

A study on the Flexural Behavior of Fiber-reinforced Concrete Beams Subjected to Tensile Steel Corrosion

Iman Sarinejad*

Department of Civil Engineering, Ramsar Branch, Islamic Azad University, Ramsar, Iran.

iman.sadrinejad@iau.ac.ir

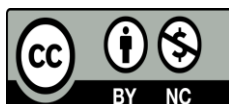
DOI 10.30495/CIVIL.2023.703645

Keywords:

Reinforced concrete beam, steel fiber, polyolefin fiber, accelerated corrosion, flexural loading

Abstract

This paper presents the results of an experimental study on the flexural performance of reinforced concrete beams made of fibrous concrete under the corrosion of tensile steels. Fifteen reinforced concrete beams were prepared in three groups; in two groups, two types of steel and polyolefin fibers were utilized to construct the beams. Four beams from each group were subjected to accelerated corrosion to create corrosion percentages of 3.5, 7, 15 and 30% in tensile steels. Then the beams were subjected to a four-point bending test, and the parameters of yield strength, ultimate strength, yield deflection, ultimate deflection, failure mode and ductility of the beams were investigated. The results indicated that up to the corrosion level of 15%, with the development of general corrosion, along with the reduction of stiffness and resistance of the beams, the ultimate deflection of the beams increased, and at the corrosion level of 30%, with the development of local corrosion, the ultimate strength and ultimate deflection of the beams were greatly reduced. The level of corrosion in tensile steel of beams containing steel fibers was lower than that of in the other beams, which was caused by the sacrificial anode effect of steel fibers. Under the corrosion conditions of tensile steel, the reduction of strength and stiffness in fibrous concrete beams were less than those in the plain concrete beams, and the performance of steel fibers in this field was significantly better than their polyolefin counterparts. Furthermore, the fibers used for this purpose, had significantly positive effect on the ductility of reinforced concrete beams with tensile steel corrosion.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).

مطالعه رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح ساخته شده از بتن الیافی تحت خوردگی فولادهای کششی

ایمان صدری نژاد*

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد رامسر، دانشگاه آزاد اسلامی، رامسر، ایران

iman.sadrinejad@iau.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۲۰ خرداد ۱۴۰۲

تاریخ دریافت: ۳۰ بهمن ۱۴۰۱

چکیده

این مقاله نتایج یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی عملکرد خمشی تیرهای بتن مسلح ساخته شده از بتن الیافی تحت خوردگی فولادهای کششی را ارائه می‌کند. پانزده تیر بتن مسلح در سه گروه آماده شدند که در دو گروه از دو نوع الیاف فولادی و پلی اولفین در ساخت تیرها استفاده شد. پس از عمل‌آوری، چهار تیر از هر گروه تحت فرآیند خوردگی تسریع شده قرار گرفتند تا درصدهای خوردگی ۳، ۵، ۷، ۱۵ و ۳۰ درصد در فولادهای کششی ایجاد شوند. سپس تیرها تحت آزمون خمش چهار نقطه‌ای قرار گرفتند و پارامترهای مقاومت تسلیم، مقاومت نهایی، خیز تسلیم، خیز نهایی، مود خرابی و شکل پذیری تیرها مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که تا تراز خوردگی ۱۵٪ با گسترش خوردگی عمومی در کنار کاهش سختی و مقاومت تیرها، خیز نهایی تیرها افزایش می‌یابد و در تراز خوردگی ۳۰٪ با گسترش خوردگی‌های موضعی مقاومت و خیز نهایی تیرها به شدت کاهش می‌یابند. تراز خوردگی در فولاد کششی تیرهای حاوی الیاف فولادی کمتر از دیگر تیرها بود که ناشی از اثر آند قربانی شونده الیاف فولادی بود. تحت شرایط خوردگی فولاد کششی، کاهش مقاومت و سختی در تیرهای بتن الیافی در مقایسه با نمونه‌های نظیر از تیرهای بتن ساده کمتر بود که الیاف فولادی در این زمینه بطور قابل ملاحظه‌ای نسبت به الیاف پلی اولفین عملکرد بهتری داشت. همچنین الیاف مورد استفاده اثر مثبت قابل توجهی بر شکل‌پذیری تیرهای بتن مسلح دچار خوردگی فولاد کششی داشتند.

کلید واژگان: تیر بتن مسلح، الیاف فولادی، الیاف پلی اولفین، خوردگی تسریع شده، بارگذاری خمشی.

۱- مقدمه

مطالعه بر روی عناصر بتن مسلح بعنوان یکی از مصالح رایج در ساخت سازه‌ها از علایق محققین بوده است [۱]. خوردگی آرماتورهای فولادی شایع‌ترین علت کوتاه شدن عمر سازه‌های بتن مسلح در سراسر جهان است و از این منظر سالانه خسارات زیادی را بر اقتصاد کشورها تحمیل می‌کند. خوردگی میلگردهای فولادی می‌تواند سختی عناصر بتن مسلح را با خراب کردن پیوند بتن-فولاد و کاهش محصور شدن میلگردهای فولادی به دلیل ترک خوردگی طولی کاهش دهد. علاوه بر این، خوردگی خواص هندسی و مکانیکی میلگردهای تقویت کننده را تغییر می‌دهد که در نتیجه باعث کاهش مقاومت نهایی و شکل پذیری سازه‌ها و حتی شکست زودرس آنها می‌شود. بنابراین، علاوه بر مهار خوردگی، ارزیابی رفتار سازه‌های آسیب دیده از خوردگی همواره یکی از علایق مهندسیین بوده است.

در سالیان اخیر مطالعاتی در مورد تاثیر خوردگی فولادهای طولی بر روی رفتار سازه‌های تیرهای ساخته شده از بتن ساده انجام شده است. نتایج این مطالعات نشان داد که در درصدهای بسیار پایین خوردگی (کمتر از ۱٫۵ درصد) رفتار تیرهای دچار خوردگی مشابه رفتار تیرهای سالم است [۲]. اما با افزایش خوردگی فولادهای طولی پارامترهای سازه ای می‌تواند بطور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر قرار گیرد که از آنجمله می‌توان به کاهش سختی و ظرفیت نهایی باربری تیرها اشاره نمود. همچنین مشخص شد که کاهش ظرفیت باربری تیرها صرفاً به دلیل کاهش سطح موثر یا کاهش مقاومت میله‌های فولادی تقویت کننده نیست، بلکه برخی از عوامل دیگر، از جمله ایجاد ترک در بتن و از دست رفتن پیوند بتن-فولاد می‌تواند منجر به کاهش بیشتر در مقاومت سازه شود [۳]. از سوی دیگر افزایش ظرفیت تغییر شکل نهایی تیرهای دچار خوردگی و به تبع آن افزایش شکل پذیری تیرها نیز توسط محققین گزارش شد [۴-۵].

در دهه‌های اخیر، به خوبی ثابت شده است که گنجاندن الیاف در بتن می‌تواند انتشار ترک را کنترل کرده و شکل‌پذیری بتن را بهبود بخشد. همچنین تاکنون مطالعات بسیاری بر روی رفتار تیرهای بتن مسلح ساخته شده از بتن الیافی صورت گرفته است که بهبود رفتارهای خمشی و برشی را در این تیرها تایید می‌نمایند [۶-۸].

بر این اساس، می‌توان انتظار داشت که الیاف بر فرآیند خوردگی و رفتار سازه ای عناصر بتن مسلح آسیب دیده از خوردگی تأثیر بگذارند. بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که مطالعات کمی بر روی خوردگی فولاد در بتن تقویت شده با الیاف تمرکز دارند [۹-۱۰]. نتایج قبلی نشان می‌دهد که وجود الیاف در بتن می‌تواند شروع خوردگی

فولاد را به تاخیر بیندازد [۱۱]، اثر منفی خوردگی را بر پیوند بین فولاد خورده شده و بتن کاهش دهد [۱۲] و از گسترش ترک‌های ناشی از خوردگی جلوگیری کند [۱۳]. علاوه بر این، برخی از محققان کاهش خوردگی فولاد را در بتن الیافی گزارش کردند [۱۴]. اغلب مطالعات انجام شده در زمینه خوردگی در بتن الیافی به مسئله شروع و گسترش خوردگی فولاد پرداخته اند و رفتار سازه‌های تیرهای بتن مسلح حاوی الیاف دچار خوردگی فولادهای طولی کمتر مورد بحث قرار گرفته است [۱۵]. بنابراین، مطالعات بیشتری برای درک بهتر رفتار سازه ای تیرهای ساخته شده از بتن الیافی آسیب دیده از خوردگی فولادهای طولی مورد نیاز است.

در این تحقیق به ارزیابی عملکرد سازه‌های تیرهای بتن مسلح ساخته شده از بتن الیافی تحت شرایط خوردگی فولادهای کششی پرداخته شده است. برای این امر از دو نوع الیاف متفاوت بطور جداگانه در ساخت تیرهای بتن مسلح استفاده شد. تیرها پس از عمل آوری تحت فرآیند خوردگی تسریع شده قرار گرفتند تا مقادیر مختلف خوردگی در فولادهای کششی تیرها ایجاد شود. در نهایت تیرهای دچار خوردگی تحت آزمایش خمشی قرار گرفتند تا رفتار سازه ای آنها ارزیابی شود.

۲- برنامه آزمایشگاه

در این تحقیق پانزده تیر بتن مسلح در مقیاس آزمایشگاهی در سه گروه مختلف ساخته شدند که شامل تیرهای ساخته شده از بتن ساده، بتن حاوی الیاف فولادی و بتن حاوی الیاف پلی اولفین بودند. از هر گروه چهار تیر تحت روش خوردگی تسریع شده قرار گرفتند تا درصدهای مختلف خوردگی ۳٫۵، ۷، ۱۵ و ۳۰ درصد در فولادهای کششی تیرها ایجاد گردد. سپس تیرها تحت آزمایش خمشی قرار گرفتند تا رفتار خمشی تیرهای آسیب دیده از خوردگی ارزیابی شود و تأثیر خوردگی بر پارامترهایی نظیر مقاومت تسلیم، مقاومت نهایی، خیز تسلیم، خیز نهایی و شکل پذیری مشخص شود. پس از پایان آزمایش خمشی، فولادهای دچار خوردگی از نمونه‌ها خارج شده و مقدار جرم از دست رفته آنها به روش وزنی اندازه گیری شدند و با مقادیر بدست آمده از روش نظری مقایسه شد. همچنین با استفاده از روش حجم سنجی تغییرات جرم از دست رفته در طول فولادهای آسیب دیده از خوردگی مورد بررسی قرار گرفت.

۲-۱- مصالح و طرحهای مخلوط

برای تولید مخلوطها از سیمان پرتلند تیپ یک، به همراه ماسه رودخانه ای با مدول نرمی ۲٫۹ و شن طبیعی شکسته با حداکثر اندازه ۱۲٫۵ میلی متر استفاده شد. برای افزایش کارایی مخلوطها، از یک

افزودنی کاهنده آب با پایه پلی کربوکسیلیک اتر استفاده شد. مشخصات الیاف فولادی و پلی اولفین (PO) استفاده شده در جدول (۱) آمده است. جزئیات اختلاطهای استفاده شده در ساخت تیرها در جدول (۲) نشان داده شده است. مخلوط بدون الیاف (M1) برای دستیابی به مقاومت فشاری در حدود ۴۰ مگاپاسکال در نمونه‌های مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری در ۲۸ روز طراحی شد. سایر مخلوط‌های حاوی الیاف (M2 و M3) بر اساس افزودن الیاف به مخلوط M1 توسعه یافتند. برای همه مخلوط‌ها، نسبت آب به سیمان ۰٫۴۲ بوده و در مخلوط‌های حاوی الیاف فولاد و PO، نسبت حجمی کل الیاف به ۱٪ محدود شد تا نگرانی‌های عملی در مورد کارایی در نظر گرفته شود.

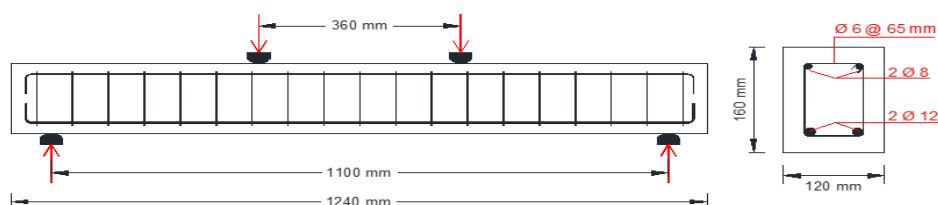
جدول ۱- ویژگی‌های هندسی و مکانیکی الیاف

خصوصیات	الیاف پلی اولفین	الیاف فولادی
طول (mm)	۵۰-۴۸	۵۰
قطر (mm)	۱٫۲۵-۱	۰٫۶
چگالی (gr/cm ³)	۰٫۹۱	۲٫۸۵
مقاومت کششی (MPa)	۵۵۰	۹۵۰
مدول الاستیک (GPa)	۸۰	۲۰۰

جدول ۲- جزئیات نمونه‌های تیر و آماده‌سازی

جدول ۲- جزئیات مخلوط‌ها

کاهنده آب (kg/m ³)	نسبت حجمی الیاف (%)		شن (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	طرح مخلوط
	پلی اولفین	فولادی					
۱/۱۷	-	-	۹۶۵	۸۷۷	۱۶۴	۳۹۰	M1
۱/۱۷	-	۱	۹۶۵	۸۷۷	۱۶۴	۳۹۰	M2
۱/۱۷	۱	-	۹۶۵	۸۷۷	۱۶۴	۳۹۰	M3



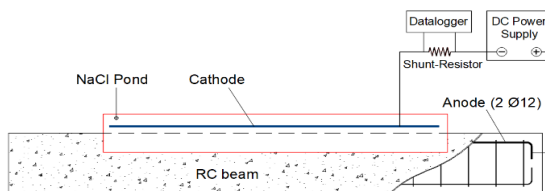
شکل ۱- ابعاد و جزئیات آرماتورگذاری تیرها

شکل (۱) ابعاد و جزئیات فولادگذاری نمونه‌های تیر را نشان می‌دهد. پانزده تیر بتن مسلح - پنج تیر برای هر مخلوط، با ابعاد ۱۲۰ میلی‌متر عرض، ۱۶۰ میلی‌متر در عمق و ۱۲۴۰ میلی‌متر طول - ساخته شدند. دو میله فولادی آجدار شماره ۱۲ به عنوان آرماتور کششی طولی با مقاومت تسلیم ۴۵۰ مگاپاسکال و مقاومت نهایی ۶۸۰ مگاپاسکال استفاده شدند. آرماتورهای فشاری طولی شامل دو میله فولادی آجدار شماره ۸ با مقاومت تسلیم ۳۶۰ مگاپاسکال و مقاومت نهایی ۵۳۰ مگاپاسکال بود. علاوه بر این، برای تامین تسلیح برشی کافی، از میله فولادی صاف با قطر ۶ میلی‌متر با فاصله ۶۵ میلی‌متر استفاده شد.

از آنجایی که این مطالعه فقط به بررسی اثرات خوردگی آرماتورهای کششی می‌پردازد، برای جلوگیری از خوردگی فولادهای برشی، آنها را در محل اتصال با آرماتورهای کششی بوسیله نوار پلاستیکی عایق سازی الکتریکی کردند. در همه تیرها، میلگردهای طولی دارای پوشش بتنی به اندازه ۲۵ میلی‌متری بودند. تیرها در سه لایه بتن ریزی شدند و پس از ۲۴ ساعت قالب برداری شدند. پس از این، تیرها به مدت ۲۸ روز تحت عمل آوری مرطوب قرار گرفتند.

نام گذاری تیرها بر اساس دو پارامتر نوع بتن و درصد خوردگی فولاد کشش انجام شده است، بصوریکه SF، Plain و PF بترتیب نشان دهنده بتن ساده، بتن حاوی الیاف فولادی و بتن حاوی الیاف پلی اولفین است. عدد ذکر شده پس از آن نیز درصد خوردگی فولاد کششی است.

می‌شوند تا پوشش بتنی به‌طور کامل اشباع گردد. سپس تیرها به مدت ۱۴۷ روز تحت فرآیند خوردگی تسریع شده قرار می‌گیرند. پس از شروع فرآیند خوردگی تسریع شده، برای ثابت نگه‌داشتن ترکیبات شیمیایی الکترولیت، محلول آب‌نمک به‌طور هفتگی عوض می‌شود.



شکل ۲- جزئیات دستگاه خوردگی تسریع شده

۲-۴-۲ روش‌های اندازه‌گیری خوردگی آرماتورها

۲-۴-۱- قانون فارادی

مقدار نظری خوردگی می‌تواند توسط قانون فارادی تخمین زده شود. این قانون یک رابطه میان جرم از دست رفته و بار الکتریکی منتقل شده بین الکترودهای آند و کاتد به‌صورت زیر برقرار می‌نماید:

$$M_L = \frac{Aq}{ZF} = \frac{A \int I dt}{ZF} \quad (1)$$

که M_L جرم از دست رفته برحسب گرم، A جرم اتمی آهن (برابر ۵۵/۸ گرم بر مول)، Z ظرفیت شیمیایی آهن (به‌طور رایج برابر ۲ فرض می‌شود)، F ثابت فارادی (برابر ۹۶۵۰۰ کلن بر مول) و q مجموع بارهای الکتریکی منتقل شده در طول آزمایش خوردگی (برحسب کلن یا آمپر× ثانیه) است. مجموع بارهای الکتریکی را می‌توان با ثابت مقدار جریان خوردگی در طول آزمایش به دست آورد.

۲-۴-۲- روش‌های وزن سنجی و حجم‌سنجی

بر اساس مطالعات پیشین تخمین تئوریک جرم از دست رفته بر اثر خوردگی متفاوت از مقدار واقعی آن است [۱۷-۱۸]. عموماً مقدار واقعی جرم از دست رفته را از طریق توزین نمونه دچار خوردگی و مقایسه آن با نمونه سالم به دست می‌آورند که این روش به وزن سنجی مشهور است. برای اندازه‌گیری واقعی خوردگی میله‌ها، ابتدا آن‌ها را از بتن خارج می‌کنند. برای در نظر گرفتن خوردگی آرماتورها در ناحیه نزدیک به دو انتهای حوضچه‌ها، طول بلندتری از آرماتورها در مقایسه با طول حوضچه‌ها (در حدود ۱۰۰۰ میلی‌متر) مورد آزمایش قرار می‌گیرد. سپس، برای زدودن هرگونه ملات و یا محصولات خوردگی، میله‌ها توسط محلول اسید هیدروکلریک و برس سیمی تمیز می‌شوند. پس از وزن کردن نمونه‌های تمیز شده، وزن آن‌ها با نمونه سالم از همان طول، که

۲-۳- تکنیک خوردگی تسریع شده

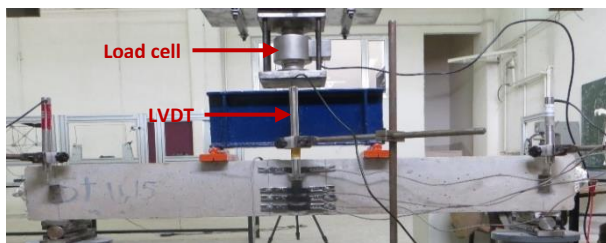
در این تحقیق برای تسریع فرآیند خوردگی آرماتورهای کششی، از یک دستگاه خوردگی تسریع شده استفاده می‌شود که بر اساس اعمال پتانسیل آندی ثابت کار می‌کند. شکل (۲) طرح کلی دستگاه خوردگی تسریع شده را نشان می‌دهد. این دستگاه شامل الکتروود آند، الکتروود کاتد، حوضچه الکترولیت، منبع تغذیه جریان مستقیم و دستگاه ثبت‌کننده داده می‌باشد. بر اساس این فرض که فقط بخشی از آرماتورهای کششی که در مجاورت الکترولیت قرار دارد دچار خوردگی می‌شود، حوضچه حاوی الکترولیت به طول ۸۰۰ میلی‌متر در وسط دهانه مؤثر بر روی وجه کششی تیر نصب می‌شود. برای حفاظت از پوشش بتنی در ناحیه تکیه‌گاهی از آسیب‌های ناشی از خوردگی، طول حوضچه کوتاه‌تر از طول دهانه مؤثر در نظر گرفته شد. عرض و ارتفاع حوضچه الکترولیت به ترتیب برابر ۳۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. وجه تماس بین حوضچه و تیر با چسب سیلیکون آب‌بندی می‌شود. محلول ۳ درصد کلرید سدیم (نمک طعام) به‌عنوان الکترولیت استفاده می‌شود. دو میله فولادی به طول تقریبی ۸۰۰ میلی‌متر به فاصله ۲۰ میلی‌متری از سطح کششی تیر قرار می‌گیرند. در برابر آرماتورهای کششی مدفون در بتن که به‌عنوان آند عمل می‌کنند، این میله‌ها نقش کاتد را ایفا می‌کنند. تنظیمات منبع جریان مستقیم به‌گونه‌ای می‌باشد که در شروع آزمایش اختلاف پتانسیل در حدود ۷ ولت را بین آند و کاتد ایجاد می‌نماید. در مطالعات پیش‌تر روش مشابهی جهت تسریع فرآیند خوردگی توسط محققین مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [۱۳، ۱۶]. با پیشرفت فرآیند خوردگی ترک‌های ناشی از خوردگی در پوشش بتنی تیر ایجاد شده و توسعه می‌یابد. بنابراین، مقاومت الکتریکی پوشش بتنی در طول آزمایش به‌تدریج کاهش می‌یابد. بر اساس قانون اهم ($V=IR$)، در یک اختلاف پتانسیل ثابت، کاهش در مقاومت الکتریکی (R) سبب افزایش جریان (I) می‌شود. افزایش جریان بر اساس قانون فارادی متناظر با افزایش نرخ خوردگی می‌باشد. از این رو در طول زمان آزمایش نرخ خوردگی افزایش می‌یابد. از این منظر، روش خوردگی تسریع شده با پتانسیل ثابت مشابه فرآیند خوردگی طبیعی است. اگرچه نرخ خوردگی در طول آزمایش به‌طور کامل تحت کنترل نیست اما می‌توان با تنظیم مناسب ولتاژ اعمالی بیشینه جریان را به سطح مشخصی محدود کرد.

برای محاسبه مقدار خوردگی در بازه‌های متفاوت از زمان، یک دستگاه ثبت‌کننده داده به‌طور پیوسته هر ۱۰ دقیقه یک‌بار در طول زمان آزمایش جریان گذرنده از آند را ثبت می‌کند. قبل از شروع فرآیند خوردگی تسریع شده، حوضچه‌ها به مدت ۳۰ روز با محلول آب‌نمک پر

همچنین برای افزایش دقت در اندازه‌گیری جرم از دست رفته از یک اهرم با مزیت مکانیکی تقریباً برابر ۳ استفاده شد.

۴-۲- ابزارهای اندازه‌گیری و روش بارگذاری

نحوه بارگذاری و جزئیات چیدمان ابزارهای حسگر به ترتیب در شکل (۴) نمایش داده شده است. تیرها تا مرحله شکست به صورت خمش چهار نقطه‌ای تحت بارگذاری قرار می‌گیرند. تیرها بر روی دو تکیه‌گاه مفصلی ساده با دهانه مؤثر ۱۱۰۰ میلی‌متر قرار می‌گیرند. دو بار نقطه‌ای به‌طور متقارن با فاصله ۱۸۰ میلی‌متر از وسط دهانه مؤثر وارد می‌شوند. نیروی لازم جهت بارگذاری از یک جک هیدرولیکی ۳۰۰ کیلونیوتنی تأمین می‌شود و توسط یک تیر فولادی پخش‌کننده به‌طور مساوی در دو نقطه بر روی تیرها اعمال می‌شود.



شکل ۴- نحوه بارگذاری و چیدمان حسگرهای بار و خیز

مقدار نیروی وارده در طول آزمایش توسط یک حسگر نیرو با دقت تقریبی ۳۰۰ نیوتن اندازه‌گیری می‌شود. خیز وسط دهانه تیرها توسط یک حسگر خیز (LVDT) با دقت ۰/۰۵ میلی‌متر اندازه‌گیری می‌شود. بعلاوه، دو عدد مبدل مشابه نیز برای اندازه‌گیری هرگونه نشست احتمالی تکیه‌گاه‌ها استفاده می‌شود. در وسط دهانه بر روی سطح بتن فشاری، حسگر کرنش سنج مناسب چسبانده می‌شوند تا تغییرات کرنش در بتن فشاری در طول زمان بارگذاری قابل اندازه‌گیری باشد. کرنش سنج‌های مورد استفاده دارای مقاومت ۱۲۰ اهم هستند. کرنش سنج مصرفی برای اندازه‌گیری کرنش در بتن از اندازه ۳۰ میلی‌متر بودند. در طول آزمایش یک سیستم ثبت داده، خروجی‌های حسگرهای مختلف را با نرخ ۱۰ داده بر ثانیه به‌طور لحظه‌ای ثبت می‌کردند.

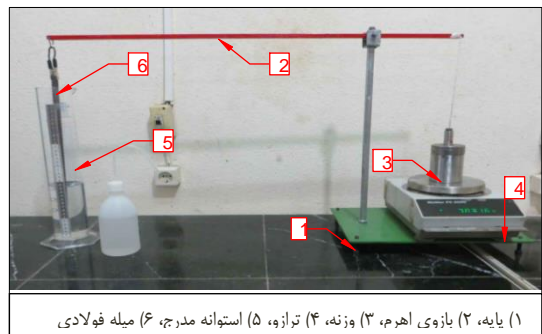
۳- نتایج آزمایشها و بحث پیرامون آنها

۱-۳- اندازه‌گیری جرم فولاد از دست رفته

شکل (۵) نسبت جرم فولاد از دست رفته تخمین زده شده از قانون فارادی به جرم از دست رفته اندازه‌گیری شده به روش وزن سنجی را نشان می‌دهد.

به‌عنوان نمونه مرجع استفاده می‌شود، مقایسه می‌شود. در نهایت مقدار جرم از دست رفته هر میله مشخص می‌گردد.

روش وزن سنجی روشی آسان، مؤثر و قابل‌اعتماد برای تعیین مقدار جرم از دست رفته ناشی از خوردگی می‌باشد، اما محدودیت‌هایی در استفاده از آن وجود دارد. این روش جرم از دست رفته کل را اندازه‌گیری می‌کند و محققان پیشین برای اندازه‌گیری مقدار جرم از دست رفته در بخش‌های مختلف یک میله، باید آن میله را به قسمت‌های کوچک‌تر می‌بریدند که این امر سبب بروز خطا می‌شود [۱۹]. برای رفع این نقایص، یک روش پیشنهاد شده است که در اینجا "روش حجم‌سنجی" نامیده می‌شود. در روش پیشنهادی ابتدا اختلاف بین حجم میله دچار خوردگی و میله مرجع (سالم) اندازه‌گیری می‌شود و سپس، از روی اختلاف حجم مقدار جرم از دست رفته محاسبه می‌شود. دستگاه طراحی شده برای اندازه‌گیری حجم میله‌های دچار خوردگی در قسمت‌های مختلف در شکل (۳) نشان داده شده است.

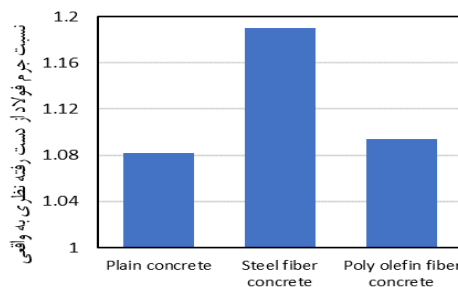


شکل ۳- جزئیات دستگاه روش وزن سنجی

این دستگاه شامل یک استوانه مدرج که با سانتیمتر، یک ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم، یک وزنه، یک بازوی اهرم و یک پایه می‌باشد. روش پیشنهادی بر پایه اصل ارشمیدس کار می‌کند. به‌طوری که تغییرات وزن اندازه نشان داده شده توسط ترازو ارتباط مستقیم با تغییرات حجم بخش غوطه‌ور در آب دارد. این ارتباط به‌راحتی با آویزان کردن چند وزنه استاندارد در انتهای اهرم و ثبت وزن اندازه‌گیری شده توسط ترازو به دست می‌آید. برای اندازه‌گیری حجم یک میله آسیب‌دیده از خوردگی در قسمت‌های مختلف متوالی با طول مشخص، تراز آب در استوانه مدرج به‌صورت منظم در گام‌هایی برابر طول مشخص شده افزایش داده می‌شود و در هر گام تغییرات وزن اندازه‌گیری شده با ترازو ثبت می‌گردد. در این تحقیق تغییر در حجم میله‌های دچار خوردگی در طول‌هایی برابر ۱۰ میلی‌متر اندازه‌گیری شد.

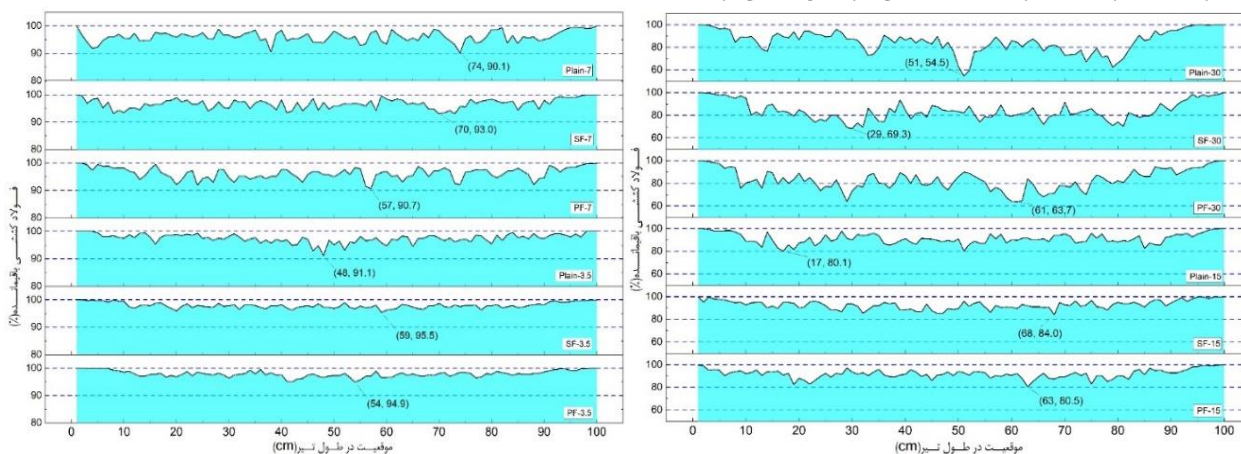
ناشی از این واقعیت باشد که الیاف فولادی متصل به آرماتورهای کششی می توانند بصورت یک آند قربانی شونده عمل کرده [۲۰] و در نتیجه جرم فولاد از دست رفته در آرماتورهای اصلی کاهش یابد.

شکل (۶) تغییرات نسبت فولاد کششی باقیمانده پس از آزمایش خوردگی تسریع شده به مقدار اولیه آن را در طول ناحیه آسیب دیده از خوردگی برای تمام تیرها نمایش می دهند. لازم به توضیح است که مقدار فولاد باقیمانده مربوط به کل فولاد کششی در هر قطعه می باشد که شامل دو میله است. در شکل (۶) قابل مشاهده است که در ترازهای خوردگی پایین خوردگی بصورت عمومی در طول ناحیه تحت آزمایش توزیع شده است. با افزایش تراز خوردگی، خوردگی های محلی شدید با عمق زیاد در برخی نقاط ایجاد شده که در آن محلها سطح مقطع فولاد کششی را بصورت قابل ملاحظه ای کاهش می دهند. قابل ذکر است که در میان نمونه های مختلف، تیرهای ساخته شده از بتن ساده شدیدترین خوردگی محلی و تیرهای ساخته شده از بتن حاوی الیاف فولادی کمترین خوردگی محلی را دارند.



شکل ۵- متوسط نسبت جرم از دست رفته فولاد نظری به جرم از دست رفته فولاد اندازه گیری شده به روش وزن سنجی

همانطور که دیده می شود، قانون فارادی در قیاس با روش وزن سنجی همواره مقدار بیشتری از جرم از دست رفته را تخمین می زند و بطور متوسط در نمونه های بتن ساده، بتن حاوی الیاف فولادی و بتن حاوی الیاف پلی اولفین نسبت جرم فولاد از دست رفته تخمین زده شده به مقدار واقعی آن بترتیب در حدود ۱/۰۸۲، ۱/۱۹۰ و ۱/۰۹۴ بوده است. بیشترین اختلاف بین نتایج روشهای نظری و اندازه گیری وزنی در نمونه های حاوی الیاف فولادی مشاهده می شود. این امر می تواند



شکل ۶ - تغییرات مقطع فولاد کششی باقیمانده در طول ناحیه دچار خوردگی

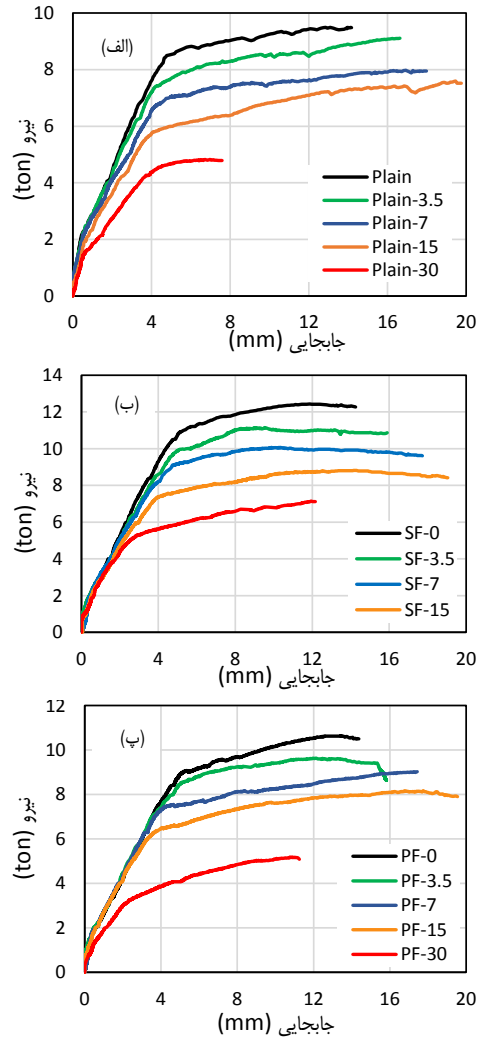
۲-۳- ارزیابی سازه ای تیرهای آسیب دیده از خوردگی

و مقاومت نهایی تیرها کاسته می شود که این نتیجه توسط محققین پیشین نیز تأیید شده است [۲۱، ۲۲].

شکل های (۷) (الف تا پ) نمودارهای بار-خیز تیرهای آسیب دیده از خوردگی فولاد کششی به ترتیب ساخته شده از مخلوط بتن بدون الیاف، مخلوط بتن حاوی الیاف فولادی و مخلوط بتن حاوی الیاف پلی اولفین را نشان می دهد. به عنوان یک روند کلی که در تمامی تیرها مشهود است، با افزایش درصد خوردگی فولاد کششی از مقاومت تسلیم

به ترتیب برابر ۲۲،۱۱، ۳۱ و ۴۲ درصد می‌گردد. در گروه تیرهای حاوی الیاف پلی اولفین، ایجاد خوردگی فولاد کششی در حدود ۳/۵، ۷، ۱۵ و ۳۰ درصد، در مقایسه با تیر سالم مشابه سبب کاهش مقاومت تسلیم به ترتیب برابر ۷، ۱۷، ۲۹ و ۶۶ درصد و کاهش مقاومت نهایی به ترتیب برابر ۱۰، ۱۴، ۲۵ و ۵۳ درصد می‌گردد. کاهش مقاومت‌های تسلیم و نهایی تیرهای آسیب‌دیده از خوردگی فولاد کششی به علت کاهش سطح مقطع فولادهای کششی می‌باشد. قابل توجه است که در درصد خوردگی مشابه تیرهای ساخته شده از بتن بدون الیاف میزان افت بیشتری را در مقاومت‌ها از خود نشان می‌دهند که این امر را می‌توان به مشارکت الیاف در فرآیند باربری در کنار فولاد کششی نسبت داد. البته در مورد تیرهای حاوی الیاف فولادی یک عامل دیگر نیز می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. الیاف فولادی می‌توانند به‌عنوان یک قربانی شونده در فرآیند خوردگی فولادهای کششی مداخله نمایند و مقدار جرم از دست رفته فولادهای کششی را کاهش دهند.

ارتباط میان درصد خوردگی و مقاومت‌های تسلیم و نهایی برای تیرهای مختلف به ترتیب در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است. در این شکل مقاومت‌ها نسبت به نمونه تیر مشابه سالم نرمال‌سازی شده‌اند و درصد خوردگی ذکر شده بر اساس مقدار نظری به دست آمده از قانون فارادی می‌باشند. بررسی سختی تیرهای آسیب‌دیده از خوردگی در مرحله پیش از تسلیم فولادهای کششی نشان می‌دهد که با افزایش درصد خوردگی فولادهای کششی از سختی تیرها کاسته می‌شود. به‌عنوان مثال در مقایسه با تیر Plain-0 و Plain-15 مقدار سختی ۳۰-۳۰ درصد کاهش داشته است. این امر در مورد تیرهای ساخته شده از بتن الیافی نیز صدق می‌کند. به‌عنوان مثال، در مقایسه با تیر SF-0 و SF-15 مقدار سختی ۳۰-۳۰ درصد کاهش داشته است. همچنین، تیرهای PF-15 و PF-30 در مقایسه با نمونه تیر سالم مشابه، افت سختی به ترتیب برابر ۱۲ و ۳۰ درصد را ثبت کرده‌اند. افت سختی تیرهای آسیب‌دیده از خوردگی فولاد کششی به علت تضعیف از دست رفتن پیوند میان بتن و فولاد می‌باشد که با افزایش میزان خوردگی شدت می‌یابد. البته مقدار کاهش سختی در تیرهای حاوی الیاف کمتر می‌باشد، زیرا بر اساس مطالعات پیشین، الیاف در تقویت باند میان فولاد و بتن مؤثر می‌باشند [۲۳]. بررسی بیشینه خیز نهایی تیرهای آسیب‌دیده از خوردگی نشان می‌دهد که تا درصد خوردگی ۱۵ درصد با افزایش درصد خوردگی افزایش خیز نهایی تیرها مشاهده می‌شود و در نسبت خوردگی ۳۰ درصد کاهش شدید ظرفیت خیز تیرها اتفاق می‌افتد.

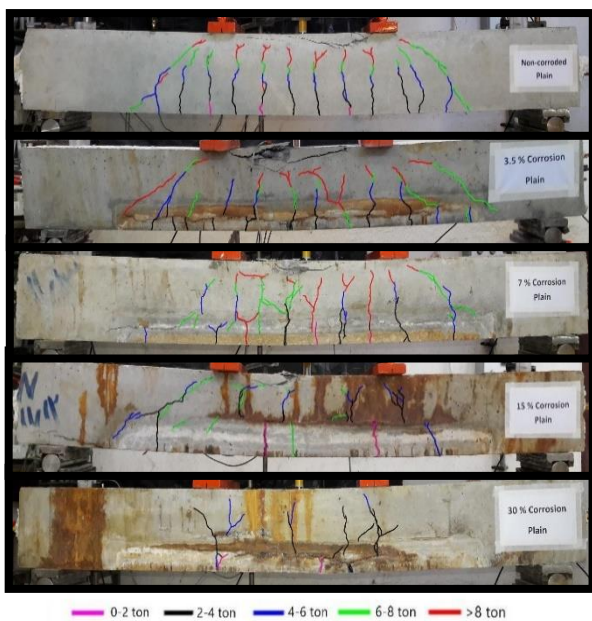


شکل ۷- نمودار نیرو-خیز تیرهای با درصد‌های مختلف خوردگی فولاد کششی ساخته شده از: (الف) بتن ساده، (ب) بتن حاوی الیاف فولادی و (پ) بتن حاوی الیاف پلی اولفین

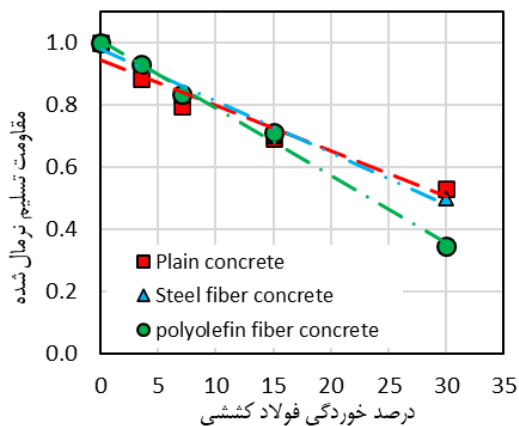
به‌عنوان مثال در تیرهای ساخته شده از مخلوط بتن بدون الیاف، ایجاد خوردگی فولاد کششی در حدود ۳/۵، ۷، ۱۵ و ۳۰ درصد، در مقایسه با تیر سالم مشابه سبب کاهش در مقاومت تسلیم به ترتیب برابر ۱۲، ۲۰، ۳۱ و ۴۷ درصد و کاهش در مقاومت نهایی به ترتیب برابر ۴، ۱۶، ۲۱، ۲۹ درصد می‌گردد. به‌طور مشابه در گروه تیرهای حاوی الیاف فولادی، ایجاد خوردگی فولاد کششی در حدود ۳/۵، ۷، ۱۵ و ۳۰ درصد، در مقایسه با تیر سالم مشابه سبب کاهش مقاومت تسلیم به ترتیب برابر ۶، ۱۷، ۳۰ و ۵۰ درصد و کاهش مقاومت نهایی

تیرها را به شدت کاهش می‌دهد. قابل ذکر است در تمام تیرهای با سطح خوردگی ۱۵ درصد و پایین‌تر مود شکست به صورت شکست بتن فشاری پس از تسلیم فولاد کششی بوده است که در تیرهای با سطح خوردگی ۳۰ درصد مود شکست به گسیختگی فولادهای کششی پس از مرحله تسلیم، بدون شکست بتن فشاری تغییر می‌یابد.

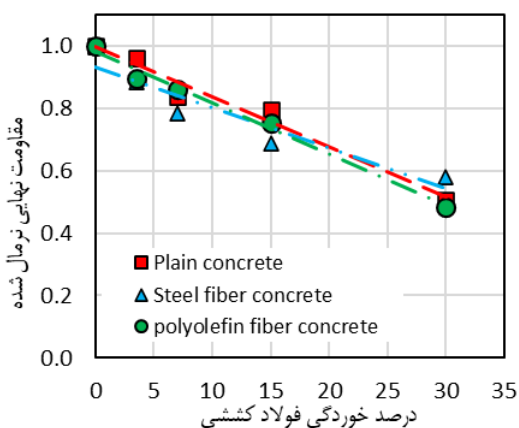
شکل‌های (۱۰) الی (۱۲) الگوهای ترک خوردگی تیرهای مختلف را پس از بارگذاری خمشی نشان می‌دهد. توزیع ترک‌های خمشی در بخش میانی دهانه و ترک‌های خمشی-برشی در بخش‌های کناری رفتار مناسب خمشی تیرها را نشان می‌دهد. البته می‌توان مشاهده نمود که با ایجاد خوردگی و افزایش سطح خوردگی از تعداد ترک‌های خمشی کاسته می‌شود و فاصله ترک‌ها از یکدیگر بیشتر می‌شود که تأیید کننده از دست رفتن پیوند میان بتن و فولاد کششی است. در تیرهای حاوی الیاف با درجات مختلف خوردگی فولاد، به علت تقویت پیوند بین بتن و فولاد، نسبت به تیر ساخته شده از بتن معمولی، تعداد ترک‌های بیشتری را می‌توان مشاهده کرد. اگرچه در درجات بالای خوردگی این اثر کم‌تر مشاهده می‌گردد و در درجات پایین‌تر خوردگی واضح‌تر است.



شکل ۱۰- الگوی ترک خوردگی تیرهای ساخته شده از بتن بدون الیاف با درصدهای مختلف خوردگی فولاد کششی

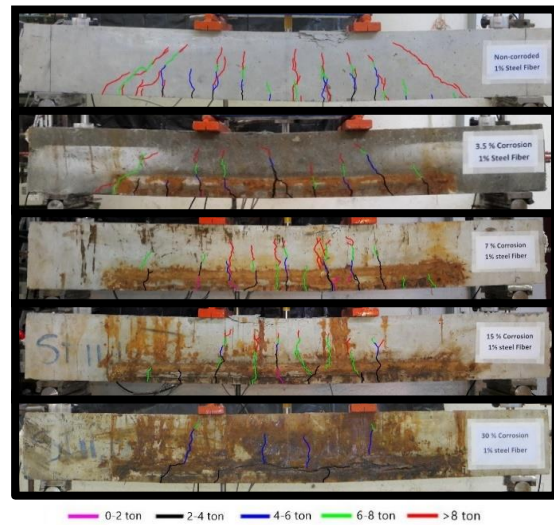


شکل ۸- تغییرات مقاومت تسلیم نرمال شده در برابر درصد خوردگی

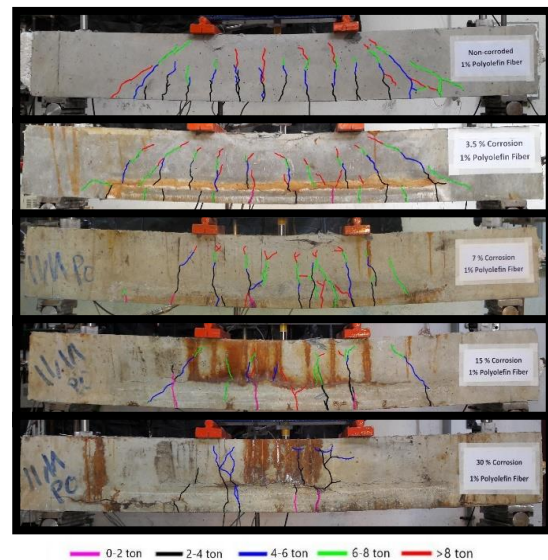


شکل ۹- تغییرات مقاومت نهایی نرمال شده در برابر درصد خوردگی

به‌عنوان مثال تیرهای Plain-15 و SF-15 و PF-15 نسبت به نمونه تیرهای متناظر سالم افزایش ظرفیت خیز به ترتیب در حدود ۳۹، ۳۵ و ۳۶ درصد را نشان می‌دهند درحالی‌که تیرهای Plain-30، SF-30 و PF-30 کاهش ظرفیت خیز نهایی به ترتیب برابر ۴۶، ۴۴ و ۲۱ درصد را ثبت می‌کنند. علت این رفتار را می‌توان به این امر نسبت داد که چون تیرها در حالت بدون بار تحت فرآیند خوردگی تسریع شده قرار گرفتند شکل کلی خوردگی فولاد کششی تا سطح خوردگی ۱۵ درصد به صورت خوردگی عمومی می‌باشد که سبب کاهش نسبت فولاد کششی در تیرهای آسیب‌دیده از خوردگی شده و در نتیجه ظرفیت خیز نهایی افزایش می‌یابد. در مقابل در مقدار خوردگی ۳۰ درصد، با توسعه خوردگی‌های شدید موضعی تمرکز تنش ایجاد شده در این مناطق سبب گسیختگی فولادهای کششی تحت بار می‌شود که ظرفیت خیز نهایی



شکل ۱۱- الگوی ترک خوردگی تیرهای ساخته شده از بتن حاوی الیاف فولادی با درصد‌های مختلف خوردگی فولاد کششی



شکل ۱۲- الگوی ترک خوردگی تیرهای ساخته شده از بتن حاوی الیاف پلی اولفین با درصد‌های مختلف خوردگی فولاد کششی

۳-۳- شکل‌پذیری تیرهای آسیب‌دیده از خوردگی

به‌طور کلی، برای تیرهای بتن مسلح چندین شاخص جهت ارزیابی شکل‌پذیری پیشنهاد شده است که رایج‌ترین آن‌ها به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (۲)$$

که Δ_u ، خیز متناظر با بار نهایی و Δ_y ، خیز متناظر با بار تسلیم می‌باشد. یکی دیگر از روش‌های ارزیابی شکل‌پذیری اعضای سازه‌ای، روش مبتنی بر انرژی جذب شده توسط عضو استفاده می‌شود که شاخص مورد استفاده در آن به‌صورت زیر می‌باشد [۲۴]:

$$\mu_E = \frac{1}{2} \left(\frac{E_t}{E_e} + 1 \right) \quad (۳)$$

که E_t ، انرژی جذب شده توسط تیر تا حالت نهایی (مساحت کل زیر نمودار-بار خیز) و E_e ، انرژی الاستیک جذب شده توسط تیر می‌باشد. بر اساس پیشنهاد Naaman و Jeong [۲۵]، برای تعیین انرژی الاستیک ذخیره شده در تیر می‌توان از منحنی باربرداری استفاده نمود و یا در صورت عدم وجود آن از فرمول زیر استفاده نمود:

$$E_e = \frac{P_u^2}{2S} \quad (۴)$$

که P_u و S به ترتیب بار نهایی تیر و شیب نمودار در حالت باربرداری می‌باشد. در حالتی که شاخه باربرداری نمودار موجود نباشد، مقدار S به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S = \frac{P_y - P_c}{\Delta_y - \Delta_c} \quad (۵)$$

که P_y ، P_c ، Δ_y و Δ_c به ترتیب بار تسلیم، بار ترک‌خوردگی، خیز متناظر با بار تسلیم و خیز متناظر با بار ترک‌خوردگی می‌باشند.

در شکل (۱۳) شاخص‌های شکل‌پذیری بر اساس روابط (۲) و (۳) برای تیرهای آسیب‌دیده از خوردگی محاسبه و رسم شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، برای تیرهای ساخته شده از بتن بدون الیاف تا مقدار خوردگی ۱۵ درصد فولاد کششی، شاخص‌های

نسبت به تیرهای ساخته شده از بتن ساده دارای مقاومت بیشتری می باشند که الیاف فولادی تاثیرگذاری مثبت بیشتری را از خود نشان می دهند.

۳- با افزایش سطح خوردگی فولاد کششی از سختی تیر بتن مسلح کاسته می شود. استفاده از الیاف پلی اولفین و فولادی در مخلوط بتن تیر سبب کاهش افت سختی ناشی از خوردگی می شود.

۴- در تمامی تیرهای بتن مسلح ساخته شده از بتن الیافی و ساده، خوردگی فولاد کششی تا سطح ۱۵ درصد سبب افزایش خیز نهایی وسط دهانه تیر دچار خوردگی نسبت به تیر سالم می گردد که نشانگر گسترش خوردگی عمومی فولادهای کششی است. مود خرابی مشاهده شده در این تیرها شکست بتن فشاری در بخش میانی دهانه بود. اما در سطح خوردگی ۳۰ درصد کاهش تغییر شکل نهایی تیرها مشاهده می شود که نشانگر توسعه خوردگی موضعی در فولاد کششی است. مود خرابی در این تیرها به گسیختگی فولاد کششی بدون شکست بتن فشاری تغییر می یابد.

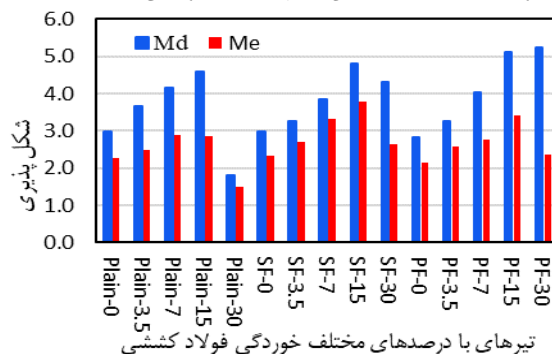
۵- بر اساس شاخص های شکل پذیری مبتنی بر خیز و انرژی، با توسعه خوردگی عمومی (تا سطح خوردگی ۱۵ درصد) افزایش شکل پذیری تیرهای بتن مسلح دچار خوردگی مشاهده می شود که با توسعه خوردگی موضعی (سطح خوردگی ۳۰ درصد) افت قابل توجهی در شاخص های شکل پذیری ایجاد می شود.

۶- افزودن الیاف به بتن تیرها می تواند تاثیری مثبت بر شکل پذیری تیرها، خصوصاً در سطوح بالای خوردگی، داشته باشد. این تاثیرات مثبت می تواند از طریق افزایش باربری و انرژی قابل جذب توسط تیرها و همچنین مداخله در الگوی خوردگی فولاد های کششی ایجاد شود.

مراجع

- [1] Abbasi Parvin Y, Moradi Shaghaghi T, Pourbaba M, Mirrezaei S, Zandi Y, A. Study on the Flexural-Shear Behavior of Concrete Beams and Comparison of the Experimental Test Results with the Prediction of Different Codes. Analysis of Structure and Earthquake. 2021;18(1): 27-38
- [2] Al-Sulaimani G, Kaleemullah M, Basunbul I. Influence of corrosion and cracking on bond behavior and strength of reinforced concrete members. Structural Journal. 1990;87(2):220-231.
- [3] Uomoto T, Misra S. Behavior of concrete beams and columns in marine environment when corrosion

شکل پذیری افزایش می یابند و پس از آن دچار افت شدید می شوند. شکل پذیری تیرهای دچار خوردگی ساخته شده از بتن حاوی الیاف نیز روندی مشابه را نشان می دهد. البته باید توجه داشت که افت ایجاد شده در مقدار خوردگی بالاتر از ۱۵ درصد در تیرهای ساخته شده از بتن الیافی از شدت کمتری برخوردار است. به طور کلی با توجه به ایجاد خوردگی نسبتاً عمومی در مقدار خوردگی های ۱۵ درصد و پایین تر که با افزایش خیز نهایی و کاهش بار نهایی تیرها همراه است، شاخص شکل پذیری مبتنی بر خیز (رابطه ۲) نسبت به تیر سالم افزایش قابل توجهی را نشان می دهند. در مقابل در شاخص شکل پذیری مبتنی بر انرژی (رابطه ۳) افزایش به مقدار بسیار کمتری دیده می شود که به دلیل کاهش انرژی جذب شده توسط تیر می باشد. در تیرهای با مقدار خوردگی ۳۰ درصد، به دلایلی توسعه خوردگی موضعی در فولاد کششی، مقدار بار نهایی و جابجای متناظر با آن به طور قابل توجهی کاهش می یابد. بنابراین شاخص های مبتنی بر خیز کاهش چشمگیری می یابد. قابل ذکر است که در تیرهای با بتن الیافی با مقدار خوردگی ۳۰ درصد، به دلیل عملکرد الیاف در کاهش مقدار خوردگی فولاد و همچنین نقش باربری آن ها، مقدار شکل پذیری آن ها بر مبنای تمامی شاخص ها بیشتر از نمونه تیر ساخته شده از بتن سالم با درصد خوردگی مشابه است.



شکل ۱۳- مقدار شاخص های شکل پذیری در تیرهای آسیب دیده از خوردگی

۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده موارد زیر قابل بیان است :

۱- تیرهای بتن مسلح ساخته شده از بتن حاوی الیاف فولادی و یا پلی اولفین در مقایسه با تیر بتن مسلح ساخته شده از بتن ساده دارای سختی و مقاومت نهایی بیشتری می باشند که این امر در مورد الیاف فولادی بسیار ملموس تر می باشد. در مقابل استفاده از الیاف خیز نهایی تیرها را کاهش می دهد.

۲- در تمام تیرهای دچار خوردگی فولاد کششی، با افزایش درصد خوردگی مقاومت تسلیم و نهایی تیرها کاهش می یابد. تیرهای حاوی الیاف فولادی و یا پلی اولفین در سطح خوردگی فولاد کششی مشابه

- beams under loading and steel corrosion. *Construction and Building Materials*. 2018;184:502-514.
- [15] Hossain K, Hossain M, Manzur T. Structural performance of fiber reinforced lightweight self-compacting concrete beams subjected to accelerated corrosion. *Journal of Building Engineering*. 2020;30:101291.
- [16] Yoon S, Wang K, Weiss WJ, Shah SP. Interaction between loading, corrosion, and serviceability of reinforced concrete. *Materials Journal*. 2000;97(6):637-644.
- [17] Shaikh FUA, Mihashi H, Kobayakawa A. Corrosion durability of reinforcing steel in cracked high-performance fiber-reinforced cementitious composite beams. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2015;27(8):04014228.
- [18] Hariche L, Ballim Y, Bouhicha M, Kenai S. Effects of reinforcement configuration and sustained load on the behaviour of reinforced concrete beams affected by reinforcing steel corrosion. *Cement and Concrete Composites*. 2012;34(10):1202-1209.
- [19] Malumbela G, Alexander M, Moyo P. Serviceability of corrosion-affected RC beams after patch repairs and FRPs under load. *Materials and structures*. 2011;44(1):331-349.
- [20] Lawler JS, Zampini D, Shah SP. Microfiber and macrofiber hybrid fiber-reinforced concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2005;17(5):595-604.
- [21] Tachibana Y, Maeda K, Kajikawa Y, Kawamura M. Mechanical behaviour of RC beams damaged by corrosion of reinforcement. *Elsevier Applied Science*. 1990;402:178-187.
- [22] Huang R, Yang C. Condition assessment of reinforced concrete beams relative to reinforcement corrosion. *Cement and Concrete Composites*. 1997;19(2):131-137.
- [23] Mihashi H, Ahmed SFU, Kobayakawa A. Corrosion of reinforcing steel in fiber reinforced cementitious composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2011;9(2):159-167.
- [24] Abdelrahman AA, Rizkalla SH. Serviceability of concrete beams prestressed by carbon. *ACI Structural Journal*. 1997;94(4):447-454.
- of reinforcing bars takes place. *Special Publication*. 1988;109:127-146.
- [4] Ting S-C, Nowak AS. Effect of reinforcing steel area loss on flexural behavior of reinforced concrete beams. *Structural Journal*. 1991;88(3):309-14.
- [5] Cabrera JG. Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion. *Cement and concrete composites*. 1996;18(1):47-59.
- [6] Campione G. Simplified flexural response of steel fiber-reinforced concrete beams. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2008;20(4):283-293.
- [7] Li Z, Zhu H, Du C, Gao D, Yuan J, Wen C. Experimental study on cracking behavior of steel fiber-reinforced concrete beams with BFRP bars under repeated loading. *Composite Structures*. 2021;267:113878.
- [8] Slater E, Moni M, Alam MS. Predicting the shear strength of steel fiber reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*. 2012;26(1):423-436.
- [9] Dong J, Zhao Y, Wang K, Jin W. Crack propagation and flexural behaviour of RC beams under simultaneous sustained loading and steel corrosion. *Construction and Building Materials*. 2017;151:208-219.
- [10] 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.
- [11] Berrocal CG, Löfgren I, Lundgren K, Tang L. Corrosion initiation in cracked fibre reinforced concrete: influence of crack width, fibre type and loading conditions. *Corrosion Science*. 2015;98:128-139.
- [12] Haddad RH, Ashteyate AM. Role of synthetic fibers in delaying steel corrosion cracks and improving bond with concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2001;28(5):787-793.
- [13] Sahmaran M, Li VC, Andrade C. Corrosion resistance performance of steel-reinforced engineered cementitious composite beams. *ACI Materials Journal*. 2008;105(3):243-250.
- [14] Sadrinejad I, Ranjbar MM, Madandoust R. Influence of hybrid fibers on serviceability of RC

[25] Taerwe L, editor. Structural ductility of concrete beams prestressed with FRP tendons. Proceedings of the second international RILEM symposium: In Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete Structures. Florida: CRC Press; 1995; (1st ed.).