

تأثیر میزان خوردگی خاموت و میلگردهای کششی بر رفتار تیرهای بتن مسلح

یوسف نظام‌دوست^۱، محمود میری^{۲*} و حسین بهشتی‌نژاد^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

^۲ استاد گروه عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان

^۳ استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بیرجند

(دریافت: ۹۶/۷/۱۰، پذیرش: ۹۷/۴/۲۴، نشر آنلاین: ۹۷/۴/۲۴)

چکیده

اثر خوردگی میلگردهای داخل بتن بر مقاومت و رفتار سازه‌های بتن مسلح از نکات مهم در بهره‌برداری از این نوع سازه‌ها در مناطق با شرایط خوردندگی بالا است. در این مقاله تأثیر میزان خوردگی میلگرد کششی و خاموت بر رفتار و تیرهای بتن مسلح به صورت جداگانه و هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور ۲۰ عدد تیر بتن مسلح با ابعاد $150 \times 150 \times 1000$ mm ساخته شده و پس از نگهداری در شرایط موردنظر و در سنین یکسان مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. فاصله خاموت‌ها ۳/۵cm و ۷ بوده و اثر سطوح خوردگی ۵٪، ۱۰٪ و ۲۵٪ مدنظر قرار گرفته است. در طول مدت نگهداری و هم‌زمان با اعمال خوردگی، تیرها تحت بار سرویس ثابت قرار گرفته و پس از رسیدن به درصد خوردگی موردنظر، رفتار آن‌ها با آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای ارزیابی شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که میزان خوردگی بیش از ۱۰٪ نوع شکست نمونه‌ها را تغییر داده و در برخی موارد سبب تغییر رفتار از شکست برشی - خمشی به گسیختگی به دلیل از بین رفتن پیوستگی میلگرد و بتن شده است. شکست نمونه به دلیل از بین رفتن پیوستگی میلگرد و بتن در نمونه‌های با خوردگی خاموت در خوردگی ۲۵٪، در نمونه‌های با خوردگی میلگرد کششی در خوردگی ۲۵٪ برای فاصله خاموت ۷/۵cm و در نمونه‌های با خوردگی هم‌زمان خاموت و میلگرد کششی در خوردگی ۱۰٪ برای فاصله خاموت ۷/۵cm اتفاق افتاده است.

کلیدواژه‌ها: تیر بتن مسلح، خوردگی میلگرد، خوردگی خاموت، مقاومت برشی.

۱- مقدمه

در دو بخش کلی اثر رفتار بتن و مصالح بر خوردگی و دیگری اعمال خوردگی روی میلگردها و بررسی تأثیر آن بر سازه‌ها صورت گرفته است.

خزائنی و همکاران (۱۳۹۵) با بررسی اثر پومیس^۱ و متاکائولن^۲ بر دوام بتن و خوردگی میلگرد نشان دادند در نمونه‌های بتن مسلح حاوی ترکیب پومیس و متاکائولن واقع در محیط‌های خوردنده، زمان مشاهده اولین ترک در نمونه‌ها ۲۶٪ افزایش می‌یابد. علاوه بر آن در این نمونه‌ها ضریب نفوذپذیری یون کلراید تا ۲۸٪ کاهش یافت.

Valipour و همکاران (۲۰۱۴) نمونه‌های بتن مسلح با نسبت‌های مختلف آب به سیمان را در شرایط رطوبتی مختلف قرار دادند و با انجام آزمایشات گالوپالاس^۳، اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل نیم پیل، اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی و اندازه‌گیری جریان خوردگی ماکروپیل نشان دادند در شرایط پاشش سرعت خوردگی میلگرد در بتن بیشتر از شرایط دیگر است.

مسئله خوردگی میلگرد در بتن از معضلات عمده سازه‌های واقع شده در محیط‌های ساحلی و با خوردندگی بالا است، به‌گونه‌ای که همه‌ساله بایستی هزینه‌های زیادی صرف تعمیر و نگهداری سازه‌های آسیب‌دیده بر اثر خوردگی گردد. مسئله خوردگی میلگرد در بتن در کشور ما و به‌ویژه برای سازه‌های ساخته شده در سواحل خلیج فارس و حاشیه دریای عمان اهمیت و ضرورت زیادی داشته، و با توجه به برنامه‌های دولت برای توسعه زیرساخت‌های مناطق مذکور مطالعه در این خصوص اهمیت دوچندانی دارد. به همین لحاظ و به موازات تحقیقات انجام گرفته در سراسر دنیا در کشور ما نیز مطالعات زیادی در این خصوص صورت گرفته و حتی دستورالعمل‌هایی نیز برای کاهش اثرات ناشی از خوردگی پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به آیین‌نامه ملی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان (پیشنهادی) (پورخورشیدی و رضانیانپور، ۱۳۸۵) اشاره کرد. به‌طور کلی تحقیقات در این زمینه

3. Galvaplus

1. Pumice
2. Methacaolin

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۵۴-۳۳۴۴۷۰۹۶

آدرس ایمیل: yusof.nezamdust@gmail.com (ی. نظام‌دوست)، mmiri@eng.usb.ac.ir (م. میری)، civileng_78@yahoo.com (ح. بهشتی‌نژاد).

میلگردها نیز می‌تواند مد شکست اعضا را تغییر دهد که مشکلات ایمنی سازه‌ها را به دنبال دارد.

Xia و همکاران (۲۰۱۱) با بررسی رفتار برشی ۱۸ عدد تیر بتن مسلح با ابعاد $120 \times 230 \times 120$ mm، فاصله خاموت‌های مختلف و درصد خوردگی‌های متفاوت به این نتیجه رسیدند که در نمونه‌های با فاصله خاموت کم، در تمامی درجات خوردگی شکست تیر به هنگام گسیختگی خاموت‌ها اتفاق می‌افتد. لیکن در نمونه‌های با فاصله خاموت زیاد شکست تیر در سطوح خوردگی کم، ناشی از تخریب بتن و در سطوح خوردگی بالا، ناشی از گسیختگی خاموت‌ها است.

Dong و همکاران (۲۰۱۱) نیز تأثیر فاصله خاموت‌ها و عملکرد تکیه‌گاهی بر روی مقاومت باقی‌مانده تیرهای خورده شده را مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور تعداد ۱۹ نمونه تیر با ابعاد $200 \times 240 \times 210$ mm با میلگردگذاری مختلف ساخته و تحت آزمایش قرار دادند. نتایج آزمایشات نشان داد که با افزایش درجه خوردگی، به دلیل کاهش پیوستگی میلگرد اصلی و خاموت عرض ترک‌ها افزایش یافته و مد شکست نمونه‌ها به درجه خوردگی میلگردها مرتبط است.

Xue و همکاران (۲۰۱۴) با بررسی رفتار برشی ۱۳ نمونه تیر بتنی با ابعاد $120 \times 240 \times 140$ mm با خاموت خورده شده دریافتند که هر چه فاصله خاموت‌ها کمتر باشد، خوردگی خاموت تأثیر بیشتری در تغییر شکل نهایی تیر داشته و این تأثیر در درجات خوردگی کم، بیشتر است.

Xu و همکاران (۲۰۱۷) هم با بررسی ۲۱ تیر بتن مسلح با ابعاد $120 \times 150 \times 140$ mm با درجات مختلف خوردگی خاموت نشان دادند که خوردگی سبب کاهش ظرفیت قفل‌شدگی بین سنگ‌دانه‌های بتن شده و همچنین شکل‌پذیری و ظرفیت برشی اعضای خمشی را کاهش می‌دهد. به علاوه ترک‌های ناشی از خوردگی خاموت‌ها در ناحیه برشی سبب کاهش ظرفیت برشی تیرها گردید. مد خرابی تیرها نیز به مقدار درجه خوردگی و نسبت دهانه برشی به ارتفاع مقطع مؤثر تیر ارتباط داشت.

Wang و همکاران (۲۰۱۵) با ساخت و نگهداری ۱۴ عدد تیر بتن مسلح در شرایط خوردگی تسریع شده تأثیر خوردگی خاموت بر رفتار برشی تیرهای بتن مسلح را مورد بررسی قرار دادند. در برخی از تیرها میلگرد طولی به صورت هم‌زمان تحت خوردگی قرار گرفت. فاصله خاموت‌ها در کلیه تیرها برابر نصف ارتفاع مؤثر مقطع در نظر گرفته شده بود. نتایج نشان داد که خوردگی کمتر از ۱۰٪ در خاموت‌ها تأثیر کمی بر کاهش مقاومت برشی تیرها دارد؛ لیکن در درجات خوردگی بالاتر، کاهش مقاومت برشی چشمگیر بود.

میری و سارانی (۱۳۹۳) با انجام آزمایش بر روی نمونه‌های بتنی خود تراکم حاوی پومیس و زئولیت^۴ نشان دادند استفاده از ترکیب پومیس و زئولیت می‌تواند سبب کاهش ۲۳٪ جذب آب، ۵۵٪ نفوذ آب و ۴۰٪ مهاجرت یون‌های کلراید نسبت به نمونه‌های شاهد گردد. از دیگر نتایج به‌دست آمده این تحقیق افزایش ۸۲٪ زمان ایجاد ترک در نمونه‌های حاوی پوزولان بود.

شکرچی‌زاده و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی اثر نسبت آب به سیمان بر جریان ماکروپیل، پتانسیل نیم پیل و نرخ خوردگی میلگرد در شرایط محیطی خلیج فارس پرداختند. نتایج حاصله حاکی از تأثیر قابل ملاحظه کاهش نسبت آب به سیمان بر کنترل خوردگی و تعویق زمان خوردگی داشت.

قویدل شهرکی و همکاران (۱۳۹۵) نیز با بررسی اثر متاکائولین و زئولیت بر پارامترهای مرتبط با دوام بتن خودمترکام نشان دادند افزودنی‌های فوق به صورت مجزا و یا هم‌زمان می‌توانند نقش مؤثری بر بهبود پارامترهای مؤثر بر پایداری نمونه‌های مورد آزمایش از جمله کاهش عمق نفوذ آب، کاهش درصد جذب آب و کاهش ضریب نفوذ یون کلر داشته باشند.

در خصوص خوردگی میلگرد و بررسی اثرات آن بر رفتار سازه، بررسی‌ها نشان می‌دهد خوردگی علاوه بر کاهش سطح مقطع میلگردها از طریق کاهش میزان پیوستگی میلگرد و بتن و همچنین ایجاد ترک در بتن نیز بر رفتار تیرهای بتن مسلح تأثیر می‌گذارد (Kashani و همکاران، ۲۰۱۴). اکثر تحقیقات انجام شده در سال‌های اخیر بر روی تأثیر درجه خوردگی بر رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح متمرکز شده (Malumbela و همکاران، ۲۰۱۲؛ Zho و همکاران، ۲۰۱۳؛ Rinaldi و همکاران، ۲۰۱۰؛ Dang و Francois، ۲۰۱۳؛ Avelo و Ortega، ۲۰۱۳) و تعداد تحقیقات انجام شده بر روی تأثیر درجه خوردگی بر رفتار برشی تیرها، خصوصاً به هنگام وقوع خوردگی هم‌زمان در خاموت و میلگردهای کششی محدود است. درحالی که به دلیل نزدیک‌تر بودن به سطح بتن، خاموت‌ها نسبت به میلگردهای طولی برای خوردگی مستعدتر هستند. Xue و همکاران (۲۰۱۴) با ساخت ۱۳ عدد تیر بتن مسلح با ابعاد $120 \times 240 \times 140$ mm و اعمال درجات مختلف خوردگی به خاموت‌ها نشان دادند که تا درصد خوردگی ۳۵٪ کاهش مقاومت نهایی نمونه‌ها به صورت تدریجی صورت می‌پذیرد. اگرچه تحقیقات Gong و Che (۲۰۱۲) نشان داد که به علت تحمل بخشی از نیروی برشی توسط خاموت‌ها، با کاهش سطح مقطع آن‌ها در اثر خوردگی و ایجاد ترک‌های ناشی از فشار وارده از طرف مواد حاصل از خوردگی مد شکست اعضا به شکل ترد و ناگهانی تغییر می‌یابد. به‌علاوه افزایش درجه خوردگی

درشت‌دانه: درشت‌دانه مورد استفاده، شن با حداکثر قطر اسمی ۱۲/۵mm و دانه‌بندی پیوسته بوده که وزن مخصوص آن 2.52 gr/cm^3 و جذب آب آن ۰/۹٪ اندازه‌گیری شده است. دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های مورد استفاده نیز در محدوده الزامات استاندارد ASTM C 33 (۲۰۱۸) انتخاب شده است.

میلگردهای مصرفی

مشخصات میلگردهای مورد استفاده جهت میلگردهای کششی، فشاری و خاموت‌ها مطابق جدول (۲) انتخاب شده است.

۲-۲- نمونه‌های آزمایشگاهی

در این تحقیق ۲۰ نمونه تیر به ابعاد $1500 \times 150 \times 100 \text{ mm}$ و با دو فاصله خاموت (S)، ۳/۵ و ۷cm در ناحیه برشی با مشخصات ارائه شده در جدول (۳)، ساخته شد. نمونه‌ها بر اساس آیین‌نامه ACI-318-14 (۲۰۱۴) طراحی شده و در طراحی نمونه‌ها همانند مراجع (Xue و همکاران، ۲۰۱۲؛ Ullah و همکاران، ۲۰۱۶) فاصله خاموت‌ها به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده است که مقاومت برشی نمونه‌ها بر اساس آیین‌نامه تأمین شده و مد شکست تیرهای خورده شده به‌صورت برشی باشد. اگرچه حداقل ظرفیت برشی با فاصله خاموت $s=d/2$ (۷cm) در نمونه‌های شاهد تأمین می‌شود اما به منظور بررسی اثر محصور کنندگی خاموت‌های خورده شده، علاوه بر فاصله $d/2$ فاصله خاموت‌ها به میزان $s=d/4$ نیز در نظر گرفته شده است. تعداد ۲ نمونه به عنوان شاهد و مابقی با درجات خوردگی هدف ۵٪، ۱۰٪ و ۲۵٪ در سه حالت: خوردگی خاموت (گروه S)، خوردگی میلگرد طولی (گروه T) و خوردگی هم‌زمان خاموت و میلگرد (گروه W) مدنظر قرار گرفته‌اند. لازم به یادآوری است که در اکثر مراجع سطوح خوردگی در محدوده صفر تا ۳۰٪ مورد مطالعه قرار گرفته و لذا درجات خوردگی هدف در این مطالعه نیز در این بازه انتخاب شده است. طرح اختلاط نمونه‌ها بر اساس استاندارد ACI 211 (۲۰۰۲) انجام شده و کارایی بتن تازه بر اساس استاندارد ASTM C143 (۲۰۱۵) برابر ۷cm اندازه‌گیری شده است. در شکل‌های (۱) و (۲) طرح شماتیک دو نمونه تیر با فاصله خاموت ۳/۵ و ۷cm نشان داده شده است.

در تحقیقی دیگر El-Sayed و همکاران (۲۰۱۶) مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح عمیق با خاموت خورده شده را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق تعداد ۱۴ عدد تیر بتن مسلح به ابعاد $2800 \times 350 \times 200 \text{ mm}$ ساخته و پس از اعمال خوردگی تسریع شده مورد ارزیابی قرار گرفتند. نسبت دهانه برشی به ارتفاع مقطع تیر به‌گونه‌ای انتخاب گردیده بود که تیرها عملکرد یک تیر عمیق را داشته باشند. فاصله خاموت‌ها نیز برابر ۱۰، ۱۵ و ۲۰cm در نظر گرفته شده بود. نتایج حاکی از کاهش مقاومت برشی و کاهش سختی تیرهای خورده بود که مقدار کاهش متناسب با افزایش درجه خوردگی بیشتر شد. همچنین در تیرهای با فاصله خاموت کمتر با کاهش فاصله خاموت‌ها به دلیل افزایش ترک‌های ناشی از خوردگی در تیرها کاهش مقاومت برشی بیشتری به‌دست آمد. با توجه به موارد فوق و تأثیر خوردگی خاموت‌ها بر خرابی تیرها و در ادامه پژوهش‌های قبلی در این تحقیق اثرات هم‌زمان خوردگی میلگرد کششی و خاموت‌ها و همچنین تأثیر فاصله خاموت بر روی رفتار تیرهای بتن مسلح، به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. تیرها در محیط تسریع شده نگهداری و هم‌زمان با اعمال خوردگی تا زمان انجام آزمایش تحت بار سرویس دائمی قرار داشته‌اند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مصالح مصرفی

سیمان

سیمان مورد استفاده در این تحقیق پرتلند تیپ II با مشخصات ارائه شده (توسط کارخانه سازنده) مطابق جدول (۱) بوده است.

سنگدانه‌های مصرفی

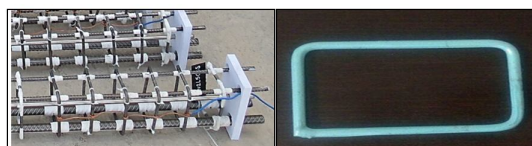
ریزدانه: ریزدانه مورد استفاده در این تحقیق ماسه با حداکثر قطر اسمی 4.75 mm ، مدول نرمی ۳ و وزن مخصوص آن 2.75 gr/cm^3 با جذب آب ۱/۵٪ بوده است.

جدول ۱- مشخصات سیمان مورد استفاده

عنوان	C ₃ A	C ₂ S	C ₃ S	C ₄ AF	گیرش (دقیقه)		مقاومت فشاری kg/cm ²			
					ابتدائی	نهایی	درصد انبساط	روز ۳	روز ۷	روز ۲۸
حد استاندارد (/)	<۸	-	-	-	>۴۵	<۴۶۰	<۰/۸	>۱۰۰	>۱۷۵	>۲۱۵
سیمان مصرفی (/)	۵/۵	۴۶/۶	۴۷/۴	۱۱/۷	۱۰۰	۱۷۵	۰/۰۳	۴۰۷	۴۹۹	۵۳۲

جدول ۲- مشخصات مکانیکی میلگردها

ردیف	نوع	قطر (mm)	Fy (MPa)	Es (MPa)
۱	میلگرد کششی	۱۶	۴۰۰	۲۰۰۰۰۰
۲	میلگرد فشاری	۸	۴۰۰	۲۰۰۰۰۰
۳	خاموت	۶	۲۴۰	۲۰۰۰۰۰



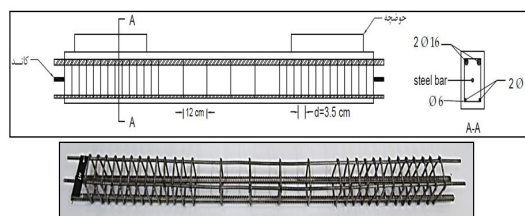
شکل ۳- نحوه عایق نمودن میلگردها و خاموت‌ها در برابر خوردگی

جدول ۳- مشخصات نمونه‌های مورد آزمایش

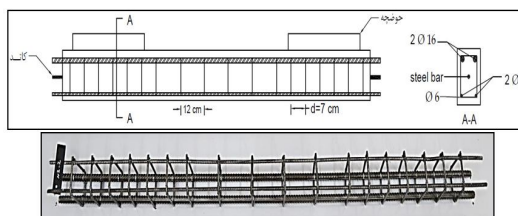
ردیف	گروه	نام نمونه	نوع خوردگی	میزان خوردگی (%)	فاصله خاموت‌ها (cm)
۱	شاهد	N1	بدون خوردگی	۰	۳/۵
۲		N2		۰	۷
۳	N1S	N1C3S	خاموت	۵	۳/۵
۴		N1C4S		۱۰	
۵		N1C6S		۲۵	
۶		N1C3T	میلگرد	۵	
۷	N1T	N1C4T	کششی	۱۰	
۸		N1C6T		۲۵	
۹		N1C3W	میلگرد	۵	
۱۰	N1W	N1C4W	کششی و	۱۰	
۱۱		N1C6W	خاموت	۲۵	
۱۲	N2S	N2C3S	خاموت	۵	۷
۱۳		N2C4S		۱۰	
۱۴		N2C6S		۲۵	
۱۵		N2C3T	میلگرد	۵	
۱۶	N2T	N2C4T	کششی	۱۰	
۱۷		N2C6T		۲۵	
۱۸		N2C3W	میلگرد	۵	
۱۹	N2W	N2C4W	کششی و	۱۰	
۲۰		N2C6W	خاموت	۲۵	

۳-۲- آزمایش خوردگی تسریع شده

در شکل (۴) نحوه انجام آزمایش خوردگی تسریع شده به صورت شماتیک نشان داده شده است. جریان اعمالی با شدت $150 \mu A / cm^2$ به وسیله منبع تغذیه نشان داده شده به نمونه‌ها اعمال شده است. در نمونه‌های W، میلگرد کششی و خاموت به صورت توأم و در نمونه‌های S و T به ترتیب خاموت و میلگرد کششی به عنوان آند به قطب مثبت منبع تغذیه متصل گردید. میلگرد استیل نیز در تمامی نمونه‌ها به عنوان کاتد در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که انتخاب ابعاد و فواصل، متناسب با امکانات آزمایشگاهی در دسترس و همچنین مطالعات مشابه قبلی صورت گرفته است (Malumbela و همکاران، ۲۰۱۲؛ Xia و همکاران، ۲۰۱۱).



شکل ۱- پیکربندی نمونه‌های با فاصله خاموت ۳/۵cm



شکل ۲- پیکربندی نمونه‌های با فاصله خاموت 7cm

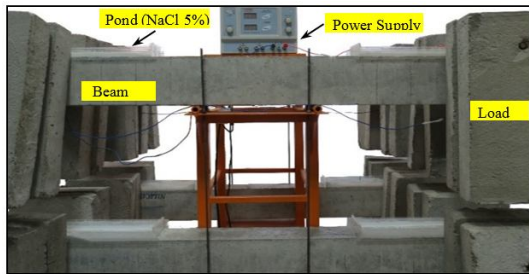
آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در سن ۲۸ روزه نشان‌دهنده مقاومت $270 kg/cm^2$ می‌باشد. در ساخت نمونه‌ها از میلگردهای آج‌دار با قطر ۱۶ mm و بدون آج با قطر ۶ mm به ترتیب برای میلگردهای کششی، فشاری و خاموت‌ها استفاده شده است. یک میلگرد استیل به قطر ۸ mm نیز به‌عنوان کاتد در وسط نمونه‌ها قرار داده شده است. همچنین انتهای میلگردهای طولی بر اساس تحقیقات و مطالعات انجام شده در مراجع (Dong و همکاران، ۲۰۱۱؛ Xue و همکاران، ۲۰۱۴) بدون خم در نظر گرفته شده است. مشخصات نمونه‌های مورد آزمایش و نحوه نام‌گذاری آن‌ها در جدول (۳) ارائه شده است. در نام‌گذاری نمونه‌ها، N بیانگر فاصله خاموت، C بیانگر درصد خوردگی، S بیانگر خوردگی خاموت، T بیانگر خوردگی میلگرد کششی و W بیانگر خوردگی توأم خاموت‌های گوشه و میلگرد کششی می‌باشد.

در تمامی نمونه‌های ساخته شده پوشش میلگرد برابر ۱/۵cm و فاصله خاموت‌ها در وسط تیر برابر ۱۲cm در نظر گرفته شده است. در نمونه‌های سری N1 فاصله خاموت‌ها در دو سر تیر برابر ۳/۵cm (شکل (۱)) و در نمونه‌های سری N2 این فاصله برابر 7cm بوده است (شکل (۲)). به منظور اعمال شرایط خوردگی حوضچه محتوی آب نمک در سطح فوقانی نمونه‌ها و در دو سمت تیر به طول ۳۵cm تعبیه شده است. قبل از بتن‌ریزی نمونه‌های T، در 70cm میانی تیرها سطوح میلگردهای کششی و خاموت‌ها با اپوکسی پوشانده شد. همچنین در نمونه‌های S، میلگرد کششی با پوشش اپوکسی از خوردگی محافظت و به منظور جلوگیری از خوردگی میلگرد فشاری نقاط اتصال آن با عایق الکتریکی مناسب پوشانیده شده است (شکل (۳)).

درصد خوردگی هدف می‌باشد. زمان لازم برای اعمال جریان تا رسیدن به سطح خوردگی مورد نظر مطابق جدول (۴) بوده است.

۴-۲- بارگذاری در مدت خوردگی

با توجه به تأثیر شرایط بارگذاری اولیه بر روی خوردگی و در نتیجه رفتار تیر، در این تحقیق هم زمان با اعمال خوردگی تسریع شده نمونه‌ها تحت بار سرویسی به میزان ۸٪ بار نهایی قرار گرفته‌اند (شکل (۶)). این مقدار بار مطابق توصیه Malumbela و همکاران (۲۰۱۲) انتخاب شده است.



شکل ۶- خوردگی تسریع شده و بارگذاری هم‌زمان در نمونه‌ها

۵-۲- بارگذاری نهایی تیرها

پس از رسیدن نمونه‌ها به درجه خوردگی هدف، تیرها تحت بارگذاری مطابق شکل (۷) قرار گرفتند. بار به صورت تدریجی و با سرعت ثابت ۱ mm/min اعمال شده و در زمان بارگذاری خیز تیر در وسط آن اندازه‌گیری و ثبت شده است.



شکل ۷- آزمایش شکست با روش خمش چهار نقطه‌ای

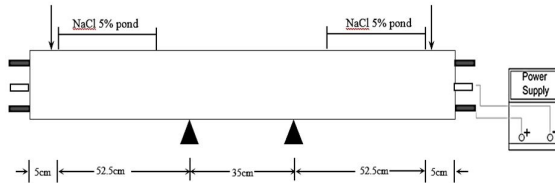
۳- نتایج آزمایشات

نتایج به‌دست آمده برای نمونه‌های مختلف به شرح زیر است:

۳-۱- نمونه‌های سری S

شکل (۸-الف) منحنی نیرو- تغییر شکل تیرهای با خوردگی خاموت با فاصله خاموت ۳/۵cm (گروه N1S) می‌باشد. در ابتدای بارگذاری و تا قبل از باز شدن ترک‌ها روند منحنی مشابه با نمونه

جهت برقراری اتصال مناسب جریان به میلگردها ضمن زنگ‌زدایی با برس سیمی در انتهای میلگرد جهت اتصال سیم از بست‌های فلزی استفاده شده است (شکل (۵)). به منظور دقت بیشتر در انجام آزمایش شدت جریان اعمالی توسط یک مولتی‌متر حساس دو بار در روز اندازه‌گیری و ثبت گردید. اعمال جریان تا حصول خوردگی مورد نظر (۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪) ادامه یافته و پس از آن نمونه‌ها توسط جک خمشی با ظرفیت ۱۰۰ تن شکسته شدند.



شکل ۴- مدل شماتیک خوردگی تسریع شد



شکل ۵- نحوه اتصال جریان الکتریکی به نمونه‌ها

جدول ۴- مدت زمان خوردگی نمونه‌ها (سن نمونه‌ها)

ردیف	درصد خوردگی هدف (%)	مدت زمان اعمال خوردگی (روز)			شدت جریان ($\mu A/cm^2$)	درصد خوردگی هدف (%)
		N2	N1	S		
۱	۵	۲۹	۳۵	۱۷	۱۵۰	۴۲
۲	۱۰	۵۸	۵۰	۳۴	۱۵۰	۸۴
۳	۲۵	۱۴۵	۱۲۵	۸۵	۱۵۰	۲۰۸

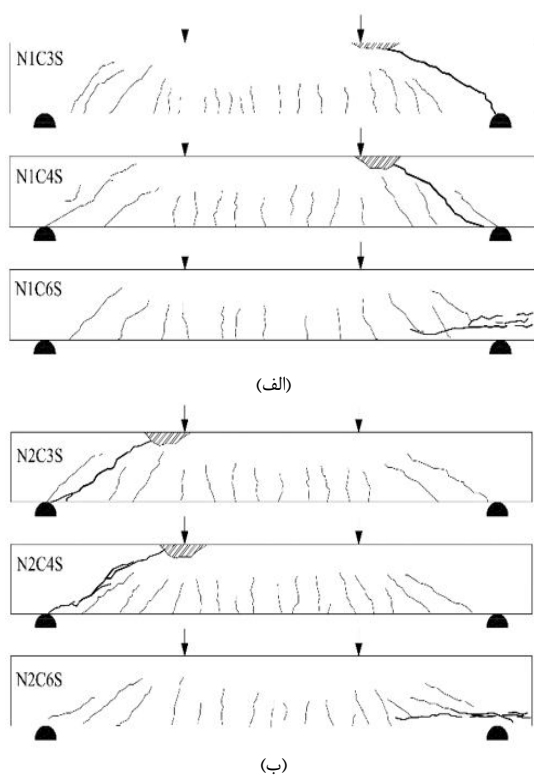
درصد خوردگی مورد نظر با توجه به مدت زمان و مقدار جریان اعمالی با استفاده از قانون فارادی و به صورت زیر محاسبه شده است (Rinaldi و همکاران، ۲۰۱۰):

$$\Delta m = \frac{55.847 \times t \times I}{2 * 96487} \quad (1)$$

$$C_w = \frac{\Delta m}{m_i} \times 100 \quad (2)$$

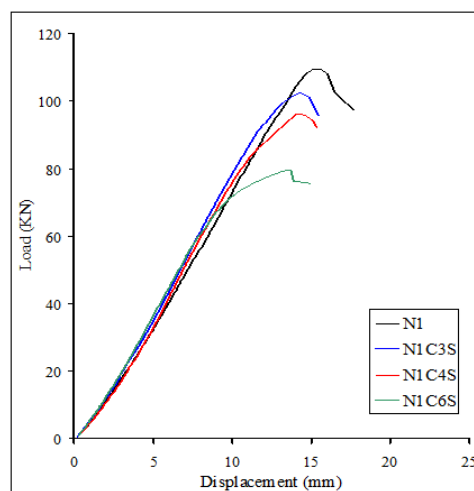
در روابط فوق Δm جرم کاهش یافته بر حسب گرم، t زمان بر حسب ثانیه و I میزان جریان خروجی دستگاه بر حسب آمپر می‌باشند. m_i جرم اولیه میلگردهای داخل بتن بر حسب گرم و C_w

علاوه بر آن کاهش پیوستگی میلگرد و بتن که ناشی از تقلیل اثر محصور شدگی میلگرد است سبب کاهش شکل پذیری تیرهای خورده شده است. در تیر N1C6S با فاصله خاموت‌ها ۳/۵cm، پس از خوردگی خاموت‌ها تا ۲۵٪ ترک‌های ناشی از آن با یکدیگر ترکیب شده و در نتیجه اثر محصور شدگی میلگرد به‌طور چشمگیری کاهش یافته است. با بررسی شکل (۸-ب) که منحنی نیرو- تغییر مکان تیرهای گروه N2S را نشان می‌دهد می‌توان دریافت که رفتار این تیرها با تیرهای گروه N1S مشابه است. مقدار کاهش ظرفیت باربری تیرهای N2C3S، N2C4S و N2C6S نسبت به تیر مرجع به ترتیب برابر با ۵٪، ۱۲٪ و ۲۲٪ بوده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان افت ظرفیت باربری تیر N1C6S نسبت به تیر N2C6S بیشتر است. دلیل آن تداخل ترک‌های ناشی از خوردگی در میلگردهای عرضی با فاصله ۳/۵cm است که سبب کاهش اثر محصورشوندگی خاموت‌ها می‌گردد. شکل (۹) توزیع ترک‌ها در تیرهای گروه N1S و N2S را نشان می‌دهد. با شروع بارگذاری، تحت نیروی برشی و لنگر خمشی هم‌زمان، هنگامی که تنش کششی وارده از مقاومت کششی بتن تجاوز نمود ترک‌های قائم بر محور تیر در بخش میانی تیر ایجاد گردید.

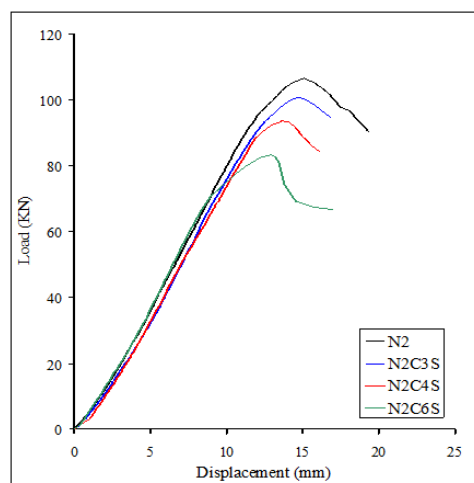


شکل ۹- توزیع ترک‌های ناشی از بارگذاری در تیرهای:
الف) گروه N1S، ب) گروه N2S

شاهد (N1) است. در این مرحله کاهش قطر میلگرد عرضی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر رفتار تیرها ندارد. لیکن با ادامه بارگذاری و توسعه ترک‌های ناشی از بار، شیب منحنی بار- تغییر شکل نمونه‌های خورده شده از شیب منحنی نمونه شاهد کمتر می‌شود. این موضوع خصوصاً در تیرهای با درجه خوردگی بالاتر مشهود است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که ظرفیت نهایی تیرهای خورده شده به طور محسوسی کاهش یافته است به گونه‌ای که نسبت به نمونه مرجع مقدار این کاهش در تیرهای N1C3S، N1C4S و N1C6S به ترتیب برابر ۶٪، ۱۲٪ و ۲۷٪ می‌باشد. به نظر می‌رسد در نتیجه خوردگی خاموت‌ها، پیوستگی بین میلگرد و بتن کاهش یافته و تأثیر محصورشدگی خاموت کاهش می‌یابد که در اثر آن عملکرد قفل شدگی سنگ‌دانه‌ها نیز کاهش می‌یابد.



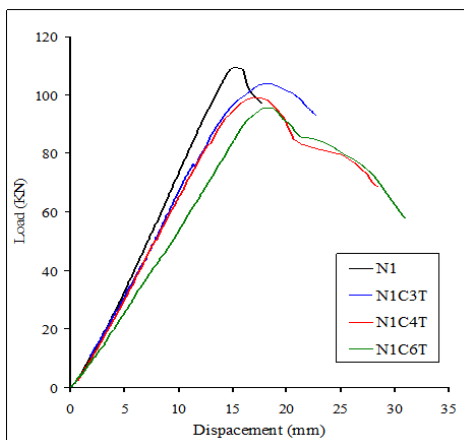
(الف)



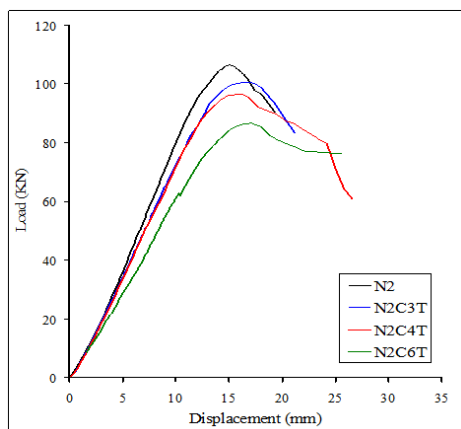
(ب)

شکل ۸- نمودار نیرو- تغییر مکان تیرهای: الف) گروه N1S، ب) گروه N2S

یافته به گونه‌ای که مقدار خیز نهایی در تیرهای N1C4T و N2C4T به ترتیب به میزان ۶۱٪ و ۳۷٪ نسبت به نمونه مرجع بیشتر شده است. در واقع در این نمونه‌ها رفتار تیر از حالت برشی به حالت برشی-خمشی تغییر نموده است. با مشاهده شکل (۱۱) می‌توان دریافت که توسعه ترک‌های برشی-خمشی در این تیرها سبب خرابی آن‌ها گردیده است. در تیر N2C6T با درجه خوردگی ۲۵٪ رفتار شکست با تیر N1C6T متفاوت است. همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌گردد ترک‌هایی در راستای میلگرد و در انتهای عضو ایجاد شده است که به دلیل حذف پیوستگی میلگرد و بتن بوده که سبب بیرون کشیدگی میلگرد از بتن شده است. ولی این موضوع در تیر مشابه با فاصله خاموت ۳/۵cm دیده نمی‌شود. در واقع در تیر N1C6T به دلیل فاصله کم میلگردها اثر محصورشدگی بتن مانع از لغزش میلگرد در داخل بتن شده است. لغزش میلگرد در بتن در نمونه N2C6T سبب افت ۱۸٪ مقاومت نهایی گردیده است. ظرفیت باربری تیر N1C6T، ۹۲۴kg (حدود ۱۰٪) از تیر N2C6T بیشتر است.



(الف)



(ب)

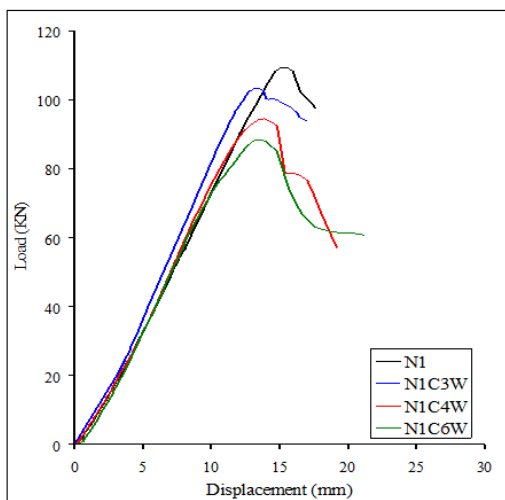
شکل ۱۰- نمودار نیرو- تغییر مکان تیرهای: (الف) گروه N1T، (ب) گروه N2T

این ترک‌ها با نزدیک شدن به تکیه‌گاه و در ناحیه برشی-خمشی به صورت قطری تغییر می‌یابد. در تیرهای با سطح خوردگی ۵٪ و ۱۰٪، با افزایش بار عرض ترک‌های قائم خمشی ثابت مانده و گسترش ترک‌های قطری سبب خرابی تیر گردیدند. با توجه به شکل (۹) در تیرهای N2C6S و N1C6S، با خوردگی ۲۵٪ ترک‌های در راستای میلگرد طولی و در محل تکیه‌گاه سبب خرابی تیر گردیدند. در واقع در این تیرها خرابی از نوع حذف پیوستگی میلگرد و بتن می‌باشد که در نتیجه کاهش اثر محصور شدگی خاموت‌ها به دلیل خوردگی آن‌ها و ایجاد ترک در بتن می‌باشد.

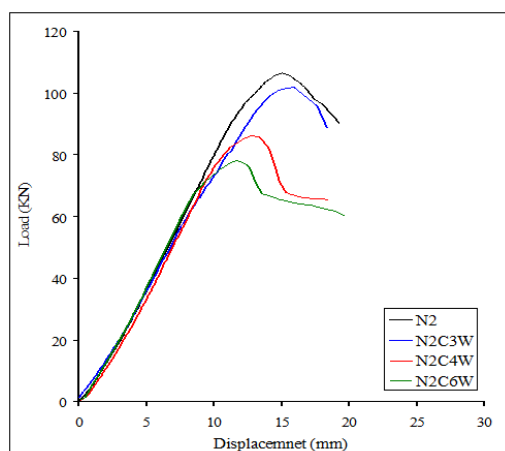
۳-۲- نمونه‌های سری T

شکل (۱۰-الف) نمودار نیرو- تغییر مکان تیرهای گروه N1T (خوردگی میلگرد طولی) را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود مقدار تغییر شکل وسط تیر نسبت به تیرهای گروه S بیشتر است به گونه‌ای که در تیرهای N1C3T، N1C4T و N1C6T نسبت به تیرهای N1C3S، N1C4S و N1C6S مقدار خیز تیر تا لحظه شکست به ترتیب به میزان ۴۷٪، ۸۶٪ و ۱۰۷٪ افزایش داشته است.

در تیرهای گروه N1T (با فاصله خاموت ۳/۵cm در ابتدای بارگذاری ترک‌های خمشی در ناحیه لنگر ثابت، به صورت قائم ایجاد شد که با افزایش بار، ترک‌های قطری در ناحیه برشی-خمشی نیز ایجاد گردید. در سطوح کم خوردگی (N1C3T) شکست به صورت برشی و با افزایش و توسعه ترک قطری صورت گرفت. در این تیر ترک‌های خمشی افزایش عرض کمتری نسبت به ترک‌های برشی داشت. با افزایش درجه خوردگی در تیرهای N1C4T و N1C6T، در سطوح ۱۰٪ و ۲۵٪ خوردگی، شکست از نوع برشی-خمشی بود. علت این موضوع کاهش قطر میلگرد طولی و ایجاد ضعف خمشی در تیرها می‌باشد. همان‌طور که از شکل (۱۰) مشخص است میزان کاهش ظرفیت باربری تیرهای N1C3T، N1C4T، N1C6T نسبت به تیر مرجع (N1) به ترتیب برابر ۵٪، ۹٪ و ۱۲٪ در صد می‌باشد. این در حالی است که این مقادیر برای تیرهای گروه N2T (با فاصله خاموت ۷cm) به ترتیب برابر ۵٪، ۹٪ و ۱۸٪ است. شکل (۱۱) الگوی ترک‌های تیرهای گروه N1T و N2T را نشان می‌دهد. شکست برشی و باز شدگی ترک‌های قطری در هر دو نمونه N1C3T و N2C3T در درجه خوردگی ۵٪ دیده می‌شود. مقدار مقاومت نهایی در تیرهای N1C3T و N2C3T به میزان ۵٪ نسبت به نمونه‌های مرجع کاهش یافته است. از طرفی همان‌طور که مشاهده می‌شود شیب منحنی مربوط به خوردگی ۵٪ در هر دو نمونه نسبت به تیر مرجع کاهش داشته که این به معنای کاهش سختی تیرهای خورده شده است. با افزایش درجه خوردگی در نمونه‌های با خوردگی ۱۰٪ مقدار خیز تیرها افزایش



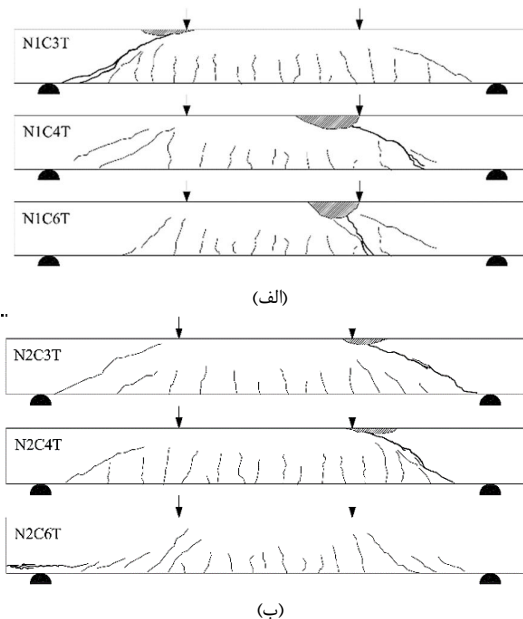
(الف)



(ب)

شکل ۱۲- نمودار نیرو- تغییر مکان تیرهای: (الف) گروه N1W، (ب) گروه N2W

با بررسی شکل (۱۳-الف) مشخص است که شکست تیر N1C6W از نوع حذف پیوستگی میلگرد و بتن بوده که این موضوع در منحنی نیرو- تغییر مکان این تیر نیز مشهود است. این نوع شکست در درجات بالای خوردگی و به دلیل کاهش مقاومت پیوستگی میلگرد طولی و بتن اتفاق می افتد. فاصله کم میلگردهای عرضی در تیر بتنی با خوردگی همزمان میلگرد و خاموت، از طرفی سبب افزایش اثر محصورشدگی میان میلگرد و بتن شده و از طرفی به دلیل توسعه و تداخل ترک‌های ناشی از خوردگی همزمان خاموت‌ها، میزان مقاومت پیوستگی را کاهش می دهد. در واقع در خوردگی همزمان میلگرد و خاموت کم کردن فاصله خاموت‌ها نتوانسته است مانع شکست تیر از نوع حذف مقاومت پیوستگی شود و میلگرد در داخل بتن جابه‌جا می شود.



شکل ۱۱- توزیع ترک‌های ناشی از بارگذاری در تیرهای: (الف) گروه N1T، (ب) گروه N2T

۳-۳- نمونه‌های سری W

شکل (۱۲-الف) نمودار نیرو- تغییر مکان تیرهای گروه N1W (خوردگی همزمان خاموت و میلگرد) با فاصله خاموت ۳/۵cm نشان می دهد. همان‌طور که مشاهده می شود در ابتدای بارگذاری شیب منحنی هر یک از نمونه‌ها با نمونه مرجع تقریباً برابر است لیکن با افزایش بار و گسترش ترک‌ها شیب منحنی و در نتیجه سختی تیرها کاهش یافته است. مقدار ظرفیت نهایی باربری تیرهای N1C3W، N1C4W و N1C6W به ترتیب به میزان ۱۳٪، ۱۹٪ و ۱۹٪ نسبت به تیر مرجع کاهش یافته است. مقدار خیز ماکزیمم در تیرهای N1 و N1C3W تقریباً برابر بوده و همان‌طور که در شکل مشخص است، رفتار تیر به صورت ترد بوده و شکست ناگهانی است. با افزایش درجه خوردگی در تیر N1C4W مقدار ظرفیت باربری تیر به میزان ۸٪ کاهش یافته است، لیکن خیز نهایی تیر به میزان ۱۳٪ نسبت به تیر N1C3W افزایش داشت. با بررسی شکل (۱۳-الف) که الگوی ترک‌های تیرهای گروه N1W را نشان می دهد می توان دریافت شکست تیر N1C4W به صورت برشی- خمشی است در حالی که نوع شکست تیر N1C3W به صورت کاملاً برشی می باشد. خوردگی همزمان خاموت و میلگرد سبب کاهش ظرفیت خمشی و برشی تیر شده و مقاومت نهایی آن را کاهش داده است. در تیر N1C6W مقدار بار نهایی قابل تحمل به میزان ۱۹٪ نسبت به تیر مرجع کاهش یافته است.

• شکست نمونه‌های با خوردگی خاموت تنها در سطوح خوردگی ۵٪ و ۱۰٪ از نوع برشی است. لیکن با افزایش درجه خوردگی و در درجه خوردگی ۲۵٪ شکست این تیرها با حذف پیوستگی بین میلگرد و بتن صورت گرفته است. میزان کاهش مقاومت نهایی تیر با فاصله خاموت ۳/۵cm از خوردگی ۲۵٪ بیشتر از نمونه با فاصله خاموت ۷cm می‌باشد.

• در نمونه‌های با خوردگی میلگرد کششی تنها، به دلیل کاهش سطح مقطع میلگرد از درجه خوردگی ۱۰٪ به بالا نوع شکست از برشی به برشی-خمشی تغییر می‌یابد.

• میزان کاهش ظرفیت باربری تیرهای با خوردگی میلگرد کششی در نمونه‌های با فاصله ۳/۵cm در سطوح خوردگی ۵٪ و ۱۰٪ با نمونه‌های با فاصله خاموت ۷cm تقریباً برابر است. لیکن با افزایش درجه خوردگی، و در درجه خوردگی ۲۵٪، به دلیل کاهش اثر محصور شدگی خاموت و کاهش پیوستگی بین میلگرد و بتن میزان کاهش بار نهایی تیر با فاصله خاموت ۷cm بیشتر است. در نمونه با فاصله خاموت ۷cm شکست ناشی از حذف پیوستگی بین میلگرد و بتن بوده است.

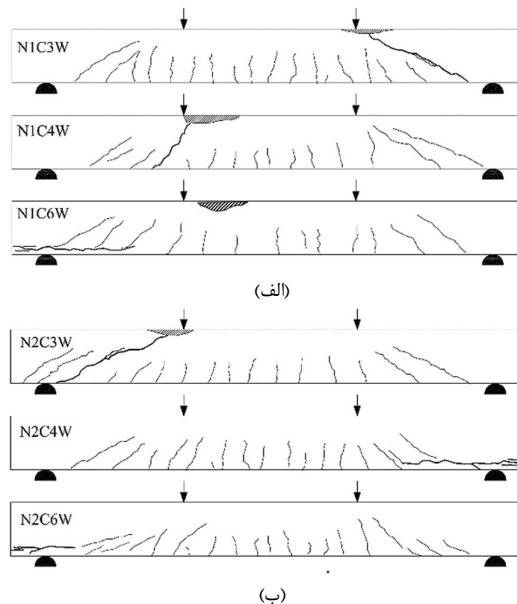
• در نمونه‌های با میلگرد طولی خورده شده و درجات خوردگی مشابه، در تیرهای با فاصله خاموت بیشتر خیز نهایی زیادتری ثبت شده است. به گونه‌ای که در درجه خوردگی ۱۰٪، افزایش خیز نهایی تیر N2C4T نسبت به تیر مرجع ۱۷٪ از تیر N1C4T بیشتر است.

• در نمونه‌های با خوردگی هم‌زمان میلگرد طولی و خاموت در درجه خوردگی ۵٪ شکست نمونه‌ها در هر دو سری، (فاصله خاموت ۳/۵ و ۷cm) از نوع برشی است. اما در خوردگی ۱۰٪ و نمونه با فاصله خاموت ۷cm شکست با از بین رفتن پیوستگی میلگرد و بتن رخ می‌دهد. این در حالی است که در نمونه با فاصله خاموت‌های ۳/۵cm شکست به صورت برشی-خمشی است.

• کاهش فاصله خاموت می‌تواند نوع شکست اعضای خمشی را تغییر دهد که این موضوع به نوع خوردگی و درجه آن بستگی دارد. افزایش اثر محصورشوندگی یکی از مزایای کم نمودن فاصله خاموت‌ها است ولی باید در نظر داشت کم کردن این فواصل می‌تواند به دلیل تداخل ترک‌های ناشی از خوردگی اثر منفی داشته باشد.

۵- سپاسگزاری

ساخت و آزمایش برخی از نمونه‌های مورد استفاده در این تحقیق، در آزمایشگاه بتن دانشگاه سیستان و بلوچستان و برخی دیگر در آزمایشگاه بتن دانشگاه آزاد اسلامی واحد بیرجند، انجام شده است. بدین‌وسیله از مساعدت مسئولین و کارکنان محترم آزمایشگاه‌های فوق تشکر و قدردانی می‌گردد.



شکل ۱۳- توزیع ترک‌های ناشی از بارگذاری در تیرهای: (الف) گروه N1W، (ب) گروه N2W

بررسی (شکل ۱۳-ب) نشان می‌دهد که این نوع شکست برای تیرهای با فاصله خاموت ۷cm در خوردگی ۱۰٪ اتفاقی افتاده است. به عبارت دیگر اگرچه با کاهش فاصله خاموت‌ها مکانیزم شکست تیر تغییر می‌یابد اما در خوردگی بالا افزایش تعداد خاموت‌ها خود باعث ایجاد ترک‌های بیشتری می‌شود. مشابه این نتیجه توسط Dong و همکاران (۲۰۱۱) نیز گزارش شده است. با بررسی (شکل ۱۲-ب) که منحنی نیرو- تغییرمکان تیرهای N2W با فاصله خاموت ۷cm را نشان می‌دهد می‌توان دریافت تا سطح خوردگی ۵٪ رفتار تیر به هنگام شکست به صورت برشی بوده و پس از آن با افزایش درجه خوردگی به دلیل کاهش اثر محصور شدگی خاموت‌ها و کاهش آج میلگرد طولی شکست از نوع حذف پیوستگی میلگرد طولی و بتن می‌باشد. همچنین می‌توان دید که در تیر N2C3W ایجاد و گسترش ترک‌های قطری سبب شکست تیر شده‌اند. مقدار کاهش بار نهایی قابل تحمل توسط تیرهای N2C4W و N2C6W نسبت به تیر مرجع به ترتیب برابر ۲۶٪ و ۱۹٪ می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد مقدار کاهش مقاومت نهایی در تیر N2C6W از تیر N1C6W با فاصله خاموت ۳/۵cm به میزان ۴۰٪ بیشتر است. این موضوع به دلیل کاهش اثر محصورشدگی به دلیل افزایش فاصله خاموت‌ها می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده از این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- El-Sayed, AK, Hussain, RR, Shuraim, AB, "Effect of Stirrup corrosion on the Shear Strength of reinforced concrete Short beams", *Journal of Civil Engineering and management*, 2016, (4), 491-499.
- Kashani MM, Lowes L N, Crewe AJ, Alexander NA, "Finite element investigation of the influence of corrosion pattern on inelastic buckling and cyclic response of corroded reinforcing bars", *Engineering Structures*, 2014, 75, 113-125.
- Ma Y, Che Y, Gong J, "Behavior of corrosion damaged circular reinforced concrete columns under cyclic loading", *Construction and Building Materials*, 2012, 29, 548-556.
- Malumbela G, Moyo P, Alexander M, "Longitudinal strains and stiffness of RC beams under load as measures of corrosion levels", *Engineering Structures*, 2012, 35, 215-227.
- Rinaldi Z, Imperatore S, Valente C, "Experimental evaluation of the flexural behavior of corroded P/C beams", *Construction and Building Materials*, 2010, 24, 2267-2278.
- Ullah R, Yokota H, Hashimoto K, Goto SH, "Load carrying capacity of RC beams with locally corroded shear reinforcement", *Journal of Asian Concrete Federation*, 2016, 2 (1), 46-55.
- Valipour M, Shekarchi M, Ghods P, "Comparative studies of experimental and numerical techniques in measurement of corrosion rate and time-to-corrosion-initiation of rebar in concrete in marine environments", *Cement & Concrete Composites*, 2014, 48, 98-107.
- Wang L, Zhang X, Zhang J, Ma Y, Liu Y, "Effects of stirrup and inclined bar corrosion on shear behavior of RC beams", *Construction and Building Materials*, 2015, 98, 537-546.
- Xia J, Jin WL, Li LY, "Shear performance of reinforced concrete beams with corroded stirrups in chloride environment", *Corrosion Science*, 2011, 53 (5), 1794-1805.
- Xu Sh, Zhang Z, Li R, Qiu B, "Experimental study on the shear behavior of RC beams with corroded stirrups", *Journal of advanced concrete technology*, 2017, 15, 178-189.
- Xue X, Hiroshi S, Song Y, "Influence of Stirrup Corrosion on Shear Strength of RC Beams", *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 204-208, 3287-3293.
- Xue X, Seki H, Song Y, "Shear Behavior of RC Beams Containing Corroded Stirrups", *Advances in Structural Engineering*, 2014, 17 (2), 165-177.
- Zhu W, François R, Coronelli D, Cleland D, "Effect of corrosion of reinforcement on the mechanical behaviour of highly corroded RC beams", *Engineering Structures*, 2013, 56, 544-554.
- ۶- مراجع
- پورخورشیدی ع، رضانیپور ع ا، "آیین‌نامه مّلی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان (پیشنهادی)"، وزارت مسکن و شهرسازی، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۵، ۴۲۸.
- خزائنی ط، میری م، رخشانی‌مهر م، دهواری ع، "ارزیابی آزمایشگاهی اثر ترکیب متاکائولن و پومیس بر دوام و خوردگی میلگرد در بتن خود تراکم"، *مجله تحقیقات بتن*، ۱۳۹۵، ۹ (۱)، ۵-۱۷.
- شکرچی‌زاده م، ولی‌پور م، پرگر ف، "بررسی خوردگی در آزمون‌های بتنی مسلح با نسبت آب به سیمان مختلف واقع در شرایط رویارویی پاشش در منطقه خلیج فارس"، *نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز*، ۱۳۹۱، ۴۲ (۱)، ۵۷-۶۳.
- قویدل شهرکی م، میری م، مهراله رخشانی‌مهر، "بررسی آزمایشگاهی اثر استفاده از ترکیب زئولیت و متاکائولین بر دوام و خوردگی میلگرد در بتن خود تراکم"، *نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز*، ۱۳۹۵، ۴۶ (۱)، ۴۹-۵۸.
- میری م، سارانی ن، "ارزیابی آزمایشگاهی استفاده از ترکیب پومیس و زئولیت بر خوردگی میلگرد و دوام بتن خود تراکم"، *علوم و مهندسی خوردگی*، ۱۳۹۳، ۴ (۲)، ۲۱-۳۲.
- American Concrete Institute, "ACI 211, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete", 2002.
- American Concrete, "ACI 318, Building code requirements for structural concrete and commentary", 2014.
- American Society for Testing and Materials, "ASTM C 143, Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete", 2015.
- American Society for Testing and Materials, "ASTM C33, Standard specification for concrete aggregates", 2018.
- Aveldaño RR, Ortega NF, "Behavior of concrete elements subjected to corrosion in their compressed or tensed reinforcement", *Construction and Building Materials*, 2013, 38, 822-828.
- Dang VH, François R, "Influence of long-term corrosion in chloride environment on mechanical behavior of RC beam", *Engineering Structures*, 2013, 48, 558-568.
- Dong W, Murakami Y, Oshita H, Suzuki S, Tsutsumi T, "Influence of Both Stirrup Spacing and Anchorage Performance on Residual Strength of Corroded RC Beams", *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2011, 9 (3), 261-275.

EXTENDED ABSTRACT

Behavior of Reinforced Concrete Beams with Corroded Stirrups and Tensile Rebars

Yusof Nezamdoust ^a, Mahmoud Miri ^{a,*}, Hossein Beheshti Nezhad ^b

^a Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

^b Department of Civil Engineering, Birjand Branch, Islamic Azad University, Birjand, Iran

Received: 03 October 2017; Accepted: 16 July 2018

Keywords:

Reinforced concrete beam, Corrosion, Shear strength, Stirrup spacing.

1. Introduction

This paper carried out an experimental investigation on the behavior of RC beams containing corroded reinforcement. Results from earlier studies demonstrate a consistent association between the corrosion level of reinforcements and carrying capacity of beams under static loading test (Dong et al., 2011, Wang et al., 2015). So far, however, there has been little discussion about the simultaneous effect of stirrup spacing and corrosion level of reinforcements on crack patterns at failure and failure mode. Therefore, the main aim of this study is to investigate the behavior of corroded beams with different stirrups spacing in several corrosion levels. Evaluation of the corroded beams was carried out the crack pattern due to loading, residual ultimate strength, and the failure mode of the beams.

2. Methodology

Twenty RC beams of 100×150×1500mm were evaluated after performing an accelerated corrosion test under sustained load according to (Malumbela et al., 2012), as shown in Fig. 1. The beams were divided into three main groups according to the type of reinforcement corrosion, S: stirrup corrosion, T: tensile rebar corrosion, and W: stirrup and tensile rebar corrosion. Two different stirrup spacing (3.5cm and 7.0cm) and 4 different degree of corrosion (0%, 5%, 10%, and 25%) were considered in each group. After the accelerated corrosion process was completed, the beams were subjected to four-point loading.

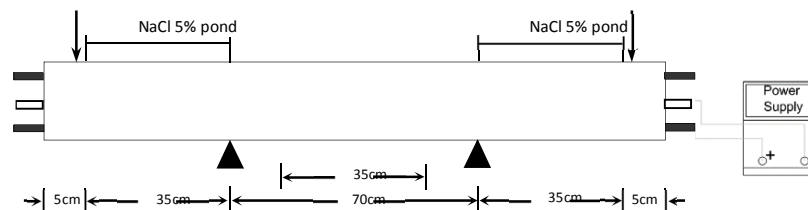


Fig. 1. Schematic setup of the accelerated corrosion process

* Corresponding Author

E-mail addresses: yusof.nezam@yahoo.com (Yusof Nezamdoust), mmiri@eng.usb.ac.ir (Mahmoud Miri), hbehshiti@iaubir.ac.ir (Hossein Beheshti Nezhad).

3. Results and discussion

The results are discussed in terms of crack pattern, failure mode, and residual ultimate strength of corroded beams at different corrosion levels in each group:

3.1. Group S

The results of this study show that as the corrosion level becomes severer, more than ten percent, the failure mode of the beams with corroded stirrups may change from shear type to bond failure. Ultimate strength reduction in specimens with stirrups spacing 3.5cm is 25% more than those with stirrups spacing 7.0cm in corrosion level of 25%. This unexpected result might be explained by the fact that the corrosion cracks are interfered by decreasing the stirrup spacing from 7.0cm to 3.5cm in severe corrosion level, and as a result the confinement effect on the bond behavior is decreased.

3.2. Group T

The failure mode of beams in group T (corrosion of longitudinal reinforcement) could change from shear to shear-flexural in the corrosion level of 10%. This result could be due to the decrease in the longitudinal rebars section. In this group, the ultimate capacities of corroded beams are nearly similar in both of specimens with two different stirrups spacing (3.5cm and 7.0cm) up to 10 percent of the corrosion level. By increasing the corrosion level (in corrosion level = 25%) the ultimate capacity of a corroded beam with stirrup spacing 3.5cm is more than that of with stirrup spacing 7.0cm. As shown in Fig. 2, the failure mode of the specimens with stirrup spacing 7cm in the corrosion level of 25% change to bond failure.

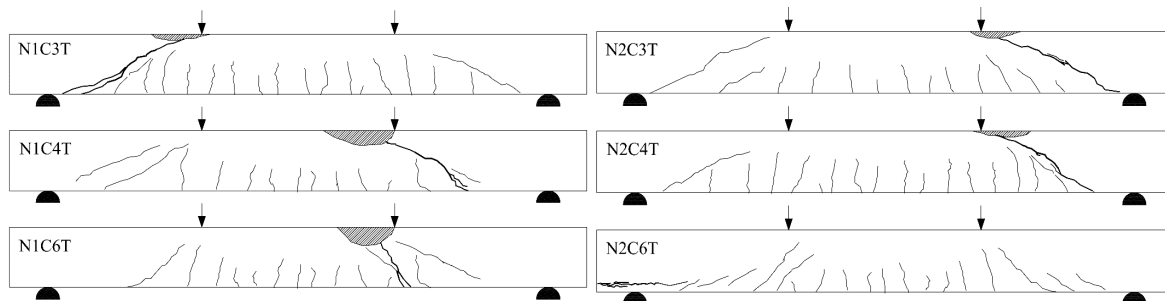


Fig. 2. Crack patterns at the failure of the beams in group T

3.3. Group W

The results obtained from beams in group W indicate that the failure mode of all corroded beams in corrosion level of 5% is shear. However, with increasing the level of corrosion (in CL=10%), the failure mode of beams with stirrup spacing 3.5cm and 7.0cm change to shear-flexural failure and bond failure, respectively.

4. Conclusions

The present study was designed to determine the simultaneous effect of corrosion level of reinforcement and stirrup spacing on the behavior of reinforced concrete beams. The failure mode of corroded beams may change by decreasing the stirrup spacing, although this will depend on the degree of corrosion. The use of transverse reinforcement with low spacing can increase the bond strength by controlling the crack widths and maintaining the bonding of concrete surrounding reinforcement. Of course, it should be noted that in specimens in group W, the decrease of stirrup spacing led to a decline in the ultimate strength capacity. Corrosion cracks interaction is a factor in reducing the confinement of longitudinal reinforcements. At the same degree of corrosion, the maximum deflection of corroded beams in the T group is more than that in the S group. So that in corrosion level 10%, the maximum deflection of the corroded beam in group T is 65% more than that in group S.

5. References

- Dong W, Murakami Y, Oshita H, Suzuki S, Tsutsumi T, "Influence of Both Stirrup Spacing and Anchorage Performance on Residual Strength of Corroded RC Beams", *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2011, 9 (3), 261-275.
- Malumbela G, Moyo P, Alexander M, "Longitudinal strains and stiffness of RC beams under load as measures of corrosion levels", *Engineering Structures*, 2012, 35, 215-227.
- Wang L, Zhang X, Zhang J, Ma Y, Liu Y, "Effects of stirrup and inclined bar corrosion on shear behavior of RC beams", *Construction and Building Materials*, 2015, 98, 537-546.