

بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با پلیمرهای مسلح الیافی و مواد پایه سیمانی مسلح الیافی

جواد سبزی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

محمدرضا اصفهانی*

استاد، دانشکده، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

چکیده

هدف از پژوهش حاضر مقایسه بین تیرهای تقویت شده با پلیمرهای مسلح الیافی (FRP) و مواد پایه سیمانی مسلح الیافی (FRCM) می‌باشد. بدین منظور شش تیر بتن مسلح ساخته شده و با FRP و FRCM تقویت گردیدند. همچنین پارامترهای دیگری مانند نوع روش تقویت و مقدار میلگرد خمشی نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در روش تسلیح خارجی (EBR)، تقویت با FRCM منجر به افزایش ظرفیت باربری در مقاطع با مقدار میلگرد خمشی $\rho_s / \rho_{sb} = 0.27$ و $\rho_s / \rho_{sb} = 0.69$ به ترتیب به میزان ۱۲/۸ درصد و ۱۶/۸ درصد در مقایسه با تقویت با FRP می‌گردد. همچنین مود گسیختگی تیرهای تقویت شده با روش EBR، در تقویت با FRP به صورت جداشدگی ورق FRP و در تقویت با FRCM به صورت پارگی شبکه FRCM می‌باشد. در روش تسلیح خارجی بر روی شیار (EBROG)، ظرفیت باربری تیرهای تقویت شده با FRP و FRCM تقریباً مشابه یکدیگر می‌باشد. همچنین مود گسیختگی مشاهده شده در روش EBROG برای تقویت با FRP و FRCM به ترتیب به صورت جداشدگی بخشی از پوشش بتن و جداشدگی کامل پوشش بتن روی میلگردهای کششی می‌باشد. در نهایت نتایج آزمایشگاهی با روابط آیین‌نامه‌ها و مدل‌های تحلیلی موجود مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار میلگرد خمشی در تیرهای تقویت شده با FRP، ظرفیت باربری به دست آمده از روابط آیین‌نامه‌ها و مدل‌های تحلیلی به ظرفیت باربری آزمایشگاهی نزدیک‌تر می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: تیر، بتن مسلح، پلیمرهای مسلح الیافی (FRP)، مواد پایه سیمانی مسلح الیافی (FRCM)، تقویت.

۱- مقدمه

سیستم‌های تقویتی پایه سیمانی دارای برخی مشکلات می‌باشد. بزرگترین مشکل در این خصوص، چسبندگی FRP به ملات سیمانی می‌باشد که ملات به دلیل ویژگی‌های ذاتی خود امکان نفوذ در رشته‌های یاف را دارا نمی‌باشد. با استفاده از مش‌های پارچه‌ای یا شبکه‌های FRP که در ملات سیمانی جاسازی شده‌اند می‌توان پیوند را تقویت کرد. تقویت ذکر شده تحت‌عنوان تقویت با مواد پایه سیمانی مسلح الیافی (FRCM^۴) مورد استفاده قرار می‌گیرد. عملکرد موفقیت‌آمیز سیستم‌های FRCM برای تقویت تیرهای بتن مسلح در برش و خمش بستگی به روش آماده‌سازی سطح بتن بستر دارد [۹]. متداول‌ترین روش آماده‌سازی در سیستم FRCM، روش سندبلاست است که به منظور برداشتن یک لایه از سطح بتن به ضخامت ۱ تا ۲ میلی‌متر انجام می‌گیرد [۱۰، ۱۱]. این روش باعث حل شدن مشکل پیوستگی با لایه FRCM می‌شود که ناشی از وجود یک لایه بتنی حاوی ریزدانه روی سطح است. عبد و همکاران [۱۲] عملکرد ماتریس سیمانی تقویت شده با پارچه FRCM در افزایش ظرفیت خمشی تیرهای بتن مسلح را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش ۱۲ تیر بتن مسلح به ابعاد ۱۵۰×۲۶۰×۲۵۰۰ میلی‌متر با دو نسبت میلگرد خمشی $\rho_s^{D12} = 0.72\%$ و $\rho_s^{D12} = 1.27\%$ ساخته و با استفاده از مصالح FRCM (کربن و پلی‌پارافینیل) تقویت شدند. نتایج این پژوهش نشان داد که میانگین شاخص‌های شکل‌پذیری برای سیستم‌های کربن و پلی‌پارافینیل به ترتیب برابر با ۴۵٪ و ۶۹٪ می‌باشد. همچنین میانگین جذب انرژی برای سیستم‌های کربن و پلی‌پارافینیل به ترتیب برابر با ۵۸٪ و ۹۰٪ بود. واکجیرا و عبد [۱۳] ایده جدیدی برای زبر کردن سطح بتن پیشنهاد کردند که شامل برداشتن پوشش بتن و کار گذاشتن کامپوزیت FRCM در شیارهای ایجاد شده است. آن‌ها این سیستم نصب را NSE^۵ نام‌گذاری کردند. در این روش FRCM کار گذاشته شده با روش NSE جایگزین بتن خراب شده می‌شود و شکل و ابعاد اصلی تیر را حفظ می‌کند که با محدودیت‌های معماری تطابق دارد. همچنین FRCM به جای اینکه روی سطح بتن کار گذاشته شود، در داخل پوشش بتن قرار می‌گیرد، که این موضوع منجر به

امروزه بازسازی و مرمت آسیب‌ها و خرابی‌های زیر ساخت‌های غیر استاندارد، یکی از مهم‌ترین موضوعات و مباحث مهندسی عمران در سراسر جهان می‌باشد. بحث اصلاح و بهسازی سازه‌های موجود با سرعت زیادی در حال رشد می‌باشد و این بحث در کشورهای توسعه یافته به‌طور ویژه مورد توجه قرار گرفته است. پلیمرهای مسلح الیافی (FRP^۱) به دلیل ویژگی‌های مطلوبی مانند نسبت مقاومت به وزن بالا و مقاومت در برابر خوردگی به‌طور گسترده‌ای برای تقویت و ساخت سازه‌های بتن مسلح مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱-۳]. عموماً FRP‌ها به وسیله چسب اپوکسی برای بهبود رفتار سازه‌های مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش‌های مختلفی برای تقویت سازه‌ها با FRP در سال‌های اخیر مورد بررسی قرار گرفته است. از انواع روش‌های تقویت می‌توان به تسلیح خارجی (EBR^۲) و تسلیح خارجی روی شیار (EBROG^۳) اشاره کرد. در روش EBR پس از برداشتن لایه‌های ضعیف سطح مورد نظر با روش‌هایی مانند سند بلاست و زبر نمودن آن، ورق FRP به وسیله چسب اپوکسی به سطح مورد نظر چسبانده می‌شود [۴ و ۵]. در تیرهای تقویت شده در خمش با روش EBR، احتمال جداشدگی ورق FRP به همراه لایه نازکی از بتن از وجه کششی تیر زیاد می‌باشد. در روش EBROG، ابتدا شیارهایی بر روی وجه کششی تیر ایجاد شده و سپس داخل شیارها با رزین اپوکسی پر شده و سپس ورق‌های FRP بر روی شیارهای ایجاد شده قرار می‌گیرد [۶]. نتایج پژوهشگران [۷] نشان دادند که استفاده از شیارهای طولی در مقایسه با شیارهای عرضی و قطری منجر به افزایش ظرفیت باربری به مقدار قابل توجهی می‌گردد. اگر چه استفاده از رزین عملکرد مناسبی در زمینه ایجاد چسبندگی کافی و مقاومت در برابر شرایط محیطی دارد، با وجود این دارای مشکلاتی از قبیل نفوذپذیری پایین، سازگاری دمایی پایین با بتن، مقاومت کم در برابر آتش‌سوزی و ضعف در برابر اشعه UV می‌باشد [۸]. برای جلوگیری از برخی مشکلات ذکر شده، سیستم‌های کامپوزیتی مبتنی بر سیمان متشکل از FRP‌ها و یک عامل اتصال سیمانی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. با وجود این، استفاده از

^۴ Fabric Reinforced Cementitious Matrix

^۵ Near-Surface Embedded

^۱ Fiber Reinforced Polymer

^۲ Externally Bonded Reinforcement

^۳ Externally Bonded Reinforcement on Grooves

مشکلات مربوط به عدم امکان نصب بر روی سطوح خیس و مقاومت پایین در برابر آتش سوزی را برطرف می نماید. در معیود پژوهش های انجام شده بر روی مقایسه FRP با FRCM، گزارش شده است که تقویت با FRP ظرفیت باربری را در مقایسه با تقویت با FRCM افزایش می دهد [۱۸]. با این حال بررسی جامعی بر روی مقایسه بین تقویت با FRP و FRCM در صورت یکسان بودن میزان تقویت خارجی انجام نشده است. بنابراین هدف اصلی پژوهش حاضر مقایسه بین تقویت FRP و FRCM در صورت یکسان بودن سطح مقطع تقویت می باشد. همچنین پارامترهای دیگری مانند نوع روش تقویت (EBROG و EBR) و مقدار میلگرد خمشی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت ظرفیت باربری حاصل از نتایج آزمایشگاهی با ظرفیت باربری به دست آمده از روابط آیین نامه ها و مدل های تحلیلی موجود برای تقویت با FRP و FRCM مقایسه می گردد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات مصالح مصرفی برای ساخت تیرها

بتن مصرفی برای ساخت تیرها از رده ی مقاومتی ۲۵ مگاپاسکال می باشد. طرح اختلاط استفاده شده برای رسیدن به مقاومت فشاری ذکر شده شامل، ماسه ۹۵۰ کیلوگرم، شن ۸۲۰ کیلوگرم و سیمان ۳۸۰ کیلوگرم می باشد. همچنین بر روی میلگردهای کششی، تست کشش مستقیم بر اساس استاندارد ASTM E8/E8M [۲۱] به منظور تعیین مشخصات مکانیکی میلگردها انجام گرفت. تنش تسلیم میلگردهای کششی به قطر ۱۶، ۲۲ و ۲۸ میلی متر به ترتیب برابر با ۴۵۳، ۳۷۶ و ۳۷۹ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته این میلگردها به ترتیب برابر با ۲۰۹، ۲۰۴ و ۲۰۳ گیگاپاسکال می باشد.

۲-۲- مشخصات مصالح مصرفی برای تقویت تیرها

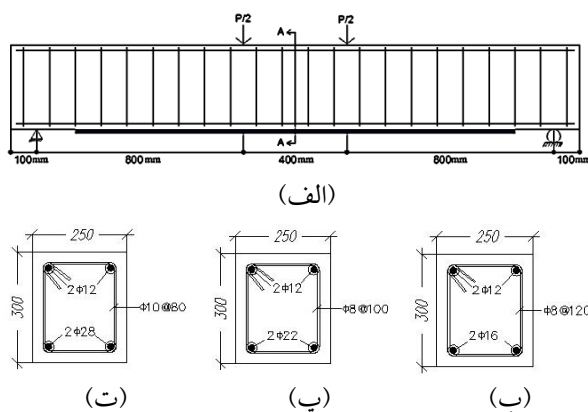
به منظور تقویت تیرها با FRP و FRCM از ورق های CFRP تک جهته با نام تجاری QUANTOM Wrap 300C با مقاومت کششی ۴۹۵۰ مگاپاسکال، مدول ارتجاعی ۲۴۰ گیگاپاسکال و کرنش پارگی ۱/۵٪ استفاده گردید. چسب اپوکسی استفاده شده در تقویت با FRP دارای مدول الاستیسیته ۱۲/۸

بهبود پیوستگی بتن با FRCM در تیرهای تقویت شده در برش می شود [۱۴]. عبد و الشریف [۱۵]، تأثیر روش های تقویت NSE-FRCM و EB^۱-FRCM را بر ظرفیت خمشی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که میانگین افزایش ظرفیت باربری برای سیستم های NSE-FRCM و EB-FRCM به ترتیب برابر با ۶۳٪ و ۷۲٪ بود. همچنین نسبت ظرفیت باربری آزمایشگاهی به ظرفیت باربری به دست آمده از روابط آیین نامه ACI-549.4R-13 [۱۶] برای سیستم های تقویت NSE و EB به ترتیب برابر با ۱/۱۲ و ۱/۰۸ به دست آمد. رئوف و همکاران [۱۷] عملکرد خمشی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با مصالح FRCM و FRP را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که اثر بخشی سیستم FRCM در افزایش ظرفیت باربری کمتر از سیستم FRP بود. همچنین تأثیر سیستم FRCM به تعداد لایه ها حساس بود، هنگامی که تعداد لایه های FRCM از ۱ به ۳ افزایش می یابد، ضریب اثر بخشی از ۰/۴۷ تا ۰/۸۰ افزایش می یابد. تریانفیلو و پاپانیکلاو [۱۸] با بررسی آنها دو نمونه نشان دادند که تقویت تیرها با سیستم FRP ظرفیت باربری را به میزان ۳۰٪ بیشتر از FRCM نشان می دهد. امبریشی و فوکاسی [۱۹] مشاهده کردند که عملکرد سیستم تقویت FRCM در افزایش ظرفیت خمشی تیرهای بتن مسلح به مقدار کمی کمتر از سیستم FRP می باشد، اما سیستم FRCM در افزایش ظرفیت تغییر شکل نسبت به سیستم FRP موثرتر می باشد. لازم به ذکر است که این نتیجه گیری تنها بر اساس مقایسه بین دو نمونه آزمایش انجام گرفت. گزنالس لیبروس و همکاران [۲۰]، تأثیر دو نوع تقویت FRP و FRCM بر رفتار برشی تیرهای بتن مسلح را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش سختی محوری کامپوزیت ها ($A_f E_f$)، مقاومت برشی تیرهای تقویت شده افزایش می یابد. برای تیرهای تقویت شده با FRP و FRCM با مقادیر مشابه $A_f E_f$ ، افزایش مقاومت برشی مشابه بود، به عبارت دیگر می توان گفت مقاومت برشی با تغییر نوع ماتریس متفاوت نیست.

با توجه به مطالب گفته شده، از معایب تقویت با FRP می توان به عدم امکان نصب بر روی سطوح خیس و مقاومت پایین در برابر آتش سوزی اشاره کرد. این در حالی است که تقویت با FRCM

¹ Externally Bonded

منظور جلوگیری از شکست برشی تیرها در زمان آزمایش از میلگردهای عرضی با مشخصات $\phi 8 @ 120$ برای تیرهای حاوی میلگرد کششی $2\phi 16$ ، $\phi 8 @ 100$ ، برای تیرهای حاوی میلگرد کششی $2\phi 22$ و $\phi 10 @ 80$ برای تیرهای حاوی میلگرد کششی $2\phi 28$ استفاده شد. برای تقویت تیرها با FRP و FRCM از دو روش تقویت EBR و EBROG استفاده گردید. ابعاد هندسی و آرایش میلگردهای طولی و عرضی هر یک از تیرها در شکل ۲ ارائه شده است. همچنین مشخصات کامل تیرها در جدول ۱ خلاصه شده است. دو تیر تقویت شده با FRP در پژوهش‌های پیشین نیز گزارش شده است [۴ و ۵].



شکل ۲- ابعاد هندسی، آرایش میلگردهای طولی و عرضی تیرها (ابعاد بر حسب میلی‌متر)، (الف) نحوه بارگذاری تیرها، (ب) $\rho_s / \rho_b = 0.27$ (پ)، $\rho_s / \rho_b = 0.41$ (ت)، $\rho_s / \rho_b = 0.69$

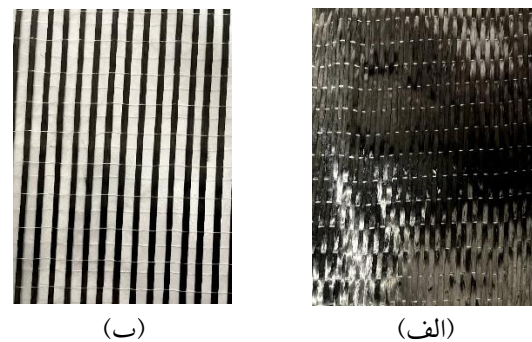
جدول ۱- مشخصات تیرهای تقویت شده

نام تیر	روش تقویت	نوع مصالح تقویتی	ρ_s^*	ρ_{sb}^*
FRP-L-E	EBR	رزین اپوکسی	۰/۶۱	۰/۲۷
FRCM-L-E	EBR	ملات پایه سیمانی	۰/۶۱	۰/۲۷
FRP-M-G	EBROG	رزین اپوکسی	۱/۲۱	۰/۴۱
FRCM-M-G	EBROG	ملات پایه سیمانی	۱/۲۱	۰/۴۱
FRP-H-E	EBR	رزین اپوکسی	۲/۰۰	۰/۶۹
FRCM-H-E	EBR	ملات پایه سیمانی	۲/۰۰	۰/۶۹

* ρ_s و ρ_{sb} به ترتیب نشان دهنده مقدار میلگرد خمشی و مقدار میلگرد خمشی در حالت بالانس برای ساخت تیرها بر اساس آیین‌نامه ACI 318-14 [۲۴] می‌باشد.

تیرها به صورت کلی FRP/FRCM-L/M/H-E/G نام گذاری شده‌اند. FRP و FRCM به ترتیب نشان دهنده استفاده از

گیگاپاسکال و مقاومت کششی ۲۰ مگاپاسکال می‌باشد. در تقویت با FRCM از ملات پایه سیمانی استفاده شده است. مصالح مورد استفاده در مطالعه حاضر برای ساخت ملات پایه سیمانی شامل ۴۰۹۰ گرم سیمان، ۱۹۰۰ گرم میکروسیلیس، ۴۸۰۰ گرم پودر سنگ، ۱۰۵۰ گرم خاکستر بادی، ۲۴۶۰ گرم آب و فوق روان کننده ژیکاو می‌باشد. همچنین، تهیه ملات‌های سیمانی در یک مخلوط کن ۳۰ لیتری انجام گرفت. مقاومت فشاری ملات پایه سیمانی بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۵۰ میلی‌متر بر اساس استاندارد ASTM C109 [۲۲] و مقاومت کششی بر روی نمونه‌های پایونی (بریکت) بر اساس استاندارد ASTM C496 [۲۳] به ترتیب برابر با ۵۰ مگاپاسکال و ۴/۸ مگاپاسکال می‌باشد. لازم به ذکر است که در تقویت با ملات پایه سیمانی نمی‌توان از ورق‌های CFRP رایج استفاده نمود، چرا که ملات امکان عبور از ورق‌های CFRP و چسبیدن به لایه زیرین را ندارد. بنابراین در تقویت با ملات پایه سیمانی از شبکه‌های الیاف CFRP استفاده می‌گردد تا بتوان چسبندگی مناسبی بین شبکه الیاف و ملات ایجاد نمود. در شکل‌های ۱- الف و ب به ترتیب ورق و شبکه‌های CFRP استفاده شده برای تقویت با FRP و FRCM نشان داده شده است.



شکل ۱- الف) ورق‌های CFRP و ب) شبکه الیاف CFRP

۲-۳- مشخصات تیرهای بتن مسلح

در این پژوهش شش تیر بتن مسلح به عرض ۲۵۰ میلی‌متر، ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر و طول ۲۲۰۰ میلی‌متر ساخته شده و تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای قرار گرفتند. ابعاد تیرها بر اساس پژوهش انجام شده توسط سبزی و همکاران [۶] انتخاب گردید. در پژوهش حاضر از سه نوع میلگرد کششی با آرایش $2\phi 16$ ، $2\phi 22$ و $2\phi 28$ برای ساخت تیرها استفاده شد. میلگرد فشاری استفاده شده در ساخت تمامی تیرها به صورت $2\phi 12$ می‌باشد. همچنین به

می‌گیرد. در نهایت ملات بر روی شبکه الیاف قرار می‌گیرد (شکل ۴-ب). لازم به ذکر است در تقویت با FRCM از سه لایه شبکه FRCM با ابعاد $1700 \times 240 \times 167$ میلی‌متر (سطح مقطع یکسان با تقویت FRP) استفاده گردید. بنابراین در تقویت با FRCM مراحل ذکر شده برای سه لایه تکرار می‌گردد.



(الف)



(ب)

شکل ۴- مراحل تقویت با روش EBR در تیرهای تقویت شده با FRCM، الف) قرارگیری لایه‌ای از ملات بر روی سطح زیر شده و ب) قرارگیری لایه‌ای از ملات بر روی شبکه FRCM

در تقویت با روش EBROG ابتدا شیارهایی بر روی وجه کششی تیر ایجاد می‌گردد. در تقویت با FRP از سه شیار به طول ۱۷۵۰ میلی‌متر، عرض ۸ میلی‌متر و عمق ۱۰ میلی‌متر استفاده شد. در مرحله بعدی درون شیارها با استفاده از جت هوا از گرد و غبار پاک گردید. سپس شیارها با استفاده از رزین اپوکسی پر شده و ورقه‌های FRP بر روی شیارها نصب شدند. در تقویت با FRCM به دلیل نیاز به سطح بیشتر برای ملات در مقایسه با چسب اپوکسی، سه شیار به طول ۱۷۵۰ میلی‌متر، عرض ۱۲ میلی‌متر و عمق ۱۶ میلی‌متر ایجاد شد (شکل ۵-الف). پس از ایجاد شیارها، درون آن‌ها با استفاده از جت هوا از هر گونه گرد و غبار پاک شد. در تقویت با FRCM، ابتدا درون شیارها به مدت حداقل ۳۰ دقیقه قبل از تقویت، اشباع گردیده و سپس درون شیارها با استفاده از ملات پر شده (شکل ۵-ب) و در انتها شبکه‌های FRCM بر روی

پلیمرهای مسلح الیافی و مواد پایه سیمانی مسلح الیافی برای تقویت می‌باشد. M و L ، H به ترتیب نشان‌دهنده مقدار میلگرد خمشی $\rho_s / \rho_{sb} = 0.27$ ، $\rho_s / \rho_{sb} = 0.4$ و $\rho_s / \rho_{sb} = 0.6$ بوده و E و G به ترتیب بیانگر استفاده از روش‌های EBR و EBROG برای تقویت می‌باشد.

۴-۲- تقویت تیرهای بتن مسلح با FRP و FRCM

در تقویت با روش EBR، ابتدا وجه کششی تیر با استفاده از سنگ فرز و سنگ مخصوص سایش بتن زبر می‌گردد (شکل ۳-الف). سپس سطح زبر شده با استفاده از جت هوا از گرد و غبار تمیز می‌گردد. در تقویت با FRP، ابتدا لایه‌ای نازک از چسب بر روی وجه کششی تیر مالیده شده و سپس ورقه‌های FRP بر روی سطح مورد نظر چسبانده می‌شود (شکل ۳-ب). در تقویت با دو لایه ورق FRP، لایه دیگری از چسب بر روی ورق FRP قرار گرفته و به طور کامل سطح آن با استفاده از چسب اپوکسی اشباع می‌گردد (شکل ۳-پ). در پژوهش حاضر از دو لایه ورق CFRP با ابعاد $1700 \times 1700 \times 167$ میلی‌متر برای تقویت با FRP استفاده گردید. در تقویت با FRCM، ابتدا وجه کششی تیر زبر شده و سپس سطح مورد نظر به مدت ۳۰ دقیقه با آب اشباع می‌گردد.



(پ)



(ب)



(الف)

شکل ۳- مراحل تقویت با روش EBR در تیرهای تقویت شده با FRP، الف) حذف لایه‌های ضعیف سطح بتن، ب) قرارگیری ورق FRP بر روی چسب اپوکسی و پ) اشباع کردن سطح FRP با چسب اپوکسی

در مرحله بعدی لایه‌ای از ملات بر روی سطح زبر شده قرار داده شده (شکل ۴-الف) و شبکه الیاف CFRP بر روی ملات قرار

۳- مشاهدات و نتایج آزمایشگاهی

شکل پذیری یک سیستم سازه‌ای، اجزا و مواد تشکیل دهنده آن همواره اهمیت ویژه‌ای در طراحی سازه‌ها دارد. شکل پذیری یک عضو به عنوان توانایی‌اش برای تحمل تغییر شکل غیر الاستیک قبل از گسیختگی، بدون از دست دادن قابل توجه مقاومت می‌باشد. سطح زیر منحنی بار- تغییر مکان تا نقطه‌ی حداکثر ظرفیت باربری نمونه‌ها ممکن است به عنوان معیار اولیه و نشانه‌ای برای مقایسه میزان جذب انرژی و شکل پذیری نمونه‌های تیری استفاده شود [۶]. خلاصه نتایج آزمایشگاهی مربوط به تغییر مکان وسط دهانه، ظرفیت باربری نهایی و سطح زیر منحنی بار- تغییر مکان تیرها تا ظرفیت باربری نهایی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- خلاصه نتایج آزمایشگاهی

نام تیر	تغییر مکان وسط دهانه (mm)	ظرفیت باربری (kN)	سطح زیر منحنی بار- تغییر مکان (kN.mm)
FRP-L-E	۱۲/۷	۱۴۸	۱۲۳۶
FRCM-L-E	۱۲/۵	۱۶۷	۱۲۲۹
FRP-M-G	۱۶/۳	۲۳۸	۲۳۲۹
FRCM-M-G	۱۵/۶	۲۴۷	۲۲۲۹
FRP-H-E	۲۰/۱	۳۰۹	۳۹۷۵
FRCM-H-E	۱۸/۸	۳۶۱	۴۱۸۷

۳-۱- تیرهای تقویت شده با مقدار میلگرد خمشی

$$\rho_s / \rho_{sb} = 0.27$$

اولین ترک خمشی در تیر تقویت شده با FRP (FRP-L-E) در بار ۴۱ کیلونیوتن ایجاد گردید. همچنین مود گسیختگی تیر ذکر شده به صورت جداشدگی ورق FRP به همراه لایه نازکی از پوشش بتن از وجه کششی تیر می‌باشد. این درحالی است که اولین ترک خمشی در تیر تقویت شده با FRCM (FRCM-L-E) در بار ۶۳ کیلونیوتن مشاهده شد. همچنین مود گسیختگی مشاهده شده در این تیر به صورت پارگی شبکه‌های FRCM می‌باشد. در شکل‌های ۷- الف و ب به ترتیب مود گسیختگی مشاهده شده در تیرهای FRP-L-E و FRCM-L-E نشان داده شده است. در شکل ۸ منحنی بار- تغییر مکان وسط دهانه تیرهای ذکر شده ارائه

ملات قرار می‌گیرد (شکل ۵- پ). لازم به ذکر است مشابه روش EBR، در تقویت با FRP از دو لایه ورق CFRP با ابعاد ۱۷۰۰×۱۷۰×۰/۱۶۷ میلی‌متر و در تقویت با FRCM از سه لایه شبکه FRCM با ابعاد ۱۷۰۰×۲۴۰×۰/۱۶۷ میلی‌متر (سطح مقطع یکسان در هر دو نوع تقویت FRP و FRCM) استفاده گردید.

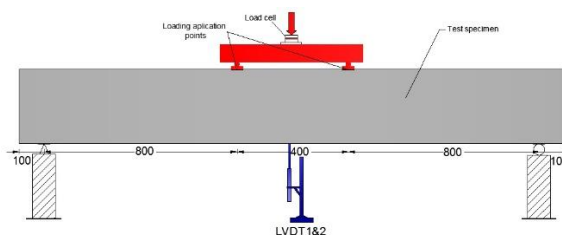


(الف) (ب) (پ)

شکل ۵- مراحل تقویت با روش EBROG در تیرهای تقویت شده با FRCM، الف) شیارهای ایجاد شده، ب) قرارگیری شبکه‌های FRCM بر روی ملات پایه سیمانی و پ) قرارگیری ملات پایه سیمانی بر روی شبکه FRCM

۲-۵- آزمایش خمش چهار نقطه‌ای

تیرهای تقویت شده با FRP و FRCM تحت آزمایش خمش چهارنقطه‌ای قرار گرفتند (شکل ۶). بارگذاری به صورت بار استاتیکی و یکنواخت انجام گرفت. تغییر مکان وسط تیر توسط تغییر مکان سنج خطی (LVDT^۱) و نیرو توسط نیروسنج^۲ به دستگاه ثبت داده‌ها^۳ منتقل شدند و خیز تجربی تیرها در وسط دهانه برداشت شد. با استفاده از نمودار بار- تغییر مکان به دست آمده از آزمایش، خیز تیرها در سطوح مختلف بارگذاری و ظرفیت باربری تیرهای تقویت شده با FRP و FRCM محاسبه گردید.



شکل ۶- نحوه آزمایش خمش چهار نقطه‌ای

³ Logger-Data

¹ Linear Variable Displacement Transducer

² Load Cell

می‌باشد. بنابراین می‌توان بیان نمود که نوع روش تقویت (FRP یا FRCM) تأثیری بر سطح زیر منحنی بار- تغییر مکان ندارد.

۲-۳- تیرهای تقویت شده با مقدار میلگرد خمشی

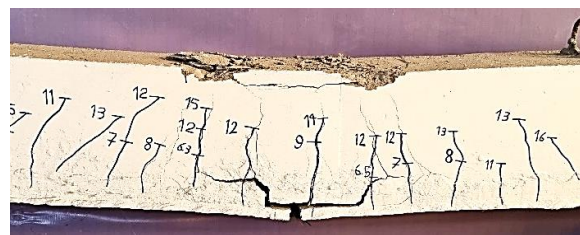
$$\rho_s / \rho_{sb} = 0.41$$

اولین ترک خمشی در تیر تقویت شده با FRP (FRP-M-G) در بار ۵۰ کیلونیوتن ایجاد گردید. همچنین مود گسیختگی تیر ذکر شده به صورت جداشدگی ورق FRP به همراه بخشی از پوشش بتن روی میلگردهای کششی می‌باشد. این درحالی است که اولین ترک خمشی در تیر تقویت شده با FRCM (FRCM-M-G) در بار ۷۰ کیلونیوتن مشاهده شد. همچنین مود گسیختگی مشاهده شده در این تیر به صورت جداشدگی ورق FRP به همراه پوشش بتن روی میلگردهای کششی می‌باشد. در شکل ۹- الف و ب به ترتیب مود گسیختگی مشاهده شده در تیرهای FRP-M-G و G و FRCM-M-G نشان داده شده است. در شکل ۱۰ منحنی بار- تغییر مکان وسط دهانه تیرهای ذکر شده ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد منحنی‌های بار- تغییر مکان تیرهای ذکر شده تقریباً منطبق بر یکدیگر می‌باشد. ظرفیت باربری و تغییر مکان وسط دهانه در لحظه باربری حداکثر تیر FRP-M-G به ترتیب برابر با ۲۳۸ کیلونیوتن و ۱۶/۳ میلی‌متر می‌باشد. این درحالیست که ظرفیت باربری و تغییر مکان وسط دهانه تیر FRCM-M-G به ترتیب برابر با ۲۴۷ کیلونیوتن و ۱۵/۶ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان بیان نمود که تقویت با FRCM منجر به افزایش ظرفیت باربری به میزان ۳/۸ درصد و کاهش خیز وسط دهانه در لحظه باربری حداکثر به میزان ۴/۳ درصد می‌گردد. در تیر FRCM-M-G و بار ۲۱۰ کیلو نیوتن، در انتهای ورق پلیمری الیافی، ترک مورب با زاویه ۴۵ درجه ظاهر گردید. سپس با ادامه بارگذاری، ترک به وجود آمده در دو مسیر مورب و افقی گسترش یافت. ترک افقی در پوشش بتن و زیر میلگردهای کششی به وجود آمد و با رسیدن به ناحیه‌ی با لنگر ثابت متوقف گردید. در نهایت در بار ۲۴۷ کیلو نیوتن پوشش بتن از قسمت انتهایی شبکه FRCM از وجه کششی تیر جدا شد و پدیده‌ی قلوه کن شدن بتن به وضوح مشاهده گردید. نتایج مربوط به سطح زیر منحنی بار- تغییر مکان برای مقطع با فولاد متوسط در جدول ۲ نشان می‌دهد که سطح زیر منحنی بار- تغییر

شده است. ظرفیت باربری و تغییر مکان وسط دهانه در لحظه باربری حداکثر تیر FRP-L-E به ترتیب برابر با ۱۴۸ کیلونیوتن و ۱۲/۷ میلی‌متر می‌باشد. این درحالی است که ظرفیت باربری و تغییر مکان وسط دهانه تیر FRCM-L-E به ترتیب برابر با ۱۶۷ کیلونیوتن و ۱۲/۵ میلی‌متر می‌باشد. بنابراین می‌توان بیان نمود که تقویت با FRCM منجر به افزایش ظرفیت باربری به میزان ۱۲/۸ درصد و کاهش خیز وسط دهانه در لحظه باربری حداکثر به میزان ۱/۶ درصد در مقایسه با تقویت با FRP می‌گردد.

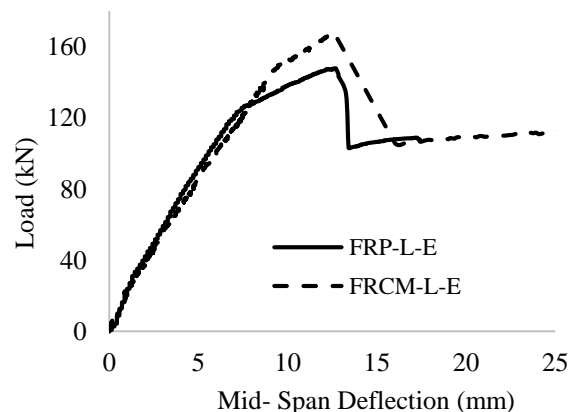


(الف)



(ب)

شکل ۷- مود گسیختگی تیرهای با مقدار میلگرد خمشی FRP-L-E (الف) و FRCM-L-E (ب) ، $\rho_s / \rho_b = 0.27$

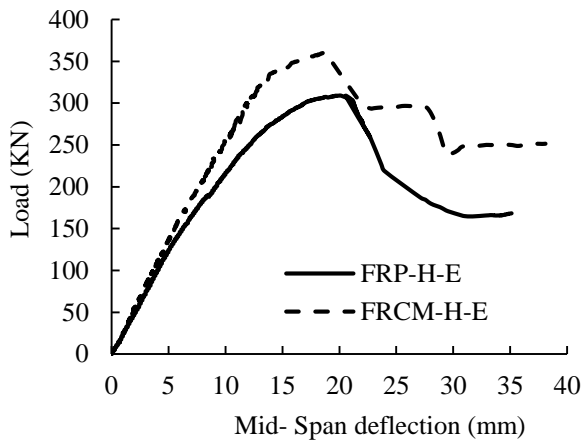


شکل ۸- منحنی بار- تغییر مکان وسط دهانه در تیرهای با مقدار

$$\rho_s / \rho_b = 0.27 \text{ میلگرد خمشی}$$

نتایج مربوط به سطح زیر منحنی بار- تغییر مکان برای مقطع با فولاد کم در جدول ۲ نشان می‌دهد که سطح زیر منحنی بار- تغییر مکان در هر دو روش تقویت با FRP و FRCM مشابه یکدیگر

درحالی است که ظرفیت باربری و تغییر مکان وسط دهانه تیر FRCM-H-E به ترتیب برابر با ۳۶۱ کیلونیوتن و ۱۸/۸ میلی‌متر می‌باشد. بنابراین می‌توان بیان نمود که تقویت با FRCM منجر به افزایش ظرفیت باربری به میزان ۱۶/۸ درصد و کاهش خیز وسط دهانه در لحظه باربری حداکثر به میزان ۶/۵ درصد می‌گردد. نتایج مربوط به سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان برای مقطع با فولاد زیاد در جدول ۲ نشان می‌دهد که سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان تیر تقویت شده با FRP به مقدار ۵/۱ درصد کمتر از تیر تقویت شده با FRCM می‌باشد.



شکل ۱۱- منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه در تیرهای با مقدار میلگرد خمشی $\rho_s / \rho_b = 0.69$

مکان تیر تقویت شده با FRP به مقدار ۴/۵ درصد بیشتر از تیر تقویت شده با FRCM می‌باشد.

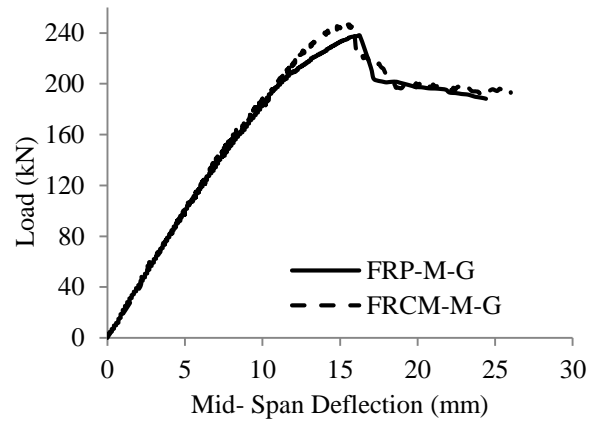


(الف)



(ب)

شکل ۹- مود گسیختگی تیرهای با مقدار میلگرد خمشی FRCM-M-G (ب) و FRP-M-G (الف) $\rho_s / \rho_b = 0.41$



شکل ۱۰- منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه در تیرهای با مقدار میلگرد خمشی $\rho_s / \rho_b = 0.41$

۴- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با روابط آیین‌نامه‌ها و مدل‌های تحلیلی در تقویت با FRP

۴-۱- آیین‌نامه ACI440.2R-17 [۲۵]

بر اساس این آیین‌نامه مود گسیختگی جداشدگی ورق FRP یا جداشدگی پوشش بتن هنگامی رخ می‌دهد که سطح تماس قادر به مقاومت در برابر نیروی به وجود آمده در لایه‌ی ورق FRP نباشد. بنابراین کرنش مؤثر که در رابطه (۱) ارائه شده است باید به کرنش جداشدگی که ممکن است رخ دهد (رابطه ۲) محدود شود.

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0.9\varepsilon_{fu} \quad (2)$$

در رابطه (۱)، ε_{cu} ، c ، d_f و ε_{bi} به ترتیب کرنش نهایی بتن (۰/۰۰۳)، عمق تار خنثی، عمق مؤثر ورق FRP و کرنش اولیه در مرکز ورق‌های FRP می‌باشند. در رابطه (۲)، n ، E_f ، t_f و

۳-۳- تیرهای تقویت شده با مقدار میلگرد خمشی $\rho_s / \rho_{sb} = 0.69$

اولین ترک خمشی در تیر تقویت شده با FRP (FRP-H-E) در بار ۵۷ کیلونیوتن ایجاد گردید. همچنین مود گسیختگی تیر ذکر شده به صورت جداشدگی ورق FRP از وجه کششی تیر می‌باشد. این درحالیست که اولین ترک خمشی در تیر تقویت شده با FRCM (FRCM-H-E) در بار ۱۲۴ کیلونیوتن مشاهده شد. همچنین مود گسیختگی مشاهده شده در این تیر به صورت پارگی شبکه‌های FRCM می‌باشد. در شکل ۱۱ منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه تیرهای ذکر شده ارائه شده است. ظرفیت باربری و تغییر مکان وسط دهانه در لحظه باربری حداکثر تیر FRP-H-E به ترتیب برابر با ۳۰۹ کیلونیوتن و ۲۰/۱ میلی‌متر می‌باشد. این

بارها برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود. $\gamma_{f,d}$ نشان‌دهنده ضریب اطمینان بر اساس احتمال مود جداشدگی (برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود)، FC ضریب اطمینانی است که به سطح دانش از عضو می‌باشد که قرار است تقویت شود بستگی دارد (برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود)، $k_{G,2}$ ضریب تصحیح می‌باشد که میانگین کالیبره شده آن برابر با ۰/۳۲ میلی‌متر می‌باشد. همچنین k_b ضریب تصحیح هندسی می‌باشد که با استفاده از رابطه (۸) تعیین می‌گردد.

$$\varepsilon_{fdd} = \frac{k_q}{\gamma_{f,d}} \sqrt{\frac{2 \cdot k_b \cdot k_{G,2}}{n \cdot E_f \cdot t_f \cdot FC}} \sqrt{f_{cm} \cdot f_{cm}} \quad (۷)$$

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - b_f/b}{1 + b_f/b}} \geq 1 \quad \text{for } b_f/b \geq 0.25 \quad (۸)$$

در رابطه (۸)، b_f عرض ورق FRP و b عرض مقطع تیر می‌باشد.

۳-۴- مدل تحلیلی لو و همکاران [۲۷]

لو و همکاران [۲۷] مدلی برای کرنش جداشدگی ورق FRP به صورت رابطه (۹) پیشنهاد کردند:

$$\varepsilon_f^{IC} = \frac{0.144(4.41 - \alpha)\tau_{max}}{\sqrt{nE_f t_f}} \quad (۹)$$

در رابطه (۹) $\tau_{max} = 1.5\beta_w f_t$ و $f_t = 0.53\sqrt{f'_c}$

$$\beta_w = \sqrt{(2.25 - (b_f/b)) / (1.25 + (b_f/b))}$$

و $\alpha = 3.41L_{ve}/L_d$ و $L_{ve} = 0.228\sqrt{nE_f t_f}$ می‌باشد.

همچنین L_d فاصله از بخش بارگذاری شده تا انتهای ورق FRP و f_t مقاومت کششی بتن است.

۴-۴- مدل تحلیلی سید و وو [۲۸]

بر اساس این مدل، مقدار کرنش جداشدگی ε_{deb} می‌تواند از رابطه‌ی (۱۰) تعیین گردد:

$$\varepsilon_{deb} = \frac{0.23(f'_c)^{0.2}}{(nE_f t_f)^{0.35}} \quad (۱۰)$$

در این حالت، ظرفیت خمشی با در نظر گرفتن معادله (۱۰) و در نظر گرفتن این موضوع که جداشدگی معمولاً بعد از تسلیم میلگردهای کششی رخ می‌دهد، با استفاده از معادله (۱۱) محاسبه می‌شود:

f'_c به ترتیب بیانگر تعداد لایه‌های FRP، مدول الاستیسیته FRP، ضخامت ورق FRP و مقاومت فشاری بتن هستند.

ظرفیت باربری تیر بتن مسلح تقویت شده با FRP به مود گسیختگی بستگی دارد. هنگامی که مود گسیختگی جداشدگی ورق FRP اتفاق می‌افتد، ظرفیت باربری بر اساس آیین نامه ACI440.2R-17 [۲۵] از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$M_n = A_s f_s (d - \frac{\beta_1 c}{2}) + \psi_f A_f f_{fe} \quad (۳)$$

$$(d_f - \frac{\beta_1 c}{2}) + A_s' f_s' (\frac{\beta_1 c}{2} - d)$$

در رابطه (۳)، $f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$ می‌باشد. در این حالت عمق تار خشی با سعی و خطا محاسبه می‌گردد. لازم به ذکر است که در این حالت استفاده از بلوک مستطیلی تنش ویتنی صحیح نمی‌باشد چون بتن در فشار به کرنش نهایی خود نرسیده است. بنابراین رابطه‌ی غیر خطی تنش - کرنش بتن تبدیل به یک بلوک مستطیلی معادل با استفاده از دو پارامتر وابسته β_1 و α_1 می‌شود. جایی که ارتفاع و عمق معادل بلوک مستطیلی تنش برای این مدل به ترتیب $\beta_1 c$ و $\alpha_1 f'_c$ می‌باشد. پارامترهای بلوک معادل تنش در رابطه‌های (۴) و (۵) ارائه شده است:

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - 2\varepsilon_c} \quad (۴)$$

$$\alpha_1 = \frac{3\varepsilon'_c \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1 \varepsilon_c'^2} \quad (۵)$$

در رابطه‌های (۴) و (۵)، $\varepsilon'_c = 1.7f'_c/E_c$ می‌باشد.

۲-۴- آیین‌نامه CNR-DT 200 R1/2013 [۲۶]

بر اساس این آیین‌نامه کرنش در FRP باید به ε_{fd} مطابق رابطه (۶) محدود شود:

$$\varepsilon_{fd} = \min \left\{ \frac{\eta_a \varepsilon_{fk}}{\gamma_f}, \varepsilon_{fdd} \right\} \quad (۶)$$

در رابطه (۶)، η_a یک ضریب محیطی می‌باشد (برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود)، γ_f فاکتور ایمنی مواد (برابر با ۱ فرض می‌شود)، ε_{fk} مشخصه کرنش گسیختگی و ε_{fdd} کرنش جداشدگی FRP می‌باشد که مطابق رابطه (۷) تعیین می‌گردد.

در رابطه (۷)، مقدار k_q برای بار گسترده برابر با ۱/۲۵ و برای سایر

عمق تار ختنی افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال عمق تار ختنی برای مقاطع با مقدار میلگرد خمشی $\rho_s/\rho_{sb} = 0.27$ و $\rho_s/\rho_{sb} = 0.41$ به ترتیب برابر با ۶۰، ۷۳ و ۱۰۰ میلی‌متر [۲۵] ACI440.2R-17 (با استفاده از سعی و خطا). پس با در نظر گرفتن کرنش گسیختگی در ورق FRP، کرنش میلگردهای کششی در موقع شکست کاهش می‌یابد، در نتیجه عرض ترک خمشی کاهش یافته و اثر لغزش کم می‌شود.

۵- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با روابط آیین‌نامه ACI-549.4R-13 [۱۶] برای تقویت با FRCM

ظرفیت باربری تیرهای بتن مسلح تقویت شده با FRCM را می‌توان بر اساس روابط آیین‌نامه‌های ACI 318-14 [۲۴] و ACI-549.4R-13 [۱۶] تخمین زد. نحوه محاسبات ظرفیت باربری تیرهای تقویت شده با FRCM مشابه تیرهای تقویت شده با FRP بر اساس آیین‌نامه ACI440.2R-17 [۲۵] بوده و تنها تفاوت در تعیین مقدار کرنش کششی موثر در مصالح FRCM می‌باشد. بر اساس آیین‌نامه ACI-549.4R-13 [۱۶]، کرنش کششی موثر در مصالح FRCM در لحظه‌ی گسیختگی بر اساس رابطه (۱۳) تعیین می‌گردد:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fu} \leq 0.012 \quad (13)$$

در جدول ۴ نسبت ظرفیت باربری نهایی حاصل از روابط آیین‌نامه ACI-549.4R-13 [۱۶] به ظرفیت باربری نهایی نتایج آزمایشگاهی این پژوهش ارائه شده است.

جدول ۴- نسبت ظرفیت باربری تحلیلی به ظرفیت باربری آزمایشگاهی در تیرهای تقویت شده با FRCM

P_{pred}/P_{exp}	نام تیر
[۱۶] ACI-549.4R-13	
۱/۲۲	FRCM-L-E
۰/۹۴	FRCM-M-G
۰/۷۹	FRCM-H-E

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌گردد در تقویت با روش EBR، برای مقطع با مقدار میلگرد خمشی $\rho_s/\rho_{sb} = 0.27$ ظرفیت باربری به دست آمده از روابط آیین‌نامه بیشتر از ظرفیت

$$M_{deb} = A_s f_y y_{ct} + 0.23 b_f (f_c')^{0.2} (n E_f t_f)^{0.65} (y_{ct} + c^*) \quad (11)$$

در این رابطه c^* فاصله بین میلگردهای کششی و مرکز ورق‌های FRP است. y_{ct} فاصله‌ی بین نیروی کششی حاصل از میلگرد کششی و نیروی فشاری قسمت فشاری مقطع می‌باشد که در سطح مقطع مستطیلی می‌تواند $0.9d$ در نظر گرفته شود. در این حالت می‌توان معادله (۱۱) را به صورت رابطه (۱۲) بازنویسی نمود:

$$M_{deb} = 0.9 A_s f_y d + 0.23 b_f (f_c')^{0.2} (n E_f t_f)^{0.65} (0.9d + c^*) \quad (12)$$

در جدول ۳ نسبت ظرفیت باربری نهایی حاصل از روابط آیین‌نامه‌ها و مدل‌های تحلیلی موجود به ظرفیت باربری نهایی حاصل از نتایج آزمایشگاهی این پژوهش ارائه شده است.

جدول ۳- نسبت ظرفیت باربری تحلیلی به ظرفیت باربری آزمایشگاهی در تیرهای تقویت شده با FRP

P_{pred}/P_{exp}				
سید و	لو و	CNR-DT 200 R1/2013	ACI440.2R [۲۵]-17	نام تیر
و	همکاران	[۲۶]		
[۲۸]	[۲۷]			
۱/۲۴	۱/۲۰	۱/۱۵	۱/۱۲	FRP-L-E
۱/۰۰	۰/۹۷	۰/۹۲	۰/۹۰	FRP-M-G
۱/۱۰	۱/۰۷	۰/۹۲	۰/۹۱	FRP-H-E

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌گردد در تقویت با روش EBR، برای مقطع با مقدار میلگرد خمشی $\rho_s/\rho_{sb} = 0.27$ ظرفیت باربری به دست آمده از روابط آیین‌نامه‌ها و مدل‌های تحلیلی بیشتر از ظرفیت باربری آزمایشگاهی می‌باشد. این درحالیست که در مقاطع با مقدار میلگرد خمشی $\rho_s/\rho_{sb} = 0.69$ ظرفیت باربری به دست آمده از روابط آیین‌نامه‌ها و مدل‌های تحلیلی به ظرفیت باربری آزمایشگاهی نزدیک می‌باشد. همچنین در تقویت با روش EBROG با مقدار میلگرد خمشی $\rho_s/\rho_{sb} = 0.41$ ظرفیت باربری به دست آمده از روابط آیین‌نامه‌ها و مدل‌های تحلیلی به ظرفیت باربری آزمایشگاهی نزدیک می‌باشد. لازم به ذکر است که با افزایش درصد میلگردهای خمشی، عرض ترک خمشی کاهش یافته و

تقریباً مشابه یکدیگر می باشد. - در تقویت با روش EBR، مود گسیختگی مشاهده شده در تقویت با FRP و FRCM به ترتیب به صورت جداشدگی ورق FRP از وجه کششی تیر و پارگی شبکه FRCM می باشد. بنابراین می توان بیان نمود که در تقویت با FRCM می توان از ظرفیت نهایی الیاف FRP به دلیل پارگی الیاف استفاده نمود.

- در تقویت با روش EBROG، مود گسیختگی مشاهده شده در تیر تقویت شده با FRCM به صورت جداشدگی کامل پوشش بتن روی میلگردهای کششی و در تیر تقویت شده با FRP به صورت جداشدگی بخشی از پوشش بتن روی میلگردهای کششی می باشد.

- در تقویت با روش EBR در مقاطع با مقدار میلگرد خمشی $\rho_s / \rho_{sb} = 0.27$ ، ظرفیت باربری به دست آمده از آیین نامه ها و مدل های تحلیلی برای تقویت با FRP به مقدار قابل توجهی بیشتر از نتایج آزمایشگاهی می باشد. این در حالی است که در تقویت با روش EBR در مقاطع با مقدار میلگرد خمشی $\rho_s / \rho_{sb} = 0.69$ ، ظرفیت باربری به دست آمده از آیین نامه ها و مدل های تحلیلی، برای تقویت با FRP به نتایج آزمایشگاهی نزدیک می باشد.

۷- مراجع

- [1] Khorasani AM, Esfahani MR, Sabzi J. The effect of transverse and flexural reinforcement on deflection and cracking of GFRP bar reinforced concrete beams. *Composites Part B: Engineering*. 2019;161:530-46.
- [2] Farahi B, Esfahani M, Sabzi J. Experimental investigation on the behavior of reinforced concrete beams retrofitted with NSM-SMA/FRP. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 2019;51:685-98.
- [3] Arabshahi A, Tavakol M, Sabzi J, Gharaei-Moghaddam N. Prediction of the effective moment of inertia for concrete beams reinforced with FRP bars using an evolutionary algorithm. In *Structures*. 2022; 35: 684-05.
- [4] Sabzi J, Esfahani MR. Effects of tensile steel bars arrangement on concrete cover separation of RC beams strengthened by CFRP sheets. *Construction and Building Materials*. 2018;162:470-9.
- [5] Sabzi J, Esfahani MR. Flexural Behavior of RC Beams Strengthened by CFRP Sheets in the Beams with low and high Reinforcement Ratios. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 2018;50:907-18.

باربری آزمایشگاهی می باشد. این درحالیست که در مقاطع با مقدار میلگرد خمشی $\rho_s / \rho_{sb} = 0.69$ ، ظرفیت باربری بدست آمده از روابط آیین نامه کمتر از ظرفیت باربری آزمایشگاهی می باشد. همچنین در تقویت با روش EBROG با مقدار میلگرد خمشی $\rho_s / \rho_{sb} = 0.41$ ، ظرفیت باربری به دست آمده از روابط آیین نامه تقریباً به ظرفیت باربری آزمایشگاهی نزدیک می باشد.

۶- نتیجه گیری

هدف از پژوهش حاضر بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با FRP و FRCM در صورت یکسان بودن میزان تقویت خارجی می باشد. همچنین پارامترهای دیگری مانند نوع روش تقویت و مقدار میلگرد خمشی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. شش تیر بتن مسلح با سه مقدار مختلف میلگرد خمشی ($\rho_s / \rho_{sb} = 0.27$ ، $\rho_s / \rho_{sb} = 0.41$ و $\rho_s / \rho_{sb} = 0.69$) ساخته شده و با دو روش تسلیح خارجی (EBR) و تسلیح خارجی روی شیار (EBROG) تقویت شدند. نتایج این پژوهش نشان می دهد که:

- در تقویت با روش EBR در مقاطع با مقدار فولاد خمشی $\rho_s / \rho_{sb} = 0.27$ ، تقویت با FRCM منجر به افزایش ظرفیت باربری به میزان ۱۲/۸ درصد و کاهش خیز وسط دهانه در لحظه باربری حداکثر به میزان ۱/۶ درصد در مقایسه با تقویت FRP می گردد.

- در تقویت با روش EBR در مقاطع با مقدار میلگرد خمشی $\rho_s / \rho_{sb} = 0.69$ ، تقویت با FRCM منجر به افزایش ظرفیت باربری به میزان ۱۶/۸ درصد و کاهش خیز وسط دهانه در لحظه باربری حداکثر به میزان ۶/۵ درصد در مقایسه با تقویت FRP می گردد. بنابراین می توان بیان نمود که در تقویت با روش EBR، با بالا رفتن مقدار میلگرد خمشی عملکرد تقویت FRCM در مقایسه با تقویت FRP در افزایش ظرفیت باربری بهبود می یابد.

- در تقویت با روش EBROG، تقویت با FRCM منجر به افزایش ظرفیت باربری به میزان ۳/۸ درصد و کاهش خیز وسط دهانه در لحظه باربری حداکثر به میزان ۴/۳ درصد در مقایسه با تقویت FRP می گردد. بنابراین می توان بیان نمود که در روش EBROG، عملکرد تیرهای تقویت شده با FRP و FRCM

- polymers (FRP) in flexural strengthening of RC beams. *Construction and Building Materials*. 2017;151:279-91.
- [18] Triantafyllou TC, Papanicolaou CG. Textile Reinforced Mortars (TRM) versus Fiber Reinforced Polymers (FRP) as Strengthening Materials of Concrete Structures. *Special Publication*. 2005;230:99-118.
- [19] D'Ambrisi A, Focacci F. Flexural strengthening of RC beams with cement-based composites. *Journal of Composites for Construction*. 2011;15:707-20.
- [20] Gonzalez-Libreros JH, Sneed L, D'Antino T, Pellegrino C. Behavior of RC beams strengthened in shear with FRP and FRCM composites. *Engineering Structures*. 2017;150:830-42.
- [21] ASTM. (2009). "Standard test methods for tension testing of metallic materials." ASTM E8/E8M, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- [22] ASTM C109 / C109M-16a, Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2 in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA, (2016).
- [23] ASTM C496/C496M-11, Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2011).
- [24] ACI Committee 318. Building code requirements for structural concrete and commentary. Farmington Hills: American Concrete Institute; 2014.
- [25] ACI 440.2R-17. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. Reported by ACI Committee 440. 2017.
- [26] CNR-DT 200 R1/2013. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. Rome, Italy: National Research Council; 2013.
- [27] Lu X, Teng J, Ye L, Jiang J. Intermediate crack debonding in FRP-strengthened RC beams: FE analysis and strength model. *Journal of Composites for Construction*. 2007;11:161-74.
- [28] Said H, Wu Z. Evaluating and proposing models of predicting IC debonding failure. *Journal of composites for construction*. 2008;12:284-99.
- [6] Sabzi J, Esfahani MR, Ozbakkaloglu T, Farahi B. Effect of concrete strength and longitudinal reinforcement arrangement on the performance of reinforced concrete beams strengthened using EBR and EBROG methods. *Engineering Structures*. 2020;205:110072.
- [7] 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*. 2010;14:804-11.
- [8] Ombres L. Flexural analysis of reinforced concrete beams strengthened with a cement based high strength composite material. *Composite Structures*. 2011;94:143-55.
- [9] Shrestha KC, Ebead U, Younis A. Effect of Surface Roughening on Concrete/TRM Bond. *Proceedings of the Ninth International Structural Engineering and Construction Conference, Resilient Structures and Sustainable Construction: ISEC Press Valencia, Spain; 2017*.
- [10] Ombres L. Debonding analysis of reinforced concrete beams strengthened with fibre reinforced cementitious mortar. *Engineering Fracture Mechanics*. 2012;81:94-109.
- [11] Tetta ZC, Koutas LN, Bournas DA. Shear strengthening of full-scale RC T-beams using textile-reinforced mortar and textile-based anchors. *Composites Part B: Engineering*. 2016;95:225-39.
- [12] Ebead U, Shrestha KC, Afzal MS, El Refai A, Nanni A. Effectiveness of fabric-reinforced cementitious matrix in strengthening reinforced concrete beams. *Journal of Composites for Construction*. 2017;21: 04016084.
- [13] Wakjira TG, Ebead U. Hybrid NSE/EB technique for shear strengthening of reinforced concrete beams using FRCM: Experimental study. *Construction and Building Materials*. 2018;164:164-77.
- [14] Wakjira TG, Ebead U. FRCM/internal transverse shear reinforcement interaction in shear strengthened RC beams. *Composite Structures*. 2018;201:326-39.
- [15] Ebead U, El-Sherif H. Near surface embedded-FRCM for flexural strengthening of reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*. 2019;204:166-76.
- [16] ACI-549.4R-13. Guide to design and construction of externally bonded fabric-reinforced cementitious matrix systems for repair and strengthening concrete and masonry structures. Reported by ACI Committee 549. 2013.
- [17] Raoof SM, Koutas LN, Bournas DA. Textile-reinforced mortar (TRM) versus fibre-reinforced

Experimental and analytical investigation of RC beams strengthened by FRP and FRCM

Javad Sabzi

Ph.D. Student, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

M. Reza Esfahani*

Professor, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Abstract

The present study aims to compare the flexural behavior of reinforced concrete (RC) beams strengthened by fiber reinforced polymer (FRP) with that of fiber reinforced cementitious matrix (FRCM) sheets. Accordingly, 6 RC beams were manufactured and strengthened by FRP and FRCM. Other parameters such as strengthening method and tensile reinforcement ratio were investigated. The results show that in externally bonded reinforcement (EBR) method, strengthening by FRCM sheets leads to the improvement of load carrying capacity by 12.8% and 16.8%, respectively, in specimens with $\rho_s / \rho_{sb} = 0.27$ and $\rho_s / \rho_{sb} = 0.69$ compared to the specimens strengthened by FRP sheets. Furthermore, the failure mode of specimens strengthened by EBR method was debonding in case of FRP sheets while the failure mode of FRCM strengthened specimens was fiber rupture. In externally bonded reinforcement on grooves (EBROG) method, the load carrying capacity of specimens strengthened by FRP and FRCM was almost the same, while their failure mode was debonding with partial cover separation and complete cover separation. Finally, the experimental results were compared to the existing models and different code provisions. It was observed that by increasing the tensile reinforcement ratio in FRP strengthened beams, the predicted results by analytical models become closer to the experimental results.

Keywords: beam; reinforced concrete (RC); fiber reinforced polymer (FRP), fiber reinforced cementitious matrix (FRCM), strengthening.

* Corresponding Author: esfahani@um.ac.ir

