

## ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد سازه‌های تیرهای بتن الیافی با الیاف فلزی قلابدار و الیاف پلیمری ماکرو در سطوح مختلف خوردگی آرمانتور

الهه رحیمی<sup>۱</sup>، جلیل شفایی\*<sup>۱</sup>، محمدرضا اصفهانی<sup>۲</sup>

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران  
۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۲۰  
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۹/۱۱  
پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۲  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۱/۱۳

### کلمات کلیدی:

بتن مسلح الیافی (FRC)  
الیاف فلزی قلابدار  
الیاف پلیمری ماکرو  
خوردگی آرمانتور  
خوردگی تسریع شده

**خلاصه:** خوردگی آرمانتور در سازه‌های بتن مسلح منجر به کاهش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری اعضای بتن مسلح می‌گردد. استفاده از الیاف در بتن برای بهبود خواص مکانیکی بتن مدت‌هاست که مورد توجه مهندسان قرار گرفته است. در این تحقیق به منظور بررسی تاثیر الیاف پلیمری و الیاف فلزی بر عملکرد خمشی تیرهای بتن مسلح دارای خوردگی و بدون خوردگی یک مطالعه آزمایشگاهی انجام گرفت. دو نوع الیاف پلیمری ماکرو و الیاف فلزی قلابدار با درصدهای حجمی ۰٪ و ۰/۵٪ در سه سطح خوردگی تقریبی ۰٪، 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 تحت آزمایش بارگذاری خمشی قرار گرفتند. رفتار سازه‌های تیرهای بتن مسلح در تیرهای دارای خوردگی و تیرهای بدون خوردگی و با الیاف و بدون الیاف مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، خوردگی آرمانتور باعث کاهش شکل‌پذیری نمونه‌ها گردید و استفاده از الیاف فلزی و پلیمری در نمونه‌های بدون خوردگی و با خوردگی سطح یک و دو باعث افزایش دو برابری شکل‌پذیری می‌گردد. الیاف پلیمری ماکرو در مقایسه با الیاف فلزی قلابدار در نمونه‌های دارای خوردگی تاثیر بیشتری در افزایش شکل‌پذیری نمونه‌ها دارند. افزایش درصد خوردگی در نمونه‌های بدون الیاف باعث کاهش حداکثر مقاومت نمونه‌ها گردید اما در نمونه‌های با الیاف با افزایش درصد خوردگی تغییر محسوسی در ظرفیت باربری نمونه‌ها مشاهده نگردید.

### ۱- مقدمه

طولی و عرضی شود. در حالیکه سطح مقطع میلگردها تحت تاثیر خوردگی کاهش می‌یابد، محصولات خوردگی در اطراف میلگردها باعث انبساط حجمی در بتن در بتن می‌شود. مطالعات انجام شده توسط محققین از جمله بازنت [۲] نشان می‌دهد که افزایش حجم ناشی از خوردگی در اطراف میلگردها دو تا چهار برابر بیشتر از حجم میلگردهای خورده نشده 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 (در حالتی که خوردگی یکنواخت رخ دهد) [۳]. از

کاربرد بتن به دلیل مزایای فنی و اقتصادی متعدد آن با سرعت بسیار زیادی رو به گسترش است. خوردگی میلگرد در بتن به عنوان یکی از مهم‌ترین دلایل تضعیف بتن مسلح می‌باشد، به گونه‌ای که آسیب‌های سازه‌ای و عملکردی سازه‌های بتن‌آرمه در اثر خوردگی آرمانتور یکی از چالش‌ها و مسائل مهم در دنیای مهندسی می‌باشد [۱]. نفوذ کلراید به داخل بتن و یا کربناتاسیون و کاهش pH محیط بتن، در صورت وجود شرایط مناسب منجر به خوردگی آرمانتور می‌گردد و می‌تواند باعث کاهش سطح مقطع میلگردهای \*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: jshafaei@shahroodut.ac.ir





(ب)



(الف)

شکل ۱. خسارات وارده به اعضای بتنی ناشی از خوردگی آرماتور  
الف-پیشرفت خوردگی و از بین رفتن پوشش بتن و نمایان شدن آرماتورها،  
ب- ترک های ناشی از خوردگی موازی با میلگردهای طولی ستون

Fig. 1. Damage to concrete members due to corrosion of reinforcement  
a) Damage to concrete cover due to reinforcement corrosion  
b) Cracks caused by corrosion parallel to column longitudinal bars

پلی پروپیلن با مقاومت و مدول الاستیسیته بالاتر، عرضه شده اند. همچنین افزایش قطر یاف امکان کاربرد آنها در درصد حجمی بالاتر را فراهم آورده است. به یافی با طول بزرگتر از ۳۰ میلی متر و قطر بزرگتر از ۰/۱ میلی متر، یاف ماکرو گفته می شود. یاف پلیمری ماکرو، اغلب از جنس پلی پروپیلن با مدول الاستیسیته سه و نیم تا پنج گیگاپاسکال می باشند. برخی از یاف پلیمری نسل جدید (معمولاً از جنس پلی اتیلن) دارای مدول الاستیسیته های بالاتری می باشند. همچنین برخی از یاف نسل جدید که با عنوان HPP، شناخته می شود، از جنس تلفیقی پلی پروپیلن و پلی اتیلن بوده و دارای مدول الاستیسیته بالاتر از هفت گیگاپاسکال می باشد. با توجه به هزینه کمتر یاف پلیمری ماکرو (قیمت به ازای واحد حجم بتن) در مقایسه با یاف فولادی از یک سو و عدم امکان خوردگی آنها از سوی دیگر، همچنین تحقیقات محدود انجام شده در داخل کشور در این خصوص، مشخص کردن مزایا و کاستی های فنی این یاف در مقایسه با یاف فولادی امری ضروری به نظر می رسد. مهم ترین اثر مثبتی که با افزودن یاف در بتن بوجود می آید، شکل پذیری بالاتر بتن و قابلیت بیشتر در افزایش مقاومت خمشی می باشد.

مطالعات مختلفی، از جمله مطالعات سونگ و همکاران [۴]، روزلر و همکاران [۵]، مایکل و همکاران [۶،۷] پوداس و همکاران [۸]، روزیوان و همکاران [۹]، فانکومار [۱۰]، پارک و همکاران [۱۱]، سپادا

اثرات خوردگی بر خواص مکانیکی و رفتار سازه ای بتن و میلگردها می توان به تاثیر خوردگی بر شکل پذیری، ظرفیت باربری، سختی، مقاومت برشی و الگوی ترک ایجاد شده در نمونه های بتنی اشاره کرد. در شکل ۱ نمونه ای از خسارات وارده به اعضا و المان های بتنی در اثر خوردگی آرماتورهای طولی و عرضی ارائه شده است.

یکی از نقاط ضعف بتن و ماتریس های سیمانی، مقاومت کششی کم، شکنندگی و عملکرد ترد تحت بارهای وارده می باشد. استفاده از یاف های فلزی و پلیمری به صورت گسترده ای جهت بهبود خواص مکانیکی به خصوص در ارتقاء مقاومت خمشی و همچنین کنترل عرض ترک تیرها در صنعت ساختمان استفاده می شود. متداول ترین یاف مورد استفاده جهت بهبود خواص مکانیکی و سازه ای بتن، یاف فولادی می باشند. نوع عمده دیگر یاف مورد استفاده، یاف پلیمری (عمدتاً از نوع پلی پروپیلن، پلی اتیلن) می باشد. از اثرات مهم کاربرد یاف پلیمری در بتن، کنترل و کاهش ترک های پلاستیک می باشد. از مشخصه های یاف پلیمری متداول، نازک بودن رشته های یاف می باشد. در صورت استفاده از مقادیر زیاد این یاف کارایی بتن دچار اختلال شده و ممکن است بیش از حد چسبناک گردد. لزوم محدود کردن میزان درصد حجمی یاف پلیمری در بتن از یک سو و پایین بودن مدول الاستیسیته این یاف از سوی دیگر باعث شده تا این یاف تاثیر قابل توجهی روی بهبود خواص مکانیکی بتن، نداشته باشند. طی سال های اخیر یاف پلیمری نسل جدید عمدتاً بر پایه

یک استخر با ۳٪ نمک، استفاده شد. در نهایت تیرهای بتن مسلح تحت آزمایش بارگذاری خمشی قرار گرفتند و براساس منحنی های بار-تغییر مکان نمونه های آزمایشگاهی، پارامترهای سختی، مقاومت و شکل پذیری نمونه های مختلف با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مشخصات هندسی و جزییات آرماتوربندی نمونه های

#### آزمایشگاهی

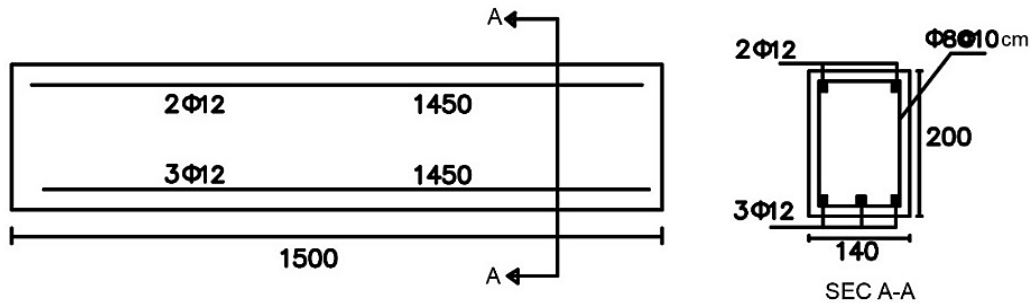
در این مطالعه، دو نوع الیاف فلزی قلابدار و الیاف پلیمری ماکرو در نمونه های آزمایشگاهی تیر بتنی قرار گرفته و در سطوح مختلف خوردگی مورد بررسی قرار گرفتند. نمونه ها به سه گروه اصلی A، B، C تقسیم شدند. گروه A نمونه های با خوردگی ۰٪، گروه B نمونه های با خوردگی تقریبی ۷٪ و گروه C نمونه های با خوردگی تقریبی ۹٪ می باشند. هر گروه مجدداً با توجه به نوع الیاف به سه زیر گروه نمونه های بدون الیاف، نمونه های با الیاف فلزی قلابدار و نمونه های با الیاف پلیمری ماکرو تقسیم شدند. سطح مقطع تیر بتنی ۱۴۰×۲۰۰ میلی متر و طول دهانه آن ۱۵۰۰ میلی متر است. پوشش بتن از سطح بتن تا روی میلگردهای عرضی ۲۵ میلی متر می باشد. میلگردهای طولی با قطر ۱۲ میلی متر و میلگردهای عرضی (خاموت) با قطر ۸ میلی متر و با فاصله هر ۱۰ سانتی متر می باشند. نمونه آزمایشگاهی با مقیاس عرضی ۱/۲ و مقیاس طولی ۱/۴ در آزمایشگاه سازه، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود ساخته شدند. شکل ۲ جزییات آرماتوربندی نمونه های ساخته شده را قبل از بتن ریزی نشان می دهد.

### ۲-۲- مشخصات و ویژگی های مصالح آزمایشگاهی

مشخصات مکانیکی میلگردهای طولی و عرضی مطابق نتایج آزمایشگاهی به صورت: تنش تسلیم ( $F_y$ ) ۳۸۸ مگاپاسکال، تنش گسیختگی ( $F_u$ ) ۵۵۱ مگاپاسکال، ازدیاد طول نسبی در حد گسیختگی ۲۷/۵٪ برای میلگردهای سایز ۸ و تنش تسلیم ( $F_y$ ) ۴۷۹ مگاپاسکال، تنش گسیختگی ( $F_u$ ) ۶۳۳ مگاپاسکال، ازدیاد طول نسبی در حد گسیختگی ۲۰٪ برای میلگردهای سایز ۱۲ می باشد. مدول الاستیسیته میلگردها ۲×۱۰<sup>۵</sup> مگاپاسکال می باشد. درصد آرماتورهای طولی تیرها براساس آئین نامه بتن ایران در حد ۱٪-۲/۵٪

و همکاران [۱۲]، فرانتلی و همکاران [۱۳] بر روی تاثیر استفاده از الیاف فلزی، پلاستیکی، نایلونی، پلی اتیلن و پلیمری ماکرو بر روی اعضای بتنی انجام شده است. وون و همکاران [۱۴] بر روی سایزها و انواع مختلف الیاف مصنوعی کار کردند تا ابعاد بهینه را به دست آورند و تاثیر الیاف بر روی مقاومت پیوستگی و خمشی نمونه های بدون خوردگی را با توجه به تست بیرون کشیدگی بررسی کنند. مطالعات اخیر نشان می دهد که الیاف در بتن مسلح نفوذپذیری بتن را کاهش و سبب افزایش عمر سرویس دهی می شود [۱۵]. مطالعات صورت گرفته نشان می دهد که حضور الیاف پلی پروپیلن سبب کاهش نفوذپذیری، انبساط و انقباض حجمی بتن و به نوبه خود کاهش احتمال ترک خوردگی در بتن می شود [۱۶]. استفاده از الیاف پلی پروپیلن سبب کاهش نفوذپذیری و موئینگی در بتن می گردد [۱۷].

با وجود این که مطالعات زیادی بر روی تاثیر استفاده از الیاف مختلف بر روی نمونه های بتنی انجام گرفته است، اما تاثیر مقایسه ای الیاف پلیمری ماکرو و الیاف فلزی قلابدار بر روی نمونه های با ابعاد بزرگ و نزدیک به واقعی و دارای خوردگی تا کنون انجام نشده است. در این پژوهش، تاثیر هر دو نوع الیاف پلیمری ماکرو و فلزی قلابدار بر روی نمونه های بتنی با ابعاد نزدیک به واقعی و در سطوح مختلف خوردگی برای بررسی مقاومت خمشی، شکل پذیری و الگوی ترک مورد بررسی قرار گرفت. به دلیل اینکه تمرکز این مطالعه بر روی نمونه های 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 تاثیر خوردگی قرار بگیرند. چرا که میلگردهای عرضی نیز روی ظرفیت باربری و جابجایی به خصوص در شرایط خوردگی تاثیر گذارند و از آنجا که میلگردهای عرضی در برابر نیروهای برشی مقاومت می کنند، بنابراین بر روی عملکرد سازه ای اعضای بتنی نیز تاثیر گذارند. در این تحقیق با ساخت تعداد نه تیر بتن مسلح با سطح مقطع ۲۰۰×۱۴۰ میلی متر و طول دهانه ۱۵۰۰ میلی متر در آزمایشگاه سازه دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، تاثیر دو نوع الیاف پلیمری ماکرو و الیاف فلزی قلابدار با درصدهای حجمی ۰٪ و ۰/۵٪ در سه سطح خوردگی تقریبی ۰٪ و ۷٪ و ۹٪ در عملکرد سازه ای تیرها مورد آزمایش قرار گرفتند. برای انجام آزمایش خوردگی تسریع شده از



شکل ۲. جزئیات هندسی و آرماتوربندی تیرها و نمونه های آزمایشگاهی (ابعاد به میلیمتر است).

Fig. 2. Geometric details and reinforcement of beams specimens (Dimension in millimeters)

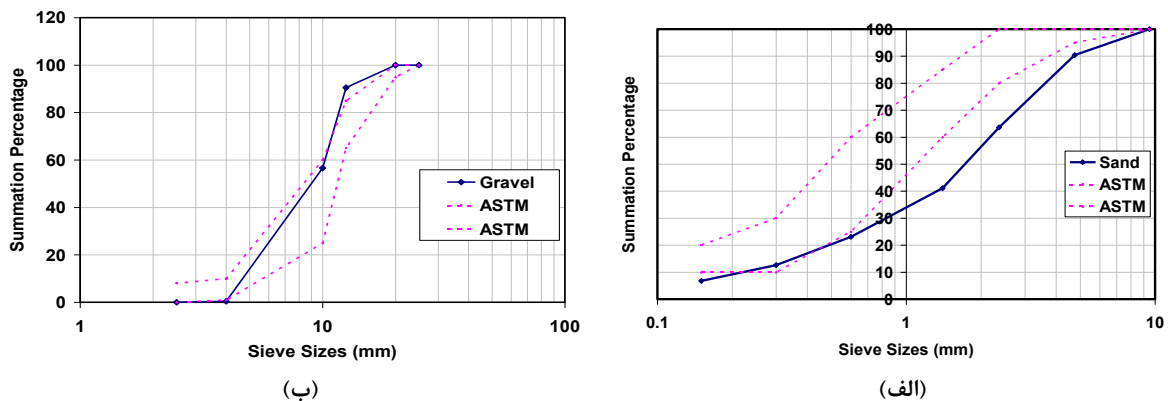
محصول کارخانه سیمان مشهد می باشد. از فوق روان کننده برند ژیکاکوا به میزان ۰/۲ درصد وزنی سیمان در روند ساخت بتن نمونه ای آزمایشگاهی استفاده گردیده است. مقاومت فشاری بتن مورد استفاده ۲۶ مگاپاسکال و به عنوان نماینده بتن در سازه های موجودی که در معرض خوردگی قرار دارند، در نظر گرفته شد.

مشخصات مکانیکی الیاف فلزی قلابدار مطابق اطلاعات ارائه شده از کارخانه سازنده برای الیاف فلزی قلابدار بصورت مقاومت کششی  $1/160 \text{ N/mm}^2$ ، مدول الاستیسیته  $210 \text{ N/mm}^2$  می باشد و دانسیته  $3780 \text{ kg/m}^3$  می باشد، طول و قطر الیاف به ترتیب ۶۰ و ۰/۹ میلی متر و نسبت  $L/D=65$  می باشد. الیاف پلیمری ماکرو دارای مقاومت کششی  $640 \text{ مگاپاسکال}$ ، مدول یانگ ۱۲ گیگاپاسکال و دانسیته  $3980 \text{ kg/m}^3$  می باشد، طول الیاف ۴۸ میلی متر و قطر آن ۰/۹۸ و نسبت  $L/D=49$  می باشد. الیافهای فلزی و مصنوعی در حین اختلاط بتن به صورت تدریجی و مرحله به مرحله به منظور جلوگیری از توده شدن الیاف، به مخلوط بتن اضافه گردید.

سطح مقطع کل بتن ( $A_p$ ) می باشد. میلگردهای عرضی به صورت تنگ های بسته با قلاب ۹۰ درجه که فاصله آزاد بین آنها ۱۰۰ میلی متر و قطر هشت میلی متر است، در نظر گرفته شد.

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 ساخت بتن نمونه های آزمایشگاهی در شکل ۳ نشان داده شده است. تعیین نسبت سنگدانه های بتن (شامل ماسه و شن نخودی و بادامی) بر اساس آزمایش دانه بندی انجام شده به گونه ای انجام شد که منحنی دانه بندی سنگدانه های بتن در محدوده دانه بندی بندی یکنواخت (حد B) طرح ملی اختلاط بتن قرار بگیرد.

سیمان مصرفی در این آزمایش از نوع سیمان پرتلند تیپ دو



شکل ۳. منحنی دانه بندی سنگدانه های مصرفی در بتن  
الف) منحنی دانه بندی ماسه ی مصرفی ب) منحنی دانه بندی شن مصرفی

Fig. 3. Grading curve of aggregate used in concrete  
a) Grading curve of sand b) Grading curve of gravel



جدول ۱. نسبت های وزنی اختلاط مصالح در بتن (برحسب کیلوگرم)

Table 1. Weight ratio of materials used in concrete mix (kg)

سیمان	شن	ماسه	آب	فوق روان کننده
370	802	980	185	2.0 درصد وزنی سیمان

الیافی به دلیل وجود فوق روان کننده حدود ۱۳۰ میلی متر اندازه گیری گردید.

### ۲-۲-۲- آرماتوربندی و ساخت نمونه ها

همان طور که قبلا اشاره شد، کلیه عملیات ساخت و انجام آزمایشها بارگذاری تیرهای بتنی در آزمایشگاه سازه ی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد. همه نمونه ها در محوطه اصلی آزمایشگاه و در فضایی سرپوشیده و در یک مرحله و به صورت افقی بتن ریزی و ساخته شدند، بعد از ساخت نمونه ها، عمل آوری بتن نمونه ها به مدت هفت روز با استفاده از گونی مرطوب و نایلون به منظور کند شدن تبخیر رطوبت گونی ها انجام شد. به منظور آرماتوربندی نمونه ها ابتدا نقشه دقیق قطع و خم آرماتورهای طولی و عرضی برای تک تک نمونه ها تهیه گردید. بر مبنای نقشه های تهیه شده جدولی از میزان مورد نیاز آرماتورهای طولی و عرضی، طول و موقعیت دقیق خمها آماده شد. سپس با توجه به طول و موقعیت خمهای آرماتورهای طولی و عرضی، اقدام به خم کاری آرماتورها بر روی میز آرماتوربندی شد. در شکل ۴ نحوه خم کاری در آرماتورهای طولی و عرضی نشان داده شده است.

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

با توجه به اینکه هدف از تحقیق حاضر ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد سازه ای تیرهای بتن الیافی در سطوح مختلف خوردگی آرماتور در ساختمان های بتن آرمه موجود می باشد، و با توجه به اینکه مقاومت فشاری بتن در ساختمان های بتن آرمه موجود کم می باشد. در این پژوهش برای ساخت نمونه های اتصالات مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن، ۲۶ مگاپاسکال انتخاب گردید. برای رسیدن به مقاومت هدف انتخاب شده، چندین طرح اختلاط برای بتن طراحی گردید و در نهایت طرح اختلاط نهایی برای ساخت بتن نمونه ها مطابق جدول ۱ انتخاب گردید. طرح اختلاط بتن به روش وزنی و براساس توصیه های طرح ملی اختلاط بتن ایران، انجام شد. حداکثر اندازه سنگدانه های مورد استفاده در بتن نمونه ها ۱۹ میلی متر انتخاب شد. اسلامپ بتن برای طراحی نسبت های مصالح در طرح اختلاط اولیه بتن، ۱۰۰ میلی متر انتخاب گردید. طرح اختلاط بتن مورد استفاده در نسبت های وزنی اختلاط مصالح در بتن مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

زمان اختلاط در خصوص بتن معمولی حداقل ۵ دقیقه بوده و اسلامپ بتن در بتن های معمولی حدود ۹۰ میلی متر و در بتن های



(ب)



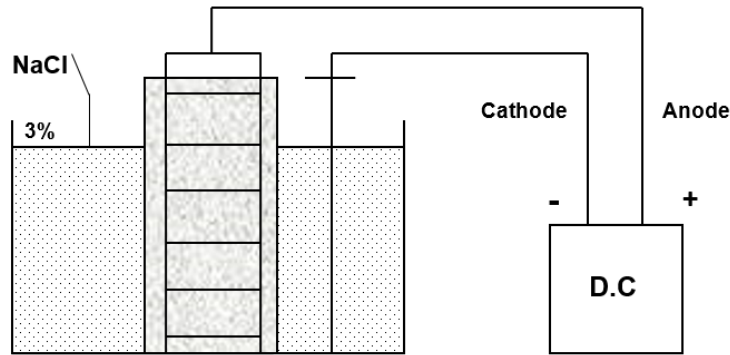
(الف)

شکل ۴. آرماتوربندی نمونه های آزمایشگاه  
الف) قفس های آرماتوربندی شده و نمونه های آزمایشگاهی ب) میلگردهای عرضی ساخته شده در آزمایشگاه

Fig. 4. Reinforcement details of laboratory specimens  
a) Reinforced cages and laboratory specimens b) Transversal bars made in the laboratory



(ب)



(الف)

شکل ۵. مدار الکتریکی برای اعمال خوردگی  
 الف) مدار الکتریکی نحوه اعمال خوردگی تسریع شده در آزمایشگاه  
 ب) کابل مسی مورد استفاده برای میلگردهای طولی و عرضی به منظور برقراری جریان در مدار الکتریکی

Fig. 5. Details of electrical circuit for corrosion

a) Electrical Circuit to apply accelerated corrosion in the laboratory

b) Copper cable used for longitudinal and transverse bars to conduct current in an electrical circuit

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  $\Delta W$  : وزن از دست رفته به گرم می باشد. پس از شکست نمونه ها، وضعیت میلگردها از نظر وزن باقیمانده مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج حاصل از رابطه فارادی کنترل گردید. درصد خوردگی نمونه ها پس از وزن مجدد از رابطه ۲ به دست می آید.

$$CL = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100 \quad (2)$$

که در رابطه ی شماره ۲،  $CL$  درصد خوردگی آزمایشگاهی،  $W_i$  وزن اولیه میلگردها قبل از خوردگی و  $W_f$  وزن میلگردها پس از تمیز کردن سطح از محصولات خوردگی می باشد. در شکل ۶ نمایی از نمونه های آزمایشگاهی در استخر نمک برای اعمال خوردگی تسریع شده نشان داده شده است.

#### ۲-۴- نام گذاری نمونه های آزمایشگاهی

نمونه های آزمایشگاهی در سه گروه A، B و C و بر حسب درصد خوردگی دسته بندی شدند. نمونه های دارای خوردگی سطح یک با

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

پس از ۲۸ روز عمل آوری نمونه های ساخته شده در مرحله قبل، نمونه ها تیر بتنی تحت آزمایش خوردگی تسریع شده قرار گرفتند. شکل ۵ جزئیات مدار الکتریکی برای اعمال خوردگی تسریع شده در آزمایشگاه را به صورت شماتیک و کابل مسی متصل شده به قفس آرماتور را نشان می دهد. به منظور اعمال خوردگی تسریع شده از یک استخر بتنی استفاده شد. استخر بتنی به منظور جلوگیری از کاهش جریان با 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.

پس از قرار دادن نمونه ها و کاتد در محلول سه- درصد آب- نمک (۳ 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 نمونه ها، 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:

$$\Delta W = \frac{I.t.A_m}{Z.F} \quad (1)$$

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

Table 2. Determination of accelerated corrosion time based on Faraday relationship at one and two corrosion levels

درصد خوردگی	وزن اولیه فولاد (gr)	$W\Delta$ (gr)	$t$ (h)	$I$ (Amp)	سطح خوردگی
7	12725	889	327	2.5	یک
10	12725	1270	467	2.5	دو



شکل ۶. نمایی از نمونه های آزمایشگاهی در استخر نمک برای اعمال خوردگی تسریع شده  
 الف) منبع تغذیه و آمپرسنج برای نمایش میزان خوردگی  
 ب) نمایی از مدار الکتریکی برای ایجاد خوردگی تسریع شده  
 ج) نمایی از تیرها در آزمایش خوردگی

Fig. 6. View of laboratory specimens in salt pools for accelerated corrosion

- a) Power supply and ammeter to show corrosion rate  
 b) View of the electrical circuit for accelerated corrosion  
 c) View of beams in corrosion testing

بارگذاری تا گسیختگی کامل نمونه ها ادامه یافت. ظرفیت جک مورد استفاده در این آزمایش ۱۰۰۰ کیلو نیوتن بود.

### ۳- مشاهدات آزمایشگاهی

#### ۳-۱- بررسی و کنترل میزان خوردگی نمونه ها

به منظور بررسی شرایط خوردگی ایجاد شده در سطوح مختلف، پس از بارگذاری و شکستن نمونه ها تحت بار خمشی، بتن نمونه ها توسط دستگاه هیلتی تخریب شد و میلگردهای طولی و عرضی 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 می شود، بین نتایج حاصل از رابطه تئوری مبتنی بر قانون فارادی و وزن محاسبه شده تقریبی از

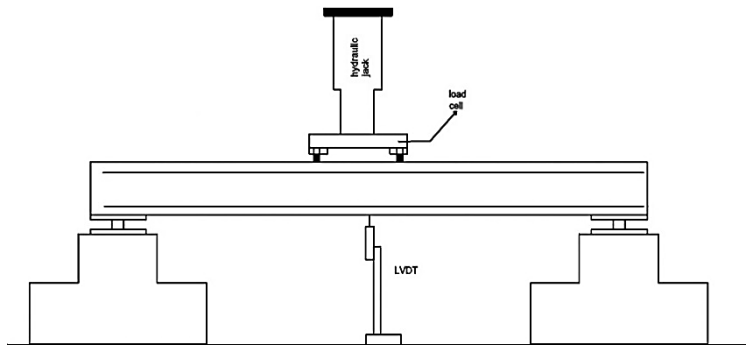
پسوند C<sup>۱</sup> و نمونه های با خوردگی سطح دو با پسوند C<sup>۲</sup> نام گذاری شدند. NC نشانگر Normal-Concrete یا نمونه های بتنی بدون الیاف می باشد. SF و PF به ترتیب بیانگر نمونه های با الیاف فلزی قلابدار و نمونه های با الیاف پلیمری ماکرو می باشد. نتیجه نام گذاری نمونه ها در جدول ۳ آمده است.

#### ۵-۲- برپایش آزمایشگاهی، ابزاربندی و نحوه بارگذاری نمونه ها

در آخرین مرحله از برنامه آزمایشگاهی کلیه نمونه های 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 نمونه ها به وسیله یک عدد تغییر مکان سنج (LVDT) کنترل و ثبت شد. شکل ۷ دستگاه بارگذاری و ابزارآلات مورد استفاده در آزمایشگاه را به دو صورت واقعی و شماتیک نشان می دهد. تیرهای بتنی توسط دستگاه بارگذاری دو نقطه ای که به صورت مستقیم روی وجه فشاری تیر قرار داشتند مورد آزمایش قرار گرفتند.

جدول ۳. جزئیات نام گذاری نمونه های آزمایشگاهی  
**Table. 3. Nomenclature of experimental specimens**

ردیف	گروه	نام نمونه	سطح خوردگی	نوع الیاف
1	A	NC	0%	بدون الیاف
2	A	SF	0%	فلزی قلابدار
3	A	PF	0%	پلیمری ماکرو
4	B	NC-C1	5%	بدون الیاف
5	B	SF-C1	5%	فلزی قلابدار
6	B	PF-C1	5%	پلیمری ماکرو
7	C	NC-C2	7.2%	بدون الیاف
8	C	SF-C2	7.2%	فلزی قلابدار
9	C	PF-C2	7.2%	پلیمری ماکرو



(ب)



(الف)

شکل ۷. برپایش آزمایشگاهی  
 الف) بارگذاری و ابزاربندی آزمایش در آزمایشگاه ب) ابزار بندی شماتیک دستگاه آزمایش خمشی

**Fig. 7. Details of test setup**

a) Loading and instrumentation of specimens b) Schematic view of instrumentation of specimens

جدول ۴. مقایسه نتایج حاصل از رابطه فارادی و آزمایش برای دو سطح خوردگی  
**Table. 4. Comparison of the results of Faraday relation and experiment for two levels of corrosion**

سطح خوردگی	وزن اولیه فولاد (گرم)	وزن فولاد پس از خوردگی (گرم)	خوردگی تجربی	خوردگی از رابطه فارادی	اختلاف تئوری با آزمایش
یک	12725	12088	5%	7%	2%
دو	12725	11809	2.7%	10%	8.2%



قائم در قسمت تحتانی تیر و در بار ۴۴ کیلونیوتن رخ داد و در ادامه و در بار ۸۰-۶۰ کیلونیوتن اولین ترک های مورب در قسمت میانی تیر مشاهده گردید و در نهایت در بار ۱۱۳ کیلو نیوتن به گسیختگی نهایی رسید. همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می شود، در نمونه NC-C۲ اولین ترک ها در ۵۰ ثانیه اول و به صورت ترک های قائم در قسمت تحتانی تیر و در بار ۱۷ کیلونیوتن رخ داد و در نهایت در بار ۹۲ کیلو نیوتن به گسیختگی نهایی رسید.

### ۳-۳-۳- نتایج آزمایش آزمایش خمشی و مقایسه عملکرد نمونه های با الیاف

#### ۳-۳-۱- مقایسه نمونه های با الیاف و بدون الیاف در سطح خوردگی %

تیرهای بدون خوردگی گروه A، در سه گروه نمونه بدون الیاف، نمونه با الیاف فلزی قلابدار و نمونه با الیاف پلیمری ماکرو با درصد حجمی ۰/۵ مورد آزمایش قرار گرفتند تا تاثیر هر کدام از الیاف بر رفتار سازه ای تیرها به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گیرد. شکل ۱۴ نمودار بار-تغییر مکان را برای نمونه های مختلف بتنی و با خوردگی %۰ نشان می دهد و شکل ۱۵ شمایی از مود نهایی گسیختگی نمونه های گروه A را نشان می دهد. مکانیزم خرابی در نمونه های بدون خوردگی همانطور که با مشاهده الگوی ترک ها در شکل ۱۵ مشخص است در خصوص نمونه بدون الیاف با ترک های با عمق بیشتر می باشد و در خصوص نمونه های با الیاف با هر دو نوع الیاف فلزی قلابدار و پلیمری ماکرو با افزایش بار به صورت ترک های

نتایج آزمایشگاهی تفاوت وجود دارد. و همانطور که مشاهده می شود قانون فارادی برای نمونه های با ابعاد بزرگ دارای خطای تا حدود ۲-۳٪ می باشد [۱۸].

### ۳-۲- نتایج و مشاهدات آزمایشگاهی تست خمشی برای نمونه های بدون الیاف

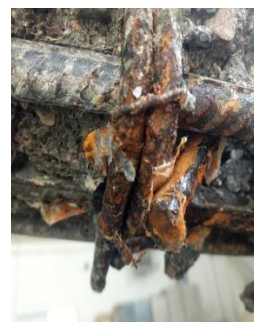
همانطور که در نام گذاری جدول شماره ۳ مشاهده می شود، نمونه های آزمایشگاهی NC و NC-C۱ و NC-C۲ نمونه های بدون الیاف و با بتن معمولی هستند. مطابق مشاهدات آزمایشگاهی در نمونه های بتن معمولی در سطح یک خوردگی، خوردگی معطوف به میلگردهای عرضی بوده ولی در سطح دو خوردگی هم میلگردهای طولی و هم میلگردهای عرضی درگیر خوردگی بودند. نمودار بار-تغییر مکان و شمایی از مود نهایی گسیختگی نمونه ها در شکل های ۹ و ۱۰ آورده شده است. مکانیزم خرابی در نمونه های بدون الیاف همانطور که با مشاهده ترک ها در شکل ۱۰ مشخص است در خصوص بتن بدون خوردگی با ترک های کم عمق تر می باشد و هرچه درصد خوردگی بالاتر رفته عمق ترک ها بیشتر شده است. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می شود، در نمونه NC اولین ترک ها در ۱۵۰ ثانیه اول و به صورت ترک های قائم در قسمت تحتانی تیر و در بار ۵۵ کیلونیوتن رخ داد و در ادامه و در بارهای ۹۰-۸۰ کیلونیوتن اولین ترک های مورب در قسمت میانی تیر مشاهده گردید و در نهایت در بار ۱۱۴ کیلو نیوتن به گسیختگی نهایی رسید. مطابق شکل ۱۲ در نمونه NC-C۱ اولین ترک ها در ۹۰ ثانیه اول و به صورت ترک های



(ج)



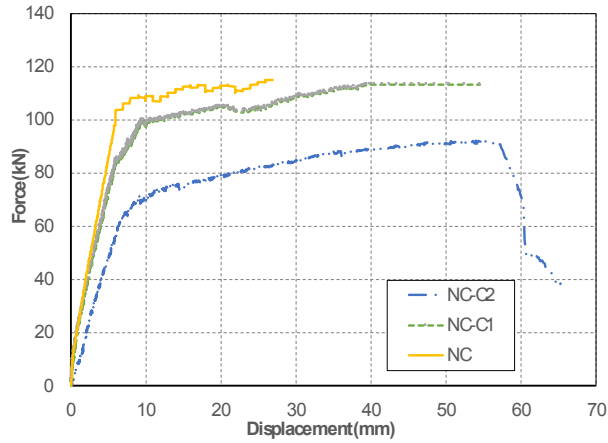
(ب)



(الف)

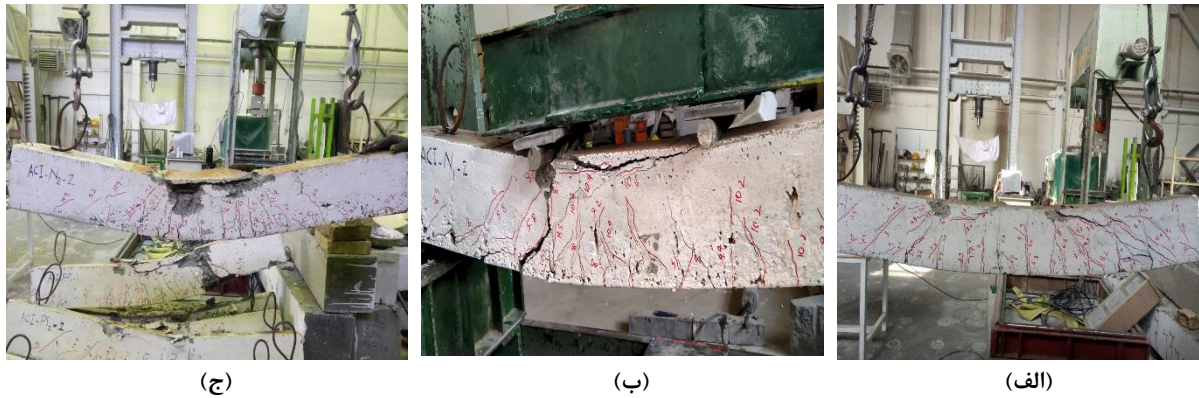
شکل ۸. نحوه خوردگی ایجاد شده در تیرهای آزمایشگاهی  
 (الف) خوردگی در خاموت ها پس از تخریب بتن تیرها (ب) محصولات خوردگی بر روی سطح خارجی تیرها (ج) خوردگی ایجاد شده در سطح زیرین تیر  
 Fig. 8.view of corrosion in experimental specimens

a) Corrosion in stirrup b) Corrosion products on the outer surface of the beams c) Corrosion at the bottom of the beam



شکل ۹. نمودار بار-تغییر مکان برای تیرهای بدون خوردگی و با خوردگی ۵٪ و ۷٫۲٪ با درصد الیاف ۰٪

Fig. 9. Load-displacement curve of corroded (5% & 7.2%) and non-corroded beams without fiber



شکل ۱۰. مود نهایی گسیختگی نمونه های بدون الیاف در سطوح مختلف خوردگی (الف) نمونه NC (ب) نمونه NC-C1 (ج) نمونه NC-C2

Fig. 10. Final failure pattern of specimens at different levels of corrosion  
a) Specimen NC b) Specimen NC-C1 c) Specimen NC-C2



شکل ۱۲. ترکهای ایجاد شده در نمونه بدون الیاف و با خوردگی سطح یک (NC-C1)

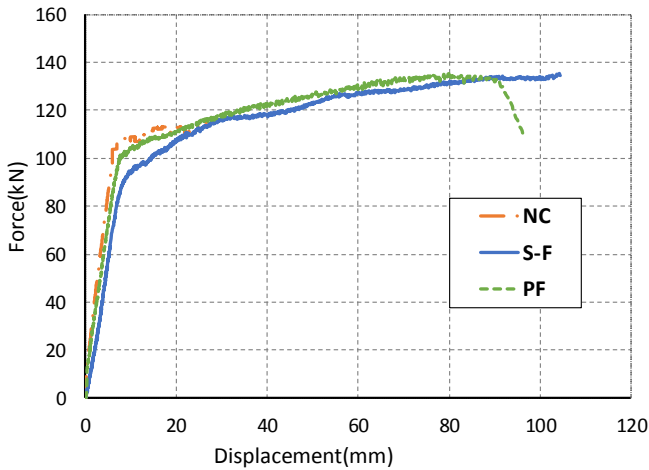
Fig. 12. Crack pattern in Specimen NC-C1



شکل ۱۱. ترک های ایجاد شده در نمونه بدون الیاف و بدون خوردگی (NC)

Fig. 11. Crack pattern in Specimen NC





شکل ۱۴. نمودار بار-تغییر مکان تیرهای بدون خوردگی (گروه A)

**Fig. 14. Load-displacement curve of non-corroded beams (Group A)**

در قسمت تحتانی تیر و در بار ۳۰ کیلونیوتن رخ داد و در ادامه و با افزایش بارگذاری ترک های ریز و با عمق کم شکل گرفتند و در بار ۷۰-۵۰ کیلونیوتن اولین ترک های 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 خصوص مقایسه ای الگوی ترک در نمونه های گروه A می توان به کاهش عمق ترک ها در نمونه های یافی و ایجاد ترک های جدید به جای افزایش عمق ترک های پیشین به علت خاصیت پل زدن یاف اشاره کرد.

۳-۳-۲- مقایسه نمونه های با یاف و بدون یاف در سطح خوردگی ۵٪

تیرهای با خوردگی پنج درصد گروه B، در سه گروه نمونه بدون



شکل ۱۳. ترک های ایجاد شده در نمونه بدون یاف و با خوردگی سطح دو (NC-C2)

**Fig. 13. Crack pattern in Specimen NC-C2**

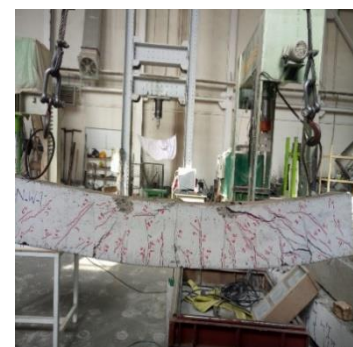
بیشتر و با عمق کمتر می باشد. همانطور که در شکل ۱۶ مشاهده می شود، در نمونه NC اولین ترک ها در ۱۵۰ ثانیه اول و به صورت ترک های قائم در قسمت تحتانی تیر و در بار ۵۵ کیلونیوتن رخ داد و در ادامه و در بارهای ۹۰-۸۰ کیلونیوتن اولین ترک های مورب در قسمت میانی تیر مشاهده گردید و با ادامه بارگذاری عمق ترک های ایجاد شده قبلی بیشتر شده در نهایت در بار ۱۱۴ کیلونیوتن به گسیختگی نهایی رسید. مطابق شکل ۱۷ در نمونه SF اولین ترک ها در ۱۰۰ ثانیه اول و به صورت ترک های قائم در قسمت تحتانی تیر و در بار ۲۴ کیلونیوتن رخ داد و در ادامه و با افزایش بارگذاری ترک های ریز و با عمق کم شکل گرفتند و در بار ۷۰-۵۰ کیلونیوتن اولین ترک های 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. همانطور که در شکل ۱۸ مشاهده می شود، در نمونه ی PF اولین ترک ها در ۱۰۰ ثانیه اول و به صورت ترک های قائم



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۱۵. مود نهایی گسیختگی نمونه های گروه A (نمونه های بدون خوردگی) الف) نمونه NC ب) نمونه SF ج) نمونه PF

**Fig. 15. Final failure pattern of specimens at Group A**  
a) Specimen NC b) Specimen SF c) Specimen PF



شکل ۱۷. ترک های ایجاد شده در نمونه با الیاف فلزی قلابدار و بدون خوردگی (SF)

Fig. 17. Crack pattern in Specimen SF

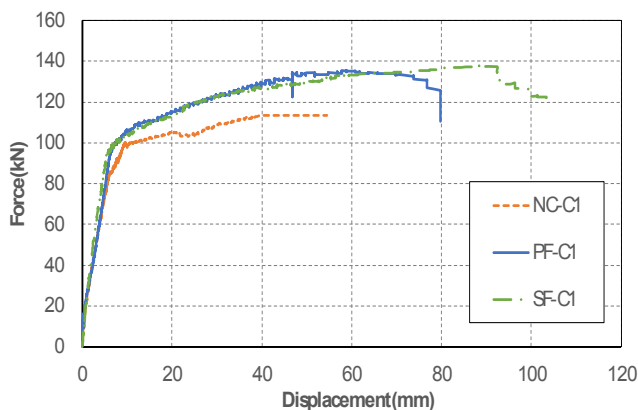


شکل ۱۶. ترک های ایجاد شده در نمونه بدون الیاف و بدون خوردگی (NC)

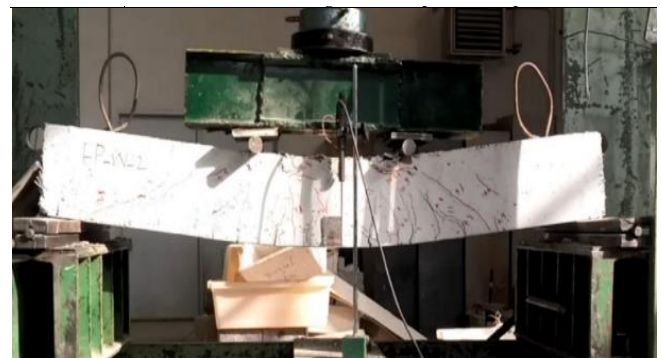
Fig. 16. Crack pattern in Specimen NC

ترک ها در ۹۰ ثانیه اول و بصورت ترک های قائم در قسمت تحتانی تیر و در بار ۴۴ کیلونیوتن رخ داد و در ادامه و با افزایش بارگذاری ترک های ریز و با عمق کم شکل گرفتند و در بار ۷۰-۵۰ کیلونیوتن اولین ترک های 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. همانطور که در شکل ۲۳ مشاهده می شود، در نمونه PF-C۱ اولین ترک ها در ۱۰۰ ثانیه اول و به صورت ترک های قائم در قسمت تحتانی تیر و در بار ۲۵ کیلونیوتن رخ داد و در ادامه و با افزایش بارگذاری ترک های ریز و با عمق کم شکل گرفتند و در بار ۷۰-۵۰ کیلونیوتن اولین ترک های 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 خصوص مقایسه الگوی ترک در نمونه های گروه B و گروه A می توان به افزایش عمق ترک در نمونه بدون الیاف و با خوردگی سطح

الیاف، نمونه با الیاف فلزی قلابدار و نمونه با الیاف پلیمری ماکرو با درصد حجمی ۰.۵ مورد آزمایش قرار گرفتند تا تاثیر هر کدام از الیاف بر رفتار سازه ای تیرها به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گیرد. شکل ۱۹ نمودار بار-تغییر مکان را برای نمونه های مختلف بتنی و با خوردگی ۵٪ نشان می دهد و شکل ۲۱ شمایی از مود نهایی گسیختگی نمونه های گروه B را نشان می دهد. مکانیزم خرابی در نمونه های بدون خوردگی همانطور که با مشاهده الگوی ترک ها در شکل ۲۰ مشخص است در خصوص نمونه بدون الیاف با ترک های با عمق بیشتر می باشد و در خصوص نمونه های با الیاف با هر دو نوع الیاف فلزی قلابدار و پلیمری ماکرو با افزایش بار به صورت ترک های بیشتر و با عمق کمتر می باشد. همانطور که در شکل ۲۱ مشاهده می شود، در نمونه NC-C۱ اولین ترک ها در ۹۰ ثانیه اول و بصورت ترک های قائم در قسمت تحتانی تیر و در بار ۴۴ کیلونیوتن رخ داد و در ادامه و در بار ۸۰-۶۰ کیلونیوتن اولین ترک های مورب در قسمت میانی تیر مشاهده گردید و در نهایت در بار ۱۱۳ کیلونیوتن به گسیختگی نهایی رسید. مطابق شکل ۲۲ در نمونه SF-C۱ اولین



شکل ۱۹. نمودار بار-تغییر مکان تیرهای با خوردگی ۵٪ (گروه B)  
Fig. 19. Load-displacement curve of corroded beams (5%) (Group B)



شکل ۱۸. ترک های ایجاد شده در نمونه با الیاف پلی پروپیلن و بدون خوردگی (PF)

Fig. 18. Crack pattern in Specimen PF





(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۲۰. نمود نهایی گسیختگی نمونه های گروه B  
الف) نمونه NC-C1 ب) نمونه SF-C1 ج) نمونه PF-C1

Fig. 20. Final failure pattern of specimens at Group B  
a) Specimens NC-C1 b) Specimens SF-C1 c) Specimens PF-C1



شکل ۲۳. ترک های ایجاد شده در نمونه با الیاف فلزی قلابدار و با خوردگی سطح یک (PF-C1)

Fig. 23. Crack pattern in Specimen PF-C1



شکل ۲۱. ترک های ایجاد شده در نمونه بدون الیاف و با خوردگی سطح یک (NC-C1)

Fig. 21. Crack pattern in Specimen NC-C1

یک NC-C1 نسبت به نمونه NC اشاره کرد اما در نمونه های الیافی با خوردگی سطح یک نسبت به نمونه ی بدون خوردگی و بدون الیاف NC ترک های با عمق کمتری داشته ایم، کاهش عمق ترک ها در نمونه های الیافی و ایجاد ترک های جدید به جای افزایش عمق ترک های پیشین به علت خاصیت پل زدن الیاف می باشد.

### ۳-۳-۳- مقایسه نمونه های با الیاف و بدون الیاف در سطح خوردگی ۷/۲٪

تیرهای با خوردگی هفت و دو دهم درصد گروه C، در سه گروه نمونه بدون الیاف، نمونه با الیاف فلزی قلابدار و نمونه با الیاف پلیمری ماکرو با درصد حجمی ۰.۵ مورد آزمایش قرار گرفتند تا تاثیر هر کدام از الیاف بر رفتار سازه ای تیرها به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گیرد. شکل ۲۴ نمودار بار-تغییر مکان را برای نمونه های مختلف بتنی



شکل ۲۲. ترک های ایجاد شده در نمونه با الیاف فلزی قلابدار و با خوردگی سطح یک (SF-C1)

Fig. 22. Crack pattern in Specimen SF-C1



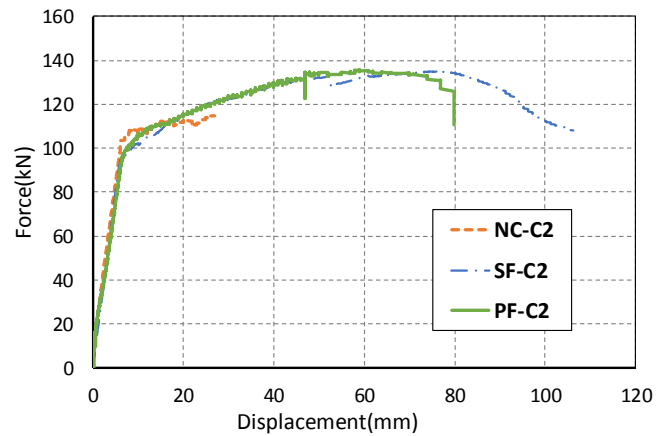
رخ داد و در ادامه و با افزایش بارگذاری ترک های ریز و با عمق کم شکل گرفتند و در بار ۶۰-۵۰ کیلونیوتن اولین ترک های مورب با شروع از قسمت تحتانی تیر و ادامه یافتن تا قسمت میانی تیر مشاهده گردید و در نهایت در بار ۱۳۴ کیلو نیوتن به گسیختگی نهایی رسید. همانطور که در شکل ۲۸ مشاهده می شود در نمونه PF-C۲ اولین ترک ها در ۱۰۰ ثانیه اول و بصورت ترک های قائم در قسمت تحتانی تیر و در بار ۲۳ کیلونیوتن رخ داد و در ادامه و با افزایش بارگذاری ترک های ریز و با عمق کم شکل گرفتند و در بار ۵۰-۶۰ کیلونیوتن اولین ترک های مورب با شروع از قسمت تحتانی تیر و ادامه یافتن تا قسمت میانی تیر مشاهده گردید و در نهایت در بار ۱۳۵ کیلو نیوتن به گسیختگی نهایی رسید. در خصوص مقایسه الگوی ترک در نمونه های گروه B و گروه A می توان به افزایش عمق ترک در نمونه های بدون یاف و با خوردگی سطح یک و دو نسبت به نمونه NC اشاره کرد، اما در نمونه های الیافی با خوردگی سطح یک و حتی سطح دو نسبت به نمونه بدون خوردگی و بدون الیاف NC ترک های با عمق کمتری داشته ایم، کاهش عمق ترک ها در نمونه های الیافی و ایجاد ترک های جدید به جای افزایش عمق ترک های پیشین به علت خاصیت پل زدن الیاف می باشد.

#### ۴-تفسیر نتایج آزمایشگاهی

##### ۴-۱-دوخطی کردن منحنی های بار تغییرمکان نمونه های

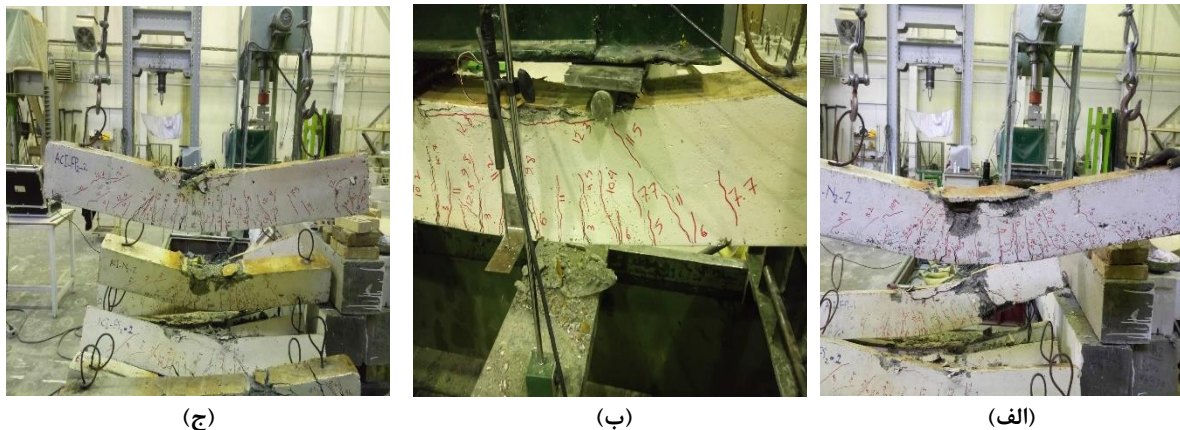
##### آزمایشگاهی

در این بخش، برای بیان مشخصات رفتاری تیرهای خمشی



شکل ۲۴. نمودار بار-تغییرمکان تیرهای با خوردگی ۲/۷٪ (گروه C)  
Fig. 24. Load-displacement curve of corroded beams (7.2%) (Group C)

و با خوردگی ۵٪ نشان می دهد و شکل ۲۵ شمایی از مود نهایی گسیختگی نمونه های گروه C را نشان می دهد. مکانیزم خرابی در نمونه های بدون خوردگی همانطور که با مشاهده الگوی ترک ها در شکل ۲۵ مشخص است در خصوص نمونه بدون الیاف با ترک های با عمق بیشتر می باشد و در خصوص نمونه های با الیاف با هر دو نوع الیاف فلزی قلابدار و پلیمری ماکرو با افزایش بار به صورت ترک های بیشتر و با عمق کمتر می باشد. همانطور که در شکل ۲۶ مشاهده می شود، در نمونه NC-C۲ اولین ترک ها در ۵۰ ثانیه اول و بصورت ترک های قائم در قسمت تحتانی تیر و در بار ۱۷ کیلونیوتن رخ داد و در نهایت در بار ۹۲ کیلو نیوتن به گسیختگی نهایی رسید. مطابق شکل ۲۷ در نمونه SF-C۲ اولین ترک ها در ۹۰ ثانیه اول و به صورت ترک های قائم در قسمت تحتانی تیر و در بار ۲۴ کیلونیوتن



شکل ۲۵. مود نهایی گسیختگی نمونه های گروه C  
الف) نمونه NC-C2 ب) نمونه SF-C2 ج) نمونه PF-C2

Fig. 25. Final failure pattern of specimens at Group C  
a) Specimens NC-C2 b) Specimens SF-C2 c) Specimens PF-C2



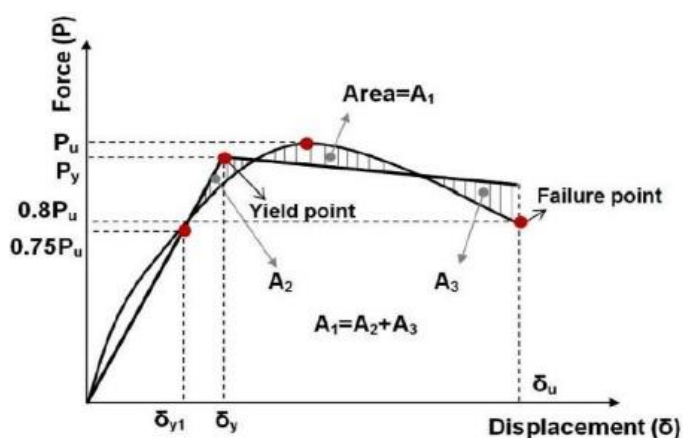
شکل ۲۷. ترک های ایجاد شده در نمونه با الیاف فلزی قلابدار و با خوردگی سطح دو (SF-C2)

Fig. 27. Crack pattern in Specimen SF-C2



شکل ۲۶. ترک های ایجاد شده در نمونه بدون الیاف و با خوردگی سطح دو (NC-C2)

Fig. 26. Crack pattern in Specimen NC-C2



شکل ۲۹. نقاط مشخصه در نمودار بار- تغییر مکان پاولی و پریستلی  
Fig. 29. Characteristic points on force-displacement curve

افت نموده است، برقرار گردد. نحوه ایده آل سازی منحنی های پوش بار-تغییر مکان در شکل ۲۹ نشان داده شده است.

بر اساس منحنی ایده آل شده دو خطی منحنی بار-تغییر مکان می توان مشخصات لرزه ای نمونه های آزمایشگاهی تیر خمشی شامل سختی، مقاومت و شکل پذیری که مشخص کننده رفتار لرزه ای یک عضو بتنی مسلح است را مطابق زیر محاسبه نمود. سختی موثر نمونه ای آزمایشگاهی برابر با سختی سکانت نقطه تسلیم نمونه می باشد. به عبارت دیگر سختی موثر برابر است با شیب خط منحنی نیرو تغییر مکان که مبداء را به نقطه ۷۵٪ ماکزیمم بار در روی منحنی بار-تغییر مکان وصل می نماید.

مقاومت جاری شدن عضو برابر با مقاومت تسلیم تیر خمشی می باشد. بدین صورت که از مبداء به نقطه ۷۵٪ ماکزیمم بار در روی منحنی بار-تغییر مکان وصل سپس تا خط افقی متناظر با حداکثر



شکل ۲۸. ترک های ایجاد شده در نمونه با الیاف فلزی قلابدار و با خوردگی سطح دو (PF-C2)

Fig. 28. Crack pattern in Specimen PF-C2

بر اساس منحنی های آزمایشگاهی نیرو-تغییر مکان به دست آمده در بخش قبل، ایده آل سازی منحنی پوش بر اساس روش ارائه شده توسط پاولی<sup>۱</sup> و پریستلی<sup>۲</sup> ارائه می شود. لازم به ذکر است که برای شبیه سازی عددی رفتار اعضای بتن مسلح، لازم است که نتایج بار-تغییر مکان آزمایش ها به مدل های ایده آل شده و نسبتاً ساده تبدیل شود. در مدل دوخطی (شکل ۲۹) ارائه شده توسط پاولی و پریستلی یک شاخه کاملاً الاستیک و یک شاخه بعد از الاستیک طراحی می گردد. مطابق شکل ۲۹، شاخه الاستیک دارای ضریب زاویه از مبدا تا محلی است که بطور تقریب ۷۵٪ ماکزیمم بار در روی منحنی را قطع می کند و تا شاخه دوم منحنی ادامه می یابد. شاخه بعد از الاستیک به گونه ای ترسیم می گردد که بالانس انرژی در دو طرف منحنی پوش، از نقطه جاری شدن عضو تا محلی که بار جانبی به اندازه ی ۲۰٪

1 Paulay  
2 Priestley

یک حداکثر مقاومت نسبت به نمونه بدون خوردگی تغییر چندانی نداشته است و از ۱۱۴/۵ کیلونیوتن به ۱۱۳/۲ کیلونیوتن رسیده است. اما با افزایش میزان خوردگی مشاهده می گردد که نمونه NC-C<sub>2</sub> با سطح دو خوردگی افت مقاومت قابل توجه تری نسبت نمونه های NC و NC-C<sub>1</sub> داشته است. لازم به ذکر است نمونه NC-C<sub>2</sub> پایین ترین ظرفیت باربری و شکل پذیری را در میان هر نه نمونه مورد آزمایش داشته است. همانطور که از نتایج جدول ۵ مشخص است شکل پذیری نمونه های بدون الیاف با افزایش درصد خوردگی کاهش یافته است. نمونه NC-C<sub>1</sub> حدود ۱۳ درصد و نمونه NC-C<sub>2</sub> حدود ۲۱ درصد نسبت به نمونه NC کاهش شکل پذیری داشته اند.

#### ۴-۲-۲- مقایسه شکل پذیری و حداکثر مقاومت نمونه های با الیاف و بدون الیاف در سطح خوردگی ۰٪.

تیرهای بدون خوردگی گروه A، در سه گروه نمونه بدون الیاف، نمونه با الیاف فلزی قلابدار و نمونه با الیاف پلیمری ماکرو با درصد حجمی ۰/۵ مورد آزمایش قرار گرفتند تا تاثیر هر کدام از الیاف بر رفتار سازه ای تیرها به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گیرد. شکل ۱۵ نمودار بار-تغییر مکان را برای نمونه های مختلف بتنی و با خوردگی ۰٪ نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود حضور الیاف فلزی قلابدار و پلیمری ماکرو تاثیر کمتری در افزایش ظرفیت باربری نمونه ها داشته اما شکل پذیری را به طور چشمگیری افزایش داده است به صورتی که ظرفیت باربری حدود ۲۰ کیلونیوتن و شکل پذیری با استفاده از الیاف فلزی قلابدار و پلیمری ماکرو به میزان

مقاومت عضو امتداد داده می شود. همانطور که در شکل ۲۹ نشان داده شده است محل بر خورد خط سختی سکانتی با خط افقی حداکثر مقاومت مشخص کننده تغییر مکان تسلیم نمونه می باشد. تغییر شکل متناظر با ۲۰٪ افت در مقاومت نمودار بار-تغییر مکان، یا تخریب هسته بتن و یا کمانش یکی از میلگردها هر کدام که زودتر اتفاق بیافتد به عنوان تغییر شکل نهایی نمونه آزمایشگاهی در نظر گرفته می شود. مشخصه شکل پذیری توانایی یک سازه و مولفه های سازه ای آن در تغییر شکل بعد از حد الاستیک بدون کاهش یا افزایش شدید مقاومت یا کاهش سختی معنی می شود. ضریب شکل پذیری مقطع نسبت تغییر مکان نهایی به تغییر مکان تسلیم نمونه خمشی می باشد. منحنی های بار-تغییر مکان نمونه های آزمایشگاهی به روش پائولی-پرایستلی دوخطی شدند. نتایج حاصل از دوخطی کردن نمودارها در جدول ۵ ارائه شده است.

#### ۴-۲-۲- مقایسه شکل پذیری و حداکثر مقاومت نمونه های آزمایشگاهی

#### ۴-۲-۱- مقایسه شکل پذیری و حداکثر مقاومت برای نمونه های بدون الیاف

نتایج آزمایشگاهی حاصل از تست خمشی که به صورت خلاصه در جدول ۵ و شکل ۱۰ آورده شده است نتایج حاصل از بارگذاری و جابجایی وسط دهانه را برای نمونه های خورده شده و خورده نشده بدون الیاف نشان می دهد.

برای نمونه های بتن معمولی، ظرفیت باربری و شکل پذیری با افزایش درصد خوردگی کاهش یافته است. در نمونه با خوردگی سطح

جدول ۵. نتایج آزمایشگاهی نمونه های مختلف

Table. 5. Results of experimental specimens

گروه	نام نمونه	نوع الیاف	سطح خوردگی(درصد)	حداکثر مقاومت (kN)	جابجایی تسلیم (mm)	جابجایی نهایی (mm)	شکل پذیری(μ)
گروه A	NC	بدون الیاف	0%	5.114	5.6	9.26	1.4
	SF	فلزی قلابدار	0%	0.134	3.11	0.105	2.9
	PF	پلیمری ماکرو	0%	0.134	5.10	0.97	2.9
گروه B	NC-C <sub>1</sub>	بدون الیاف	5%	2.113	0.15	5.54	6.3
	SF-C <sub>1</sub>	فلزی قلابدار	5%	0.134	4.8	4.67	0.8
	PF-C <sub>1</sub>	پلیمری ماکرو	5%	0.135	0.11	0.95	6.8
گروه C	NC-C <sub>2</sub>	بدون الیاف	2.7%	0.92	5.12	0.41	2.3
	SF-C <sub>2</sub>	فلزی قلابدار	2.7%	0.134	0.15	0.106	0.7
	PF-C <sub>2</sub>	پلیمری ماکرو	2.7%	0.135	0.10	0.80	0.8



خوردگی سطح یک بر ظرفیت باربری می توان دید که در مقایسه نمونه بدون الیاف در هر دو گروه کاهش ظرفیت باربری را با توجه به خوردگی مشاهده کرد اما در نمونه های الیافی در ظرفیت باربری تغییر محسوسی رخ نداده است.

#### ۴-۲-۴- مقایسه شکل پذیری و حداکثر مقاومت نمونه های با الیاف و بدون الیاف در سطح خوردگی ۷/۲٪

نمودار شکل ۲۵ نتایج حاصل از بارگذاری و جابجایی وسط دهانه برای نمونه های گروه C را نشان می دهد. کاهش ظرفیت باربری در خصوص نمونه بدون الیاف NC-C<sub>۲</sub> نسبت به نمونه NC بسیار بیشتر و محسوس تر می باشد اما در خصوص نمونه های الیافی SF-C<sub>۲</sub> و PF-C<sub>۲</sub> افت ظرفیت باربری نسبت به نمونه های بدون خوردگی گروه A دیده نمی شود. شکل پذیری نمونه های گروه C نسبت به نمونه مشابه در گروه B و A کاهش داشته، اما شکل پذیری نمونه های الیافی SF-C<sub>۲</sub> و PF-C<sub>۲</sub> با خوردگی سطح ۲ نسبت به نمونه NC همچنان بسیار بیشتر و به ترتیب ۱/۷ و ۱/۹۳ برابر و نسبت به NC-C<sub>۱</sub> به ترتیب ۱/۹۴ و ۲/۲ برابر و نسبت به NC-C<sub>۲</sub> به ترتیب ۲/۱۵ و ۲/۴۳ برابر می باشد. در اینجا می توان تاثیر چشمگیر الیاف بر افزایش شکل پذیری نمونه ها را مشاهده کرد. لازم به ذکر است همانطور که در نتایج جدول ۲ مشاهده می شود با افزایش درصد خوردگی، شاهد کاهش شکل پذیری کمتری از نمونه های با الیاف پلیمری ماکرو نسبت به الیاف فلزی قلابدار بوده ایم به صورتی که نمونه فلزی قلابدار SF-C<sub>۲</sub> افت ۲۴ درصدی شکل پذیری نسبت به نمونه SF و نمونه پلیمری ماکرو PF-C<sub>۲</sub> افت ۱۴ درصدی نسبت به نمونه PF داشته است. در خصوص مکانیزم خرابی تیرهای گروه C، همانطور که در شکل ۲۶ مشاهده می گردد با افزایش بارگذاری در نمونه های الیافی شاهد ایجاد ترک های با عمق کم و در ناحیه کششی بودیم در حالیکه در نمونه NC-C<sub>۲</sub> با افزایش بارگذاری شاهد افزایش عمق ترک های ایجاد شده قبلی در تیر بودیم.

#### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، یک مطالعه آزمایشگاهی در خصوص بررسی تاثیر خوردگی آرماتور در رفتار تیرهای بتن الیافی با الیاف فلزی قلابدار و پلیمری ماکرو صورت گرفت. با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی،

۲/۲۳ برابر افزایش یافته است. هر دو نوع الیاف پلیمری ماکرو و فلزی قلابدار بر روی شکل پذیری و حداکثر مقاومت به صورت مشابه عمل کرده اند.

#### ۳-۲-۴- مقایسه شکل پذیری و حداکثر مقاومت نمونه های با الیاف و بدون الیاف در سطح خوردگی ۵٪

نمودار شکل ۲۰ نتایج حاصل از بارگذاری و جابجایی وسط دهانه برای نمونه های گروه B را نشان می دهد. تاثیر الیاف بر افزایش ظرفیت باربری تیرها در گروه B مشاهده می شود (البته این افزایش ظرفیت چندان زیاد نبوده است). هر دو نوع الیاف فلزی قلابدار و پلیمری ماکرو در خصوص تاثیر بر افزایش ظرفیت باربری به صورت مشابه عمل کرده اند. همانطور که در جدول ۵ و نمودار شکل ۱۵ مشاهده می شود مهم ترین تاثیر استفاده از الیاف را می توان در افزایش شکل پذیری دید به صورتی که استفاده از الیاف فلزی قلابدار شکل پذیری را به میزان ۲/۲ و استفاده از الیاف پلیمری ماکرو شکل پذیری را به میزان ۲/۳۸ برابر نسبت به نمونه بدون الیاف افزایش داده است. در میان نمونه های گروه B شکل پذیری نمونه های SF-C<sub>۱</sub> و PF-C<sub>۱</sub> که نمونه های با الیاف و با خوردگی ۵٪ هستند بسیار بیشتر از نمونه بدون الیاف و بدون خوردگی NC در گروه A می باشد. در مقایسه نمونه های با الیاف گروه B و A کاهش شکل پذیری در نمونه های دارای خوردگی سطح یک گروه B مشاهده می شود اما همچنان شکل پذیری بالا و حدود ۲ برابر نمونه بدون الیاف می باشد. و می توان نتیجه گرفت که الیاف پلیمری ماکرو در بالاترین میزان و پس از آن الیاف فلزی قلابدار ظرفیت برشی را افزایش داده اند و این موضوع را می توان با قابلیت انتقال تنش الیاف در خوردگی با سطوح پایین تر توضیح داد. الیاف در طول رفتار خمشی تیر با قابلیت انتقال تنش، از بزرگ شدن و عمیق شدن میکرو ترک های ایجاد شده در نتیجه ی افزایش حجم ناشی از خوردگی در نمونه های الیافی جلوگیری کرده است. همانطور که در شکل ۱۶ مشاهده می شود ترک های کششی بیشتری در ناحیه کششی تیرهای با الیاف نسبت به نمونه بدون الیاف مشاهده می شود و با افزایش بارگذاری در نمونه های الیافی شاهد ایجاد ترک های با عمق کم و در ناحیه کششی بودیم در حالیکه در نمونه NC-C<sub>۱</sub> با افزایش بارگذاری شاهد افزایش عمق ترک های ایجاد شده قبلی و شکسته شدن تیر بودیم. در خصوص تاثیر

- 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.
- [4] P.S. Song, S. Hwang, B.C. Sheu, Strength properties of nylon-and polypropylene-fiber-reinforced concretes, *Cem. Conc. Res.* 35 (8) (2005) 1546–1550.
- [5] J.R. Roesler, S.A. Altoubat, D.A. Lange, K.A. Rieder, G.R. Ulreich, Effect of synthetic fibers on structural behavior of concrete slabs-on-ground, *Mater. J.* 103 (1) (2006) 3–10.
- [6] J. Michels, D. Waldmann, S. Maas, A. Zürbes, Steel fibers as only reinforcement for flat slab construction— experimental investigation and design, *Constr. Build Mater.* 26 (1) (2012) 145–155.
- [7] J. Michels, R. Christen, D. Waldmann, Experimental and numerical investigation on postcracking behavior of steel fiber reinforced concrete, *Eng. Fract. Mech.* 98 (2013) 326–349.
- [8] P. Pujadas, A. Blanco, S. Cavalero, A. Aguado, Plastic fibres as the only reinforcement for flat suspended slabs: experimental investigation and numerical simulation, *Constr. Build. Mater.* 57 (2014) 92–104.
- [9] Imran I. Rosidawani, S. Sugiri, I. Pane, Behaviour of macro synthetic fiber reinforced concrete columns under concentric axial compression, *Proc. Eng* 125 (2015) 987–994.
- [10] A. Sofi, B.R. Phanikumar, An experimental investigation on flexural behaviour of fibre-reinforced pond ash-modified concrete, *Ain Shams Eng. J.* 6 (4) (2015) 1133–1142.
- [11] Y. Park, A. Abolmaali, J. Beakley, E. Attiogbe, Thin-walled flexible concrete pipes with synthetic fibers and reduced traditional steel cage, *Eng. Struct.* 100 (1) (2015) 731–741.
- [12] S. Spadea, I. Farina, A. Carrafiello, F. Fraternali, Recycled nylon fibers as cement mortar reinforcement, *Constr. Build. Mater.* 80 (2015) 200–2009.

مهم‌ترین نتیجه‌های حاصل از این مطالعه به صورت زیر بیان می‌گردد.

(۱) در خصوص ظرفیت باربری نمونه‌ها، افزایش مقاومت نهایی در نمونه‌های بدون الیاف و بدون خوردگی و با خوردگی سطح یک به کمک الیاف فلزی قلابدار و پلیمری ماکرو به صورت مشابه و به میزان کم و به میزان بیشتری در خصوص نمونه NC-C<sup>۲</sup> با خوردگی سطح دو در این مطالعه آزمایشگاهی مشاهده گردید.

(۲) با استفاده از الیاف، شکل پذیری به طور چشمگیری افزایش یافت و افزایش شکل پذیری در خصوص نمونه‌هایی که از الیاف پلیمری ماکرو در آن استفاده شده بود نسبت به نمونه‌هایی که از الیاف فلزی قلابدار در آن استفاده شده بود بیشتر مشاهده گردید.

(۳) با توجه به نتایج به دست آمده مشخص شد که عملکرد الیاف در خصوص بهبود شکل پذیری با افزایش درصد خوردگی محدود شده و کمتر گردیده است. با این وجود نمونه‌های خورده شده‌ای که توسط بتن الیافی ساخته شده اند حتی در بالاترین درصد خوردگی (۷/۲٪) نیز عملکرد بهتری در خصوص شکل پذیری نسبت به نمونه بدون الیاف و بدون خوردگی داشتند. مقاومت به دست آمده در نمونه‌های الیافی در برابر افزایش عمق ترک‌های ایجاد شده و در ناحیه کششی را می‌توان به دلیل خاصیت پل زدن الیاف‌ها در دو طرف ترک در نمونه‌های الیافی دانست که باعث پراکندگی و توزیع ترک‌ها در ناحیه خمشی تیرها شده است.

(۴) با توجه به دانسیته الیاف پلیمری ماکرو و در نتیجه نیاز به استفاده میزان کمتر از این الیاف در یک حجم مشخص نسبت به الیاف فلزی قلابدار (در این مطالعه در حجم مشخص ۰/۵٪) و در نتیجه بهبود کارایی بتن و اقتصادی تر بودن آن‌ها و همچنین عملکرد بهتر آنها در بهبود رفتار سازه‌ای تیرهای بتنی و خورده نشدن این الیاف به دلیل جنس آن‌ها در شرایط محیطی خورنده (زنگ زدگی در الیاف فلزی قلابدار پس از تخریب نمونه‌ها مشاهده گردید)، در مجموع می‌توان این الیاف را نسبت به الیاف فلزی قلابدار اقتصادی تر، با دوام بیشتر در شرایط محیطی خورنده و عملکرد سازه‌ای بهتر به ویژه در شکل پذیری نسبت به الیاف فلزی قلابدار معرفی کرد.

## مراجع

- [1] W. Zhu, R. François, Corrosion of the reinforcement and its influence on the residual structural



- rebar embedded in the fibers reinforced concrete ,  
construction and building materials 35 (2012) 564  
-570.
- [17] Ramezaniapour. A.A, et all. Labaratory study on  
the effect of polypropylene fiber on durability,  
and physical and mechanical characteristic of  
concrete for application in sleepers .Construction  
and building materials 44(2013)411-418 .
- [18] 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.
- [13] F. Fraternali, S. Spadea, V.P. Berardi, Effects of  
recycled PET fibres on the mechanical properties and  
seawater curing of Portland cement-based concretes,  
Constr. Build. Mater. 61 (2014) 293–302.
- [14] J.P. Won, D.H. Lim, C.G. Park, Bond behaviour and  
flexural performance of structural synthetic fibre-  
reinforced concrete, Mag. Concr. Res. 58 (6) (2006)  
401–410.
- [15] Sappakittipakorn. M, Banthia. N, corrosion of Rebar  
and Role of Fiber Reinforced, Journal of Testing and  
Evaluation, vol . 40, No .1, Available on line at : www.  
astm.org.
- [16] Kakooei. s, et all , The corrosion inverstigation of

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

*E. Rahimi, J. Shafaei, M. Esfahani, Experimental Evaluation of Structural Performance of FRC Beams with Hooked Metal and Macro Polymer Fibers at Different Levels of Reinforcement Corrosion, Amirkabir J. Civil Eng., 53(4) (2021): 1275-1294.*

DOI: [10.22060/ceej.2020.16735.6322](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.16735.6322)



