

تحقیقات بتن

سال چهاردهم، شماره دوم

تابستان ۱۴۰۰

ص ۱۱۷-۱۰۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹

## بررسی تأثیر آمادگی سطوح تیرهای بتنی تقویت شده با CFRP بر ظرفیت خمشی آنها

معین پاکرو\*

دانشجو کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات خراسان رضوی، گروه عمران، نیشابور.

بنیامین عامری کردیانی

کارشناس ارشد سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، دانشکده مهندسی، مشهد.

حمید وارسته پور

استادیار، موسسه آموزش عالی صنعت آب و برق مشهد، گروه عمران، مشهد.

### چکیده

بسیاری از سازه‌های بتن آرمه به خاطر حوادث طبیعی مانند نیروی زلزله، باد و یا بر اثر خستگی مصالح و یا عوامل خوردنده در معرض آسیب قرار گرفته‌اند. از این رو استفاده از فناوری‌های جدید جهت نوسازی و بهسازی این سازه‌ها حایز اهمیت است. امروزه کامپوزیت‌های پلیمری الیافی (CFRP) با مقاومت بالا به طور گسترده در بهسازی و مقاوم سازی سازه‌های بتنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این کامپوزیت‌ها برای تقویت اجزای مختلف سازه از جمله تیر، ستون و اجزای صفحه‌ای مانند دال سقف و دیوار برشی قابل کاربرد است. در این مقاله به بررسی تأثیر آمادگی سطوح تیرهای بتنی تقویت شده با CFRP بر ظرفیت خمشی آنها پرداخته شده است. ۸ عدد تیر بتن مسلح توسط الیاف کامپوزیتی ساخته شد و مورد آزمایش بارگذاری خمشی چهار نقطه‌ای قرار گرفت. با بررسی نتایج آزمایشگاهی روش ابداعی ارائه شد که در آن آماده‌سازی در حالت سند بلاست علاوه بر افزایش ظرفیت خمشی منجر به تعویق جداسازی زودرس در تیرهای مورد آزمایش گردید. همچنین مشاهده شد میزان ظرفیت خمشی در تیر با یک لایه تقویت CFRP به میزان ۴۵/۹ درصد و دو لایه تقویت CFRP به میزان ۶۴/۸ درصد نسبت به تیر شاهد بیشتر شد.

واژه‌های کلیدی: آمادگی سطح، تیر بتن مسلح، CFRP، مطالعه آزمایشگاهی، جداسازی سطحی.

\* نویسنده مسئول: pakroo\_moein@yahoo.com

## ۱- مقدمه

پایین بتن کارایی بهتری دارد [۴]. مستوفی‌نژاد و محمودآبادی در سال ۲۰۱۰ روش جدید شیارزنی را به‌عنوان روشی مناسب برای جلوگیری از شکست زودرس برای جای‌گزینی آماده‌سازی سطحی ارائه نمودند که در آن با ایجاد شیار عرضی، قطری و طولی بر روی نمونه‌ها و پرکردن آنها با چسب و چسباندن ورق FRP روی سطح کل نمونه و مقایسه تأثیر آن در بار نهایی نسبت به آماده‌سازی سطحی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تغییر نوع از شیار عرضی به قطری و در نهایت طولی، موجب افزایش مقدار بار نهایی گسیختگی می‌شود. همچنین افزایش عمق شیار طولی، موجب تغییر نوع گسیختگی از جداشدگی زودرس به پارگی ورق FRP خواهد شد [۵]. مستوفی‌نژاد و شاملی در سال ۲۰۱۰ با انجام آزمایش‌های بر روی تیرهای بتنی غیرمسلح تقویت شده با ۱، ۲ و ۳ لایه CFRP به روش بدون آماده‌سازی سطحی، با آماده‌سازی سطحی، شیارزنی و روش نصب سطحی ورق داخل شیار به بررسی هرکدام از روش‌ها پرداختند [۶]. مستوفی‌نژاد و مقدس بیدآبادی در سال ۱۳۹۰ با بررسی نمونه‌هایی از تیرهای بتنی و تقویت آن با ورق‌های CFRP با روش شیارزنی و آماده‌سازی سطحی متعارف و آزمایش ۴ نقطه‌ای تیرهای مذکور به این نتیجه رسیدند که روش شیارزنی در تغییر مکانیسم جداشدگی زودرس و نیز افزایش ظرفیت باربری تیر مؤثرتر است [۷]. صدرممتاز و رستمی‌عتیق در سال ۱۳۹۱ تعداد ۹ عدد تیر بتنی که ۸ عدد آن در یک لایه و از یک جهت با ورق CFRP تقویت شده بود و انتهای آنها با روش‌های تعبیه سوراخ در زیر ورق و دور پیچ کردن انتهای ورق بصورت (U) شکل بود را مورد آزمایش خمشی قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان داد افزایش ظرفیت باربری به میزان ۲۶ و ۳۲ درصد و افزایش شکل‌پذیری به میزان ۷۷ و ۹۰ درصد است [۸]. وارسته‌پور و رضایی آدریانی در سال ۱۳۹۳ با بررسی نمونه‌هایی از تیرهای بتنی تقویت شده با ورق CFRP که در آنها پدیده گسیختگی زودرس، شکافته شدن پوشش بتن و جدا شدن سطح مشترک بتن و صفحه تقویتی اتفاق افتاده بود و با ارائه روشی جدید به صورت اجرای ورق تقویتی تیر بتنی تا ۵ میلی متر بالاتر از پوشش بتنی زیر تیر تحت خمش ۴ نقطه‌ای، مشاهده کردند پدیده جداشدگی زودرس به تعویق افتاد [۹]. وارسته‌پور و اسکناطی در سال ۱۳۹۴ به بررسی نمونه‌هایی از تیرهای بتنی تقویت شده با ورق GFRP که در آنها پدیده گسیختگی زودرس،

در برخی از ساختمان‌های بتنی به دلایلی نظیر ضعف سازه، توسعه بنا، اشکالات اجرایی و... نیاز به بهسازی و مقاوم‌سازی می‌باشد. روش‌های مختلفی برای بهسازی و مقاوم‌سازی این دسته از ساختمان‌ها موجود است که یکی از این روش‌ها، استفاده از ورق FRP می‌باشد. از ورق‌های FRP جهت تقویت خمشی، برشی، پیچشی و محصورشدگی استفاده می‌شود. در همین راستا از جمله مسائل پیش روی مهندسان و محققان پیرامون استفاده از ورق‌های FRP در مقاوم‌سازی خمشی تیرهای بتنی، مکانیزم گسیختگی عضو و نیز پدیده‌ای به نام جداشدگی سطحی می‌باشد. هدف از این مقاله، ارائه یک روش مناسب جهت آماده‌سازی سطح بتن جهت اتصال ورق FRP به سطح بتن می‌باشد. درک درست از رفتار سازه در شرایط عادی و تغییرات دما برای پذیرش این روش ضروری است [۱]. اولین تحقیقات انجام شده در این زمینه از اوایل دهه ۱۹۸۰ آغاز شد. اما زلزله‌های سال ۱۹۹۰ کالیفرنیا و ۱۹۹۵ کوبه ژاپن عامل مهم و مؤثری جهت بررسی همه‌جانبه کاربرد کامپوزیت‌های پلیمری ساخته شده از الیاف FRP جهت تقویت و مقاوم‌سازی بتنی و بنایی در مناطق زلزله‌خیز گردید. این مطالعات که دامنه آن روز به روز در حال افزایش است؛ زمینه‌ای وسیع جهت استفاده از این کامپوزیت‌ها را در سازه‌های نیازمند به تقویت، بهسازی یا ترمیم فراهم نموده است. هم‌اکنون تعداد زیادی از محققان و پژوهشگران صنعت سازه در سراسر جهان در حال بررسی، مطالعه و انجام آزمایش‌های تقویت سازه‌ها با کامپوزیت‌های FRP می‌باشند [۲]. یکی از مهمترین عواملی که بر مقاومت در برابر جداشدگی اثر می‌گذارد آماده‌سازی سطحی بتن است. Teng و Lam در سال ۲۰۰۴ مطالعات گسترده‌ای بر روی روش‌های مختلف آماده‌سازی و اثرات آن انجام دادند و نتیجه گرفتند که با صیقل دادن مکانیکی مانند ماسه‌پاشی، به مقاومت در مقابل جداشدگی بهتری می‌توان دست یافت [۳]. مستوفی‌نژاد و حاج رسولی‌ها در سال ۱۳۸۸ به بررسی تأثیر عمق و عرض شیار طولی و نیز مقاومت فشاری نمونه‌ها برای جلوگیری از وقوع پدیده جداشدگی زودرس در نمونه‌های بتنی فاقد میلگرد و تقویت شده با ورق FRP پرداختند که نتایج نشان داد افزایش عمق و عرض شیار بر بار گسیختگی نهایی و کنترل جداشدگی زودرس اثر مثبت دارد، همچنین روش شیارزنی در مقاومت‌های فشاری

و فولادی کاهش داده است. با این وجود در رابطه با بعضی اثرات که بر خواص مصالح FRP و پیوستگی بین بتن و ورق FRP مؤثر است نگرانی‌هایی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به جداشدگی زودرس این ورق‌ها اشاره نمود. آماده نبودن سطح بتن برای پیوند مناسب بین سطح بتن و ورق FRP از جمله دلیل‌های مهم جداشدگی زودرس این ورق‌ها از سطح بتن به شمار می‌رود. این موضوع به شکست زودرس و عملکرد غیراقتصادی عضو سازه‌ای می‌انجامد. انجام عملیات آماده‌سازی سطحی بتن دشواری‌هایی چون هزینه بالا، آلودگی محیط‌زیست و زمان‌بری را سبب می‌شود. در این آزمایش ۹ نمونه تیر بتنی با ابعاد  $150 \times 200 \times 150$  میلی‌متر که هر کدام توسط ۲ میلگرد طولی به قطر ۱۰ میلی‌متر آجدار از نوع AIII (دارای تنش تسلیم 400  $N/mm^2$ ) در پایین مقطع، خاموت به قطر ۸ میلی‌متر به فاصله ۱۰۰ میلی‌متر از نوع AII (دارای تنش تسلیم  $340 N/mm^2$ ) و دو میلگرد طولی دیگر بدون آج از نوع AI (دارای تنش تسلیم  $240 N/mm^2$ ) در بالای مقطع به جهت حفظ فواصل بین خاموت‌ها ساخته شده و در شکل شماره ۱ نشان داده است. تعداد ۳ نمونه مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری جهت آزمایش اندازه‌گیری مقاومت فشاری ۲۸ روزه نیز گرفته شد. هر کدام از این نمونه‌ها با عناوین BF<sub>1</sub>, BS<sub>2</sub>, BS<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>1</sub>, B<sub>0</sub>, BSb<sub>2</sub>, BSb<sub>1</sub>, BF<sub>2</sub> نام‌گذاری شده‌اند. همچنین مشخصات میلگرد مصرفی در جدول شماره ۲ نشان داده شده است. در این آزمایش ۶ نمونه پس از آماده‌سازی سطحی مناسب که شامل برداشتن شیره بتن توسط سه روش فرز، برس سیمی و سنبلاست بود (به طوریکه سنگدانه‌ها نمایان شوند)، اقدام به چسباندن لایه‌ها طبق استاندارد ACI 440 شده است. تیرهای بتنی ساخته شده تحت بارگذاری چهار نقطه‌ای و به صورت کنترل تغییر بار با نرخ ۱۰ کیلوگرم بر ثانیه، وسط دهانه تیر شکسته شده‌اند. به جهت رسیدن به مقاومت ۴۰ مگاپاسکال در بتن مورد استفاده در نمونه‌ها، از طرح اختلاط ذکر شده در آیین‌نامه ACI 211 استفاده شده که در جدول شماره ۳ نشان داده شده است. نمونه تیرهای بتنی ساخته شده با این طرح اختلاط در شکل ۱ نشان داده شده است. به منظور کنترل کیفیت و تعیین مشخصات مصالح، طبق ضوابط آیین‌نامه ASTM C33 عمل شده است. ضریب نرمی تعیین‌کننده ریز بودن و درشت بودن دانه‌ها است. هر اندازه دانه‌های سنگی درشت‌تر باشند نرمی آن‌ها بیشتر و هر اندازه ریزدانه‌ها بیشتر

شکافته شدن پوشش بتن و جدا شدن سطح مشترک بتن و صفحه تقویتی انجام شده بود، پرداختند [۱۰]. وارسته‌پور و کرمانی در سال ۱۳۹۴ با ارائه روشی ترکیبی که از حالت کلاسیک و روش L شکل چسباندن ورق CFRP می‌باشد در جهت افزایش ظرفیت مقطع بتنی و افزایش تغییر شکل‌ها استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که باربری تیر در مقایسه با سایر روش‌ها در خمش و بدون تقویت ۱۰٪ و ۴۰٪ افزایش داشته است [۱۱]. مستوفی‌نژاد و عارفیان در سال ۱۳۹۴ به ارزیابی تجربی طول مهار مؤثر ورق‌های تقویتی FRP با استفاده از روش نصب خارجی EBR بر سطح بتن در سه رده‌ی مقاومتی کمتر از ۳۰ مگاپاسکال، ۳۰ تا ۴۰ مگاپاسکال و در نهایت بالای ۴۰ مگاپاسکال پرداختند. نتایج آنها نشان داد افزایش طول اتصال ورق تقویتی خارجی به بتن، دستیابی به مقاومت کششی کامل را تضمین نمی‌کند [۱۲]. سجادی مزینانی و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی مقایسه بین استفاده از چند لایه GFRP مقاومت بالا و چند لایه از CFRP مقاومت بالا در شکل‌پذیری پرداختند و نتایج نشانگر آن بود که استفاده از چند لایه GFRP مقاومت بالا بجای چند لایه از CFRP مقاومت بالا، شکل‌پذیری افزایش یافته است [۱۳]. در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی تأثیر آمادگی سطح بر روی تیرهای بتنی با پارچه‌های کربن در ظرفیت نهایی آنها و مقایسه آن با محاسبات تئوریک منطبق با آیین‌نامه پرداخته شده است. به این منظور ۹ نمونه تیر بتنی مسلح به عرض ۱۵۰، ارتفاع ۲۰۰ و طول ۱۵۰۰ میلی‌متر تحت آزمایش بارگذاری خمشی چهار نقطه‌ای قرار گرفت که پس از بررسی نتایج تئوریک و آزمایشگاهی روش ابداعی ارائه شد که در آن روش آماده‌سازی تیر قبل از چسباندن ورق CFRP علاوه بر افزایش ظرفیت خمشی منجر به تعویق جداشدگی زودرس در تیر مورد آزمایش شد.

## ۲- روش تحقیق

ورق‌های FRP از جمله مصالح ساختمانی هستند که از دو یا تعداد بیشتری مواد سازنده تشکیل شده‌اند که با یکدیگر به صورت یکپارچه کار می‌کنند. تحقیقات انجام شده در چند سال گذشته ثابت کرده است که پلیمرهای مسلح با الیاف در تعمیر و بازسازی سازه‌ها کارآمدتر و مفیدتر از سایر روش‌ها می‌باشند و استفاده از این ورق‌ها بسیاری از مشکلات را در رابطه با تقویت سازه‌های بتنی

باشند، ضریب نرمی کمتری دارند. ضریب نرمی ماسه بین ۲/۳ تا ۳/۲ همچنین ماده نگهدارنده الیاف CFRP را دارا می‌باشند. متغیر می‌باشد. ورق مورد استفاده در این تحقیق، از نوع CFRP می‌باشد که آن در جدول شماره ۴ نشان داده شده است. چسب‌ها یا همان رزین‌های پلیمری، وظیفه انتقال نیرو بین الیاف و بتن و

جدول ۱- مشخصات سطوح آماده شده نمونه تیرهای ساخته شده

ردیف	نام نمونه	نوع آماده‌سازی سطحی	تعداد لایه ورق CFRP	شرح نمونه
۱	B <sub>0</sub>	ندارد	---	نمونه شاهد - هیچگونه تقویت ندارد
۲	BS <sub>1</sub>	برس سیمی	یک	ورق در سرتاسر ناحیه کششی زیر تیر است
۳	BS <sub>2</sub>	برس سیمی	دو	ورق در سرتاسر ناحیه کششی زیر تیر است
۴	BF <sub>1</sub>	دستگاه فرز	یک	ورق در سرتاسر ناحیه کششی زیر تیر است
۵	BF <sub>2</sub>	دستگاه فرز	دو	ورق در سرتاسر ناحیه کششی زیر تیر است
۶	BSb <sub>1</sub>	سند بلاست	یک	ورق در سرتاسر ناحیه کششی زیر تیر است
۷	BSb <sub>2</sub>	سند بلاست	دو	ورق در سرتاسر ناحیه کششی زیر تیر است
۸	B <sub>1</sub>	ندارد	یک	ورق در سرتاسر ناحیه کششی زیر تیر است
۹	B <sub>2</sub>	ندارد	دو	ورق در سرتاسر ناحیه کششی زیر تیر است

جدول ۲- مشخصات میلگردهای استفاده شده در تیرهای بتنی

نوع میلگرد	قطر میلگرد (mm)	حداقل تنش تسلیم (N/mm <sup>2</sup> )	حداقل مقاومت کششی (N/mm <sup>2</sup> )	کرنش تسلیم (درصد)	کرنش نهایی (درصد)	مدول الاستیسیته (GPa)
AI	۶	۲۴۰	۳۶۰	---	۲۵	---
AII	۸	۳۴۰	۵۰۰	۰/۰۰۱۸	۱۸	۲۰۶
AIII	۱۰	۴۰۰	۶۰۰	۰/۰۰۲۱	۱۶	۲۰۷

جدول ۳- مشخصات بتن استفاده شده برای ساخت تیرها

نوع مصالح	آب	سیمان	شن	ماسه
میزان مصرف (kg/m <sup>3</sup> )	۲۰۰	۴۰۰	۷۰۰	۱۰۵۰



شکل ۱- آرماتوربندی و قالب‌بندی تیرهای بتنی

جدول ۴- مشخصات فیزیکی ورق کامپوزیت استفاده شده

جنس الیاف	مقاومت کششی نهایی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	ضخامت (mm)
Carbon Fiber	۴۹۰۰	۲۳۰	۰/۱۱۱

جدول ۵- مشخصات فیزیکی رزین استفاده شده

مقاومت کششی (MPa)	مدول کششی (MPa)	مدول خمشی (GPa)
۳۰	۲۵۰۰	۲۷۰۰



شکل ۲- نمونه تیرهای بتنی ساخته شده

در روش دستگاه فرز که با استفاده از صفحه مخصوص می‌باشد و در شکل ۴ نشان داده شده است، با کشیدن آن بر روی بتن سطحی صاف، بدون خاک و شیره بتن حاصل می‌شود.



شکل ۴- آماده‌سازی سطح بتن قبل از چسباندن ورق CFRP با روش دستگاه فرز

در روش سند بلاست که با استفاده از ماسه و فشار هوا بر روی سطح بتن و در کارگاه مخصوص به آن انجام شد که در شکل ۵ نشان داده شده است. آماده‌سازی سطح حاصل به گونه‌ای انجام پذیرفت که خاک و شیره بتن از سطح جدا گردید و در نهایت

پس از عمل‌آوری ۲۸ روزه نمونه‌ها، فرایند آماده‌سازی سطح کششی به منظور نصب الیاف CFRP انجام گردید. خلل و فرج سطح نمونه‌های بتنی قبل از چسباندن الیاف ابتدا با گروت پر شده و سپس آماده‌سازی سطحی به سه روش برس سیمی، دستگاه فرز و سند بلاست انجام شد. در روش برس سیمی که با کشیدن برس بر روی سطح کششی بتن انجام می‌شود و در شکل ۳ نشان داده شده است، سطحی صاف، بدون خاک و شیره بتن حاصل می‌شود.



شکل ۳- آماده‌سازی سطح بتن قبل از چسباندن ورق CFRP با روش برس سیمی



به جهت انجام آزمایش، همه تیرها به صورت دو سر مفصل و تحت بارگذاری خمشی چهار نقطه‌ای قرار گرفته‌اند که در شکل ۷ نشان داده شده است. بارگذاری به صورت کنترل تغییر بار که با نرخ ۱۰ کیلوگرم بر ثانیه اعمال شد و نمودار بار-تغییر مکان به وسیله دستگاه جک ۲۰۰ تنی ثبت گردید.



شکل ۷- نمایی از دستگاه بارگذاری خمشی چهار نقطه‌ای

سطحی زبر به همراه سنگ‌دانه‌های ریز آن قابل مشاهده می‌باشد. جهت چسباندن سطحی الیاف به نمونه‌ها، ابتدا لایه‌ای نازک و یکنواخت از چسب بر روی سطح بتن آغشته شده و الیاف روی آن قرار گرفت. جهت چسباندن الیاف به سطح مورد نظر با استفاده از کاردک، دوباره چسب را به طور کامل و یکنواخت بر روی آنها کشیده شد تا از اتصال کامل اطمینان حاصل شود. سپس لایه‌های بعدی به همین ترتیب چسبانده شد. در انتها نیز یک لایه یکنواخت از چسب بر روی الیاف آغشته شد تا از آنها محافظت نماید و اتصال الیاف به یکدیگر تکمیل گردد. در شکل شماره ۶ نمونه‌ای از مراحل تیرهای با ورق CFRP نشان داده شده است. بعد از انجام این کار، نمونه‌ها به مدت ۷ روز نگهداری و آماده بارگذاری شدند.



شکل ۵- آماده‌سازی سطح بتن قبل از چسباندن ورق CFRP با روش سند بلاست

۳- تشریح مدل‌سازی و کارهای آزمایشگاهی  
تیر B0 که بدون تقویت خارجی است تیر شاهد می‌باشد و صرفاً جهت مقایسه با سایر تیرها مورد آزمایش قرار گرفته است. این تیر تحت بارگذاری خمشی چهار نقطه‌ای قرار گرفت و توسط ترک‌های خمشی در وسط تیر شکسته شد. مقاومت نهایی این تیر ۵۷/۴ کیلونیوتن با تغییر مکان حداکثر ۲۲ میلیمتر در وسط تیر اتفاق افتاد. در شکل ۸ تیر B0 پس از اعمال بارگذاری و در شکل ۹ نمودار بار-تغییر مکان آن نشان داده شده است. نتایج دیگر نمونه‌ها در جدول شماره ۶ نشان داده شده است.



شکل ۸- تیر B0 بعد از اعمال بارگذاری خمشی چهار نقطه‌ای

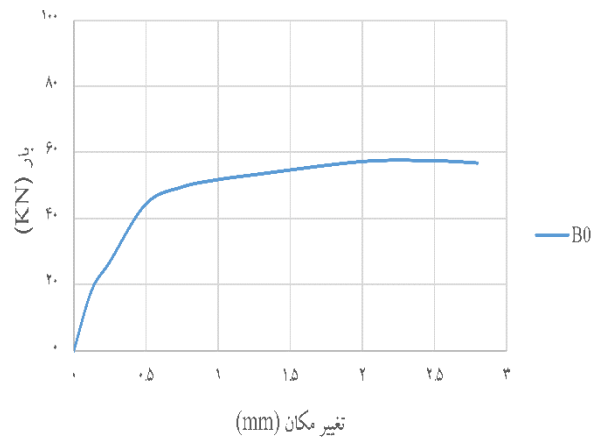


شکل ۶- چسباندن ورق CFRP به تیرهای بتنی

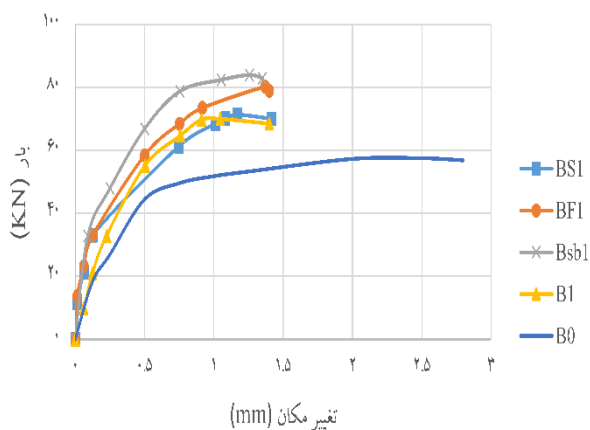
جدول ۶- مقایسه آزمایش بار گذاری خمشی چهار نقطه‌ای بر روی نمونه‌ها

ردیف	نام نمونه	تغییر مکان نهایی نمونه (mm)	مقاومت نهایی آزمایشگاه (KN)	درصد افزایش مقاومت نهایی نسبت به حالت تقویت نشده	درصد کاهش تغییر مکان وسط تیرها نسبت به تیر شاهد
۱	B <sub>0</sub>	۲۵	۵۷/۴	---	---
۲	BS <sub>1</sub>	۱۱/۶	۷۱/۲	۲۴	۵۳/۶
۳	BS <sub>2</sub>	۱۲/۵	۸۱/۲	۴۱/۴	۵۰
۴	BF <sub>1</sub>	۱۳/۷	۸۰/۱	۳۹/۵	۴۵/۲
۵	BF <sub>2</sub>	۱۲/۵	۸۷/۹	۵۳/۱	۵۰
۶	BSb <sub>1</sub>	۱۲/۵	۸۳/۸	۴۵/۹	۵۰
۷	BSb <sub>2</sub>	۹/۱	۹۴/۶	۶۴/۸	۶۳/۶
۸	B <sub>1</sub>	۱۰/۴	۶۹/۹	۲۱/۷	۵۸/۴
۹	B <sub>2</sub>	۱۱/۲	۷۹/۵	۳۸/۵	۵۵/۲

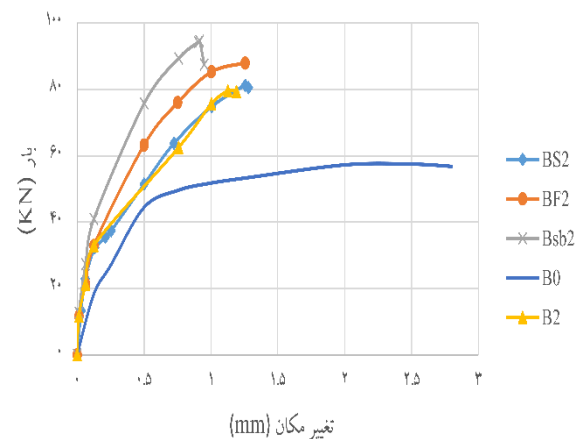
موجب افزایش مقاومت نهایی عضو بتنی می‌گردد. همچنین در بررسی‌های بعمل آمده استفاده از ۲ لایه ورق CFRP نسبت به ۱ لایه ورق موجب افزایش مقاومت نهایی می‌گردد. در مقایسه نمونه‌ها، نمونه بتنی سند بلاست شده و دارای ۲ لایه ورق CFRP بیشترین مقاومت نهایی را بین نمونه‌های مورد آزمایش کسب کرد. در ادامه به بررسی تئوریک ظرفیت مقطع با استفاده از آیین‌نامه ACI318-08 پرداخته شده تا بتوان به مقایسه‌ای بین نتایج آزمایش‌های انجام شده و تئوریک پرداخت.



شکل ۹- نمودار بار-تغییر مکان تیر



شکل ۱۱- نمودار مقایسه بار-تغییر مکان نمونه‌های دارای دو ورق CFRP با تیر شاهد



شکل ۱۰- نمودار مقایسه بار-تغییر مکان نمونه‌های دارای یک ورق CFRP با تیر شاهد

#### ۴- محاسبه ظرفیت نهایی خمشی مقطع مطابق با آیین‌نامه ACI318-08

تا سال ۱۹۵۶ تنها روش طراحی سازه‌های بتن آرمه مطابق آیین‌نامه

همانطور که ملاحظه گردید استفاده از ورق‌های CFRP جهت تقویت بسیار سودمند بوده و در همه حالت‌های آماده سازی سطح

$$\rho_b = 0.85 \beta_1 \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \times \frac{600}{600 + f_y} \quad \text{رابطه (۴-۶):}$$

محاسبه ظرفیت خمشی مقطع Mn:

برای به دست آوردن ظرفیت خمشی مقطع از روابط زیر استفاده می‌کنیم:

$$\rho > \rho_b \quad \text{(الف)}$$

در این حالت مقطع، پر فولاد بوده و ظرفیت خمشی با استفاده از مقدار a (عرض بلوک ویتنی) به دست می‌آید:

$$\left(\frac{0.85f_y}{0.003\rho Es}\right) a^2 + da - \beta_1 d^3 = 0 \quad \text{رابطه (۴-۷):}$$

$$M_n = 0.85 f_c b a \left(d - \frac{a}{2}\right) \quad \text{رابطه (۴-۸):}$$

$$\rho \leq \rho_b \quad \text{(ب)}$$

در این حالت مقطع، کم فولاد بوده و ظرفیت خمشی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$M_n = \rho f_y b d^2 \left(1 - 0.59 \rho \frac{f_y}{f_c}\right) \quad \text{رابطه (۴-۹):}$$

### ۴-۳- حالات گسیختگی تیر پس از تقویت با FRP

پس از تقویت تیر با FRP، بسته به مقاومت فشاری (که شامل مقاومت فشاری خود بتن و احتمالاً مقاومت فولاد قرار داده شده در منطقه فشاری است) مقاومت کششی (که شامل مقاومت کششی خود بتن و فولاد قرار داده شده در منطقه کششی است) و یا به عبارتی دیگر پر فولاد بودن یا کم فولاد بودن (گسیختگی ترد یا نرم) بتن و...، مودهای گسیختگی را می‌توان به سه دسته تقسیم نمود که برای هر کدام روابطی مطرح و پیشنهاد شده است.

۱- خرد شدن بتن در ناحیه فشاری قبل از تسلیم فولاد کششی

۲- خرد شدن بتن در ناحیه فشاری بعد از تسلیم فولاد کششی

۳- شکست کششی ورق کامپوزیت

### ۴-۴- روش کلاسیک در تحلیل تیر تقویت شده با

#### صفحات FRP

با استفاده از نمودار و تعیین معادلات تعادل و موقعیت محور خشی امکان محاسبه ظرفیت نهایی خمشی مقطع برای هر حالت با استفاده از معادلات زیر وجود دارد:

حالت (۱):

$$M_u = b d^2 \left( f_p \rho_a \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{com}}\right) + E_{com} \varepsilon_{ucom} \rho_{com} \left(\frac{h + 0.5 T p - \rho_a}{d}\right) \right)$$

ACI 318 طراحی به روش تنش مجاز (ASD) بوده است. اگرچه امروز تمام سازه‌های بتنی به روش مقاومت نهایی و حالت حدی طراحی می‌شوند اما به دلایلی که در ذیل اشاره می‌شود هنوز هم مورد قبول جامعه مهندسی می‌باشد.

- برای طراحی سازه‌هایی که قرار است در سطح کمتری از تنش قرار بگیرند تا مسئله ترک خوردگی مشکل ساز نباشد هنوز از این روش استفاده می‌شود مانند طراحی مخازن آب.

- برای طراحی پل‌های بتنی استفاده از این روش به خاطر مسائل خستگی اجازه داده شده است.

- در محاسبه ممان اینرسی جهت کنترل خیز تیرها اطلاعات روش تنش مجاز استفاده می‌شود و از این نظر این روش با اهمیت شناخته می‌شود.

### ۴-۱- طراحی مقطع با فولاد کششی

جهت به دست آوردن ظرفیت خمشی مقطع، ابتدا باید مقدار ضریب  $\beta_1$  بر اساس آئین نامه ACI 318-08 بر اساس میزان مقاومت فشاری ( $f'_c$ ) از طریق روابط زیر تعیین نمود:

$$\beta_1 = 0.85 \quad f'_c \leq 300 \left(\frac{kg}{cm^2}\right) \quad \text{رابطه (۴-۱):}$$

$$\beta_1 = 0.85 \quad f'_c > 300 \left(\frac{kg}{cm^2}\right) \quad \text{رابطه (۴-۲):}$$

برای محاسبه نسبت آرماتور ( $\rho$ )، از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

$$\rho = \frac{A_s}{b d} \quad \text{رابطه (۴-۳):}$$

که در آن:

$b =$  عرض مقطع

$d =$  فاصله مرکز آرماتور تا وجه کششی مقطع

$A_s =$  مجموع سطح مقطع آرماتورهای کششی

### ۴-۲- نسبت فولاد بالانس $\rho_b$ :

در یک تیر بتنی مسلح می‌توان به درصدی از فولاد در مقطع دست یافت که هم زمان با ایجاد کرنش تسلیم در فولادها، کرنش بتن به حد خرابی  $\varepsilon_{cu} = 0.003$  رسیده باشد که به این درصد فولاد، میزان آرماتور بالانس گفته می‌شود و با

$\rho_b$  نشان داده می‌شود:

$$\rho > \rho_b \rightarrow \text{فولاد تسلیم نمی‌شود} \quad \text{رابطه (۴-۴):}$$

$$\rho \leq \rho_b \rightarrow \text{فولاد تسلیم می‌شود} \quad \text{رابطه (۴-۵):}$$



حالت (۲):

نبودن سطح بتن به منظور اتصال مناسب بین سطح و ورق کامپوزیتی اشاره نمود. در این مقاله ۹ نمونه تیر بتنی تحت آزمایش بارگذاری خمشی چهار نقطه‌ای قرار گرفت. ۸ نمونه از این تیرها با تعداد یک و دو لایه از الیاف CFRP و با روش‌های مختلف آماده‌سازی جهت مقاوم‌سازی به همراه یک تیر (شاهد) که بدون تقویت ساخته شده بود، مورد آزمایش قرار گرفتند. با توجه به این که تمام تیرها در شرایط آزمایشگاهی یکسان تحت آزمایش قرار گرفتند، نتایج زیر به دست آمد:

$$M_u = bd^2 \left( \frac{0.85cf_p \beta_1}{d} \cdot \frac{h + 0.5Tp - 0.5\beta_1c}{d} \right) - f_p \rho_a \left( \frac{h}{d} + 0.5 \frac{Tp}{d} - 1 \right)$$

حالت (۳):

$$M_u = bd^2 \left( \frac{0.85cf_p \beta_1}{d} \cdot \frac{h + 0.5Tp - 0.5\beta_1c}{d} \right) - E_a \varepsilon_u \left( \frac{1-c}{d} \right) \rho_a \left( \frac{h}{d} + 0.5 \frac{Tp}{d} - 1 \right)$$

در معادلات ذکر شده،  $\rho_a = \frac{A_s}{bd}$  و  $\rho_{com} = bp$  به ترتیب نسبت فولاد و ورق کامپوزیت و  $\xi$  فاصله بین نقطه اثر نیروی معادل فشاری و دورترین تار فشاری می‌باشد. همچنین در این معادلات  $E_{com}$  و  $A_p$  به ترتیب ضریب ارتجاعی و سطح مقطع ورق کامپوزیت و  $Y_p$  فاصله بین ورق کامپوزیت تا تار خشی مقطع ترک خورده و  $h$  عمق تیر می‌باشد. آئین نامه‌های طراحی با ضرایب اطمینان و کاهنده‌ی متفاوتی برای مقاومت فولاد، بتن و FRP و محدودیت‌ها بر روی کرنش‌ها براساس روش فوق پایه‌گذاری شده‌اند. محاسبات تئوریک کلیه تیرها در جدول ۷ ارائه گردیده است.

آماده‌سازی سطح به روش سند بلاست نتایج بهتری به دست آورد، به طوری که مشاهده گردید میزان ظرفیت خمشی در تیر با یک لایه تقویت CFRP به میزان ۴۵/۹ درصد و دو لایه تقویت CFRP به میزان ۶۴/۸ درصد نسبت به تیر شاهد بیشتر است. در نتیجه این مدل آماده‌سازی، روش مناسبی در جهت به تعویق انداختن شکست زودرس و بهینه‌تر کردن تقویت در تیرهای مسلح بتنی می‌باشد.

استفاده بیشتر از ورق‌های CFRP جهت بالا بردن ظرفیت خمشی تیر از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. مشاهده گردید آماده‌سازی سطحی در جهت افزایش ظرفیت خمشی تیر بسیار حائز اهمیت است.

با مقایسه نتایج تئوریک و آزمایشگاهی به این نتیجه می‌رسیم که میزان ظرفیت خمشی در نتایج تئوریک از روند نتایج آزمایشگاهی پیروی می‌کند و اعداد بدست آمده نزدیک به هم می‌باشند.

جدول ۷- ظرفیت خمشی تیرها طبق محاسبات

ردیف	نام نمونه	مقاومت نهایی آزمایشگاه (KN)
۱	B <sub>0</sub>	۵۳/۲۲
۲	BS <sub>1</sub>	۸۹
۳	BS <sub>2</sub>	۹۵/۰۴
۴	BF <sub>1</sub>	۹۲/۱۱
۵	BF <sub>2</sub>	۱۰۱/۹۶
۶	BSb <sub>1</sub>	۹۰/۷۸
۷	BSb <sub>2</sub>	۱۰۳/۲۱
۸	B <sub>1</sub>	۸۳/۹
۹	B <sub>2</sub>	۹۳/۰۱۵

## ۶- منابع

- [1] Tuakta, C. and Buyukozturk, O. (2011). Deterioration of FRP/concrete bond system under variable moisture conditions quantified by fracture mechanic. Composite Part B: Engineering. Vol. 42. No. 2. 145-154
- [2] Nanni, A. and gold, W.J. (1998). strength assessment of external FRP reinforcement. concrete international. Vol. 20. No. 6. 39-42A.
- [3] Lam, L. and Teng, J.G. (2004). Ultimate Condision of fiber reinforced polymer confined concrete. Journal of Composites for Construction. ASCE. 8. 539-548

[۴] مستوفی نژاد، د، حاج رسولی‌ها، م، ج، بررسی عوامل تاثیرگذار بر عملکرد روش شیارزنی در کنترل جداشدگی ورق FRP از سطح بتن، پنجمین کنگره ملی عمران، مشهد، ۱۳۸۸

## ۵- نتیجه‌گیری

یکی از متداول‌ترین روش‌های موجود برای مقاوم‌سازی سازه‌های بتن‌آرمه، استفاده از ورق‌های کامپوزیتی FRP است. یکی از مسائل مهم در تقویت خمشی تیرهای بتن‌آرمه به کمک کامپوزیت‌های FRP جداشدگی ورق‌ها از سطح بتن است که منجر به شکست زودرس (قبل از رسیدن به ظرفیت نهایی) عضو سازه‌ای می‌شود. از دلایل گسیختگی زودرس، می‌توان به آماده

[5] Mostofinejad, D. and Mahmoudabadi, E. (2010). 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. 804-811

[6] Mostofinjad, D. and Shamel, M. (2010). Performance of EBROG method under Multilayer FRP sheets for flexural strengthening of concrete beams. The 12<sup>th</sup> East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-12). Hong Kong. China

[7] مستوفی‌نژاد، د، مقدس بیدآبادی، ر، تاثیر روش شیازنی به جای آماده‌سازی سطحی در تغییر مکانیزم گسیختگی خمشی تیرهای بتنی تقویت شده با FRP، سومین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، تهران، ۱۳۹۰

[8] صدرممتاز، ع، رستمی‌عتیق، ه، بررسی تاثیر نحوه اتصال انتهای ورق‌های CFRP بر نحوه‌ی شکست تیرهای بتنی مسلح تقویت شده در خمش، چهارمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، ۱۳۹۱

[9] وارسته‌پور، ح، رضایی آدریانی، م، ع، حذف شکست زودرس تیربتنی تقویت شده با FRP، ششمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، ۱۳۹۳

[10] وارسته‌پور، ح، اسکناطی، ا، ر، افزایش ظرفیت خمشی تیر بتن آرمه با استفاده از الیاف کامپوزیت شیشه، هفتمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، ۱۳۹۴

[11] وارسته‌پور، ح، کرمانی، ف، روش جدید تقویت تیر بتنی با استفاده از الیاف کربن، هفتمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، ۱۳۹۴

[12] مستوفی‌نژاد، د، عارفیان، ب، ارزیابی تجربی طول مهار موثر ورق‌های تقویتی FRP بر سطح بتن، دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، تبریز، دانشگاه تبریز دانشکده مهندسی عمران، ۱۳۹۴

[13] Sajadi Manizani, B., Tavousi, Sh. and Akbarpour, A. (2015). the Comparison between Using Multilayers of High Resistance GFRP on Ductility with Multilayers of High Resistance CFRP. 7<sup>th</sup> International Conference of Seismology and Earthquake Engineering. Iran.

## The effect of preparing of reinforced concrete beams with CFRP on their flexural strength

M. Pakroo \*

MSc Student, Islamic Azad University, Civil Department, Neyshabur.

B.Ameri Kordiani

Structural Master's Degree, Islamic Azad University, School of Engineering, Mashhad.

H. Varastehpor

Assistant Professor, Institute for Energy & Hydro Technology, Civil Department, Mashhad.

### Abstract

Many concrete structures have been damaged due to natural disasters such as earthquake, wind, or corrosive fatigue. Therefore, the use of new technologies to modernize and improve these structures is important. Fiber reinforced polymer (FRP) composites are widely used in retrofit and strengthening of reinforced concrete (RC) structures. FRP composites are applicable for strengthening various structural elements including beams, columns and plane elements such as floor slabs and shear walls. In this paper, the effect of surface preparation on concrete beams with carbon fabrics has been investigated. 8 Reinforced concrete beams were made by composite fibers and a concrete sample beam in the laboratory and tested for four-point bending loading Took. The experimental and Theoretical results of the proposed method have been presented in which the preparation in sandblasting, in addition to increasing the flexural strength, delayed the early detachment in the beams tested. It was also observed that the bending capacity in the beam increased with a 45.9% CFRP reinforcement layer and CFRP reinforcement layer 64.8% higher than that of the sample beam.

**Keywords:** Surface preparation, Reinforced concrete beam, CFRP, Laboratory study, Surface detachment.

---

\* Corresponding Author: pakroo\_moein@yahoo.com

