

بررسی خوردگی بتن پوزولانی توسط آزمون تسریع شده خوردگی

حسن نوری^{۱*}، نقدعلی علوی فرد^۲، عبدالله افشار^۳

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی شریف

^۲ کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ استاد دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی شریف

* نویسنده مسئول: hasannoori.66@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۱۶

چکیده

در این پژوهش رفتار خوردگی آرماتور فولادی در بتن به دو روش متفاوت حفاظت مورد بررسی قرار گرفت. در روش نخست، افزودنی‌های پوزولانی در درصد‌های بهینه از جمله خاکستر بادی ۲۵٪ وزنی سیمان، میکروسیلیس ۱۰٪ وزنی سیمان و سرباره کوره بلند ۲۵٪ وزنی سیمان به طرح اختلاط بتن اضافه گردیدند و در روش دوم حفاظت، ممانعت کننده فروگارد ۹۰۱ به میزان ۰/۵٪ وزنی سیمان به طرح اختلاط بتن پایه اضافه شد و اثر این ممانعت کننده بر رفتار خوردگی فولاد در بتن در شرایط شبیه‌سازی شده دریایی (۳/۵٪ NaCl) و تسریع شده‌ی خوردگی تعیین گردید.

جهت انجام آزمون تسریع شده خوردگی در شرایط ذکر شده، نمونه‌های بتنی تحت ولتاژ ۲۴ ولت قرار گرفتند. نتایج آزمون نشان می‌دهد که از بین بتن‌های ساخته شده، بتن پوزولانی حاوی ۱۰٪ وزنی سیمان میکروسیلیس و نمونه‌ی حاوی ممانعت کننده فروگارد دارای بیشترین مقاومت می‌باشند و پس از ۲۴ روز شکسته و تخریب شدند و نمونه‌ی شاهد کمترین مقاومت را داشته و پس از ۱۸ روز تخریب گردید.

کلمات کلیدی: بتن، پوزولان، خوردگی، آزمون تسریع شده خوردگی، سرعت خوردگی؛

Examination of Reinforcement Corrosion in Pozzolanic Concrete by Accelerated Corrosion Test

H. Noori ^{1*}, N. A. Alavifard ², A. Afshar ³

¹ M. Sc, Materials and Metallurgy Engineering, Sharif University of Technology

² M. Sc, Materials and Metallurgy Engineering, Mashhad Ferdowsi University

³ Professor, Faculty of Materials Science and Metallurgy, Sharif University of Technology

* Corresponding Author: hasannoori.66@gmail.com

Submission: 2017, 01, 31 Acceptance: 2017, 11, 07

Abstract

In this study, the corrosion behavior of steel reinforcement in concrete was investigated in two different protection methods. In the first method, pozzolanic additives with optimized percentage were added to concrete mix design (the percentage of these additives are 25% Weight of cement of fly ash, Micro silica with 10 percent of weight of cement and 25% of Blast Furnace slag weight of cement). In the second approach of protection, 0.5 percent weight of cement of ferrogard 901 inhibitor is added to basic mix concrete design and its effect on the corrosion behavior of steel in concrete in simulated sea conditions (3.5% NaCl) and accelerated corrosion was determined.

In order to perform the accelerated corrosion test in the above conditions, concrete samples were placed under a voltage of 24 volts. The results of the test show that the pozzolanic concrete containing 10% by weight of microsilica cement and Ferrogard 901 inhibitory specimen has the highest resistance and after 24 days was broken and destroyed and the control sample the least resistance was destroyed after 18 days.

Keywords: Concrete, Pozzolanic, Corrosion, Accelerated test, Corrosion Rate;

۱- مقدمه

آزمون تحت ولتاژ یک آزمون تسریع شده خوردگی می باشد که اطلاعاتی راجع به نفوذپذیری و ویژگی های بتن ارائه می دهد. این آزمون شامل یک منبع تأمین ولتاژ مستقیم، نمونه مورد آزمون و یک ظرف پلاستیکی حاوی ۳/۵٪ محلول نمک طعام، دو صفحه فلزی و دستگاه اندازه گیری سرعت خوردگی می باشد. مراحل انجام آزمون ولتاژ ثابت در شکل ۱ نشان داده شده است. الکتروود کاری از بتن تقویت شده به قطب مثبت، و ورق های فولادی (الکتروود شمارنده) به قطب منفی منبع متصل می شوند. ۲۴ ولت پتانسیل ثابت منبع جریان ولتاژ مستقیم به سیستم اعمال می شود. در این مدار، آرماتور فولادی آند، ورق های فولادی کاتد و محلول نمک طعام الکتروولیت بود [۱].

تحقیقی توسط بوگا و همکارانش بر روی خواص مکانیکی بتن و خوردگی آرماتور در بتن به وسیله آزمون ولتاژ ثابت و شبیه سازی آن انجام شد. در این پژوهش به منظور تعیین خواص مکانیکی بتن ها از آزمون های فشاری و به منظور بررسی رفتار خوردگی و دوام بتن ها از آزمون ولتاژ ثابت استفاده شد. نتایج استحکام فشاری و آزمون های خوردگی تحت دوره های ۲۸ و ۱۸۰ روز نگهداری در محیط مورد نظر بررسی شدند.

آن ها به منظور انجام آزمون ولتاژ ثابت از اختلاف پتانسیل ۳۰۷ استفاده نمودند و این ولتاژ را تا زمان تخریب کامل بتن ها اعمال نمودند. همچنین هر ۵ دقیقه جریان خوردگی هر بتن توسط دستگاه ثبت جریان و نمودارهای جریان-زمان که در سیستم آزمون تسریع شده خوردگی رسم شده اند ذخیره می شدند. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص شد که استحکام فشاری محصولات بتنی با

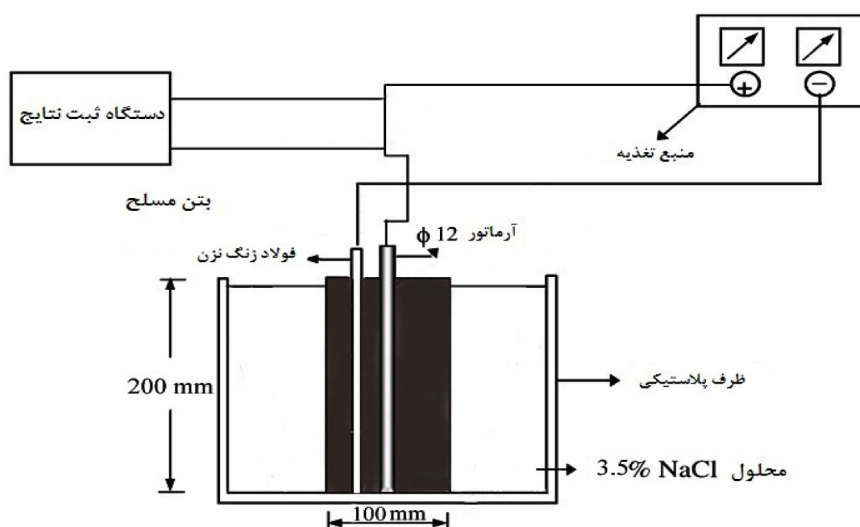
سیمان CEM I 42/5 R بالاتر از CEM II/B-M 32/5 R می باشد. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش مقدار خاکستر بادی در نمونه ها، بعد از ۲۸ روز استحکام فشاری بتن کاهش می یابد. زیرا، ترکیبات معدنی مانند خاکستر بادی، نمی توانند به طور کامل واکنش های پوزولانی تکمیل نمایند.

پس از انجام آزمون تسریع شده خوردگی، آرماتور در بتن مسلح خورده شده و نمونه ها تخریب می شوند. زیرا افزایش حجم محصولات خوردگی (زنگ زدگی) ۶/۵-۲ برابر بزرگتر از حجم آرماتور مورد استفاده در بتن می باشد، این محصولات خوردگی تنش کششی بزرگی را در بتن سخت شده ایجاد می کنند که این کشش باعث ایجاد ترک های بزرگ و ترک خوردن بتن مسلح می شود. زمان تخریب بین ۲۷۹ تا ۳۹۴ ساعت گزارش شد، لذا می توان نتیجه گرفت که تولید نمونه ها با استفاده از سیمان CEM II/B-M 32.5 R دارای دوام بالاتری می باشد. به طور کلی رابطه ای بین استحکام فشاری بتن و نفوذپذیری آن وجود دارد. مشخص شده است که، استحکام فشاری بالا دارای نفوذپذیری کمی است. نفوذ یون های کلر دوره تخریب را کوتاه تر و زمان وقوع آسیب به بتن با استحکام فشاری بالا و نفوذپذیری پایین را بیشتر خواهد کرد. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص شد که افزایش خاکستر بادی در بتن، باعث کاهش جریان خوردگی می شود [۱].

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مواد بتنی

در این پژوهش مطابق با دستورالعمل استاندارد بتن ایران (آبا) و استاندارد ASTM C150 برای ساخت سازه های بتنی در محیط



شکل ۱- سیستم آزمون تسریع شده خوردگی جهت بررسی خوردگی فولاد در بتن [۱]

خلیج فارس از سیمان پرتلند نوع دو [۲]، از خاکستر بادی نوع F بر اساس استاندارد ASTM C618 و در مقدار بهینه ۲۵ درصد وزنی سیمان [۳]، میکروسیلیس سمنان در مقدار بهینه ۱۰٪ وزنی سیمان [۴] و سرباره کوره بلند تهیه شده از کارخانه ذوب آهن اصفهان به مقدار بهینه ۲۵٪ وزنی [۵] استفاده شد که در جدول ۱، ترکیب فروگارد ۹۰۱ که در ترکیب بتن و با مقدار بهینه ی ۱۲ KG/M3 استفاده شد در جدول ۲ و طرح اختلاط های تهیه شده در جدول ۳ آمده است.

جدول ۱ - ترکیب شیمیایی مواد استفاده شده

ماده - ترکیب	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl
سیمان پرتلند نوع ۲	۶۲	۲۱	۳/۳	۱/۵	۵/۵	۱/۷	۰/۱۴	۰/۶۴	۰/۰۱۲
خاکستر بادی نوع F	۴/۶۲	۵۱/۵	۳۰/۵	۶/۷	۳	۰/۴	۰/۴۳	۰/۵۵	۰/۰۰۷
میکروسیلیس	۳	۹۴	۰/۴	۰/۷	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲۳	۰/۴۴	۰/۰۰۲
سرباره کوره بلند	۳۴/۲	۶۶/۳۹	۱۲/۹۴	۱/۵۸	۶/۹۴	۰/۷۲	۰/۲	۱/۴۴	۰

جدول ۲ - مشخصات ممانعت کننده فروگارد ۹۰۱

نام تجاری محصول	ترکیب شیمیایی	رنگ	دانسیته (kg/l)	میزان pH	دمای کارکرد (°C)
Sika FerroGard901	۲-دی متیل آمینو اتانول	سبز	۱/۰۶	۱۰	۱-۳۵

جدول ۳ - مشخصات طرح اختلاط های استفاده شده

اجزا تشکیل دهنده	طرح اختلاط اول (Control-cl)	طرح اختلاط دوم (Ferrogard-fg)	طرح اختلاط سوم (MicroSilis-MS)	طرح اختلاط چهارم (Fly Ash-fa)	طرح اختلاط پنجم (Slag-sg)
سیمان تیپ ۲ (g)	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
نسبت آب به سیمان	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴
شن (g)	۸۲۳	۸۲۳	۸۲۳	۸۲۳	۸۲۳
ماسه (g)	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
فوق روانساز (g)	۱	۱	۱	۱	۱
ممانعت کننده (g)	-	۲	-	-	-
میکروسیلیس (g)	-	-	۴۰	-	-
خاکستر بادی (g)	-	-	-	۱۰۰	-
سرباره کوره بلند (g)	-	-	-	-	۱۰۰
فعال کننده (g) NaOH	-	-	-	-	۳

۳-۱- بررسی تغییرات جریان

تغییرات جریان در گستره‌ی میلی آمپر متغیر است. با تقسیم جریان اندازه‌گیری شده بر سطح مقطع آرماتور مورد بررسی در بتن، دانسیته جریان محاسبه شد و در کلیه منحنی‌ها، دانسیته جریان بر حسب زمان سپری شده رسم شده است. نمونه‌های تحت آزمون به ترتیب ترک‌خورده و شکسته می‌شدند. اولین نمونه‌ای که شکسته شد نمونه شاهد بود که هیچ افزودنی‌ای نداشت. این طرح اختلاط بعد از گذر ۱۸ روز از اعمال پتانسیل ۲۴ ولتی ترک‌خورده و شکسته شد. سپس طرح اختلاط‌های با افزودنی خاکستر بادی و سرباره کوره بلند بودند که پس از ۲۱ روز شکسته شدند و در نهایت دو طرح اختلاط میکروسیلیس و ممانعت‌کننده‌ی فروگارد بودند که بعد از ۲۴ روز شکسته شدند. وضعیت نمونه‌ها بعد از شکست در شکل ۳ نشان داده شده است.



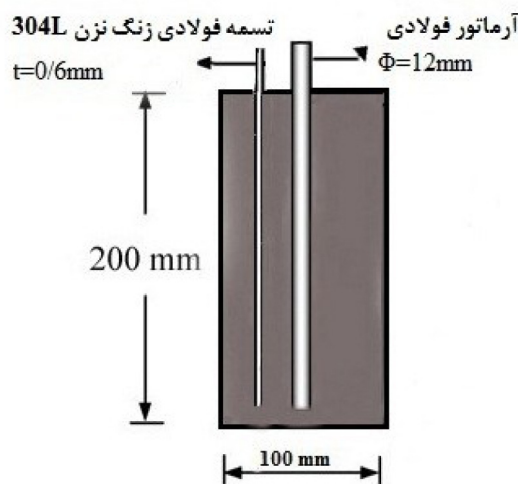
شکل ۳ - تصویری از بتن‌های تحت آزمایش تسریع شده‌ی خوردگی، بتن کنترل پس از ۱۸ روز، بتن‌های حاوی خاکستر بادی و سرباره کوره بلند پس از ۲۱ روز و بتن‌های حاوی میکروسیلیس و ممانعت‌کننده‌ی فروگارد ۹۰۱ پس از ۲۴ روز

پس از انجام آزمایش تسریع خوردگی بر روی ۵ طرح اختلاط بتن، نتایج اندازه‌گیری شده‌ی دانسیته جریان خوردگی ثبت گردید. روند تغییرات دانسیته جریان خوردگی بر حسب مدت زمانی که تحت تأثیر جریان بوده است، در شکل ۴ آمده است.

همان‌طور که در منحنی‌های شکل ۴ مشاهده می‌شود، در تمامی موارد ابتدا مقداری کاهش جریان داشته و در ادامه مقدار جریان افزایش می‌یابد. علت این کاهش در ابتدای منحنی می‌تواند ناشی از تکمیل فرآیند هیدراسیون و تشکیل لایه پسیو بر روی آرماتور باشد که باعث کاهش خوردگی و کاهش دانسیته جریان می‌گردد، اما در ادامه و با گذشت زمان و همچنین اعمال ولتاژ به تدریج لایه پسیو تشکیل شده بر روی آرماتور تخریب شده و از بین می‌رود، لذا انتقال الکترون در سطح افزایش یافته در نتیجه دانسیته جریان افزایش می‌یابد.

۲-۲- ترکیب بتن

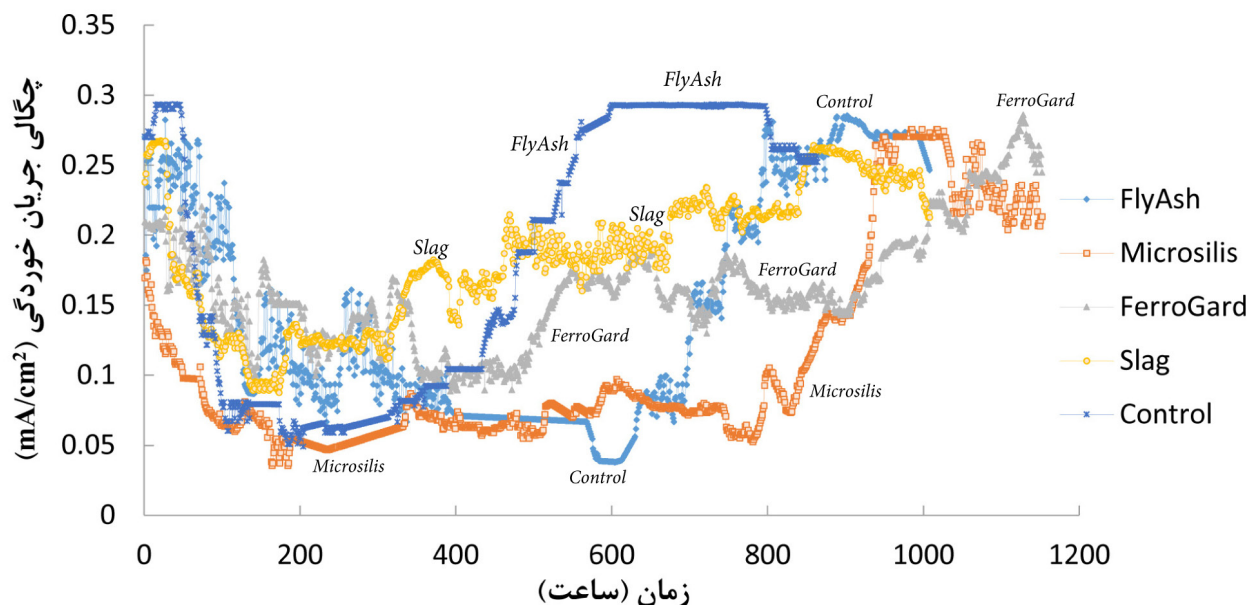
برای انجام آزمایش‌های الکتروشیمیایی در هر نمونه از یک آرماتور فولادی و یک فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴L استفاده گردید. بدین منظور، آرماتورهای فولادی با قطر ۱۲ mm به طول ۲۵۰ mm آماده و همچنین ورق‌های زنگ‌نزن به طول ۲۵ cm، عرض ۱/۵ cm و ضخامت ۰/۶ mm برش داده شده و در بتن قرار گرفتند. از یک نوع قالب استوانه‌ای شکل از جنس لوله پلیکا به قطر ۱۰۰ mm و ارتفاع ۲۰۰ mm جهت ساخت بتن استفاده شد. آرماتور فولادی در مرکز قالب و به فاصله ۵ cm از هر طرف قرار گرفت. تسمه فولادی زنگ‌نزن ۳۰۴L نیز در فاصله بین آرماتور و دیواره و به فاصله ۲/۵ cm از آرماتور و جداره قالب قرار داده شد. ورق‌های پلیکسی‌گلاس نیز به منظور قرارگیری در ته قالب تهیه شدند. جهت جلوگیری از نشتی آب بتن از قالب اطراف آن ابتدا با چسب مایع و سپس با چسب سیلیکا (آکواریوم) آب‌بندی شد. درون هر قالب نیز جهت تسهیل در خروج نمونه‌ی بتنی از روغن صنعتی استفاده شد.



شکل ۲ - شکل شماتیک بتن مسلح استفاده شده در پروژه

۳- نتایج و بحث

نتایج آزمون خوردگی تسریع شده برای هر پنج طرح اختلاط به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفت. مطابق با تحقیقات انجام‌شده، تخریب نمونه زمانی اتفاق می‌افتد که ترکی به عرض حداقل ۰/۵ سانتی متر در بتن ایجاد گردد (در اثر انبساط محصولات خوردگی) [۶]. مطالعات انجام‌شده در آزمون تسریع شده خوردگی با پتانسیل آندی ثابت نشان می‌دهد زمان تغییر تقعر قبل از قله ماکزیمم منحنی جریان بر حسب زمان منطبق با زمان ترک خوردن بتن می‌باشد [۷].



شکل ۴ - منحنی‌های تغییرات دانسیته جریان خوردگی بر حسب زمان برای ۵ طرح اختلاط متفاوت

و ۶ نشان داده شده است.

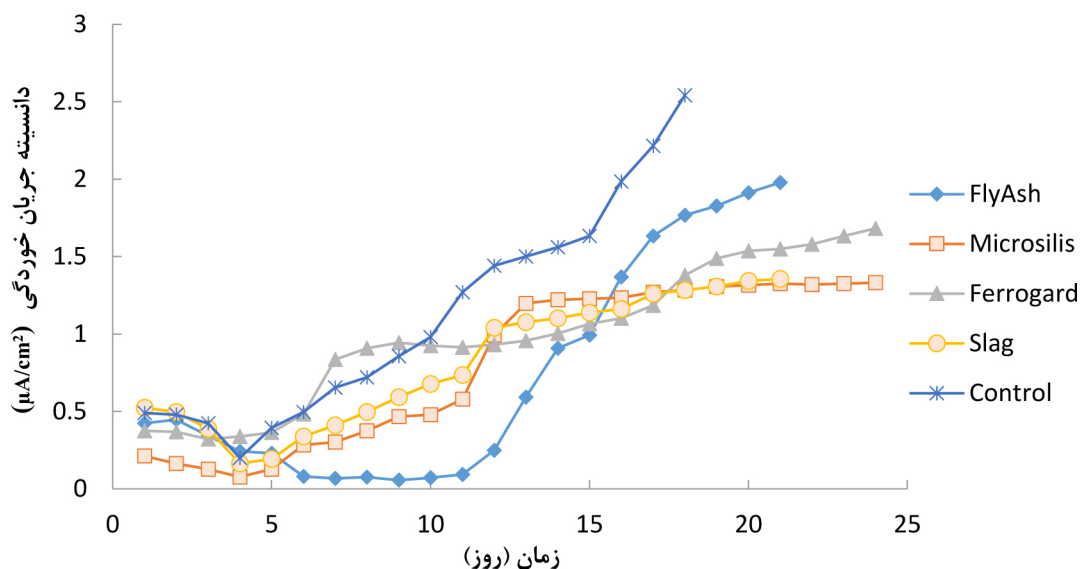
بر اساس استاندارد ASTM C876 می‌توان با اندازه‌گیری پتانسیل مدار باز آرماتور در بتن، خوردگی آرماتور در بتن را پیش‌بینی کرد و از آنجایی که پتانسیل مدار باز با پتانسیل خوردگی آرماتور در بتن تقریباً برابر است می‌توان علاوه بر مقایسه پتانسیل هر یک از حالت‌های فوق، حالت خوردگی آرماتور در بتن را نیز پیش‌بینی نمود. همان‌طور که مشاهده می‌شود پتانسیل خوردگی تمامی انواع طرح اختلاط‌ها ابتدا مقداری افزایش داشته و سپس مقدار پتانسیل کاهش یافته است. دلیل این تغییر رفتار پتانسیل خوردگی بتن‌ها همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد به دلیل همزمانی دو فرآیند تکمیل هیدراسیون و نفوذ یون کلر در بتن و سطح آرماتور می‌باشد که فرآیند تکمیل هیدراسیون پروسه‌ای زمان‌بر است و بین ۸۰ تا ۹۰ روز در حالت عادی زمان می‌برد [۸] و در حالت تسریع شده این تکمیل فرآیند به نظر می‌رسد بین ۸ تا ۱۰ روز رخ می‌دهد.

بر اساس جدول ۴ (استاندارد ASTM C876) چنانچه پتانسیل خوردگی بتن کمتر از -426 mV نسبت الکتروود کالومل باشد شرایط خوردگی، خوردگی شدید ارزیابی می‌شود. همان‌طور که در منحنی مشاهده می‌شود مقدار پتانسیل خوردگی برای طرح اختلاط بتن شاهد پس از ۱۲ روز، برای طرح اختلاط‌های حاوی مواد پوزولانی خاکستر بادی و سرباره کوره بلند بین ۱۵ تا ۱۶ روز، و برای طرح اختلاط‌های حاوی ماده پوزولانی میکروسلیس و ممانعت‌کننده فروگارد بین ۱۸ تا ۱۹ روز به زیر -426 mV می‌رسد و وارد منطقه شدید خوردگی می‌شود.

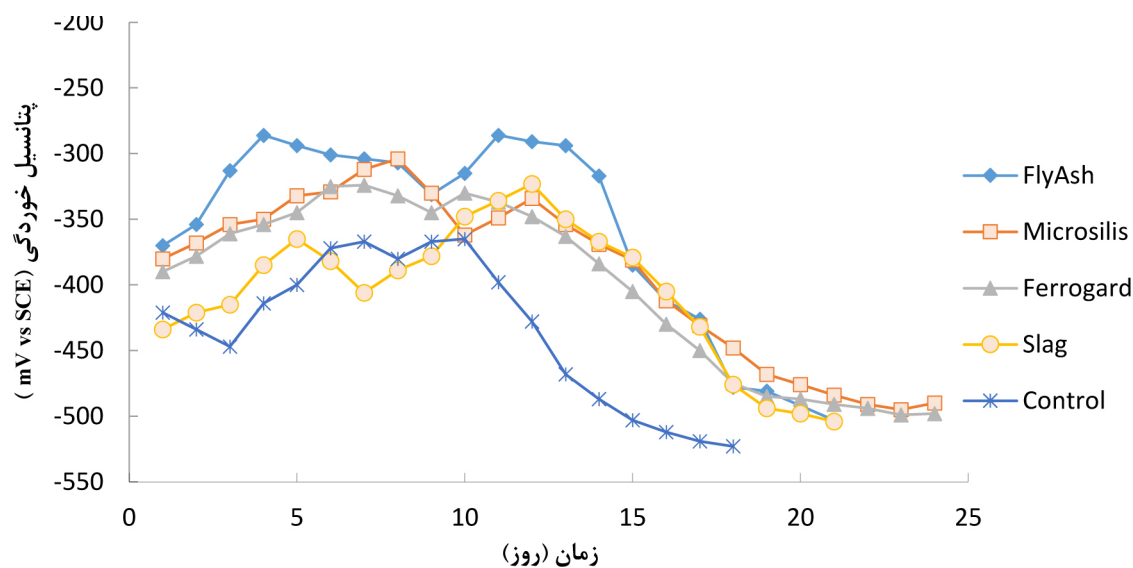
دانسیته جریان تا مرحله‌ای که بتن ترک می‌خورد و شکسته می‌شود روند افزایشی خود را ادامه می‌دهد و بیشترین مقدار دانسیته جریان نیز در نقطه‌ای است که بتن در مرحله شکستن قرار دارد. در ادامه و پس از شکسته شدن بتن مقداری دانسیته جریان کاهش می‌یابد. همان‌طور که گفته شد اولین نوع بتنی که شکسته شد، نوع طرح اختلاط اول (شاهد) بود و پس از آن طرح اختلاط‌های حاوی پوزولان و ممانعت‌کننده بودند، به این ترتیب که پس از بتن شاهد، بتن‌های حاوی خاکستر بادی و سرباره شکسته شدند و در نهایت بتن‌های حاوی میکروسلیس و ممانعت‌کننده فروگارد بودند که شکسته شدند. لذا می‌توان نتیجه گرفت که افزودن پوزولان به بتن باعث افزایش استحکام و کاهش دانسیته جریان و لذا افزایش حفاظت بتن در مقابل خوردگی می‌شود.

۳-۲- بررسی خوردگی آرماتور توسط آزمون پلاریزاسیون

از تمامی نمونه‌های بتنی غوطه‌ور در محلول $3\% \text{ NaCl}$ که در معرض آزمون تسریع شده قرار گرفته بودند، آزمون پلاریزاسیون گرفته شد. سپس با استفاده از داده‌های این منحنی، پتانسیل خوردگی و میزان جریان خوردگی مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از برون‌یابی تافل توسط نرم‌افزار نصب بر روی دستگاه EG & G دانسیته جریان خوردگی و پتانسیل خوردگی استخراج گردید. نتایج آزمون پلاریزاسیون آرماتور فولاد ساده کربنی در پنج طرح اختلاط و روند تغییرات پتانسیل خوردگی و دانسیته جریان خوردگی حاصل از آزمون پلاریزاسیون در شکل‌های ۵



شکل ۵ - منحنی‌های تغییرات دانسیته جریان خوردگی بر حسب زمان پس از قرارگیری تحت آزمون تسریع شده‌ی خوردگی برای پنج طرح اختلاط متفاوت

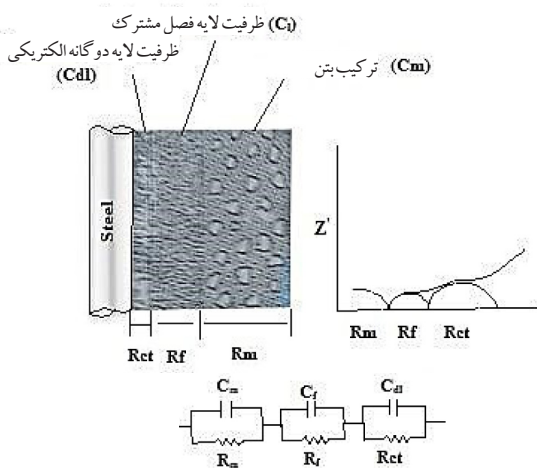


شکل ۶ - منحنی‌های تغییرات پتانسیل خوردگی بر حسب زمان پس از قرارگیری تحت آزمون تسریع شده‌ی خوردگی برای پنج طرح اختلاط متفاوت

جدول ۴ - شدت خوردگی آرماتور فولادی در بتن استاندارد ASTM C876 [۹]

شرایط خوردگی	نسبت به الکتروود مس/سولفات مس	نسبت به الکتروود کالومل
خوردگی شدید	کمتر از -۵۰۰	کمتر از -۴۲۶
خوردگی بالا (۹۰٪ احتمال خوردگی)	کمتر از -۳۵۰	کمتر از -۲۷۶
خوردگی متوسط	-۲۰۰ تا -۳۵۰	-۲۷۶ تا -۱۲۶
خوردگی کم (۱۰٪ احتمال خوردگی)	بیشتر از -۲۰۰	بیشتر از -۱۲۶

طرح اختلاط بتن و استفاده از ممانعت کننده مورد بررسی قرار گرفت. در مورد بتن، مقاومت پلایزاسیون و میزان خوردگی را بر اساس جدول ۵ و برای بررسی و تحلیل داده‌های به دست آمده، از نرم‌افزار ZSim و مدار معادل نشان داده شده در شکل ۷ استفاده گردیده است.



شکل ۷ - سیستم فولاد در بتن به همراه طیف امپدانس الکتروشیمیایی و مدار الکتریکی

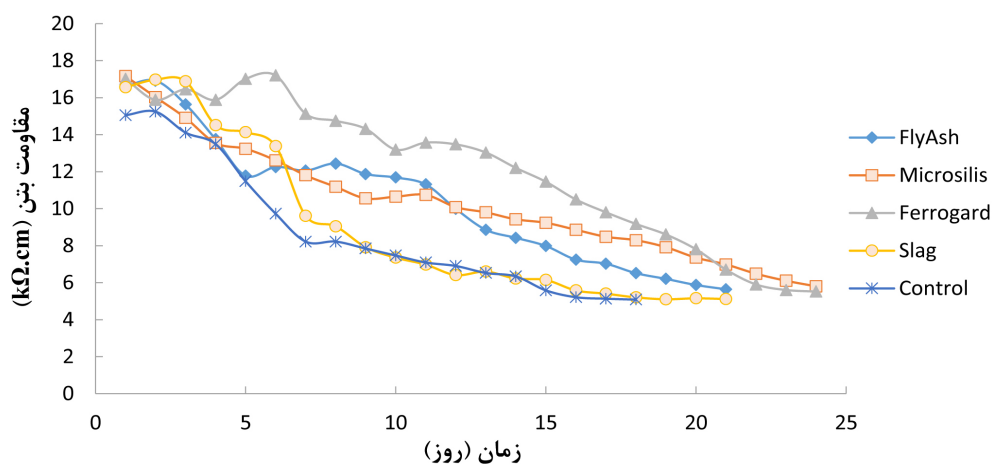
تغییرات مقاومت بتن‌ها در مدت زمان قرارگیری تحت ولتاژ ۲۴۷ پس از قرارگیری در محلول ۳/۵٪ NaCl در شکل ۸ نشان داده شده است.

وقتی جریان خوردگی از $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ فراتر می‌رود، لایه روئین سطحی آرماتور از بین رفته و حالت فعال خوردگی رخ می‌دهد. دلیل انتقال از حالت روئین به فعال در طرح اختلاط وجود ساختار متخلخل بتن و سهولت نفوذ یون کلر از تخلخل‌ها می‌باشد. مکانیزم شکسته شدن لایه پسیو، افزایش یون کلر بر روی سطح آرماتور است. وقتی نسبت غلظت یون کلر به یون هیدروکسید از مقدار آستانه‌ای بیشتر می‌شود، لایه محافظ اکسیدی شکسته شده و خوردگی آغاز می‌گردد [۱۰]. در طرح اختلاط‌هایی که از مواد پوزولانی و ممانعت کننده استفاده شده مقدار دانسیته جریان خوردگی به مراتب کمتر از طرح اختلاطی است که در آن از این مواد استفاده نشده است، در واقع در این حالت لایه شکسته نشده و جریان خوردگی زیر حد بحرانی می‌باشد. دانسیته جریان‌های پایین نشان‌دهنده مقاومت لایه اکسیدی محافظ در طرح اختلاط‌ها را دارد که جهت تفسیر میزان مقاومت لایه و شروع و پیشرفت خوردگی از آزمون تسریع شده خوردگی استفاده گردید. استفاده از ممانعت کننده باعث افزایش ناحیه روئین در شاخه‌ی آندی و انتقال شاخه کاتدی به سمت چپ (جریان‌های کمتر و افزایش شیب) گردیده است که نشان‌دهنده مکانیزم مختلط حفاظت کاتدی و آندی ممانعت کننده می‌باشد.

۳-۳- آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی
جهت تحلیل نتایج این بخش، اثر دو متغیر استفاده از مواد پوزولانی در

جدول ۵ - تفسیر دانسیته جریان خوردگی توسط رودریگز

وضعیت خوردگی	دانسیته جریان خوردگی ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
حفاظت کامل	۰ - ۰/۲
خوردگی کم تا متوسط	۰/۲ - ۰/۵
خوردگی متوسط تا زیاد	۰/۵ - ۱/۰
خوردگی شدید	بیشتر از ۱



شکل ۸ - منحنی‌های تغییرات مقاومت الکتریکی بتن نسبت به زمان تحت ولتاژ ۲۴۷ در معرض محلول ۳/۵٪ NaCl

آزمایش تسریع شده ی خوردگی را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود در سطح آرماتورهایی که در بتن های حاوی پوزولان و ممانعت کننده قرار داشته اند خوردگی به مقدار بسیار کم و در مرحله شروع خوردگی قرار دارند، اما آرماتوری که در بتن شاهد قرار گرفته است، لایه های اکسیدی بر سطح آن تشکیل شده اند که به تدریج و در حال ورود به مرحله خوردگی زیاد می باشد.

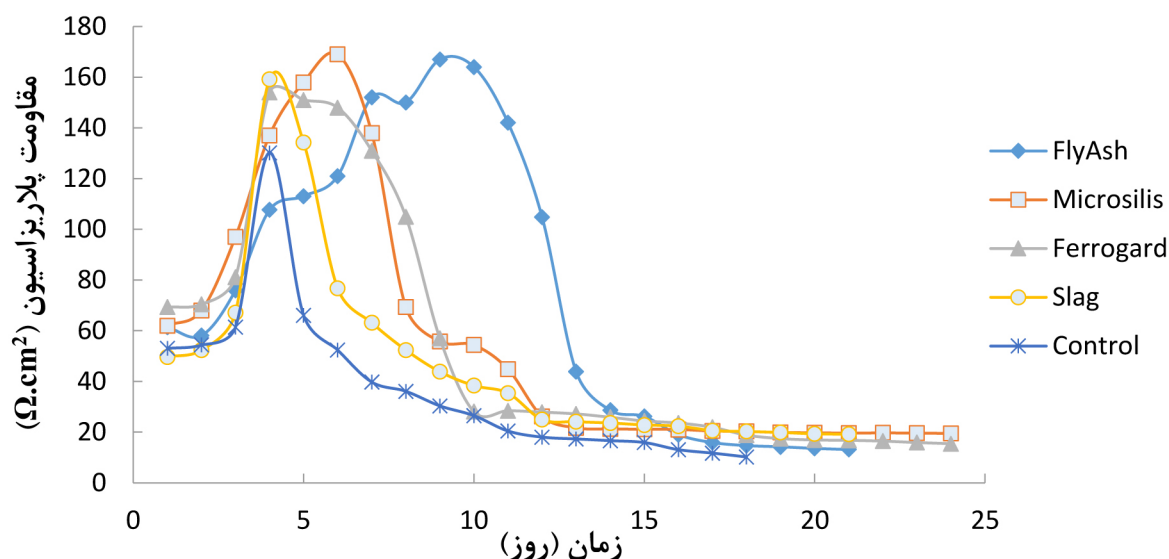
۳-۴ - بررسی سطح آرماتورهای قرار گرفته در بتن

همان طور که بیان شد پنج طرح اختلاط به منظور بررسی رفتار خوردگی آرماتور در بتن تهیه شد و در محلول ۳/۵٪ NaCl قرار داده شدند. تخریب بتن بدین گونه است که به دلیل تشکیل لایه های اکسیدی بر روی سطح آرماتور، افزایش حجمی حاصل می شود که این افزایش حجم باعث کاهش استحکام و مقاومت بتن و در نتیجه افزایش دانسیته جریان و سرعت خوردگی می شود.

شکل ۱۱ سطح آرماتورها را در روز ۱۸ نشان می دهد. همان طور که گفته شد، در روز ۱۸ بتن شاهد شکسته می شود. در شکل نیز مشاهده می شود که آرماتور قرار گرفته در بتن شاهد کاملاً خورده شده است در صورتی که آرماتورهای دیگر مقاوم بوده اند، با این وجود در سطح آرماتورهایی که در بتن های حاوی خاکستر بادی و سرباره کوره بلند قرار گرفته بودند، نسبت به دو آرماتور دیگر که در ممانعت کننده و پوزولان میکروسیلیس قرار گرفته بودند، لایه های اکسیدی بیشتری به وجود آمده اند.

همان طور که در منحنی های شکل ۸ مشاهده می شود مقاومت الکتریکی بتن ها تا روز پنجم با شیب بسیار ملایم افزایشی مواجه هستند سپس و پس از گذر زمان این مقاومت به تدریج کاهش یافته و به کمتر از $10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ که منطقه ایمن برای حفاظت است می رسد و به تدریج این مقاومت کاهش یافته تا تخریب بتن را در پی دارد. نتایج مقاومت پلاریزاسیون نیز در شکل ۹ آمده است.

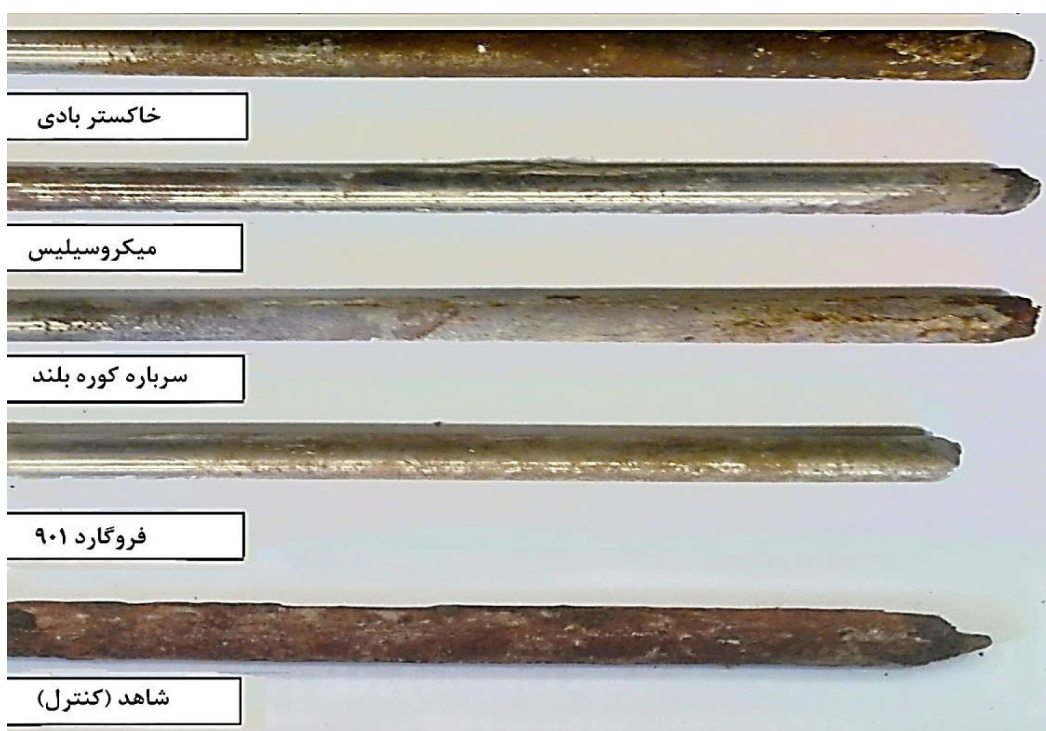
نتایج نشان می دهد که چنانچه مقاومت بتن در محدوده ی $(\Omega\cdot\text{cm}^2)$ $0/25$ تا $2/5$ باشد بتن دارای مقاومت کمی می باشد و خوردگی در آن بالاست [۱۱]. همان طور که مشاهده می شود مقاومت پلاریزاسیون بتن ها در روزهای ابتدایی اعمال ولتاژ و انجام آزمون افزایش می یابد و سپس با کاهش شدیدی همراه است که این پدیده ناشی از تکمیل فرآیند هیدراسیون بتن می باشد. در ادامه و پس از نفوذ یون کلر به سطح آرماتور و تخریب لایه پسیو به تدریج تخریب بتن آغاز شده و مقاومت آن کاهش می یابد. در این میان کاهش مقاومت بتن شاهد از باقی بتن ها سریع تر آغاز شده که نشان دهنده ی مقاومت پایین تر این بتن نسبت به طرح اختلاط های دیگر می باشد. بتن استفاده شده در این طرح اختلاط پس از اینکه ۱۰ روز در معرض اعمال ولتاژ و در محلول ۳/۵٪ NaCl قرار گرفت، مقاومت پلاریزاسیون آن بسیار کاهش یافته در خوردگی آن بسیار افزایش می یابد و از روز ۱۳ به بعد مقاومت آن به کمتر از $10 \Omega\cdot\text{cm}^2$ رسیده، و در روز ۱۸، نمونه ترک برداشته و شکسته می شود. شکل ۱۰ نمایی از آرماتورهای روزهای مذکور پس از قرارگیری تحت



شکل ۹ - منحنی های تغییرات مقاومت پلاریزاسیون بتن نسبت به زمان تحت ولتاژ ۲۴۷ در محلول ۳/۵٪ NaCl



شکل ۱ - الف) آرماتور قرارگرفته در بتن حاوی پوزولان خاکستر بادی پس از ۱۱ روز از قرارگیری تحت آزمایش تسریع شدهی خوردگی، ب) آرماتور قرارگرفته در بتن حاوی پوزولان میکروسیلیس پس از ۱۱ روز از قرارگیری تحت آزمایش تسریع شدهی خوردگی، ج) آرماتور قرارگرفته در بتن حاوی پوزولان سرباره کوره بلند پس از ۱۱ روز از قرارگیری تحت آزمایش تسریع شدهی خوردگی، د) آرماتور قرارگرفته در بتن حاوی ممانعت کنندهی فروگارد پس از ۱۱ روز از قرارگیری تحت آزمایش تسریع شدهی خوردگی و ه) آرماتور قرارگرفته در بتن شاهد پس از ۹ روز از قرارگیری تحت آزمایش تسریع شدهی خوردگی



شکل ۱۱ - آرماتورهای قرارگرفته در بتن، ۱۸ روز پس از قرارگیری تحت آزمون تسریع شدهی خوردگی

نتیجه گیری

در این پژوهش از پنج طرح اختلاط برای بررسی خواص بتن در محلول $NaCl$ ۳/۵٪ برای بررسی رفتار خوردگی آرماتور استفاده شد. با توجه به آزمون‌های انجام شده نتایج زیر به دست آمد:

در آزمون تسریع شده ی خوردگی و پس از اعمال ۲۴۷ پتانسیل آندی، ابتدا بتن شاهد و پس از ۱۸ روز شکسته شد و سپس بتن های حاوی افزودنی پوزولان‌های خاکستر بادی و سرباره کوره بلند پس از ۲۱ روز و سپس بتن حاوی پوزولان میکروسیلیس و ممانعت کنندهی فروگارد ۹۰۱ پس از ۲۴ روز شکسته شدند.

در واقع افزودن مواد پوزولانی و ممانعت کننده به بتن‌ها باعث تاخیر در ترک برداشتن و شکسته شدن بتن‌ها می‌شود، به گونه‌ای که افزودن ۲۵٪ خاکستر بادی و ۲۵٪ سرباره کوره بلند، ترک خوردن بتن‌ها را تا ۱/۲ برابر و افزودن ۱۰٪ ماده پوزولانی میکروسیلیس و ۵٪ ممانعت کنندهی فروگارد ترک خوردن بتن‌ها را تا ۱/۳۵ برابر به تعویق می‌اندازد.

مراجع

- [1] A. Boga, I.T. M. Saridemir, Prediction of mechanical properties of recycled aggregate concretes containing silica fume using artificial neural networks and fuzzy logic. Comput. Mater. Sci. Vol. 42, 2008, pp. 74-82.
- [2] J. Scully, M. Ismail, Electrochemical Impedance Analysis and Interpretation. American Society of testing and materials, 1993.
- [3] G. Osborne, Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete. Cement and Concrete Composites Vol. 21, 1999, pp.11-21.
- [4] F. Hills, Ground Granulated Blast-Furnace Slag as Cementitious Constituent in Concrete. American Concrete Institue, 1995, pp. 625-634.
- [5] M. Collepardi, S. Collepardi, J. Ogoumah, F. Simonelli, The Influence of Slag and Fly Ash on the Carbonation of Concretes. ACI Materials Journal Vol. 85, 1998, pp. 505-511.
- [6] ASTM D4541, Standard Specification for Pull off Test, 1998, American Society for Testing and Materials: Philadelphia, PA.
- [7] E. Guneyisi, T. Ozturan, M. Gesoglu, A study on Reinforcement Corrosion and related properties of plain and blended cement concretes under different curing condition. Cement & Concrete Composition Vol. 27, 2005, pp. 449-461.
- [8] M. Momtemor, A. Simoes, M. Salta, Effect of fly ash in concrete reinforcement corrosion studied by EIS. Cement and Concrete Composites Vol. 22, 2000, pp. 175-185.
- [9] T. Parthiban, R. Ravi, G. Parthiban, S. Srinivasan, K. Ramakrishnan, M. Raghavan, Neural network analysis for corrosion of steel in concrete. Corrosion Science Vol. 47, 2005, pp. 1625-1642.
- [10] J. Gonzalez, S. Felifi, P. Rodffiguez, E. Ramlrez, C. Alonso, some questions on the corrosion of steel in concrete Part 1: when, how and how much steel corrodes. Material and Structure Vol. 29, 1996, pp. 40-46.
- [11] ASTM G59, Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements. 2009.

