

اثر ورق‌های تقویتی FRP در محیط مرطوب بر رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح فولادی در شرایط خوردگی

مریم ملکوتی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

محمدرضا اصفهانی*

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

چکیده

از مهم‌ترین دلایل ایجاد ضعف در سازه‌های بتن مسلح، خوردگی میلگرد می‌باشد. چنانچه روند خوردگی میلگردها ادامه پیدا کند و تمهیداتی برای مقابله در نظر گرفته نشود ممکن است باعث کاهش ظرفیت باربری عضو و یا حتی نابودی کامل آن گردد، پس در شرایط خوردگی باید سازه با استفاده از روش‌های مختلف تقویت و ترمیم شود. به دلیل دوام مواد FRP در محیط‌های خورنده، استفاده از این مواد جهت تقویت و بهسازی المان‌های آسیب‌دیده بتنی در برابر خوردگی کاربرد دارد. در این پژوهش اثر ورق‌های تقویتی CFRP بر رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح فولادی در مجاورت رطوبت و شرایط خوردگی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. به این منظور ابتدا تعداد ۱۰ تیر بتن مسلح با ابعاد مقطع ۱۵۰×۲۰۰ میلیمتر و به طول ۱۴۰۰ میلیمتر ساخته شد. یکی از نمونه‌ها به‌عنوان نمونه‌ی شاهد در نظر گرفته شد و سایر نمونه‌ها تا رسیدن به ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد خوردگی تحت فرایند خوردگی قرار گرفتند. مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده از آزمایشات نشان داد، خوردگی میلگردهای طولی بر رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح اثر می‌گذارد و با افزایش میزان خوردگی، ظرفیت باربری نمونه‌ها کاهش پیدا می‌کند. تیرهای دارای خوردگی زمانی که با ورق‌های CFRP تقویت شدند تا ۳۵ درصد افزایش ظرفیت باربری نسبت به نمونه‌های با درصد خوردگی مشابه و فاقد تقویت از خود نشان دادند. مقایسه‌ی نمونه‌های قرار گرفته در معرض خوردگی مجدد نیز نشان می‌دهد تقویت با ورق CFRP به نحو مؤثری از خوردگی بیشتر میلگردها جلوگیری کرده است و سبب جلوگیری از خوردگی به میزان ۲۶/۹ درصد در برخی از نمونه‌ها شده است.

واژه‌های کلیدی: تیر بتن مسلح تقویت شده، خوردگی میلگرد طولی، خوردگی تسریع شده، ورق‌های CFRP.

* نویسنده مسئول: esfahani@um.ac.ir

۱- مقدمه

Jian و همکاران [۷] اثر تعداد لایه‌های CFRP و اصلاح پوشش بتنی آسیب دیده بتنی با ملات پلیمری را در بازایی ظرفیت تیرهای بتن مسلح در اثر خوردگی مطالعه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند افزایش تعداد لایه‌های ورق CFRP باعث افزایش ظرفیت باربری می‌شود و با افزایش میزان خوردگی، بهتر است پوشش بتنی ترمیم شود.

Almassri و همکاران [۸] در مطالعه‌ای اثربخشی ترمیم با میلگردهای CFRP به روش تقویت نزدیک سطح (NSM^۱) را بررسی کردند تا کارایی این روش در بازگرداندن عملکرد مکانیکی تیرهای آسیب‌دیده بتن مسلح روشن گردد. مدلسازی به روش اجزای محدود و توسط نرم افزار آباکوس نیز صورت گرفت تا نتایج آزمایشگاهی و عددی با هم مقایسه شوند. در ادامه سختی تیر و الگوی ترک‌ها قبل و بعد از ترمیم بررسی شده و ظرفیت نهایی، شکل‌پذیری و مودهای شکست نیز مقایسه و مشخص شد ظرفیت خمشی و سختی تیر افزایش پیدا کرده است. Triantafyllou و همکاران [۹] اثر خوردگی میلگردها در تیرهای بتن مسلح دارای خوردگی و تقویت شده با FRP را مطالعه کردند. در هر مرحله ابتدا نمونه‌ها تا درصد مشخص شده تحت خوردگی قرار گرفته و سپس باری حدود ۶۰ تا ۷۵ درصد ظرفیت نهایی بر آن‌ها وارد شد. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص شد تقویت با FRP ظرفیت تحمل بار در تیرها را افزایش داده و تغییر شکل‌ها را کاهش می‌دهد. البته تیرهایی که در طول آزمایش، بار بیشتری را تجربه کرده بودند (حدود ۷۵ درصد ظرفیت نهایی قابل تحمل خود) در مراحل بعدی توانایی تحمل بار در آن‌ها کاهش یافته و زودتر دچار ترک خوردگی شدند.

در اکثر مطالعات انجام شده ظرفیتی که در سازه پس از تقویت با ورق CFRP حاصل شده مورد بررسی قرار گرفته است، اما توجه به این نکته که سازه در طول عمر باقیمانده خود ممکن است باز هم مورد تهاجم عوامل مخرب قرار بگیرد نیز حائز اهمیت می‌باشد. پس باید پس از ترمیم و تقویت سازه با ورق‌های FRP اثر آن‌ها در افزایش ظرفیت سازه و مقاومت در برابر خوردگی مجدد نیز مورد بررسی قرار بگیرد. با توجه به توضیحات ارائه شده، تحقیق و مطالعه روی ابعاد مختلف این موضوع ضروری است.

یکی از مشکلات رایج در زمینه‌ی سازه‌های بتن مسلح خوردگی و آسیب میلگرد در محیط‌های مرطوب و خورنده است. عوامل مختلفی ممکن است باعث شروع پدیده‌ی خوردگی در سازه شوند که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به حمله‌های کلریدی و کربناته شدن اشاره کرد. آسیب‌های وارد به سازه ناشی از خوردگی گاهی به صورت جزئی بوده و ظرفیت سازه را اندکی کاهش می‌دهد ولی در برخی موارد خوردگی ممکن است باعث خرابی‌های شدید در سازه شود و در نهایت صدمات مالی و جانی به ارمغان آورد. از این رو دستیابی به روش‌های مؤثری که منجر به بازایی ظرفیت سازه شده و شرایط بهره‌برداری مناسب را فراهم آورند، لازم و ضروری می‌باشد [۱]. خوردگی میلگرد فولادی در سازه‌ها پیامدهای نامطلوبی ایجاد کرده و باعث بروز مشکلات متعددی نظیر کاهش مقاومت و شکل‌پذیری سازه، ترک خوردن بتن و به‌طور کلی تضعیف عملکرد سازه‌ای عضو می‌شود [۲].

نتایج تحقیقات Bertur و همکاران [۳] نشان داد که برای محاسبه‌ی شدت خوردگی میلگرد در بتن، می‌توان میزان کاهش در سطح مقطع میلگرد را اندازه‌گیری کرد. همچنین افزایش حجم ناشی از محصولات خوردگی در بتن باعث بروز ترک و از بین رفتن چسبندگی بین میلگرد و بتن می‌شود. Lee و همکاران [۴] ارتباط بین خوردگی میلگرد و مقاومت خمشی تیرهای بتن مسلح را مورد مطالعه قرار داده و نتیجه گرفتند خوردگی میلگردها باعث کاهش ظرفیت باربری تیرها و ایجاد ترک در پوشش بتنی اطراف میلگردها شده که با افزایش میزان خوردگی، عرض این ترک‌ها افزایش پیدا می‌کند. Maalej و Bonacci [۵] اثر تقویت با ورق‌های FRP^۱ را در تیرهای آسیب‌دیده به علت خوردگی بررسی و مشاهده کردند در اثر تقویت، ظرفیت خمشی تیرها افزایش پیدا می‌کند.

Soudki و همکاران [۶] تیرها را تحت بار سرویس تا حد نمایان شدن ترک، بارگذاری کرده و پس تقویت با ورق‌های CFRP^۲ نمونه‌ها را در یک محیط تهاجمی حاوی یون‌های کلرید قرار دادند. آن‌ها افزایش ظرفیت باربری تیرهای تقویت شده نسبت به تیرهای فاقد تقویت را مشاهده کردند.

³ Near Surface Mounted

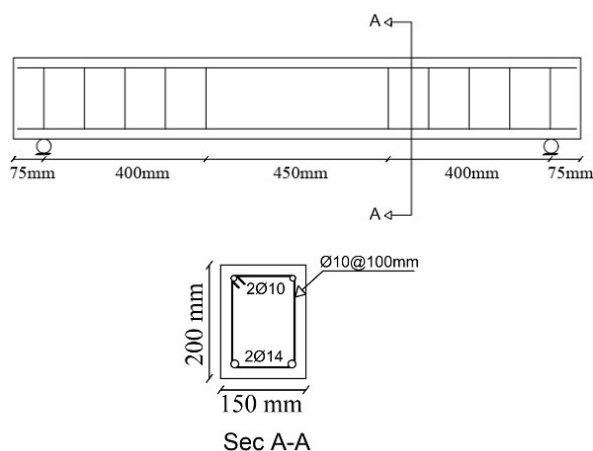
¹ Fiber Reinforced Polymer

² Carbon Fiber Reinforced Polymer

۲- برنامه آزمایشگاهی

۱-۲- مشخصات هندسی نمونه‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش ۱۰ عدد نمونه‌ی آزمایشگاهی شامل تیرهای بتن مسلح با ابعاد مقطع ۱۵۰*۲۰۰ میلی‌متر و به طول ۱۴۰۰ میلی‌متر ساخته شد. میلگردهایی با قطر ۱۰ و ۱۴ میلی‌متر به ترتیب به‌عنوان میلگرد طولی فشاری و میلگرد طولی کششی استفاده شد. میلگردهای عرضی نیز با قطر ۸ میلی‌متر و با فاصله‌ی آزاد ۱۰۰ میلی‌متر در دهانه‌های برشی قرار گرفتند. ابعاد هندسی تیرها، آرایش میلگردهای طولی و عرضی نمونه‌ها در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱- ابعاد هندسی تیرها، آرایش میلگردهای طولی و عرضی نمونه‌ها

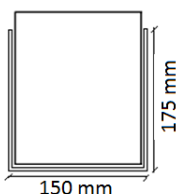
سنگی ۱۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. طرح اختلاط وزنی بتن مذکور در جدول ۱ آمده است. به منظور اندازه‌گیری مقاومت فشاری بتن ساخته شده، تعداد ۸ عدد نمونه‌ی استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر تهیه و همراه تیرهای بتنی در شرایط مناسب عمل‌آوری شد. این نمونه‌ها در زمان‌های ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه توسط دستگاه سنجش مقاومت فشاری بتن مورد آزمایش قرار گرفتند.

جدول ۱- وزن مصالح مورد نیاز برای یک مترمکعب مخلوط

بتنی با مقاومت مشخصه ۲۵ مگاپاسکال

نوع مصالح مصرفی	بادامی	نخودی	ماسه	سیمان آب	مقدار مورد نیاز (kg)
	۴۵۰	۳۲۰	۱۱۰۰	۳۵۰	۱۷۵

جهت تقویت تیرهای ساخته شده، از ورق‌های CFRP با الیاف تک‌جهته استفاده گردید. از آنجا که در این پژوهش تیرهای تقویت شده تحت خوردگی ثانویه قرار گرفتند، لذا همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، تقویت تیرها به صورت خمشی و U شکل با چسباندن ورقی به عرض ۵۰۰ میلی‌متر و با طول ۱۴۰۰ میلی‌متر در سراسر وجه کششی انجام شد تا کارایی ورق‌ها در جلوگیری از خوردگی بیشتر میلگردها مشخص شود. مشخصات مکانیکی ارائه شده توسط شرکت سازنده الیاف مورد استفاده و رزین اپوکسی در جدول ۲ آمده است.



شکل ۲- تقویت تیرهای ساخته شده با ورق CFRP

۲-۲- مشخصات مصالح

برای ساختن نمونه‌های آزمایشگاهی از رده بتن با مقاومت معمولی که مقاومت فشاری نمونه‌ی استوانه‌ای استاندارد آن ۲۵ مگاپاسکال بود، استفاده شد. نسبت آب به سیمان ۰/۵ و حداکثر بعد دانه‌های

جدول ۲- مشخصات CFRP و چسب مصرفی

مشخصات ورق تقویتی	نوع ورق	ضخامت هر لایه (mm)	ضریب کشسانی (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	کرنش نهایی (%)
	QUANTOM Wrap 300C	۰/۱۶۷	۲۴۰	۴۹۵۰	۱/۵
مشخصات چسب	نوع چسب	ضخامت هر لایه (mm)	ضریب کشسانی (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	مدول خمشی (MPa)
	QUANTOM EPR 3301	۰/۴	۳/۵	۴۵	۳۰۰۰

۳-۲- اعمال خوردگی تسریع شده به نمونه‌ها

تیرها پس از عمل‌آوری مناسب و حدود سه ماه پس از ساخت، در شرایط آزمایشگاهی تحت خوردگی تسریع شده قرار گرفتند. به این منظور حوضچه‌هایی با محلول سه درصد سدیم کلرید (سه



شکل ۵- قرارگیری نمونه‌ها داخل حوضچه

زمان مورد نیاز برای رسیدن به درصد خوردگی‌های مورد نظر با استفاده از قانون فارادی و طبق رابطه‌ی (۱) محاسبه شده و در جدول ۳ آمده است.

$$t = \frac{m_L n F}{a I} \quad (1)$$

در این رابطه، m_L جرم از دست رفته میلگرد کششی در اثر خوردگی، n ظرفیت فلز (برای آهن برابر ۲ است)، F ثابت فارادی (۹۶۴۸۷ کولمب)، a جرم اتمی فلز (برای آهن ۵۵/۸ گرم می‌باشد) و I جریان اعمال شده توسط منبع تغذیه و t مدت زمان مورد نیاز برای ایجاد فرایند خوردگی می‌باشد.

جدول ۳- مدت زمان لازم برای خوردگی تسریع شده بر اساس قانون فارادی

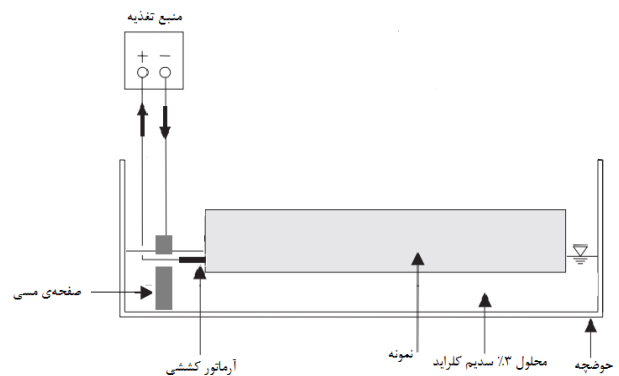
درصد خوردگی	شدت جریان (آمپر)	وزن از دست رفته (گرم)	زمان لازم (ساعت)
۵	۱	۱۶۶/۹۸	۱۱۱/۶۵
۱۰	۱	۳۳۳/۹۶	۲۲۳/۳۱
۱۵	۱	۵۰۰/۹۴	۳۳۴/۹۶

پس از انجام آزمایش‌های لازم بر روی نمونه‌ها برای اندازه‌گیری شدت خوردگی میلگردهای طولی، باید این میلگردها را از داخل نمونه‌ها خارج کرده تا وزن آن‌ها تعیین شود. پس از به دست آوردن وزن میلگردهای دارای خوردگی، با کسر این عدد از عدد اولیه‌ی ثبت شده برای وزن میلگردها، مقدار کاهش وزن هر میلگرد و در واقع میزان خوردگی مشخص خواهد شد.

۲-۴- تقویت نمونه‌ها با FRP

برای چسباندن ورق‌های FRP، در ابتدا شیره‌ی بتن حذف گردید، به این ترتیب که سطح تیرها توسط دستگاه فرز تا حد نمایان شدن سنگدانه ساییده شد تا سطحی هموار و مناسب جهت چسباندن ورق

درصد وزنی آب به آن نمک اضافه شد) پر شده و نمونه‌ها داخل آن قرار گرفتند. شکل ۳ تصویر شماتیک ایجاد مدار الکتریکی و اعمال شرایط خوردگی تسریع شده را نشان می‌دهد.



شکل ۳- تصویر شماتیک ایجاد مدار الکتریکی و اعمال شرایط خوردگی تسریع شده

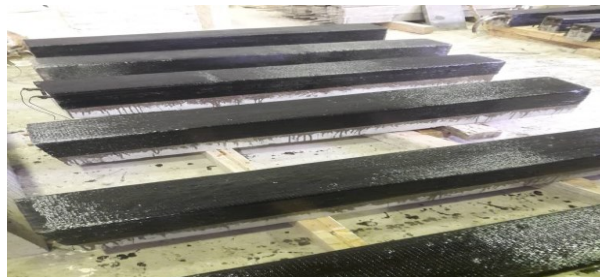
برای ایجاد خوردگی در میلگردهای کششی این میلگردها در همه‌ی نمونه‌ها حدود ۵۰ میلی‌متر از مقطع تیر بیرون زده شد و هنگام اعمال خوردگی در ابتدا این قسمت با استفاده از سمباده به خوبی تمیز شد. سپس سیم برق به دور میلگرد پیچیده شده و به منظور جلوگیری از تماس سیم با آب اطراف آن با استفاده از چسب پرایمر و چسب قیری و گذاشتن لوله‌های خرطومی عایق شد. با استفاده از این روش که جزئیات آن در شکل ۴ مشخص است، به خوبی از میلگردها و سیم محافظت شده و از نفوذ آب جلوگیری به عمل آمد.



شکل ۴- اتصال سیم به میلگرد کششی و عایق‌بندی آن

میلگردهای کششی در طول فرایند خوردگی تسریع شده به‌عنوان آند عمل کرده و از چند صفحه‌ی مسی برای کاتد استفاده می‌شود. پس از آماده‌سازی میلگردها و دیگر ابزار لازم، نمونه‌ها مطابق شکل ۵ داخل حوضچه‌ها قرار داده شده و با اتصال آن‌ها به منبع جریان مستقیم روند خوردگی آغاز می‌گردد. در طی فرایند خوردگی، نمونه‌ها به‌صورت روزانه کنترل شده تا از برقراری جریان اطمینان حاصل شود.

نمونه‌ها عدد نوشته شده بعد حرف C (Corrosion) بیان‌گر درصد خوردگی نهایی در نظر گرفته شده برای نمونه می‌باشد و برای نمونه‌های تقویت شده با ورق CFRP از حرف F (FRP strengthening) استفاده شده است.



شکل ۶- تقویت نمونه‌ها با ورق FRP

FRP به دست آید. سپس با استفاده از جت هوا و جت آب هر گونه گرد و غبار یا آلودگی نیز پاک شد و خلل و فرج موجود در سطح بتن با استفاده از رزین مناسب تعمیر گردید تا سطح مناسب جهت نصب ورق‌ها تأمین شود. ورق FRP به شیوه‌ی نصب تر به تیرها متصل شد به این منظور ابتدا وجه تحتانی و وجوه کناری نمونه‌ها به رزین کافی آغشته گشته و سپس ورق روی آن‌ها چسبانده شد. در ادامه هوای محبوس بین ورق و رزین توسط غلطک به خوبی خارج شده و یک لایه‌ی دیگر رزین روی ورق زده و به مدت ۱۵ روز چسب عمل‌آوری شد. تیرهای تقویت شده با ورق FRP در شکل ۶ قابل مشاهده است.

۲-۵- روش انجام آزمایش

به عنوان مثال نمونه‌ی B-C5-F-C10 ابتدا برای رسیدن به خوردگی ۵ درصد در شرایط خوردگی قرار گرفته، سپس با ورق FRP تقویت شده و در نهایت دوباره شرایط خوردگی برای رسیدن به خوردگی ۱۰ درصد بر آن اعمال شده است. نمونه‌های F-C15-B-C10 و B-C7.5-F-C15 نیز به ترتیب ابتدا تحت خوردگی ۱۰ و ۷/۵ درصد قرار گرفته و پس از تقویت با ورق FRP برای رسیدن به خوردگی ۱۵ درصد در شرایط خوردگی مجدد قرار گرفتند. جزئیات بیشتر نمونه‌ها در جدول ۴ آمده است.

یکی از نمونه‌ها به عنوان نمونه‌ی شاهد در نظر گرفته شد و سایر نمونه‌ها تا رسیدن به ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد خوردگی تحت فرایند خوردگی تسریع شده قرار گرفتند. برای هر درصد خوردگی ۳ نمونه در نظر گرفته شد به طوری که یک تیر دارای خوردگی و فاقد تقویت، یک تیر دارای خوردگی و تقویت شده با ورق CFRP و در نهایت آخرین نمونه پس از ایجاد خوردگی و تقویت با ورق CFRP مجدد تحت شرایط خوردگی قرار گرفت. در نام‌گذاری

جدول ۴- جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی

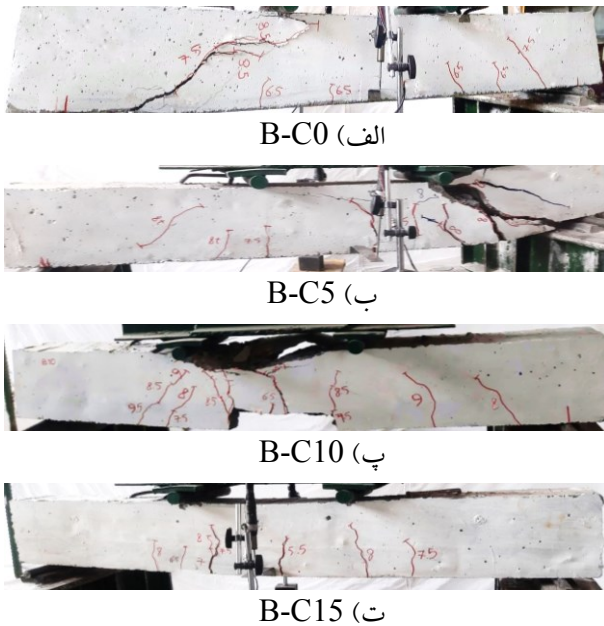
ردیف	نام اختصاری نمونه	درصد خوردگی	تقویت با FRP پس از خوردگی	خوردگی مجدد پس از تقویت با FRP
۱	B-C0	۰	ندارد	ندارد
۲	B-C5	۵	ندارد	ندارد
۳	B-C10	۱۰	ندارد	ندارد
۴	B-C15	۱۵	ندارد	ندارد
۵	B-C5-F	۵	دارد	ندارد
۶	B-C10-F	۱۰	دارد	ندارد
۷	B-C15-F	۱۵	دارد	ندارد
۸	B-C5-F-C10	۵	دارد	دارد
۹	B-C10-F-C15	۱۰	دارد	دارد
۱۰	B-C7.5-F-C15	۱۵	دارد	دارد

۲-۶- دستگاه و روند آزمایش استاتیکی

به صورت خمش چهار نقطه‌ای و با استفاده از یک جک هیدرولیکی با ظرفیت معادل ۲۰۰ کیلو نیوتن بارگذاری شدند.

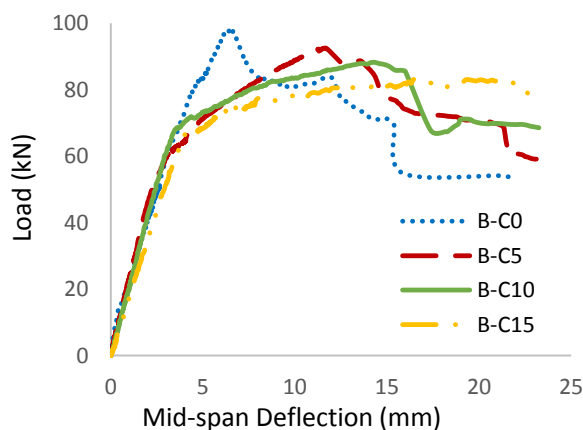
در آخرین مرحله از برنامه‌ی آزمایشگاهی کلیه‌ی نمونه‌ها

است. در تیرهای مورد آزمایش با توجه به نوع بارگذاری که خمش چهار نقطه‌ای بود، اولین ترک‌ها در نواحی میانی تیر رخ داد که علت این موضوع لنگر خمشی حداکثر در وسط دهانه‌ی تیر و حد فاصل بین دو بار نقطه‌ای دانست. برای نمونه شاهد و نمونه‌های دارای خوردگی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد بار معادل ترک خوردگی به ترتیب ۶۵/۰، ۶۰/۰، ۶۵/۰ و ۵۵/۰ کیلونیوتن ثبت شد. در شکل ۹ نمایی کلی از وضعیت ترک در نمونه‌ها آمده است.



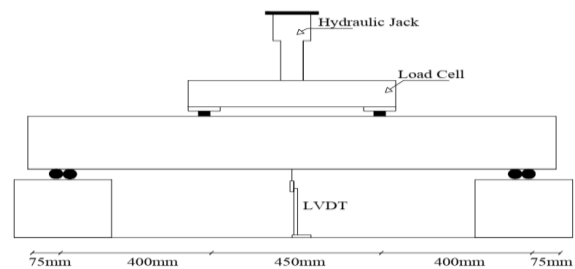
شکل ۹- نمایی کلی از انتشار ترک در نمونه‌های فاقد تقویت

منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه برای نمونه‌های دارای خوردگی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰- منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه‌ی نمونه‌های شاهد و دارای خوردگی

بارگذاری به صورت استاتیکی و یکنواخت صورت پذیرفت و تغییر مکان وسط دهانه بوسیله‌ی تغییر مکان خطی (LVDT)^۱ و نیرو توسط نیروسنج^۲ به دستگاه ثبت داده منتقل شد. از پمپ، سیستم کنترل فشار و دستگاه ثبت داده‌ها نیز در کنار سایر لوازم استفاده شد. در بارهای مختلف، چگونگی گسترش ترک‌ها ترسیم و مشاهدات ثبت شد تا در نهایت نحوه‌ی شکست نمونه‌ها مشخص گردد. در شکل ۷ بارگذاری و ابزاربندی آزمایش در آزمایشگاه به صورت شماتیک قابل مشاهده است.



شکل ۷- ابزاربندی شماتیک دستگاه آزمایش خمشی

۳- نتایج آزمایشگاهی

۳-۱- بررسی و کنترل خوردگی در میلگردهای طولی

در طول فرایند خوردگی آسیب‌های وارد شده به تیرها نظیر ترک‌های متعدد طولی و همچنین لکه‌های قهوه‌ای رنگ ناشی از زنگ‌زدگی بر روی تیرها ظاهر شد. پس از اتمام فرایند و خارج کردن میلگردها اثر خوردگی بر میلگردها قابل مشاهده بود همانطور که در شکل ۸ مشخص است برای سطوح بالای خوردگی، آج‌ها دچار آسیب زیادی شده و تقریباً از بین رفته بودند.



شکل ۸- اثر خوردگی بر میلگردها در خوردگی ۱۵ درصد

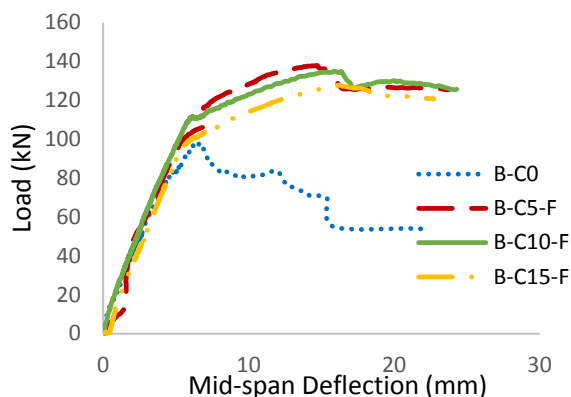
۳-۲- نتایج بارگذاری نمونه‌های دارای خوردگی و فاقد تقویت با ورق FRP

تحمل بتن در مقابل تنش‌های کششی به مراتب پایین‌تر از تنش‌های فشاری است، از این رو حتی با بکارگیری آرماتور در سازه‌های بتن مسلح ناحیه‌ی کششی در این اعضا مستعد ترک خوردگی

² Load Cell

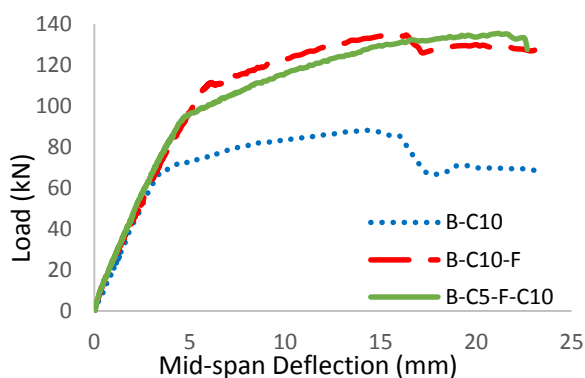
¹ Linear Variable Displacement Transducer

ترسیم شده است. برای نمونه‌ی B-C5-F-C10 حداکثر ظرفیت باربری نسبت به نمونه‌های B-C10-F و B-C10 به ترتیب ۳۵/۰ درصد و ۰/۵ درصد افزایش یافته است. حداکثری ظرفیت باربری نمونه‌ی B-C7.5-F-C15 در مقایسه با نمونه‌های B-C15 و B-C15-F به ترتیب افزایش ۳۷ درصدی و ۳/۵ درصدی داشته است، برای نمونه‌ی B-C10-F-C15 نیز این اعداد به ۳۷/۰ درصد و ۲/۷ درصد رسیده است.



شکل ۱۲- منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه‌ی نمونه‌های شاهد و

تقویت شده



شکل ۱۳ منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه‌ی نمونه‌های

B-C5-F-C10 و B-C10-F و B-C10

طبق قانون فارادی برای دستیابی به خوردگی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد نمونه‌ها باید به ترتیب ۱۱۱/۶۵، ۲۲۳/۳۱ و ۳۳۴/۹۶ ساعت تحت جریان ۱ آمپر قرار می‌گرفتند. نمونه‌ی B-C5-F-C10 در ابتدا به مدت ۱۱۱/۶۵ ساعت برای خوردگی ۵ درصد تحت شرایط خوردگی قرار گرفت، سپس با ورق CFRP تقویت شد و برای رسیدن به مجموع خوردگی ۱۰ درصد به مدت ۱۱۱/۶۵ ساعت دیگر در شرایط خوردگی قرار گرفت. نمونه‌های B-C7.5-F-C15 و B-C10-F-C15 نیز به ترتیب به مدت ۱۶۷/۴۷ و

مطابق با این شکل تا بار ۶۰/۰ کیلونیوتن رفتار نمونه‌ها تا حدودی مشابه یکدیگر بوده، اما با افزایش نیرو رفتار تیرها تغییر می‌کند. حداکثر ظرفیت باربری برای نمونه‌ی شاهد برابر با ۹۸/۰ کیلونیوتن و برای نمونه‌های دارای ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد خوردگی به ترتیب برابر با ۹۲/۵، ۸۸/۲ و ۸۳/۰ کیلونیوتن ثبت شد. نتایج به دست آمده حاکی از این هستند که با افزایش میزان خوردگی، حداکثر ظرفیت باربری نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است.

۳-۳- نتایج بارگذاری نمونه‌های دارای خوردگی و تقویت شده با FRP

با افزایش بار در تیرهای تقویت شده به تدریج صدای شکسته شدن چسب‌ها شنیده و سرانجام برای تمامی نمونه‌ها پس از حاصل شدن ظرفیت باربری حداکثر ورق با صدای بلندی از وجه کششی تیر جدا شد، در این هنگام تکه‌های بتن خرد شده با گسیختگی ورق فرو ریختند. شکل ۱۱ جدا شدن ورق FRP از وجه کششی نمونه-ی B-C5-F را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- جدا شدن ورق FRP از وجه کششی نمونه‌ی

B-C5-F

نمونه‌های دارای ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد خوردگی و تقویت شده با FRP به ترتیب افزایش ۳۳/۰، ۳۴/۶ و ۳۵/۰ درصدی در ظرفیت باربری نسبت به نمونه‌های مشابه و فاقد تقویت از خود نشان دادند. همانطور که در شکل ۱۲ آمده است تقویت نمونه‌های دارای خوردگی با ورق CFRP نه تنها کاهش ظرفیت ناشی از خوردگی را جبران کرد بلکه باعث افزایش ظرفیت نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی شاهد نیز شد.

۳-۴- اثر خوردگی مجدد بر تیرهای تقویت شده

به منظور بررسی اثر تقویت با ورق‌های FRP در جلوگیری از ایجاد خوردگی منحنی بار-تغییر مکان وسط دهانه برای نمونه‌های B-C10-F و B-C10-F-C10 مطابق شکل ۱۳

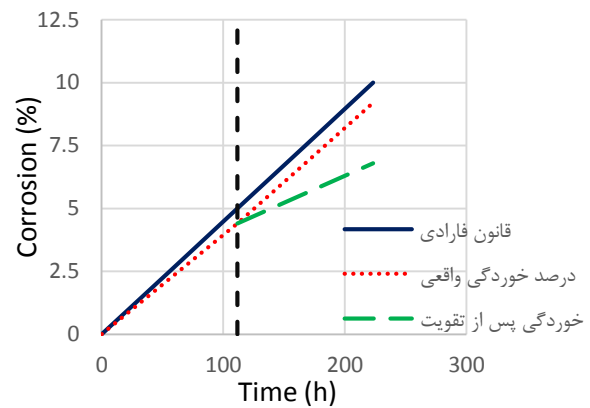
CFRP سبب کاهش گسترش خوردگی شده است. استفاده از این ورق‌ها سبب جلوگیری از گسترش خوردگی به میزان ۲۶/۹، ۲۵/۹ و ۲۰/۰ درصد به ترتیب برای نمونه‌های با خوردگی اولیه ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد شده است.

ظرفیت نهایی نمونه‌های آزمایشگاهی در جدول ۵ آمده است تا بر اساس آن میزان کاهش ظرفیت باربری در اثر خوردگی مشخص شود و یا اثر تقویت با FRP در افزایش ظرفیت باربری با نمونه‌ی شاهد مقایسه شود.

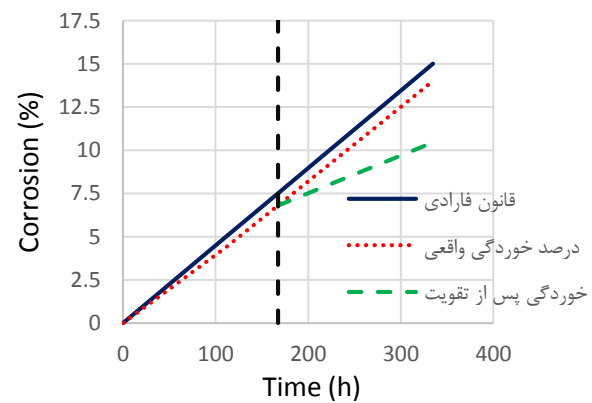
جدول ۵- نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های مختلف

تغییر بار نهایی نسبت به نمونه‌ی شاهد (%)	میانگین خوردگی ایجاد شده (%)	بار نهایی آزمایشگاهی (kN)	تغییر مکان حداکثر در وسط تیر (mm)	نام نمونه
-	۰	۹۸/۰	۷/۰	B-C0
کاهش ۵/۶	۴/۴	۹۲/۵	۱۱/۶	B-C5
کاهش ۱۰/۰	۹/۱	۸۸/۲	۱۴/۳	B-C10
کاهش ۱۵/۷	۱۴/۰	۸۳/۰	۱۶/۴	B-C15
افزایش ۲۸/۹	۴/۴	۱۳۷/۹	۱۴/۶	B-C5-F
افزایش ۲۷/۳	۹/۳	۱۳۴/۹	۱۵/۹	B-C10-F
افزایش ۲۳/۳	۱۴/۱	۱۲۷/۷	۱۶/۳	B-C15-F
افزایش ۲۷/۷	۶/۸	۱۳۵/۶	۲۱/۰	B-C5-F-C10
افزایش ۲۵/۴	۱۱/۲	۱۳۱/۳	۱۷/۰	B-C10-F-C15
افزایش ۲۶/۰	۱۰/۴	۱۳۲/۴	۱۷/۸	B-C7.5-F-C15

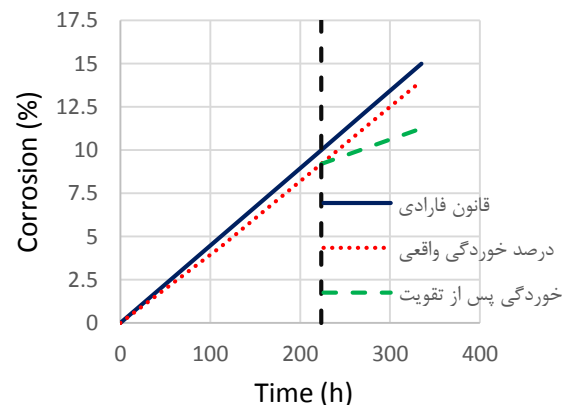
۲۲۳/۳۱ ساعت در شرایط خوردگی قرار گرفته و پس از تقویت با ورق CFRP برای رسیدن به مجموع خوردگی ۱۵ درصد دوباره به جریان برق وصل شدند.



شکل ۱۴- اثر ورق CFRP در جلوگیری از گسترش خوردگی در نمونه‌ی B-C5-F-C10



شکل ۱۵- اثر ورق CFRP در جلوگیری از گسترش خوردگی در نمونه‌ی B-C7.5-F-C15



شکل ۱۶- اثر ورق CFRP در جلوگیری از گسترش خوردگی در نمونه‌ی B-C10-F-C15

بررسی نمودارهای ترسیم شده نشان می‌دهد تقویت با ورق‌های

خوردگی به میزان ۲۶/۹، ۲۵/۹ و ۲۰/۰ درصد به ترتیب برای نمونه‌های با خوردگی اولیه ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد شده است. این موضوع نشان می‌دهد بکارگیری ورق‌های CFRP برای اعضای قرار گرفته در محیط‌های خورنده و مرطوب از بروز خوردگی بیشتر جلوگیری کرده و با افزایش عمر مفید سازه به طول مدت بهره‌برداری از آن می‌افزاید.

۵- مراجع

- [1] Amleh, L., Mirza, S., 'Corrosion influence on bond between steel and concrete', *ACI Structural Journal*, vol. 96, no. 3, pp. 415-423, 1999.
- [2] Cairns, J., Du, Y., Law, D., 'Structural performance of corrosion-damaged concrete beams', *Mag Concrete Res*, pp. 60-70, 2008.
- [3] Bertur, A., Diamond, S., Berke, N.S., 'Steel Corrosion in Concrete', *Fundamentals and Civil Engineering Practice*, E & FN Spon, London, 1997.
- [4] Lee, H.S., Kage, T., Noguchi, T., Tomosawa, F., 'The Evaluation of Flexural Strength of RC Beams Damaged by Rebar Corrosion', *Durability of Building Materials and Components 8*, Institute for Research in Construction, Ottawa ON, K1A 0R6, Canada, pp. 321-330, 1999.
- [5] Bonacci, J. F., Maalej, M., 'Externally-bonded FRP for rehabilitation of corrosion damaged concrete beams', *ACI Structural Journal*, Vol. 97, No. 5, pp. 703-711, 2000.
- [6] Soudki, K., El-Salakawy, E., Craig, B., 'Behavior of CFRP strengthened reinforced concrete beams in corrosive environment', *Journal of composites for construction*, Vol. 11, No. 3, pp. 291-298, 2007.
- [7] Xie, J., Hu, Ru., 'Experimental study on rehabilitation of corrosion-damaged reinforced concrete beams with carbon fiber reinforced polymer', *Construction and Building Materials*, Vol. 38, pp. 708-716, 2016.
- [8] Almassri, B., Amjad, K., Francois, R., Al Mahmoud, F., 'study on behavior of corroded RC beam strengthened with CFRP rod, an experimental and finite element modeling study', *Structural Faults and Repair Conference*, Imperial College, London, UK, 2014.
- [9] Triantafyllou, G., Rousakis, T., Karabinis, A., 'Corroded RC Beams at Service Load before and after Patch Repair and Strengthening with NSM CFRP Strips', *Buildings*, Vol. 9, pp. 67, 2019.

با توجه به کاهش روند خوردگی در نمونه‌های تقویت شده با FRP ظرفیت باربری در این نمونه‌ها افزایش یافته است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر استفاده از ورق‌های FRP برای تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح در شرایط خوردگی و محیط‌های مرطوب مورد مطالعه قرار گرفت و هدف اصلی آن بررسی عملکرد FRP در جلوگیری از خوردگی مجدد بود که به این منظور تعداد ۱۰ عدد نمونه‌ی آزمایشگاهی تهیه شد. نتایج حاصل شده به شرح زیر می‌باشد:

- خوردگی بر روی رفتار خمشی تیرها اثر گذاشته و باعث کاهش ظرفیت باربری آن‌ها شد. نمونه‌های دارای خوردگی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد در مقایسه با نمونه‌ی شاهد به ترتیب به میزان ۵/۶، ۱۰/۰ و ۱۵/۷ درصد کاهش ظرفیت از خود نشان دادند.

- معیار اندازه‌گیری تغییر مکان در پژوهش انجام شده، خیز یا تغییر مکان وسط دهانه برای نمونه‌های مختلف بود. با توجه به نتایج حاصل شده از آزمایشات در مقدار بار یکسان، تغییر مکان وسط دهانه در نمونه‌های دارای خوردگی نسبت به نمونه‌ی شاهد بیشتر است که با افزایش درصد خوردگی، این اختلاف نیز افزایش می‌یابد. تقویت با ورق CFRP باعث افزایش تغییر مکان وسط دهانه بار بیشینه شد، بطوریکه مقدار تغییر مکان وسط دهانه در بار حداکثر برای نمونه‌های تقویت شده از ۱۱ تا ۲۰ درصد نسبت به نمونه‌های فاقد تقویت بیشتر بود.

- تقویت نمونه‌ها با ورق‌های CFRP باعث جبران کاهش ظرفیت باربری ناشی از خوردگی میلگردهای طولی در آن‌ها شد. تیرهایی که دارای خوردگی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد بودند، زمانی که با ورق‌های CFRP تقویت شدند با افزایش ظرفیت باربری به ترتیب ۳۳/۰، ۳۴/۶ و ۳۵/۰ درصدی نسبت به نمونه‌های مشابه و فاقد تقویت مواجه شدند، از این رو روش بکار گرفته شده برای تقویت تیرهای دارای خوردگی مناسب می‌باشد. همچنین نمونه‌های دارای تقویت در مقایسه با نمونه‌ی شاهد نیز ظرفیت باربری بیشتری از خود نشان دادند که دلیلی بر کارآمدی استفاده از این روش است. - بررسی نمونه‌های قرار گرفته در معرض خوردگی مجدد نیز نشان می‌دهد که تقویت با ورق‌های CFRP سبب کاهش روند خوردگی شده است. استفاده از این ورق‌ها سبب جلوگیری از روند

Effect of CFRP strengthening on the behavior of reinforced concrete beams under corrosive environments

Maryam Malakouti

MSc student, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

M. Reza Esfahani*

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

Abstract

Corrosion of rebars is one of the most important problems in reinforced concrete structures. It may reduce the load capacity or cause failure of structural members. When corrosion occurs, the structure member can be strengthened/repared using different methods. Due to the durability of FRP (Fiber Reinforced Polymer) materials in corrosive environments, these materials can be used to strengthen/repair the damaged reinforced concrete members against corrosion. In this study, the effect of Carbon FRP sheets on the flexural behavior of steel reinforced concrete beams in moisture and corrosion conditions is studied. For this purpose, ten reinforced concrete beam specimens with the cross-sectional dimensions of 150 x 200 mm and a length of 1400 mm were made. One specimen was considered as the control specimen without strengthening, and other specimens were subjected under accelerated corrosion conditions with different corrosion rates of 5, 10, and 15 percent. A comparison of the experimental results showed that the corrosion of longitudinal rebars affects the flexural behavior of reinforced concrete specimens. With increasing corrosion, the load capacity of the specimens decreased. Strengthening of the corroded specimens with CFRP sheets increased the load capacity of the corroded specimens up to 35% compared to the un-strengthened specimen. The results of specimens exposed to re-corrosion condition after strengthening showed that the strengthening of specimens by CFRP sheets effectively reduced further corrosion up to 26.9%.

Keywords: Reinforced concrete beam, corrosion of longitudinal rebars, accelerated corrosion, CFRP sheets.

* Corresponding Author: esfahani@um.ac.ir