



بررسی آزمایشگاهی تیرهای بتنی تقویت شده با کامپوزیت‌های الیافی نصب شده به روش سوراخ‌زنی

رضا مرشد*، علی شاهی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۳-۰۱
بازنگری: ۱۳۹۷-۱۱-۱۸
پذیرش: ۱۳۹۷-۱۲-۱۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۲-۱۴

کلمات کلیدی:

ورق‌های کامپوزیت الیافی
تقویت خمشی
روش سوراخ‌زنی
روش نصب سطحی
جداشدگی

خلاصه: یکی از مهم‌ترین کاربردهای کامپوزیت‌های الیافی، تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح با چسباندن این مصالح به وجه کششی تیر می‌باشد. بیشترین اشکال در این روش تقویت مربوط به جداشدگی زود هنگام ورق از سطح بتن است که موجب گسیختگی زودرس، قبل از حصول ظرفیت نهایی محاسباتی تیر می‌شود. رایج‌ترین روش آماده‌سازی سطح بتن جهت اتصال مناسب ورق‌های کامپوزیت الیافی، روش نصب سطحی (EBR) نام دارد که علاوه بر ایجاد آلودگی زیست‌محیطی، مشکل جداشدگی زودرس ورق تقویتی از سطح بتن را نیز به‌طور کامل برطرف نمی‌کند. در این مقاله به بررسی امکان جایگزینی روش پیشنهادی سوراخ‌زنی با نصب پیچ به جای آماده‌سازی به روش نصب سطحی در تقویت خمشی تیرهای بتنی با ورقه‌های کامپوزیتی پرداخته شده است. در این تحقیق ۱۰ عدد نمونه تیر به ابعاد $1700 \times 300 \times 150$ میلی‌متر مورد آزمایش خمش ۴ نقطه ای قرار گرفت. نمونه‌های مذکور با تغییر تعداد لایه‌ها و روش نصب ورق‌ها و در سه نمونه با تقویت توام خمشی و برشی مورد آزمایش قرار گرفتند. با استفاده از روش پیشنهادی مشکل جداشدگی در تمامی نمونه‌ها به‌طور کامل برطرف گردید. بیشترین افزایش مقاومت خمشی مربوط به نمونه‌ای بود که روی آن علاوه بر تقویت خمشی، تقویت برشی با روش نصب نزدیک به سطح میلگرد کامپوزیتی اجرا شده بود. اثر حذف چسب در ناحیه میانی ورق‌های تقویت نیز مورد بررسی قرار گرفت. نصب بدون چسب ورق‌ها در قسمت میانی باعث به تأخیر افتادن گسیختگی ورق‌ها گردید.

۱- مقدمه

از آنجایی که جایگزین نمودن سازه‌های موجود با سازه‌های جدید در اغلب موارد از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیست لذا یافتن راه حل مناسبی جهت ترمیم و تقویت سازه‌ها اهمیت شایانی پیدا می‌کند. در مقایسه با ساختن یک سازه‌ی جدید، تقویت سازه‌ی موجود حتی می‌تواند پیچیده‌تر باشد؛ زیرا شرایط سازه‌ای از قبل ثابت شده است. علاوه بر این همواره دسترسی به نواحی که نیاز به تقویت دارند ساده نیست. از سوی دیگر انتخاب یک شیوه‌ی نامناسب تعمیر یا تقویت، حتی می‌تواند باعث تضعیف عملکرد سازه شود. روش‌های سنتی استفاده شده به‌عنوان تکنیک‌های مقاوم سازی نظیر انواع مختلف پوشش‌های مسلح، شاتکریت، کابل‌های پس تنیدگی

امروزه می‌توان از بتن مسلح به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مواد ساختمانی موجود با کاربردی فراگیر نام برد. با این وجود، در سراسر دنیا سازه‌های بتنی زیادی وجود دارند که از لحاظ مهندسی غیرایمن و غیرقابل استفاده تلقی شده و نیاز به تقویت دارند. دلایل زیادی را می‌توان برای ضرورت انجام تقویت برشمرد که به‌طور خلاصه می‌توان به مواردی نظیر خطاهای محاسباتی، ضعف در اجرا، تغییر کاربری سازه، تغییر آیین‌نامه‌ها و فرسودگی سازه در طول زمان اشاره کرد [۱].

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Morshed@yazd.ac.ir



قرار گرفته در خارج از سازه و استفاده از صفحات فولادی مقیدشده به سازه، معمولاً نیاز به فضای زیادی دارند [۲] و اغلب در برابر شرایط محیطی آسیب پذیر می‌باشند.

مزایای مختلف کامپوزیت‌های الیافی موجب شده که استفاده از این مصالح برای بهسازی و تقویت سازه‌های مختلف از جمله سازه‌های بتن مسلح در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری قرار گیرد. از جمله مزایای این نوع کامپوزیت‌ها می‌توان به نسبت مقاومت به وزن بالا، سهولت کاربرد، مقاومت کافی در برابر خوردگی و ایجاد کمترین تغییرات در هندسه و شکل سازه‌ی تقویت‌شده اشاره کرد [۳].

یکی از مهم‌ترین کاربردهای کامپوزیت‌های الیافی، تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح با چسباندن این مصالح به وجه کششی تیر می‌باشد. اما کشش این ناحیه باعث پوسته‌پوسته شدن و یا جداسازی مصالح تقویتی از سطح بتن می‌شود. این پدیده به دلیل تأثیرپذیری از عوامل مختلف از قبیل ترک خوردگی و تمرکز تنش پیچیده می‌باشد [۴].

مشکل اصلی در تیرهای بتن مسلح تقویت‌شده با ورقه‌های کامپوزیتی، جداسازی ناگهانی ورق از سطح بتن است که موجب گسیختگی زودرس، قبل از حصول ظرفیت نهایی محاسباتی تیر می‌شود. شاید بتوان مهم‌ترین دلیل گسیختگی جداسازی را آماده نبودن سطح بتن جهت اتصال مناسب با کامپوزیت دانست [۵]. یکی از مسائل مهمی که باید در نصب کامپوزیت‌ها مورد توجه قرار گیرد، فراهم نمودن سطحی مناسب برای بتن جهت اتصال با کامپوزیت می‌باشد. برای آماده‌سازی سطح بتن باید با حذف لایه‌ی ضعیف سطح بتن (شیره‌ی بتن)، دانه‌های شن و ماسه را به‌منظور بهبود چسبندگی و فراهم نمودن یک سطح هموار نمایان ساخت. هم‌چنین هرگونه تخلخل و ناهمواری موضعی و هرگونه گرد و غبار و آلودگی در سطح بتن باید حذف شود. آماده‌سازی سطح بتن موجب تقویت اتصال شده و جداسازی را به تعویق می‌اندازد.

برای آماده‌سازی سطح بتن روش‌های مختلفی از جمله ماسه‌پاشی و جت آب و استفاده از سنگ فرز جهت تمیز و زبر نمودن سطح بتن وجود دارد. انتخاب روش مناسب جهت آماده‌سازی سطح بتن به عوامل مختلفی مانند هزینه‌ی عملیات، ابعاد سطح مورد نظر، دسترسی به مواد و وسایل مورد نیاز و سلامت و ایمنی روش بستگی دارد.

از مهم‌ترین مشکلات روش آماده‌سازی سطحی بتن می‌توان به هزینه‌ی عملیات، عدم دسترسی آسان به عضو مورد نظر، ایجاد

گرد و غبار و در نتیجه عدم امکان بهره‌برداری از سازه در حین عملیات تقویت اشاره نمود. هم‌چنین با این روش در بسیاری از موارد نمی‌توان مشکل جداسازی را برطرف نمود [۵]. در این تحقیق، روش پیشنهادی سوراخ‌زنی و تعبیه پیچ به‌منظور افزایش پیوند ورقه‌های کامپوزیت الیافی با بتن مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار گرفته‌است.

۲- پیشینه تحقیق

تاکنون روش‌های متعددی برای اتصال بهتر ورق‌های کامپوزیتی به سطح تیرهای بتنی ابداع شده‌است. در سال ۲۰۱۰ مستوفی‌نژاد و محمودآبادی، روشی نوین تحت عنوان شیارزنی را ابداع کردند که بعدها موسوم به روش EBROG گشت [۶]. در این روش به جای آماده‌سازی سطحی بتن در سطح بتن شیاری به عرض و عمق چند میلی‌متر ایجاد می‌شود. سپس این شیارها توسط اپوکسی پر شده و ورق کامپوزیتی روی آن چسبانده می‌شود. نتیجه‌ی این کار افزایش سطح تماس بین بتن و اپوکسی و هم‌چنین انتقال تنش‌های بین‌سطحی و لایه‌های مقاوم تر بتن است و از این طریق اتصال بین بتن و ورق تقویتی بهبود می‌یابد. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که با این روش می‌توان تا حد زیادی پدیده‌ی جداسازی را به تعویق انداخت و حتی در مواردی به مود گسیختگی پارگی ورق نیز رسید [۶]. مستوفی‌نژاد و شاملی در سال ۲۰۱۱ روش جدیدی را تحت عنوان EBRIG ارائه کردند. آن‌ها به‌منظور افزایش سطح تماس بین ورق تقویتی و تیر بتنی و انتقال نیروی برشی ایجاد شده بین آن‌ها به لایه‌های مقاوم تر بتن ورق کامپوزیتی را به‌طور مستقیم به سطح شیاری که در وجه کششی تیر ایجاد شده بود چسباندند. آن‌ها با آزمایش ۳۶ نمونه‌ی تیر بتنی به ابعاد $100 \times 140 \times 120$ میلی‌متر که با روش‌های مختلف تقویت‌شده بودند به این نتیجه رسیدند که هنگام استفاده از یک لایه ورق هر سه روش EBRIG و EBROG و EBRIG مؤثر خواهند بود و تیرها با پارگی ورق کامپوزیتی گسیخته می‌شوند. اما با اضافه کردن تعداد لایه‌های ورق و افزایش سطح مقطع آن روش EBRIG در به تعویق انداختن جداسازی نسبت به دو روش دیگر مؤثرتر بوده و تیرهای تقویت‌شده به این روش ظرفیت باربری بیشتری خواهند داشت [۷]. مستوفی‌نژاد و همکارانش در ادامه بررسی خود در مورد روش شیارزنی و پارامترهای موثر تحقیقات آزمایشگاهی کامل‌تری را انجام دادند و در تمام پژوهش‌های بعدی نیز بر مزایای

تعبیه می‌گردند. به کارگیری این روش باعث پایین آمدن احتمال جداسدگی و هم‌چنین محافظت بهتر کامپوزیت از آسیب‌های خارجی در مقایسه با روش چسباندن سطحی می‌شود. در این تحقیق تیرهایی که با روش نصب نزدیک به سطح تقویت شدند در مقایسه با تیرهایی که با روش EBR تقویت‌شده بودند، بین ۱۲ تا ۱۸ درصد بار نهایی بیشتری را تحمل کردند.

در سال ۲۰۱۷ فو، چن و تنگ برای کاهش جداسدگی ناشی از ترک‌های میانی در تیرهای تقویت‌شده با ورق کامپوزیتی، استفاده از نوارهای U شکل کامپوزیتی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد استفاده از نوارهای U شکل به صورت عمودی اثر نسبی محدودی بر جداسدگی سطحی دارد ولی استفاده از نوارهای U شکل به صورت مورب اثر بهتری بر کاهش جداسدگی سطحی دارد [۱۶]. در سال ۲۰۱۷ چناردی و رادا طاهای اثر ترکیب روش نصب نزدیک به سطح و تکنیک استفاده از نوارهای U شکل را بر روی تیرهای بتن مسلح بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها آن‌ها نشان داد که استفاده از نوارهای U شکل باعث بهبود عملکرد میلگردهای کامپوزیتی در روش نصب نزدیک به سطح خواهد شد. هر چند که ترکیب این دو روش می‌تواند باعث جداسدگی ناگهانی نوارهای U شکل در هنگام گسیختگی میلگردهای کامپوزیتی شود [۱۷].

۳- مشخصات نمونه‌ها و مصالح مصرفی

آزمایش‌ها بر مبنای تست ۴ ی تیرهای بتن آرمه با طول دهانه ساده ۱/۵ متر برنامه‌ریزی گردید. ابعاد، مقاومت بتن و آرماتور خمشی نمونه‌ها ثابت انتخاب گردید و تعداد لایه‌های ورق تقویتی و نحوه اتصال ورق به تیر از پارامترهای متغیر آزمایش‌ها بودند.

۳-۱- نمونه‌های بتن آرمه

به‌منظور انجام این آزمایش تعداد ۱۰ تیر بتن آرمه در ابعاد

جدول ۱. طرح اختلاط بتن مصرفی
Table 1. Concrete mix design

مقاومت فشاری (MPa)	W/C	سیمان (Kg)	آب (Kg)	ماسه (Kg)	شن (Kg)
۲۵	۰/۵	۴۰۰	۲۰۰	۹۰۰	۹۰۰

روش شیارزنی تاکید گردید [۸-۱۱]. روش دیگری تحت عنوان نصب صفحات کامپوزیتی به روش سوراخ‌زنی در سال ۲۰۱۲ توسط کمالی‌زاد و افتخار ابداع گردید [۱۲]. در این روش با ایده انتقال تنش به عمق مقطع، سوراخ‌هایی را در سطح مصالح ایجاد کرده، و در هنگام نصب ورق، این سوراخ‌ها با استفاده از چسب پر می‌شوند. در تقویت نمونه‌های آجری با این روش، بهبود عملکرد چشم‌گیری حاصل شد و نتایج آزمایش‌ها آزمایش‌ها نشان داد که این روش در انتقال سطح شکست به عمق مقطع مؤثر بوده و موجب بالا رفتن ظرفیت باربری می‌شود. در سال ۲۰۱۲ افتخار و یعقوبی روش پیشنهادی سوراخ‌زنی را در تیرهایی بدون آرماتور بررسی کردند و توانستند با افزایش سطح تماس بین رزین و بتن از طریق نفوذ رزین به عمق بتن مقاومت نهایی گسیختگی را افزایش دهند [۱۳].

در سال ۲۰۱۵ مرشد و نبوی‌زاده به‌منظور بررسی اثر روش مهارهای مکانیکی بر روی ظرفیت خمشی نمونه‌ها و میزان به تأخیر انداختن جداسدگی ورق کامپوزیتی از بتن، تعداد ۱۲ نمونه سالم و ۳ نمونه تیر ترک‌خورده به ابعاد ۱۷۰۰×۳۰۰×۱۵۰ میلی‌مترمکعب را مورد آزمایش خمشی ۴ نقطه‌ای قرار دادند [۱۴]. نتایج آزمایش‌ها آن‌ها حاکی از آن بود که استفاده از مهار مکانیکی فشاری در نواحی بحرانی ترک‌خوردگی به دلیل جلوگیری از ایجاد و انتشار ترک‌هایی که منجر به جداسدگی می‌شوند، باعث بالا رفتن ظرفیت باربری و تغییر شکل نمونه می‌شود. در بعضی نمونه‌ها که ورق‌ها به بدون استفاده از چسب نصب شدند، قرار گرفتن الیاف در سرتاسر تیر تحت کشش یکنواخت، موجب افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری به نسبت روش نصب سطحی با چسب شد. آزمایش‌ها نمونه‌های ترک‌خورده‌ی آن‌ها نشان داد به‌دلیل وجود ترک‌های قبل از آزمایش و قرار گرفتن ورق تحت تنش زیاد در این نواحی، روش نصب بدون استفاده از چسب نتایج بهتری را نشان می‌دهد. هم‌چنین آزمایش‌ها نشان داد با افزایش سطح مقطع و تعداد لایه‌های ورق در نمونه‌ها، وضعیت بحرانی‌تری از نظر پدیده جداسدگی پدید می‌آید. در سال ۲۰۱۶ خلیفه عملکرد و تأثیرگذاری روش‌های NSM (نصب نزدیک به سطح) و EBR برای تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح را مقایسه کرد [۱۵]. در روش نصب نزدیک به سطح که یکی از روش‌های معمول برای تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح است، میلگردهای کامپوزیتی الیافی به کمک چسب داخل شیارهایی و نزدیک به سطح

جدول ۲. مشخصات الیاف و چسب رزین اپوکسی مصرفی
Table 2. Specifications of FRP Sheet and Epoxy Resin

Quantum Wrap C200	ضخامت هر لایه (mm)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	کرنش پارگی (%)
	۰/۱۱۱	۴۹۵۰	۲۴۰	۱/۵
Quantum EPR 3301	ضخامت هر لایه (mm)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	مدول خمشی (MPa)
	۰/۴	۴۵	۰/۵	۳۰۰۰

و آزمایش گردید. به طور کلی موضوعات زیر در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت.

۱. بررسی اثر روش سوراخ زنی با پیچ بر روی نمونه‌ها
۲. بررسی اثر نصب قسمتی از ورق کامپوزیتی بدون استفاده از چسب
۳. بررسی اثر سطح مقطع و تعداد لایه‌های ورق بر روی رفتار تیر
۴. استفاده از تقویت برشی با میلگرد کامپوزیتی برای بررسی اثر حذف ترک برشی در جدادگی

در مورد نامگذاری نمونه‌ها بدین گونه عمل شد که اولین عدد بعد از حرف B نشان‌دهنده تعداد لایه‌های ورق به کار رفته می‌باشد. باید در نظر داشت عرض ورق همه‌ی نمونه‌ها ۹ سانتی‌متر و طول ورق نمونه‌ها ۱۴۰ سانتی‌متر می‌باشد. همچنین حرف b بعد از حرف B نشان‌دهنده استفاده از روش سوراخ زنی با پیچ می‌باشد. حرف U نشان‌دهنده عدم استفاده از چسب در نصب قسمت میانی ورق می‌باشد (در این گونه نمونه‌ها ۵۰ سانتی‌متر از وسط ورق بدون چسب است) و حرف G نیز نشان‌دهنده تقویت برشی با میلگردهای GFRP است و حرف S بیانگر خاموت گذاری با فاصله‌ی بیشتر (فاصله ۱۷۰ میلی‌متر در مقایسه با بقیه که از فاصله ۱۳۰ میلی‌متر استفاده شده‌است) می‌باشد. در نمونه‌های مورد بررسی طول و عرض ورق کامپوزیتی و همچنین تعداد پیچ‌ها نسبت به سطح ورق پارامترهای ثابت در نظر گرفته شدند و تعداد لایه‌های ورق و اثر چسب در ناحیه‌ی میانی تیر (ناحیه‌ی تنش حداکثر) و اثر تقویت برشی در جدادگی، متغیرهایی برای بررسی در نظر گرفته شدند. خلاصه نامگذاری تیرها در جدول

۱۷۰۰×۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متر مکعب ساخته شد. آرماتور تیرها ثابت و به صورت ۲ عدد میلگرد ۱۲ آردار از رده S۴۰۰ در قسمت کششی (پایین) و ۲ عدد میلگرد ۱۲ آردار نیز در بالای مقطع استفاده شد. برای خاموت‌ها نیز از میلگرد شماره ۸ از رده S۳۴۰ و با فاصله ۱۳۰ و ۱۷۰ میلی‌متر استفاده گردید. مقدار پوشش بتن از همه وجه‌ها برابر با ۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. مقاومت فشاری بتن برابر با ۲۵ مگاپاسکال بوده و طرح اختلاط بتن مصرفی در جدول ۳-۱ آورده شده‌است.

۲-۳- کامپوزیت‌های الیافی

ورق‌های کامپوزیت الیافی مصرف شده در این آزمایش از نوع الیاف کربن (CFRP) با نام تجاری Quantum Wrap C۲۰۰ و ساخت کشور انگلستان است. چسب رزین اپوکسی با نام تجاری Quantum EPR ۳۳۰۱ مورد استفاده قرار گرفت. این الیاف در تعداد لایه‌های مختلف و با عرض ۹۰ میلی‌متر و طول ۱۴۰۰ میلی‌متر بر روی وجه کششی تیر بتن آرمه چسبانده شد. مشخصات الیاف و چسب رزین اپوکسی مصرفی در جدول ۲ آمده‌است.

۴- مراحل انجام آزمایش

در این مرحله ابتدا ۴ نمونه اولیه به ترتیب به صورت تقویت نشده و تقویت شده به روش EBR با یک، دو و سه لایه ورق کامپوزیتی ساخته شدند و مورد آزمایش قرار گرفتند. بر اساس نتایج این نمونه‌ها و اهداف در نظر گرفته شده برای این پژوهش، ۶ نمونه دیگر طراحی

جدول ۳. نامگذاری نمونه‌ها بر اساس نحوه تقویت
Table 3. Sample Specifications

نمونه	نحوه تقویت
B0	نمونه شاهد
B1	استفاده از یک لایه ورق ۹ سانتی‌متری سراسری
B2	استفاده از ۲ لایه ورق ۹ سانتی‌متری سراسری
B3	استفاده از ۳ لایه ورق ۹ سانتی‌متری سراسری
B1-b	استفاده از یک لایه ورق ۹ سانتی‌متری سراسری به روش سوراخ‌زنی با پیچ
B2-b	استفاده از دو لایه ورق ۹ سانتی‌متری سراسری به روش سوراخ‌زنی با پیچ
B2-bUS	استفاده از ۲ لایه ورق ۹ سانتی‌متری سراسری به روش سوراخ‌زنی با پیچ و ۵۰ سانتی‌متر میانی بدون چسب و خاموت‌گذاری با فاصله ۱۷ سانتی‌متر
B3-bUS	استفاده از ۳ لایه ورق ۹ سانتی‌متری سراسری به روش سوراخ‌زنی با پیچ و ۵۰ سانتی‌متر میانی بدون چسب و خاموت‌گذاری با فاصله ۱۷ سانتی‌متر
B3-bUG	استفاده از ۳ لایه ورق ۹ سانتی‌متری سراسری به روش سوراخ‌زنی با پیچ و ۵۰ سانتی‌متر میانی بدون چسب+ تقویت برشی با میلگردهای GFRP
B3-G	استفاده از ۳ لایه ورق ۹ سانتی‌متری سراسری به صورت ساده+ تقویت برشی با میلگردهای GFRP

۳ ارائه شده‌است.

۴-۱- روش سوراخ‌زنی با پیچ

چسب پر شد. سپس سطح بتن به وسیله‌ی کاردک به چسب آغشته شده و ورق کامپوزیتی بریده شده روی سطح بتن چسبانده شد. در آخر پیچ‌هایی به قطر ۷ میلی‌متر و طول ۵ سانتی‌متر داخل سوراخ‌ها تعبیه گردید.

این روش به‌عنوان راه‌حلی برای جایگزینی روش آماده‌سازی سطحی و به‌منظور پیوستگی بهتر ورقه‌های کامپوزیتی به سطح بتن پیشنهاد و ارائه گردید. نحوه‌ی اجرای این روش بدین صورت بود که ابتدا نقاطی که برای سوراخ کردن بر روی وجه کششی در نظر گرفته شده‌اند، علامت‌گذاری شده و سپس با استفاده از دستگاه دریل و مته‌ی شماره‌ی ۸ سوراخ‌هایی به عمق ۵ سانتی‌متر ایجاد گردید. سپس سوراخ‌های ایجاد شده و سطح بتن به‌وسیله‌ی جت آب تمیز شد تا آلودگی‌ها و ذرات ریز ناشی از سوراخ کردن به‌طور کامل محو گردند. پس از مدتی صبر برای خشک شدن سطح بتن، چسب به‌وسیله‌ی سرنگ به داخل سوراخ‌ها تزریق شده و سوراخ‌ها کاملاً با

در این روش به دلیل نفوذ چسب به عمق بتن و هم‌چنین نفوذ پیچ تا عمق بیش از کاور بتن و مهار ورقه‌های کامپوزیتی توسط پیچ‌ها، تنش‌های ایجاد شده به عمق بیشتری از تیر بتنی منتقل می‌شوند که حاصل آن می‌تواند به تأخیر پدیده‌ی جدایش ورق تقویتی و در نهایت افزایش بار گسیختگی و شکل‌پذیری تیر منجر شود.

۴-۲- تقویت نمونه‌ها

نمونه B0 نمونه شاهد بوده که بدون هیچ گونه تقویت آزمایش گردید. نمونه‌های B1 و B2 و B3 با روش نصب آماده‌سازی

به وسیله‌ی چسب اپوکسی به وجه کششی تیر چسبانده شد. نمونه‌ی B1-b اولین نمونه‌ی تقویت‌شده به روش سوراخ‌زنی با پیچ بود. در این نمونه یک لایه ورق کامپوزیت الیاف کربن به طول ۱۴۰ سانتی‌متر و عرض ۹ سانتی‌متر به وجه کششی تیر چسبانده شد و سپس پیچ‌هایی به قطر ۷ میلی‌متر و طول ۵ سانتی‌متر در سوراخ‌هایی که از قبل آماده شده بود، تعبیه شدند.

نمونه‌ی B2-b مشابه نمونه‌ی B1-b بود فقط با این تفاوت که در این نمونه پیچ‌ها از بین دو لایه ورق عبور داده شدند (شکل ۱).

در این پژوهش به منظور بررسی اثر ضعف مقاومت برشی که می‌تواند منجر به شروع زود هنگام ترک‌های برشی و جدایی سریع‌تر ورق‌های کامپوزیت گردد، خاموت‌گذاری تعدادی از تیرها با فاصله بیشتری (۱۷ سانتی‌متر به جای ۱۳ سانتی‌متر) انجام شد. انتظار می‌رفت جدایی و پارگی ورق‌های کامپوزیت در این نمونه‌ها که با ترک‌خوردگی بیشتری همراه هستند، زودتر اتفاق افتد. این نمونه‌ها با پسوند S مشخص شده‌اند. البته بعداً دو نمونه از این تیرها با روش نزدیک به سطح با میلگرد GFRP به قطر ۴ میلی‌متر در دهانه برش تقویت برشی شدند تا بتوان تاثیر کامل تقویت خمشی را روی آن‌ها مطالعه کرد. روش نصب این میلگردها بدین صورت بود که ابتدا در دهانه برش که ترک‌های برشی حداکثر است به وسیله دستگاه فرز و سنگ گرانیت بر شیارهایی قائم به طول ۳۰ سانتی‌متر و عرض ۶ میلی‌متر و عمق ۱۲ میلی‌متر بر روی وجوه کناری تیر بتنی ایجاد گردید. پس از آماده شدن شیارها داخل شیارها به وسیله‌ی جت آب تمیز شده و پس از خشک شدن سطح بتن، داخل شیارها به رزین مربوط به کاشت میلگرد آغشته شده و سپس میلگردهای GFRP بریده شده به طول ۳۰ سانتی‌متر داخل شیارها تعبیه شدند.

در نمونه‌ی B2-bUS که به روش سوراخ‌زنی با پیچ و با دو لایه FRP تقویت شد، ورق‌های تقویت در ۵۰ سانتی‌متر میانی تیر فاقد چسب و بدون پیوستگی با سطح تیر است (شکل ۲).

در نمونه‌ی B3-bUS که خاموت‌گذاری با فاصله‌ی بیشتری انجام گرفت به منظور بررسی اثر توأمان روش سوراخ‌زنی، سه لایه ورق FRP به طول ۱۴۰ سانتی‌متر بریده شد و همانند نمونه‌ی قبلی به روش سوراخ‌زنی با پیچ و در ۵۰ سانتی‌متر میانی بدون چسب تقویت شد. نمونه‌ی B3-bUG را بعد از تقویت برشی به وسیله‌ی میلگرد GFRP، با سه لایه ورق FRP به طول ۱۴۰ سانتی‌متر و همانند



شکل ۱. تقویت نمونه‌ی B2-b
Fig. 1. Sample B2-b



شکل ۲. تصویر نمونه تقویت‌شده‌ی B2-bUS
Fig. 2. Sample B2-US



شکل ۳. تصویر نمونه تقویت‌شده‌ی B3-bUG
Fig. 3. Sample B3-bUG

سطحی (EBR) تقویت گردیدند. در این روش پس از آماده‌سازی سطحی نمونه به وسیله دستگاه فرز و برداشتن یک لایه‌ی بسیار نازک و سست از شیره‌ی بتن، بسته به شماره نمونه به ترتیب یک یا دو و یا سه لایه‌ی ورق کامپوزیت با طول ۱۴۰ سانتی‌متر و عرض ۹ سانتی‌متر

جدول ۴. خلاصه نتایج آزمایش‌ها
Table 4. Summary of test results

نمونه	تغییر شکل (mm)	بار حداکثر (KN)	نحوه گسیختگی
B0	۲۵	۱۰۱/۳۲	خرد شدن بتن
B1	۱۰/۵	۱۱۳/۶۹	جداشدگی ورق در اثر ترک های خمشی برشی
B2	۱۰/۹۶	۱۱۵/۴۶	جداشدگی به همراه کنده شدن قسمتی از کاور بتن در اثر ترک های خمشی برشی
B3	۱۱/۳	۱۱۷/۲۲	جداشدگی ورق در اثر ترک های خمشی برشی
B1-b	۱۵/۵	۱۱۵/۴۶	پارگی ورق در اثر ترک های خمشی برشی
B2-b	۱۰/۰۹	۱۲۲/۵۳	پارگی ورق در اثر ترک های خمشی برشی بدون کوچک ترین جداشدگی
B2-bUS	۳۹/۶۱	۱۱۳/۶۹	ریش شدن ورق و گسیختگی برشی
B3-bUS	۷/۹۳	۱۱۳/۶۹	گسیختگی برشی در یک طرف تیر
B3-bUG	۲۱/۹	۱۳۴/۸۹	ریش شدن ورق در ناحیه میانی بدون چسب
B3-G	۹/۱۸	۱۲۴/۲۹	جداشدگی ورق در اثر ترک های میانی



شکل ۴. دستگاه تست خمش
Fig. 4. Bending Test Apparatus

تیرهای قبلی با روش سوراخ زنی با پیچ و در حالت ناحیه میانی بدون چسب، به صورت خمشی تقویت شد (شکل ۳).

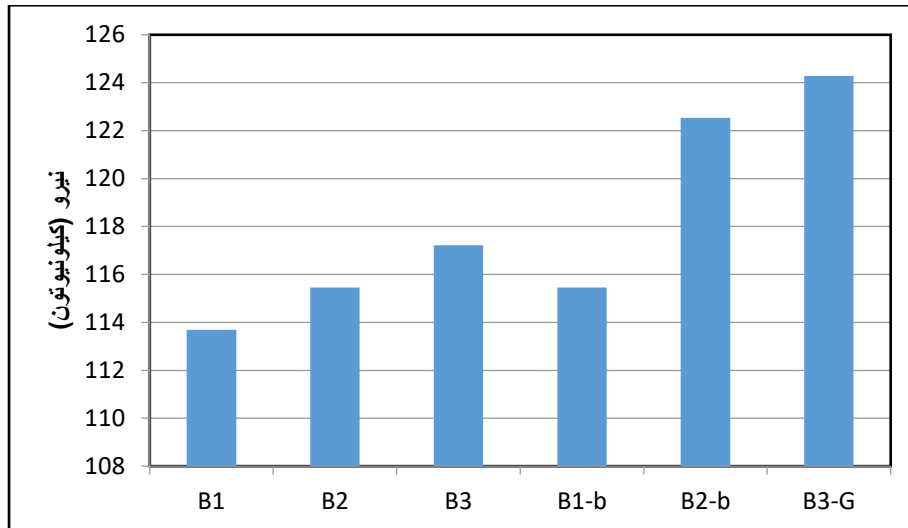
۳-۴- نحوه آزمایش

همان طور که قبلاً اشاره شد تیرهای ساخته شده تحت آزمایش خمش ۴ نقطه ای قرار گرفتند. به منظور اعمال بار در این آزمایش، از دستگاه تست خمشی نصب شده روی کف قوی آزمایشگاه بتن و سازه دانشگاه یزد استفاده شده است. نحوه قرارگیری نمونه در دستگاه به منظور اعمال بار در شکل ۴ نشان داده شده است. فاصله نقاط بارگذاری ۳۰ سانتی متر و فاصله تکیه گاه ها ۱۵۰ سانتی متر بود.

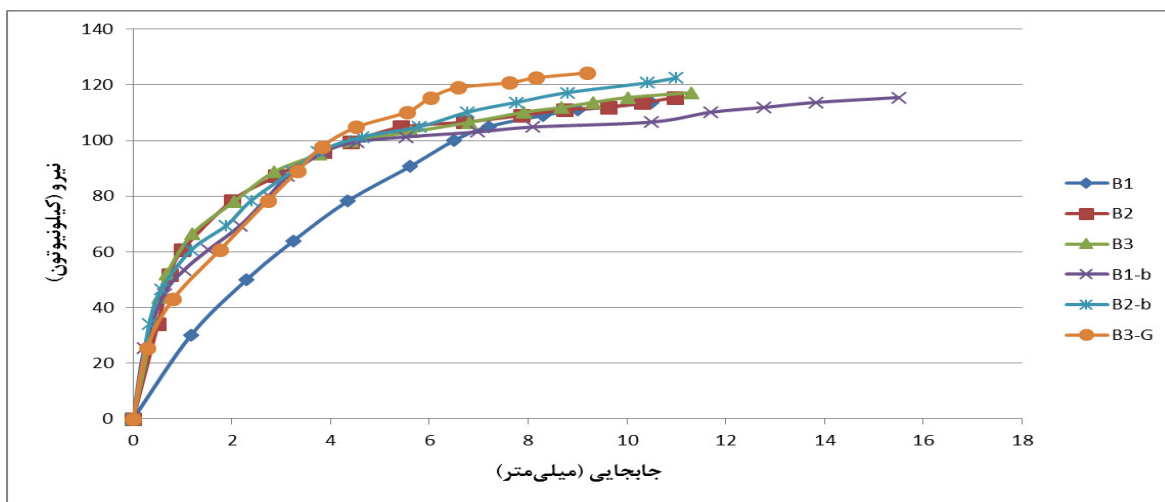
به منظور ثبت نتایج مربوط به جابجایی در وسط دهانه تیر در حین بارگذاری، از جابجایی سنج (LVDT) با دقت ۰/۰۱ میلی متر استفاده شده است.

۵- ارائه و بررسی نتایج

خلاصه نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. در ادامه تاثیر پارامترهای مختلف روی نتایج با جزئیات



شکل ۵. مقایسه رابطی ظرفیت باربری با تعداد لایه‌های ورق تقویت
Fig. 5. Load Capacity Vs. Number of FRP Sheet Layers



شکل ۶. مقایسه رابطی بار-جابجایی با تعداد لایه‌های الیاف در تیرها
Fig. 6. Comparison of Load-Displacement Curves

لایه‌ها نبوده‌است. در شکل‌های ۵ و ۶ مقایسه‌ای بین نتایج نمونه‌هایی که با تعداد لایه‌های مختلف تقویت‌شده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، انجام گرفته‌است. لازم به ذکر است که رابطه بار-تغییرمکان بعد از گسیختگی ورق‌های تقویت دارای افت ناگهانی مقاومت بودند که این ناحیه در نمودارها حذف شده‌است. افزایش سطح مقطع ورق آن‌چنان که انتظار می‌رفت باعث افزایش ظرفیت باربری در تیرهای اولیه نشد که یکی از دلایل می‌تواند

بیشتر ارائه شده‌است.

۵-۱- بررسی اثر افزایش سطح مقطع کامپوزیت الیافی

با افزایش تعداد لایه‌های ورق تقویت، ظرفیت باربری افزایش می‌یابد ولی چگونگی پیوند این ورقه‌ها با بتن و تنش تماسی حاصل که با افزایش تعداد لایه‌ها افزایش می‌یابد، در نتایج حاصله بسیار تأثیرگذار است به گونه‌ای که افزایش ظرفیت باربری متناسب با تعداد

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0.9 \varepsilon_{fu} \quad (1)$$

همان‌طور که در این رابطه مشخص است اگر تعداد لایه (n) و یا ضخامت ورق (t_f) افزایش پیدا کند، کرنش جدشدگی (ε_{fd}) کاهش پیدا می‌کند.

۲-۵- بررسی روش پیشنهادی سوراخ‌زنی با پیچ

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از روش سوراخ‌زنی با پیچ می‌تواند باعث جلوگیری از جدشدگی سطحی ورقه کامپوزیت الیافی از سطح بتن و افزایش ظرفیت باربری تیر شود. تاثیر این روش پیشنهادی در شکل‌های ۸ و ۹ مشخص می‌گردد.

بر طبق نتایج آزمایش‌ها در تیر B1-b با وجود تقویت با روش سوراخ‌زنی با پیچ نسبت به تیر B1 افزایش قابل‌ملاحظه‌ای در ظرفیت باربری مشاهده نگردید (شکل ۱۰). ولی در تیرهای B2-b و B3-bUG که به ترتیب از دو و سه لایه ورق FRP استفاده شده بود، نسبت به تیرهای B2 و B3 افزایش مقاومت قابل توجه بود.

با توجه به نتایج با افزایش تعداد لایه‌های ورق تقویت، به کار بردن روش مناسبی برای جلوگیری از جدشدگی سطحی زود هنگام ضروری است. روش سوراخ‌زنی با پیچ با جلوگیری از جدشدگی سطحی زود هنگام، باعث افزایش ظرفیت باربری در تیرهای تقویت شده شده است.

۳-۵- بررسی تاثیر نصب الیاف بدون استفاده از چسب در قسمت میانی تیر

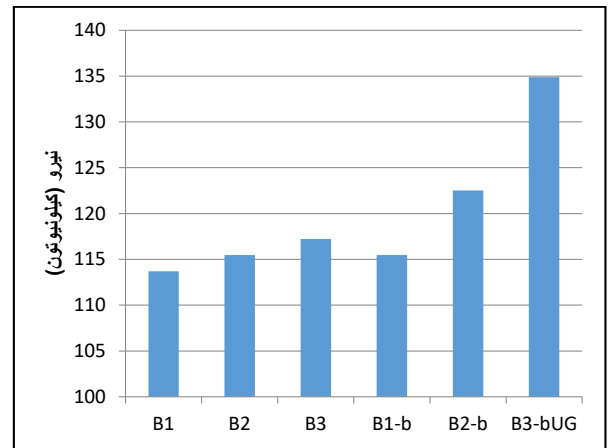
در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ تیرهای تقویت شده با چسب و بدون چسب در قسمت میانی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

اثر حذف چسب در قسمت میانی بر روی ۳ نمونه مورد آزمایش قرار گرفت که نمونه‌های B2-bUS و B3-bUS به دلیل ترک خوردگی برشی زیاد، زودتر از انتظار گسیخته شدند (شکل ۱۳).

در تیر B3-bUG که تقویت برشی شده بود، ظرفیت باربری به بالاترین حد در بین نمونه‌ها رسید و مقدار جابجایی نیز بسیار بالا بود. نحوه‌ی گسیختگی این تیر نیز بدین صورت بود که با افزایش بار و جابجایی، رشته‌های الیاف به صورت تکی و به تدریج پاره می‌شدند و در نهایت نیز الیاف به صورت رشته‌رشته درآمدند و پارگی ناگهانی رخ نداد.



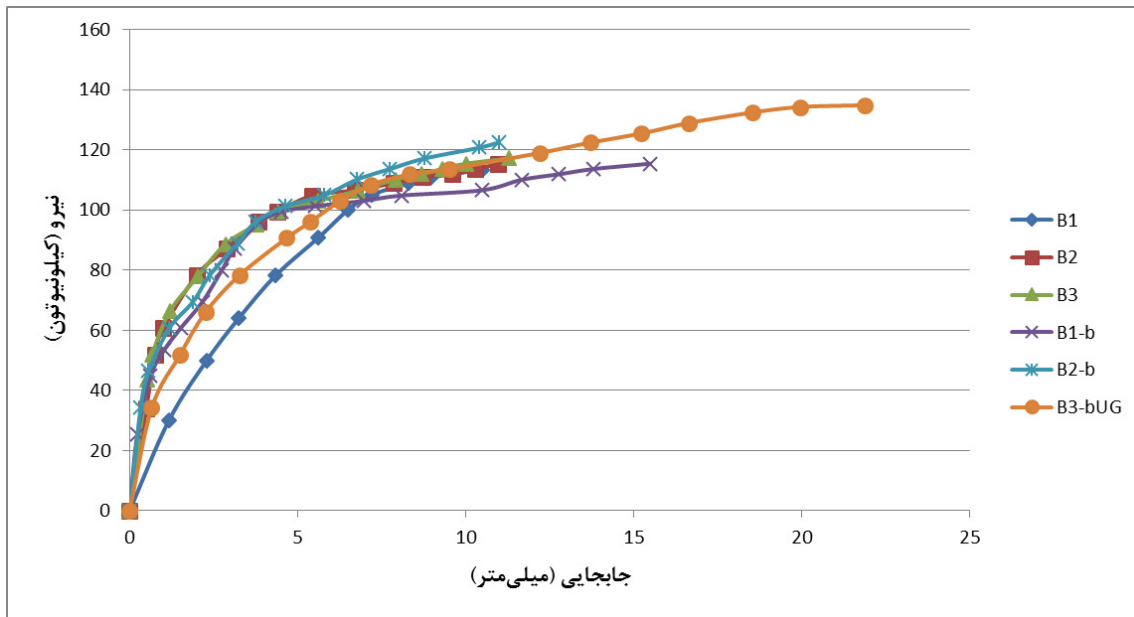
شکل ۷. جدشدگی ورق تقویت تیر B2
Fig. 7. FRP De-bonding at Sample B2



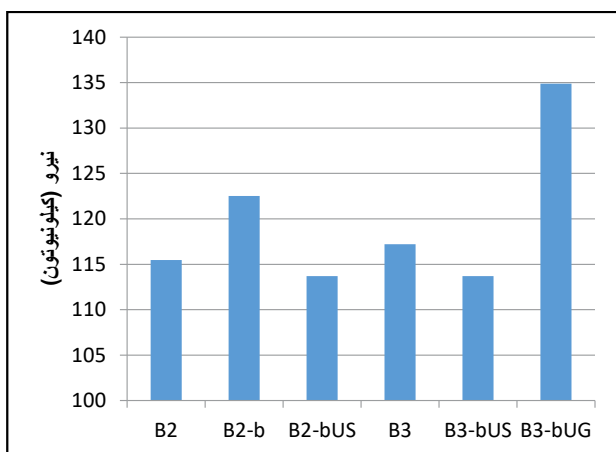
شکل ۸. تاثیر روش سوراخ‌زنی با پیچ بر ظرفیت باربری نمونه‌ها
Fig. 8. Effect of Proposed Method on Load Capacity of Specimens

جدشدگی زودرس ورق‌ها باشد (شکل ۷).

در نمونه‌ی B1 مقدار بار حداکثر در آزمایش در حد مقاومت قابل انتظار از روابط تئوریک شد ولی در نمونه‌های B2 و B3 به دلیل جدشدگی سطحی، ظرفیت باربری بسیار کمتر از مقدار مورد انتظار شد. در نمونه‌هایی که به وسیله‌ی سوراخ‌زنی با پیچ از جدشدگی سطحی جلوگیری شد، ظرفیت باربری با افزایش تعداد لایه‌ها افزایش یافت و به مقادیر مورد انتظار نزدیک شد. روابط تجربی آیین‌نامه‌ای نیز احتمال جدشدگی زود هنگام با افزایش تعداد لایه‌های ورق را بخوبی پیش‌بینی می‌کنند. این مسئله در رابطه کرنش جدشدگی در آیین‌نامه ACI 440-2R-08 به چشم می‌خورد [۱۸].



شکل ۹. تأثیر روش سوراخ‌زنی با پیچ بر رابطه بار-جابجایی نمونه‌ها
 Fig. 9. Effect of Proposed Method on Load-Displacement Curves



شکل ۱۱. تأثیر نصب الیاف بدون چسب در قسمت میانی بر ظرفیت باربری نمونه‌ها

Fig. 11. Effect of Elimination of Adhesive at mid-part of Samples



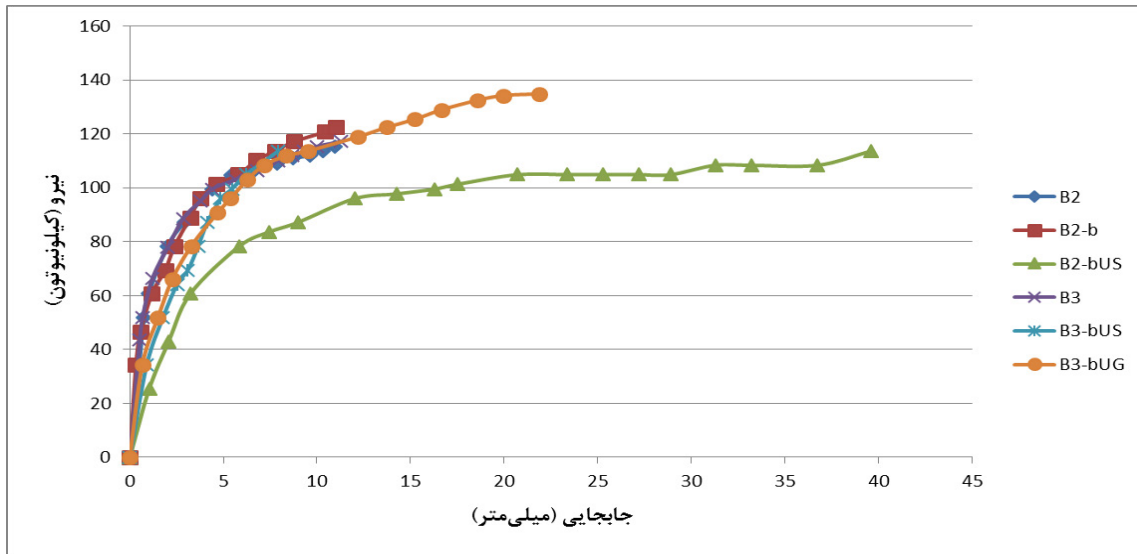
شکل ۱۰. نحوه گسیختگی تیر B1-b
 Fig. 10. FRP Rupture at Sample B1-b

۴-۵- بررسی اثر ترک‌های برشی و تقویت برشی

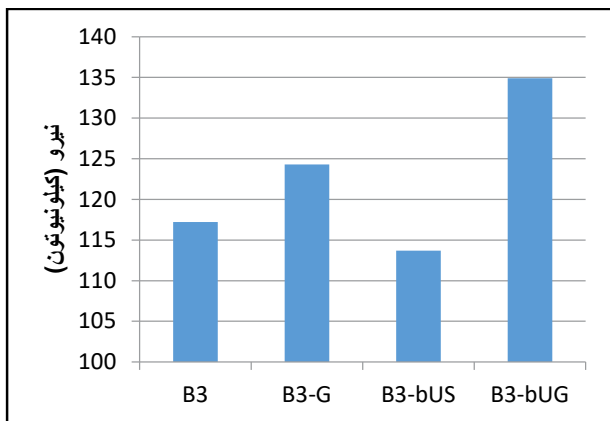
در این پژوهش برای بررسی میزان تأثیر ترک‌های برشی بر ظرفیت باربری تیرها و تأثیر آن بر جداسدگی، دو نمونه از تیرها با ضعف مقاومت برشی (به صورت فاصله‌ی بیشتر خاموت‌گذاری) آزمایش گردیده‌اند. ضمناً رفتار همین دو نمونه در حالتی که با تقویت برشی تیرها با میلگرد GFRP از ایجاد ترک‌های برشی جلوگیری گردید نیز مقایسه گردید. در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ این نمونه‌ها با

یکدیگر مقایسه شده‌اند.

نمونه‌ی B3 همان‌طور که قبلاً بیان شده بود در اثر ترک‌های خمشی برشی دچار جداسدگی سطحی شد و در اثر آن از حداکثر ظرفیت الیاف استفاده نشد. تیر B3-bUS که برای بررسی اثر ترک‌های برشی، با فاصله‌ی بیشتر خاموت‌گذاری شده بود نیز خیلی زود به صورت برشی گسیخته شد و بررسی تأثیر ترک‌های برشی بر الیاف FRP ناقص ماند.



شکل ۱۲. تأثیر نصب الیاف بدون چسب در قسمت میانی بر رابطه بار-جابجایی نمونه‌ها
 Fig. 12. Effect of partial Elimination of Adhesive on Load-Displacement Curves



شکل ۱۴. مقایسه ظرفیت باربری نمونه‌هایی با سه لایه ورق با و بدون تقویت برشی
 Fig. 14. Load Capacity of Samples strengthened with 3 layers of FRP Sheet

نسبی، تأثیر تقویت خمشی به مراتب بهتر بود.

۶- نتیجه‌گیری

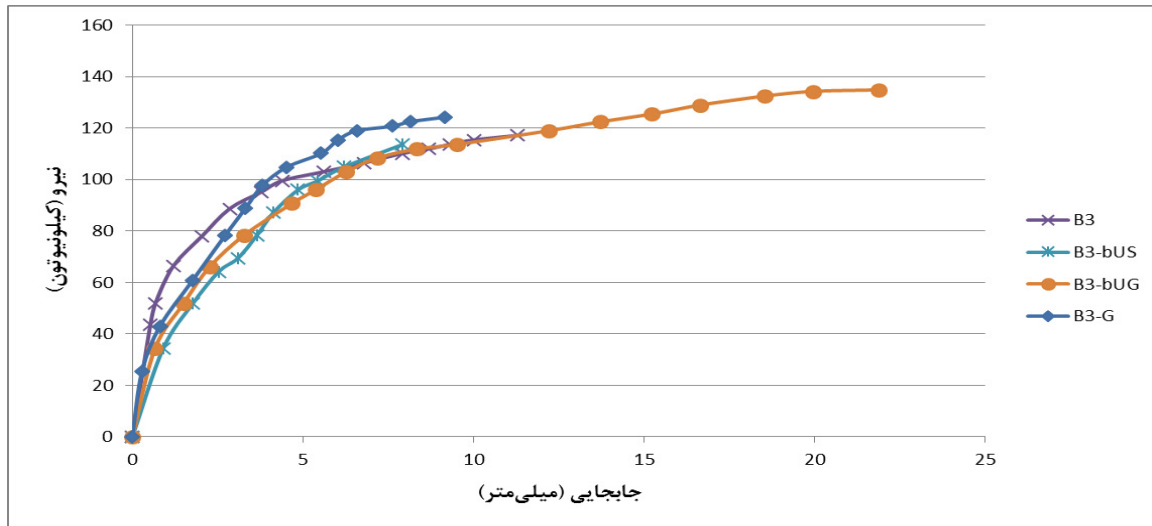
در این پژوهش که در آزمایشگاه بتن و سازه دانشگاه یزد به انجام رسید، روش پیشنهادی سوراخ‌زنی همراه با تعبیه پیچ جهت جلوگیری از جدا شدگی ورقه‌های تقویتی کامپوزیت‌های الیاف کربن از وجه کششی تیر به صورت آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. خلاصه نتایج به دست آمده از انجام این تحقیق را می‌توان به شرح



شکل ۱۳. نحوه گسیختگی تقویت در تیر B3-bUS
 Fig. 13. Rupture of FRP Sheet at Sample B3-bUS

اما در تیرهای B3-bUG و B3-G که به وسیله میلگردهای GFRP تقویت برشی شده بودند و از گسترش ترک‌های برشی جلوگیری شده بود، نتایج مناسب‌تری به دست آمد. البته مد شکست تیر B3-G با جدا شدگی ورقه تقویت همراه گردید (شکل ۱۶).

بر اساس نتایج، ضعف برشی و ترک‌های برشی در جدا شدگی سطحی و در نتیجه کاهش ظرفیت باربری تیرهای تقویت شده با کامپوزیت‌های الیافی موثر است. وجود ترک‌های برشی باعث شد جدا شدگی به سرعت به سمت انتهای تیر پیش رود و ورق به صورت کامل کنده شود. با صورت تقویت برشی تیرهای دارای ضعف برشی



شکل ۱۵. مقایسه عملکرد نمونه‌هایی با سه لایه ورق با و بدون تقویت برشی
Fig. 15. Load-Displacement Curves of Samples strengthened with 3 layers of FRP Sheet

زود هنگام گردید که روش سوراخ‌زنی با پیچ باعث حذف کامل مد جداشدگی گردید.

۴- با حذف رزین و چسب در قسمت میانی ورقه‌های الیاف کربن، مد شکست از حالت پارگی ناگهانی ورقه‌ها به گسیختگی تدریجی الیاف تبدیل و گسیختگی ورق‌ها به تاخیر افتاد.

۵- تقویت برشی تیرهای دارای ضعف آرماتور برشی با کاشت نزدیک به سطح میلگردهای GFRP، روشی موثر و کارآمد شناخته شد و به‌طور کامل از توسعه ترک و شکست برشی تیرهای تقویت‌شده جلوگیری نمود.



شکل ۱۶. جداشدگی ورق تقویت تیر B3-G
Fig. 16. De-bonding of FRP Sheet at Sample B3-G

مراجع

- [1] Eftekhari, M. R., The Effect of Flexural Reinforcement and External Reinforcement on the Behavior of Beams Strengthened by CFRP Sheets, Doctoral Thesis, Isfahan University of Technology, 2010 (in Persian).
- [2] Carolin, A., Carbon Fiber Reinforced Polymers for Strengthening of Structural Elements, Doctoral Thesis, Lulea University of Technology, Sweden, p.247, 2003.
- [3] Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., and Lam, L., FRP strengthened RC structures, Journal of Composites for Construction, ASCE, Vol.6, No. 3, pp. 232-245, 2002.

زیر بیان کرد:

۱- در نمونه‌های ساخته شده در این پژوهش، جداشدگی اتفاق افتاده از نوع جداشدگی ناشی از اثر تداخل ترک در سطح مشترک بود و ترک‌های خمشی و خمشی برشی پدید آمده باعث جداشدگی از این نوع شد.

۲- ترک‌های برشی گرچه عامل شروع‌کننده جداشدگی سطحی نیستند ولی تقویت برشی و کنترل این ترک‌ها توانست پدیده‌ی جداشدگی را به میزان قابل‌توجهی به تأخیر بیندازد.

۳- افزایش تعداد لایه‌های ورق تقویتی منجر به جداشدگی

- A., Heydari Mofrad, H., Investigating the effects of concrete compressive strength, CFRP thickness and groove depth on CFRP-concrete bond strength of EBROG joints, *Construction and Building Materials*, Volume 189, 20 November 2018, Pages 323-337.
- [12] Kamalizad, M., Eftekhar, M., Enhancement of Performance of FRP Composites in Strengthening Masonary Structures, *Proceedings of International Conference on Seismic Retrofitting*, Tabriz, Iran, 2012.
- [13] Eftekhar, M. R., Yaghoubi, M., Boring Method for Delaying Debonding in the Concrete Beams Strengthened By FRP Sheets. *The Fourth Annual National Conference of Concrete*, Iran, 2012 (in Persian).
- [14] Nabavizadeh, S. A., *The Behavior of Concrete Beams Strengthened with FRP Sheets By the Proposed Anchorage System*. MSc Thesis, Yazd University, 2015 (in Persian).
- [15] Khalifa, A. M., Flexural Performance of RC Beams Strengthened with Near Surface Mounted CFRP Strips, *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 55, No. 2, pp. 1497-1505, 2016.
- [16] Fu, B., Chen, G. M., Teng, J. G., Mitigation of Intermediate Crack Debonding in FRP- Plated RC Beams Using FRP U-jackets, *Composite Structures*, No. 176, pp. 883-897, 2017.
- [17] Chennareddy, R., Reda Taha, M. M. Effect of Combining Near Surface Mounted and U-Wrap Fiber Reinforced Polymer Strengthening Techniques on Behavior of Reinforced Concrete Beams. *ACI Structural Journal*, Vol. 114, No. 3, pp. 719-728, 2017.
- [18] ACI Committee 440, ACI 440.2R-08. *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*, USA, 2008.
- [4] Huy Binh Pham., Riadh Al-Mahaidi., Prediction Models for Debonding Failure Load of Carbon Fiber Reinforced Polymer Retrofitted Reinforced concrete Beams, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 10, No. 1, 2006.
- [5] Karbhari, V. M., and Zhao, L., Issues Related to Composite Plating and Environmental Exposure Effects on Composite- Concrete Interface in External Strengthening Composites Structures, Vol. 40, No. 3, pp. 293-304, 1998.
- [6] Mostofinejad, D., Mahmoudabadi, E., Grooving as Alternative Method of Surface Preparation to Postpone Debonding of FRP Laminates in Concrete Beams, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 14, No. 6, 2010.
- [7] Mostofinejad, D., Shameli, M., Performance of EBROG Method under Multilayer FRP Sheets for Flexural Strengthening of Concrete Beams, *Procedia Engineering*, No. 14, pp. 3176-3182, 2011.
- [8] Mostofinejad, D., Moghaddas, A., Bond efficiency of EBR and EBROG methods in different flexural failure mechanisms of FRP strengthened RC beams, *Construction and Building Materials*, Volume 54, 15 March 2014, Pages 605-614.
- [9] Mostofinejad, D., Khozaei, K., Effect of GM patterns on ductility and debonding control of FRP sheets in RC strengthened beams, *Construction and Building Materials*, Volume 93, 15 September 2015, Pages 110-120.
- [10] Ghorbani, M., Mostofinejad, D., Hosseini, A., Experimental investigation into bond behavior of FRP-to-concrete under mixed-mode I/II loading, *Construction and Building Materials*, Volume 132, 1 February 2017, Pages 303-312.
- [11] Mostofinejad, D., Heydari Mofrad, M., Hosseini,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Morshed, A. Shahi, *Experimental investigation on RC beams strengthened with FRP sheets by drilling method*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(2) (2020) 455-468.

DOI: [10.22060/ceej.2019.14485.5669](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.14485.5669)



