



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۷، شماره ۳، زمستان ۱۳۹۴، صفحه ۱۷ تا ۳۰

Vol. 47, No. 3, Winter 2015, pp. 17-30



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست

AmirKabir Journal of Science & Research
Civil and Environmental Engineering
(ASJR-CEE)

تأثیر جریان سرگردان DC بر سازه‌های بتنی

عباس آقاجانی کوپایی*^۱، محمد علی گل‌عذار^۲، احمد ساعتچی^۳، کیوان رئیسی^۳، سعید شعبانی^۴

۱- استادیار، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیر دریا، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- استاد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

۴- مربی، پژوهشکده علوم و تکنولوژی زیر دریا، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت: ۱۳۹۲/۱/۲۴ پذیرش: ۱۳۹۳/۲/۲۸)

چکیده

در این مقاله اثرات جریان سرگردان DC بر نمونه‌های بتنی در شرایطی که آرماتورها در معرض خوردگی نیستند (محیط آبی عاری از کلرید)، بررسی شده است. نمونه‌های بتنی با نسبت‌های مختلف آب به سیمان و میکروسیلیس پس از عمل‌آوری به مدت ۳۰ روز در محیط آب مقطر در معرض میدان الکتریکی ۵۰ VDC قرار گرفت. اثرات میدان مزبور بر بتن با آزمون‌های مقاومت ویژه، طیف‌نگار امیدانس الکتروشیمیایی و آزمون الکتریکی نفوذپذیری مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج، جریان سرگردان DC دارای اثرات منفی بر نفوذپذیری بتن است. کاهش نسبت آب به سیمان و نیز افزودن میکروسیلیس به طرح اختلاط بتن موجب افزایش مقاومت بتن در برابر اثرات منفی جریان سرگردان DC می‌شود. مکانیزیم پیشنهادی مهاجرت هیدرواکسید کلسیم بتن از طریق گسترش انحلال آن در محلول حفره‌های بتن و انتقال آن در مسیر میدان الکتریکی است.

کلمات کلیدی:

جریان سرگردان، بتن، دوام، نفوذپذیری

۱- مقدمه

در بسیاری موارد سازه‌های بتنی تحت تأثیر میدان الکتریکی ناشی از جریان سرگردان قرار می‌گیرند. سازه‌های بتنی در مجاورت سیستم‌های حفاظت کاتدی و فنداسیون بتنی تونل مترو، نمونه‌ای از سازه‌های بتنی در معرض جریان سرگردان هستند.

در بسیاری از ایستگاه‌های تقویت فشار گاز و نیز پالایشگاه‌های نفت و گاز، حجم قابل ملاحظه‌ای فنداسیون بتنی در درون خاک قرار دارد. در این تاسیسات لوله‌های فلزی مدفون در خاک تحت حفاظت کاتدی قرار دارند. بنابراین فنداسیون‌های بتنی که در مجاورت آنها و در درون خاک قرار دارند در بسیاری موارد در میدان الکتریکی ناشی از حفاظت کاتدی لوله‌های زیر زمینی قرار دارند [۱،۲].

در قطارهای شهری درصدی از جریان الکتریکی DC از طریق ریل‌ها به زمین نشت می‌کند. بدلیل طول زیاد ریل‌ها و نیز ایمنی مسافران و وجود سیستم ارت در ایستگاه‌های قطار شهری، جلوگیری کامل از نشت جریان الکتریکی در شبکه مترو وجود ندارد [۳-۵].

در کلیه مواردی که بطور نمونه اشاره گردید، ساختارهای بتنی تحت تأثیر میدان الکتریکی قرار دارند. بنابراین لازم است تأثیر میدان الکتریکی ناشی از جریان سرگردان بر سازه‌های بتنی مورد بررسی قرار گیرد. بر اساس گزارش مروری که انجمن خوردگی آمریکا در سال ۲۰۱۰ در رابطه با اثرات جریان سرگردان در سازه‌های بتنی انتشار کرده [۶]، اغلب مقالات و تحقیقات انجام شده در این رابطه در خصوص بررسی خوردگی آرماتورهای فولادی در بتن می‌باشد و کمتر به بررسی تغییرات ساختار بتن در شرایط جریان سرگردان پرداخته شده است.

بررسی‌های انجام شده در رابطه با تأثیر جریان DC بر ساختار بتن را می‌توان بطور خلاصه در دو گروه زیر طبقه‌بندی کرد:

۱- مقالاتی که به بررسی جریان سرگردان DC و یا جریان‌های آندی بر خوردگی آرماتورهای بتن پرداخته اند. مراجع [۶-۹] نمونه‌ای از این تحقیقات می‌باشد.

۲- مقالاتی که در ارتباط با تأثیر مهاجرت کلرید بر ساختار بتن در آزمون‌های الکتریکی تعیین ضریب کلرید بتن و یا تأثیر زدودن الکتریکی کلرید از بتن بر ساختار آن می‌باشد. منابع [۱۰-۱۳] نمونه‌ای از تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌باشد.

تحقیقات گروه دوم که در ارتباط با مهاجرت کلرید در بتن است تا حدودی به تحقیقات این مقاله نزدیک است و بطور نمونه نتایج برخی از آنها بشرح زیر است:

”سنچز“ و همکاران [۱۰] طی مقاله‌ای اثرات مهاجرت یون‌ها در آزمون‌های الکتریکی بتن در ایجاد خطا برای اندازه‌گیری ضریب نفوذ کلرید در بتن را بررسی کردند. آنها از مجموعه‌ای که دارای دو محفظه بود استفاده کردند. محفظه‌های مزبور توسط نمونه بتنی از یکدیگر جدا می‌شدند. در یکی از آنها محلول یک مولار آب نمک و در دیگری آب مقطر ریخته شد. جریان الکتریکی در ولتاژ ۷۱۲ توسط دو الکتروود فلزی

بین محفظه آندی و کاتدی برقرار گردید. علاوه بر این با قراردادن الکتروود کاری و مرجع در محفظه کاتدی و قرار دادن الکتروود کمکی در محفظه آندی طیف امپدانس نمونه‌های بتنی در زمان‌های مختلف ترسیم گردید. در این آزمون تغییرات ایجاد شده در طیف EIS به دلیل تغییرات ترکیب شیمیایی محلول حفره‌های بتن است. با نفوذ آب نمک به درون حفره‌های بتن، طیف امپدانس بطرف امپدانس‌های کمتر (بطرف چپ) جابجا می‌شود. آنها مشاهده کردند تا ۲۹۰ ساعت طیف امپدانس بطرف چپ جابجا می‌شود ولی اگر زمان عبور جریان از ۲۹۰ ساعت بیشتر شود اندکی بطرف راست حرکت می‌کند. آنها از این موضوع نتیجه گرفتند که در مدت زمان‌های طولانی، کلریدها می‌توانند با مواد هیدراته جداره‌ی حفره‌های موبین واکنش داده و تولید پیوند شیمیایی با آن نمایند. مواد حاصل از این واکنش موجب تنگ‌تر شدن حفره‌های موبین بتن و در نتیجه کاهش نفوذپذیری آن و حرکت طیف امپدانس بطرف راست می‌شود. بنابراین آزمون‌های الکتریکی بتن که برای تعیین نفوذپذیری بتن در برابر کلرید بکار می‌رود از لحاظ ایجاد اتصال کلرید با جداره حفره‌های موبین بتن دارای خطا است. بنابراین آنها در حقیقت یکی از منابع بروز خطا در آزمون الکتریکی تعیین نفوذپذیری بتن را بررسی کردند [۱۰].

”مایکل سیگورت“ [۱۱] و همکاران اثرات زدودن کلرید بتن به روش الکتروشیمیایی را بر مهاجرت یون‌ها و تغییر ساختار بتن بررسی کردند. در این بررسی آنها اثرات زدودن کلرید بر ساختار بتن را توسط میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار دادند و با مقایسه نمونه‌های کلرزدایی شده با نمونه‌های خام، اظهار داشتند، عملیات الکتریکی کلرزدایی بتن می‌تواند نفوذپذیری بتن را افزایش دهد. همچنین آنها با بکارگیری غشاءهای با اندازه حفره‌های مشخص، تأثیر اندازه‌های حفره‌های موبین در مهاجرت یون‌ها را مورد بررسی قرار دادند [۱۱].

”جیندرا“ و همکاران [۱۲] سعی کردند بین نتایج آزمون EIS و نفوذپذیری بتن و نیز بین نتایج آزمون EIS و نتایج آزمون الکتریکی تعیین نفوذپذیری بتن، رابطه برقرار کنند. به همین دلیل با انجام آزمون‌های الکتریکی و نیز آزمون‌های EIS متعدد و رسم نمودارهای مختلف، سعی کردند بین پارامترهای امپدانس و آزمون الکتریکی تعیین نفوذپذیری بتن رابطه برقرار کنند [۱۲].

امروزه سازه‌های بتنی از طریق بکارگیری روش‌های الکتروشیمیایی (نظیر حفاظت کاتدی)، افزایش دانسیته بتن (از طریق کاهش نسبت آب به سیمان و یا افزودن مواد پوزولانی به طرح اختلاط بتن) و نیز بکارگیری پوشش در برابر نفوذ کلرید و اثرات خوردگی آن بر آرماتور حفاظت می‌شوند [۱۴]. مطالعات انجام شده در این رابطه عمدتاً در خصوص حفاظت خوردگی آرماتور است. از آنجائیکه بتن برای جریان الکتریکی نوعی الکترولیت محسوب می‌شود بنابراین احتمالاً جریان سرگردان منجر به انجام برخی واکنش‌های شیمیایی در فاز جامد و یا فاز مایع (محل حفره‌های بتن) و نیز مهاجرت یون‌ها و انجام فرایند انتقال جرم در بتن شود. موارد مزبور می‌تواند بر ساختار بتن و نفوذپذیری آن در برابر یون‌ها

جدول ۱: طرح اختلاط نمونه‌های بتنی

نمونه	سیمان پرتلند (kg/m ³)	شن 5 mm > (kg/m ³)	ماسه 5-10 mm (kg/m ³)	درصد میکروسیلیس (kg/m ³)	درصد وزنی روان‌ساز G110P	آب (kg/m ³)	w/(c+SF)
۱	۳۵۰	۱۱۴۵	۱۹۹	-	۲%	۱۲۹/۵	۰/۳۷
۲	۳۵۰	۱۱۴۵	۱۹۹	-	۲%	۱۴۰	۰/۴۰
۳	۳۵۰	۱۱۴۵	۱۹۹	-	۲%	۱۴۷	۰/۴۳
۴	۳۲۲	۱۱۴۵	۱۹۹	۸% (۲۸)	۲%	۱۴۰	۰/۴۰
۵	۳۱۵	۱۱۴۵	۱۹۹	۱۰% (۳۵)	۲%	۱۴۰	۰/۴۰

۲- روش تحقیق

۲-۱- نمونه‌های بتنی

طرح‌های اختلاط مندرج در جدول ۱ برای ساخت نمونه‌های بتنی استفاده شد. قالبگیری بلوک‌های سیمانی در استوانه‌هایی به قطر ۱۰ سانتی متر انجام شد. از هر طرح اختلاط چهار بلوک استوانه‌ای بتنی تهیه شد تا در صورت نیاز به انجام آزمون‌های تکمیلی و یا تکرار آزمون‌های قبلی امکان‌پذیر باشد. مطابق شکل ۱-الف در داخل بلوک‌های استوانه‌ای سه ردیف میله فولاد ساده کربنی وجود دارد. قسمت میانی این میله‌ها بطول ۳/۵ cm بدون پوشش می‌باشد. این ناحیه درست در داخل نمونه بتنی قرار دارد. از این میله‌ها برای انجام آزمون طیف نگار امپدانس الکتروشیمیایی استفاده شد.

زمان عمل‌آوری کامل نمونه‌های حاوی میکروسیلیس بیش از ۲۸ روز است، زیرا میکروسیلیس نوعی ماده پوزولانی است و می‌تواند با مواد قلیایی حاصل از واکنش هیدراته شدن سیمان واکنش داده و تولید محصولات هیدراته نماید [۱۴]. نمونه‌های ۴ و ۵ دارای میکروسیلیس می‌باشند بنابراین برای ایجاد شرایط یکسان، کلیه نمونه‌ها در دمای محیط به مدت ۶۰ روز در داخل آب قرار داده شده تا واکنش‌های عمل‌آوری آنها کامل شود. سپس یک سانتی‌متر از بالا و پائین نمونه‌ها بریده شد و مابقی آن به سه نمونه استوانه‌ای به ارتفاع ۵ cm بریده شد. بدین ترتیب مطابق شکل (۱-ب) در داخل هر نمونه بریده شده، سه الکتروود فولادی قرار دارد. از هر طرح اختلاط چهار بلوک استوانه بتنی تهیه شد. بر اساس استاندارد ASTM C1202 [۱۵]، برای انجام آزمون الکتریکی اندازه‌گیری نفوذپذیری، سطوح جانبی نمونه‌ها باید دارای پوشش باشد بنابراین بر روی سطوح جانبی آنها پوشش اپوکسی اعمال شد و فقط سطوح برش زده شده بالایی و پایینی بدون پوشش هستند.

۲-۲- روش آزمایش

پس از عمل‌آوری نمونه‌ها و قبل از اعمال جریان سرگردان DC و همچنین در حالت اشباع از آب، از هر طرح اختلاط یک نمونه انتخاب و ساختار و نیز نفوذپذیری آنها به کمک آزمون‌های مقاومت ویژه،

تأثیر داشته باشد. در مقالات موجود تأثیر جریان سرگردان DC بر ساختار و نفوذپذیری بتن در محیط عاری از کلرید بررسی نشده است.

هدف از این تحقیق بررسی اثرات جریان سرگردان DC بر ساختار و نفوذپذیری بتن در محیط عاری از کلرید است. برای این منظور نمونه‌های مختلف بتن با نسبت‌های متفاوت آب به سیمان و میکروسیلیس ساخته شد و در محیط آبی عاری از کلرید در معرض جریان سرگردان DC قرار داده شد. سپس اثرات آن بر ساختار و نفوذپذیری بتن از طریق آزمون‌های طیف نگار امپدانس الکتروشیمیایی^۱ و آزمون الکتریکی نفوذپذیری^۲ (آزمون RCP) بررسی شد.



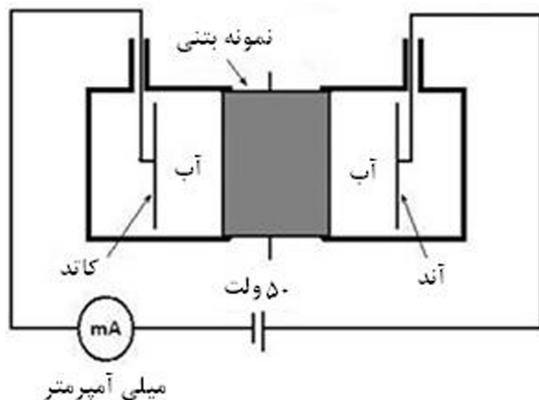
الف



شکل ۱: الف) بلوک‌های استوانه‌ای بتنی قبل از برش (ب) نمونه‌های بتنی بعد از برش

^۱ Electrochemical Impedance Spectroscopy

^۲ Rapid Chloride Penetration (RCP) test



شکل ۲: اعمال جریان سرگردان در میدان الکتریکی ۵۰ VDC بر روی نمونه‌های بتنی به مدت ۳۰ روز در محیط آب مقطر

۲-۱- اندازه‌گیری مقاومت ویژه

برای اندازه‌گیری مقاومت ویژه، نمونه‌های بتنی اشباع از آب بین دو صفحه فولادی با اختلاف پتانسیل ۱۲ VDC قرار داده شدند. برای ایجاد ارتباط الکترولیتی بهتر، بین صفحه فولادی و سطح بتن پارچه مرطوب قرار داده شد. با اندازه‌گیری جریان عبوری از نمونه‌ها، مقاومت ویژه آنها به کمک رابطه $\rho = R \times A / l$ و با احتساب $R = \Delta E / I$ محاسبه شد [۱۴]. در این رابطه ΔE اختلاف پتانسیل (V) در لحظه خاموش کردن جریان از طریق منبع تغذیه بین صفحه بالایی و پایینی، I (آمپر) جریان عبوری از نمونه بتنی درست قبل از قطع جریان، l ضخامت نمونه (بر حسب cm، ضخامت نمونه‌ها ۵ cm است)، A سطح تماس صفحه فلزی با نمونه بتنی (بر حسب cm^2 ، این سطح در مورد نمونه‌های بتنی $78/5 \text{ cm}^2$ است) و ρ مقاومت ویژه بتن بر حسب $\Omega \cdot \text{cm}$ است. ضمناً قبل از انجام آزمایش، آب اضافی سطح نمونه‌ها به کمک پارچه خشک برطرف شد. به منظور حذف خطای ناشی از اثرات پلاریزاسیون جریان DC، از پتانسیل لحظه خاموش استفاده شد. در این روش ΔE افت پتانسیل در لحظه قطع جریان و I جریان در لحظه قبل از قطع جریان است.

۲-۲- آزمون طیف نگار امپدانس الکتروشیمیایی

آزمون مزبور در حالت اشباع از آب، قبل و بعد از اعمال جریان سرگردان DC، انجام شد. میله‌های فولادی نصب شده در نمونه‌ها (شکل ۱-ب) به عنوان الکترودهای کاری، کمکی و مرجع در این آزمون استفاده شد.

مطابق شکل ۳، طیف امپدانس الکتروشیمیایی بتن دارای دو قوس یا نیم حلقه است. قوس فرکانس بالا مربوط به خواص و ساختار بالک بتن و قوس فرکانس پایین مربوط به خواص فصل مشترک الکترودهای فولادی با بتن است [۱۶، ۱۷].

مقاومت حقیقی شروع و پایان حلقه مزبور به ترتیب $R_p(S+L)$ و $R_c = R_p(S+L) + R_p(INT)$ است. که در آن $R_p(INT)$ مقاومت کل فصل مشترک‌های جامد-مایع (Ω) و $R_p(S+L)$ مقاومت کل فازهای جامد و

آزمون طیف‌نگار امپدانس الکتروشیمیایی (نمودار نایکوئیست) و آزمون نفوذپذیری الکتریکی (آزمون RCP) بررسی شد. همچنین پس از آزمون نفوذپذیری الکتریکی، نمونه‌ها برش زده شد و با پاشیدن محلول نیترات نقره ۰/۱ نرمال بر سطح بریده شده، عمق نفوذ کلرید به عنوان معیاری از ضریب نفوذ در برابر کلرید اندازه‌گیری شد. برای ایجاد حالت اشباع از آب، نمونه‌ها قبل از آزمون به مدت ۵ روز در دمای محیط در آب مقطر قرار داده شدند.

تغییرات نفوذپذیری از طریق آزمون الکتریکی و اندازه‌گیری مقاومت ویژه و آزمون طیف‌نگار امپدانس الکتروشیمیایی قابل بررسی است. در آزمون الکتریکی نفوذپذیری، از محلول ۳% آب نمک استفاده می‌شود. بنابراین محلول آب نمک فقط برای آزمون بتن بکار گرفته شد ولی اعمال جریان سرگردان DC به مدت ۳۰ روز در محیط عاری از کلرید اعمال شد. نمونه‌های دیگر از هر طرح اختلاط مطابق شکل (۲)، به مدت ۳۰ روز در محیط آب مقطر در ۵۰ VDC قرار گرفت. این حالت نوعی اعمال جریان سرگردان DC محسوب می‌شود. هر روز آب موجود در سلول کاتدی و آندی شکل ۲ با آب مقطر تازه جایگزین شد. آند و کاتد در شکل مزبور از جنس توری برنجی با مش ۲۰ است.

پس از گذشت ۳۰ روز در حالت اشباع از آب، آزمون‌های مقاومت ویژه، طیف‌نگار امپدانس الکتروشیمیایی و نفوذپذیری الکتریکی بر روی نمونه‌ها انجام شد. همچنین پس از آزمون نفوذپذیری الکتریکی، نمونه‌ها برش زده شد و با پاشیدن محلول نیترات نقره ۰/۱ نرمال بر سطح بریده شده، عمق نفوذ کلرید در آنها اندازه‌گیری شد. سپس نتایج قبل و بعد از اعمال جریان سرگردان DC با یکدیگر مقایسه شد.

علاوه بر این از هر طرح اختلاط نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتیمتر (بدون نصب میله فلزی در آنها) تهیه شد و پس از عمل‌آوری، استحکام فشاری آنها اندازه‌گیری شد (جدول ۲). از آنجائیکه نمونه‌هایی که در معرض ۵۰ ولت DC قرار گرفتند حاوی میله‌های فلزی برای انجام آزمون EIS بودند بنابراین نتایج آنها قابل مقایسه با نمونه‌های بدون میله فلزی نبود. از طرف دیگر نمونه‌های مزبور دارای ارتفاع ۵ سانتی‌متر بودند در صورتیکه نمونه‌های استحکام فشاری با ارتفاع ۲۰ سانتیمتر بودند. بنابراین استحکام فشاری نمونه‌ها فقط قبل از اعمال ۵۰ ولت DC اندازه‌گیری شد و بررسی تاثیر ولتاژ مزبور بر ساختار و خواص فیزیکی نمونه‌های بتنی به کمک آزمون‌های مقاومت ویژه، EIS و آزمون RCP انجام شد. در جدول ۲ فقط استحکام فشاری قبل از اعمال ۵۰ VDC ارائه شده است.

جدول ۲: استحکام فشاری نمونه‌های بتنی قبل از اعمال ۵۰ VDC

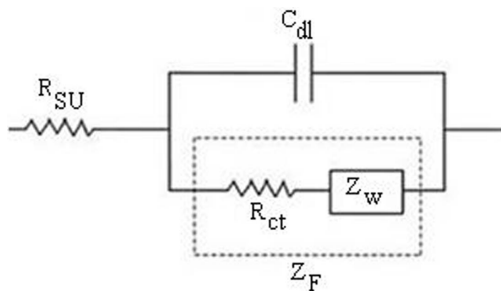
نمونه	۱	۲	۳	۴	۵
استحکام فشاری	۴۱۰/۶	۳۸۰/۴	۳۷۰/۵	۴۱۰/۸	۴۳۵/۲
(kg/cm^2)					

۰/۵ مولار است، واکنش زیر در فصل مشترک الکتروود نقره با سطح بتن انجام می‌شود [۱۶،۱۷]:



انجام واکنش الکتروشیمیایی در سطح الکتروود نقره باعث ایجاد امپدانس واربروگ^۴ در طیف امپدانس الکتروشیمیایی می‌شود. با توجه به اینکه واکنش فوق، واکنش الکتروشیمیایی و رورسیبل^۵ است و تنها در کنترل نفوذ کلرید قرار دارد. بنابراین در طیف امپدانس و در فرکانس‌های پایین ایجاد خطی تقریباً مستقیم با شیب -۱ می‌کند. قوس دیگری نیز در فرکانس‌های بالاتر تشکیل می‌شود که مربوط به لایه دوگانه الکترونی^۶ در سطح الکتروود نقره است و ارتباطی به واکنش فوق ندارد. این قسمت کاربردی در تعیین ضریب نفوذ کلرید در لایه سطحی بتن ندارد و بنابراین فقط از اطلاعات ناحیه خطی (امپدانس واربروگ) استفاده می‌شود [۱۶،۱۷].

مدار معادل الکترونی این آزمون مطابق شکل (۴) است و سرعت رابطه (۱) و نفوذ کلرید در بتن از طریق امپدانس فارادیک^۷ (Z_F) قابل بررسی است. Z_F شامل دو امپدانس سری شامل مقاومت انتقال بار الکترونی (R_{ct}) و امپدانس واربروگ (Z_w) است. در شکل (۴)، R_{SU} مقاومت محلول الکتروولیت بین سطح بتن و الکتروود نقره و C_{dl} ظرفیت خازنی لایه دوگانه الکترونی در سطح الکتروود نقره است [۱۶،۱۷].



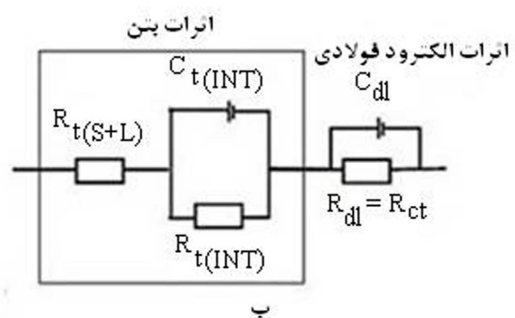
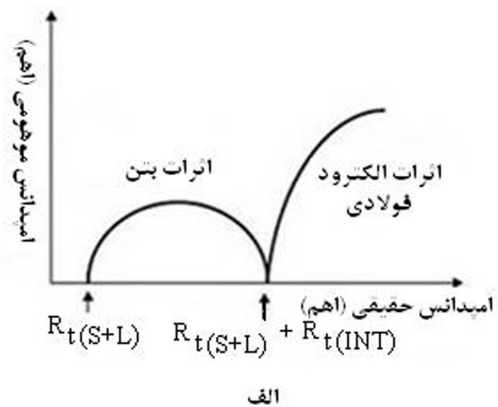
شکل ۴: مدار معادل الکترونی اندازه گیری ضریب نفوذ کلرید در لایه سطحی نمونه های بتنی از طریق آزمون طیف نگار امپدانس الکتروشیمیایی [۱۷]

با رسم مقدار امپدانس حقیقی ($Z'F$) و یا موهومی ($Z''F$) در فرکانس‌های پایین (یعنی در ناحیه امپدانس واربروگ) بر حسب $\omega^{-1/2}$ می‌توان مقدار ضریب واربروگ (σ) را تعیین کرد. ω ضریب زاویه‌ای و برابر با $\omega = 2\pi f$ است. f فرکانس اعمال شده در آزمون امپدانس الکتروشیمیایی است. به این نمودارها رادلز^۸ گفته می‌شود. σ شیب خط $Z'F$ یا $Z''F$ بر حسب $\omega^{-1/2}$ است. در مورد واکنش‌های رورسیبل مثل واکنش (۱) دو خط $Z'F$ یا $Z''F$ بر حسب $\omega^{-1/2}$ بر هم منطبق هستند و در مورد واکنش‌های الکتروشیمیایی غیر رورسیبل بصورت دو خط موازی است [۱۷].

مایع در بتن (Ω) و R_c مقاومت بتن در پایان حلقه فرکانس بالا (Ω) هستند [۱۶،۱۷].

این آزمون به کمک دستگاه پارسنت^۳ ۲۲۷۳ در محدوده فرکانس ۲ MHz الی ۱۰۰ MHz انجام شد. بدلیل محدودیت فرکانس دستگاه، طیف فرکانس بالا بطور کامل ظاهر نمی‌شود بنابراین بررسی‌ها و تحلیل‌ها بر اساس قسمت قابل رویت انجام شد.

به کمک آزمون طیف‌نگار امپدانس الکتروشیمیایی علاوه بر بررسی ساختار بتن می‌توان ضریب نفوذ کلرید را به عنوان معیاری از نفوذپذیری بتن در لایه سطحی اندازه‌گیری کرد [۱۶،۱۷]. تعیین ضریب نفوذ کلرید در لایه سطحی نمونه‌های بتنی قبل از آزمون RCP انجام شد. برای این منظور نمونه‌های اشباع از آب به مدت ۳ روز در محلول آب نمک ۰/۵ مولار قرار گرفتند تا غلظت کلرید در حفره‌های مویین سطحی به مقدار مزبور برسد. سپس با قرار دادن الکتروود فلزی به شکل ورق و از جنس نقره و به ابعاد ۴ در ۴ cm بر روی سطح بالایی و پایینی نمونه، آزمون طیف‌نگار امپدانس الکتروشیمیایی در لایه سطحی بتن انجام شد. الکتروودهای کاری و کمکی در این روش، ورق نقره و الکتروود مرجع از نوع الکتروود کالومل اشباع انتخاب شد.



شکل ۳: الف) شماتیکی از طیف امپدانس الکتروشیمیایی بتن ب) مدار معادل الکترونی طیف امپدانس الکتروشیمیایی بتن [۱۶،۱۷].

برای ارتباط الکتروولیتی بهتر الکتروودها با سطح بتن، بین سطح بتن و سطح الکتروودها از پارچه مرطوب استفاده شد. در این آزمون بدلیل آنکه حفره‌های مویین لایه سطحی نمونه‌های بتنی حاوی آب نمک با غلظت

^۳ Parstat 2273 potentiostat/galvanostat/FRA

^۴ Warburg impedance

^۵ Reversible

^۶ Electrical double layer

^۷ Faradaic impedance

^۸ Randles plot

شده در بخش ۲-۲-۱ اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج بدست آمده (جدول ۳) با اعمال جریان سرگردان به مدت ۳۰ روز، مقاومت ویژه نمونه‌ها نسبت به حالت قبل از اعمال جریان سرگردان کاهش یافته است و مقدار کاهش آن در نمونه‌های با نسبت آب به سیمان بیشتر، زیادتر است.

همچنین با کاهش نسبت آب به سیمان و افزودن میکروسیلیس به طرح اختلاط بتن، مقدار کاهش مقاومت ویژه پس از اعمال جریان سرگردان کاهش یافته و نمونه بتنی از پایداری و مقاومت بیشتری در برابر جریان سرگردان برخوردار بوده است.

۳-۲-۲- آزمون طیف نگار امپدانس الکتروشیمیایی

پس از عمل‌آوری نمونه‌های بتنی، آزمون امپدانس الکتروشیمیایی در حالت قبل و بعد از اعمال جریان سرگردان بر روی آنها انجام شد. دستگاه پارستت ۲۲۷۳ حداکثر می‌تواند ۲ MHz فرکانس ایجاد نماید و بنابراین بدلیل محدودیت فرکانس آن، قوس فرکانس بالا در طیف امپدانس نمونه‌های بتنی بطور کامل ظاهر نشده است. بنابراین در بخش بعدی تفسیر نتایج تغییرات ساختار میکروسکوپی بتن بر اساس مقادیر R_C انجام شده است. R_C برابر با مجموع مقاومت فازهای جامد و مایع بتن $R_p(S+L)$ و مقاومت فصل مشترک فازهای جامد و مایع $R_p(INT)$ است. از آنجائیکه در حین تغییرات ساختاری مقدار $R_p(S+L)$ تقریباً ثابت باقی‌می‌ماند [۱۶، ۱۷] بنابراین تغییرات R_C در طیف امپدانس نشانگر تغییرات $R_p(INT)$ خواهد بود و از آن می‌توان در تفسیر نتایج ساختار بتن استفاده کرد.

در شکل ۵ طیف امپدانس الکتروشیمیایی نمونه‌های بتنی قبل از اعمال جریان سرگردان مشاهده می‌شود. در بخش ۲-۲-۲ اشاره شد، طیف مزبور شامل دو ناحیه فرکانس پایین و فرکانس بالا است. طیف فرکانس پایین در ارتباط با فصل مشترک الکترودها با نمونه بتنی و طیف فرکانس بالا در ارتباط با ساختار و خواص بتن است.

در شکل ۵ مشاهده می‌شود، با متراکم تر شدن بتن از طریق کاهش نسبت آب به سیمان و یا افزودن میکروسیلیس به طرح اختلاط (نمونه های ۱ و ۵)، قطر و ارتفاع قوس طیف فرکانس بالا در آزمون طیف‌نگار امپدانس الکتروشیمیایی افزایش یافته و طیف امپدانس بطرف راست منتقل شده است. علت این موضوع به دلیل افزایش قطر و ارتفاع طیف فرکانس بالا با متراکم تر شدن بتن است [۱۶، ۱۷].

آزمون طیف‌نگار امپدانس الکتروشیمیایی پس از اعمال جریان سرگردان نیز بر روی نمونه‌های بتنی انجام شد و نتایج آن با حالت قبل از اعمال جریان سرگردان با یکدیگر مقایسه شد.

در شکل ۶ طیف امپدانس الکتروشیمیایی نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ در حالت قبل و بعد از اعمال جریان سرگردان با یکدیگر مقایسه شده است. از آنجائیکه بدلیل محدودیت فرکانس دستگاه، قوس فرکانس بالا بطور کامل ظاهر نشده است بنابراین تفسیر نتایج بر اساس تغییرات R_C انجام شده است.

با مشخص شدن σ ، مقدار ضریب نفوذ کلرید در لایه سطحی نمونه‌های بتنی را می‌توان از رابطه (۲) محاسبه نمود [۱۶-۱۸]

$$D = \left[\frac{RT}{\sqrt{2AF^2\sigma C}} \right]^2 \quad (2)$$

در این رابطه D ضریب نفوذ کلرید در لایه سطحی بتن (m^2s^{-1})، A سطح الکتروده نقره (m^2)، σ ضریب واربورگ (Ωm^2s^{-1}) و C غلظت محلول کلرید در حفره های موئین سطح بتن است. با توجه به اینکه نمونه‌های بتنی به مدت ۳ روز در آب نمک با غلظت ۰/۵ مولار بوده اند بنابراین مقدار C برابر با ۵۰۰ مول بر متر مکعب است. R ثابت گازها ($J K^{-1} mol^{-1}$)، T دما (K) و F ثابت فاراده ($C.mol^{-1}$) است.

برای ۲۵ درجه سانتی‌گراد رابطه (۲) بصورت زیر خلاصه می‌شود [۱۷]:

$$D = 3.54 \times 10^{-14} (A\sigma C)^{-2} \quad (3)$$

بر اساس رابطه فوق هر چه مقدار بیشتر باشد ضریب نفوذ کلرید در لایه سطحی کمتر است.

۳-۲-۲-۲- آزمون RCP

قبل و بعد از اعمال جریان سرگردان DC، آزمون RCP بر روی نمونه‌های بتنی انجام شد. در این آزمون در فواصل زمانی ۱۵ دقیقه جریان عبوری از نمونه‌ها ثبت شد. سپس بر اساس استاندارد ASTM C1202 [۱۵] و رابطه زیر نفوذپذیری نمونه‌ها در برابر کلرید بر اساس بار الکتریکی عبوری از آنها تعیین و با یکدیگر مقایسه شد.

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + 2I_{360}) \quad (4)$$

که در آن، Q بار الکتریکی عبوری از نمونه بتنی (کولن)، I_0 جریان اندازه‌گیری شده بلافاصله پس از اعمال ولتاژ بر نمونه بتنی در سلول‌ها (آمپر)، I_t جریان عبوری از نمونه بتنی پس از گذشت t دقیقه از اعمال ولتاژ در آزمون RCP است.

همچنین پس از اتمام آزمون RCP نمونه‌های بتنی در راستای محور برش زده شدند و بر اساس دستورالعمل 492 NT BUILT [۱۹] با پاشیدن نیترات نقره ۰/۱ نرمال، عمق نفوذ کلرید در نمونه‌های مختلف به عنوان معیاری از ضریب نفوذ کلرید با یکدیگر مقایسه شد. ناحیه‌ای که در آن کلرید نفوذ کرده است بر اثر پاشیدن نیترات نقره پس از حدود ۱۵ دقیقه به رنگ سفید تغییر رنگ می‌دهد.

از آنجائیکه آزمون RCP ممکن است بر نتایج آزمون امپدانس الکتروشیمیایی تأثیر بگذارد بنابراین آزمون امپدانس الکتروشیمیایی قبل از آزمون RCP انجام شد.

۳- نتایج

۳-۱- مقاومت ویژه نمونه‌ها

بعد از عمل‌آوری نمونه‌ها و قبل و بعد از اعمال جریان سرگردان، مقاومت ویژه نمونه‌های بتنی در حالت اشباع از آب مطابق با روش اشاره

جدول ۳: مقاومت ویژه نمونه‌های بتنی در حالت قبل و بعد از اعمال جریان سرگردان در ۵۰V

نمونه	۱	۲	۳	۴	۵
مقاومت ویژه ($\Omega.cm$)	۳۸۵۶۵	۲۵۲۶۳	۲۰۸۶۰	۳۰۳۴۷	۴۱۵۲۵
مقاومت ویژه ($\Omega.cm$)	۳۷۰۲۵	۲۳۴۹۸	۱۸۳۵۹	۲۹۷۴۲	۴۱۴۹۸
درصد کاهش	۴%	۷%	۱۲%	۲%	ناچیز
	$w/c = 0.37$	$w/c = 0.40$	$w/c = 0.43$	$w/c = 0.40$	$w/c = 0.40$
				SF= ۸%	SF= ۱۰%

جدول ۴: مقدار RC در حالت قبل و بعد از اعمال جریان سرگردان

نمونه	۱	۲	۳	۴	۵
R_C (اهم)	۱۶۸۱	۱۱۹۸	۷۹۵	۱۳۳۰	۱۸۱۰
R_C (اهم)	۱۶۲۷	۱۰۵۶	۵۹۰	۱۳۰۸	۱۸۰۵

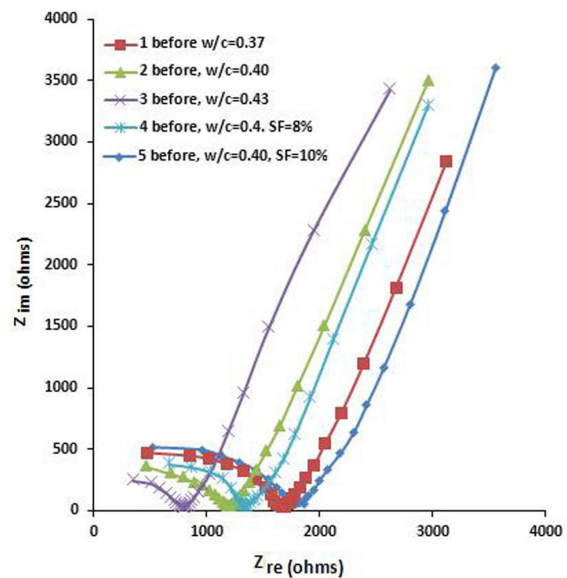
طیف امپدانس الکتروشیمیایی تعیین شد. به عبارت دیگر شیب نمودارهای رادلز همان ضریب وارپورگ است.

در جدول ۵ مقدار ضریب وارپورگ و نیز ضریب نفوذ کلرید در لایه سطحی نمونه‌های بتنی در حالت قبل و بعد از اعمال جریان سرگردان مشاهده می‌شود. بر اساس نتایج جدول مزبور، جریان سرگردان موجب کاهش ضریب وارپورگ و افزایش ضریب نفوذ کلرید در لایه سطحی نمونه‌های بتنی شده است. مقدار این افزایش در نمونه ۳ (با بیشترین نسبت آب به سیمان) بیش از سایر نمونه‌ها است.

مقدار درصد کاهش σ و افزایش ضریب نفوذ در لایه سطحی نمونه ۳ (با بیشترین نسبت آب به سیمان $w/c = 0.43$) به ترتیب ۳۶٪ و ۱۴۳٪ است. این مقادیر در مورد نمونه ۱ (با کمترین نسبت آب به سیمان $w/c = 0.37$) به ترتیب برابر با ۴٪ و ۹٪ است.

همچنین افزایش ضریب نفوذ کلرید در نمونه‌های حاوی میکروسلیس ناچیز است. در این رابطه درصد کاهش σ و افزایش ضریب نفوذ در لایه سطحی نمونه ۴ به ترتیب ۰/۴٪ و ۰/۹٪ است. بنابراین

بر این اساس مقدار R_C در حالت قبل و بعد از اعمال جریان سرگردان از طریق طیف امپدانس الکتروشیمیایی اندازه‌گیری و در جدول ۴ ارائه شد. نتایج این جدول همسو با نتایج آزمون مقاومت ویژه (جدول ۳) است و نشان می‌دهد که جریان سرگردان DC موجب کاهش مقدار R_C در نمونه‌های بتنی می‌شود و مقدار کاهش آن با افزودن میکروسلیس و یا کاهش نسبت آب به سیمان در طرح اختلاط کاهش می‌یابد.



شکل ۵: طیف امپدانس الکتروشیمیایی نمونه‌های بتنی (نمودار نایکوئیست) قبل از اعمال جریان سرگردان

۳-۳- ضریب نفوذ کلرید

مطابق با روش ارائه شده در بخش ۲-۲-۲ ضریب نفوذ کلرید در لایه سطحی نمونه‌های بتنی در حالت قبل و بعد از اعمال جریان سرگردان از طریق ضریب وارپورگ محاسبه شد. ضریب وارپورگ از طریق رسم نمودارهای رادلز با توجه به داده‌های

۳-۴- آزمون RCP

بعد از عمل آوری نمونه‌های بتنی، آزمون RCP در حالت قبل و بعد از اعمال جریان سرگردان بر روی نمونه‌ها انجام شد. در شکل ۷ منحنی‌های جریان-زمان نمونه‌های بتنی در حالت قبل و بعد از اعمال جریان سرگردان با یکدیگر مقایسه شده است. در جدول ۶ بار الکتریکی عبوری در آزمون مزبور مشاهده می‌شود.

بر اساس شکل ۷ و جدول ۶، جریان و بار الکتریکی عبوری از نمونه‌های ۱ (نمونه با نسبت آب به سیمان کم) و ۵ (نمونه حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس) در حالت قبل و بعد از اعمال جریان سرگردان، کمتر از نمونه‌های دیگر است. همچنین اعمال جریان سرگردان به مدت ۳۰ روز بر نمونه‌های بتنی، موجب افزایش جریان و بار الکتریکی عبوری از آنها در آزمون RCP شده است. علاوه بر این نمونه ۳ با نسبت آب به سیمان بالاتر ($w/c = 0.43$) دارای جریان و بار الکتریکی عبوری بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها است بطوریکه درصد افزایش بار الکتریکی آن ۳۳٪ است. درصد افزایش بار الکتریکی عبوری در نمونه ۱ (با کمترین نسبت آب به سیمان ($w/c = 0.37$)) و نمونه ۴ (حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس و $w/c = 0.40$) به ترتیب برابر با ۴۷٪ و ۴۰٪ است.

۳-۵- عمق نفوذ کلرید

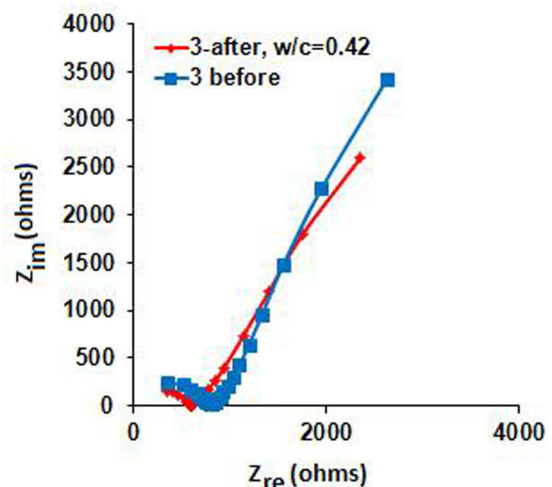
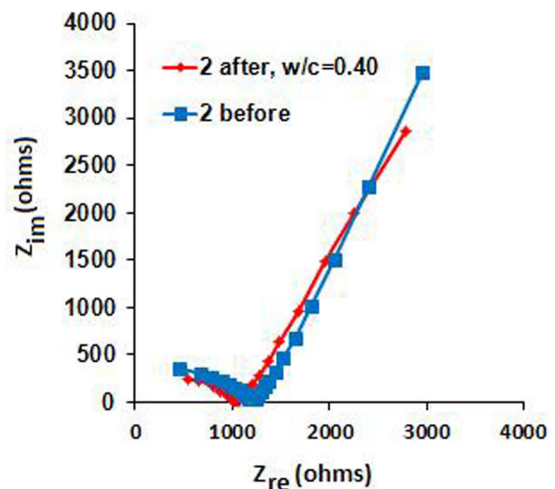
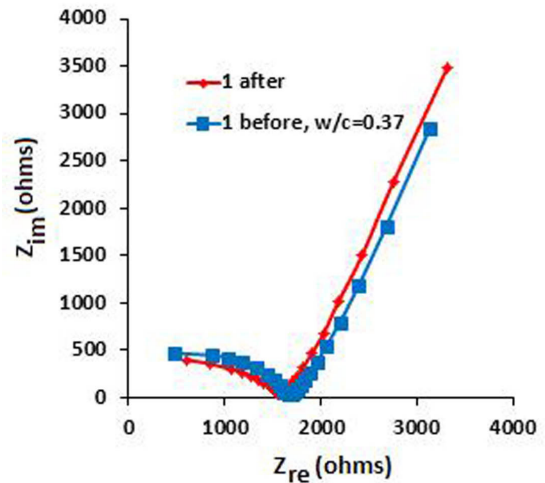
در آزمون‌های الکتریکی نظیر RCP که یون‌ها در حالت غیر یکنواخت مهاجرت^۹ (NSSM) می‌کنند ضریب نفوذ کلرید (Dnssm) رابطه مستقیم با توزیع اندازه حفره‌های مویین بتن دارد [۱۲]. بر این اساس پس از آزمون RCP، نمونه‌های بتنی در راستای محور برش زده شد و عمق نفوذ کلرید در آنها بر اساس دستورالعمل NT BUILT 492 [۱۹] از طریق پاشیدن محلول ۰/۱ نرمال نیترات نقره بر سطح بریده شده تعیین گردید. نتایج این آزمون در جدول ۷ ارائه شده است. همچنین در شکل ۸ تصویر عمق نفوذ کلرید در نمونه‌های ۱ الی ۳ پس از آزمون RCP مشاهده می‌شود.

در نمونه‌های ۱ ($w/c = 0.37$) و ۵ (10%SF و $w/c = 0.37$) اثرات جریان سرگردان در ۵۰V بر افزایش عمق نفوذ کلرید در آزمون RCP کمتر از سایر نمونه‌ها است و درصد افزایش عمق نفوذ کلرید در آنها به ترتیب ۲۵٪ و صفر درصد است. در مورد نمونه‌های ۲، ۳ و ۴ درصد افزایش عمق نفوذ کلرید به ترتیب برابر با ۲۹٪، ۴۰٪ و ۱۷٪ است. به عبارت دیگر اثرات جریان سرگردان در افزایش میزان عمق نفوذ کلرید در نمونه‌های با نسبت بالاتر آب به سیمان بیشتر بوده و همچنین میکروسیلیس نقش موثری در کاهش اثرات عمق نفوذ داشته است.

۳-۶- جریان و دمای نمونه‌ها

در مدت اعمال جریان سرگردان در ۵۰V، جریان عبوری از نمونه‌های بتنی اندازه‌گیری شد و در جدول ۸ نتایج آن ارائه شده است.

کاهش نسبت آب به سیمان و یا افزودن میکروسیلیس به نمونه بتنی مقاومت آنرا در برابر اثرات منفی جریان سرگردان افزایش داده و به نوعی پایداری ساختار آنها را افزایش می‌دهد.



شکل ۶: طیف امپدانس الکتروشیمیایی نمونه‌های ۱ الی ۳ در حالت قبل و بعد از اعمال جریان سرگردان به مدت ۳۰ روز (در ۵۰V)

⁹ Non-Steady State Migration (NSSM)

جدول ۵: ضریب وارپورگ (σ) و ضریب نفوذ کلرید در لایه سطحی نمونه های بتنی در حالت قبل و بعد از اعمال جریان سرگردان

قبل از اعمال جریان سرگردان					
نمونه	۱	۲	۳	۴	۵
	w/c = ۰/۳۷	w/c = ۰/۴۰	w/c = ۰/۴۳	w/c = ۰/۴۰	w/c = ۰/۴۰
	SF= ۱۰%	SF= ۱۰%	SF= ۱۰%	SF= ۱۰%	SF= ۱۰%
$\sigma \times 10^{-3}$ ($\Omega.m^2.s^{-1/2}$)	۲/۱۶	۱/۹۱	۱/۳۱	۱/۹۷	۲/۲۹
$D \times 10^{14}$ ($m^2.s^{-1}$)	۵/۰۳	۶/۴۴	۱۳/۶۹	۶/۰۵	۴/۴۸

بعد از اعمال جریان سرگردان در ۵۰ V و به مدت ۳۰ روز					
نمونه	۱	۲	۳	۴	۵
	w/c = ۰/۳۷	w/c = ۰/۴۰	w/c = ۰/۴۳	w/c = ۰/۴۰	w/c = ۰/۴۰
	SF= ۱۰%	SF= ۱۰%	SF= ۱۰%	SF= ۱۰%	SF= ۱۰%
$\sigma \times 10^{-3}$ ($\Omega.m^2.s^{-1/2}$)	۲/۰۷	۱/۶۱	۰/۸۴	۱/۹۵	۲/۲۸
$D \times 10^{14}$ ($m^2.s^{-1}$)	۵/۴۸	۹/۰۶	۳۳/۳۰	۶/۱۸	۴/۵۲

جدول ۶: بار الکتریکی عبوری از نمونه های بتنی در حالت قبل و بعد از اعمال جریان سرگردان در ۵۰V و به مدت ۳۰ روز

نمونه	۱	۲	۳	۴	۵
	w/c = ۰/۳۷	w/c = ۰/۴۰	w/c = ۰/۴۳	w/c = ۰/۴۰	w/c = ۰/۴۰
	SF= ۱۰%	SF= ۱۰%	SF= ۱۰%	SF= ۱۰%	SF= ۱۰%
بار الکتریکی (کولن)	۶۷۰	۱۴۳۲	۱۶۱۲	۱۰۴۵	۵۵۸
بعد از اعمال جریان سرگردان در ۵۰ V و به مدت ۳۰ روز					
بار الکتریکی (کولن)	۷۰۲	۱۵۵۴	۲۱۴۳	۱۰۵۰	۵۶۰

جدول ۸: جریان عبوری از نمونه های بتنی در مدت اعمال جریان سرگردان در ۵۰V

جریان (میلی آمپر)	در شروع (میلی آمپر)	پس از ۱۵ روز (میلی آمپر)	پس از ۳۰ روز (میلی آمپر)
نمونه ۱	۲۱	۲۱	۲۲
نمونه ۲	۳۰	۳۱	۳۳
نمونه ۳	۳۵	۳۷	۳۹
نمونه ۴	۲۵	۲۶	۲۶
نمونه ۵	۱۹	۱۹	۱۹

جدول ۷: عمق نفوذ کلرید در آزمون RCP در نمونه های بتنی در حالت قبل و بعد از اعمال جریان سرگردان در ۵۰V و به مدت ۳۰ روز

قبل از اعمال جریان سرگردان					
نمونه	۱	۲	۳	۴	۵
عمق نفوذ کلرید (میلی متر)	۴	۷	۱۰	۶	۴
بعد از اعمال جریان سرگردان در ۵۰ V و به مدت ۳۰ روز					
عمق نفوذ کلرید (میلی متر)	۵	۹	۱۴	۷	۴

آزاد در مدت اعمال جریان سرگردان تغییر قابل ملاحظه‌ای نداشته است و فقط مقدار آن اندکی منفی تر از مقادیر اشاره شده در استاندارد ASTM C876 است. دلیل این موضوع اشباع شدن بتن از آب و کاهش اکسیژن در محلول حفره‌های مویین بتن است. با کاهش اکسیژن پتانسیل آزاد اندازه‌گیری شده مقداری منفی تر خواهد شد.



نمونه ۱



نمونه ۲



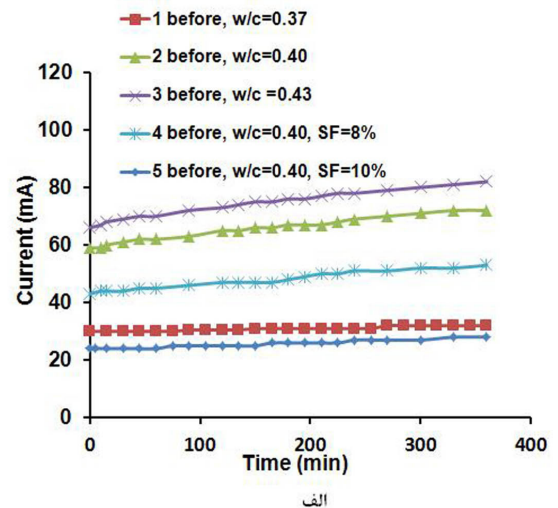
نمونه ۳

شکل ۸: عمق نفوذ کلرید در آزمون RCP در مورد نمونه‌های ۱ الی ۳ و در حالت قبل از اعمال جریان سرگردان

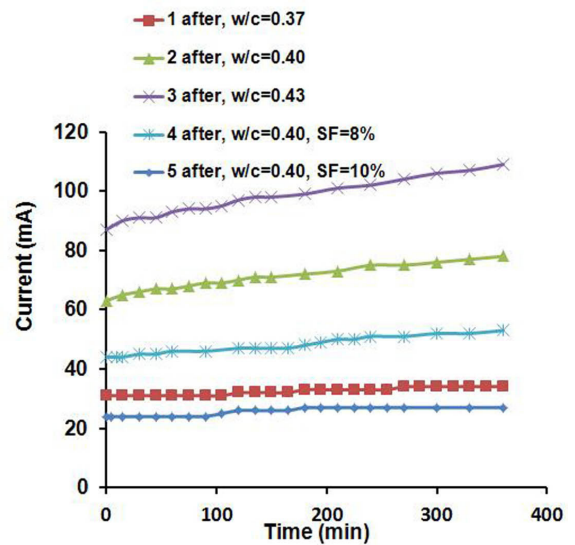
جدول ۹: پتانسیل آزاد میله‌های فولادی نصب شده در نمونه‌های بتنی نسبت به الکتروود مرجع مس/سولفات مس در فواصل مختلف زمانی اعمال جریان سرگردان در ۵۰V (پتانسیل آزاد در حالت قطع جریان اندازه‌گیری شد)

پتانسیل (V)	در شروع (V)	پس از ۱۵ روز (V)	پس از ۳۰ روز (V)
نمونه ۱	-۰/۱۷	-۰/۱۷	-۰/۱۷
نمونه ۲	-۰/۱۹	-۰/۲۰	-۰/۲۰
نمونه ۳	-۰/۲۱	-۰/۲۲	-۰/۲۳
نمونه ۴	-۰/۲۴	۰/۲۵	-۰/۲۵
نمونه ۵	-۰/۲۵	-۰/۲۶	-۰/۲۶

همچنین دمای نمونه‌ها نیز اندازه‌گیری شد و تغییراتی نسبت به دمای محیط (۲۵ درجه سانتیگراد) در آنها مشاهده نشد، زیرا مطابق جدول ۸ جریان عبوری از نمونه‌ها بسیار کم است و بنابراین نمی‌تواند موجب تغییرات دمایی در نمونه‌ها شود.



الف



ب

شکل ۷: منحنی‌های جریان-زمان نمونه‌های بتنی در آزمون RCP. الف) قبل از اعمال جریان سرگردان (ب) بعد از اعمال جریان سرگردان (در ۵۰V و به مدت ۳۰ روز)

۳-۷- پتانسیل آزاد میله‌های فولادی

پتانسیل آزاد میله‌های فولادی موجود در نمونه‌های بتنی در مدت اعمال جریان سرگردان و در حالت قطع جریان نسبت به الکتروود مرجع مس/سولفات مس و مطابق با استاندارد ASTM C876 [۲۰] اندازه‌گیری شد. در این مورد جریان عبوری از نمونه‌ها فقط در زمان اندازه‌گیری پتانسیل آزاد قطع و پس از اتمام اندازه‌گیری جریان برقرار شد.

در جدول ۹ نتایج پتانسیل آزاد میله‌های فولادی نصب شده در نمونه‌های بتنی مشاهده می‌شود. بر اساس نتایج جدول مزبور، پتانسیل

موجب تغییرات دما و یا تنش‌های حرارتی در نمونه‌ها نشده است. بنابراین تغییرات ایجاد شده در نفوذپذیری نمونه‌های بتنی در ارتباط مستقیم با تغییرات ساختار بتن در اثر اعمال جریان سرگردان است. نتایج انجام آزمون امپدانس الکتروشیمیایی نشان داد با اعمال جریان سرگردان قطر و ارتفاع قوس فرکانس بالا کاهش می‌یابد و قوس مزبور بطرف چپ حرکت می‌کند (شکل ۶).

در بخش ۳-۲ توضیح داده شد بدلیل آنکه $R_f(S+L)$ (مقاومت الکتریکی فازهای جامد و مایع بتن) ثابت است [۱۶،۱۷] بنابراین با کاهش قطر و ارتفاع طیف فرکانس بالا، موقعیت RC در طیف امپدانس بطرف چپ حرکت می‌کند و این موضوع بمفهوم کاهش مقاومت فصل مشترک فازهای جامد-مایع در بتن ($R_f(INT)$) است. کاهش $R_f(INT)$ نیز به مفهوم افزایش فصل مشترک‌های جامد-مایع و یا به عبارت دیگر افزایش حجم حفره‌های مویین موجود و یا ایجاد شبکه جدیدی از حفره‌های مویین است [۱۶،۱۷].

افزایش ضریب نفوذ کلرید در لایه سطحی نمونه‌های بتنی عامل دیگری است که دلالت بر افزایش حجم حفره‌های مویین نمونه‌های بتنی در اثر اعمال جریان سرگردان دارد، زیرا ضریب نفوذ کلرید در ارتباط مستقیم با تخلخل یا نفوذپذیری (حجم حفره‌های مویین) بتن است [۱۲،۲۱].

ساختار میکروسکوپی بتن ساخته شده از سیمان پرتلند شامل شن و ماسه، کلینگر^{۱۰}، محصولات هیدراته (C-S-H) و رسوبات هیدرواکسید کلسیم است. رسوبات هیدرواکسید کلسیم $Ca(OH)_2$ یا پرتلندیت^{۱۱} و محصولات هیدراته (C-S-H)^{۱۲} به ترتیب ۲۰-۲۵٪ و ۵۰-۶۰٪ حجمی سیمان هیدراته شده را تشکیل می‌دهند. C-S-H تا حدودی ماده‌ای پایدار و با قابلیت انحلال کم است. این ماده دارای ترکیب شیمیایی مشخص نیست و نسبت اکسیدهای تشکیل دهنده آن به درجه هیدراسیون، نسبت آب به سیمان و دما بستگی دارد. با افزایش عمل آوری و نیز کاهش نسبت آب به سیمان، نسبت C/S در C-S-H از ۱/۵ بطرف ۲ میل می‌کند و میزان بیشتری از اکسید کلسیم در فاز هیدراته تمرکز می‌یابد. بنابراین کاهش نسبت آب به سیمان می‌تواند باعث کاهش مقدار فاز هیدرواکسید کلسیم در ساختار بتن شود [۱۴].

در بین اجزاء سیمان هیدراته، هیدرواکسید کلسیم دارای بیشترین حلالیت در آب است [۱۴]. از طرفی اعمال میدان الکتریکی بر بتن موجب مهاجرت یون‌ها در آن خواهد شد [۱۱] بنابراین با مهاجرت یون‌های کلسیم و هیدرواکسید بطرف کاتد و آند در اثر میدان الکتریکی ناشی از جریان سرگردان (میدان ۵۰ V)، باعث می‌شود هیدرواکسید کلسیم در فاز جامد بر اساس اصل لوشاتلیه^{۱۳} در محلول حفره‌های بتن حل شود و غلظت یون‌های کلسیم و هیدرواکسید را در محلول حفره‌های بتن ثابت نگه دارد.

بنابراین بر اساس استاندارد ASTM C876 [۲۰] میله‌های فولادی نمونه‌های بتنی در مدت اعمال جریان سرگردان دچار خوردگی نشده‌اند. علاوه بر این در پایان آزمایش‌ها نمونه‌ها شکسته شد و هیچگونه خوردگی در میله‌های نصب شده در آنها مشاهده نشد.

۴- بحث

۴-۱- اثرات جریان سرگردان DC

کلیه نتایج آزمون‌های این تحقیق نشان داد اعمال جریان سرگردان بر نمونه‌های بتنی در ولتاژ ۵۰ V و در مدت ۳۰ روز موجب افزایش نفوذپذیری آن می‌شود. در این رابطه می‌توان از کاهش مقاومت ویژه (جدول ۳)، کاهش R_c (جدول ۴)، افزایش ضریب نفوذ کلرید در لایه سطحی نمونه‌های بتنی (جدول ۵) و افزایش بار الکتریکی عبوری و نیز افزایش عمق نفوذ کلرید در آزمون RCP (جدول ۶ و ۷) نام برد.

بر اساس رابطه (۵) ضریب نفوذ از طریق تخلخل‌ها و حفره‌های مویین بتن در ارتباط مستقیم با میزان تخلخل و حفره‌های مویین است.

$$DP = (0.114P - 3.381) \times 10^{-7} \quad (5)$$

در این رابطه P درصد تخلخل و DP ضریب نفوذ از طریق تخلخل‌های بتن بر حسب cm^2/sec است [۲۱]. از طرفی مقاومت الکتریکی بتن بر اساس رابطه (۶) متناسب با عکس درصد حفره‌های مویین و تخلخل بتن است.

$$R = \frac{2L\delta}{3S\lambda} \left(\frac{1}{P \times r_0} \right) \quad (6)$$

که در آن R مقاومت الکتریکی بتن، L طول نمونه، S سطح نمونه، δ ضخامت لایه دوگانه الکتریکی در حفره‌های مویین بتن، λ هدایت ویژه محلول حفره‌های مویین، r_0 قطر حفره‌های مویین و P درصد حجمی تخلخل است [۲۱]. بنابراین افزایش نفوذپذیری بتن از طریق افزایش حجم حفره‌های مویین (افزایش P) موجب افزایش ضریب نفوذ بتن (افزایش D_p) و کاهش مقاومت الکتریکی بتن (کاهش R) می‌شود. با کاهش مقاومت الکتریکی، بار الکتریکی عبوری از بتن در آزمون RCP افزایش می‌یابد.

همچنین بر اساس نتایج آزمون‌های انجام شده هر چه نسبت آب به سیمان نمونه بتنی بیشتر باشد، تأثیر جریان سرگردان در افزایش نفوذپذیری نمونه‌های بتنی بیشتر است. علاوه بر این نمونه‌های حاوی میکروسیلیس، دارای نوعی پایداری در برابر اثرات جریان سرگردان هستند و مقدار افزایش نفوذپذیری آنها در اثر اعمال جریان سرگردان ناچیز است. در مدت انجام آزمایش‌ها، خوردگی در میله‌های فولادی نصب شده در نمونه‌ها بوجود نیامد، زیرا اولاً تغییرات پتانسیل آنها ناچیز بود و مقادیر آن بگونه‌ای بود که بر اساس استاندارد ASTM C876 امکان خوردگی در آنها وجود نداشت (نتایج جدول ۹) و ثانیاً پس از اتمام آزمون‌ها، نمونه‌ها شکسته شدند و هیچگونه آثار خوردگی در میله‌های مزبور مشاهده نشد. علاوه بر این جریان عبوری از نمونه‌ها مطابق جدول ۸ اندک است و

¹⁰ Clinker

¹¹ Portlandite

¹² C=CaO, S=SiO₂, H=H₂O

¹³ Le Chatelier's principle

روبرو خواهد بود و رشد حفره‌های مویین با سرعت کمتری انجام می‌شود. برای مثال مقاومت ویژه نمونه ۱ به میزان ۳۴٪ از نمونه ۲ بیشتر است و یا ضریب نفوذ در لایه سطحی نمونه ۱ به میزان ۲۸٪ کمتر از نمونه ۲ است. همچنین بار الکتریکی عبوری از نمونه ۱ در آزمون RCP تقریباً ۱۰۰٪ کمتر از نمونه ۲ است.

۴-۲- مقایسه اثرات جریان سرگردان AC و DC

بر اساس نتایج تحقیقات انجام شده توسط نویسندگان این مقاله اثرات جریان سرگردان AC کاملاً متفاوت با اثرات جریان سرگردان DC است. در این رابطه می‌توان از نتایج تحقیقات نویسندگان این مقاله در خصوص اثرات جریان سرگردان AC بر بتن [۳، ۱۶، ۱۷، ۲۲]، تداخل جریان ناشی از بتن‌های مدفون در خاک بر سیستم‌های حفاظت کاتدی و تاسیسات فلزی مدفون در خاک [۱، ۲، ۳]، اثرات جریان سرگردان مترو (قطار شهری) بر تاسیسات مجاور مدفون در خاک [۲۳، ۲۴] و اثرات جریان سرگردان در ولتاژهای بالا بر تیرهای بتنی در حالت اشباع از آب (در شرایط بارندگی) [۲۵] را نام برد. در اینجا بر اساس نتایج تحقیقات مذکور، اثرات جریان سرگردان AC و DC بر بتن با یکدیگر مقایسه شده است.

۱- فرکانس نقطه شروع قوس فرکانس بالا در طیف امپدانس نمونه‌های بتنی در حوالی فرکانس ۵۰ قرار دارد. در این فرکانس جزء موهومی امپدانس در برابر جزء حقیقی آن بسیار کوچک است بنابراین جریان عبوری از مسیر خازنی بسیار بیشتر از مسیر مقاومتی است. این موضوع باعث گرم شدن سریع نمونه بتنی و ایجاد تنش‌های حرارتی و بروز میکروترک در آن می‌شود [۲۲].

۲- از آنجائیکه فرکانس برق شهر ۵۰ هرتز است بنابراین اثرات جریان سرگردان برق متناوب شهری بر بتن اشباع از آب بیشتر از سایر جریان‌های متناوب است. البته در فرکانس‌های بسیار بالا مجدداً جزء موهومی امپدانس نسبت به جزء حقیقی آن بسیار کم است ولی چنین جریان‌هایی عملاً کاربرد چندانی ندارد. از آنجائیکه جریان سرگردان DC فقط می‌تواند از مسیر مقاومتی عبور نماید بنابراین مقدار جریان عبوری نسبت به جریان AC بسیار کمتر است [۲۲].

۳- در طول مدت اعمال جریان سرگردان DC، تغییرات مقدار جریان عبوری از نمونه‌ها بسیار کم است در صورتیکه در جریان سرگردان AC با ولتاژ بالا تغییرات جریان سرگردان عبوری از نمونه‌ها بسیار زیاد است و این موضوع سبب بروز تنش‌های حرارتی و انقباضی در آنها و بروز میکروترک در آنها می‌شود [۲۲].

۴- افزایش سریع دما هنگام اعمال جریان سرگردان AC با ولتاژ بالا موجب انحلال بیشتر هیدرواکسید کلسیم در محلول حفره‌های بتن می‌شود. از طرفی افزایش دما موجب تبخیر محلول حفره‌های بتن می‌شود و فشار بخار آن موجب خروج اجباری محلول حفره‌های بتن از فصل مشترک شن و ماسه با زمینه سیمانی خواهد شد. این موضوع موجب رشد اندازه حفره‌های مویین بتن می‌شود. در جریان DC معمولاً بدلیل پایین

حل شدن فاز جامد در محلول حفره‌های مویین و مهاجرت آن در میدان الکتریکی موجب بزرگتر شدن حفره‌های مویین بتن و یا حتی ایجاد شبکه‌های جدید از حفره‌های مویین خواهد شد. این عامل حجم حفره‌های مویین بتن را افزایش داده و موجب افزایش نفوذپذیری بتن خواهد شد، زیرا نفوذپذیری بتن رابطه مستقیم با تخلخل بتن (حجم حفره‌های مویین) دارد [۲۱، ۱۲].

نمونه‌های ۳ و ۴ به ترتیب دارای ۸ و ۱۰ درصد میکروسیلیس هستند و در آنها واکنش پوزولانی زیر انجام می‌شود:



بر اثر واکنش فوق اولاً مقدار Ca(OH)_2 در فاز زمینه کاهش می‌یابد و ثانیاً مقدار فاز هیدراته افزایش می‌یابد و بر اثر افزایش حجم ناشی از آن، حجم و اندازه حفره‌های مویین بتن کاهش می‌یابد. بنابراین بر اساس رابطه (۴) و (۵) ضریب نفوذ بتن کاهش و مقاومت الکتریکی آن افزایش می‌یابد. به همین دلیل مقاومت ویژه نمونه ۴ و ۵ نسبت به نمونه ۲ به ترتیب ۲۰٪ و ۶۴٪ بیشتر است. همچنین ضریب نفوذ کلرید در لایه سطحی نمونه‌های ۴ و ۵ نسبت به نمونه ۲ به ترتیب به میزان ۶٪ و ۳۰٪ کمتر است. با افزایش مقاومت الکتریکی، بار الکتریکی عبوری از نمونه در آزمون RCP کاهش می‌یابد. در جدول ۶ مشاهده می‌شود بار الکتریکی عبوری از نمونه‌های ۴ و ۵ در آزمون RCP، نسبت به نمونه ۱ به ترتیب ۲۷٪ و ۶۱٪ کاهش یافته است.

بنابراین افزودن میکروسیلیس به طرح اختلاط بتن موجب کوچک شدن اندازه و حجم حفره‌های مویین بتن، کاهش ضریب نفوذ، افزایش مقاومت الکتریکی و کاهش بار الکتریکی عبوری از آن در آزمون RCP می‌شود. به عبارت دیگر پایداری بتن هنگام قرارگیری در میدان الکتریکی DC افزایش می‌یابد و یون‌های موجود در فاز هیدراته برای جابجا شدن با مشکلات بیشتری روبرو خواهند بود. بنابراین انتقال جرم از بتن با سرعت بسیار کمتری انجام می‌شود و در نتیجه رشد اندازه حفره‌های مویین در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس بسیار کمتر انجام می‌شود. بر این اساس پس از اعمال ۵۰ VDC میزان تغییر خواص در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس نسبت به نمونه‌های بدون میکروسیلیس کمتر است. برای مثال پس از اعمال ۵۰ VDC میزان تغییرات مقاومت ویژه در نمونه‌های ۲، ۴ و ۵ به ترتیب ۷٪، ۲٪ و ۰/۰۶٪ بوده است. همچنین درصد تغییرات R_c پس از اعمال ۵۰ VDC در نمونه‌های ۲، ۴ و ۵ به ترتیب ۱۱/۸٪، ۱/۷٪ و ۰/۳٪ است.

بطور مشابه کاهش نسبت آب به سیمان موجب کاهش مقدار Ca(OH)_2 در فاز هیدراته، افزایش مقدار فاز هیدراته و در نتیجه کاهش اندازه و حجم حفره‌های مویین خواهد شد. در نتیجه بر اساس روابط ۴ و ۵ با کاهش نسبت آب به سیمان در طرح اختلاط بتن، ضریب نفوذ بتن کاهش و مقاومت الکتریکی آن افزایش می‌یابد. بنابراین با کاهش نسبت آب به سیمان، پایداری ساختاری بتن هنگام قرارگیری در میدان الکتریکی بیشتر می‌شود و انتقال جرم از طریق جابجایی یون‌ها با مشکلات بیشتری

۴/۸٪ بوده است. این مقادیر نسبت به نمونه ۲ با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ به میزان قابل ملاحظه کمتر است.

با توجه به اینکه در مدت اعمال جریان سرگردان، میله های فولادی موجود در بتن دچار خوردگی نمی شود بنابراین تغییرات مشاهده شده پس از اعمال جریان سرگردان فقط در ارتباط با تغییرات ساختار نمونه های بتنی است. مکانیزمی که در این خصوص پیشنهاد شد شامل انحلال هیدرواکسید کلسیم بتن در محلول حفره های مویین و مهاجرت آن در میدان ناشی از جریان سرگردان است.

۶- منابع

- [1] A. Saatchi, A. Aghajani, "Interference Problems in Cathodic Protection of Complex Installation", *Materials Performance*, vol. 44, pp. 22-25, 2005
- [2] A. Saatchi, A. aghajani, "Correcting Non-uniform Potential distribution and Interference Problems in the Cathodic Protection System of a Gas Compressor Station", *Corrosion 2013 Conference*, Accepted, Document Number: C2013-0002108, 2013
- [3] Aghajani1, A. Saatchi, M. A. Golozar, K. Raeissi, "Effects of stray current on reinforcement concrete structures in urban and industrial installations" *Zang Journal*, accepted, Document No. 91-1578, 2013.
- [4] S. Yang, X. Yang, "Evaluation of stray current corrosion resistance of concrete in metro construction", *Front. Archit. Civ. Eng. China*, vol.2, no. 3, pp. 246-252, 2008.
- [5] West Virginia University, "Appalachian Underground Corrosion Short Course (AUCSC)", First ed., Chapter 4, pp. 1-8, Morgantown, West Virginia, 2009.
- [6] NACE International Publication 01110, "Stray-Current-Induced Corrosion in Reinforced and Prestressed Concrete Structures", pp. 6-34, NACE International, USA, 2010.
- [7] L. Bertolini, M. Carsana, P. Pedferri, "Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current", *Corrosion Science* 49, pp. 1056-1068, 2007.
- [8] European Federation of Corrosion Publications Number 38, "Corrosion of reinforcement in concrete", First ed., Chapter 1 to 24, Woodhead publishing limited, New York, 2007.
- [9] A. Solgaard, M. Carsana, M. Geiker, A. Kuter, L. Bertolini, "Experimental Observations of Stray Current Effects on Steel Fibres embedded in Mortar", Accepted, *Corrosion Science* 2013.
- [10] I. Sanchez, X.R. Novoa, G. de Vera, M.A. Climent, "Microstructural modifications in Portland cement concrete due to forced ionic migration tests. Study

بودن جریان عبوری از نمونه‌ها، تنش‌های حرارتی و انقباضی پدید نمی‌آید و مکانیزم اصلی تغییر ساختار، مهاجرت یون‌ها است. از طرفی نقش مهاجرت یون‌ها در جریان سرگردان DC در انتقال هیدرواکسید کلسیم به سطح بتن به مراتب کمتر از نقش جریان سرگردان AC است، زیرا فشار داخلی بتن در اثر تخییر محلول حفره‌های بتن موجب حرکت اجباری محلول به سطح بتن و تشکیل رسوب سفید رنگ در فصل مشترک دانه‌های شن و ماسه با زمینه سیمانی می‌شود [۲۲].

۵- جریان سرگردان AC با ولتاژ بالا می‌تواند در مدت کمتر از یک دقیقه ساختار میکروسکوپی نمونه بتنی را بشدت تخریب کند و دوام بتن در شرایط محیطی را به میزان قابل ملاحظه کاهش دهد ولی اثرات جریان سرگردان DC در دراز مدت مشخص می‌شود [۲۲].

۵- نتیجه گیری

بر اساس نتایج آزمون‌های انجام شده، عبور طولانی مدت جریان سرگردان از نمونه های بتنی در محیط آبی و عاری از کلرید موجب ایجاد تغییرات ساختاری از طریق مهاجرت یون‌ها در بتن و در نتیجه افزایش نفوذپذیری آن در برابر کلرید و کاهش مقاومت ویژه آن خواهد شد. بنابراین فرایندهایی که بتواند نفوذ یون‌ها در بتن را کاهش دهد موجب افزایش مقاومت بتن در برابر عبور طولانی مدت جریان سرگردان خواهد شد. کاهش نسبت آب به سیمان و نیز افزودن میکروسیلیس به طرح اختلاط بتن موجب کاهش سرعت نفوذ یون‌ها در بتن می‌شود. در این رابطه در ۵۰ VDC با افزودن ۱۰٪ میکروسیلیس (با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰) به طرح اختلاط اثرات عبور جریان الکتریکی در کاهش مقاومت ویژه، درصد کاهش R_c ، درصد افزایش ضریب نفوذ کلرید در لایه سطحی و درصد افزایش بار الکتریکی عبوری از نمونه ناچیز است (کمتر از ۱٪). بنابراین افزودن میکروسیلیس به طرح اختلاط، مهاجرت یون‌ها را با مشکلات بیشتری روبرو می‌کند و در نتیجه پایداری ساختاری بتن را در برابر عبور طولانی مدت جریان سرگردان افزایش می‌دهد. به عبارت دیگر میکروسیلیس علاوه بر کاهش هیدرواکسید کلسیم باعث متراکم تر شدن بتن و کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود.

کاهش نسبت آب به سیمان موجب نزدیک شدن نسبت C/S در فاز هیدراته به عدد ۲ و در نتیجه کاهش مقدار هیدروکسید کلسیم در ساختار بتن می‌شود. علاوه بر این موجب کاهش حجم حفره های مویین بتن از طریق متراکم کردن بتن می‌شود. بنابراین مسیرهای نفوذ در بتن را تنگ تر کرده و مهاجرت یون‌ها را با مشکلات بیشتری روبرو خواهد کرد. با کاهش مهاجرت یون‌ها، ساختار بتن از پایداری بیشتری در برابر عبور جریان برخوردار خواهد شد و اثرات آن بر خواص فیزیکی بتن کاهش می‌یابد. در نمونه با نسبت آب به سیمان ۰/۳۷ (نمونه ۱) اثرات عبور جریان بمدت ۳۰ روز و در ولتاژ ۵۰ VDC بر درصد کاهش مقاومت ویژه، درصد کاهش R_c ، درصد افزایش ضریب نفوذ در لایه سطحی و درصد افزایش بار الکتریکی عبوری در آزمون RCP، به ترتیب ۴٪، ۳/۳٪، ۹٪ و

- by impedance spectroscopy”, *Cement and Concrete Research*, vol. 38, pp. 1015–1025, 2008.
- [11] M. Siegwart, J. F. Lyness, B. J. McFarland, “Change of pore size in concrete due to electrochemical chloride extraction and possible implication for the migration of ions”, *Cement and Concrete Research*, vol. 33, pp. 1211-1221, 2003.
- [12] J. Jain, N. Neithalath, “Electrical impedance analysis based quantification of microstructural changes in concretes due to non-steady state chloride migration”, *Materials Chemistry and Physics*, vol. 129, pp. 569–579, 2011.
- [13] J. M. Loche, A. Ammar, P. Dumargue, “Influence of migration of chloride ions on the electrochemical impedance spectroscopy of mortar paste”, *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, pp. 1797-1803, 2005.
- [14] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedeferra, R. Polder, “Corrosion of Steel in Concrete”, First ed., pp. 277-282, 291, 43, 82, 4, 23-26, 6-8, Weinheim: Wiley-VchVerlag GmbH & Co. KGaA, Italy, 2004.
- [15] ASTM C1202-12, “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration”, ASTM International, 2012.
- [16] A. Aghajani, A. Saatchi, M. A. Golozar, K. Raeissi, “Electrochemical Impedance Spectroscopy Study of the Effects of High Voltage AC Stray Current on Concrete”, *Journal of transportation research*, Accepted, article No. 1370-91, 2012.
- [17] Aghajani, A. Saatchi, M. A. Golozar, K. Raeissi, “Application of Electrochemical Impedance Spectroscopy in study concrete microstructure” *Zang Journal*, Accepted, letter No. 91-1555, 2013.
- [18] R. Vedalakshmi, V. Saraswathy, Ha-Won Song, N. Palaniswamy, “Determination of diffusion coefficient of chloride in concrete using Warburg diffusion coefficient”, *Corrosion Science*, vol. 51, pp. 1299–1307, 2009.
- [19] NT BUILD 492. “Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments”, First ed. USA, Approved 2012.
- [20] ASTM C876-09, “Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete”, ASTM international, Philadelphia, 2013.
- [21] R. Vedalakshmi, R. R. Devi, B. Emmanuel, N. Palaniswamy, “Determination of diffusion coefficient of chloride in concrete: an electrochemical impedance spectroscopic approach”, *Materials and Structures*, vol. 41, pp. 1315–1326, 2008.
- [22] A. Aghajani K, A. Saatchi, M. A. Golozar, K. Raeissi, “Effects of AC stray current on concrete structures”, Accepted, *Amirkabir Journal of Science and Technology*, Letter No. AUTJ_3964, 2013.
- [23] A. Aghajani, A. Saatchi, “Stray Current Analysis in Metro Network”, *Zang Journal*, vol. 33, pp. 5-10, 2008.
- [24] A. Aghajani, A. Saatchi, “Application of Reverse Current Switches in Removing Metro Stray Current Corrosion”, *Zang Journal*, vol. 32, pp. 5-11, 2008.
- [25] A. Aghajani, M. A. Golozar, A. Saatchi, K. Raeissi, S. Shabani, M. Urgan, “Stray Alternating Current Problems in Concrete Power Poles”, *Materials Performance*, Accepted, 2013