

ارزیابی عملکرد میدانی نمونه‌های بتنی مسلح با آزمون طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی

هادی بیرامی^{۱*}، مریم احتشام‌زاده^۲

^۱ دانشجوی دکتری، بخش مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان.
^۲ استاد، بخش مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان.

* نویسنده مسئول: hbeirami@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۰۶

چکیده

تخریب ناشی از خوردگی به عنوان یکی از مهمترین عوامل در اضمحلال گسترده سازه‌های بتنی نصب شده در مناطق جنوبی ایران محسوب می‌شود و این مسئله در سال‌های اخیر توجه محققین بسیاری را به خود جلب نموده است. با توجه به متفاوت بودن نتایج آزمون‌های تسريع شده و یا محیط‌های شبیه‌سازی شده با آزمون‌های میدانی در ارزیابی فرآیند خوردگی لزوم تحقیق جهت دستیابی به داده‌های دقیق میدانی در این خصوص وجود دارد. در این مقاله نتایج مربوط به انجام آزمون‌های طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی بر روی نمونه‌های بتنی شاهد، دارای میکرو سیلیس و دارای ممانعت‌کننده خوردگی پس از «هشت» سال قرارگیری در یک پایگاه تحقیقات خوردگی در حاشیه شمالی خلیج فارس ارائه شده است. آنالیز طیف‌های به دست آمده نشان داد با استفاده از مدار معادل رندلز اصلاح شده می‌توان تحلیل مناسبی از توسعه وضعیت خوردگی در نمونه‌های تحت بررسی به دست آورد. هم‌چنین نمونه‌های دارای میکروسیلیس در مقایسه با نمونه‌های دارای ممانعت‌کننده خوردگی و نمونه‌های شاهد به ترتیب از ۱/۸ و ۱۳/۴ برابر مقاومت انتقال بار بالاتری برخوردار بودند.

کلمات کلیدی: ارزیابی میدانی، خوردگی بتن، امپدانس، ممانعت‌کننده، میکروسیلیس؛

Field evaluation of Reinforced Concrete Samples Using Electrochemical Impedance Spectroscopy Test

H. Beirami^{1*}, M. Ehteshamzadeh²

¹ Ph.D student, Department of Materials Science and Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman.

² Professor, Department of Materials Science and Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman.

* Corresponding Author: hbeirami@yahoo.com

Submission: 2016, 02, 19 Acceptance: 2016, 08, 27

Abstract

Corrosion of reinforced concrete structures is one of the major factors in creating intensive damages in concrete structures installed in south region of Iran. This phenomenon has been in the focus of many studies recently. Since during corrosion assessment stage there is a difference between results of accelerated and field tests, it is necessary to conduct field evaluation survey in this regard. In the current article corrosion behaviour of reinforced concrete cylinders, containing micro silica, corrosion inhibitors and without any additive were studied using Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS). The samples were exposed to corrosive environment in Northern margin of Persian Gulf in a corrosion research center for 8 years. Analysis of observed spectra in terms of modified Randles circuit appeared to be a reasonable approximation. In addition micro silica added samples have 1.8 and 13.4 times better charge transfer resistance comparing to the corrosion inhibitor added and without any additive samples, respectively.

Keywords: Field Evaluation, Concrete Corrosion, Impedance, Corrosion Inhibitor, Micro Silica;

۱- مقدمه

استفاده از آزمون طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی در نمونه‌های بتنی مسلح می‌تواند اطلاعات مفیدی در خصوص مقاومت الکتریکی بتن، خصوصیات دی‌الکتریک پوشش بتنی، سرعت خوردگی و مکانیزم‌های در حال رخداد در فصل مشترک بتن و فولاد را فراهم آورد. در هنگام استفاده از آزمون امپدانس در نمونه‌های بتنی مسلح ممکن است مشاهداتی نظیر ایجاد بیش از یک نیم‌دایره در نمودارهای نایکوئیست، ایجاد دنباله در فرکانس‌های پایین و بروز اغوجاج در نیم دایره‌های به دست آمده رخ دهند. این عوامل بایستی با اضافه کردن اجزای سری مقاومت و خازن، به کارگیری جزء واربرگ و جایگزینی جزء خازن با ثابت زمانی در مدار معادل شبیه‌سازی شود [۷-۹] و با تحلیل مقادیر وضعیت خوردگی در نمونه‌ها ارزیابی گردد که این کار نیز در این مقاله انجام شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

نمونه‌ها به صورت شاهد، همراه با ممانعت‌کننده خوردگی و میکروسیلیس دار تهیه شدند. برای تهیه نمونه‌های میکروسیلیس دار که دارای مقدار ۱۰ درصد میکروسیلیس هستند، به میزان ۱۰ درصد از وزن سیمان کم شده و به جای آن میکروسیلیس اضافه شد. در تمام موارد مقدار روان‌کننده مورد استفاده ۰/۴٪ وزن مواد سیمانی بود. در جدول (۱) مقدار آب و سیمان و وزن شن و ماسه مورد استفاده و همچنین مقدار میکروسیلیس استفاده شده برای تهیه نمونه‌های میکروسیلیس دار آورده شده است. بتن تهیه شده به مدت ۳ دقیقه در همزن بتن اختلاط یافته و سپس ۳۰ ثانیه متوقف شده و مجدداً ۲ دقیقه اختلاط ادامه یافته است. آب مورد استفاده برای تهیه بتن مطابق ترکیب ارائه شده در جدول (۲) و سیمان مورد استفاده در تمام موارد سیمان تیپ بلینی تهران (جدول (۳)) بود. روان‌ساز مورد استفاده ساخت شرکت Tricozal و مدل VZO21 بوده است. هم‌چنین پایه بازدارنده مورد استفاده در این تحقیق آمینوآلکل می‌باشد. برای تهیه آرماتور از میل گرد آجدار شماره ۱۰ نوع A2 استفاده شده است.

دوام و پایداری سازه‌های بتنی مسلح، مانند عرشه‌ی پل‌ها، اسکله‌ها و فونداسیون‌های نصب شده در محیط‌های دریایی از نظر اقتصادی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است [۱]. مهم‌ترین مکانیزم تخریب این نوع سازه‌ها خوردگی آرماتور فولادی در بتن می‌باشد [۲]. در محیط قلیایی بتن (pH بین ۱۲/۵ تا ۱۳/۵)، یک لایه روئین بر روی سطح آرماتور تشکیل می‌گردد و آرماتور را حفاظت می‌نماید. با نفوذ یون کلر و دی اکسید کربن لایه روئین از بین می‌رود و افزایش حجم ناشی از تشکیل و انباشت محصولات خوردگی باعث انهدام بتن می‌گردد [۳-۱]. افزایش حجم بیش از ۶ برابری لایه‌های اکسیدی آهن (محصولات خوردگی) باعث ایجاد تنش حدود ۴۵۰ مگاپاسکال به بتن می‌گردد، که این تنش تابعی از ترکیب بتن، ترکیب محصولات خوردگی و درجه هیدراتاسیون و شرایط قرارگیری سازه می‌باشد [۴-۵]. تخریب در سازه‌های بتنی واقع در محیط خلیج فارس بیشتر از دیگر مناطق ساحلی دنیا تخمین زده می‌شود. در این مقایسه، رطوبت زیاد محیط، جزر و مد، پاشش و گستره‌ی وسیع تغییرات دمایی از جمله عوامل تشدیدکننده خوردگی بتن مسلح در این منطقه از جنوب کشور به شمار می‌آید [۶].

به دست آوردن اطلاعات دقیق عملکردی از بتن‌های گوناگون در محیط‌های خورنده به طراحان کمک می‌کند تا بتوانند طراحی خود را از نقطه نظر دوام مورد بازبینی قرار داده و طول عمر مورد انتظار از سازه را لحاظ نمایند. داشتن اطلاعات مبتنی بر داده‌های میدانی می‌تواند کمک شایانی در این زمینه به نماید و لزوم پرداختن به آزمون‌های میدانی طولانی مدت در این زمینه کاملاً وجود دارد. به ویژه اینکه محیط‌هایی نظیر حاشیه‌های شمالی خلیج فارس از خورنده‌ترین مکان‌های موجود در این کره خاکی محسوب شده و تاکنون ارزیابی عملکرد طولانی مدت نمونه‌های بتنی مسلح دارای روش‌های مختلف حفاظتی شامل افزودن ممانعت‌کننده خوردگی و میکروسیلیس با آزمون امپدانس در حاشیه شمالی خلیج فارس انجام نشده است.

جدول ۱- وزن مصالح مختلف در حالات مختلف نمونه

نوع مصالح	وزن ماسه (Kg/m ³)	وزن شن (Kg/m ³)	آب مصرفی (Lit/m ³)	عیار سیمان (Kg/m ³)	مقدار میکروسیلیس (%)
الف	۸۵۵	۸۵۵	۱۸۲	۴۰۰	صفر
	۸۵۵	۸۵۵	۱۸۲	۳۶۰+۴۰	۱۰
ب	۸۳۳	۹۲۶	۱۸۲	۴۰۰	صفر
	۸۳۳	۹۲۶	۱۸۳	۳۶۰+۴۰	۱۰
ج	۸۴۳	۹۵۷	۱۸۲	۴۰۰	صفر
	۸۴۳	۹۵۷	۱۸۰	۳۶۰+۴۰	۱۰

جدول ۲- مشخصات آب مصرفی جهت ساخت نمونه‌ها

فلوئیدیت	هدایت الکتریکی m.mho s/cm	باقیمانده در تبخیر	سختی کل (mg/l)	سولفات‌ها (mg/l)	کلورها (mg/l)
۷/۵۷	۲/۰۵	۱۱۷	۲۹۱	۳۰۴	۲۶۲

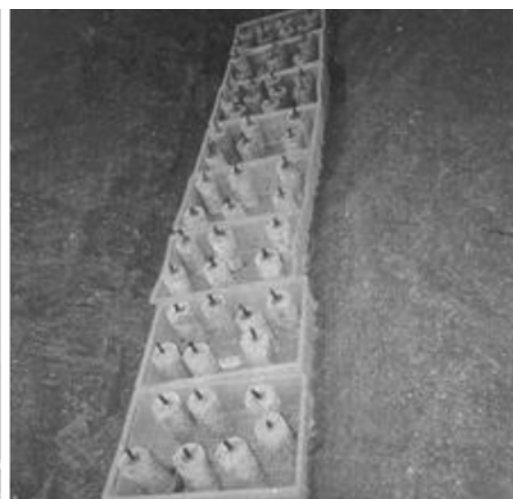
جدول ۳- ترکیب شیمیایی سیمان مورد استفاده (سیمان بلینی تهران)

C ₄ AF	C ₃ A	C ₂ S	C ₃ S	L.O.I	SO ₃ ⁻²	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
۱۰/۳	۶/۹	۲۶/۸	۹/۴۵	۱/۷	۲/۳۲	۳/۴۸	۶۱/۹۳	۳/۳۸	۲/۷۸	۲۱/۴

محل نصب نمونه‌های بتنی در بندرعباس - منطقه پایگاه تحقیقاتی واقع در مجاورت روستای بوستانو می‌باشد که منطقه مذکور در عرض جغرافیایی '۱۳ N ۲۷° و طول جغرافیایی '۲۲ E ۵۶° قرار دارد. درجه حرارت محیط مورد بررسی به دلیل نزدیکی به خط استوا بسیار زیاد بوده و به طور متوسط بین ۳۰ الی ۴۰ درجه سانتی‌گراد متغیر می‌باشد. تغییرات درجه حرارت در شبانه‌روز و در طول سال نیز دارای افت و خیزهای بالایی است به گونه‌ای که تغییرات دمایی در طول سال به بیش از ۴۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. جزر و مد در این منطقه بیش از ۲/۵ متر می‌باشد و خصوصیات جغرافیایی منطقه به عنوان ناحیه گرمسیری احتمال وقوع انواع خوردگی را بالا می‌برد. جهت بررسی وضعیت خوردگی در نمونه‌های بتنی مسلح، از آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه استفاده شد. الکتروود کاری در تمامی نمونه‌ها فولاد ساده کربنی نوع A2 می‌باشد. شایان ذکر است در محیط آزمایشگاه و پیش از آغاز آزمون نمونه‌ها جهت پایداری به مدت ۴ ساعت در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم قرار گرفتند و سپس آزمون مطابق با شرایط مندرج در جدول (۴) بر روی آنها انجام شد.

نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش‌ها به شکل استوانه‌ای با ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر و به قطر ۸ سانتی‌متر بوده است که بر روی محور تقارن آن یک میل‌گرد عاجدار به قطر ۱۰ میلی‌متر به طول ۱۵ سانتی‌متر قرار گرفته است، به طوری که فاصله انتهای میل‌گرد از قاعده استوانه ۴ سانتی‌متر بوده است و ۵ سانتی‌متر فوقانی میل‌گرد دارای یک پوشش عایق پلاستیکی بوده و تنها ۱۰ سانتی‌متر از آرماتور در تماس با بتن بوده است.

نمونه‌های ریخته شده به مدت ۲۴ ساعت نگهداشته شدند تا خودگیری کامل شود و بعد از آن تمام نمونه‌ها در آب غوطه‌ور شده و عمل آوری شده‌اند. مدت زمان عمل آوری ۲۸ روز بود. شرایط نصب نمونه‌ها به این صورت بود که ابتدا تمام نمونه‌ها به محل نصب منتقل شده سپس از محل خارج شدن آرماتور از بتن با چسب سیلیکا آب‌بندی شدند. این عمل به این علت انجام شد که از ایجاد خوردگی شیاری در این مناطق جلوگیری شود. سپس نمونه‌های مربوط به هر حالت خاص در یک جعبه پلاستیکی بصورت عمودی قرار داده شدند (بطوری که آرماتور بیرون آمده از بتن در بالای نمونه قرار گرفته باشد) و در عمق نیم‌متری در فاصله ۳۰ متری از ساحل قرار داده شدند، (شکل (۱)).



شکل ۱- تصاویری از نمونه‌های قرار داده شده در محیط و محل نصب.

۳- نتایج و بحث

در نمونه‌های بتنی مسلح به دلیل پیچیدگی سیستم مدل‌های مختلفی جهت تعیین و ارزیابی پارامترهای واکنش مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۱۰-۱۱]. در میان این مدل‌ها، مدار معادل رندلز اصلاح شده یکی از مناسب‌ترین مدارهای به کار گرفته شده می‌باشد (شکل (۲)). در این مدل R1 جزء مقاومت الکتریکی الکترولیت می‌باشد که با توجه به استفاده از محلول کلرید سدیم ۳/۵ درصد و زنی، این مقاومت عددی کوچک و قابل صرف‌نظر کردن خواهد بود. به دلیل ناهمواری‌های موجود در سطح آرماتور (به سبب زبری سطح و همچنین توسعه محصولات خوردگی) و همین‌طور طبیعت ناهمگن بتن، خازن ایده آل موجود در مدار رندلز (C1) با جزء فاز ثابت (CPE1) جایگزین می‌گردد که عملکرد لایه دوگانه ایجاد شده در سطح آرماتور را نشان می‌دهد. مقاومت این جزء از رابطه (۱) قابل اندازه‌گیری می‌باشد:

$$Z_{CPE} = 1 / Y_0 (j \cdot \omega)^n \quad \text{رابطه (۱)}$$

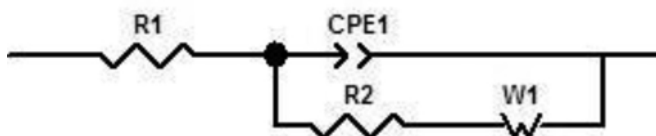
که در این رابطه مقدار n اطلاعاتی در خصوص میزان خروج از حالت ایده آلی در خازن را نشان می‌دهد. Y_0 ادمیتانس پایه، j برابر با جذر منفی یک و ω فرکانس زاویه ای می‌باشد. اجزای

R2 و W به ترتیب مقاومت‌های مربوط به انتقال بار و پدیده نفوذ می‌باشند که نقش تعیین کننده‌ای در سرعت خوردگی آرماتور در بتن دارند.

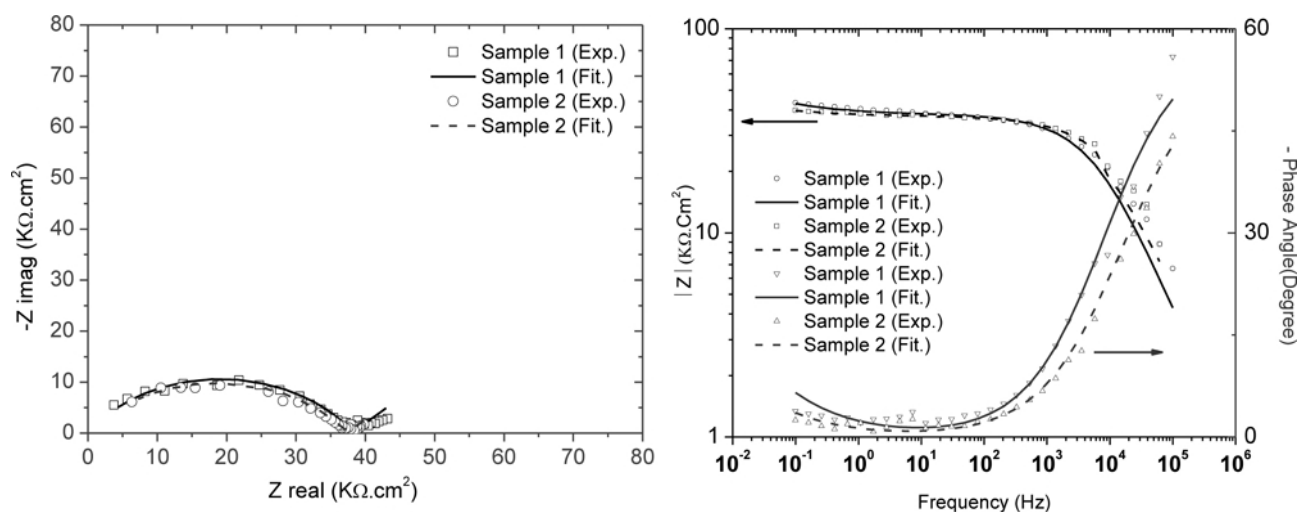
در شکل‌های (۳) الی (۵) نمودارهای مربوط به اندازه‌گیری امپدانس نمونه‌ها به صورت نمودارهای بد و نایکوئیست نمایش داده شده است. همان‌طور که از نمودارها مشخص می‌باشد بین داده‌های آزمایشگاهی و نمودار رسم شده با استفاده از مدار معادل به کار گرفته شده تطابق قابل قبولی وجود دارد. مقدار امپدانس در نمونه‌های دارای ممانعت کننده خوردگی و نمونه‌های حاوی میکروسیلیس به میزان قابل توجهی نسبت به نمونه‌های شاهد افزایش داشته است که همین امر تاثیر مثبت افزودن ممانعت کننده خوردگی و میکروسیلیس در افزایش مقاومت به خوردگی نمونه‌ها پس از هشت سال قرارگیری در حاشیه شمالی خلیج فارس را نشان می‌دهد. با مقایسه نمودارهای نایکوئیست در شکل‌های (۳) و (۴) مشخص می‌شود که برخلاف تصور مقاومت به خوردگی نمونه‌های حاوی میکروسیلیس از نمونه‌های دارای ممانعت کننده نیز بیشتر است. قرائت امپدانس‌های پایین در نمونه شاهد (نمودار نایکوئیست در شکل (۵)) بیانگر شروع پدیده خوردگی در این نمونه‌ها می‌باشد.

جدول ۲- شرایط انجام آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی

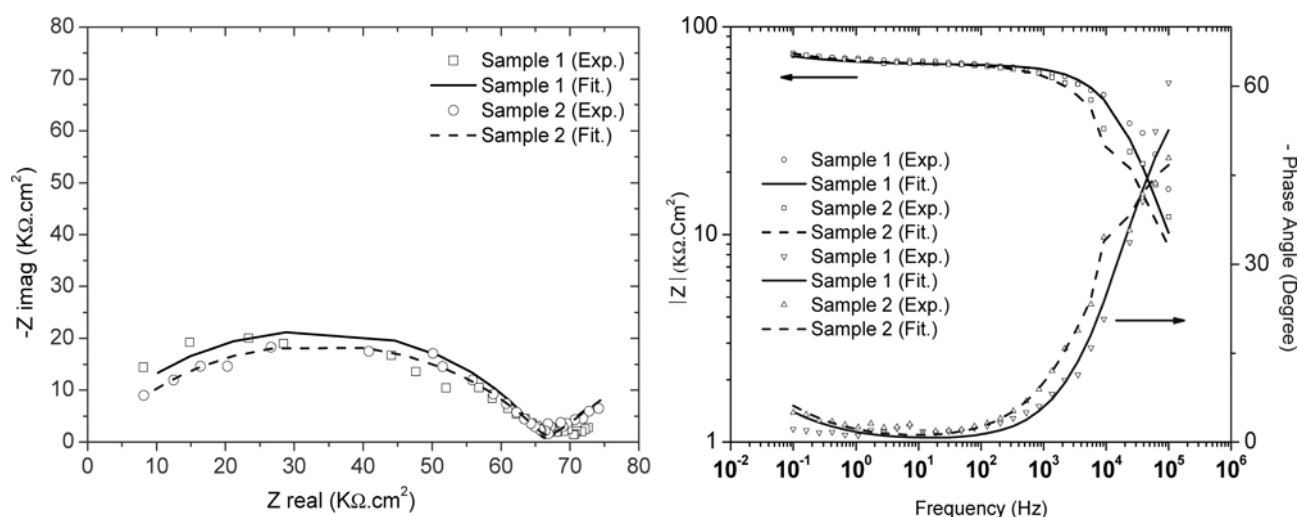
EG&G Potentiostat/Galvanostat Model 273A HF Frequency response analyzer(SI1255)	نوع دستگاه
۳۱/۴۱ Cm ^۲	مساحت مورد آزمایش
SCE (Saturated Calomel Electrode KCl)	الکتروود مرجع
کلرید سدیم ۳/۵ درصد وزنی	الکترولیت
EIS Spectrum Analyzer و Power suite	نرم افزار اندازه گیری آزمون
۱۰ mHz - ۱۰۰ kHz	گستره‌ی فرکانس اعمالی
۱۰ mV	دامنه پتانسیل



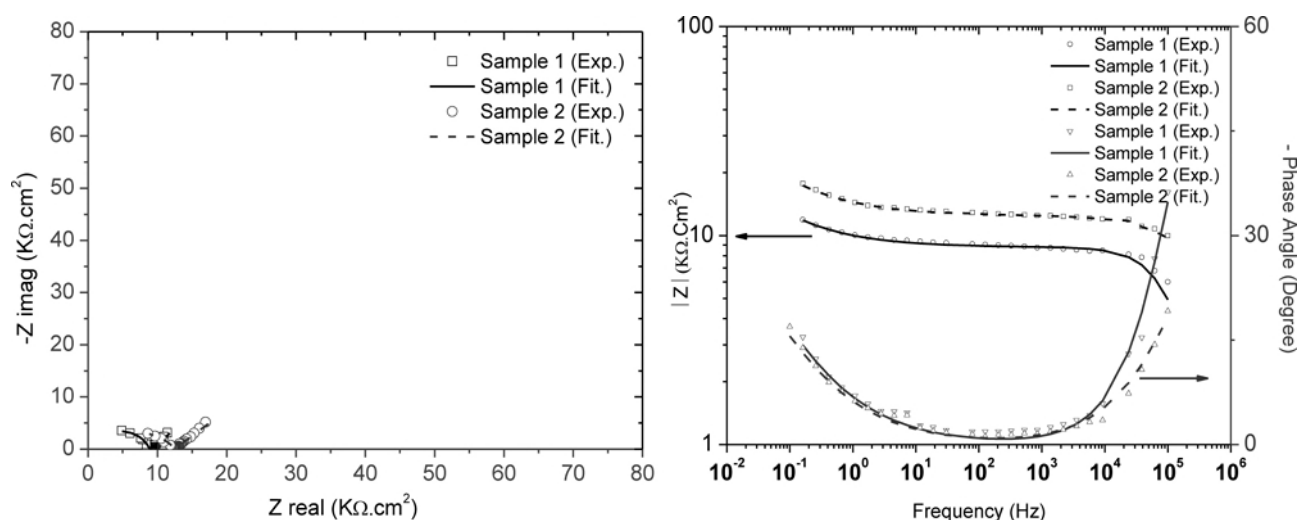
شکل ۲- اجزای مدار معادل رندلز اصلاح شده جهت ارزیابی عملکرد نمونه‌های بتنی مسلح



شکل ۳- نمودارهای بد و نایکوئیست مربوط به نمونه‌های دارای ممانعت کننده خوردگی.



شکل ۴- نمودارهای بد و نایکوئیست مربوط به نمونه‌های دارای میکروسیلیس.



شکل ۵- نمودارهای بد و نایکوئیست مربوط به نمونه‌های شاهد.

ممانعت‌کننده خوردگی و نمونه‌های شاهد به ترتیب از ۱/۸ و ۱۳/۴ برابر مقاومت انتقال بار بالاتری برخوردار بودند. از سوی دیگر نتایج موجود در ستون ظرفیت خازنی و ضریب تصحیح در جدول (۵) نشان می‌دهند انتخاب جزء فاز ثابت در مدار معادل درست می‌باشد و داده‌های مربوط به ظرفیت خازنی و مقاومت در نمونه‌های دارای ممانعت‌کننده خوردگی بیش از سایر نمونه‌ها می‌باشد. این عامل ممکن است به دلیل عملکرد ممانعت‌کننده در افزایش تجمع بار در لایه دوگانه ایجاد شده در فصل مشترک فولاد - بتن باشد. ظرفیت خازنی در نمونه‌های دارای میکروسیلیس و نمونه‌های بدون اضافه شونده تقریباً در یک محدوده می‌باشند.

نتیجه‌گیری

- نتایج حاصل از آزمون امپدانس بر روی نمونه‌های بتنی مسلح نصب شده در حاشیه شمالی خلیج فارس نشان داد که پس از هشت سال قرارگیری در محیط، نمونه‌های دارای میکروسیلیس بیشترین مقاومت به خوردگی (حتی بیش از نمونه‌های دارای ممانعت‌کننده خوردگی) را دارا بودند.
- استفاده از آزمون امپدانس اسپکتروسکوپی، اطلاعات مفیدی را در خصوص عملکرد میدانی نمونه‌ها نشان داد و با استفاده از نمودارهای بد و نایکوئیست حاصل می‌توان در خصوص مکانیزم‌های حاکم بر فرآیند خوردگی در محدوده‌های فرکانسی مختلف اظهار نظر نمود.
- نمونه‌های بتنی مسلح به دلیل پیچیدگی مورفولوژی سطح و ناهمگون بودن الکترولیت، در فرکانس‌های بالا رفتار خازنی ایده‌آل از خود نشان نداده و لازم است از جزء فاز ثابت به جای خازن در مدار معادل استفاده شود.
- در بررسی رفتار فصل مشترک بتن - فولاد در تمامی نمونه‌ها رفتار خازنی، مکانیزم کنترل توسط انتقال بار و مکانیزم کنترل توسط نفوذ دیده شد.

موضوع مهم دیگر در نمودارهای نایکوئیست مربوط به نمونه‌های بتنی مسلح بررسی شده، ظهور پدیده واربرگ در محدوده فرکانس پایین در کلیه نمونه‌ها است. با توجه به اینکه در این نمونه‌ها فرکانس‌های بالا مربوط به عملکرد فصل مشترک الکتروکود - بتن می‌باشد [۱۳-۱۲]، نشان‌دهنده این است که در این محدوده مکانیزم غالب در پدیده خوردگی فرآیند نفوذ بوده و احتمالاً نفوذ اکسیژن و احیای آن کنترل‌کننده واکنش خوردگی می‌باشد [۹، ۱۱، ۱۴ و ۱۵]. براساس اطلاعات موجود در نمودارهای بد، در فرکانس‌های بالا (بیش از ۱۰ کیلوهرتز) نمونه‌ها در نمودار مدول امپدانس بر حسب فرکانس شبیه نزدیک به ۱- (زاویه ۴۵- درجه) از خود نشان داده اند که بیانگر حضور رفتار خازنی در فصل مشترک آرماتور - بتن می‌باشد و زاویه فازهایی متفاوت از ۴۵- درجه بیانگر لزوم استفاده از جزء فاز ثابت به جای خازن ایده آل در مدار معادل انتخاب شده می‌باشد. در فرکانس‌های پایین‌تر که شیب به سمت صفر میل می‌کند، بیانگر این است که مقاومت در برابر فرآیند انتقال بار به‌عنوان مکانیزم غالب و کنترل‌کننده ظاهر گشته است. در فرکانس‌های زیر یک هرتز با تغییر زاویه فاز، کنترل توسط مکانیزم نفوذ قابل مشاهده می‌باشد. مقادیر مربوط به معادل سازی نمودارهای ترسیمی با مدار معادل مورد استفاده در شکل (۲) در اطلاعات مندرج در جدول (۵) قابل ملاحظه می‌باشد.

در اعداد مندرج در جدول (۵) اختلاف زیادی بین مقاومت انتقال بار در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس با سایر نمونه‌ها مشهود می‌باشد و با توجه به اینکه این مقاومت با سرعت خوردگی نسبت معکوس دارد، لذا نشان‌دهنده پیشرفت کمتر خوردگی در این نمونه‌ها می‌باشد. اگرچه نمونه‌های دارای ممانعت‌کننده از مقاومت پلاریزاسیون کمتری نسبت به نمونه‌های دارای میکروسیلیس برخوردار هستند ولیکن به مراتب این مقاومت از مقاومت انتقال بار در نمونه‌های بدون اضافه شونده بیشتر است. نتایج نشان می‌دهند نمونه‌های دارای میکروسیلیس در مقایسه با نمونه‌های دارای

جدول ۵- پارامترهای مربوط به مدار معادل منتج از نتایج آزمون

عنوان	شماره نمونه	مقاومت انتقال بار (KΩ.Cm ²)	ظرفیت خازنی (μF.Cm ⁻²)	ضریب تصحیح (n)	سرعت خوردگی (mm/y)
نمونه ۱ دارای سیمان	نمونه ۱	۳۸/۱	۲۴/۲	۰/۶	۰/۰۰۸
	نمونه ۲	۳۷/۳	۲۲/۵	۰/۶	۰/۰۰۸
نمونه ۱ دارای سیمان و میکروسیلیس	نمونه ۱	۶۶/۷	۱/۳	۰/۷	۰/۰۰۵
	نمونه ۲	۶۶/۱	۲/۸	۰/۷	۰/۰۰۵
نمونه ۱ بدون اضافه شونده	نمونه ۱	۱/۱	۳/۹	۰/۷	۰/۲۷۶
	نمونه ۲	۸/۸	۱/۲	۰/۸	۰/۰۳۶

تشکر و قدردانی

تحقیقاتی و همچنین مشارکت آقایان مهندسان مهرگان عباسی و محمد حافظی و آقای دکتر یداله یعقوبی نژاد جهت همکاری در انجام آزمون‌ها و همین‌طور شرکت پایه بتن بابت تهیه نمونه‌های اولیه تشکر و قدردانی می‌گردد.

بدین‌وسیله از زحمات و همکاری‌های ارزشمند آقای مهندس جلیل صحراگرد و آقای مهندس احمد سایانی از شرکت برق منطقه‌ای هرمزگان، بابت در اختیار قرار دادن امکانات پایگاه

مراجع

- [1] K. Y. Ann, H. W. Song, "Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete", Corrosion Science, Vol. 49, No. 11, 2007, Pp 4113-4133.
- [2] P.V. Naygaard, "Non-destructive electrochemical monitoring of reinforcement corrosion", Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, 2009.
- [3] R. Zhang, "Analysis of both initiation and propagation phases of corrosion in Reinforced Concrete structures and their influence on service life", Ph.D. Thesis, Toulouse, FRANCE Toulouse University, 2008.
- [4] A. Bentur, S. Diamond, N. S. Berke, "Steel Corrosion in Concrete", E & FN Spon, 1st. Edition, 1998, Pp. 76-78.
- [5] M. F. Montemor, A. M. P. Simoes, M. G. S. Ferreira, "Chloride-induced corrosion on reinforcing steel: from the fundamentals to the monitoring techniques", Cement & Concrete Composites, Vol. 25, 2003, Pp. 491-502.
- [6] J. A. Gonzalez, S. Feliu, P. Rodriguez, E. Ramirez, C. Alonso, C. Andrade, "Some questions on the corrosion of steel in concrete Part I: when, how and how much steel corrodes", Materials Structure, Vol. 29, 1996, Pp. 6-40.
- [7] V.Feliu, J.A.Gonzalez, C.Anderade, S.Feliu, "Equivalent circuit for modeling the concrete interface, Experimental evidence and rhetorical predictions", Corrosion Science, Vol. 40, No. 6, 1998, Pp. 975-993.
- [8] R.J. Duarte, A.S.Castela, R.Neves, L.Freire, M.F.Montemor, "Corrosion behavior of steel rebars embedded in concrete: an electrochemical impedance spectroscopy study", Electrochimica Acta, Vol. 124, 2014, Pp. 218-224.
- [9] M. Ismail, M. Ohtsu, "Corrosion rate of ordinary and high-performance concrete subjected to chloride attack by AC impedance spectroscopy", Construction and Building Materials, Vol. 20, 2006, Pp. 458-469.
- [10] J.M.Deus, B.Diaz, L.Freire, X.R.Nova "The electrochemical behavior of steel rebars in concrete: an electrochemical impedance spectroscopy study of the effect of temperature", Electrochimica Acta, Vol. 131, 2014, Pp. 106-115.
- [11] M.A. Pech-Canul, P.Castro "Corrosion measurement of steel reinforcement in concrete exposed to tropical marine atmosphere", Cement and Concrete Research, Vol. 32, 2002, Pp. 491-498.
- [12] G. Song, "Equivalent circuit model for AC electrochemical impedance spectroscopy of concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 30, 2002, Pp. 1723-1730.
- [13] L. Creazzi, "Study and monitoring of materials for protection of steel in concrete", Ph.D. Thesis, University of Trento, Italy, 2007.
- [14] M.F. Montemor, A.M.P. Simoes, M.M. Salta, "Effect of fly ash on concrete reinforcement corrosion studied by EIS ", Cement and Concrete Composite, Vol. 22, 2000, Pp. 175-185.
- [15] M. Serdar, L.V. Zulj, D. Bjegovic "Long term corrosion behavior of stainless reinforcing steel in mortar exposed to chloride environment", Corrosion Science, Vol. 69, 2013, Pp. 149-157.