

بررسی آزمایشگاهی تقویت تیرهای بتن مسلح آسیب‌دیده در خوردگی آرماتور با استفاده از ورق‌های GFRP

الهه رحیمی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

جلیل شفایی*

استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

محمدرضا اصفهانی

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

چکیده

یکی از مؤثرترین روش‌ها جهت تقویت و بهسازی المان‌های آسیب‌دیده در برابر خوردگی استفاده از الیاف پلیمر کامپوزیتی می‌باشد. در این تحقیق یک مطالعه آزمایشگاهی برای بررسی تأثیر الیاف پلیمر کامپوزیتی در تقویت تیرهای بتنی خورده شده انجام گرفت. بدین منظور ۱۵ تیر بتنی با دو نوع الیاف فلزی قلاب‌دار و پلیمری ماکرو با درصد حجمی ۰٪ و ۰/۵٪ ساخته شدند. نمونه‌ها در سه سطح خوردگی تقریبی ۰٪ و ۷٪ و ۹٪ مورد آزمایش قرار گرفتند. برای انجام آزمایش خوردگی تسریع شده از یک استخر با ۳٪ نمک، استفاده شد. در نهایت تیرهای بتن مسلح خورده شده با یک‌لایه الیاف پلیمر کامپوزیتی GFRP تقویت شدند و تحت آزمایش بارگذاری خمشی قرار گرفتند. بر اساس نتایج آزمایشگاهی خوردگی باعث کاهش شکل‌پذیری نمونه‌ها گردیده و استفاده از الیاف پلیمری شیشه GFRP باعث افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت باربری نمونه‌ها و کاهش تعداد ترک‌های ایجادشده و میزان افزایش عمق آن‌ها و تمرکز بیشتر خرابی و آسیب در محدوده جداشدگی ورق می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: بتن مسلح الیافی، ورق‌های GFRP، خوردگی آرماتور، خوردگی تسریع شده، تقویت.

* نویسنده مسئول: jshafaei@shahroodut.ac.ir

۱- مقدمه

با وجود اینکه مطالعات زیادی بر روی تأثیر استفاده از ورق‌های FRP و الیاف مختلف بر روی نمونه‌های بتنی انجام گرفته است، اما تأثیر مقایسه‌ای مقاومت‌سازی تیرهای بتنی آسیب‌دیده تحت اثر خوردگی و با دو نوع الیاف پلیمری ماکرو و الیاف فلزی قلاب‌دار بر روی نمونه‌های با ابعاد بزرگ و نزدیک به واقعی تاکنون انجام نشده است. در این مطالعه، تأثیر مقاومت‌سازی تیرهای بتنی با الیاف پلیمری GFRP و با هر دو نوع الیاف پلیمری ماکرو و فلزی قلاب‌دار و در سطوح مختلف خوردگی برای بررسی مقاومت خمشی، شکل‌پذیری و الگوی ترک مورد بررسی قرار گرفت. به دلیل اینکه تمرکز این مطالعه بر روی نمونه‌های با ابعاد بزرگ و نزدیک به واقعی بوده است، تلاش نویسندگان این مقاله بر روی ایجاد شرایط خوردگی تسریع شده در سطوح مختلف به صورتی بوده است که هم میلگردهای طولی و هم عرضی به صورت یکنواخت و بر طبق قانون فارادی تحت تأثیر خوردگی قرار بگیرند. چراکه میلگردهای عرضی نیز روی ظرفیت باربری و جابجایی به خصوص در شرایط خوردگی تأثیرگذارند و از آنجا که میلگردهای عرضی در برابر نیروهای برشی مقاومت می‌کنند، بنابراین بر روی جابجایی کلی اعضای بتنی نیز تأثیرگذارند.

قطعاً عملکرد استفاده از الیاف‌ها در بتن‌های با مقاومت بالاتر مؤثرتر می‌باشد. در این پژوهش هدف اصلی مقاومت‌سازی در نمونه‌های خورده شده با مقاومت معمولی بتن، با استفاده از ورقه‌های GFRP بود. با توجه به اینکه محققین استفاده از الیاف را در بتن به منظور افزایش عمر مفید سازه‌های بتنی در معرض خوردگی پیشنهاد داده بودند برنامه آزمایشگاهی تحقیق حاضر با حفظ مقاومت بتن معمولی به منظور تأثیر هم‌زمان پدیده خوردگی در بتن‌های الیافی و مقاومت‌سازی آن‌ها با استفاده از ورق‌های GFRP برنامه‌ریزی شد. در ادامه مشخصات برنامه آزمایشگاهی، نتایج و تفسیر نتایج آزمایشگاهی ارائه شده است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات هندسی و جزییات آرماتوربندی نمونه‌های آزمایشگاهی

در این مطالعه آزمایشگاهی، ۱۵ نمونه تیر بتنی با ابعاد نزدیک به واقعی (۱۴۰*۲۰۰*۱۵۰۰) ساخته شد و ۶ نمونه با GFRP مقاومت‌سازی گردیدند. نمونه‌های شاهد و بدون مقاومت‌سازی در سه

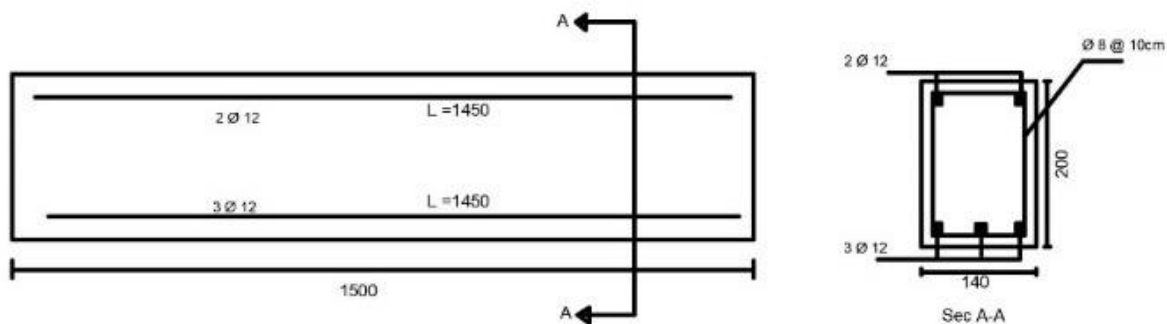
خوردگی میلگرد در بتن به عنوان یکی از مهم‌ترین دلایل تضعیف بتن مسلح می‌باشد [۱]. مطالعات انجام شده توسط محققین از جمله Bazant [۲] نشان می‌دهد که افزایش حجم ناشی از خوردگی در اطراف میلگردها ۲-۴ برابر بیشتر از حجم فولاد مصرفی است که این موضوع باعث ترک خوردگی در بتن می‌شود. اکسیداسیون آهن و تبدیل شدن آن به اکسیدهای محلول، که اصطلاحاً زنگ نامیده می‌شود و تجمع این اکسید در اطراف میلگرد باعث ایجاد فشار داخلی در بتن شده و به پوشش بتنی آسیب می‌رساند (درحالتی که خوردگی یکنواخت رخ دهد) [۳]. از اثرات خوردگی بر خواص مکانیکی و رفتار سازه‌های بتن و میلگردها می‌توان به تأثیر خوردگی بر شکل‌پذیری، ظرفیت باربری، سختی، مقاومت برشی و الگوی ترک ایجادشده در نمونه‌های بتنی اشاره کرد.

الیاف پلیمری GFRP گزینه مناسبی برای بهسازی و مقاومت‌سازی اعضای بتنی آسیب‌دیده می‌باشند. این الیاف علاوه بر نسبت مقاومت به وزن بالا، دوام در محیط‌های خورنده و مقاومت خستگی بالا به سادگی و سهولت قابل نصب در دال‌ها، تیرها و ستون‌های بتنی هستند. مطالعات انجام شده در این خصوص از جمله مطالعات انجام شده توسط Triantafillou [۴]، Chajes [۵] و Ross [۶] بر روی تیرهای تقویت شده در خمش انجام شده است که در تمامی آن‌ها نتایج آزمایش حاکی از افزایش مقاومت تیرها است.

Soudki و همکاران بر روی مقاومت‌سازی تیرهای بتنی تحت خوردگی با الیاف پلیمری FRP از جنس شیشه و کربن مطالعه داشتند که نتایج حاکی از بهبود عملکرد سازه‌ای و کاهش ترک‌های ناشی از خوردگی بود [۷]. استفاده از الیاف پلیمری FRP برای بهسازی و تعمیر سازه‌های آسیب‌دیده از خوردگی مورد توجه بسیار از محققین به منظور تقویت سازه‌های آسیب‌دیده قرار دارد. محققان بسیاری تلاش کردند تا عملکرد سازه‌های آسیب‌دیده ناشی از خوردگی را بررسی نمایند اما اطلاعات اندکی در خصوص رفتار سازه‌ای تیرهایی که در برابر خوردگی آسیب‌دیده‌اند و به وسیله ورق‌های FRP تقویت شده‌اند. از این رو نویسنده مقاله سعی در این داشته تا این شکاف را از بین برده و اطلاعات بیشتری در این خصوص ارائه نماید. لذا بررسی‌هایی در خصوص چگونگی تأثیر الیاف پلیمری FRP بر مقاومت خمشی و ظرفیت باربری و تغییر مکان و نحوه ترک خوردگی در تیرهای بتنی آسیب‌دیده مقاومت‌سازی شده صورت گرفته است.

می باشند. نمونه آزمایشگاهی با مقیاس عرضی ۱/۲ و مقیاس طولی ۱/۴ می باشد. شکل ۱ جزئیات آرماتوربندی نمونه های ساخته شده را قبل از بتن ریزی نشان می دهد. با توجه به اینکه انتهای میلگردهای طولی در نمونه ها خم نشده بود، لازم به ذکر است در مشاهدات آزمایشگاهی هیچ گونه شکست های نزدیک مقطع میلگردها (pull out) مشاهده نگردید به دلیل اینکه خوردگی های بالای ۱۰ درصد به میزان کمتر در موارد سازه های رخ می دهد و بیشتر خوردگی های معمول و در سازه های رایج در محدوده زیر ۱۰ درصد می باشد و خوردگی های زیر ۵ درصد نیز چندان محسوس و قابل توجه در کارهای آزمایشگاهی نیست در این تحقیق به بررسی خوردگی های رایج تر در سازه ها پرداخته است. به همین دلیل دو درصد خوردگی هفت و نه درصد انتخاب گردید.

گروه اصلی A، B و C تقسیم بندی شدند. گروه A نمونه های با خوردگی ۰٪، گروه B نمونه های با خوردگی تقریبی ۷٪ و گروه C نمونه های با خوردگی تقریبی ۹٪ می باشند. هر گروه مجدداً با توجه به نوع الیاف به سه زیر گروه نمونه های بدون الیاف، نمونه های با الیاف فلزی قلاب دار و نمونه های با الیاف پلیمری ماکرو تقسیم شدند. سپس نمونه های با خوردگی سطح یک و دو که در گروه B و C قرار دارند پس از اعمال خوردگی و آسیب دیدن با یک لایه ورق GFRP به صورت سراسری در زیر تیر مقاوم سازی شدند نمونه های مقاوم سازی شده در دو گروه D و E قرار گرفتند. سطح مقطع تیر بتنی ۱۴۰*۲۰۰ میلی متر و طول دهانه آن ۱۵۰۰ میلی متر است. کاور بتن از سطح بتن تا وسط میلگردهای عرضی ۲۵ میلی متر می باشد. میلگردهای طولی با قطر ۱۲ میلی متر و میلگردهای عرضی با قطر ۸ میلی متر و با فاصله هر ۱۰ سانتی متر



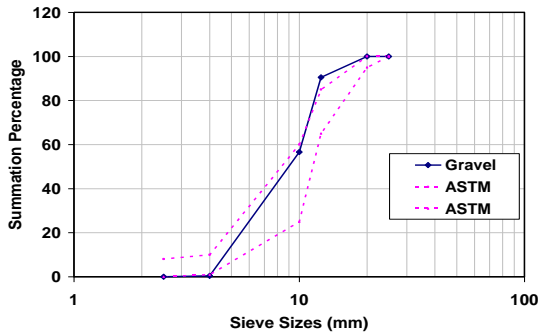
شکل ۱- جزئیات هندسی و آرماتوربندی تیرها و نمونه های آزمایشگاهی (ابعاد به میلی متر است)

برای ساخت بتن مصرفی مورد استفاده در این آزمایش، شن مصرفی دارای درصد شکستگی معادل ۴۷ درصد بوده و در محدوده ی الک ۰/۵ اینچ (۱۲/۵ میلی متر) تا الک نمره ی ۴ (۴/۷۵ میلی متر) قرار دارد. ماسه ی مورد استفاده در این آزمایش نیز در محدوده ی زیر الک نمره ی ۴ (۴/۷۵ میلی متر) قرار دارد. منحنی دانه بندی شن و ماسه ی مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است. سیمان مصرفی در این آزمایش از نوع سیمان پرتلند تیپ دو محصول کارخانه مشهد می باشد. از فوق روان کننده برند ژیکواوا به میزان ۰/۲ درصد وزنی سیمان در روند ساخت استفاده گردیده است. مقاومت فشاری بتن مورد استفاده ۲۶ مگاپاسکال می باشد. مشخصات مکانیکی الیاف فلزی قلاب دار مطابق اطلاعات ارائه شده از کارخانه سازنده برای الیاف فلزی قلاب دار به صورت

۲-۲- ویژگی های مصالح مورد استفاده

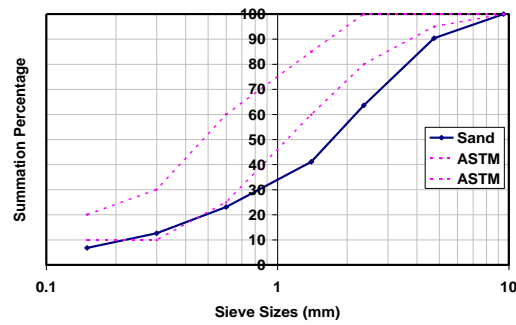
مشخصات مکانیکی میلگردهای طولی و عرضی مطابق نتایج آزمایشگاهی به صورت: تنش تسلیم (Fy) ۳۸۸ مگاپاسکال، تنش گسیختگی (Fu) ۵۵۱ مگاپاسکال، ازدیاد طول نسبی در حد گسیختگی ۲۷/۵٪ برای میلگردهای سایز ۸ و تنش تسلیم (Fy) ۴۷۹ مگاپاسکال، تنش گسیختگی (Fu) ۶۳۳ مگاپاسکال، ازدیاد طول نسبی در حد گسیختگی ۲۰٪ می باشد. مدول الاستیسیته میلگردها ۲۰۵*۱۰ مگاپاسکال می باشد. درصد آرماتورهای طولی تیرها بر اساس آئین نامه بتن ایران در حد ۶٪ - ۱٪ سطح مقطع کل بتن (Ag) می باشد. میلگردهای عرضی به صورت تنگ های بسته با قلاب ۹۰ درجه که فاصله آزاد بین آن ها ۱۰۰ میلی متر و قطر هشت میلی متر در نظر گرفته شد.

در این برنامه آزمایشگاهی از نوع الیاف شیشه می‌باشند. مشخصات مکانیکی مربوط به ورق‌های پلیمری GFRP در جهت اصلی مطابق اطلاعات ارائه شده از کارخانه سازنده به صورت مقاومت کششی ۲۳۰۰ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته ۷۶ گیگاپاسکال، ضخامت مؤثر ۳۵۸ / میلی‌متر و وزن سطحی ۹۳۵ gr/cm² می‌باشد. شکل ۲ جزئیات دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های مصرفی در بتن را نشان می‌دهد.



ب) منحنی دانه‌بندی شن مصرفی

مقاومت کششی ۱,۱۶۰ MPa ، مدول الاستیسیته ۲۱۰ MPa می‌باشد و دانسیته ۷۸۰۰ kg/m³ می‌باشد، طول و قطر الیاف به ترتیب ۶۰ و ۰,۹ میلی‌متر و نسبت L/D=۶۵ می‌باشد. الیاف پلیمری ماکرو دارای مقاومت کششی ۶۴۰ مگاپاسکال ، مدول یانگ ۱۲۰۰۰ مگاپاسکال و دانسیته ۹۸۰ kg/m³ می‌باشد، طول الیاف ۴۸ میلی‌متر و قطر آن ۰/۹۸ و نسبت L/D=۴۹ می‌باشد. الیاف به صورت تدریجی به مخلوط بتن اضافه گردید. الیاف مورد استفاده



الف) منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی مصرفی

شکل ۲- منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های مصرفی در بتن

استخر بتنی به یک لایه پلاستیکی کاملاً پوشانده شد. تسریع در خوردگی با عمل الکتروشیمیایی و به وسیله اعمال شدت جریان ثابت بین آند (قفسه آرماتوربندی شامل فولاد طولی و عرضی) و میلگردی به عنوان کاتد که در خارج از نمونه قرار داشت به دست آمد. لذا پس از قرار دادن نمونه‌ها و کاتد در محلول سه درصد آب‌نمک (سه درصد وزنی آب، نمک استفاده شد) و ایجاد شدت جریان ثابت بین آند و کاتد توسط یک دستگاه منبع تغذیه عمل خوردگی آغاز گردید. جهت اعمال جریان ثابت برابر ۲/۵ آمپر برای هر یک از نمونه‌ها، ولتاژ دستگاه در محدوده شش الی هفت ولت کنترل گردید. زمان مورد نیاز برای رسیدن به سطوح خوردگی مورد نظر با توجه به قانون فارادی و مطابق رابطه زیر محاسبه گردید:

$$\Delta W = \frac{I.t.A_m}{Z.F} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در این رابطه I : شدت جریان اعمالی بر حسب آمپر، A_m : جرم اتمی فلز (برای آهن ۵۵/۸ گرم)، Z : ظرفیت فلز (برابر با ۲)، t : زمان از هنگام شروع اعمال خوردگی بر حسب ثانیه، F : ثابت فارادی (۹۶۵۵۹ کولمب) و ΔW : وزن از دست رفته به گرم می‌باشد.

۲-۱-۲- طرح اختلاط و مشخصات بتن مورد استفاده

نسبت‌های وزنی اختلاط مصالح در بتن مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- نسبت‌های وزنی اختلاط مصالح در بتن (بر حسب کیلوگرم)

سیمان	شن	ماسه	آب	فوق روان کننده
۳۷۰	۸۰۲	۹۸۰	۱۸۵	۰/۲ درصد وزنی سیمان

زمان اختلاط در خصوص بتن معمولی حداقل ۵ دقیقه بوده و اسلامپ بتن در بتن‌های معمولی حدود ۹۰ میلی‌متر و در بتن‌های الیافی به دلیل وجود فوق روان کننده حدود ۱۳۰ میلی‌متر اندازه‌گیری گردید.

۲-۳- نحوه اعمال خوردگی تسریع شده در تیرهای آزمایشگاهی

پس از سه ماه عمل آوری، نمونه‌ها تحت آزمایش خوردگی تسریع شده قرار گرفتند. شکل ۳ جزئیات مدار الکتریکی برای اعمال خوردگی تسریع شده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد. منظور جلوگیری از کاهش جریان در طول مدت آزمایش خوردگی

پس از شکست نمونه‌ها، وضعیت میلگردها از نظر وزن باقیمانده مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج حاصل از رابطه فارادی کنترل گردید. درصد خوردگی نمونه‌ها پس از وزن مجدد از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$CL = (W_i - W_f) / W_i * 100 \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن W_i وزن اولیه میلگردها قبل از خوردگی و W_f وزن میلگردها پس از تمیز کردن سطح از محصولات خوردگی می‌باشد. جدول ۲ زمان مورد نیاز برای خوردگی را مطابق رابطه فارادی نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که آرماتورها در تمام طول تیر با توجه به مدار خوردگی بسته شده نشان داده شده در شکل ۳-د در معرض خوردگی قرار گرفته‌اند.

جدول ۲- تعیین زمان خوردگی تسریع شده بر اساس رابطه فارادی در سطوح خوردگی یک و دو

سطح خوردگی	I (Amp)	t (hr)	ΔW (gr)	وزن اولیه فولاد (gr)	درصد خوردگی
یک	۲/۵	۳۲۷	۸۸۹	۱۲۷۲۵	۷
دو	۲/۵	۴۴۰	۱۱۴۵/۲۵	۱۲۷۲۵	۹



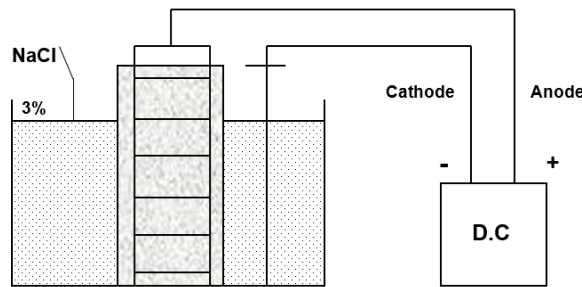
الف) منبع تغذیه و آمپرسنج برای نمایش



ب) نمایی از مدار الکتریکی برای ایجاد خوردگی تسریع شده



ج) نمایی از تیرها در آزمایش خوردگی



د) تصویر شماتیک مدار الکتریکی برای اعمال خوردگی تسریع شده

شکل ۳- جزئیات مدار الکتریکی برای اعمال خوردگی تسریع شده

و نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با پسوند R نشان داده شده‌اند. نتیجه نام گذاری نمونه‌ها در جدول ۳ آمده است.

۲-۴- نام گذاری نمونه‌ها

نمونه‌های آزمایشگاهی در سه گروه A، B و C و برحسب درصد خوردگی دسته‌بندی شدند. نمونه‌های دارای خوردگی سطح یک با پسوند C1 و نمونه‌های با خوردگی سطح دو با پسوند C2 نام گذاری شدند. NC نشانگر Normal- Concrete یا نمونه‌های بتنی بدون الیاف می‌باشد. SF و PF به ترتیب بیانگر نمونه‌های با الیاف فلزی قلاب‌دار و نمونه‌های با الیاف پلیمری ماکرو می‌باشد.

۲-۵- جزئیات مقاوم‌سازی تیرها با ورق‌های پلیمری شیشه (GFRP)

نمونه‌هایی که در معرض خوردگی شدید قرار می‌گیرند، قطر و سطح مقطع فولاد آن‌ها به قدری کم می‌گردد که باعث کاهش

۶-۲- ابزاربندی آزمایش و نحوه بارگذاری

در آخرین مرحله از برنامه آزمایشگاهی کلیه نمونه‌های دارای خوردگی و بدون خوردگی تحت بارگذاری استاتیکی افزایشی قرار گرفتند. هم‌زمان با اعمال بار محوری، تغییر شکل خمشی متناظر با نیروهای وارده برای کلیه نمونه‌ها به وسیله یک عدد تغییر مکان سنج (LVDT) کنترل و ثبت شد. شکل ۴ دستگاه بارگذاری و ابزارآلات مورد استفاده (Setup) در آزمایشگاه را به دو صورت واقعی و شماتیک نشان می‌دهد. مطابق شکل ۴-ب فاصله مرکز به مرکز دو تکیه‌گاه یا به عبارتی دهانه خالص تیر ۱٫۲۵ بوده است. تیرهای بتنی توسط دستگاه بارگذاری دو نقطه‌ای که به صورت مستقیم روی وجه فشاری تیر قرار داشتند مورد آزمایش قرار گرفتند. بارگذاری تا گسیختگی کامل نمونه‌ها ادامه یافت. ظرفیت جک مورد استفاده در این آزمایش ۳۰۰ کیلو نیوتن بود.

جدول ۳- جزئیات نام گذاری نمونه‌ها

ردیف	کد	نام نمونه	سطح خوردگی	نوع الیاف
۱	A	NC	٪۰	بدون الیاف
۲	A	SF	٪۰	فلزی قلاب‌دار
۳	A	PF	٪۰	پلیمری ماکرو
۴	B	NC-C1	٪۵	بدون الیاف
۵	B	SF-C1	٪۵	فلزی قلاب‌دار
۶	B	PF-C1	٪۵	پلیمری ماکرو
۷	C	NC-C2	٪۷٫۲۰	بدون الیاف
۸	C	SF-C2	٪۷٫۲۰	فلزی قلاب‌دار
۹	C	PF-C2	٪۷٫۲۰	پلیمری ماکرو
۱۰	D	R-NC-C1	٪۵	بدون الیاف
۱۱	D	R-SF-C1	٪۵	فلزی قلاب‌دار
۱۲	D	R-PF-C1	٪۵	پلیمری ماکرو
۱۳	E	R-NC-C2	٪۷٫۲۰	بدون الیاف
۱۴	E	R-SF-C2	٪۷٫۲۰	فلزی قلاب‌دار
۱۵	E	R-PF-C2	٪۷٫۲۰	پلیمری ماکرو

۳- مشاهدات آزمایشگاهی

۳-۱- بررسی و کنترل میزان خوردگی نمونه‌ها

به منظور بررسی شرایط خوردگی ایجاد شده در سطوح مختلف، پس از بارگذاری و شکستن نمونه‌ها تحت بار خمشی، بتن نمونه‌ها توسط دستگاه هیلتی تخریب شد و میلگردهای طولی و عرضی

نیروی تحمل شده توسط فولاد طولی شده و از طرفی درصد فولاد عرضی موجود نیز به قدری کاهش می‌یابد که دیگر محدودیت‌های آئین‌نامه‌ای ارضاء نمی‌گردد. در نمونه‌هایی که سطوح مختلف خوردگی را تجربه کرده‌اند از ورق‌های پلیمری GFRP به عنوان محصورکننده‌های خارجی جهت مقاوم‌سازی و افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری نمونه‌های شاهد مورد استفاده قرار گرفت. برای مقایسه رفتار این نمونه‌ها با نمونه‌های بدون خوردگی، به تعداد سه عدد از نمونه‌های خورده نشده هم با این ورق‌ها مقاوم‌سازی شدند. یک ماه پس از اتمام دوره خوردگی تسریع شده و رسیدن به سطوح خوردگی هدف، زنگ آهن و ماتریس سیمان چسبیده بر روی سطح زیرین نمونه‌ها توسط سمباده و سنگ زدوده شد و آماده‌سازی گردید. برای اجرای FRP عملیات ساب زدن باید تا جایی ادامه یابد که شیره بتن زدوده و سنگ‌دانه‌های بتن نمایان گردد. پس از ساب زدن، چنانچه سطح بتن نیاز به ترمیم داشته باشد باید پیش از نصب FRP سطح بتن با مواد مناسب ترمیم گردد. سپس سطح زیرین نمونه‌ها با مایع رزین اولیه آغشته گردید تا سطح نمونه‌ها برای چسباندن و به کار بردن چسب مخصوص آماده باشد.

پس از این مرحله برای پر کردن حفرات سطحی ریز بتن، ترک‌های سطحی و به وجود آوردن یک سطح صاف برای چسباندن الیاف FRP از بتونه‌های پرکننده استفاده شد. و دو روز پس از بتونه‌زنی سطح نمونه‌ها توسط سمباده صاف و نمونه‌ها برای چسباندن الیاف آماده گردید. ورق‌های شیشه برای سطح زیرین تیرها در یک‌لایه به طول یک متر و در آزمایشگاه بریده شد. برای چسباندن ورق‌های پلیمری GFRP، رزین و سخت‌کننده را به نسبت دو به یک در آزمایشگاه وزن کرده و پس از مخلوط نمودن با یکدیگر ابتدا توسط غلتک‌های مخصوص یک‌لایه از چسب تهیه شده روی سطح بتن کشیده شد، سپس ورق‌های بریده شده نیز کاملاً با چسب آغشته و اشباع شدند.

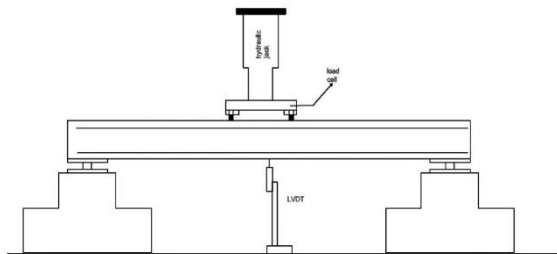
مدت زمان عمل‌آوری کامل رزین مورد استفاده در این برنامه آزمایشگاهی هفت الی ده روز می‌باشد. به مدت حدود یک ماه پس از چسباندن الیاف، نمونه‌ها در دمای محیط آزمایشگاه نگاه‌داری شده و سپس آزمایش‌ها بعدی روی آن‌ها انجام گرفت. جهت اصلی الیاف در جهت آرماتورهای طولی بودند.

محاسباتی نسبت به قانون فارادی برای نمونه‌های با ابعاد بزرگ مطابق این پژوهش دارای خطای تا حدود ۲-۳ درصد نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. و این‌طور استنباط می‌شود که قانون فارادی برای نمونه‌های با ابعاد و در اسکیل بزرگ دارای خطا می‌باشد [۸].

پس از شکست نمونه‌ها مشاهده شد که با توجه به محل قرارگیری میلگردها میزان خوردگی ایجاد شده در میلگردها متفاوت بوده است. میلگردهای نزدیک به گوشه خوردگی بیشتری نسبت به میلگردهای میانی داشتند و همچنین خوردگی در میلگردهای عرضی بیشتر از میلگردهای طولی رخ داده بود. در شکل ۵ شمایی از توزیع خوردگی در نمونه‌های آزمایشگاهی نشان داده شده است.

مورد بررسی قرار گرفتند و مجدداً وزن شدند. طی آزمایش انجام شده با روش خوردگی تسریع شده با توجه به محل قرارگیری میلگردها میزان خوردگی ایجاد شده در میلگردها متفاوت بود. میلگردهای نزدیک به گوشه خوردگی بیشتری نسبت به میلگردهای میانی داشتند و همچنین خوردگی در میلگردهای عرضی بیشتر از میلگردهای طولی رخ داده بود.

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، بین نتایج حاصل از رابطه تئوری مبتنی بر قانون فارادی و وزن محاسبه شده تقریبی نمونه‌ها پس از اعمال خوردگی در آزمایشگاه و در نتیجه درصد خوردگی به دست آمده از آزمایش تفاوت وجود دارد. درصد خوردگی



ب) ابزاربندی شماتیک دستگاه تست خمشی



الف) بارگذاری و ابزاربندی آزمایش در آزمایشگاه

شکل ۴- برپایش آزمایشگاهی

جدول ۴ - مقایسه نتایج حاصل از رابطه فارادی و آزمایش برای دو سطح خوردگی

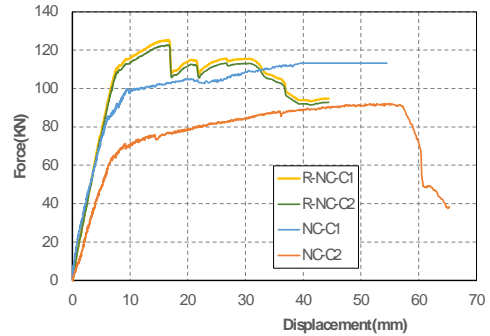
سطح خوردگی	وزن اولیه فولاد (گرم)	وزن فولاد پس از خوردگی (گرم)	خوردگی تجربی	خوردگی از رابطه فارادی	اختلاف تئوری با آزمایش
یک	۱۲۷۲۵	۱۲۰۸۸	۵٪	۷٪	۲٪
دو	۱۲۷۲۵	۱۱۸۰۹	۷,۲٪	۱۰٪	۲,۸٪



شکل ۵- شمایی از توزیع میزان خوردگی در نمونه‌های آزمایشگاهی

۲-۳- نتایج و مشاهدات آزمایشگاهی آزمایش شده با خمشی برای نمونه‌های بدون الیاف مقاوم‌سازی شده با الیاف پلیمری شیشه (GFRP)

شکل ۶ نمودار بار-تغییرمان نمونه‌های بدون الیاف را نشان می‌دهد.



شکل ۶- نمودار بار-تغییرمان برای تیرهای با خوردگی ۵٪ و ۲،۷٪ با درصد الیاف ۰٪ در دو حالت بدون مقاوم‌سازی و مقاوم‌سازی شده با GFRP

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود در خصوص مکانیزم گسیختگی نمونه‌های مقاوم‌سازی شده نسبت به نمونه‌های بدون

مقاوم‌سازی شاهد کاهش تعداد ترک‌ها و میزان بازشدگی و افزایش عمق ترک‌ها و همچنین تمرکز خرابی در محل گسیختگی ورق FRP بوده‌ایم. در نمونه R-NC-C2 اولین ترک‌ها به صورت ترک‌های قائم در قسمت تحتانی تیر و در بار ۴۶ کیلو نیوتن رخ داد و در ادامه و با افزایش بارگذاری ترک‌های ریز و با عمق کم شکل گرفتند و در بار ۶۰-۵۰ کیلو نیوتن اولین ترک‌های مورب با شروع از قسمت تحتانی تیر و ادامه یافتن تا قسمت میانی تیر مشاهده گردید و در نهایت در بار ۱۲۲ کیلو نیوتن شاهد جداسازی ورق FRP و گسیختگی نهایی تیر بودیم. در نمونه R-NC-C1 اولین ترک‌ها به صورت ترک‌های قائم در قسمت تحتانی تیر و در بار ۵۰ کیلو نیوتن رخ داد و در ادامه و با افزایش بارگذاری ترک‌های ریز و با عمق کم شکل گرفتند و در بار ۷۰-۸۰ کیلو نیوتن اولین ترک‌های مورب با شروع از قسمت تحتانی تیر و ادامه یافتن تا قسمت میانی تیر مشاهده گردید و در نهایت در بار ۱۲۵ کیلو نیوتن شاهد جداسازی (debonding) ورق FRP و گسیختگی نهایی تیر بودیم.



ج) R-NC-C1



الف) نمونه NC-C1



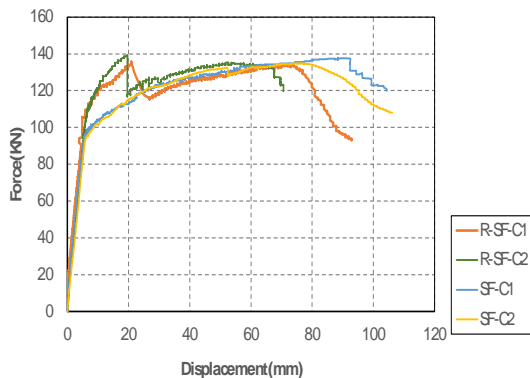
د) R-NC-C2



ب) نمونه NC-C2

شکل ۷- شمایی از مود نهایی گسیختگی نمونه‌های بدون الیاف در سطح یک خوردگی در دو حالت بدون مقاوم‌سازی و مقاوم‌سازی شده با GFRP

خرابی در محل گسیختگی ورق FRP بوده ایم. در نمونه R-SF-C1 اولین ترک‌ها به صورت ترک‌های قائم در قسمت تحتانی تیر و در بار ۶۰ کیلونیوتن رخ داد و در ادامه و با افزایش بارگذاری ترک‌های ریز و با عمق کم شکل گرفتند و در بار ۸۰-۷۰ کیلونیوتن اولین ترک‌های مورب با شروع از قسمت تحتانی تیر و ادامه یافتن تا قسمت میانی تیر مشاهده گردید و در نهایت در بار ۱۲۳ کیلونیوتن شاهد جداشدگی ورق FRP و در ۱۳۷ کیلونیوتن شاهد گسیختگی نهایی تیر بودیم.



شکل ۸- نمودار بار-تغییرمان برای تیرهای با خوردگی ۵٪ و ۲،۷٪ با درصد الیاف فلزی قلاب‌دار در دو حالت بدون مقاوم‌سازی و مقاوم‌سازی شده با GFRP

در نمونه NC-C1 اولین ترک‌ها به صورت ترک‌های قائم در قسمت تحتانی تیر و در بار ۴۴ کیلونیوتن رخ داد و در ادامه و در بار ۶۰-۸۰ کیلونیوتن اولین ترک‌های مورب در قسمت میانی تیر مشاهده گردید و در نهایت در بار ۱۱۳ کیلونیوتن به گسیختگی نهایی رسید. در نمونه NC-C2 اولین ترک‌ها به صورت ترک‌های قائم در قسمت تحتانی تیر و در بار ۱۷ کیلونیوتن رخ داد و در نهایت در بار ۹۲ کیلونیوتن به گسیختگی نهایی رسید.

۳-۳- نتایج آزمایش تست خمشی برای نمونه‌های با الیاف مقاوم‌سازی شده با الیاف پلیمری شیشه (GFRP) ۱-۳-۳- مقایسه تأثیر مقاوم‌سازی در نمونه‌های دارای الیاف فلزی قلاب‌دار در سطح یک و دو خوردگی

شکل ۸ نمودار بار-تغییرمان نمونه‌های بدون الیاف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود در خصوص مکانیزم گسیختگی نمونه‌های مقاوم‌سازی شده نسبت به نمونه‌های بدون مقاوم‌سازی شاهد کاهش تعداد ترک‌ها و میزان بازشدگی و افزایش عمق ترک‌ها نسبت به نمونه‌های مقاوم‌سازی نشده و همچنین تمرکز



ج) R-SF-C1



الف) نمونه SF-C1

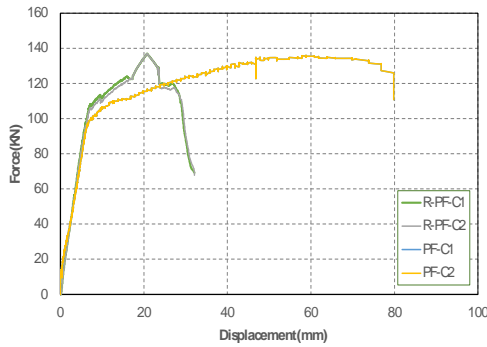


د) R-SF-C2



ب) نمونه SF-C2

شکل ۹- مود نهایی گسیختگی نمونه‌های با الیاف فلزی قلاب‌دار در سطح یک خوردگی در دو حالت بدون مقاوم‌سازی و مقاوم‌سازی شده با GFRP



شکل ۱۰- نمودار بار-تغییرمان برای تیرهای با خوردگی ۵٪ و

۷٫۲٪ با درصد الیاف پلیمری ماکرو در دو حالت بدون

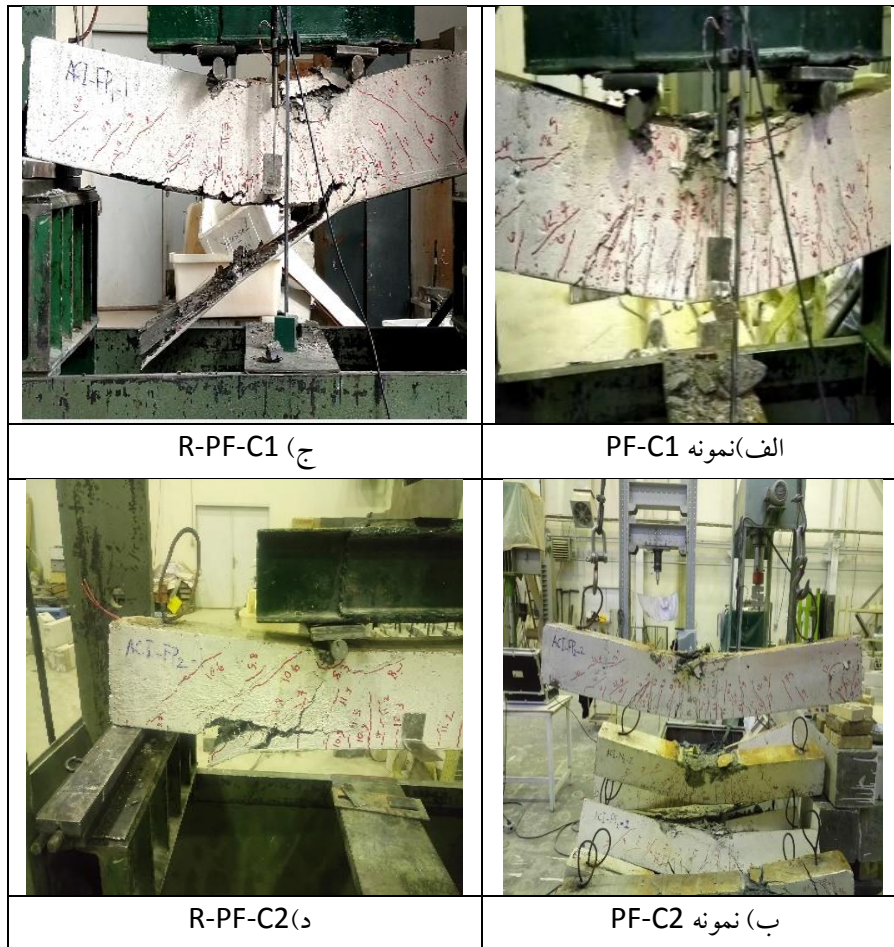
مقاوم‌سازی و مقاوم‌سازی شده با GFRP

در نمونه R-PF-C2 اولین ترک‌ها به صورت ترک‌های قائم در قسمت تحتانی تیر و در بار ۵۸ کیلونیوتن رخ داد و در ادامه و با افزایش بارگذاری ترک‌های ریز و با عمق کم شکل گرفتند و در بار ۷۰-۸۰ کیلونیوتن اولین ترک‌های مورب با شروع از قسمت تحتانی تیر و ادامه یافتن تا قسمت میانی تیر مشاهده گردید و در نهایت در بار ۱۲۳ کیلونیوتن شاهد جداشدگی (debonding) ورق FRP و در بار ۱۳۷ کیلونیوتن شاهد گسیختگی نهایی تیر بودیم. در نمونه PF-C1 اولین ترک‌ها به صورت ترک‌های قائم در قسمت تحتانی تیر و در بار ۲۵ کیلونیوتن رخ داد و در ادامه و با افزایش بارگذاری ترک‌های ریز و با عمق کم شکل گرفتند و در بار ۵۰-۷۰ کیلونیوتن اولین ترک‌های مورب با شروع از قسمت تحتانی تیر و ادامه یافتن تا قسمت میانی تیر مشاهده گردید و در نهایت در بار ۱۳۴ کیلونیوتن به گسیختگی نهایی رسید. در نمونه PF-C2 اولین ترک‌ها به صورت ترک‌های قائم در قسمت تحتانی تیر و در بار ۲۳ کیلونیوتن رخ داد و در ادامه و با افزایش بارگذاری ترک‌های ریز و با عمق کم شکل گرفتند و در بار ۵۰-۶۰ کیلونیوتن اولین ترک‌های مورب با شروع از قسمت تحتانی تیر و ادامه یافتن تا قسمت میانی تیر مشاهده گردید و در نهایت در بار ۱۳۵ کیلونیوتن به گسیختگی نهایی رسید. در نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با افزایش تغییر شکل و نزدیک شدن به خیز نهایی، ترک‌های ریزی در وسط دهانه و در مجاورت ترک‌های اولیه ایجاد شده و ورق GFRP تغییر حالت داده و پاره شد و افزایش عمق ترک‌ها و تمرکز خرابی در همان محل پارگی ورق رخ می‌داد. گسیختگی ورق‌های FRP با تغییر شکل بیشتر به صورت جداشدگی از بتن در امتداد ترک‌های افقی بود.

در نمونه R-SF-C2 اولین ترک‌ها به صورت ترک‌های قائم در قسمت تحتانی تیر و در بار ۵۵ کیلونیوتن رخ داد و در ادامه و با افزایش بارگذاری ترک‌های ریز و با عمق کم شکل گرفتند و در بار ۷۰-۸۰ کیلونیوتن اولین ترک‌های مورب با شروع از قسمت تحتانی تیر و ادامه یافتن تا قسمت میانی تیر مشاهده گردید و در نهایت در بار ۱۳۳ کیلونیوتن شاهد جداشدگی (debonding) ورق FRP و در بار ۱۳۹ کیلونیوتن شاهد گسیختگی نهایی تیر بودیم. در نمونه SF-C1 اولین ترک‌ها به صورت ترک‌های قائم در قسمت تحتانی تیر و در بار ۴۴ کیلونیوتن رخ داد و در ادامه و با افزایش بارگذاری ترک‌های ریز و با عمق کم شکل گرفتند و در بار ۵۰-۷۰ کیلونیوتن اولین ترک‌های مورب با شروع از قسمت تحتانی تیر و ادامه یافتن تا قسمت میانی تیر مشاهده گردید و در نهایت در بار ۱۳۴ کیلونیوتن به گسیختگی نهایی رسید. در نمونه SF-C2 اولین ترک‌ها به صورت ترک‌های قائم در قسمت تحتانی تیر و در بار ۲۴ کیلونیوتن رخ داد و در ادامه و با افزایش بارگذاری ترک‌های ریز و با عمق کم شکل گرفتند و در بار ۵۰-۶۰ کیلونیوتن اولین ترک‌های مورب با شروع از قسمت تحتانی تیر و ادامه یافتن تا قسمت میانی تیر مشاهده گردید و در نهایت در بار ۱۳۴ کیلونیوتن به گسیختگی نهایی رسید.

۳-۲- مقایسه تأثیر مقاوم‌سازی در نمونه‌های دارای الیاف پلیمری ماکرو در سطح یک و دو خوردگی

شکل ۱۰ نمودار بار-تغییرمان نمونه‌های بدون الیاف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود در خصوص مکانیزم گسیختگی نمونه‌های مقاوم‌سازی شده نسبت به نمونه‌های بدون مقاوم‌سازی روند ترک خوردگی هر دو گروه مشابه است ولی در تیرهای تقویت شده شاهد کاهش تعداد ترک‌ها و کاهش میزان بازشدگی و عدم افزایش عمق ترک‌ها نسبت به نمونه‌های مقاوم‌سازی نشده و همچنین تمرکز خرابی در محل گسیختگی ورق FRP بوده‌ایم. نمونه R-PF-C1 اولین ترک‌ها به صورت ترک‌های قائم در قسمت تحتانی تیر و در بار ۵۸ کیلونیوتن رخ داد و در ادامه و با افزایش بارگذاری ترک‌های ریز و با عمق کم شکل گرفتند و در بار ۷۰-۸۰ کیلونیوتن اولین ترک‌های مورب با شروع از قسمت تحتانی تیر و ادامه یافتن تا قسمت میانی تیر مشاهده گردید و در نهایت در بار ۱۳۵ کیلونیوتن شاهد جداشدگی ورق FRP و در بار ۱۳۷ کیلونیوتن شاهد گسیختگی نهایی تیر بودیم.



شکل ۱۱- مود نهایی گسیختگی نمونه‌های با الیاف پلیمری ماکرو در سطح یک خوردگی در دو حالت بدون مقاوم‌سازی و مقاوم‌سازی شده با GFRP

۴- تفسیر نتایج آزمایشگاهی

۴-۲- مقایسه شکل پذیری و حداکثر مقاومت نمونه‌های

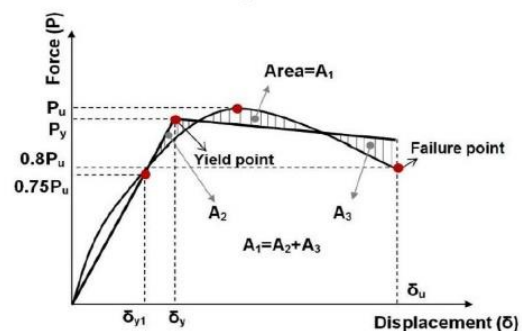
۴-۱- دوخطی کردن منحنی‌های بار-تغییرمان نمونه-

های آزمایشگاهی

۴-۲-۱- مقایسه شکل پذیری و حداکثر مقاومت نمونه‌های

بدون الیاف مقاوم‌سازی شده با الیاف پلیمری شیشه (GFRP) همان‌طور که در نتایج جدول ۵ و نمودار شکل ۶ مشاهده می‌شود در خصوص نمونه‌های بدون الیاف با درصد خوردگی ۵٪ و ۷٫۲٪ بدون مقاوم‌سازی شاهد افت مقاومت نمونه NC-C2 نسبت به نمونه NC-C1 از ۱۱۳ به ۹۲ کیلونیوتن بودیم. و شکل‌پذیری نمونه NC-C2 نیز کمتر از نمونه NC-C1 بوده است که این موضوع را می‌توان به دلیل افزایش میزان خوردگی در نمونه NC-C2 دانست. در خصوص نمونه‌های مقاوم‌سازی شده NC-C1 و NC-C2 با الیاف پلیمری GFRP شاهد افزایش ظرفیت باربری نمونه‌ها به ترتیب از ۱۱۳٫۲ به ۱۲۵ کیلونیوتن و از ۹۲ به ۱۲۲ کیلونیوتن بوده‌ایم. نمونه NC-C2 با سطح دو خوردگی افزایش مقاومت بیشتری به کمک الیاف پلیمری GFRP نسبت به نمونه

منحنی‌های بار-تغییرمان نمونه‌های آزمایشگاهی به روش پائولی-پرایستلی [۹] و همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود دوخطی شدند. شکل‌پذیری μ با محاسبه نسبت تغییر مکان نهایی Δu به تغییر مکان تسلیم Δy به دست آمده است. نتایج حاصل از دوخطی کردن نمودارها در جدول ۵ آمده است



شکل ۱۲- نقاط مشخصه در نمودار بار- تغییر مکان

NC-C1 داشته است. شکل پذیری نمونه مقاوم سازی شده R- NC-C2 نسبت به NC-C2 حدود ۳۵ درصد افزایش NC-C1 نسبت به NC-C1 حدود ۲۲ درصد و شکل پذیری یافته است.

جدول ۵- نتایج آزمایشگاهی نمونه های مختلف

گروه	نام نمونه	نوع الیاف	سطح خوردگی	حداکثر مقاومت (kN)	جابجایی تسلیم (mm)	جابجایی نهایی (mm)	شکل پذیری (μ)
	NC	بدون الیاف	٪۰	۱۱۴/۵	۶/۵	۲۶/۹	۴/۱
گروه A	SF	فلزی قلاب دار	٪۰	۱۳۴/۰	۱۱/۳	۱۰۵/۰	۹/۲
	PF	پلیمری ماکرو	٪۰	۱۳۵/۰	۱۰/۵	۹۷/۰	۹/۲
	NC-C1	بدون الیاف	٪۰	۱۱۳/۲	۱۵/۰	۵۴/۵	۳/۶
گروه B	SF-C1	فلزی قلاب دار	٪۰	۱۳۴/۰	۸/۴	۶۷/۴	۸/۰
	PF-C1	پلیمری ماکرو	٪۰	۱۳۵/۰	۱۱/۰	۹۵/۰	۸/۶
	NC-C2	بدون الیاف	٪۰	۹۲/۰	۱۲/۵	۴۱/۰	۳/۲
گروه C	SF-C2	فلزی قلاب دار	٪۰	۱۳۴/۰	۱۵/۰	۱۰۶/۰	۷/۰
	PF-C2	پلیمری ماکرو	٪۰	۱۳۵/۰	۱۰/۰	۸۰/۰	۸/۰
	R-NC-	بدون الیاف	٪۰	۱۲۵/۰	۱۰/۰	۴۴/۴	۴/۴
گروه D	R-SF-C1	فلزی قلاب دار	٪۰	۱۳۷/۰	۱۰/۰	۹۲/۰	۱۰/۱
	R-PF-C1	پلیمری ماکرو	٪۰	۱۳۷/۰	۸/۰	۳۲/۵	۴/۰
	R-NC-	بدون الیاف	٪۰	۱۲۲/۰	۱۰/۰	۴۴/۴	۴/۴
گروه E	R-SF-C2	فلزی قلاب دار	٪۰	۱۳۹/۰	۷/۰	۷۰/۰	۱۰/۰
	R-PF-C2	پلیمری ماکرو	٪۰	۱۳۷/۰	۸/۰	۳۲/۵	۴/۰

۴-۲-۲- مقایسه شکل پذیری و حداکثر مقاومت نمونه - C1 حدود ۲۶ درصد و شکل پذیری نمونه R-SF-C2 نسبت به SF-C2 حدود ۴۱ درصد افزایش یافته است. علت افزایش شکل پذیری در نمونه های خورده شده و تقویت شده با GFRP خصوصاً برای نمونه های بالیاف فلزی، مربوط به

کاهش جابجایی تسلیم نمونه ها بر اساس روش انتخابی دوخطی کردن نمونه های بار تغییرمان می باشد که در جدول ۵ نشان داده شده است.

۴-۲-۳- مقایسه شکل پذیری و حداکثر مقاومت نمونه - های دارای الیاف پلیمری ماکرو مقاوم سازی شده با الیاف پلیمری شیشه (GFRP) در سطح یک و دو خوردگی همان طور که در نتایج جدول ۵ و نمودار شکل ۸ مشاهده می شود در خصوص نمونه های با الیاف فلزی قلاب دار با درصد خوردگی ۵٪ و ۷٫۲٪ و مقاوم سازی شده با الیاف پلیمری GFRP شاهد افزایش ظرفیت باربری نمونه های R-SF-C1 و R-SF-C2 نسبت به نمونه های SF-C1 و SF-C2 به ترتیب از ۱۳۴ به ۱۳۷ کیلونیوتن و از ۱۳۴ به ۱۳۹ کیلونیوتن بوده ایم. در مقایسه نمونه R-SF-C2 با خوردگی سطح دو با نمونه های بدون الیاف مقاوم سازی شده R-NC-C1 با خوردگی سطح یک و R-NC-C2 با سطح دو خوردگی مشاهده می شود که ظرفیت باربری نسبت به هر دو نمونه افزایش چشمگیری داشته است. همچنین شکل -

پذیری نمونه مقاوم سازی شده R-SF-C1 نسبت به SF-C1 و ۷٫۲٪ و مقاوم سازی شده با الیاف پلیمری GFRP شاهد افزایش

۶- مراجع

- [1] W. Zhu, R. François, Corrosion of the reinforcement and its influence on the residual structural performance of a 26-year-old corroded RC beam, *Constr. Build. Mater.* 51 (2014) 461–472.
- [2] Z.P. Bazant, Physical model for steel corrosion in concrete sea structures— theory, *J. Struct. Div.* 105 (6) (1979) 1137–1153.
- [۷]. حسینی، عبدالله و پرهیزگار، طیبه، استخراج یون کلراز بتن به منظور توقف خوردگی آرماتور، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ۱۳۸۴.
- [4] Triantafillou, T.C. (1998), "Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites", *ACI Structural Journal*, 95:107-115.
- [5] Chajes, M.J., Januszka, T.F., Mertz, D.R., Thomson, T.A., and Finch, W.W. (1995), "Shear strengthening of reinforced concrete beams using externally applied composite fabrics", *ACI Structural Journal*, 92: 295-303.
- [6] Ross, C.A., Jerome, D. M., Tedesco, J. W, and Hughes, M.L. (1999), "Strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composite laminates", *ACI struct*, J,96 (2), 212-220.
- [7] Soudki, K.A., Sherwood and T, Masoud, S. (2006), "FRP Repair of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Beams" , *Engineering Structures, Mechanics & Construction*, 165–173. Springer.
- [8] K. Bicera, H. Yalcinerb, A. Pekrioglu Balkisa, A. Kumbasaroglub, Effect of corrosion on flexural strength of reinforced concrete beams with polypropylene fibers, *Construction and Building Materials* 185 (2018) 574–588.
- [9] Paulay T, Priestley MJN. *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*. New York: John Wiley & Sons; 1992.

ظرفیت باربری نمونه‌های R-PF-C1 و R-PF-C2 نسبت به نمونه‌های PF-C1 و PF-C2 از ۱۳۵ به ۱۳۷ کیلونیوتن بوده‌ایم. در مقایسه نمونه R-PF-C2 با خوردگی سطح دو با نمونه‌های بدون الیاف مقاوم‌سازی شده R-NC-C1 با خوردگی سطح یک و R-NC-C2 با سطح دو خوردگی مشاهده می‌شود که ظرفیت باربری نسبت به هر دو نمونه افزایش چشمگیری داشته است. شکل‌پذیری نمونه مقاوم‌سازی شده R-PF-C1 نسبت به PF-C1 و نمونه R-PF-C2 نسبت به PF-C2 کاهش یافته است، اما نسبت به R-NC-C1 و R-NC-C2 همچنان بیشتر بوده است.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش‌های نشان می‌دهد که مقاوم‌سازی نمونه‌های دارای خوردگی سطح دو با الیاف پلیمری GFRP، مقاومت و شکل‌پذیری را افزایش می‌دهد. به طوری که مقاومت و شکل‌پذیری این نمونه‌ها از حد مربوط به نمونه‌های شاهد فراتر رفته و حتی مقدار افزایش مقاومت و شکل‌پذیری آن‌ها نسبت به الیاف بدون خوردگی و مقاوم‌سازی نشده هم بیشتر بوده است. بررسی مکانیزم شکست نمونه‌های مقاوم‌سازی شده نشان می‌دهد که در اکثر موارد به علت تمرکز تنش در وسط دهانه شکست همراه با پارگی FRP و در وسط دهانه نمونه رخ می‌دهد. در نمونه‌های دارای خوردگی سطح دو (خوردگی ۰٫۷، ۲٪) به دلیل آسیب‌دیدگی بیشتر خاموت‌ها و نازک شدن ضخامت آن‌ها مکانیزم شکست بدین صورت می‌باشد که با افزایش بار، پارگی FRP همراه با کماتش آرماتورهای طولی در اثر گسیختگی خاموت‌های آسیب‌دیده رخ می‌دهد و در تیرهای تقویت شده شاهد کاهش تعداد ترک‌ها و کاهش میزان بازشدگی و عدم افزایش عمق ترک‌ها نسبت به نمونه‌های مقاوم‌سازی نشده و همچنین تمرکز خرابی در محل گسیختگی ورق FRP بوده‌ایم. با افزایش تغییر شکل و نزدیک شدن به خیز نهایی، ترک‌های ریزی در وسط دهانه و در مجاورت ترک‌های اولیه ایجاد شده و ورق GFRP تغییر حالت داده و پاره شد و افزایش عمق ترک‌ها و تمرکز خرابی در همان محل پارگی ورق رخ می‌داد. گسیختگی ورق‌های FRP با تغییر شکل بیشتر به صورت جداشدگی از بتن در امتداد ترک‌های افقی بود.

Experimental Evaluation of Retrofit of RC Beams Damaged by Reinforcement Corrosion Using GFRP Sheets

Elahe Rahimi

MSc student, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

Jalil Shafaei *

Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

Mohammad Esfahani

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

Abstract

One of the most effective methods for strengthening and repairing damaged corrosion elements is the use of fiber reinforced polymers. In this research, an experimental study was conducted to investigate the effect of GFRP on the retrofit of corroded RC beams. For this purpose, 15 concrete beams were constructed with two types of hooked metal fibers and polymeric macros with a volume percentage of 0% and 0.5%. The samples were tested at three levels of corrosion of 0%, 7% and 9%. An accelerated corrosion test was used from a 3% salt pool. Finally, corroded beams retrofitted with a GFRP composite polymer fiber layer were subjected to a flexural loading test. Based on experimental results, corrosion reduces the ductility of the specimens and the use of GFRP increases the ductility and bearing capacity of the specimens and reduces the number of cracks created and increases the depth of them and more focus on failure and damage is within the range of sheet separation.

Keywords: Fiber reinforced concrete (FRC), GFRP Sheets, Reinforcement corrosion, Hooked metal fibers, Accelerated corrosion, Retrofit.

* Corresponding Author: jshafaei@shahroodut.ac.ir