

مطالعه‌ی آزمایشگاهی روی اثر خوردگی بر رفتار تنش-کرنشی ستون‌های دایره‌ای شکل مسلح

امین کاشی^۱، علی‌اکبر رضانیانپور^۲، فرامرز مودی^{۳*}، سید محسن خیراندیش^۴

۱. دانشجوی دکترا، دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲. استاد، دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳. استادیار، مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۴. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

در سازه‌های بتنی مسلح نفوذ یون‌های کلرید موجود در محیط در حضور رطوبت و اکسیژن موجب آغاز پدیده‌ی خوردگی خواهد شد. روند خوردگی موجب تولید محصولاتی داخل بتن خواهد شد که می‌توانند ۵ الی ۶ برابر افزایش حجم دهند و به تبع آن با ایجاد ترک، پوشش روی میلگردها را تخریب کنند. در این تحقیق به منظور مطالعه‌ی پدیده‌ی خوردگی در ستون‌های بتنی مسلح، ابتدا نمونه‌های استوانه‌ای مسلح به ابعاد ۱۵×۳۰ سانتیمتر آماده شد و سپس بر اساس قانون فارادی خوردگی تسریع شده در آزمایشگاه تا کاهش جرم ۱۵٪ اعمال گردید. آزمایش مقاومت فشاری در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه امیرکبیر به منظور تعیین رفتار تنش-کرنش نمونه‌ها بر روی آن‌ها انجام شد. نتایج نشان داد خوردگی میلگردها بر روی منحنی‌های تنش-کرنش تأثیر منفی داشته و موجب کاهش ۲۸٪ مقاومت نهایی، ۱۴٪ کرنش نهایی، ۲۰٪ مدول الاستیک و ۲۳٪ شکل‌پذیری شده است.

واژه‌های کلیدی: بتن خورده شده، خوردگی تسریع شده، منحنی تنش-کرنش، شکل‌پذیری

۱- مقدمه

عوامل متعددی دوام سازه‌های بتنی مسلح قرار گرفته در محیط‌های دریایی را به چالش کشیده‌اند. مطالعات فراوانی در این زمینه صورت گرفته که غالباً نفوذ یون‌های کلرید موجود در آب دریا به داخل بتن را عامل اصلی کاهش دوام این سازه‌ها دانسته‌اند. با افزایش غلظت یون‌های کلرید در سطح میلگردها و رسیدن آن به مقدار آستانه، لایه‌ی محافظ روی میلگردها از بین رفته و خوردگی آغاز خواهد شد. با ادامه‌ی فرآیند خوردگی داخل بتن، علاوه بر کاهش سطح مقطع میلگردها، محصولات تولید شده ناشی از خوردگی می‌توانند ۵ الی ۶ برابر افزایش حجم دهند و با افزایش فشار داخلی، پوشش بتن ترک خورده و در ادامه دچار پوسته‌شدگی و جداشدگی خواهد شد. این موضوع موجب کاهش عمر سرویس‌دهی سازه‌های بتنی شده و نتیجتاً هزینه‌های تعمیر و تقویت آن‌ها را افزایش خواهد داد [۱-۴]. مطالعات زیادی بر روی تأثیر میزان خوردگی میلگردهای داخلی بر پارامترهای مکانیکی سازه‌های بتنی مسلح انجام شده که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره خواهد شد:

در یک مطالعه با اعمال خوردگی به میزان ۰.۵٪ و ۲.۷۵٪ در میلگردهای کششی تیرها، مشخص شد مقاومت نهایی خمشی آن‌ها به ترتیب ۶٪ و ۱۸٪ کاهش داشته است. همچنین کاهش ۱۱٪ و ۳۱٪ به ترتیب در شکل‌پذیری تیرها مشاهده شده است [۵]. در تحقیق دیگری خوردگی در چهار بازه‌ی بین ۰٪ تا ۵٪، بین ۵٪ تا ۱۵٪، بین ۱۵٪ تا ۵۰٪ و بیشتر از ۵۰٪ به میلگردهای کششی تیرهای بتنی اعمال شد. مقاومت نهایی خمشی تیرها در بازه‌های فوق به ترتیب ۳٪، ۹٪، ۲۰٪ و ۲۳٪ کاهش داشته است [۶]. بررسی دیگری که بر روی اثر میزان خوردگی میلگردهای کششی بر رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح انجام شد، نشان داد درصدهای خوردگی ۵، ۱۰ و ۱۵ موجب کاهش میزان ظرفیت خمشی به ترتیب به مقدار ۱۴٪، ۱۲٪ و ۲۸٪ شده است. همچنین اعمال خوردگی ۱۵٪ به نمونه‌ها موجب کاهش تغییر مکان نهایی وسط تیر و شکل‌پذیری به ترتیب به میزان ۴۱٪ و ۱۱٪ گردیده است [۷]. مطالعه بر روی رفتار لرزه‌ای ستون‌های بتنی با سطح مقطع مستطیلی نشان داد خوردگی میلگردها و کاهش وزن آن‌ها به میزان ۱۶/۸٪ موجب کاهش ۹٪ و ۱۸٪ به ترتیب در بار نهایی لرزه‌ای و شکل‌پذیری شده است. همچنین تغییر مکان نهایی به مقدار ۳۷٪ کاهش داشته است [۸]. تحقیق صورت گرفته بر روی اثر خوردگی میلگردهای ستون‌های بتنی بر منحنی‌های نیرو-ممان آن‌ها نشان داد ظرفیت خمشی ستون‌ها در یک بار محوری ثابت معادل ۴۰ درصد ظرفیت نهایی آن‌ها می‌تواند از ۶ تا ۱۰۰ درصد کاهش یابد. این مقدار تقلیل ظرفیت وابسته به سطح خوردگی میلگردها بوده که در این تحقیق ۴/۲۵٪ تا ۷/۷۵٪ متغیر بوده است [۹]. در تحقیق دیگری که بر روی رفتار فشاری ستون‌های بتن مسلح با مقطع دایره صورت گرفت مشخص شد پس از اعمال خوردگی برابر ۱۰ و ۲۵ درصد کاهش وزن میلگردها، مقاومت فشاری ستون‌ها به ترتیب به میزان ۳ و ۱۲ درصد کاهش یافته است. همچنین مقدار کرنش نهایی محوری نیز به ترتیب ۲ و ۵ درصد کاهش داشته است. به علاوه اینکه، ۱/۵٪ و ۹٪ کاهش به ترتیب در مقدار شکل‌پذیری نمونه‌ها تحت ۱۰ و ۲۵ درصد خوردگی نیز مشاهده شده است [۱۰].

مطالعات پیشین حاکی از اثر منفی پدیده‌ی خوردگی بر مقاومت نهایی، کرنش نهایی و شکل‌پذیری سازه‌های بتنی مسلح است. با توجه به سازه‌های متعدد قرار گرفته در منطقه‌ی حاشیه‌ای خلیج‌فارس، در این تحقیق با قرار دادن نمونه‌های فشاری مسلح در محلول آب نمک با غلظت مشابه این منطقه و اعمال فرآیند خوردگی تسریع شده، سعی شده است شرایطی مشابه با آن‌چه در ناحیه‌ی خلیج‌فارس در حال وقوع است شبیه‌سازی شود. پس از اعمال خوردگی، تغییرات مقاومت، کرنش، مدول و شکل‌پذیری نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت.

۲- برنامه‌ی آزمایشی

۲-۱- مواد و مصالح مورد استفاده

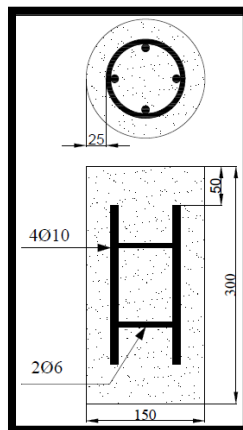
بتن مصرفی در این تحقیق متشکل از سیمان، آب، درشت‌دانه و ریزدانه است. سیمان مصرفی از نوع ۲ تهیه شده از کارخانه‌ی سیمان تهران بوده و همچنین آب استفاده شده در بتن از آب قابل شرب شهر تهران تهیه شده است. سنگدانه‌ی مصرفی از منطقه‌ی شهریار استان تهران تهیه شده که شامل شن درشت‌دانه با حداکثر اندازه ۱۹mm، شن ریزدانه و ماسه است. طرح اختلاط بتن برای رسیدن به مقاومت ۲۸ روزه‌ی 30MPa بر اساس آیین‌نامه‌ی طرح اختلاط ملی [۱۱] انجام شده است. مقادیر بدست آمده هر یک از اجزای بتن در جدول ۱ آورده شده است. مقاومت فشاری بتن طبق استاندارد ASTM C39/C39M [۱۲] اندازه‌گیری شده و مقدار آن برابر 29.8MPa بدست آمده است. در ساخت نمونه‌ها از میلگردهای آج‌دار AIII به قطر ۱۰ میلیمتر و همچنین از میلگردهای بدون آج AI با قطر ۶ میلیمتر استفاده شده است. سطح میلگردها قبل از استفاده داخل بتن به روش مکانیکی تمیز شده تا عاری از هرگونه آلودگی سطحی شوند.

جدول ۱- مشخصات بتن مصرفی

اسلامپ (mm)	نسبت آب به سیمان	مقدار سیمان (kg/m^3)	مقدار شن (kg/m^3)	مقدار ماسه (kg/m^3)	مقدار آب (kg/m^3)	مقاومت ۷ روزه (MPa)	مقاومت ۲۸ روزه (MPa)
۵۵	۰/۵۱	۳۴۱	۸۰۴	۹۷۴	۱۹۹	۱۷	۲۹/۸

۲-۲- ساخت و آماده‌سازی نمونه‌ها

در این مطالعه مدل کردن ستون‌های بتن مسلح با ساخت نمونه‌های استوانه‌ای مسلح به ابعاد 15×30 cm انجام شده است. در هر نمونه تعداد ۴ میلگرد آج‌دار نمره ۱۰ به طول ۲۰ cm به عنوان میلگردهای طولی و دو عدد میلگرد نمره ۶ بدون آج به عنوان خاموت استفاده شده که به منظور ارتباط الکتریکی بهتر آن‌ها از اتصال جوشی برای ساخت شبکه‌ی میلگردها استفاده شده است. پس از آماده‌سازی شبکه میلگردها و وزن کردن آن‌ها، سیم مسی به یکی از میلگردهای طولی اتصال داده شد به نحوی که سر دیگر سیم از نمونه‌های بتنی بیرون بماند. این کار به منظور اعمال خوردگی تسریع شده به نمونه‌های مسلح انجام شده که فرآیند آن در ادامه توضیح داده شده است. بتن با طرح مخلوط مد نظر تهیه شد و سپس بتن‌ریزی در قالب‌های 15×30 cm انجام گرفت. بتن‌ریزی برای هر نمونه در سه لایه صورت گرفت که پس از ریختن هر لایه عملیات تراکم به کمک میزان لرزان انجام شد. شبکه‌ی میلگردها در داخل قالب به نحوی قرار گرفت که از بالا و پایین دارای پوشش بتنی ۵ cm و از اطراف دارای پوشش بتنی ۲/۵ cm باشند. پس از فرآیند بتن‌ریزی سطح نمونه‌ها با پوشش پلاستیکی پوشیده شد و به مدت ۲۴ ساعت در قالب نگهداری شدند. بعد از باز کردن قالب‌ها عمل‌آوری به مدت ۲۸ روز با قرار دادن آن‌ها در محلول آب آهک اشباع انجام شد. شکل ۱ (الف) نمای شماتیک از نمونه‌های بتنی مسلح آورده شده، همچنین شکل ۱ (ب) و (ج) نحوه‌ی آماده‌سازی نمونه‌ها را نشان داده است.



(الف)



(ب)

(ج)

شکل ۱- (الف) نمای شماتیک از نمونه‌های بتنی مسلح (ب) بتن‌ریزی نمونه‌های بتنی مسلح (ج) نمونه‌های بتن مسلح بعد از قالب‌گیری

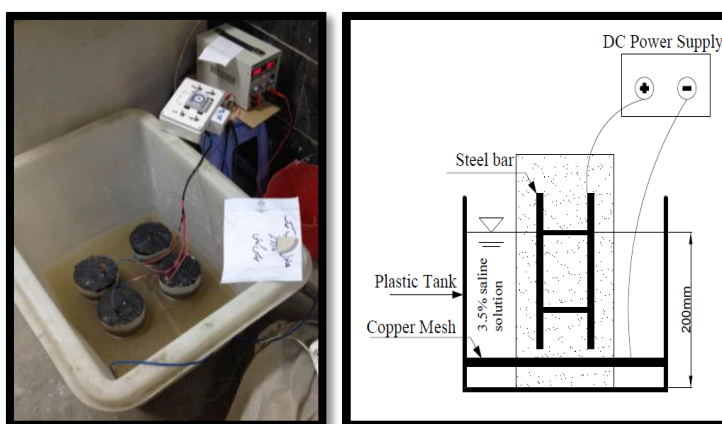
۲-۳- اعمال خوردگی تسریع شده

در حالت طبیعی فرآیند خوردگی روند کندی دارد و ممکن است سالها به طول بیانجامد. بنابراین با توجه به کمبود وقت جهت انجام آزمایش‌ها روشی در نظر گرفته شد که پدیده‌ی خوردگی در مدت زمان بسیار کوتاه‌تری نسبت به حالت واقعی انجام شود. محققان بسیاری از این روش بمنظور اعمال پدیده‌ی خوردگی استفاده کرده‌اند [۴]، [۶]، [۱۰] و [۱۳-۲۱]. اساس این روش اعمال جریان الکتریکی مستقیم و تسریع در انجام واکنشها است. در این تحقیق جریان DC بوسیله‌ی یک دستگاه منبع تغذیه با ظرفیت ۵ آمپر و ۳۰ ولت تولید شده است. به منظور اعمال جریان توسط یک منبع تغذیه به چهار نمونه، یک جعبه‌ی تقسیم طراحی و ساخته شد. این جعبه‌ی تقسیم سر راه منبع جریان قرار گرفته و جریان از طریق مقاومت‌های قرار گرفته در آن، فی‌مابین چهار نمونه تقسیم شده است. قبل از اعمال جریان، ابتدا دو سر نمونه‌های بتنی با پوشش پلیمری محافظت شد تا تنها راه نفوذ یون‌های کلرید از بدنه‌ی استوانه‌های بتنی باشد. برای اعمال خوردگی تسریع شده ابتدا بایستی محلول آب نمک آماده شود. بدین ترتیب از محلول آب نمک با غلظت ۳/۵٪ استفاده شده است. این غلظت با توجه به غلظت یون‌های کلرید موجود در آب دریا در نواحی خلیج فارس انتخاب شده است. سپس نمونه‌ها داخل این محلول قرار گرفتند به نحوی که ۳۰٪ سطح آن‌ها خارج از محلول و ۷۰٪ در داخل محلول قرار گیرد. مستغرق کردن به این روش به دلیل فراهم کردن اکسیژن کافی برای اعمال خوردگی بوده است. قبل از اعمال جریان، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت داخل آب نمک قرار گرفتند و پس از آن فرآیند اعمال خوردگی تسریع شده آغاز شد. اعمال خوردگی تسریع شده بر اساس رابطه فارادی انجام شده است. رابطه فارادی بر اساس اعمال جریان ثابت به یک فلز به شرح زیر است:

$$\Delta w = \frac{A.I.t}{Z.F} \quad (1-1)$$

که در آن Δw وزن از دست رفته‌ی فلز به گرم، A وزن اتمی آهن برابر ۵۶ گرم، I میزان جریان ثابت اعمالی بر حسب آمپر، t زمان اعمال جریان بر حسب ثانیه، Z ظرفیت واکنش الکتروکود که برای آهن برابر ۲ است و F ثابت فارادی برابر ۹۶۵۰۰ آمپر-ثانیه است.

درصد میزان خوردگی اعمالی در این تحقیق برابر ۱۵٪ در نظر گرفته شد. در عمل حدود خوردگی بین ۱۰ تا ۱۵ درصد حدودی است که باید به تعمیر و تقویت سازه پرداخته شود [۱۷]. برای رسیدن به درصد خوردگی مورد نظر، تصمیم به اعمال جریان ۱ آمپر به هر نمونه گرفته شد. بدین ترتیب قطب مثبت دستگاه به میلگرد نمونه‌ی مسلح و قطب منفی را به میلگرد دیگری که در داخل آب نمک به عنوان میلگرد مرجع قرار دارد، متصل شده است. شکل ۲ نمای شماتیک و همچنین نمونه‌های قرار گرفته در معرض خوردگی را نشان داده است. زمان لازم جهت اعمال جریان ۱ آمپر به منظور رسیدن به مقدار خوردگی ۱۵٪ از رابطه‌ی فارادی قابل محاسبه است. در جدول ۲ نمونه‌های مورد مطالعه در این تحقیق و همچنین زمان‌های محاسبه شده جهت اعمال جریان به آن‌ها آورده شده است.



(ب)

(الف)

شکل ۲- فرآیند خوردگی تسریع شده (الف) نمایی شماتیک از اعمال جریان به نمونه‌ها (ب) فرآیند خوردگی تسریع شده در آزمایشگاه

جدول ۲- نمونه‌های مورد مطالعه به همراه زمان‌های لازم جهت اعمال خوردگی تسریع شده

نمونه	C1	C2	C3	C4	C5	C6
وزن شبکه میلگرد (g)	۶۸۳/۶۳	۶۸۸/۱۴	۶۹۲/۰۳	۶۸۵/۶۹	۶۸۹/۱۶	۶۸۹/۷۲
زمان محاسبه شده جهت اعمال خوردگی تسریع شده (دقیقه)	بدون خوردگی	بدون خوردگی	بدون خوردگی	۵۹۰۸	۵۹۳۸	۵۹۴۳

۲-۴- آزمایش‌های انجام شده

پس از اعمال خوردگی تسریع شده، آزمایش مقاومت فشاری طبق استاندارد ASTM C39/C39M [۱۲] بر روی نمونه‌های شاهد و نمونه‌های خورده انجام شد. خروجی این آزمایش‌ها منحنی‌های تنش-کرنش فشاری بوده که به تحلیل آن‌ها پرداخته شده است. این آزمایش در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه صنعتی امیرکبیر و توسط دستگاه دار تک^۱ انجام شده است (شکل ۳).



شکل ۳- دستگاه دار تک آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه امیرکبیر

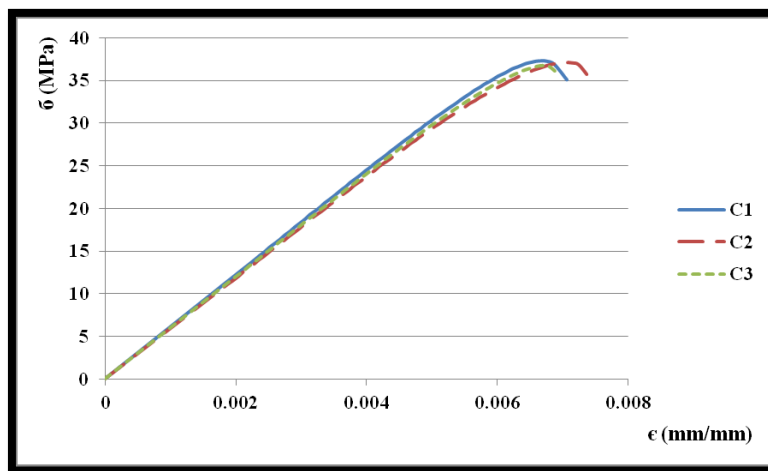
^۱ DARTEC

۳- نتایج آزمایش‌ها و بحث پیرامون آن

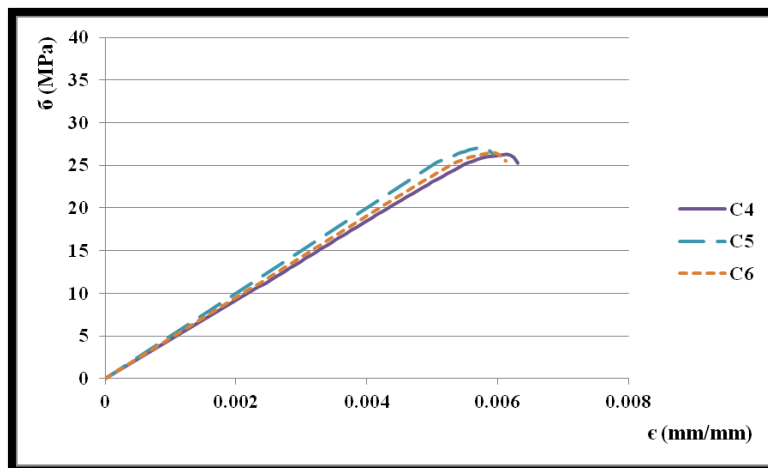
منحنی‌های تنش-کرنش محوری مربوط به نمونه‌های قرار گرفته در معرض خوردگی و نیز نمونه‌های کنترل در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین در جدول ۳ پارامترهای مکانیکی بدست آمده از این نمودارها خلاصه شده است. این پارامترها شامل کرنش تسلیم محوری (ϵ_y)، تنش تسلیم محوری (σ_y)، کرنش نهایی محوری (ϵ_u)، مقاومت فشاری نهایی ($\bar{\sigma}_u$) و مدول ناحیه الاستیک (E) است. به طور کلی خوردگی میلگردها موجب کاهش مقاومت‌های فشاری نهایی، کرنش‌های نهایی فشاری، مدول الاستیک و همچنین شکل پذیری نمونه‌ها شده است. شکل پذیری نمونه‌ها از رابطه‌ی (۱-۲) بدست آمده که در آن μ شکل پذیری، ϵ_u کرنش نهایی محوری و ϵ_y کرنش تسلیم محوری است.

$$\mu = \epsilon_u / \epsilon_y$$

(۱-۲)



(الف)



(ب)

شکل ۴- منحنی‌های تنش-کرنش فشاری در (الف) نمونه‌ها قبل از اعمال خوردگی (ب) نمونه‌ها پس از اعمال خوردگی

جدول ۱- مشخصات مکانیکی نمونه‌های مورد مطالعه

μ	E (GPa)	$\bar{\sigma}_u$ (Mpa)	ϵ_u (%)	$\bar{\sigma}_y$ (Mpa)	ϵ_y (%)	
۱/۵۳	۶/۱۱	۳۷/۲۸	۰/۷۰۶۹	۲۸/۰۱	۰/۴۵۹۹	C1
۱/۶۳	۵/۹۳	۳۷/۱	۰/۷۳۸	۲۶/۶۷	۰/۴۵۱۳	C2
۱/۵۳	۶/۰۲	۳۶/۸۱	۰/۶۹۱۶	۲۷/۱۳	۰/۴۵۱۵	C3
۱/۲۴	۴/۶۱	۲۶/۳۲	۰/۶۳۱	۲۳/۳۸	۰/۵۰۷۶	C4
۱/۱۷	۴/۹۹	۲۷/۱	۰/۵۹۳۲	۲۵/۳۳	۰/۵۰۷	C5
۱/۲۱	۴/۷۶	۲۶/۵۱	۰/۶۱۲۵	۲۴/۰۵	۰/۵۰۶۱	C6

مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های C1، C2 و C3 به ترتیب برابر ۳۷/۲۸، ۳۷/۱ و ۳۶/۸۱ مگاپاسکال بوده که پس از فرآیند خوردگی در نمونه‌های C4، C5 و C6 به ۲۶/۳۲، ۲۷/۱ و ۲۶/۵۱ مگاپاسکال رسیده است. بنابراین مقاومت نهایی فشاری به طور متوسط ۲۸٪ کاهش داشته است. این کاهش مقاومت عمدتاً به دلیل ترک‌های موجود در بتن ناشی از انبساط محصولات تولید شده در فرآیند خوردگی است. همچنین نحوه‌ی گسیختگی نمونه‌ها نشان داد، گسیختگی نمونه‌های خورده شده از نواحی ترک خورده بوده که با باز شدن این ترک‌ها و پیوستن آن‌ها به یکدیگر اتفاق افتاده است. همچنین نحوه‌ی شکست این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های خورده نشده شکننده‌تر بوده است (مشاهده‌ی شکل ۵). کرنش نهایی محوری نمونه‌های C1، C2، C3، C4، C5 و C6 به ترتیب برابر ۰/۷۰۶۹، ۰/۷۳۸، ۰/۶۹۱۶، ۰/۶۳۱، ۰/۵۹۳۲ و ۰/۶۱۲۵ درصد بوده است که می‌توان نتیجه گرفت خوردگی به طور متوسط موجب کاهش ۱۴٪ در کرنش نهایی محوری شده است. همچنین با توجه به مقادیر بدست آمده در جدول ۳ مقدار شکل‌پذیری نمونه‌ها نیز پس از اعمال خوردگی میلگردها به طور میانگین ۲۳٪ کاهش یافته است. نکته‌ی مهم دیگر، سطح زیر منحنی‌های تنش-کرنش است که با اعمال خوردگی به نمونه‌ها کاهش یافته است. کاهش سطح منحنی به معنی جذب انرژی کمتر نمونه‌های خورده شده نسبت به نمونه‌های خورده نشده تا نقطه‌ی شکست است.

از دیگر پارامترهای مهم استخراج شده از نمودارهای تنش-کرنش محوری استوانه‌های بتنی، مدول الاستیک بوده که برابر شیب اولیه‌ی نمودارها است. این مقدار در نمونه‌های خورده نشده‌ی C1، C2 و C3 به ترتیب برابر ۶/۱۱، ۵/۹۳ و ۶/۰۲ بوده است. فرآیند خوردگی موجب کاهش مدول الاستیک شده که برای نمونه‌های C4، C5 و C6 به ترتیب برابر ۴/۶۱، ۴/۹۹ و ۴/۷۶ است. به طور متوسط این پارامتر پس از فرآیند خوردگی ۲۰٪ کاهش داشته است.

همچنین شکل ۵-ج) میلگردهای خورده شده بعد از گسیختگی نمونه‌های مسلح خورده شده را نشان داده است. همان‌طور که در شکل مشخص است فرآیند خوردگی تسریع شده موجب کاهش قطر میلگردهای طولی و تولید محصولات ناشی از زنگ‌زدگی فلز شده است.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۵- نحوه‌ی گسیختگی نمونه‌ها (الف) نمونه‌ها قبل از فرآیند خوردگی (ب) نمونه‌ها پس از فرآیند خوردگی (ج) شبکه‌ی میلگردهای خورده شده

۴- نتیجه‌گیری

۱) اعمال خوردگی تسریع شده بر اساس قانون فارادی صورت گرفته است. این روش یک روش مناسب برای تسریع در فرآیند خوردگی میلگردها بوده است. اگر فقط ایجاد یک خوردگی با درصد مشخصی از کاهش وزن میلگردها مد نظر باشد، اعمال جریان ثابت در عوض ولتاژ ثابت موجب ساده‌تر شدن شکل معادله‌ی فارادی شده و به تبع آن اندازه‌گیری کاهش وزن میلگردها ساده‌تر خواهد شد.

۲) اعمال خوردگی تا میزان ۱۵٪ کاهش وزن میلگردها به طور متوسط موجب کاهش ۲۸٪، ۱۴٪ و ۲۰٪ به ترتیب در مقاومت نهایی فشاری، کرنش نهایی محوری و مدول الاستیک ستون‌های بتنی مسلح شده است.

۳) نحوه‌ی شکست نمونه‌ها نشان داد که نمونه‌های خورده شده تحت فشار، با پیوستن ترک‌های ناشی از خوردگی به یکدیگر دچار شکست شده و گسیختگی آن‌ها نسبت به نمونه‌های خورده نشده شکننده‌تر بوده است. همچنین با اندازه‌گیری شکل‌پذیری نمونه‌ها مشخص شد که این پارامتر به طور متوسط ۲۳٪ در نمونه‌های خورده شده در مقایسه با نمونه‌های خورده نشده کاهش داشته که خود مؤید رفتار شکننده‌ی این نمونه‌ها است.

۵-مراجع

- [۱] E. Poulsen and L. Mejlbro, Diffusion of chloride in concrete, London and New York, Taylor & Francis, 2005.
- [۲] M. Safehian and A. Ramezaniapour, "Assessment of service life models for determination of chloride penetration into silica fume concrete in the severe marine environmental condition" Construction and Building Materials, vol. 48, pp. 287-294, 2013.
- [۳] م. صافحیان و ع. رمضانیانپور، بررسی تاثیر شرایط خوردنده محیط دریایی بردوام و عمر مفید صفحات بتن مسلح تحت بارگذاری خمشی ثابت و متغیر، پایان نامه‌ی دکتری، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۳.
- [۴] M. Otieno, H. Beushausen and M. Alexander, "Chloride-induced corrosion of steel in cracked concrete – Part I: Experimental studies under accelerated and natural marine environments," Cement and Concrete Research, vol. 79, pp. 373-385, 2016.
- [۵] A. Al-Saidy and K. Al-Jabri, "Effect of damaged concrete cover on the behavior of corroded concrete beams repaired with CFRP sheets," Composite Structures, vol. 93, p. 1775-1786, 2011.
- [۶] J. Xie and R. Hu, "Experimental study on rehabilitation of corrosion-damaged reinforced concrete beams with carbon fiber reinforced polymer," Construction and Building Materials, vol. 38, p. 708-716, 2012.
- [۷] A. Al-Saidy, A. Al-Harthy, A. Al-Jabri, M. Abdul-Halim and N. Al-Shidi, "Structural performance of corroded RC beams repaired with CFRP sheets," Composite Structures, vol. 92, p. 1931-1938, 2010.
- [۸] J. Li, J. Gong and L. Wang, "Seismic behavior of corrosion-damaged reinforced concrete columns strengthened using combined carbon fiber-reinforced polymer and steel jacket," Construction and Building Materials, vol. 23, no. 7, pp. 2653-2663, 2009.
- [۹] M. Tapan and R. Aboutahab, "Effect of steel corrosion and loss of concrete cover on strength of deteriorated RC columns," Construction and Building Materials, vol. 25, no. 5, pp. 2596-2603, 2011.
- [۱۰] J. Revathy, K. Suguna and P. Raghunath, "Effect of Corrosion Damage on the Ductility Performance of Concrete Columns," American Journal of Engineering and Applied Sciences, vol. 2, no. 2, pp. 324-327, 2009.
- [۱۱] وزارت مسکن و شهرسازی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، روش ملی طرح مخلوط بتن، چاپ دوم، تهران: مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۶.
- [۱۲] ASTM C39/C39M, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, USA: American Society for Testing and Materials, 2005.
- [۱۳] S. Tastani and S. Pantazopoulou, "Experimental evaluation of FRP jackets in upgrading RC corroded columns with substandard detailing," Engineering Structures, vol. 26, pp. 817-829, 2004.
- [۱۴] A. Belarbi and S. Bae, "An experimental study on the effect of environmental exposures and corrosion on RC columns with FRP composite jackets," Composites: Part B, vol. 38, p. 674-684, 2006.
- [۱۵] G. Nossoni, S. Harichandran and M. Baiyasi, "Rate of Reinforcement Corrosion and Stress Concentration in Concrete Columns Repaired with Bonded and Unbonded FRP Wraps," Journal of Composites for Construction, ASCE, vol. 19, no. 5, pp. 04014080-7, 2015.
- [۱۶] S. Pantazopoulou, J. Bonacci, S. Sheikh, M. Thomas and N. Hearn, "Repair of corrosion-damaged columns with FRP wraps," Composites for construction, ASCE, vol. 5, no. 1, pp. 3-11, 2001.
- [۱۷] ا. اسماعیل زاده و ع. ا. رمضانیانپور، رفتار تیرهای خمشی با خوردگیهای متفاوت آرماتورها با و بدون صفحات تقویتی FRP، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۸۵.
- [۱۸] J. Joshi, H. Arora and U. Sharma, "Structural performance of differently confined and strengthened corroding reinforced concrete columns," Construction and Building Materials, vol. 82, pp. 287-295, 2015.
- [۱۹] J. Xie and R. Hu, "Experimental study on rehabilitation of corrosion-damaged reinforced concrete beams with carbon fiber reinforced polymer," Construction and Building Materials, vol. 38, p. 708-716, 2012.
- [۲۰] E. Güneysi, M. Gesog˘lu, F. Karabog˘a and K. Mermerdas, "Corrosion behavior of reinforcing steel embedded in chloride contaminated concretes with and without metakaolin," Composites: Part B, vol. 45, pp. 1288-1295, 2013.
- [۲۱] J. Sun, Q. Huang and Y. Ren, "Performance deterioration of corroded RC beams and reinforcing bars under repeated loading," Construction and Building Materials, vol. 96, pp. 404-415, 2015.