بررسی مقاومت به خوردگی آرماتورهای فولادی در بتن و نقش افزودنی-های الیاف پلی استر و نانوسیلیس در آن

حمید ناظمی*[1]، محمدرضا درخشش[2]، حامد ابراهیم خانی[2]

۱- مربی، گروه مهندسی مواد، واحد مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

۲- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مجلسی، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، اصفهان، ایران

*hnazemi@iaumajlesi.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۴/۱۷، تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۷/۰۸)

چکیده

بتن‌ها غالباً به وسیله میلگردهای فولادی برای افزایش استحکام مسلح می‌شوند. خوردگی این میلگردها یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب سازه‌های بتنی است. یکی از روش‌های مناسب جهت جلوگیری از خوردگی آرماتورها و بهبود خواص مکانیکی بتن، افزودن مواد مختلف برای کاهش نفوذ یون-های مخرب در بتن است. در این تحقیق، الیاف پلی استر و نانو سیلیس بعنوان ماده افزودنی در ساخت بتن استفاده شد. میزان مقاومت به خوردگی آرماتور فولادی بتن در درصدهای متفاوت مواد افزودنی در محلول ۵٪ سدیم کلرید به روش امپدانس الکتروشیمیایی بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزودن الیاف پلی استر تا میزان ۳٪ و نانو سیلیس تا ۴٪ مقاومت در برابر انتقال بار به شدت افزایش یافته و خوردگی آرماتور کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی:

خوردگی، بتن، آرماتور فولادی، الیاف پلی استر، نانوسیلیس.

۱- مقدمه

بتن‌ها غالباً به وسیله میلگردهای فولادی برای افزایش استحکام مسلح می‌شوند. خوردگی این میلگردها یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب سازه‌های بتنی است[۱-۲]. یکی از روش‌های مناسب جهت جلوگیری از خوردگی آرماتورها و بهبود خواص مکانیکی بتن، افزودن مواد مختلف به منظور کاهش نفوذ یون-های مخرب در بتن است[۳-۴]. از جمله این مواد افزودنی می-توان به استفاده از الیاف پلیمری و نانو سیلیس اشاره کرد.

یکی از مهم‌ترین دلایل استفاده از بتن‌های الیافی، افزایش استحکام کششی و انعطاف‌پذیری بیشتر بتن است[۵-۶]. در سال‌های اخیر از الیاف مختلف برای حفاظت از خوردگی سازه-های بتنی استفاده شده است[۷-۸]. با تخریب بتن اطراف آرماتور یا خوردگی میلگرد، پیوند بین فولاد و بتن ضعیف می-شود. همچنین با افزایش اسیدیته محیط به خصوص در سازه‌هایی که در معرض نفوذ کلرید هستند، لایه‌های پسیویته حفاظتی در سطح فولاد خراب شده و خوردگی آغاز می‌شود. بنابراین تخریب پیوند بین فولاد و بتن سبب شکست سازه می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که الیاف، نرمی بتن را بهبود داده و ترک‌های انقباضی را کاهش می‌دهد. همچنین پتانسیل خوردگی

Archive of SID

www.SID.ir

با استفاده از الیاف در بتن مثبت‌تر می‌باشد و از ترک‌های ناشی از خوردگی جلوگیری می‌کند[۹-۱۰].

ملات بتن پس از سخت شدن به دلایل مختلف درون خود منفذهای زیادی باقی می‌گذارد که شاید در شرایط محیطی عادی اثر چندانی نگذارند ولی در شرایط تهاجم آب‌های املاح-دار، به وضوح ضعف‌های بتن به علت این ترک‌ها و منفذهای مویین و شرایط خاص محیطی مشاهده می‌شود. استفاده از نانو سیلیکا باعث می‌شود تا منافذ و راه‌های تأثیرگذاری شرایط خاص در بتن تا حد بسیار زیادی گرفته شده و نفوذپذیری کاهش یابد. به این ترتیب دست‌یابی به سازه‌هایی با دوام و کیفیت بسیار بهتر و هزینه نگهداری و تعمیر پایین‌تر امکان‌پذیر خواهد بود. نانو ذرات سیلیس با ایجاد واکنش پوزولانی با کریستال‌های هیدروکسید کلسیم $Ca(OH)_2$، ژل متراکم و یکپارچه و نامحلول هیدروکسید کلسیم سیلیکات (C-S-H) تشکیل می‌دهد. نانو سیلیس به علت داشتن سطح ویژه بسیار زیاد مانند هسته عمل کرده و چسبندگی بسیار قوی با سیمان هیدراته تشکیل می‌دهد. نانو سیلیس با هیدروکسید کلسیم واکنش داده و از رشد بیشتر بلورهای هیدروکسید کلسیم جلوگیری و مانند پوزولان‌ها، ترک‌های ریز و منافذ موئین را پر کرده و در نهایت سبب تراکم ساختمان سیمان، کاهش نفوذپذیری، افزایش مقاومت، دوام و عمر مفید سازه بتنی می‌گردد. خود ترمیمی بتن از ورود آب و نمک و یون کلر و مواد شیمیایی داخل سازه بتنی جلوگیری نموده و از خوردگی فولاد و تخریب بتن پیشگیری خواهد کرد[۱۱-۱۳].در این تحقیق الیاف پلی استر و ذرات نانو سیلیس به عنوان مواد افزودنی در ساخت بتن مورد استفاده قرار گرفته و میزان خوردگی آرماتور بتن در نسبت های حجمی مختلف این مواد افزودنی با استفاده از روش‌های الکتروشیمیایی بررسی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

سیمان مورد استفاده، جهت ساخت نمونه های بتنی از نوع پرتلند تیپ ۲ می‌باشد. اندازه دانه‌های سنگدانه‌های مورد استفاده مطابق با استاندارد ASTM C33 انتخاب شد. نسبت آب به سیمان مورد استفاده در این تحقیق w/c = 0.48 بود. مواد افزودنی (۱) الیاف پلی استر به طول ۱۲ میلیمتر به میزان ۰، ۱، ۳ و ۴ درصد و (۲) ذرات نانو سیلیس به میزان ۰، ۲ و ۴ درصد بود که خواص فیزیکی و شیمیایی آنها در به ترتیب در جداول ۱ و۲ آمده است. اثر هر کدام از مواد افزودنی بصورت جداگانه بررسی شد. روان‌کننده‌ای که در این تحقیق استفاده شد Conplast RP264M نام داشت.

جدول(۱): مشخصات فیزیکی و شیمیایی الیاف پلی استر.

(°C) نقطه ذوب	(MPa) استحکام کششی	(µm) قطر	(g/cm^3) چگالی	(mm) طول الیاف
۲۴۰- ۲۶۰	>۷۶۰	۲۰	۱/۴	۱۲

جدول(۲): مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانو سیلیس.

٪خلوص	(g/cm^3) چگالی	(m^2/g) سطح مخصوص	(nm) قطر
۹۹/۹	<۰/۱۵	۱۶۵	۱۵

برای ساخت نمونه‌ها، بعد از مخلوط کردن مواد اولیه در میکسر دوار و افزودن الیاف پلی استر یا ذرات نانو سیلیس، بتن در قالب‌های مکعبی به ابعاد ۲۵cm ریخته شد و میلگرد از جنس فولاد ساده کربنی، در مرکز نمونه قرار گرفت. نمونه‌های بتنی در محلول NaCl ۵٪ قرار داده شد.

به منظور بررسی تغییرات پتانسیل مدار باز نسبت به زمان، به مدت ۸ ماه پتانسیل نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. همچنین برای بررسی مقاومت به خوردگی آزمون امپدانس الکتروشیمیایی در محدوده فرکانس ۱۰mHz تا ۱۰۰kHz انجام شد. دستگاه مورد استفاده برای رسم منحنی‌های امپدانس الکتروشیمیایی، پتانسیواستات مدل parstat 2273 بود. سل الکتروشیمیایی از نوع سه الکترودی بوده که شامل الکترود کاری، الکترود کمکی و الکترود مرجع کالومل می‌باشد. برای اندازه‌گیری پتانسیل در بررسی‌های

Archive of SID

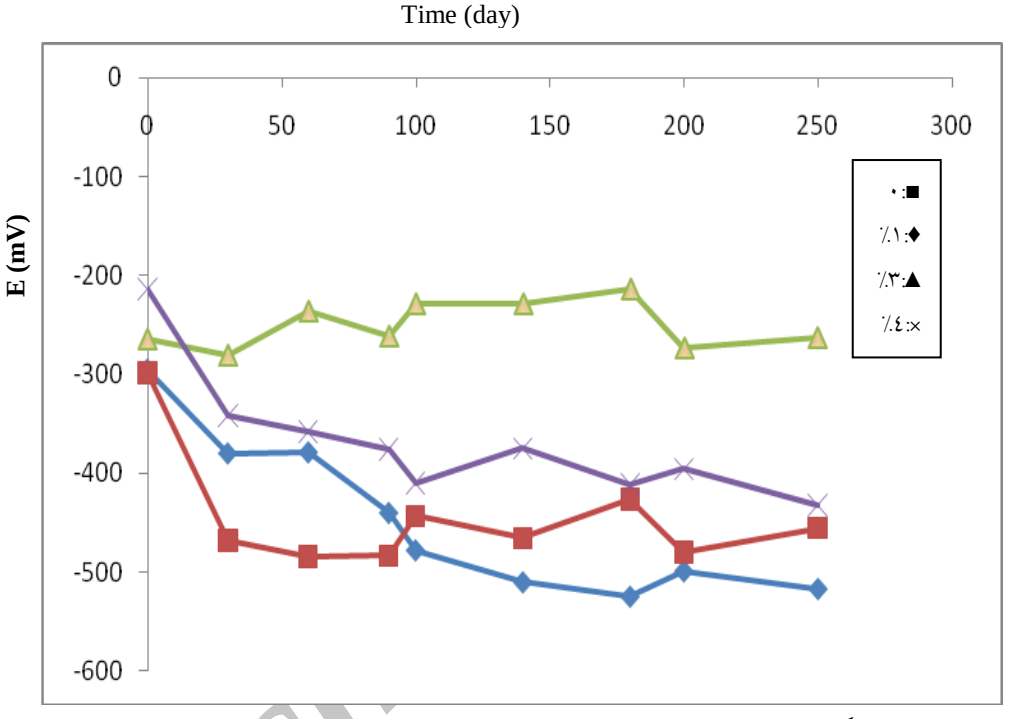
www.SID.ir

پتانسیومتری، الکترودی که مورد استفاده قرار گرفت کالومل بود و پتانسیل میلگرد نسبت به این الکترود اندازه‌گیری شد.

۳- نتایج و بحث

۳- ۱- بررسی الیاف پلی استر

در شکل ۱ تغییرات پتانسیل نسبت به زمان برای بتن با درصدهای متفاوت الیاف، نشان داده شده است. برای انجام این آزمایش، در مدت زمان ۸ ماه پتانسیل نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش درصد الیاف پلی استر، پتانسیل به سمت مقادیر مثبت‌تر رفته و منحنی تعادل بهتری دارد که این در مقدار ۳٪ الیاف پلی استر بخوبی مشاهده می‌شود.

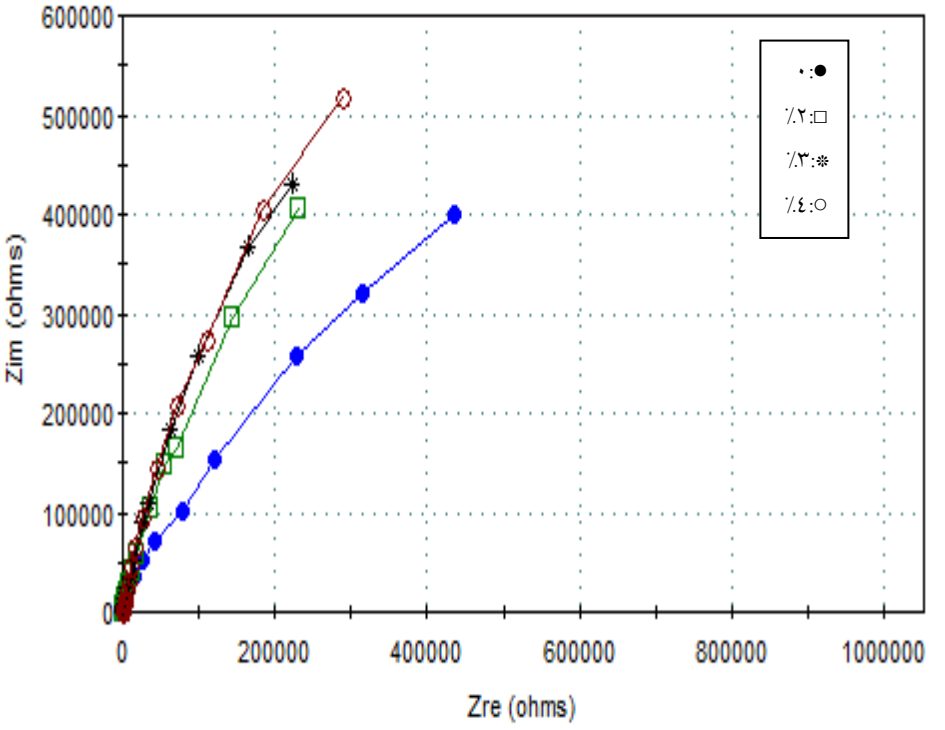


شکل(۱): منحنی تغییرات پتانسیل نسبت به زمان برای بتن با مقادیر متفاوت الیاف پلی‌استر.

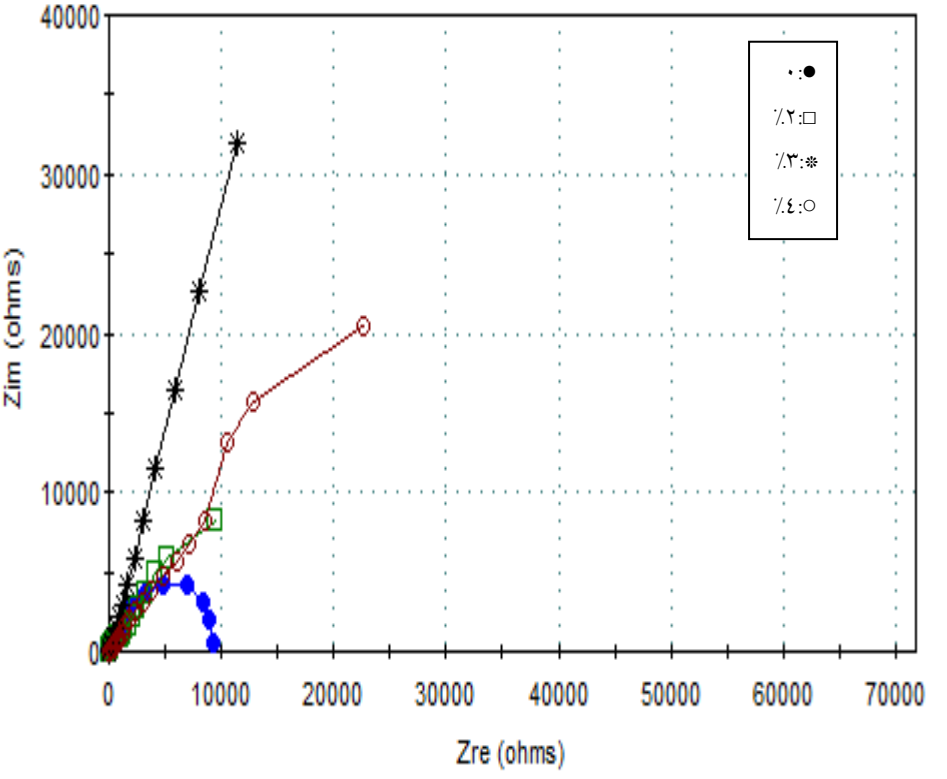
شکل‌های ۲، ۳ و۴ منحنی نایکوئیست نمونه‌ها را در مقادیر مختلف الیاف پلی استر، به ترتیب بعد از ۱، ۱۴ و۶۰ روز قرارگیری در محلول سدیم کلرید ۵٪ نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش درصد الیاف پلی استر، مقاومت به خوردگی به شدت افزایش یافته است اما در مقدار ۴٪، بعد از گذشت ۱۴ روز مقاومت کمتر از ۳٪، و بعد از ۶۰ روز کمتر از ۲٪ می‌شود. بنابراین مقدار الیاف پلی استر بر راندمان بتن الیافی و خوردگی فولاد در بتن تأثیر دارد و مقدار ۳٪ مناسب‌تر است. نتایج انطباق بدست آمده و شبیه‌سازی طیف‌ها توسط نرم افزار Z-View در جدول ۳ آمده است. R_p مقاومت در برابر انتقال بار است. مقاومت انتقال بار معیاری از مقاومت ماده به خارج ساختن یون ها از خود و در نتیجه جایگزینی الکترون در واکنش های کاتدی است. بنابراین هنگامی که مقاومت انتقال بار افزایش می یابد، مقاومت در برابر خارج شدن یون ها و به تبع آن خوردگی کاهش می یابد. در بتن های کامپوزیتی، در حالتی که مبادی ورود و نفوذ یون های مخرب به درون بتن مسدود گردد، زمان لازم برای رسیدن محلول خورنده به آرماتورها افزایش یافته و همین امر خوردگی را کاهش داده و یا به تعویق خواهد انداخت. استفاده از الیاف در بتن، علاوه بر پرکردن مسیرهای نفوذ یون های مخرب به درون بتن، با افزایش فشردگی بتن، این مسیرها را کاملاً مسدود کرده و لذا نرخ خوردگی کاهش یافته است.

Archive of SID

www.SID.ir

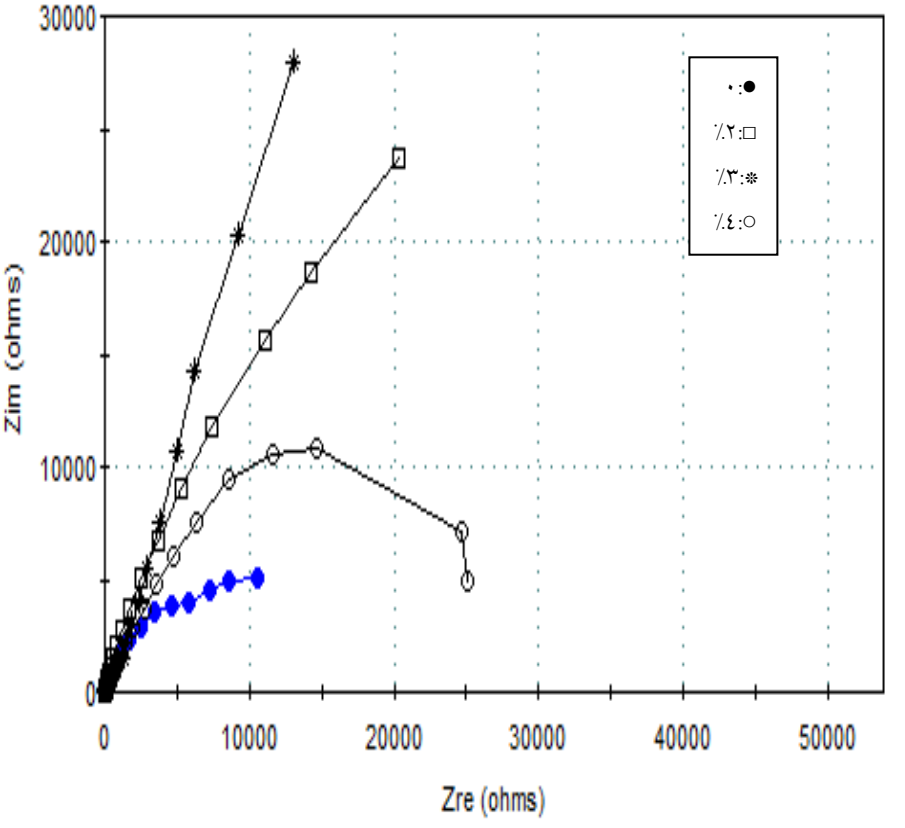


شکل(۲): منحنی نایکوئیست نمونه‌ها در مقادیر مختلف الیاف پلی استر پس از ۱ روز قرارگیری در محلول آب نمک.



شکل(۳): منحنی نایکوئیست نمونه‌ها در مقادیر مختلف الیاف پلی استر پس از ۱۴ روز قرارگیری در محلول آب نمک.

www.SID.ir



شکل(۴): منحنی نایکوئیست نمونه‌ها را در مقادیر مختلف الیاف پلی استر پس از ۶۰ روز قرارگیری در محلول آب نمک.

جدول(۳): نتایج انطباق طیف‌های امپدانس الکتروشیمیایی.

درصد پلی استر	R_p (Ω) بعد از ۱ روز	R_p (Ω) بعد از ۱۴ روز	R_p (Ω) بعد از ۶۰ روز
۰	۲۲۴۰۰	۲۶۷۲	۱۵۹۷
۲	۲۳۷۰۰۰	۶۰۵۳	۱۵۰۵۵
۳	۳۵۰۰۰۰	۳۱۰۰۰۰	۲۸۰۰۰۰
۴	۳۷۴۰۰۰	۲۵۴۱۴	۹۱۳۱

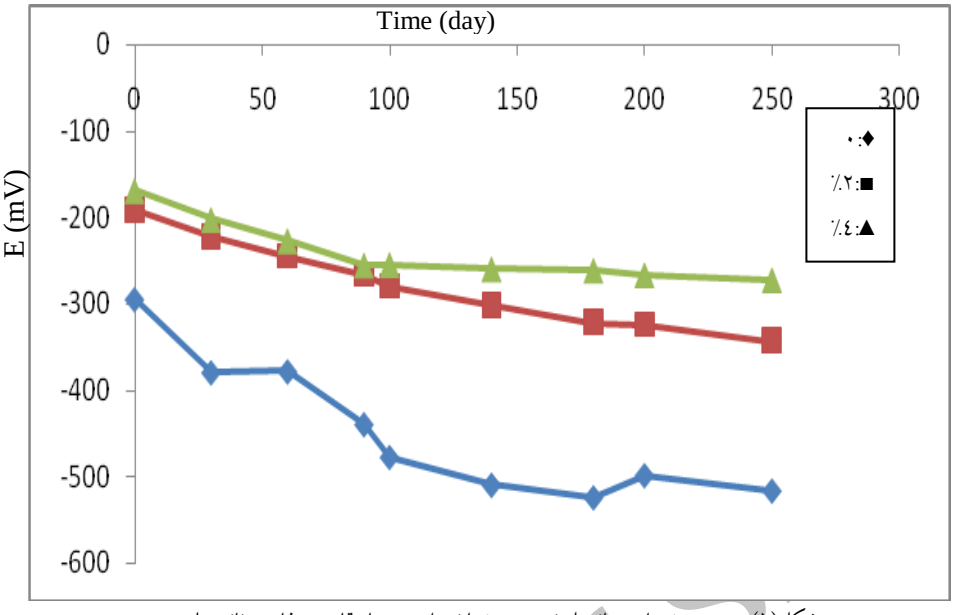
الیاف پلی استر با کاهش نفوذپذیری و کاهش انبساط و انقباض-های حجمی بتن از ترک خوردن جلوگیری می‌کند. همچنین با کاهش نفوذپذیری، باعث کاهش شدت نفوذ عناصر مهاجم به داخل نمونه بتنی می‌شود. در جدول ۳ ملاحظه می‌شود که مقاومت در برابر انتقال بار با افزایش الیاف تا ۳٪، بیشتر می‌شود. برای نمونه R_p به عنوان معیار مقاومت بتن در برابر عوامل خورنده، در حالتی که از پلی استر استفاده نشده است، در مقایسه با استفاده از آن به میزان ۴٪ در یک روز پس از غوطه وری تفاوت چندانی ایجاد نکرده است. چراکه در یک روز حفرات در سطح بتن درگیر بوده و نقش این افزودنی هنوز مشخص نشده است. اما پس از ۶۰ روز غوطه وری، مقدار مقاومت در حالت الیاف در مقایسه با بدون آن در حدود ۳ برابر است. این امر نقش ارزنده الیاف را نشان می دهد.

۲-۳- بررسی ذرات نانو سیلیس

در شکل ۵ تغییرات پتانسیل نسبت به زمان برای بتن با درصدهای متفاوت نانو سیلس نشان داده شده است. برای انجام این آزمایش، مدت ۸ ماه پتانسیل نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش درصد ذرات نانو سیلیس تا ۴٪، پتانسیل به سمت مقادیر مثبت‌تر انتقال پیدا کرده است.

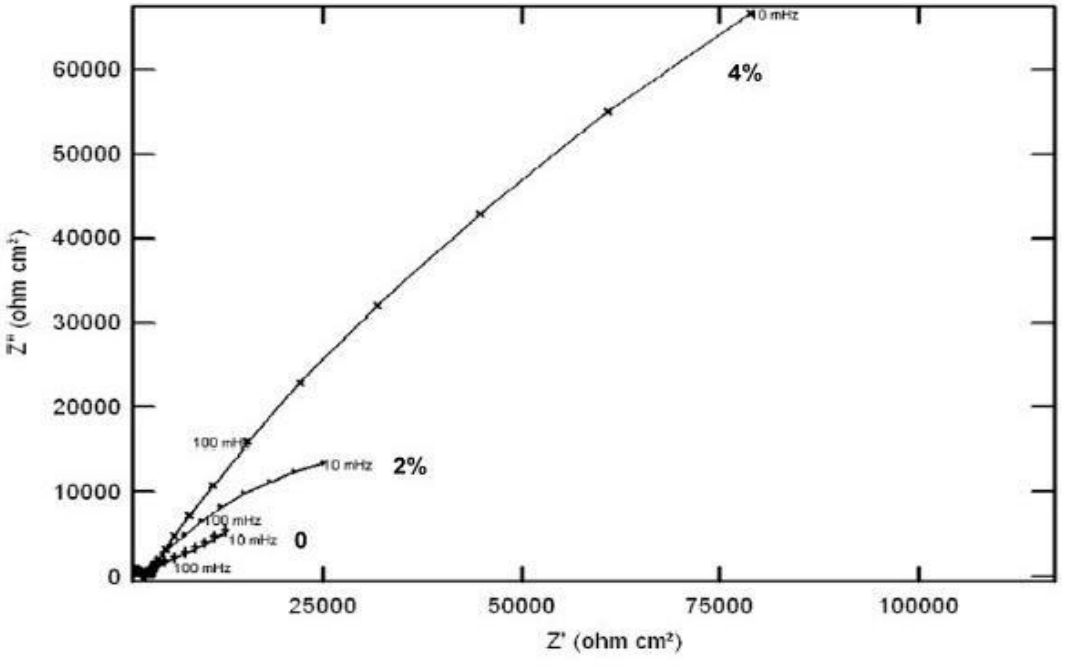
Archive

www.SID.ir



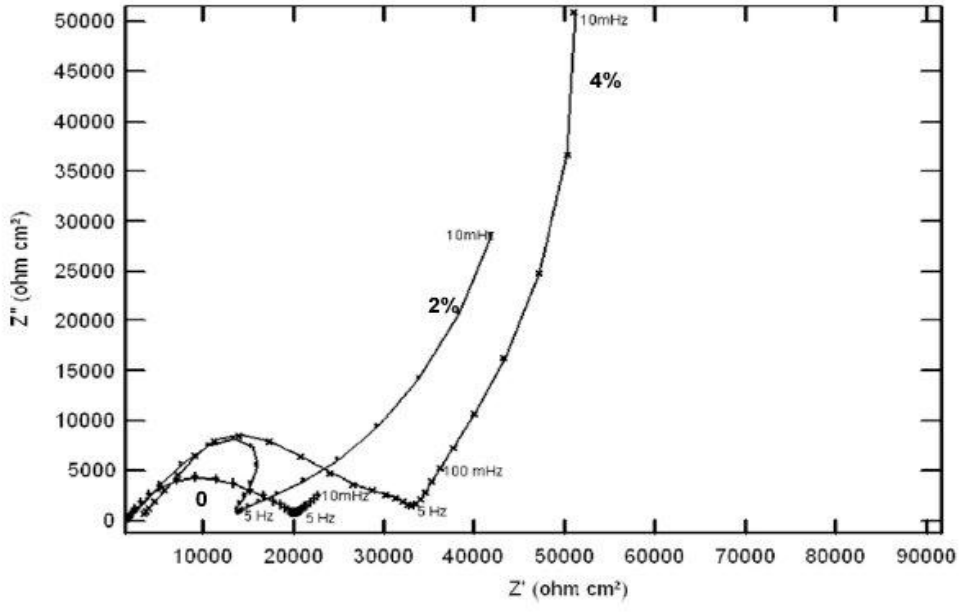
شکل(۵): منحنی تغییرات پتانسیل نسبت به زمان برای بتن با مقادیر متفاوت نانوسیلیس.

شکل‌های ۶، ۷ و ۸ منحنی‌های نایکوئیست نمونه‌ها را در مقادیر متفاوت نانوسیلیس، به ترتیب بعد از ۱، ۱۴ و ۶۰ روز قرارگیری در محلول سدیم کلرید ۵٪ نشان می‌دهد. نتایج انطباق بدست آمده و شبیه‌سازی طیف‌ها در جدول ۴ آمده است. در تمامی شکل‌ها ملاحظه می‌شود که با افزایش درصد افزودنی نانو سیلیس، مقاومت در برابر انتقال بار افزایش یافته، بنابراین خوردگی به شدت کم می‌شود.

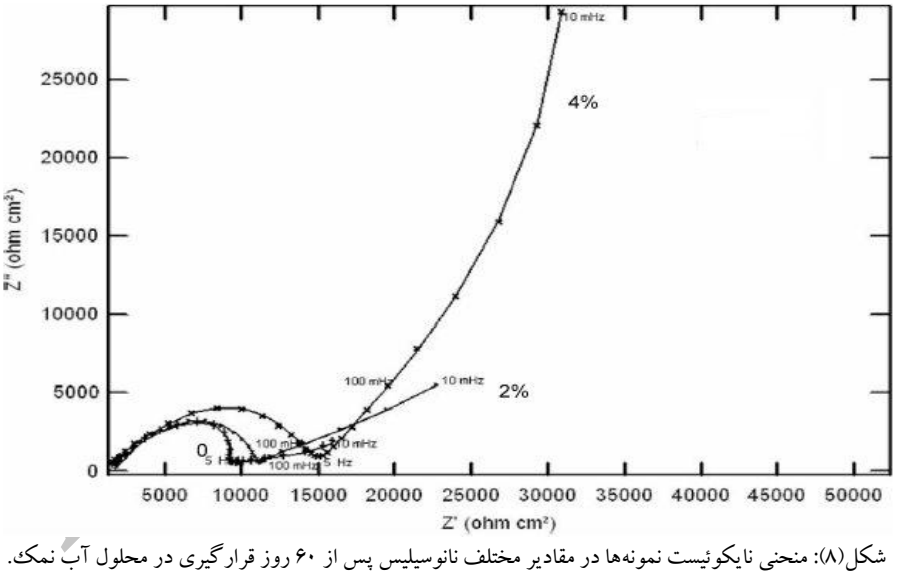


شکل(۶): منحنی نایکوئیست نمونه‌ها در مقادیر مختلف نانوسیلیس پس از ۱ روز قرارگیری در محلول آب نمک.

www.SID.ir



شکل(۷): منحنی نایکوئیست نمونه‌ها در مقادیر مختلف نانوسیلیس پس از ۱۴ روز قرارگیری در محلول آب نمک.



شکل(۸): منحنی نایکوئیست نمونه‌ها در مقادیر مختلف نانوسیلیس پس از ۶۰ روز قرارگیری در محلول آب نمک.

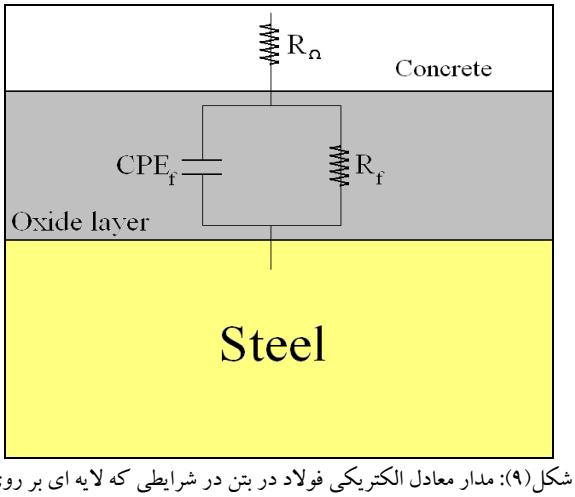
جدول(۴): نتایج انطباق طیف‌های امپدانس الکتروشیمیایی.

درصد نانو سیلیس	R_p (Ω) بعد از ۱ روز	R_p (Ω) بعد از ۱۴ روز	R_p (Ω) بعد از ۶۰ روز
۰	۳۷۵۰	۲۲۳۰	۱۰۰۰۰
۲	۲۷۸۰۰	۲۵۰۰۰	۲۱۰۰۰
۴	۸۴۹۰۰	۸۱۲۰۰	۷۹۰۰۰

نانو سیلیس به خاطر سطح ویژه بالا، دارای فعالیت خیلی زیاد بوده و می‌تواند با کریستال‌های $Ca(OH)_2$ به سرعت وارد واکنش شود و ژل C-S-H را تولید کند. بنابراین اندازه و مقدار این کریستال‌ها در بتن کاهش می‌یابد و از طرف دیگر C-S-H تولید شده باعث پر شدن حفرات موجود در بتن می‌شود و مانع از ورود یون‌های کلرید خواهد شد. بر اساس نتایج ارایه شده از

www.SID.ir

آزمون های امپدانس الکتروشیمیایی می توان مدار معادل شکل ۹ را برای آرماتور موجود در بتن در شرایط کامپوزیتی با الیاف پلی استر و ذرات سیلیس ارایه کرد. بر اساس مدار ارایه شده، بتن دارای مقاومت اهمی می باشد. با افزودن ذرات سیلیس و الیاف پلی استر، این مقاومت به شدت افزایش می یابد. به عبارت دیگر، نقش اصلی در افزایش کارایی بتن ، افزایش مقاومت بتن در برابر نفوذ عوامل و یون های خورنده است. در این تحقیق، سیلیس به عنوان ذرات افزودنی، باعث پرشدن منافذ بتن به طور مستقیم شده است. این امر به شدت نفوذ یون های خورنده را کاهش می دهد. افزودن الیاف پلی استر به صورت غیرمستقیم این منافذ را کاهش داده است. چراکه الیاف مورد نظر باعث فشردگی بیشتر بتن و در نتیجه کاهش میزان نفوذ در بتن شده است. در صورتی که به مدار معادل توجه شود قسمتی از این مدار مربوط به تشکیل لایه اکسیدی بر روی سطح آرماتور است. یکی دیگر از جزییات، مدار مربوط به این لایه است. در صورتی که این لایه نیز خصوصیات مقاومتی بالایی داشته باشد در افزایش مقاومت مدار موثر خواهد بود. لازم به ذکراست قسمتی از مدار که مربوط به محیط بوده و در شکل آورده نشده است، مقاومت محلول است. در حضور عوامل خورنده نظیر یون های کلرید، مقاومت محلول به شدت افت کرده و نفوذپذیری آن افزایش می یابد.



شکل(۹): مدار معادل الکتریکی فولاد در بتن در شرایطی که لایه ای بر روی فولاد تشکیل شده است.

٤- نتیجه‌گیری

۱- الیاف پلی استر با کاهش نفوذپذیری و کاهش انبساط و انقباض‌های حجمی بتن از ترک خوردن جلوگیری می‌کند. همچنین نفوذپذیری کمتر، یعنی عناصر مهاجم کمتری به داخل نمونه بتنی وارد می‌شود. با افزایش الیاف پلی استر تا ۳٪، مقاومت در برابر انتقال بار بیشتر و شدت خوردگی تا حدود ۳ برابر کاهش می‌یابد.

۲- نانو سیلیس با تولید ژل C-S-H حفرات موجود در بتن را پر کرده و مانع از ورود یون‌های کلرید می‌شود. با افزایش درصد نانو سیلیس تا ۴٪ در بتن، مقاومت در برابر انتقال بار افزایش یافته و بنابراین میزان خوردگی تا حدود ۸ برابر کم می‌شود.

٥- مراجع

[1] F.L. Laque, "Marine corrosion, causes and prevention", The Corrosion Monograph Series, 1975.

[2] C. Andrate, C. Alonso & J. Sarria, "Corrosion rate evaluation in concrete structures exposed to atmosphere ", Cement & Concrete Composite, No. 24, pp. 55-64, 2002.

[3] E. M. Bezerra, A. P. Joaquim, H. Savastano, V.M. John & V. Agopyan, "The effect of different mineral additions and synthetic fiber contents on properties of cement based composites", Cement & Concrete Composite, No. 28, pp. 555-563, 2006.

[4] H. G. Wheat, "Using polymers to minimize corrosion of steel in concrete", Cement & Concrete Composites, No.24, pp. 119-126, 2002.

[5] Khajuria, P. Balaguru, "Plastic Shrinkage Characteristics of fiber Reinforced Cement Composite", Fiber Reinforced Cement and Concrete, RILEM, pp. 82-91, 1992.

[6] ACI Committee 544, "Measurement of properties Fiber Reinforced Concrete", ACI Materials Journal, Vol.85, pp. 583-593, 1988.

[7] R. H. Haddad, A. M. Ashteyat, "Role of synthetic fiber in delaying steel corrosion cracks and improving bond with concrete", Canadian Journal of Civil Engineering, No. 28, pp. 787-793,2001.

Archive of SID

www.SID.ir

[8] A.H. Al-Tayyib, "Corrosion of steel reinforcement in polypropylene fiber reinforced concrete structures", ACI Materials Journals, Vol.87, No. 2, pp. 108-113, 1990.

[9] A.A. Gurrten, M. Erbil & K. Kayakirilmaz, "Effect of polyvinylpyrrolidone on the corrosion resistance of steel", Cement & Concrete Composites, No. 27, pp. 802-808, 2005.

[10] S. Ahmmad, "Reinforcement corrosion in concrete structures, Its monitoring and service life prediction a review", Cement & Concrete Composites, No. 25, pp. 459-471, 2005.

[11] P. A. Doland, J.S. Camillo, "Effect of nanosilica Additions on cement pastse", Application of nanotechnology in concrete design, international conference, university of Dundee, Scotland, UK, 2005.

[12] W. Y. Kuo, J.Sh. Huang & Ch. H. Lin, "Effect of organo-modified montmorillonite on strengths and permeability of cement mortars", Cement and Concrete Research, No. 36, pp. 886-895, 2006.

[13] A. Nazari, "Microstructural, thermal, physical and mechanical behavior of the self compacting concrete containing SiO_2 nanoparticles", Materials Science and Engineering A, Vol. 527, pp. 7663-7672, 2010.

Archive of SID

www.SID.ir