



دانشگاه صنعتی امیر کبیر
(پلی تکنیک تهران)

سال چهل و پنج، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۲، صفحه ۶۹ تا ۸۰
Vol. 45, No.1, Summer 2013, pp. 69-80



نشریه علمی - پژوهشی امیر کبیر (مهندسی عمران و محیط زیست)
Amirkabir Journal of Science & Research (Civil & Environmental Engineering)
(AJSR - CEE)

تأثیر جریان سرگردان AC بر سازه‌های بتنی

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

۱ دانشجوی دکترا دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان

۲ استاد دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان

۳ دانشیار دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان

۴ مربی پژوهشکده علوم زیر دریا دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت ۱۳۹۱/۷/۱۰، پذیرش ۹۱/۱۲/۲۸)

چکیده

هدف از این تحقیق بررسی اثرات جریان سرگردان AC بر سازه‌های بتنی است. در این بررسی ولتاژهای ۲۲۰ و ۳۸۰ ولت AC بر نمونه‌های مختلف بتنی اعمال شد و اثرات جریان سرگردان AC بر ساختار آنها به کمک آزمون‌های جریان-زمان، مقاومت ویژه، عمق نفوذ کلرید، مقدار بار الکتریکی عبوری در آزمون "اندازه‌گیری سریع نفوذپذیری در برابر کلرید" و آزمون طیف نگار امپدانس الکتروشیمیایی بررسی شد. بر اساس نتایج آزمون‌های انجام شده، جریان AC در ولتاژهای بالا باعث ایجاد تغییرات ساختاری در بتن موجب کاهش مقاومت الکتریکی، افزایش عمق نفوذ کلرید، افزایش بار الکتریکی در آزمون نفوذپذیری کلرید و ایجاد تغییر در شکل طیف امپدانس الکتروشیمیایی بتن می‌شود. کاهش نسبت w/c و نیز اضافه نمودن میکروسیلیس به طرح اختلاط بتن موجب افزایش مقاومت آن در برابر اثرات جریان سرگردان AC می‌شود. اغلب مقالات موجود در زمینه خوردگی بتن در ارتباط با خوردگی آرماتور است. در این مقاله تأثیر جریان AC در ولتاژهای بالا بر ساختار بتن بررسی شده است. روش کاهش دوام از راه تنش حرارتی، انقباض ناشی از خشک شدن بتن، ایجاد ترک‌های مویین و بمباران یونی است.

کلمات کلیدی

جریان متناوب، سرگردان، بتن

* نویسنده مسئول وعهده دار مکاتبات Email: aghajani@cc.iut.ac.ir

۱- مقدمه

سازه‌های بتنی در سامانه توزیع برق در معرض جریان سرگردان AC با ولتاژ بالا قرار دارند. کابل‌های برق به کمک مقره‌های عایقی از تیرهای بتنی برق عایق شده‌اند. با گذشت زمان، آلودگی هوا باعث تشکیل لایه نازک رسوب در سطح مقره‌ها می‌شود. در آغاز شروع بارندگی، لایه مزبور مرطوب می‌شود و مقاومت الکتریکی سطح مقره کاهش می‌یابد. در چنین شرایطی قوس الکتریکی در سطح مقره تشکیل می‌شود و جریان قابل ملاحظه‌ای از طریق تیر بتنی برق به زمین منتقل می‌شود. مقدار این جریان بحدی است که موجب ذوب شدن سطح مقره و پایه فلزی آن می‌شود. بر اساس مشاهدات انجام شده توسط نویسندگان مقاله، تیرهای بتنی که در معرض چنین حالتی قرار گرفته‌اند در مدت زمان کمتری دچار ریزش بتن از ناحیه هم سطح با زمین و نیز خوردگی آرماتور شده‌اند. یکی از دلایل این موضوع می‌تواند اثرات جریان سرگردان AC در ولتاژهای بالا بر ساختار بتن است. این جریان می‌تواند باعث کاهش دوام بتن در شرایط محیطی شود.

۲- روش تحقیق

در این بخش ابتدا مواد مورد استفاده و سپس آزمون‌های تحقیق ارائه شده است.

۱-۲ نمونه‌های بتنی

ابتدا تاثیر نسبت آب به سیمان بر رفتار نمونه بتنی در برابر جریان سرگردان AC بررسی شد. برای این منظور طرح اختلاط‌های ۱ الی ۵ در جدول (۱) بکار گرفته شد. طبق شکل ۱ (۱) برای ساخت نمونه‌ها از قالب استوانه‌ای بطول ۲۰ سانتی‌متر و قطر داخلی ۱۰ سانتی‌متر استفاده شد. از هر طرح اختلاط، چهار استوانه بتنی به ابعاد گفته شده تهیه شد. در داخل استوانه‌ها در هر ردیف سه میله فولاد ساده کربنی مطابق شکل (۱) وجود دارد. قسمت میانی این میله‌ها بطول ۳/۵ سانتی‌متر بدون پوشش است. این ناحیه بطور دقیق در داخل نمونه بتنی قرار دارد. از این میله‌ها برای انجام آزمون EIS^۲ استفاده می‌شود که در قسمت‌های بعد توضیح داده خواهد شد.

استوانه‌های بتنی تهیه شده که بدون میکروسیلیس هستند، واکنش عمل‌آوری آنها در مدت حدود ۳۰ روز تکمیل می‌شود ولی استوانه‌های بتنی حاوی میکروسیلیس زمان عمل‌آوری بیش تری دارند [۱]. بنابر این استوانه‌های ۱ الی ۵ به مدت ۳۰ روز و استوانه‌های ۶ الی ۹ به مدت ۶۰ روز در دمای محیط و در داخل آب آشامیدنی قرار داده شد تا واکنش‌های عمل‌آوری آنها کامل شود. سپس ۱ سانتی‌متر از بالا و پایین استوانه‌ها بریده شد و باقی آن‌ها مطابق شکل (۱) به سه نمونه به ارتفاع ۵ سانتی‌متر بریده شد. نمونه تهیه شده از مرکز قالب برای انجام آزمایش‌ها انتخاب شد.

در این مقاله با آزمایش‌هایی تاثیر جریان سرگردان AC بر ساختارهای بتنی بررسی شده است. اغلب مقالات منتشر شده در رابطه با اثرات خوردگی جریان سرگردان بر آرماتورهای فولادی است [۳-۱] و تاکنون مقاله‌ای در رابطه با تاثیر جریان سرگردان AC بر ساختار بتن منتشر نشده است. پیشینه این موضوع، بررسی‌های میدانی نویسندگان مقاله بر روی تیرهای بتنی اطراف شهر اصفهان است. در این تیرها عوامل متعدد محیطی و نیز پایین بودن کیفیت بتن بر کاهش دوام آنها موثر بوده ولی در کنار عوامل یاد شده موضوع نشت شدید جریان برق در شرایط مرطوب و آلوده نیز مطرح است.

در این تحقیق با بکارگیری آزمون‌های جدید خوردگی ابتدا تاثیر جریان سرگردان AC در ولتاژهای ۲۲۰ و ۳۸۰ ولت AC بر نمونه‌های بتنی اثبات می‌شود. سپس تاثیر کاهش نسبت آب به سیمان (w/c) و افزودن میکروسیلیس به طرح اختلاط بتن بر افزایش مقاومت نمونه‌های بتنی در برابر اثرات مخرب جریان سرگردان AC بررسی شده است. همچنین رفتار جریان AC در بتن از طریق طرح "واحد‌های سلولی"^۱ و مدار معادل الکتریکی بررسی و بحث شده است.

بر اساس نتایج بدست آمده، جریان سرگردان در ولتاژهای بالا از طریق تنش‌های حرارتی، موجب بروز میکروتکرک در

جدول (۱): طرح اختلاط نمونه های بتنی

نمونه	سیمان پرتلند kg/m ³	شن < ۵mm (Kg/m ³)	ماسه ۵-۱۰ mm (Kg/m ³)	شن ۱۰-۲۰ mm (Kg/m ³)	آب (Kg/m ³)	درصد وزنی G110P روانساز (%/سیمان)	Silica Fume(SF) %/سیمان (kg/m ³)	w/(c+SF)
۱	۳۵۰	۱۱۴۵	۱۹۹	۵۵۸	۲۲۲/۱	-	-	۰/۶۳
۲	۳۵۰	۱۱۴۵	۱۹۹	۵۵۸	۱۷۵/۲	-	-	۰/۵
۳	۳۵۰	۱۱۴۵	۱۹۹	۵۵۸	۱۴۷	٪۲	-	۰/۴۲
۴	۳۵۰	۱۱۴۵	۱۹۹	۵۵۸	۱۴۰	٪۲	-	۰/۴۰
۵	۳۵۰	۱۱۴۵	۱۹۹	۵۵۸	۱۲۹/۵	٪۲	-	۰/۳۷
۶	۳۲۹	۱۱۴۵	۱۹۹	۵۵۸	۱۴۰	٪۲	٪۶ (۲۱)	۰/۴۰
۷	۳۲۲	۱۱۴۵	۱۹۹	۵۵۸	۱۴۰	٪۲	٪۸ (۳۸)	۰/۴۰
۸	۳۱۵	۱۱۴۵	۱۹۹	۵۵۸	۱۴۰	٪۲	٪۱۰ (۳۵)	۰/۴۰
۹	۳۰۱	۱۱۴۵	۱۹۹	۵۵۸	۱۴۰	٪۲	٪۱۴ (۴۹)	۰/۴۰

به عبارت دیگر نمونه قسمت بالایی و پایینی هر استوانه در آزمایش‌ها استفاده نشد و بصورت نمونه شاهد نگهداری شد تا در صورت بروز مشکل و یا خطا در آزمایش‌ها از آن نمونه‌ها برای کنترل نتایج استفاده شود.

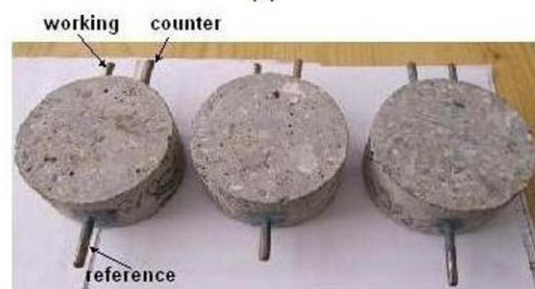
برای بررسی تاثیر افزودن میکروسیلیس بر بهبود مقاومت بتن در برابر جریان سرگردان AC، طرح‌های اختلاط ۶ الی ۹ بکار گرفته شد. همانطور که در جدول (۱) دیده می‌شود در نمونه‌های ۶ الی ۹ میکروسیلیس جایگزین درصد مشخصی از سیمان شده است.

۲-۲- روش آزمایش

قبل از اعمال جریان سرگردان AC بر نمونه‌های بتنی، آزمون‌های مقاومت ویژه، EIS، عمق نفوذ کلرید و آزمون RCP^۳ بر روی یکی از نمونه‌های هر طرح اختلاط انجام شد. آزمون‌های گفته شده در حالت اشباع از آب انجام شد. نمونه‌های باقیمانده تحت اعمال جریان سرگردان AC با ولتاژهای ۲۲۰ و ۳۸۰ ولت به مدت ۴۰ دقیقه قرار گرفتند. در حین اعمال جریان سرگردان، تغییرات جریان عبوری از نمونه‌ها نسبت به زمان اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها دوباره به مدت ۵ روز در آب آشامیدنی قرار داده شدند تا در حالت اشباع از آب قرار گیرد. در ادامه آزمون‌های مقاومت ویژه، EIS، عمق نفوذ کلرید و آزمون RCP^۳ بر روی آنها انجام شد و نتایج آن با حالت قبل از اعمال جریان سرگردان AC مقایسه شد. اکنون روش انجام آزمون‌های گفته شده توضیح داده می‌شود.



(a)



(b)

شکل (۱): قالب تهیه نمونه‌ها و نیز نمونه‌های بتنی بریده شده

۲-۲-۱- اندازه گیری مقاومت ویژه

مطابق شکل (۲) برای اندازه گیری مقاومت ویژه، نمونه‌های بتنی بین دو صفحه فولادی در ۱۲ ولت DC قرار داده شد. برای ایجاد ارتباط الکترولیتی بهتر، بین صفحه فولادی و سطح بتن پارچه مرطوب قرار داده شد. با اندازه گیری جریان عبوری از نمونه‌ها، مقاومت ویژه آن‌ها به روش زیر محاسبه شد [۱]:

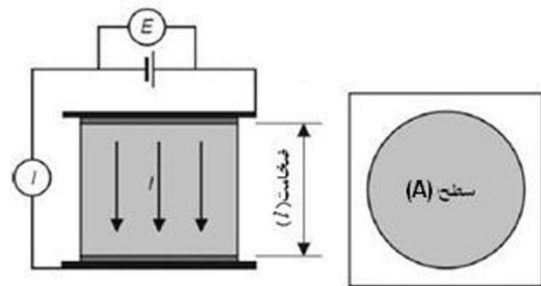
$$\rho = R \frac{A}{l} \quad (1)$$

$$R = \frac{\Delta E}{I}, \quad l = 5 \text{ cm} \quad (2)$$

$$A = 3.14 \times \frac{100}{4} = 78.5 \text{ cm}^2, \quad \frac{A}{l} = 15.7$$

$$\rho = 15.7 \times R \quad (3)$$

مقاومت ویژه نمونه‌ها در حالت اشباع از آب اندازه‌گیری شد. برای این منظور نمونه‌ها به مدت ۵ روز در آب آشامیدنی قرار داده شدند. سپس نمونه‌ها از آب بیرون آورده و پس از گذشت ۳ ساعت و خشک شدن آب سطحی آنها، مقاومت ویژه نمونه‌های بتنی مطابق شکل (۲) اندازه گیری شد.



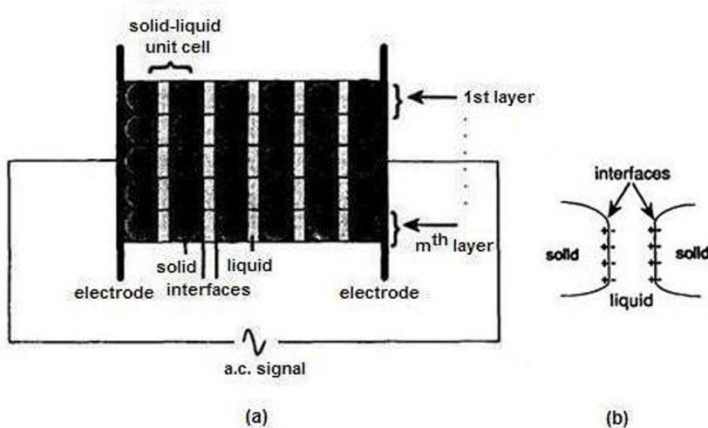
شکل (۲): اندازه گیری مقاومت ویژه نمونه بتنی [۴]

۲-۲-۲- نحوه اعمال جریان سرگردان AC

نمونه‌ها در حالت اشباع از آب تحت تاثیر جریان سرگردان AC قرار گرفتند. برای این منظور قبل از انجام آزمایش، نمونه‌ها به مدت ۵ روز در آب آشامیدنی قرار داده شدند تا بطور کامل از آب اشباع شوند. برای اعمال جریان سرگردان AC از دو صفحه فولادی در زیر و بالای نمونه‌ها استفاده شد. برای ایجاد ارتباط الکترولیتی بهتر، بین صفحات فولادی و نمونه‌های بتنی، پارچه مرطوب قرار داده شد. به عبارت دیگر نحوه اعمال جریان سرگردان AC مشابه شکل (۲) اجرا شد ولی بجای اعمال ولتاژ DC ولتاژهای متناوب ۲۲۰ و ۳۸۰ ولت بمدت ۴۰ دقیقه بر نمونه‌ها اعمال و در حین اعمال ولتاژ AC تغییرات جریان بر حسب زمان اندازه‌گیری و ثبت شد.

۲-۲-۳- آزمون امپدانس

یکی از کاربردهای EIS در مطالعه تغییرات ساختار میکروسکوپی مواد سیمانی در اثر واکنش‌های هیدراته و جریان سرگردان است. شکل (۳) مدلی از سیمان هیدراته شده را هنگام اعمال میدان الکتریکی AC نشان می‌دهد. بر اساس این مدل، سیمان هیدراته شامل m لایه و در هر لایه n سلول هیدراته یا واحد سلولی وجود دارد. هر واحد سلولی شامل فاز مایع، جامد و فصل مشترک جامد-مایع (شکل (۳)) است.

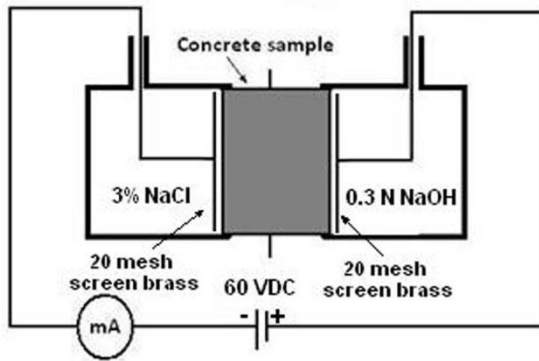


شکل (۳): سیمان هیدراته مدل شده در میدان الکتریکی AC

در هنگام اعمال ولتاژ خارجی بر نمونه بتنی، یون‌های موجود در هر واحد سلولی (یون‌های موجود در فاز مایع) از حالت اتفاقی خارج می‌شود. در داخل واحدهای سلولی، یون‌های مثبت بطرفی که به قطب منفی میدان نزدیک‌تر باشد و یون‌های منفی بطرفی که به قطب مثبت میدان نزدیک باشد آرایش می‌گیرند. به بیان دیگری با اعمال میدان الکتریکی خارجی بر نمونه سیمانی تعداد زیادی خازن‌های سلولی در آن تشکیل می‌شود. این خازن‌ها در آزمون EIS در فرکانس‌های بسیار بالا طیف خود را ظاهر می‌نمایند [۵]. شکل (۴) طیف نایکوئیست نمونه سیمانی را نشان می‌دهد [۶، ۷]. در این شکل $R_{i(S+L)}$ کل مقاومت فازهای جامد و مایع سیمان هیدراته، $R_{i(INT)}$ کل مقاومت فصل مشترک جامد/مایع سیمان هیدراته و $C_{t(INT)}$ کل ظرفیت خازنی فصل مشترک جامد/مایع است.

بر اساس شکل (۴) طیف امپدانس نمونه‌های سیمانی شامل دو قسمت می‌باشد. طیف فرکانس بالا مربوط به خواص ماده سیمانی و طیف فرکانس پایین مربوط به خواص فصل مشترک الکتروکود (آرماچور) است [۶، ۷].

طیف امپدانس نمونه‌های بتنی بعد از عمل آوری کامل و قبل از اعمال جریان سرگردان AC در حالت اشباع از آب به کمک دستگاه پارسنت^۴ ۲۲۷۳ و در محدوده فرکانس ۲ مگاهرتز الی



شکل (۵): شکل ساده ای از دستگاه RCP

در این روش مقدار بار الکتریکی عبوری (بر حسب کولن) در مدت ۶ ساعت اندازه‌گیری می‌شود و از آن به عنوان معیار نفوذپذیری در برابر کلرید استفاده می‌شود. هر چه مقدار بار الکتریکی عبوری بیشتر باشد نفوذپذیری بتن در برابر عبور کلرید کمتر است.

برای اندازه‌گیری بار الکتریکی لازم است سطح زیر نمودار جریان-زمان محاسبه شود. اینکار به کمک نرم افزار مناسب انجام می‌شود. روش دیگر محاسبه بار الکتریکی به کمک فرمول (۴) است [۱۱]:

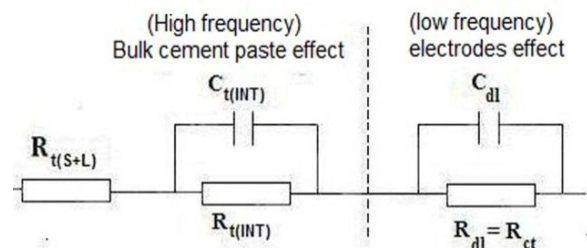
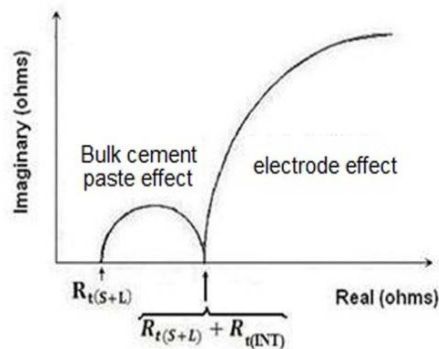
$$Q=900(I_0+2I_{30}+2I_{60}+\dots+2I_{300}+2I_{330}+I_{360}) \quad (4)$$

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 سلول‌های الکتریکی است.

نمونه‌های بتنی قبل و بعد از اعمال جریان سرگردان AC، تحت آزمون RCP قرار گرفتند و جریان عبوری از آنها در فواصل ۱۵ دقیقه اندازه‌گیری شد. همچنین بار الکتریکی عبوری از آنها بر اساس استاندارد [۱۱] ASTM C1202-97 اندازه‌گیری شد و با یکدیگر مقایسه شد.

برای اطمینان بیشتر از نتایج آزمون RCP نمونه‌های بتنی پس از آزمون برش زده شد و با پاشیدن نیترات نقره ۰/۱ نرمال، عمق نفوذ کلرید در نمونه‌ها اندازه‌گیری و با یکدیگر مقایسه شد. نواحی که در آنها کلرید نفوذ نموده پس از گذشت حدود ۱۵ دقیقه از زمان پاشیدن محلول نیترات نقره، به رنگ سفید در می‌آیند. بر اساس شکل (۶) و NT BUILT 492 [۱۲]، اندازه‌گیری عمق نفوذ کلرید در فواصل یک سانتی‌متری لبه‌های نمونه انجام نشد. همچنین چنانچه عمق نفوذ کلرید در ناحیه‌ای از نمونه بشدت از مقدار متوسط عمق نفوذ در سایر نواحی بیشتر باشد، عمق نفوذ در آن ناحیه در محاسبه متوسط عمق نفوذ کلرید در نظر گرفته نمی‌شود.

۱۰۰ میلی‌هرتز ترسیم شد. قبل از آزمایش، نمونه‌ها به مدت ۵ روز در آب قرار داده شد تا از آب اشباع باشند. در ادامه نمونه‌ها در حالت اشباع از آب به مدت ۴۰ دقیقه تحت جریان سرگردان AC با ولتاژهای ۲۲۰ و ۳۸۰ ولت قرار گرفتند. با توجه به اینکه اعمال جریان سرگردان AC باعث از دست رفتن آب بتن می‌شود بنابراین پس از اعمال جریان سرگردان AC، نمونه‌ها مجدداً به مدت ۵ روز در آب قرار داده شد تا از آب اشباع شوند. سپس مجدداً طیف امپدانس نمونه‌ها ترسیم و با طیف امپدانس قبل از اعمال جریان سرگردان، مقایسه شد.



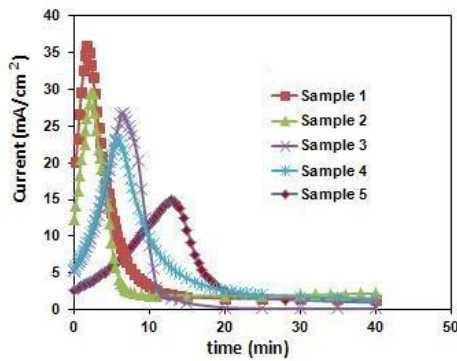
شکل (۴): طیف امپدانس الکتروشیمیایی مواد سیمانی [۷،۶]

۲-۲-۴- آزمون RCP

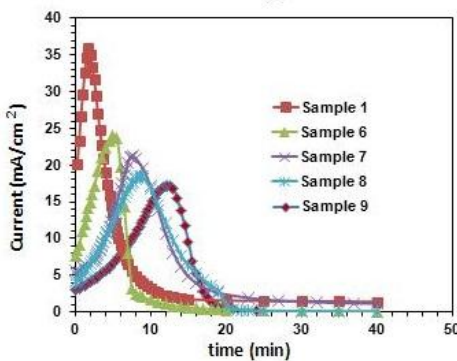
در روش آزمون الکتریکی، تعیین نفوذپذیری بتن در برابر کلرید از نمونه‌های بتنی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۵۰ میلی‌متر و اشباع از آب استفاده می‌شود. این نمونه بین دو سلول از جنس تفلون و یا پلکسی گلاس قرار می‌گیرد. در سلول سمت چپ محلول ۳٪ NaCl و در سلول سمت راست محلول ۰/۳ نرمال NaOH ریخته می‌شود. در داخل هر سلول توری برنجی قرار دارد و به آن سیم الکتریکی روکش‌دار متصل شده است. سپس اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت DC به کمک منبع تغذیه بین آند و کاتد به مدت ۶ ساعت اعمال می‌شود [۸،۹،۱۰]. در شکل (۵) نمونه‌ای از دستگاه آزمون RCP مشاهده می‌شود:

۳- نتایج

همانطور که دیده می‌شود در مراحل اولیه اعمال جریان سرگردان AC مقاومت نمونه‌های بتنی کاهش می‌یابد و جریان عبوری از آنها افزایش می‌یابد. سرعت کاهش مقاومت و یا سرعت افزایش جریان در نمونه‌های مختلف با یکدیگر متفاوت است. در نمونه‌های ۱ الی ۵ مقدار W/C از ۰/۶۳ به ۰/۳۷ کاهش داده شده است. همچنین در نمونه‌های ۶ الی ۹ در W/C ثابت، مقدار درصد میکروسلیس اضافه شده از ۰/۶ به ۰/۱۴ افزایش داده شده است.



(a)



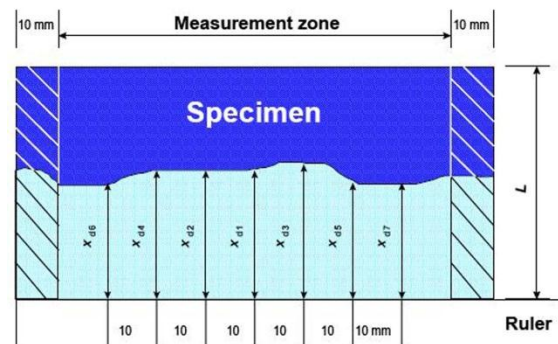
(b)

شکل (۸): منحنی‌های جریان بر حسب زمان در نمونه‌های بتنی شماره ۱ الی ۹ تحت ۳۸۰ ولت AC

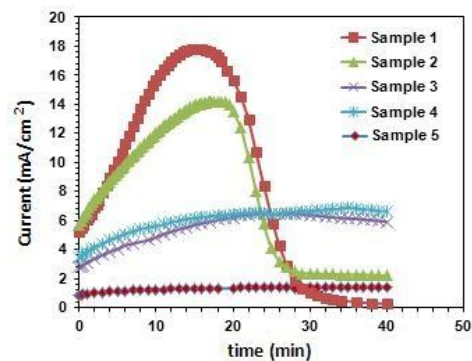
مطابق شکل (۷) و شکل (۸) با کاهش W/C و نیز افزایش میکروسلیس، مقاومت نمونه‌های بتنی در برابر جریان سرگردان AC افزایش یافته است. به عبارت دیگر در همه نمونه‌ها در مرحله اول جریان عبوری افزایش یافته است و پس از رسیدن به مقدار بیشینه خود شروع به کاهش نموده است. با کاهش نسبت W/C و نیز افزایش درصد میکروسلیس، مقدار ماکزیمم جریان در نمونه‌ها کاهش یافته و بیشینه جریان در زمان طولانی‌تری حاصل شده است. همچنین با افزایش ولتاژ از ۲۲۰ ولت به ۳۸۰ ولت، سرعت کاهش مقاومت نمونه‌های بتنی افزایش می‌یابد و بیشینه منحنی‌ها در زمان کوتاه‌تری حاصل می‌شود.

با عبور جریان از نمونه‌ها، دمای آنها افزایش می‌یابد و این موضوع باعث تبخیر آب نمونه‌ها می‌شود. بر اساس شکل (۷) و شکل (۸) بیشینه جریان در نمونه ۱ بیشترین مقدار را دارد بنابراین این در شکل (۹) بطور نمونه، تغییرات دما و کاهش وزن نمونه ۱

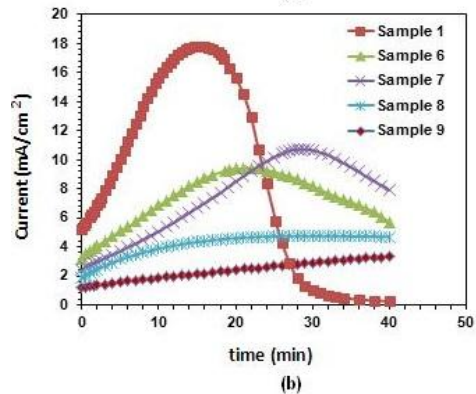
مقاومت ویژه نمونه‌های بتنی پس از عمل آوری و در حالت اشباع از آب مطابق روش اشاره شده در بخش‌های قبلی اندازه‌گیری شد. همانطور که قبلاً گفته شد هر طرح اختلاط شامل چهار نمونه یکسان است. در حالت اشباع از آب، نمونه‌های دوم و سوم هر طرح اختلاط به ترتیب تحت جریان سرگردان AC با ولتاژهای ۲۲۰ و ۳۸۰ ولت AC به مدت ۴۰ دقیقه قرار گرفتند. روش اعمال جریان سرگردان در بخش‌های قبلی توضیح داده شد. در این آزمون تغییرات جریان عبوری از نمونه‌ها بر حسب زمان اندازه‌گیری شد و مطابق شکل (۷) و شکل (۸) بصورت منحنی‌های جریان-زمان ترسیم شد.



شکل (۶) اندازه‌گیری عمق نفوذ کلرید در نمونه‌های بتنی [۱۲].



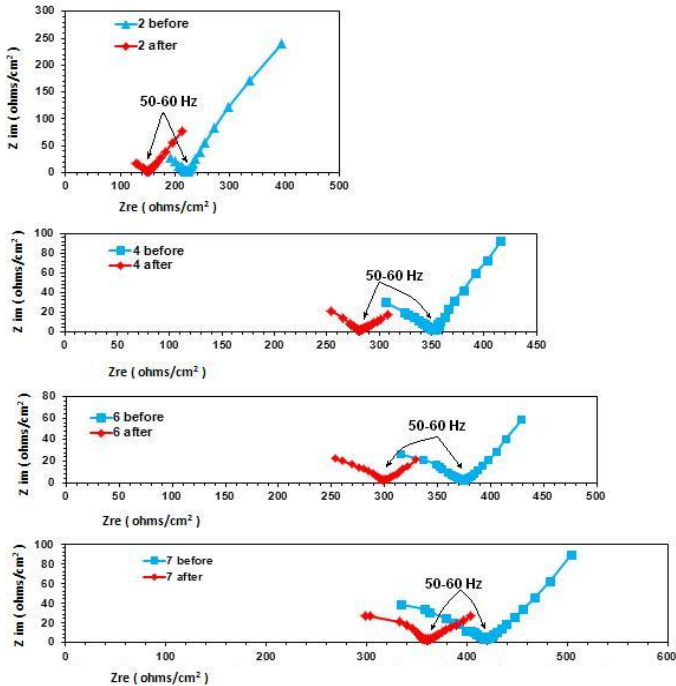
(a)



(b)

شکل (۷) منحنی‌های جریان بر حسب زمان در نمونه‌های بتنی شماره ۱ الی ۹ تحت ۲۲۰ ولت AC

دارد. بنابراین در شکل (۱۰) طیف فرکانس بالا بطور کامل تشکیل نشده است. دستگاه‌هایی مانند سولارتون^۵ ۱۲۶۰ قادر است فرکانس مزبور را تامین نماید ولی متأسفانه در اغلب دانشگاه‌های داخل کشور وجود ندارد. به همین دلیل طیف فرکانس بالا در نمونه‌های بتنی بطور کامل ظاهر نشده است و قسمتی از آن مشاهده می‌شود.



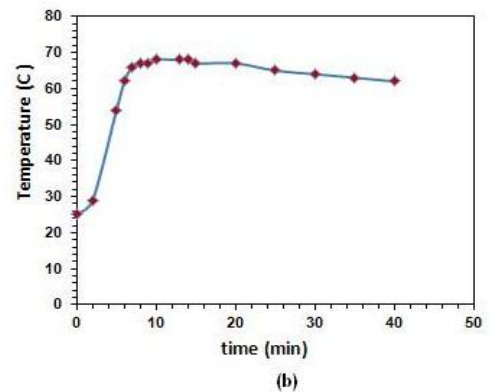
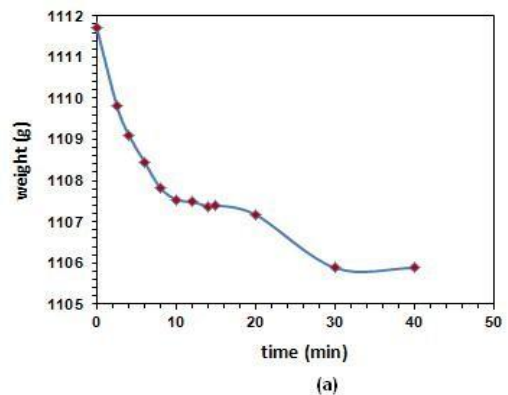
شکل (۱۰): نتایج آزمون EIS بر روی نمونه‌های بتنی شماره ۲، ۴، ۶ و ۷ در حالت قبل و بعد از اعمال جریان سرگردان AC تحت ۳۸۰ ولت بر اساس نتایج شکل (۱۰) پس از اعمال جریان سرگردان AC، طیف فرکانس بالا در نمونه‌های بتنی دچار تغییر شده است. این تغییر ممکن است ناشی از تغییرات ساختاری و نیز تشکیل ترک‌هایی مویین در نمونه‌های بتنی باشد [۱۳-۱۸]. همچنین مقدار تغییرات با افزایش درصد میکروسیلیس و نیز با کاهش نسبت W/C کاهش یافته است.

با توجه به اینکه مقدار کمی از طیف فرکانس بالا در شکل (۱۰) ظاهر شده است بنابراین تعیین قطر و یا ارتفاع آن از طریق برون‌یابی طیف موجود امکان‌پذیر نیست ولی به نظر می‌رسد قطر و ارتفاع طیف فرکانس بالا پس از اعمال جریان سرگردان AC نسبت به حالت قبل از آن کاهش یافته است. برای اطمینان از این موضوع علاوه بر آزمون مقاومت ویژه، آزمون RCP نیز قبل و بعد از اعمال جریان AC بر روی نمونه‌های بتنی انجام شد.

اگر قطر و ارتفاع طیف فرکانس بالا در نمونه‌های بتنی پس از اعمال جریان سرگردان AC کاهش یافته باشد این موضوع به مفهوم افزایش اندازه حفره‌های مویین بتن و افزایش نفوذپذیری

(به عنوان معیاری از تغییرات رطوبت آن) در حین اعمال جریان AC رسم شده است. بر اساس شکل گفته شده دمای نمونه در مراحل اولیه با سرعت زیاد افزایش یافته است. همچنین رطوبت آن کاهش یافته است.

پس از اعمال جریان سرگردان AC در ولتاژهای ۲۲۰ و ۳۸۰، مقاومت ویژه نمونه‌ها مطابق روش اشاره شده در بخش‌های قبلی و در حالت اشباع از آب اندازه‌گیری شد. نتایج در جدول (۱) مشاهده می‌شود. بر اساس نتایج جدول گفته شده، افزودن میکروسیلیس و کاهش نسبت W/C در طرح اختلاط نمونه‌های بتنی، درصد کاهش مقاومت ویژه نمونه‌های بتنی را نسبت به حالت قبل از اعمال جریان سرگردان AC، کاهش داده است.



شکل (۹): (a) تغییرات دما (b) تغییرات وزن نمونه ۱ در حین اعمال جریان سرگردان AC در ۳۸۰ ولت

در شکل (۱۰) طیف امپدانس برخی از نمونه‌های بتنی در حالت قبل و بعد از اعمال جریان سرگردان AC در ولتاژ ۳۸۰ ولت نشان می‌دهد. در این شکل طیف امپدانس بعد از اعمال جریان سرگردان AC، نسبت به حالت قبل از آن، بطرف چپ حرکت می‌نماید.

آزمون EIS به کمک دستگاه پارسنت 2273 انجام شد. ماکزیمم فرکانس قابل اعمال توسط این دستگاه ۲ مگاهرتز است. برای کامل شدن طیف فرکانس بالا در آزمون EIS بتن، نیاز به فرکانس‌های بسیار بالا در محدوده ۳۰ الی ۴۰ مگاهرتز

برش زده شده و مطابق با روش اشاره در بخش روش تحقیق تعیین شد.

بر اساس شکل (۱۱) و نتایج جدول (۳)، پس از اعمال جریان سرگردان AC در ولتاژهای ۲۲۰ و ۳۸۰ ولت، عمق نفوذ کلرید در نمونه‌های بتنی نسبت به حالت قبل از اعمال جریان سرگردان AC، افزایش یافته است. همچنین بطور مشابه، با کاهش نسبت w/c و افزایش درصد میکروسیلیس، اثرات جریان سرگردان AC در افزایش عمق نفوذ کلرید کاهش یافته است.

۴- بحث

تغییرات ساختار میکروسکوپی مانند ایجاد ترک‌های موئین و یا تغییر اندازه حفره‌های موئین آن می‌تواند باعث ایجاد تغییر در شکل طیف فرکانس بالا در آزمون نمونه‌های بتنی شود [۱۳-۱۸]. دلیل پیچیده بودن ساختار میکروسکوپی بتن، بررسی تغییرات ساختاری آن از طریق مطالعات میکروسکوپی بسیار مشکل است. در این رابطه روش EIS، ابزاری مناسب و سریع برای بررسی تغییرات ساختار بتن است.



شکل (۱۱) تعیین عمق نفوذ کلرید پس از آزمون RCP بوسیله پاشیدن نیترات نقره ۰/۱ نرمال بر سطح برش زده شده.

بتن در برابر کلریدها و همچنین کاهش مقاومت ویژه آنها است [۱۳-۱۸]. به عبارت دیگر هر چه ارتفاع قوس فرکانس بالا در طیف امپدانس بیشتر باشد دلیل بر تراکم بیشتر بتن، کوچکتر بودن اندازه حفره‌های موئین بتن و مقاومت بیشتر آن در برابر نفوذ کلرید است [۱۳]. همچنین قطر قوس طیف فرکانس بالا در ارتباط با مقدار فاز هیدراته است. بنابر این هر چه درجه عمل‌آوری بتن بیشتر باشد قطر قوس گفته شده زیادتر خواهد بود [۱۴].

علاوه بر تغییرات شکل ظاهری طیف EIS، فرکانس شروع قوس فرکانس بالا در طیف EIS نمونه‌های بتنی، مورد بررسی قرار گرفت. این فرکانس بسیار نزدیک به فرکانس برق شهر یعنی 50 Hz بود. در شکل (۱۰) این موضوع نشان داده شده است. در قسمت بعد این موضوع بحث شده است.

در جدول (۲) بار الکتریکی عبوری از نمونه‌ها در آزمون RCP، در حالت قبل و بعد از اعمال جریان AC (در ولتاژهای ۲۲۰ و ۳۸۰ ولت) با یکدیگر مقایسه شده است. بر اساس نتایج این جدول، نمونه‌هایی که تحت جریان سرگردان AC قرار داشته‌اند، بار الکتریکی عبوری از آنها در آزمون RCP بیش از حالت قبل از اعمال جریان AC است. همچنین بار الکتریکی عبوری از نمونه‌هایی که تحت جریان AC در ولتاژ ۳۸۰ ولت قرار داشته‌اند بیشتر از نمونه‌های مشابهی است که تحت ولتاژ ۲۲۰ ولت قرار داشته‌اند. علاوه بر این پس از اعمال جریان سرگردان AC، میزان افزایش بار الکتریکی عبوری در نمونه‌های با نسبت w/c کمتر و یا با مقادیر بیشتر میکروسیلیس، کمتر است. پس از آزمون RCP، نمونه‌های بتنی برش زده شد و عمق نفوذ کلرید در آنها از راه پاشیدن محلول نیترات نقره بر سطح

جدول (۱): مقاومت ویژه نمونه‌های بتنی قبل و بعد از اعمال جریان سرگردان AC

قبل از اعمال جریان AC									
نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
مقاومت ویژه (Ω .cm)	۱۲۵۶۰	۱۵۸۴۰	۲۲۳۴۰	۲۵۳۱۴	۳۸۱۰۰	۲۶۵۹۷/۶۴	۳۰۱۴۴	۴۱۱۰۵	۴۴۶۵۱
بعد از اعمال جریان AC تحت 220 VAC									
مقاومت ویژه (Ω .cm)	۸۹۱۴	۱۱۷۰۰	۱۹۷۰۰	۲۲۸۲۷	۳۶۹۷۰	۲۴۲۰۰	۲۷۷۰۸	۴۰۳۸۰	۴۳۶۸۰
درصد کاهش مقاومت ویژه	%۲۹	%۲۶/۱۳	%۱۱/۸۱	%۹/۸	%۲/۹۶	%۹/۰۱	%۸/۰۸	%۱/۷۶	%۲/۱۷
بعد از اعمال جریان AC تحت 380 VAC									
مقاومت ویژه (Ω .cm)	۸۱۹۱	۱۰۷۷۵	۱۶۴۹۳	۲۰۱۹۲	۳۳۶۲۷	۲۱۴۵۰/۱۲	۲۵۹۵۳	۳۷۱۸۰	۴۰۲۶۰
درصد کاهش مقاومت ویژه	%۳۴/۷۸	%۳۱/۹۷	%۲۶/۱۷	%۲۰/۳۳	%۱۱/۷۳	%۱۹/۳۵	%۱۳/۹۰	%۹/۵۴	%۹/۸۳

جدول (۲): مقایسه بار الکتریکی عبوری از نمونه های بتنی در آزمون RCP در حالت قبل و بعد از اعمال جریان سرگردان AC تحت ۲۲۰ و ۳۸۰

ولت									
قبل از اعمال جریان AC									
نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
بار الکتریکی (کولن)	۶۷۷۷	۴۰۲۹/۳	۱۸۲۰/۷	۱۳۵۸/۱	۶۲۱	۱۲۶۲/۷	۱۰۶۲	۵۴۰	۴۳۶/۵
بعد از اعمال جریان AC تحت ۲۲۰ ولت									
بار الکتریکی (کولن)	۷۹۱۱/۹	۴۲۹۳	۲۶۸۴/۷	۱۹۹۸/۹	۱۰۹۳/۵	۱۲۶۷/۲	۱۰۸۷/۲	۵۴۸/۱	۴۳۷/۴
بعد از اعمال جریان AC تحت ۳۸۰ ولت									
بار الکتریکی (کولن)	۹۷۹۵/۶	۴۹۲۱/۲	۲۹۲۶/۸	۲۷۸۶/۴	۱۶۳۳/۵	۱۵۰۸/۴	۱۲۱۹/۵	۱۱۱۸/۷	۷۸۳

دارد از زمینه سیمانی عبور نماید. به همین دلیل رفتار امپدانس بتن و سیمان هیدراته با یکدیگر مشابه است [۱۷]. بر این اساس می‌توان مدل سیمان هیدراته را برای بتن هیدراته نیز در نظر گرفت.

هنگامیکه جریان از مسیر خازنی عبور می‌نماید یون‌ها با سرعت بین صفحات خازنی جابجا می‌شوند و بر اثر اعمال میدان الکتریکی شتاب می‌گیرند. برخورد یون‌ها با دیواره‌های سلولی موجب ایجاد گرما می‌شود. همچنین در صورتیکه میدان الکتریکی اعمال به اندازه کافی قوی باشد انرژی جنبشی یون‌ها افزایش می‌یابد و برخورد آنها با جداره واحدهای سلولی می‌تواند موجب تخریب آنها شود و به نوعی دیواره سلول‌ها را بمباران یونی نمایند. علاوه بر این دمای نمونه با سرعت افزایش می‌یابد و اثرات ناشی از تنش حرارتی می‌تواند موجب ایجاد میکروترک در ساختار نمونه بتنی شود.

شکل (۹) نشان می‌دهد در مرحله اول اعمال جریان، سرعت افزایش دما در نمونه بتنی زیاد است و این موضوع می‌تواند منجر به بروز تنش‌های حرارتی از نوع فشاری و کششی در بتن شود. اگر تنش‌های کششی بیش از تنش کششی نمونه بتنی باشد می‌تواند منجر به بروز ترک در آن شود. علاوه بر این اگر انرژی برخورد یون‌ها کافی باشد می‌تواند به جداره واحدهای سلولی آسیب برسانند. این عامل سبب متصل شدن واحدهای سلولی به یکدیگر و یا به عبارت دیگر موجب افزایش اندازه حفره‌های مویین بتن خواهد شد.

بررسی نمودارهای EIS نمونه های بتنی (شکل (۱۰)) نشان می‌دهد طیف فرکانس بالا در فرکانس نزدیک به ۵۰ هرتز شروع می‌شود. در این فرکانس جزء موهومی امپدانس نسبت به جزء حقیقی آن بسیار کمتر است لذا جریان عبوری از نمونه‌های بتنی در حالت فرکانس ۵۰ هرتز بیشتر از سایر فرکانس‌ها است. بنابراین میزان آسیب بتن در این حالت بیشتر از سایر فرکانس‌ها است. البته در فرکانس‌های بسیار بالا طیف امپدانس بتن مجدداً

همانطور که در بخش روش تحقیق اشاره شد، به دلیل محدودیت فرکانس دستگاه پارستت 2273، طیف فرکانس بالا بطور کامل رسم نشده است. بنابراین تغییرات قطر و ارتفاع طیف فرکانس بالا در نمونه‌ها بدرستی مشخص نیست. به عبارت دیگر آزمون EIS وجود تغییرات ساختاری نمونه‌های بتنی را تایید می‌نماید ولی بدلیل کامل نبودن طیف مزبور، نوع تغییرات مشخص نیست. به همین دلیل آزمون‌های تکمیلی شامل آزمون RCP، عمق نفوذ کلرید و مقاومت ویژه بر روی نمونه‌های بتنی انجام شد تا نوع تغییرات ساختاری ایجاد شده در نمونه‌های بتنی مشخص شود.

بر اساس شکل (۳)، سیمان هیدراته را می‌توان بصورت مجموعه‌ای از واحدهای سلولی در نظر گرفت. در حالت عادی یون‌های موجود در محلول واحدهای سلولی بصورت اتفاقی هستند. هنگامیکه سیمان هیدراته در میدان الکتریکی قرار گیرد یون‌ها از حالت اتفاقی خارج شده و منظم می‌شوند. در این حالت یون‌های مثبت در یک طرف واحد سلولی و یون‌های منفی در طرف دیگر آن قرار می‌گیرند. به این ترتیب در داخل سیمان هیدراته تعداد بسیار زیادی خازن‌های سلولی تشکیل می‌شود. حال اگر سیمان هیدراته در میدان الکتریکی AC قرار گیرد یون‌های موجود در واحدهای سلولی شروع به حرکت رفت و برگشت سریع می‌کنند و موقعیت خود را هماهنگ با فرکانس اعمالی بین صفحات مثبت و منفی خازن‌های سلولی تغییر می‌دهند [۵].

بر اساس این مدل، جریان AC در نمونه‌های بتنی از دو مسیر مختلف عبور می‌نماید. این مسیرها شامل مسیر خازنی و مسیر مقاومتی است. شکل (۴) مدار معادل الکتریکی مسیرهای مزبور را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۴)، امپدانس مسیر خازنی و مقاومتی به فرکانس جریان AC بستگی دارد. در بتن مقاومت الکتریکی فاز شن و ماسه به مراتب بیشتر از مقاومت الکتریکی زمینه سیمانی است. بنابر این جریان تمایل

محور امیدانس حقیقی را قطع می‌نماید و حالتی مشابه با فرکانس ۵۰ هرتز ایجاد می‌شود ولی چنین فرکانس‌هایی در عمل

جدول (۳): مقایسه عمق نفوذ کلرید در آزمون RCP در حالت قبل و بعد از اعمال جریان سرگردان AC تحت ۲۲۰ و ۳۸۰ ولت

قبل از اعمال جریان AC									
نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
عمق نفوذ (mm)	کل ضخامت نمونه	کل ضخامت نمونه	۲۰	۱۴	۴	۸	۶	۴	۳
بعد از اعمال جریان AC تحت ۲۲۰ ولت									
عمق نفوذ (mm)	کل ضخامت نمونه	کل ضخامت نمونه	۳۳	۲۶	۶	۱۲	۱۱	۷	۶
بعد از اعمال جریان AC تحت ۳۸۰ ولت									
عمق نفوذ (mm)	کل ضخامت نمونه	کل ضخامت نمونه	۳۷	۳۵	۲۵	۲۰	۱۸	۱۴	۹

قوس فرکانس بالا در طیف امیدانس بتن خواهد شد [۱۳-۱۶]. بنابر این بر اساس نتایج آزمون‌های مقاومت ویژه، RCP و عمق نفوذ کلرید می‌توان نتیجه گرفت در شکل (۱۰) پس از اعمال جریان سرگردان AC، قطر و ارتفاع طیف فرکانس بالا در آزمون EIS نسبت به حالت قبل از اعمال جریان AC کاهش یافته است.

افزودن میکروسیلیس و یا کاهش نسبت W/C در نمونه‌های بتنی موجب دوام و افزایش مقاومت آنها در برابر اثرات جریان AC در ولتاژ بالا شده است. به نظر می‌رسد دو عامل گفته شده موجب افزایش مقاومت بتن در برابر ترک‌های حرارتی و نیز ترک‌های ناشی از خشک شدن بتن شود. در نمودارهای جریان-زمان (شکل (۷) و شکل (۸)) ملاحظه شد اضافه کردن میکروسیلیس و نیز کاهش W/C سرعت افزایش دما و همچنین بیشینه جریان عبوری از نمونه‌ها را کاهش می‌دهد. این دو عامل می‌تواند تشکیل میکروترک را در اثر مکانیزم تنش حرارتی و انقباضی کاهش دهد.

۵- نتیجه گیری

بر اساس آزمون‌های انجام شده، جریان سرگردان AC در ولتاژهای بالا از طریق مکانیزم تنش‌های حرارتی و تنش‌های ناشی از خشک شدن بتن و نیز بمباران یونی جداره حفره‌های بتن موجب کاهش دوام بتن می‌شود. بنابر این به نظر می‌رسد بکارگیری الیاف و پوشش‌های عایقی بتواند در جلوگیری و کنترل اثرات مخرب جریان AC نقش داشته باشد و می‌تواند در تحقیقات آینده بررسی شود.

در تیرهای بتنی برق نشت شدید جریان AC در شروع بارندگی و در مناطقی که آلودگی هوا زیاد است رخ می‌دهد. با مرطوب شدن رسوب سطح مقره‌ها، مقاومت الکتریکی آنها بشدت افت می‌نماید و در این هنگام تنها عامل کنترل کننده در برابر

اثرات شیمیایی جریان AC ناچیز است بنابر این اعمال جریان AC بر نمونه‌های بتنی موجب تغییر ترکیب شیمیایی آنها نمی‌شود. در ترکیب شیمیایی ثابت، مقاومت ویژه بتن در ارتباط با وزن حجمی بتن، اندازه و توزیع حفره‌های موئین آن است [۱۹]. از طرفی در هنگام اعمال جریان AC، در مرحله اول، جریان عبوری از نمونه‌ها به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد. این موضوع می‌تواند منجر به تشکیل میکرو ترک و نیز افزایش اندازه حفره‌های موئین بتن شود. همچنین در این مرحله آب موجود در محلول واحدهای سلولی شروع به تبخیر می‌کند.

در نمودارهای جریان-زمان (شکل (۷) و شکل (۸)) در مرحله اول مقاومت الکتریکی نمونه‌ها کاهش می‌یابد و با خشک شدن واحدهای سلولی، خاصیت خازنی آنها از بین می‌رود و جریان مجبور خواهد بود از مسیر مقاومتی عبور نماید. امیدانس مسیر مقاومتی به مراتب بیشتر از امیدانس مسیر خازنی است. بنابر این با پیشرفت خشک شدن واحدهای سلولی، امیدانس نمونه‌های بتنی افزایش یافته و جریان عبوری از آنها کاهش می‌یابد.

علاوه بر این، خشک شدن بتن می‌تواند عاملی برای ایجاد انقباض، خزش و در نتیجه ایجاد میکرو ترک در آن باشد [۲]. بنابراین در صورتیکه تنش ناشی از انقباض بتن بیش از تنش کششی آن باشد در این مرحله نیز مشابه مرحله اول در ساختار بتن میکروترک تشکیل خواهد شد. بنابراین تغییرات ساختاری در مرحله دوم نمودارهای جریان-زمان نیز ادامه می‌یابد.

بزرگتر شدن اندازه حفره‌های موئین نمونه‌های بتن و نیز تشکیل میکروترک باعث افزایش نفوذپذیری آنها در برابر کلرید (جدول (۲))، افزایش عمق نفوذ کلرید (جدول (۳)) و نیز کاهش مقاومت ویژه آنها شد (جدول (۱)).

بر اساس تحقیقات انجام شده، تشکیل میکروترک و نیز افزایش اندازه حفره‌های موئین بتن موجب کاهش قطر و ارتفاع

می‌رود. بدین ترتیب با بالا بردن مقاومت الکتریکی تیر برق از طریق بالا بردن کیفیت آن می‌توان از خسارات مفره‌ها و تیرهای برق بر اثر نشت جریان جلوگیری نمود. مسلماً اجرای این طرح موجب کاهش قابل ملاحظه هزینه‌های سالیانه تعویض تیرهای برق و مفره‌ها خواهد شد.

نشت جریان، مقاومت الکتریکی تیر بتنی است. اضافه کردن میکروسیلیس و یا کاهش نسبت W/C در طرح اختلاط تیرهای بتنی برق موجب افزایش مقاومت آنها در برابر عبور جریان AC می‌شود. بنابر این تیر بتنی می‌تواند در ابتدای بارندگی از نشت جریان جلوگیری نماید و پس از گذشت مدت کوتاهی، رسوبات سطح مفره توسط باران شسته شده و مقاومت الکتریکی آن بالا

۶- مراجع

- [۱۲] Nordtest method, NT Build 492, "Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments" Approved, 1999-2011.
- [۱۳] ZhongziXu, Ping Gu, Ping Xie, J. J. Beaudoin "Application of A.C. Impedance Techniques in Studies of Porous Cementitious Materials (II): Relationship Between ACIS Behavior and the Porous Microstructure", Cement and Concrete Research. Vol. 23, pp. 853-862, 1993.
- [۱۴] Ping Xie, Ping Gu, Yan Fu, J.J. Beaudoin "A.C. Impedance Phenomena in Hydrating Cement System: Origin of the High Frequency Arc", Cement and Concrete Research Vol. 24, No. 4, pp. 704-706, 1994.
- [۱۵] Ping Gu, Ping Xie, J. J. Beaudoin, R. Brousseau "A.C. Impedance Spectroscopy(II):Microstructural Characterization of HydratingCement-Silica Fume Systems", Cement and Concrete Research. Vol. 23, pp. 157-168, 1993.
- [۱۶] Ping Gu, ZhongziXu, Ping Xie, J.J. Beaudoin "An A.C. Impedance Spectroscopy Study of Microcracking In Cement-Based Composites During Compressive Lodding", Cement and Concrete Research Vol. 23, pp. 675-682, 1993.
- [۱۷] W.J.McCarter "A Parametric Study of The Impedance Characteristics of Cement-Aggregate Systems During Early Hydration", Cement and Concrete Research, Vol. 24, No. 6, pp. 1097-1110, 1994.
- [۱۸] Hugo Mercado, Sylvie Lorente, Xavier Bourbon "Chloride diffusion coefficient: A comparison between impedance spectroscopy and electrokinetic tests", Cement and Concrete Composites, Volume 34, pp. 68-75, 2012.
- [۱۹] R. Vedalakshmi R. Renugha Devi Bosco Emmanuel N. Palaniswamy "Determination of diffusion coefficient of chloride in concrete: an electrochemical impedance spectroscopic approach", Materials and Structures No. 41, pp. 1315-1326, 2008.
- [۱] Luca Bertolini, Maddalena Carsana, Pietro Pedferri, "Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current", Corrosion Science 49, pp. 1056-1068, 2007.
- [۲] M. Raupach, B. Elsener, R. Polder and J. Mietz, Corrosion of reinforcement in concrete, Chapter 9, "Influence of stray currents on corrosion of steel in concrete", Woodhead publishing limited, 2007.
- [۳] Shucai YANG, Xu YANG, "Evaluation of stray current corrosion resistance of concrete in metro construction", pp. 246-2529, Front. Archit. Civ. Eng. China, 2008.
- [۴] Luca Bertolini, Bernhard Elsener, Pietro Pedferri, Rob Polder, "Corrosion of Steel in Concrete", Wiley-VchVerlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2004.
- [۵] Ping Gu, PingXie, J. J. Beaudoin, R. Brousseau, "Application of A.C. Impedance Spectroscopy (I): A New Equivalent Circuit Model for Hydrated Portland Cement Paste", Cement and Concrete Research. Vol. 22, pp. 833-840, 1992.
- [۶] GuofuQiao, JinpingOu "Corrosion monitoring of reinforcing steel in cement mortar by EIS and ENA", Electrochimica Acta No. 52, pp. 8008-8019, 2007.
- [۷] Ping Gu, Ping Xie & J.J. Beaudoin "Impedance Characterization of microcracking Behaviour in Fibre-reinforced Cement Composites", Cement & Concrete Composites No. 15, pp. 173-180, 1999.
- [۸] Ahmed, M. S., Kayali, O., & Anderson, W. "Evaluation of Binary and Ternary Blends of Pozzolanic Materials Using the Rapid Chloride Permeability Test". Journal of Materials in Civil Engineering, No. 21, pp. 446-453, 2009.
- [۹] C.C. Yang, C.T. Chiang, "Relation between the chloride migration coefficients of concrete from the colourimetric method and the chloride profile method" J. Chin. Inst. Eng. 32, pp. 801-809, 2009.
- [۱۰] P.A. Claisse, H.I. Elsayad, E. Ganjian, "Modelling the rapid chloride permeability test", Cem. Concr. Res. 40, pp. 405-409, 2010.
- [۱۱] ASTM C1202, "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.

۷- پی نوشت ها

^۱ unit cells

^۲ Electrochemical Impedance Spectroscopy

^۳ Rapid Chloride Penetration Test

^۴ Parstat 2273 potentiostat/galvanostat/FRA

^۵ Solarton 1260