامی است. در برخی موارد محدودیت‌هایی در آماده‌سازی سطحی بتن وجود دارد؛ مانند محدودیت زیست‌محیطی که طی آن تخریب سطح بتن و دیگر عملیات مورد نیاز برای آماده‌سازی سطح مانع از انجام عملیات آماده‌سازی سطحی می‌شود. بنابراین در مواردی استفاده از شیوه‌ی جایگزین ضرورت می‌یابد. این شیوه باید به‌گونه‌ی باشد که علاوه بر رفع محدودیت مذکور، مقاومت اتصال بین سطح بتن و ورق FRP را افزایش دهد.

در سال ۲۰۰۴، در مطالعات آزمایشگاهی بر روی ۱۱ نمونه تیر بتن آرمه‌ی تقویت‌شده با ورقه‌ی کامپوزیتی الیاف شیشه (GFRP)، اثرات طول، ضخامت و عرض ورق تقویتی بر جداشدگی بین سطحی بررسی شد.<sup>[۶]</sup> نتایج حاصل از مطالعات یادشده نشان داد که با افزایش طول ورق تقویتی، ممکن است نوع گسیختگی تغییر کند. به‌عبارت دیگر، استفاده از ورق تقویتی GFRP به طول  $L = 0.6L$  (طول دهانه‌ی مؤثر تیر) بدون توجه به نوع مهار مورد استفاده‌شده، به گسیختگی تیر با حالت جداشدگی پوشش بتن از روی آرماتورهای کششی می‌انجامد. در این تحقیق، روش مقتضی برای کنترل جداشدگی پوشش بتن، استفاده از طول ورق تقویتی حداقل به میزان ۸۰٪ طول دهانه‌ی تیر پیشنهاد شده است. در این صورت گسیختگی تیر از نوع جداشدگی بین سطحی خواهد بود. محققین تأثیرپذیری نوع گسیختگی از تغییر در مقدار تقویت را به‌مراتب کم‌تر از تغییر در طول ورق ذکر کردند. در مورد عرض ورق تقویت نیز گفته شده بود که برای ورق‌های با ضخامت یکسان، افزایش عرض ورق منجر به افزایش باربری سازه می‌شود، ولی مقدار تغییر شکل تیر در بار بیشینه، تقریباً یکسان است. این محققان ضمن استفاده از مهار U شکل و قلاب مهاری در انتهای ورق FRP نشان دادند که مهار U شکل مقاومت نهایی و انعطاف‌پذیری بهتری را ایجاد می‌کند.<sup>[۶]</sup>

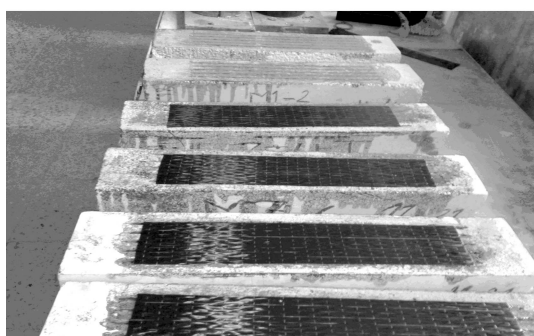
در همین راستا، در سال ۲۰۰۴ نیز اثرات شرایط مختلف قیود انتهایی تیرهای بتن آرمه‌ی مسلح با ورقه‌های FRP کربنی مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعات برای مهارکردن ورق از صفحات FRP به شکل U، L، X به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر در دورپیچ کردن تیر استفاده شد. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که هر دو پارامتر طول مهاری و شرایط قیود انتهایی در مسئله‌ی جداشدگی ورق FRP مؤثرند. استفاده از دورپیچ قائم صفحات FRP در انتهای ورق تقویتی وجه کششی تیر، یا افزایش طول ورق در وجه کششی تیر تا نزدیک تکیه‌گاه، مانع از جدایش انتهای ورق می‌شود اگرچه به جداشدگی خمشی - برشی در طول تیر خواهد انجامید. در مقابل، مهار یا L یا X شکل می‌تواند هم از جداشدگی انتهایی و هم از جداشدگی خمشی - برشی جلوگیری کند.<sup>[۷]</sup>

در تحقیقات آزمایشگاهی سال ۲۰۰۶ که بر پایه‌ی بررسی نتایج جداشدگی ورق FRP از سطح بتن انجام شد، تعداد ۵ نمونه‌ی بتنی به ابعاد  $125 \times 125 \times 330$  میلی‌متر توسط کامپوزیت‌های CFRP تقویت‌شده مورد آزمایش قرار گرفت، به طوری که ۱۵۰ میلی‌متر از طول ورق به سطح بتن چسبانده شد و ۳۵ میلی‌متر بدون اتصال به سطح بتن، تحت آزمایش کشش مستقیم قرار گرفتند. نتایج حاصله نشان‌گر وجود رفتار کشسان خطی در ورق FRP تا لحظه‌ی گسیختگی نهایی بوده است.<sup>[۸]</sup>

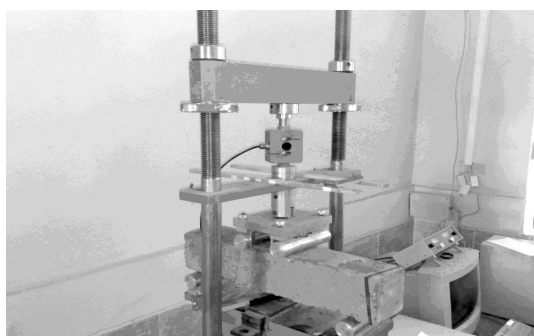
در همین سال، جداشدگی ورق FRP ناشی از اثر تغییر مکان قائم ایجادشده در دو طرف ترک تحت بارگذاری خمشی مورد بررسی قرار گرفت.<sup>[۹]</sup> در این بررسی‌ها تعداد ۹ نمونه‌ی بتنی از طریق ایجاد اختلاف تغییر مکان در دو طرف ترک به مقدار ۰، ۴ و ۸ میلی‌متر توسط کامپوزیت‌های CFRP به طول ۱۵۰ و ۴۵۰ میلی‌متر تقویت و تحت بارگذاری خمشی قرار گرفتند. نتایج حاصله نشان داد که افزایش مقاومت



شکل ۳. استفاده از دستگاه فرز به منظور آماده‌سازی سطحی.



شکل ۴. ایجاد شیار طولی بر سطح نمونه.



شکل ۵. شمای آزمایش خمش چهار نقطه‌یی بر روی نمونه‌ی منشوری.

-- به عنوان شیوهی جایگزین آماده‌سازی سطحی -- (شکل ۴)، تعداد ۶ نمونه‌ی منشوری روی سطح ساخته شد و بر آن شیار طولی به فاصله‌ی ۱۵ میلی‌متر از یکدیگر و به عمق ۱۰ میلی‌متر و عرض ۳ میلی‌متر ایجاد، و شیارها با اپوکسی Sikadur C۳۰۰ پر شد. نهایتاً نمونه‌ها توسط ورق CFRP موجود تقویت شد و تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌یی قرار گرفت (شکل ۵).

ساخت نمونه‌های منشوری، نمونه‌های مکعبی برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری بتن نیز ساخته شد.

## ۲.۲. تقسیم بندی نمونه‌های آزمایشگاهی

به طور کلی تقسیم‌بندی نمونه‌ها با دو هدف انجام شد:

۱. بررسی تأثیر آماده‌سازی سطحی بتن بر نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های تقویت‌شده بدون آماده‌سازی سطحی؛

۲. بررسی تأثیر استفاده از روش ایجاد شیار طولی به عنوان شیوهی جایگزین آماده‌سازی سطحی.

### ۱.۲.۲. بررسی تأثیر آماده‌سازی سطحی بتن

در ارتباط با تأثیر آماده‌سازی سطحی بتن بر بار جدا شدگی ورق FRP، محققین در سال ۱۹۹۶ به بررسی این اثر پرداختند<sup>[۱۱]</sup> که نتایج آزمایش آنان حاکی از افزایش ۳ الی ۱۰ درصدی در بار نهایی گسیختگی بوده است. در تحقیق حاضر نیز تعدادی از نمونه‌ها به منظور بررسی تأثیر آماده‌سازی سطحی مورد استفاده قرار گرفت. سطح این نمونه‌ها توسط دستگاه فرز و سنگ مخصوص سایش بتن آماده شد تا شیره‌ی بتن موجود بر روی سطح کاملاً برداشته شود و سطحی هموار و مناسب برای نصب ورق FRP فراهم شود (شکل ۳).

هنگام استفاده از دستگاه فرز دقت شد تا ناهمواری در سطح پدیدار نشود؛ چرا که این مسئله باعث کاهش در مقاومت اتصال خواهد شد. سطح نمونه‌های آماده‌شده با استفاده از دستگاه فشار باد کاملاً تمیز و از هرگونه آلودگی و گرد و غبار پاک شد. سپس خلل و فرج موجود در سطح بتن با اپوکسی مناسب (Sikadur ۳۱) پر شد تا میزان خلل و فرج در سطح موجود کمینه شود. با انجام مراحل مذکور، نمونه‌های موجود برای نصب ورق FRP آماده شدند. برای اتصال ورقه‌های کامپوزیتی به سطح بتن، ابتدا سطح آماده‌شده‌ی بتن با استفاده از قلم‌موی مناسب به رزین از نوع Sikadur C۳۰۰ آغشته شد. سپس ورقه‌های کامپوزیتی بریده‌شده به ابعاد ۱۲/۵ × ۴۰ × ۳۶۰ میلی‌متر بر روی سطح قرار گرفته و مجدداً در رزین کاملاً غوطه‌ور شد. در نهایت، رزین اضافی با استفاده از کاردک مناسب برداشته شد، زیرا وجود رزین اضافی روی سطح در بارگسیختگی نهایی اثر منفی خواهد گذاشت.

### ۲.۲.۲. بررسی تأثیر استفاده از راه‌های جایگزین آماده‌سازی سطحی

به منظور بررسی امکان استفاده از شیار طولی، و نیز تأثیر این کاربرد بر سطح نمونه

### ۳.۲. نتایج آزمایشگاهی

میانگین بارگسیختگی نمونه‌های آزمایش شده در جدول ۱ نشان داده شده است. میانگین بارگسیختگی در نمونه‌های بدون تقویت ۱۴/۳ کیلونیوتن بوده است. با تقویت خمشی تیرهای بتنی در این تحقیق، میانگین بارگسیختگی در نمونه‌های بدون آماده‌سازی سطحی و با سطح آماده‌سازی شده به ترتیب ۱۵/۷ و ۱۶/۷ کیلونیوتن بوده است که این خود بیانگر افزایش ۲۰ درصدی ظرفیت خمشی مقطع، در نتیجه تقویت توسط کامپوزیت‌های FRP، و افزایش ۱۰ درصدی ظرفیت خمشی به دلیل آماده‌سازی سطحی بوده است. نتایج ارائه شده در جدول ۱ نشان می‌دهد که کاربرد شیوهی «شیارزنی» به عنوان شیوهی جایگزین آماده‌سازی سطحی، به بارگسیختگی نهایی بالاتر -- در مقایسه با نمونه‌های بدون آماده‌سازی سطحی -- منجر می‌شود؛ به طوری که بارگسیختگی نمونه‌های دارای شیار برابر ۲۱/۶ کیلونیوتن است که در مقایسه با نمونه‌های با آماده‌سازی سطحی نزدیک به ۳۰ درصد افزایش نشان می‌دهد.

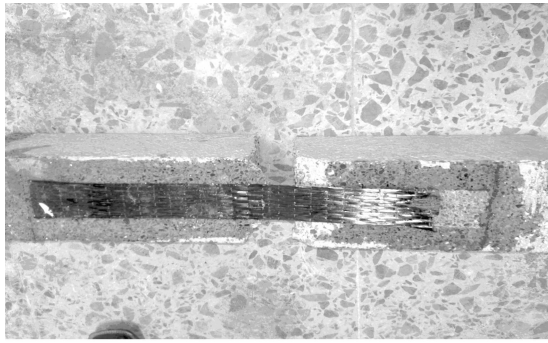
علت ضعف در اتصال ورق و سطح بتن ناشی از عدم ایجاد سطح تماس کافی و مناسب میان این دو عضو است. لذا با رفع این نقیصه و افزایش سطح تماس اپوکسی اتصال‌دهنده در راستای تنش ایجاد شده در ورق که در راستای طولی است، کسب بارگسیختگی نهایی بالاتری مورد انتظار است. با ایجاد شیار طولی این سطح تماس بیشتر شده و پدیده‌ی جداشدگی به تأخیر می‌افتد و بارگسیختگی بالاتری کسب می‌شود. در این تحقیق مشاهده شد که نحوه‌ی گسیختگی در نمونه‌ها در پی ایجاد شیار طولی بر سطح، به صورت پارگی ورق FRP است. این در حالی است که در نمونه‌های با آماده‌سازی سطحی، جداشدگی زودرس ورق از سطح بتن اتفاق افتاد (شکل ۶).

شکل‌های ۷ و ۸ هر کدام شامل ۴ منحنی بار - تغییر مکان است که نشان‌گر رفتار نمونه‌های بدون آماده‌سازی سطحی و با آماده‌سازی سطحی است. چنان که مشاهده می‌شود، منحنی بار - تغییر مکان نمونه‌های آماده‌سازی سطحی شده و نیز در نمونه‌های بدون آماده‌سازی سطحی قبل از ایجاد ترک، دارای رفتار خطی و کشسان است که با ایجاد ترک، و بر اثر باز شدن ترک بارگسیختگی کاهش می‌یابد. میزان بار در نمونه‌های بدون آماده‌سازی سطحی، پس از ایجاد ترک افزایش ناچیزی داشته، اما نمونه‌ها تحمل بار اضافی را نداشته‌اند. بارگسیختگی نهایی در نمونه‌های با آماده‌سازی سطحی در مقایسه با نمونه‌های بدون آماده‌سازی در حدود ۵ الی ۱۵ درصد افزایش یافته است.

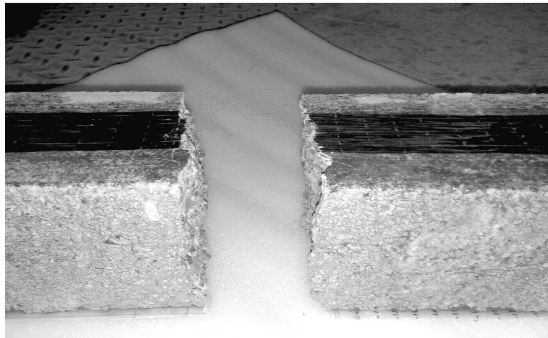
همچنین نمونه‌های با ایجاد شیار طولی بر سطح نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های با آماده‌سازی سطحی، از بار نظیر ترک خوردگی، بارگسیختگی نهایی و همچنین

جدول ۱. بارگسیختگی نهایی.

گروه	نوع نمونه	تعداد نمونه	میانگین بار گسیختگی نهایی (kN)
۱	بدون تقویت خمشی	۵	۱۴/۳
۲	بدون آماده‌سازی سطحی	۵	۱۵/۷
۳	با آماده‌سازی سطحی	۱۰	۱۶/۷
۴	با ایجاد شیار طولی	۶	۲۱/۶

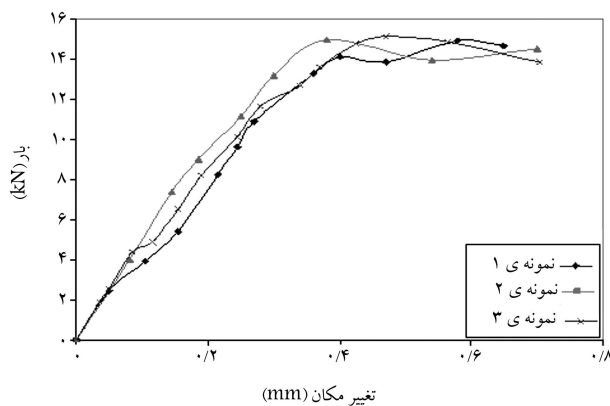


الف) آماده سازی سطحی؛

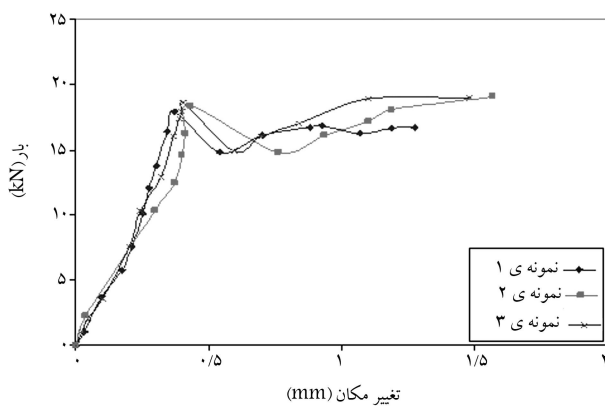


ب) ایجاد شیار طولی.

شکل ۶. نحوه‌ی گسیختگی نمونه‌ها.



شکل ۷. منحنی بار - تغییر مکان برای نمونه‌های بدون آماده‌سازی سطحی.



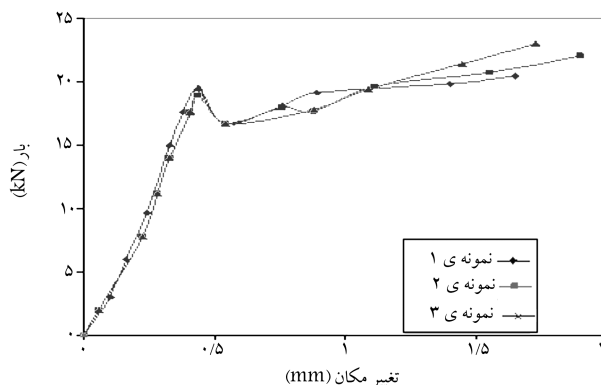
شکل ۸. منحنی بار - تغییر مکان برای نمونه‌های آماده‌سازی سطحی شده.



آزمایشگاهی و تقویت آن‌ها توسط کامپوزیت‌های CFRP و اتخاذ روش‌های گوناگون آماده‌سازی سطحی بتن، مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی نتایج به دست آمده از تقویت خمشی تیرها و همچنین آماده‌سازی سطحی و شیوهی شیازنی به‌عنوان جایگزین آماده‌سازی سطحی، نتایج حاصله عبارت خواهند بود از:

۱. آماده‌سازی سطحی بتن که با از بین بردن لایه‌ی ضعیف سطح بتن و پرکردن خلل و فرج صورت پذیرفت، بارگسیختگی نهایی را نسبت به نمونه‌های بدون آماده‌سازی سطحی ۵ الی ۱۵ درصد افزایش داد. درحقیقت، ایجاد سطح تماس مناسب بین ورقه‌های FRP و سطح بتن باعث درگیری بیشتر در سطح بتن می‌شود و لذا بارگسیختگی نهایی افزایش می‌یابد.

۲. شیار طولی که در این تحقیق برای اولین بار به‌عنوان جانشین آماده‌سازی سطحی متعارف مورد استفاده قرار گرفت، به‌عملت افزایش سطح تماس اپوکسی با سطح بتن زیرین در راستای تنش طولی، باعث افزایش محسوس بارگسیختگی نهایی شد؛ مثلاً ایجاد شیار طولی با عمق ۱۰ میلی‌متر باعث افزایش بارگسیختگی نهایی تا حدود ۳۰ درصد نسبت به نمونه‌های با آماده‌سازی سطحی شد که این امر باعث تبدیل شدن مود شکست به پارگی ورقه‌های FRP شد و نهایتاً ورق کامپوزیت گسیخته شد. این مسئله مؤید آن است که شیارهای طولی با عمق کافی می‌تواند به جلوگیری کامل از پدیده‌ی جداشدگی بینجامد. شایان ذکر است که استفاده از شیوهی شیازنی در زیر تیر و پرکردن آن با چسب قبل از اتصال صفحه‌ی تخت FRP، به‌عنوان یک شیوهی ابتکاری برای نخستین بار مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۹. منحنی بار - تغییر مکان نمونه‌های با ایجاد شیار طولی.

سطح زیرمنحنی بیشتری برخوردار است که نشان‌گر افزایش جذب انرژی این نمونه‌ها نسبت به سایر نمونه‌هاست. منحنی بار - تغییر مکان نمونه‌های با ایجاد شیار طولی بر سطح نمونه‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است.

### ۳. نتیجه‌گیری

هدف اصلی این تحقیق بررسی تأثیر آماده‌سازی سطحی بتن، و استفاده از شیوهی جایگزین آماده‌سازی بوده است. این مسئله با ساخت نمونه‌های بتنی در مقیاس

### منابع

1. Fukuyama, H. and Sugano, S. "Seismic rehabilitation of RC building", *Cement and Concrete Composites*, **22**(3), pp. 59-79 (2000).
2. Teng, J.G.; Chen, J.F.; Smith, S.T. and Lam, L. "FRP strengthened RC structures", *Journal of Composites for Construction, ASCE*, **6**(3), pp. 232-245 (2002)
3. Oehlers, D.J. "Development of design rules for retrofitting by adhesive bonding or bolting either FRP or steel plate to RC beams or slabs in bridges and building", *Composites, Part A*, **32**, pp. 1345-1355 (2001).
4. Karbhari, V.M. and Zhao, L. "Issues related to composite plating and environmental exposure effects on composite-concrete interface in external strengthening", *Composite Structures*, **40**(3), pp. 293-304 (1998).
5. Hutchinson, A.R., *Strengthening of Reinforced Concrete Structure*, London, Ch. 3, pp. 70-74 (1993).
6. Oh, H.S. and Sim, J. "Interface debonding failure in beams strengthened with externally bonded GFRP", *Composites Interfaces*, **11**(1), pp. 25-42 (2004).
7. Pimanmas, A. and Pornpongsaroj, P. "Peeling behavior of reinforced concrete beams strengthened with CFRP plates under various end restraint conditions", *Magazine of Concrete Research*, **56**(2), pp. 73-81 (2004).
8. Mohamad, A.; Subramaniam, K. and Ghosn, M. "Experimental investigation and fracture analysis of debonding between concrete and FRP sheets", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, **132**(9), pp. 914-923 (2006).
9. Pan, J. and Christopher, K. "Debonding along the FRP-concrete interface under combined pulling/peeling effects", *Engineering Fracture Mechanics*, **4**(74), pp. 132-150 (2007).
10. Rosenboom, O. and Rizkalla, S. "Experimental study of intermediate crack debonding in fiber-reinforced polymer strengthened beams", *ACI Structural Journal*, **105**(1), pp. 41-50 (2008).
11. Chajes, M.J.; Finch, W.W.; Januszka, T.F. and Thomason, T.A. "Bond and force transfer of composite material plates bonded to concrete", *ACI Structural Journal*, **93**(2), pp. 208-217 (1996).