

آثار جریان سرگردان متناوب و عوامل محیطی بر تیرهای بتنی توزیع برق

عباس آقاجانی^{۱*}، محمد علی گل‌عذار^۲، احمد ساعتچی^۳، کیوان رئیسی^۴، سعید شعبانی^۵

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

۲ و ۳- استاد، دانشکده مهندسی مواد- دانشگاه صنعتی اصفهان

۴- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد- دانشگاه صنعتی اصفهان

۵- مربی، دانشگاه صنعتی اصفهان- پژوهشکده علوم و فناوری زیر دریا، اصفهان

aghajani@cc.iut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۹/۱۱

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۴/۲۷

چکیده- هدف این مقاله بررسی آثار جریان سرگردان متناوب در ۳۸۰ ولت و نیز آثار عوامل محیطی بر دوام تیرهای بتنی توزیع برق است. در این پژوهش ساز و کار تخریب تیرهای بتنی به کمک آزمون‌های الکتریکی، الکتروشیمیایی و بررسی ساختار بتن بررسی شده است. بر اساس نتایج آزمون‌های انجام شده، جریان سرگردان متناوب در ولتاژهای بالا و نیز آثار عوامل محیطی باعث کاهش دوام تیرهای بتنی می‌شود. مکانیزم تخریب بتن به وسیله‌ی جریان سرگردان متناوب از طریق توزیع غیر یکنواخت جریان، ایجاد تنش‌های حرارتی و انقباضی، افزایش دما و ایجاد فشار بخار در داخل بتن و انتقال مواد از طریق محلول حفره‌های مویین به فصل مشترک سیمان-شن و ماسه است. به کارگیری فناوری‌های جدید در ساخت تیرهای بتنی به منظور کاهش نسبت آب به سیمان و نصب صحیح و رعایت اصول نگهداری آنها موجب افزایش قابل ملاحظه مقاومت آنها در برابر آثار جریان سرگردان متناوب خواهد شد.

واژگان کلیدی: تیر بتنی، دوام، جریان سرگردان

۱- مقدمه

تیرهای بتنی مورد استفاده در شبکه برق ایران شامل تیرهای بتنی با مقطع گرد (تیرگرد) و تیرهای بتنی با مقطع مستطیلی (تیراچ) است. تکنولوژی ساخت تیرهای گرد با تیرهای اچ متفاوت است. تیرهای گرد از طریق تکنولوژی گریز از مرکز ساخته می‌شوند. در این روش آب اضافی بتن، قبل از انجام

واکنش هیدراته به وسیله‌ی مکانیزم گریز از مرکز پاک می‌شود و بتنی با حداقل مقدار آب به سیمان تولید می‌شود. علاوه بر این آرما‌تورهای آن حالت پیش تنیده دارد و پس از عمل‌آوری تیر به طور مداوم تنش فشاری بر بتن اعمال می‌شود. سیمان به کار رفته در طرح اختلاط تیرهای مزبور از نوع سیمان پرتلند معمولی است. تیرهای اچ به روش

سطح مقره را بشدت کاهش می‌دهد و جریان الکتریکی می‌تواند در سطح مقره خزش کند و بین دو فاز دیگر و همچنین زمین (از طریق سیستم ارت و تیر بتنی) مبادله شود [۱]. تیر بتنی و سیستم ارت دو مسیر موازی است. بنابراین چنانچه مقاومت سیستم ارت بالا باشد و تیر بتنی اشباع از آب نیز از مقاومت الکتریکی مناسب برخوردار نباشند قسمتی از جریان از طریق تیر بتنی به زمین وارد می‌شود. در چنین شرایطی کیفیت بتن تنها عامل کنترل و جلوگیری از عبور جریان از تیر بتنی است.

بر اساس نمایش‌های انجام شده بتن ناحیه مجاور سطح زمین در تیرهای اچ پس از مدتی دچار ترک و ریزش می‌شود. در برخی موارد ریزش بتن پس از بروز خوردگی در آرماتور بوده و در موارد دیگر ریزش بتن بدون آثار خوردگی آرماتور است. تشکیل پیل‌های غلظتی بین آرماتور ناحیه مجاور سطح زمین و نواحی بالا و پایین تیر برق، موجب تمرکز خوردگی در ناحیه مجاور زمین شده و منجر به نیزه ای شدن آرماتور و در نهایت سقوط تیر برق خواهد شد. همچنین خزش جریان در سطح مقره باعث ذوب سطحی و زبر شدن آن شده است.

بیشتر مقالات منتشر شده در رابطه با خوردگی بتن، به بررسی خوردگی آرماتور پرداخته است [۲]. در این مقاله نویسندگان بر اساس سوابق پژوهش‌های قبلی خودشان در رابطه با جریان سرگردان متناوب [۳-۵] و نیز آثار تداخل جریان ناشی از بتن در سیستم‌های حفاظت کاتدی [۶، ۷]، آثار جریان سرگردان متناوب را بر تیرهای بتنی برق به کمک آزمون‌های میدانی و آزمون‌های مدرن آزمایشگاهی بررسی کرده‌اند.

۲- روش پژوهش

در این پژوهش از آزمون‌های میدانی و آزمایشگاهی استفاده شد.

قالب‌گیری و بدون استفاده از روان‌ساز در طرح اختلاط بتن ساخته می‌شوند. بر اساس بررسی‌های انجام شده نسبت آب به سیمان در طرح اختلاط تیرهای گرد و اچ در محدوده ۰/۵۵ الی ۰/۶۵، متغیر است (طرح اختلاط جدول ۱).

تیرهای گرد از دوام بسیار بالایی برخوردار هستند و بر اساس بررسی‌های میدانی پس از گذشت حدود ۲۰ سال، هیچگونه آثار ریزش بتن و خوردگی آرماتور در آنها دیده نشده است. در مقابل تیرهای اچ پس از گذشت حدود ۱۵ سال دچار ریزش بتن و خوردگی آرماتور در ناحیه تماس با زمین شده‌اند.

جدول (۱) طرح اختلاط به کار رفته در برخی از تیرهای بتنی اچ و

گرد در استان اصفهان

نوع تیر	سیمان (kg/m ³)	ماسه 0-5 mm (kg/m ³)	شن 5-10 mm (kg/m ³)	شن 10-20 mm (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	w/c
اچ	۳۵۰	۱۱۴۵	۱۹۹	۵۵۸	۲۱۷	۰/۶۲
گرد	۴۸۰	۱۲۳۰	۶۰۰	-	۲۶۴	۰/۵۵

عوامل متعددی در تخریب تیرهای بتنی برق در شرایط محیطی دخیل است که در این رابطه می‌توان از کربناته شدن، سولفاته شدن، مکانیزم یخ و ذوب آن و... را نام برد. در این پژوهش مکانیزم جدیدی در تخریب تیرهای بتنی برق مطرح می‌شود که تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است بنابر این عمده تمرکز آزمون‌های این مقاله روی این موضوع است. در این رابطه به منظور بررسی تأثیر متقابل عوامل طبیعی و نشت جریان در تیرهای بتنی اشباع از آب، آثار برخی از عوامل محیطی بر تیرهای بتنی بررسی شده است. بر اساس آزمون‌های انجام شده ثابت می‌شود آثار نشت جریان الکتریکی در شرایط بارانی و نیز اثرات عوامل طبیعی موجب تسریع تخریب تیرهای بتنی می‌شود.

آلودگی هوا در سطح مقره‌ها ایجاد رسوب می‌کند. در شرایط بارانی رسوب مزبور با جذب آب مقاومت الکتریکی

۱-۲- آزمون‌های میدانی

۱-۱-۲- آنالیز میزان کلرید خاک و بتن

در یکی از مناطقی که تیرهای بتنی اچ دچار تخریب و خوردگی شده بودند، خاک محل از لحاظ میزان کلرید بررسی شد. همچنین نمونه‌هایی از بتن ناحیه خوردگی آرماتور و ریزش بتن و نیز نواحی سالم آن تهیه و میزان کلرید آن به روش وزن سنجی [۸] تحلیل شد. در این روش نمونه‌ها تا مش ۲۰۰ آسیاب شدند. سپس ۲۰ گرم از آن در آب ۵۵ درجه سانتی‌گراد ریخته شد. پس از ۳۰ دقیقه و گذراندن آن از صافی، آنالیز کلرید از طریق وزن سنجی و به کمک روش تیتراسیون با نیترات نقره انجام شد.

۲-۱-۲- اندازه‌گیری پتانسیل آزاد آرماتور

یکی از تیرهای بتنی برق گرد و اچ با طول عمر ۱۰ سال، از خاک بیرون آورده شد و پتانسیل آزاد آن بر اساس استاندارد ASTM C876 [۹] نسبت به الکتروود مرجع مس/سولفات مس در طول تیر برق اندازه‌گیری شد. این تیرها در یکی از مناطق حومه اصفهان (دولت آباد) انتخاب شد. انتخاب نمونه خاک برای تحلیل از همین محل و از موقعیت نصب تیر برق انجام شد. در این محل میزان خسارت خوردگی و ریزش بتن زیاد گزارش شده است.

برای ایجاد ارتباط الکتریکی با آرماتور، مقداری از بتن ناحیه ابتدای تیر تا سطح آرماتور پاک شد. همچنین برای ایجاد ارتباط الکترولیتی بهتر از پارچه مرطوب بین الکتروود مرجع و سطح بتن استفاده شد [۱۰، ۱۱]. سپس منحنی تغییرات پتانسیل در طول تیرهای مزبور رسم شد و نتایج آن بر اساس استاندارد ASTM C876 تفسیر شد [۹].

۲-۱-۳- بررسی کربناته شدن تیرهای برق

برای این منظور از شناساگر فنل فتالئین استفاده شد. این

محلول شامل یک گرم شناساگر فنل فتالئین در محلولی شامل ۵۰ سانتی متر مکعب آب و ۵۰ سانتی متر مکعب الکل است. سپس بر روی سطح مقطع بتن اسپری شد. محلول نام‌برده در pH بالاتر از ۱۰ به رنگ بنفش و در pH کمتر از ۱۰ تغییر رنگ مشاهده نمی‌شود. کربناته شدن باعث کاهش pH بتن می‌شود. بنابر این نواحی کربناته شده که مقدار pH آنها کمتر از ۱۰ است تغییر رنگ از خود نشان نمی‌دهند [۱۱].

۲-۲- آزمون‌های آزمایشگاهی

نمونه‌های بتنی در نسبت‌های مختلف آب به سیمان مطابق جدول ۲ ساخته شد. نمونه‌ها به مدت ۳۰ روز در دمای اتاق و در آب، عمل‌آوری شد. سپس در حالت اشباع از آب، مقاومت پلازیاسیون میله فلزی نمونه‌ها و ضریب دیفوزیون کلرید در سطح نمونه‌های بتنی قبل از قرارگیری آنها در معرض جریان سرگردان متناوب اندازه‌گیری شد. در ادامه نمونه‌ها در حالت اشباع از آب در معرض جریان سرگردان متناوب تحت ۳۸۰ ولت به مدت ۱۵ دقیقه قرار گرفتند. اعمال ولتاژ متناوب از طریق میله‌های فولادی نصب شده در نمونه‌های بتنی انجام شد (میله‌های تحت عنوان "کمکی" و "کاری" در شکل ۱) همچنین در حین اعمال جریان مقدار افزایش دما و کاهش وزن نمونه‌ها (در اثر تبخیر آب) اندازه‌گیری شد.

جدول (۲) طرح اختلاط به کار رفته برای تهیه نمونه‌های بتنی

نمونه	سیمان (kg/m ³)	ماسه 0-5 mm (kg/m ³)	شن 5-10 mm (kg/m ³)	شن 10-20 mm (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	w/c
۱	۳۵۰	۱۱۴۵	۱۹۹	۵۵۸	۲۱۷	۰/۶۲
۲	۳۵۰	۱۱۴۵	۱۹۹	۵۵۸	۱۲۲/۵	۰/۳۵

* در طرح اختلاط ۲ مقدار ۲ درصد روانساز G110 P استفاده شد

عبور جریان الکتریکی از نمونه‌ها باعث گرم شدن آنها

برای اعمال جریان و نیز انجام آزمون مقاومت پلاریزاسیون استفاده شد. سیمان به کار رفته در طرح اختلاط از نوع سیمان پرتلند معمولی است.

پس از عمل‌آوری، یک سانتی‌متر از ابتدا و انتهای بلوک‌ها بریده شد و سپس مقدار باقیمانده به سه نمونه به ارتفاع ۵ سانتی‌متر بریده شد (شکل ۱). از هر طرح اختلاط سه بلوک استوانه‌ای تهیه شد. بنابر این پس از برش بلوک‌ها، هر طرح اختلاط دارای ۹ نمونه بتنی خواهد بود. تعداد نمونه‌ها بیش از تعداد آزمون‌ها تهیه شد تا در صورت نیاز به انجام آزمون‌های تکمیلی و یا تکرار آزمون‌های قبلی امکان‌پذیر باشد.

اعمال جریان در حالت اشباع از آب انجام شد. همچنین تغییرات جریان نسبت به زمان اندازه‌گیری شد و نمودارهای جریان-زمان نمونه‌های بتنی ترسیم شد.

۲-۲-۲- ضریب دیفوزیون کلرید در لایه سطحی

قبل و بعد از اعمال جریان سرگردان متناوب، ضریب نفوذ کلرید در لایه سطحی نمونه‌های بتنی به کمک آزمون طیف نگار امپدانس الکتروشیمیایی^۲ و در فرکانس‌های پائین اندازه‌گیری شد. در این خصوص روش استاندارد وجود ندارد و روش استفاده شده در این پژوهش بر اساس مقالات معتبر علمی (ISI) است [۱۲، ۱۳]. برای این منظور نمونه‌های اشباع از آب به مدت ۳ روز در محلول آب نمک ۰/۵ مولار نگهداری شد. در این مدت غلظت کلرید در حفره‌های لایه‌های سطحی به مقدار ۰/۵ مولار می‌رسد. سپس دو صفحه از جنس نقره و به ابعاد ۴ در ۴ سانتی‌متر انتخاب شد. از این صفحات به عنوان الکترود کاری و کمکی در آزمون طیف نگار امپدانس الکتروشیمیایی استفاده شد. یکی از آنها در سطح بریده شده بالایی و دیگری در

می‌شود پس از سرد شدن آنها در شرایط محیطی، نمونه‌ها به مدت ۵ روز در آب مقطر قرار داده شد تا دوباره به حالت اشباع از آب برسد. در ادامه در حالت اشباع از آب، مقاومت پلاریزاسیون میله فلزی نمونه‌ها و ضریب دیفوزیون کلرید در لایه سطحی آنها اندازه‌گیری شد و با نتایج قبل از اعمال جریان سرگردان متناوب مقایسه شد.



شکل (۱) الف) نمونه‌های بتنی بعد از برش ب) طریقه اعمال ۳۸۰ ولت متناوب

مقاومت پلاریزاسیون میله فولادی نمونه‌ها به کمک دستگاه پارسنت ۲۲۷۳ و با سرعت اسکن ۱۶۶ میکرو ولت بر ثانیه اندازه‌گیری شد. در این آزمون مطابق شکل ۱ الف میله‌های فلزی نمونه‌ها به عنوان الکترودهای کاری، کمکی و مرجع استفاده شد.

۲-۲-۱- نمونه‌های آزمایشگاهی

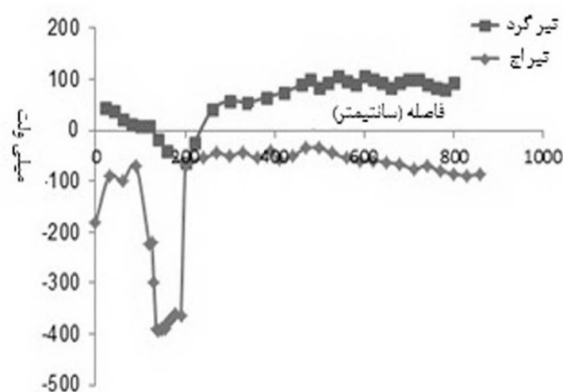
برای قالب‌گیری نمونه‌های بتنی از قالب پلاستیکی به شکل استوانه و به قطر داخلی ۱۰ سانتی‌متر استفاده شد. در داخل این قالب میله‌هایی از جنس فولاد ساده کربنی قرار دارد. قسمت میانی این میله‌ها بطول ۳/۵ سانتی‌متر بدون پوشش است. این ناحیه درست در داخل بتن قرار دارد. سایر نواحی میله‌ها بجز ابتدای آنها که بیرون از قالب قرار دارد به وسیله پوشش اپوکسی پوشانده شد. از این میله‌ها

با مشخص بودن C و σ ، تمام پارامترهای این رابطه معلوم است. در این رابطه مقدار C برابر با غلظت محلول آب نمک است زیرا در مدت ۳ روز غلظت یون کلرید در حفره‌های سطحی نمونه بتنی به مقدار ۰/۵ مولار می‌رسد.

۳- نتایج

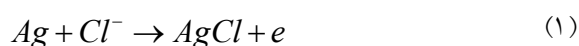
۳-۱- پتانسیل آزاد آرماتور

پتانسیل آزاد نمونه‌ای از تیر اچ و تیر گرد مطابق روش ارائه شده در بخش ۲-۱-۲ اندازه‌گیری شد. نتایج این اندازه‌گیری در شکل ۲ مشاهده می‌شود. طول عمر تیرهای مزبور ۱۰ سال است. در تیر اچ، پتانسیل آزاد در فاصله ۱۵۰ سانتی‌متر از ابتدای تیر حداقل مقدار را دارد. قبل از بیرون آوردن تیر مزبور از زمین، این ناحیه کمی بالاتر از سطح زمین قرار داشته است. در تیر بتنی گرد، مقادیر پتانسیل در طول تیر مثبت تر از تیر بتنی اچ است. در این تیر نیز در فاصله ۲۰۰ سانتی‌متر از ابتدای تیر، مقدار پتانسیل آزاد حداقل است. به طور مشابه، قبل از بیرون آوردن تیر مزبور از زمین، این ناحیه کمی بالاتر از سطح زمین قرار داشته است.



شکل (۲) تغییرات پتانسیل آزاد آرماتور تیر بتنی اچ و گرد با طول عمر ۱۰ سال در یکی مناطق حومه اصفهان (نسبت به الکتروود مرجع مس/سولفات مس)

سطح بریده شده پائینی نمونه بتنی قرار داده شد. در این آزمون الکتروود مرجع از نوع کالومل اشباع انتخاب شد. برای ارتباط الکترولیتی مناسب، بین الکتروودها و سطح نمونه بتنی از پارچه مرطوب استفاده شد. در ادامه طیف نایکوئیست در محدوده فرکانس ۰/۰۵ الی ۴۰۰ هرتز به کمک دستگاه پارسنت ۲۲۷۳ ترسیم شد و سپس با ترسیم نمودار رندلس^۱، مقدار ضریب واربورگ محاسبه شد. در این روش فقط واکنش رورسیبل زیر در سطح الکتروود نقره انجام می‌شود. این واکنش فقط تحت کنترل نفوذ یون کلرید قرار دارد [۱۲].



از داده‌های طیف امپدانس آزمون طیف نگار امپدانس الکتروشیمیایی (طیف نایکوئیست) در فرکانس‌های پایین، مقادیر موهومی (Z_F'') و یا حقیقی (Z_F') امپدانس برحسب $\omega^{-1/2}$ ترسیم شد. نمودار حاصل به شکل خط راست با شیب σ (ضریب واربورگ) است [۱۲]. به این نمودارها، نمودار رندلس گفته می‌شود. سپس ضریب دیفوزیون کلرید در لایه سطحی نمونه‌های بتنی به کمک ضریب واربورگ و با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد [۱۳].

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

D ضریب نفوذ کلرید (m^2s^{-1}) با استفاده از σ ، A سطح الکتروود (m^2)، σ ضریب واربورگ ($\Omega m^2s^{-1/2}$)، C غلظت کلرید برحسب مول بر m^3 ، R ثابت گازها ($J K^{-1} mol^{-1}$)، T دما (K)، F ثابت فاراده ($C mol^{-1}$) برای دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد رابطه بالا بصورت زیر ساده می‌شود [۱۳].

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

1- Randles plot

۳-۲- ساختار میکروسکوپی

از تیرهای بتنی گفته شده نمونه‌هایی تهیه شد و ساختار میکروسکوپی آنها به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ بررسی شد. مشاهده میکروسکوپی نشان داد تیرهای بتنی گرد از تراکم بیشتری نسبت به تیرهای اچ برخوردارند و میزان حفره‌های موجود در آنها کمتر است.

۳-۳- میزان کلرید بتن

میزان کلرید بتن در تیرهای گفته شده و خاک محل به روش وزن سنجی (تیتراسیون) اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها از ناحیه مجاور سطح زمین و قسمت‌های بالاتر تهیه شد. نتایج به شرح جدول ۳ است.

جدول (۳) مقادیر کلرید در خاک محل و نیز در بتن نمونه‌ای از

تیر اچ و گرد

نمونه	درصد وزنی کلرید
تیر اچ، ۵ سانتی متر بالاتر از سطح زمین	$1/02 \pm 0/04$
تیر اچ، ۱۲۰ سانتی متر بالاتر از سطح زمین	$0/030 \pm 0/001$
تیر گرد، ۵ سانتی متر بالاتر از سطح زمین	$0/010 \pm 0/0005$
خاک	$0/055 \pm 0/001$

مطابق جدول ۳، غلظت کلرید در ناحیه مجاور سطح زمین یا ناحیه ریزش بتن در تیرهای اچ بیش از غلظت کلرید در خاک محل است. همچنین غلظت آن بیش از غلظت کلرید در نواحی بالاتر تیر اچ است. علاوه بر این غلظت کلرید در بتن تیر اچ بیشتر از تیر گرد است. بر اساس بازدهی میدانی، قسمت پایین تیرهای اچ قبل از ریزش بتن دچار تغییر رنگ می‌شود. این حالت در تیر گرد دیده نمی‌شود.

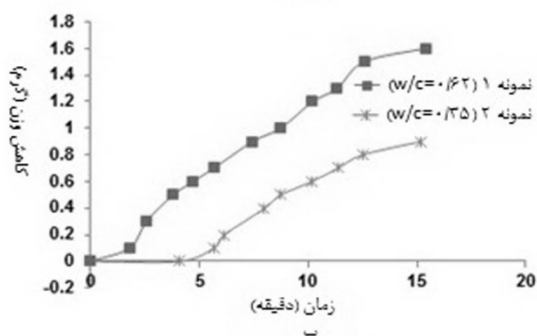
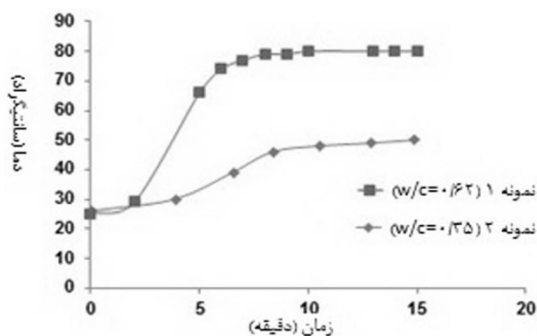
۳-۴- عمق کربناته

مطابق با روش ارائه شده در بخش ۲-۱-۳، تیر بتنی اچ و گرد از لحاظ عمق کربناته بررسی شد. پوشش بتن تیر اچ

در ناحیه‌ای که ۲۰ سانتی متر بالاتر از سطح زمین قرار دارد به گونه کامل کربناته شده است و بر اثر پاشیدن محلول شناساگر فنل فتالین بر سطح مقطع آن، تغییر رنگ مشاهده نشد. در عوض میزان کربناته شدن در تیر گرد بسیار کم است و بیشتر نواحی مقطع نمونه بر اثر پاشیدن شناساگر به رنگ بنفش تغییر رنگ پیدا کرد. در تیر گرد میزان کربناته شدن در نوک تیر بیشتر از ناحیه مجاور زمین بود.

۳-۵- اعمال جریان متناوب ۳۸۰ ولت

مطابق با روش ارائه شده در بخش ۲-۲ نمونه‌های بتنی در حالت اشباع از آب به مدت ۱۵ دقیقه در معرض ۳۸۰ ولت متناوب قرار گرفت. با اعمال ولتاژ، دمای نمونه‌ها مطابق نمودار شکل ۳ الف شروع به افزایش کرد. همچنین به دلیل بخار شدن آب نمونه‌ها، وزن آنها مطابق نمودار شکل ۳ ب در حین اعمال جریان کاهش یافت.

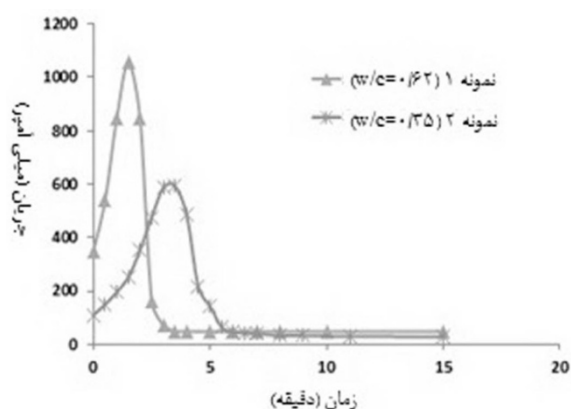


شکل (۳) الف) افزایش درجه حرارت ب) کاهش وزن نمونه‌های بتنی ۱ و ۲ در هنگام اعمال جریان سرگردان ۳۸۰ ولت متناوب

1- Scanning Electron Microscope (SEM)

تغییرات جریان عبوری از نمونه های ۱ و ۲ نسبت به زمان اندازه گیری شد. مطابق شکل ۴، جریان عبوری از نمونه های بتنی دارای تغییرات قابل ملاحظه است. پس از اعمال ولتاژ در سطح نمونه ۱ ترک هایی دیده شد.

در نمونه ۱، جریان اولیه ۳۴۸ میلی آمپر است و در مدت ۱/۵ دقیقه به مقدار بیشینه ۱۰۵۷ میلی آمپر می رسد و سپس طی مدت ۱/۵ دقیقه به مقدار ۵۰ میلی آمپر می رسد. در نمونه ۲، جریان اولیه ۹۱ میلی آمپر است و در مدت ۳/۵ دقیقه به مقدار بیشینه ۵۹۲ می رسد و سپس طی مدت ۲ دقیقه به مقدار ۳۳ میلی آمپر می رسد.



شکل (۴) تغییرات جریان عبوری از نمونه بتنی ۱ و ۲ در مدت اعمال ۳۸۰ ولت متناوب

۳-۶- مقاومت پلاریزاسیون

پس از اعمال جریان، نمونه ها به مدت چند ساعت در شرایط آزمایشگاه نگهداری شد و پس از سرد شدن به مدت ۵ روز در آب مقطر قرار داده شد تا از آب اشباع شوند. سپس به کمک دستگاه پارسنت ۲۲۷۳ منحنی مقاومت پلاریزاسیون میله فولادی نمونه ها در محدوده ± 20 میلی ولت از پتانسیل آزاد میله فولادی ترسیم شد. این آزمایش برای حالت قبل از اعمال ولتاژ نیز انجام شد و نتایج حالت قبل و بعد از اعمال ولتاژ متناوب با یکدیگر مقایسه شد.

با تکیه بر آنچه که انجام شده، در هنگام اعمال ولتاژ AC، به دلیل گرم شدن نمونه ها آب داخل بتن شروع به تبخیر می کند و فشار بخار آب، باعث انتقال محلول حفره های بتن به طرف مرز دانه های شن و ماسه با زمینه سیمانی می شود. محلول حفره های بتن رسوب سفید رنگی از خود بر جای می گذارد. این رسوب به کمک میکروسکوپ الکترونی بررسی شد. بر اساس نتایج جدول ۴ عمده عناصر تشکیل دهنده رسوب سفید رنگ، کلسیم و اکسیژن است.

جدول (۴) تحلیل عنصری رسوب سفید رنگ توسط امکان ایدکس میکروسکوپ الکترونی

عصر	خط	دانسیته (c/s)	درصد اتمی	غلظت	واحد
O	Ka	۱/۹۲	۴۹/۶۴	۲۹/۹۳	درصد وزنی
Na	Ka	۰/۶۷	۱/۹۸	۱/۷۲	درصد وزنی
Mg	Ka	۰/۹۳	۱/۷۸	۱/۶۳	درصد وزنی
Al	Ka	۱/۳۱	۱/۸۹	۱/۹۲	درصد وزنی
Si	Ka	۳/۲۰	۳/۸۱	۴/۰۴	درصد وزنی
S	Ka	۲/۸۰	۲/۶۵	۳/۲۰	درصد وزنی
Cl	Ka	۱/۲۱	۱/۰۷	۱/۴۳	درصد وزنی
Ca	Ka	۴۱/۶۷	۳۷/۱۶	۵۶/۱۲	درصد وزنی
			۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	درصد

این رسوب علاوه بر سطوح پایینی در سطوح بالایی نمونه بتنی شماره ۱ نیز دیده شد. بنابر این محلول توانایی خروج از بتن در خلاف نیروی جاذبه زمین را دارد. از طرفی فرایندهای نفوذ نمی تواند تنها عامل آن باشد زیرا در مدت زمان کوتاه اعمال جریان به همراه بخار آب از مرز دانه های شن و ماسه با فشار خارج می شود. با بالا فشار داخل بتن بر اثر بالا رفتن دما، محلول حفره های مویین بتن بطرف فازهای بازتر (مرز دانه های شن و ماسه با زمینه سیمانی) هدایت می شود.

علاوه بر این در حین اعمال ۳۸۰ ولت متناوب،

جدول (۵) ضریب وارپورگ و ضریب دیفوزیون در لایه سطحی نمونه

بتنی قبل و بعد از اعمال ۳۸۰ ولت AC

قبل از اعمال ۳۸۰ ولت AC		
نمونه	۱	۲
$\sigma \times 10^{-3} (\Omega \cdot m^2 \cdot s^{-1/2})$	۰/۸۱	۱/۸۸
$D \times 10^{-12} (m^2 \cdot s^{-1})$	۰/۳۵	۰/۰۷
بعد از اعمال ۳۸۰ ولت AC		
نمونه	۱	۲
$\sigma \times 10^{-3} (\Omega \cdot m^2 \cdot s^{-1/2})$	۰/۳۲	۱/۲۷
$D \times 10^{-12} (m^2 \cdot s^{-1})$	۲/۳۱	۰/۱۴

۴- بحث و بررسی نتایج

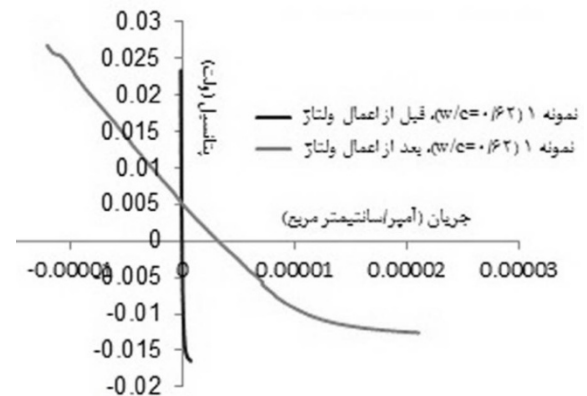
۴-۱- بررسی‌های میدانی

در شکل ۲ دیده شد کمترین پتانسیل آزاد در ناحیه مجاور زمین در تیرهای اچ و گرد قرار دارد. یون‌های محلول در آب از طریق ناحیه مدفون در خاک سازه بتنی وارد آن می‌شود و در ناحیه مجاور سطح زمین آب آنها بخار می‌شود و یون‌های حل شده در داخل بتن باقی می‌ماند. به این ترتیب در تیرهای برق در زمان‌های طولانی غلظت عوامل خورنده در ناحیه مجاور سطح زمین افزایش پیدا می‌کند [۱۱].

بنابر این ایجاد تغییر رنگ در قسمت مجاور زمین در تیرهای اچ به خاطر نفوذ عوامل خورنده از خاک به درون تیر برق و تمرکز آن در ناحیه مجاور زمین است. نفوذ برخی از یون‌ها خورنده مثل کلریدها موجب از بین رفتن لایه پاسیو آرماتور فولادی می‌شوند.

بر اساس استاندارد ASTM C876 وقتی پتانسیل آزاد فولاد در بتن منفی تر از ۳۵۰- میلی ولت نسبت به الکتروود مرجع مس/سولفات مس شود احتمال بروز خوردگی در فولاد بیش از ۹۰٪ است [۹]. بنابر این منفی‌تر بودن پتانسیل آزاد آرماتور در ناحیه مجاور زمین به دلیل تمرکز عوامل خورنده و تمرکز خوردگی در این ناحیه است. تحلیل

در شکل ۵ منحنی پلاریزاسیون نمونه ۱ در حالت قبل و بعد از اعمال ۳۸۰ ولت متناوب ترسیم شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود پس از اعمال ولتاژ متناوب شیب منحنی (مقاومت پلاریزاسیون) به مقدار قابل ملاحظه کاهش یافته است



شکل (۵) نمودار پلاریزاسیون نمونه ۱ در حالت قبل و بعد از اعمال ۳۸۰ ولت متناوب

۳-۲- ضریب دیفوزیون کلرید در لایه سطحی نمونه‌ها

بعد از ترسیم نمودارهای مقاومت پلاریزاسیون، نمونه‌های بتنی به مدت ۳ روز در محلول آب نمک ۰/۳ مولار قرار داده شد و در ادامه مطابق روش ارائه شده در بخش ۲-۲-۲، مقدار ضریب وارپورگ (σ) نمونه‌ها در حالت قبل و بعد از اعمال ۳۸۰ ولت متناوب اندازه‌گیری شد. سپس به کمک رابطه ۳ مقدار ضریب نفوذ کلرید در لایه سطحی نمونه‌ها محاسبه شد.

بر اساس جدول ۵، بعد از اعمال ۳۸۰ ولت متناوب، ضریب وارپورگ کاهش پیدا می‌کند پس مطابق رابطه ۳ ضریب دیفوزیون کلرید در لایه سطحی نمونه‌ها افزایش یافته است. مقدار این افزایش برای نمونه ۱ بیش از نمونه ۲ است.

در پایان آزمایش نمونه‌های بتنی از محل میله‌ها شکسته شد و هیچ‌گونه آثار خوردگی در آنها دیده نشد.

جریان در تیرهای بتنی گرد دیده و گزارش نشده است. ارتعاشات تیرهای اچ موجب گسترش ترک در تیر بتنی در نواحی مجاور زمین می‌شود. بنابراین باعث افزایش نفوذپذیری بتن، تسریع نفوذ عوامل خوردنده مثل کلریدها، منفی‌تر شدن پتانسیل آزاد یا پتانسیل خوردگی آرماتورها در این ناحیه نسبت به نواحی مجاور، کاهش بیشتر مقاومت الکتریکی تیر بتنی در هنگام بارندگی و زیاد شدن احتمال بروز نشت جریان در آن می‌شود.

بر اساس گزارش موجود، مشاهده میدانی و نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی انجام شده، خزش جریان موجب بروز ترک و تشدید ریزش بتن در تیرهای بتنی برق می‌شود. به عبارت دیگر عوامل محیطی، موجب آماده شدن شرایط برای خزش یا نشت جریان می‌شود و هر دو (عوامل محیطی و نشت جریان)، روند کاهش دوام بتن را زیاد می‌کنند.

۴-۲- بررسی‌های آزمایشگاهی

۴-۲-۱- تشکیل رسوب سفید رنگ

حدود ۲۰ الی ۲۵٪ حجمی سیمان هیدراته شامل هیدرواکسید کلسیم (Ca(OH)_2) یا پرتلندیت^(۴) است. قابلیت انحلال این ماده نسبت به سایر محصولات هیدراته به مراتب بیشتر است [۱۱].

عناصر عمده تشکیل دهنده رسوب سفید رنگ در نمونه‌های بتنی، کلسیم و اکسیژن است (جدول ۴). بنابراین نتیجه گرفته می‌شود رسوب مزبور بیشتر هیدرواکسید کلسیم است. همچنین بر اساس شکل ۳ الف، دمای نمونه ۱ بر اثر اعمال جریان متناوب به میزان ۸۰ درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا می‌کند. افزایش دما موجب افزایش حلالیت هیدرواکسید کلسیم در محلول حفره‌های مویین بتن خواهد

شیمیایی مندرج در جدول ۳ نیز نشان می‌دهد غلظت کلرید در خاک محل کمتر از غلظت کلرید در بتن تیر اچ (در ناحیه مجاور سطح زمین) است.

مشابه این حالت می‌تواند در مورد نفوذ یون‌های سولفات و یا سایر یون‌ها رخ دهد. همچنین مکانیزم یخ زدن و ذوب شدن آن نیز می‌تواند نفوذپذیری تیر بتنی را در مجاورت زمین زیاد کند. همچنین نفوذ یون‌ها از طریق خاک به درون تیر بتنی موجب کاهش مقاومت الکتریکی تیر بتنی در ناحیه مدفون و افزایش احتمال نشت جریان و بروز خوردگی در آرماتور می‌شود.

پتانسیل متداول فولاد در بتن در حدود $0/2 -$ ولت نسبت به الکتروود مس سولفات مس است. در شکل ۲ دیده می‌شود پتانسیل آزاد آرماتور تیر گرد بسیار مثبت‌تر از پتانسیل متداول فولاد در بتن است. در هنگام اندازه‌گیری پتانسیل آرماتور در بتن‌های با مقاومت ویژه بالا، پتانسیل اتصال یا پتانسیل نفوذی^(۱) بین الکتروود مرجع و سطح بتن ایجاد می‌شود. این پتانسیل مثبت بوده و مقدار آن بیش از $200 +$ میلی ولت است [۱۴]. این پتانسیل با کاهش نسبت آب به سیمان افزایش پیدا می‌کند [۱۵]. پتانسیل اندازه‌گیری شده مجموع پتانسیل واقعی آرماتور و پتانسیل اتصال است. پس مثبت بودن پتانسیل آزاد آرماتور در این تیرها دلیل بر بالا بودن پتانسیل اتصال و در نتیجه کیفیت بالای بتن است. بررسی ساختار میکروسکوپی بتن تیر اچ و گرد نشان داد بتن تیر گرد از تراکم بیشتری نسبت به بتن تیر اچ برخوردار است.

بنابر این به دلیل تراکم بیشتر، نفوذپذیری کمتر، جذب آب کمتر، نفوذ عوامل خوردنده و افت مقاومت الکتریکی در هنگام بارندگی در تیرهای گرد کمتر از تیرهای اچ است. به همین دلیل در منطقه مورد مطالعه در اصفهان، خزش

2- Portlandite

1- junction or diffusion potential

جریان در داخل بتن ایجاد می‌شود و جریان عبوری در مسیر حفره های موئین بتن متمرکز می‌شود [۳-۵].

تمرکز جریان در مسیر حفره‌های موئین موجب ایجاد تنش‌های حرارتی بین مسیر حفره‌های بتن و نواحی مجاور و نیز تبخیر آب حفره‌های موئین بتن می‌شود. از طرفی تبخیر آب حفره های موئین بتن موجب ایجاد تنش‌های انقباضی در بتن می‌شود [۱۱]. تنش‌های مزبور در نمونه ۱ به اندازه‌ای است که موجب بروز ماکروترک در آن شد.

بر اساس شکل ۴ در هنگام اعمال جریان متناوب، ابتدا مقاومت الکتریکی نمونه‌ها کاهش پیدا می‌کند و جریان نسبت به زمان افزایش پیدا می‌کند. پس از رسیدن جریان به مقدار بیشینه، دوباره جریان به شکل مداوم با گذشت زمان کاهش پیدا می‌کند. علت این موضوع تمرکز جریان در مسیر حفره‌های موئین بتن و تخریب آنها به وسیله‌ی سازوکار ایجاد میکروترک در مسیر حفره‌های موئین بتن است. با گسترش میکروترک‌ها، نفوذ پذیری بتن افزایش پیدا می‌کند و نفوذپذیری رابطه برعکس با مقاومت ویژه الکتریکی بتن دارد [۱۷].

بر این اساس جریان الکتریکی در مدت کوتاهی به سرعت افزایش پیدا می‌کند و افزایش دمای ناشی از آن باعث تبخیر آب حفره‌های موئین بتن خواهد شد. با خشک شدن حفره‌های موئین بتن، جریان متناوب نمی‌تواند از مسیر خازنی (مسیر حفره های موئین) عبور کند زیرا خاصیت خازنی خود را از دست می‌دهند. بنابر این جریان به ناچار باید از مسیر مقاومتی عبور کند و این مسیر دارای امپدانس به مراتب بیشتری نسبت به مسیر حفره های موئین بتن است و در مدت کوتاهی جریان عبوری از بتن بشدت کاهش پیدا می‌کند.

بر اساس شکل ۳، بیشینه دما و نیز سرعت افزایش دما در نمونه ۲ کمتر از نمونه ۱ است. زیرا با کاهش نسبت آب

شد. از طرفی در نمونه ۱ حدود ۱/۶ گرم کاهش وزن در اثر تبخیر آب در حین اعمال جریان بوجود می‌آید (شکل ۳ ب). حجم و فشار بخار ایجاد شده باعث حرکت محلول حفره‌های بتن به طرف فصل مشترک سیمان با شن و ماسه و ایجاد رسوب سفید رنگ در آن نواحی می‌شود. انتقال هیدرواکسید کلسیم به نواحی مرزی باعث رشد حفره های موئین، افزایش نفوذپذیری و کاهش مقاومت الکتریکی بتن می‌شود.

سطح دانه‌های شن و ماسه به دلیل جذب آب، دارای نسبت آب به سیمان بالاتری نسبت به بالک بتن است و به همین دلیل فصل مشترک گفته شده از فضای بازتری برخوردار است [۱۶]. بر این اساس محلول مزبور از این نواحی خارج می‌شود.

در مرجع [۱۷]، تصاویری از تبخیر شدن شدید آب تیر بتنی اشباع از آب در هنگام عبور جریان متناوب با ولتاژ بالا را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در نمونه‌های آزمایشگاهی دیده شد، چنین فشار بخار داخلی، قادر است محلول حفره‌های بتن را به طرف سطح تیر بتنی هدایت کند.

۴-۲-۲- تشکیل ترک

جریان متناوب در هنگام عبور از بتن از دو مسیر موازی عبور می‌کند. مسیر اول مسیر مقاومتی بوده و شامل فاز جامد هیدراته و شن و ماسه است. مسیر دوم مسیر خازنی بوده و شامل مسیر حفره‌های موئین بتن است. مسیر حفره‌های موئین بتن به دلیل دارا بودن الکترولیت و تشکیل لایه دوگانه الکتریکی^۱ در حکم خازن عمل می‌کنند و جریان متناوب قادر است از خازن عبور کند [۳-۵] امپدانس مسیر خازنی در جریان متناوب شهری به مراتب کمتر از امپدانس مسیر مقاومتی است [۳-۵] بنابر این توزیع بسیار غیر یکنواخت

1- Electrical dubel layer

۵- نتیجه گیری

عوامل محیطی و نشت جریان در کاهش دوام تیرهای بتنی برق به یکدیگر کمک می‌کنند و موجب تسریع در از بین رفتن بتن در شرایط محیطی خواهند شد. بر اساس آزمون‌های آزمایشگاهی، اعمال ولتاژ متناوب ۳۸۰ ولت بر نمونه بتنی اشباع از آب می‌تواند در مدت کوتاه ۱/۵ دقیقه نفوذپذیری آن را به شدت افزایش دهد.

برای بالا بردن مقاومت الکتریکی تیر بتنی و جلوگیری از نشت جریان، باید نسبت آب به سیمان در طرح اختلاط بتن از طریق استفاده از روانساز به کمترین مقدار ممکن کاهش داده شود و همچنین فاز هیدراته با عمل‌آوری مناسب و نیز استفاده از مواد پوزولانی مانند میکروسیلیس گسترش پیدا کند. این موضوع موجب کاهش حجم حفره‌های مویین بتن، کاهش جذب آب در هنگام بارندگی و کاهش آثار محیطی در کاهش مقاومت الکتریکی تیرهای بتنی برق خواهد شد.

علاوه بر این لازم است نسبت به ایجاد حالت پیش‌تیدگی در آرماتورهای تیرهای اچ اقدام شود تا مانع از ارتعاش تیر در اثر نیروهای طبیعی مثل باد و یا وزن کابل‌ها و... شود. راهکار دیگر افزایش ابعاد تیرهای اچ است که این موضوع ممان خمشی آنها را بیشتر کرده و موجب کاهش ارتعاش آنها خواهد شد.

استفاده از مواد پوزولانی موجب کاهش قلیایی شدن بتن می‌شود و قلیایی شدن بتن نقش مؤثری در حفاظت خوردگی آرماتورها دارد. بنابر این باید تولید تیرهای بتنی متراکم از طریق کاهش نسبت آب به سیمان به وسیله‌ی مکانیزم گریز از مرکز و یا استفاده از روانساز انجام شود.

علاوه بر رعایت موارد بالا، باید مقاومت الکتریکی در محل نصب تیر برق و نیز در محل نصب مقره‌ها افزایش داده شود و این محل دارای زهکشی مناسب بوده و از جمع

به سیمان، تراکم بتن افزایش یافته و حجم حفره‌های مویین بتن کاهش می‌یابد [۱۱]. بنابر این مسیرهای مویین کمتری در بتن نمونه ۲ برای عبور جریان وجود دارد و جریان عبوری از آن نسبت به نمونه ۱ کمتر است.

۴-۲-۳- ضریب نفوذ کلرید در لایه سطحی

بر اساس جدول ۵ بعد از اعمال ۳۸۰ ولت متناوب بر نمونه‌های بتنی، ضریب دیفوزیون کلرید در لایه سطحی نمونه‌های ۱ و ۲ به ترتیب به میزان ۵۶٪ و ۱۰۰٪ نسبت به حالت قبل از اعمال ولتاژ متناوب افزایش یافته است. دلیل این موضوع افزایش اندازه حفره‌های مویین بتن به وسیله‌ی سازوکار انتقال هیدرواکسید کلسیم و نیز تشکیل میکروتورک و ماکروتورک بر اثر سازوکار تنش‌های حرارتی و انقباضی است. این عوامل باعث افزایش نفوذپذیری بتن و در نتیجه افزایش ضریب نفوذ کلرید در لایه سطحی می‌شود. با کاهش نسبت آب به سیمان، جریان عبوری از بتن کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه عملکرد مکانیزم‌های تنش‌های حرارتی-انقباضی و نیز انتقال هیدرواکسید کلسیم کاهش پیدا می‌کند. به همین دلیل میزان افزایش ضریب نفوذ کلرید در لایه سطحی نمونه ۲ کمتر از نمونه ۱ است.

۴-۲-۴- مقاومت پلاریزاسیون

بر اساس شکل ۵ مقاومت پلاریزاسیون آرماتور فولادی پس از اعمال جریان سرگردان متناوب به شدت کاهش یافته است ولی پس از شکستن نمونه‌های مزبور آثار خوردگی در میله‌ها مشاهده نشد. با توجه به آثار ناچیز شیمیایی جریان سرگردان متناوب، نتیجه می‌شود بیشتر اثر این جریان، انهدام و تخریب فیلم پسیو میله فولادی است. همچنین مشخص شد جریان سرگردان متناوب موجب تغییر ساختار بتن و کاهش دوام آن و تشدید آثار محیطی می‌شود.

- A. Saatchi, A. Aghajani, "Interference Problems and non-uniform potentials in CP of a complex Installation" *Materials Performance*, Dec.2005, pp.22-25.
- [6] Saatchi, A. aghajani, "Correcting Non-uniform Potential distribution and Interference Problems in the Cathodic Protection System of a Gas Compressor Station" *Corrosion 2013 Conference*, Document Number: C2013-0002108, 2013, accepted.
- [7] TxDOT Designation: Tex-617-J, *Test Procedure for Determining Chloride in Concrete*, Texas Department of Transportation, 2005
- [8] ASTM C876, *Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in concrete*, Astm International, USA, 2012.
- [9] John H. Bungey, Stephen G. Millard & Michael G. Grantham, *Testing of Concrete in Structures*, forth ed., USA, Taylor & Francis, 2006, pp. 185-190
- [10] Luca Bertolini, Bernhard Elsener, Pietro Pedferri, Rob Polder, *Corrosion of Steel in Concrete*, first ed., Italy, Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004, pp. 277-282, 291, 43, 82, 4, 23-26, 6-8
- [11] Meilun Shi, Zhiyuan Chen, Jian Sun, "Determination of chloride diffusivity in concrete by AC impedance spectroscopy" *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, 1999, pp. 1111-1115
- [12] 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, 2009, pp. 1299-1307
- [13] Roar Myrdal, Rescon AS, "Phenomena That Disturb the Measurement of Potentials in Concrete" *The NACE International Annual Conference and Exposition*, paper No. 339, March 24 - 29, 1996
- [14] Kyung-Man Moon, Sung-Yul Lee, Myung-Hoon LEE, Yun-Hae Kim, "Effect of W/C ratio and cover thickness on polarization characteristics of embedded steel in mortar" *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 19, 2009, pp. 909-912
- [15] P. Kumar Mehta Paulo J. M. Monteiro, *Concrete Microstructure, Properties, and Materials*, third ed., USA, McGraw-Hill, 2006, pp. 24
- [16] W. Bogajewski, F. Dawalibi, Y. Gervais, "Effects of sustained ground fault current on concrete poles" *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 8, August 1982.
- [17] 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*, Vol. 41, pp. 1315-1326

شدن آب باران در اطراف تیر برق جلوگیری شود. استفاده از پوشش‌های پلیمری در ناحیه مدفون در خاک، موجب کاهش نفوذ عوامل خوردنده به درون بتن شده و مقاومت الکتریکی آنرا در برابر نشت جریان افزایش می‌دهد. فاصله خزشی مقره‌ها باید با در نظر گرفتن میزان آلودگی محیطی، افزایش داده شود. همچنین از نصب مستقیم مقره‌ها بر روی تیرهای بتنی اجتناب شود و برای نصب آنها بر تیرهای بتنی از کراس آرم^۱ غیر فلزی استفاده شود. سیستم ارت مسیر الکتریکی موازی با تیر بتنی برق است. بنابر این سیستم ارت باید دارای مقاومت الکتریکی پایین باشد تا بتواند درصد بیشتری از جریان‌های ناشی و یا جریان‌های خطا را به طرف زمین هدایت کند.

۶- تشکر و قدردانی

از همکاری خوب و گسترده شرکت برق استان اصفهان در انجام این پروژه تشکر و قدردانی می‌شود.

۷- منابع

- [1] Colin Bayliss and Brain Hardy, *Transmission and Distribution Electrical Engineering*, fourth ed., USA, Elsevier Ltd, 2012, chapter 6.
- [2] NACE International Publication 01110, *Stray-Current-Induced Corrosion in Reinforced and Prestressed Concrete Structures*, NACE International, USA, 2010, pp.1-34
- [3] Aghajani1, 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*, article No. 1370-91, 2012, accepted.
- [4] Aghajani1, A. Saatchi, M. A. Golozar, K. Raeissi, "Effects of stray current on reinforcement concrete structures in urban and industrial installations" *Zang Journal*, acceptance letter No. 91-1578, 2013, accepted
- [5] Aghajani1, A. Saatchi, M. A. Golozar, K. Raeissi, "Application of Electrochemical Impedance Spectroscopy in study concrete microstructure" *Zang Journal*, acceptance letter No. 91-1555, 2013, accepted

1- Cross arm