

بررسی تاثیر چیدمان آندها در حفاظت کاتدی با استفاده از جریان اعمالی بر خوردگی بتن مسلح

رامین ایازی^۱، اسماعیل جعفری^{*۲}

۱ گروه مهندسی مواد، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

۲ گروه مهندسی مواد، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

* نویسنده مسئول: jafarias@iauhiraz.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۴/۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۸

چکیده

در این مقاله تاثیر نحوه چیدمان آندها بر روی چگالی جریان اعمالی در سیستم حفاظت کاتدی بتن مسلح مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور دو آرایش متفاوت از آندها با تعداد آندهای متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است نتایج حاکی از آن است که محل قرارگیری آندها نسبت به میل گردها در بتن روی چگالی جریان تاثیر مهمی دارد. و مقدار چگالی جریان اعمالی برای حفاظت از خوردگی، تابعی از محل قرارگیری آندها می باشد. در حالتی که آندها نسبت به میل گردها موازی می باشند چگالی جریان اعمالی کمتری مورد نیاز است و در صورتی که آندها نسبت به میل گردها عمودی باشند، چگالی جریان بیشتری جهت حفاظت مورد نیاز می باشد.

کلیدواژه: حفاظت کاتدی، بتن مسلح، چگالی جریان، جریان اعمالی.

An Investigation on the Anode Distribution in Cathodic Protection by Impressed Current on the Corrosion of Reinforced Concrete

R.Ayazi¹, E. Jafari^{2*}

1. Materials Science and Engineering Dept., Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz Iran

2. Materials Science and Engineering Dept., Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz Iran

* **Corresponding Author:** Esmaeil Jafari

Submission: 2021, 05, 22 **Acceptance:** 2021, 01, 08

Abstract

In this paper, the effect of anode arrangement is investigated on the applied current density in the cathodic protection system of reinforced concrete. For this purpose, two different arrangements of anodes with different number of anodes have been studied. The results indicate that the location of anodes relative to the rods in concrete has a significant effect on the current density. And the amount of applied current density for corrosion protection is a function of the anodes location. In the case where the anodes are parallel to the rods, a lower applied current density is required, and if the anodes are vertical to the rods, a higher current density is required for protection.

Keywords: Cathodic protection, Reinforced concrete, Current density, Impressed current.

۱- مقدمه

امروزه خوردگی در صنایع نفت، گاز، پتروشیمی، خطوط انتقال نفت، گاز، آب، حمل و نقل دریایی، سازه‌های دریایی، اسکله‌ها، مخازن، معادن و سازه‌های بتنی، باعث خسارات فراوانی می‌شود و صنایع مختلف، هزینه‌های گزافی برای کنترل و پیشگیری خوردگی صرف می‌کنند. بتن مسلح، بیشترین مصالح مورد استفاده در ساختمان‌ها، پل‌ها و فونداسیون سازه‌های بتنی می‌باشد [۱]. ویژگی‌هایی از قبیل: طول عمر بالا، قابلیت شکل‌پذیری مطلوب، تحمل درجه حرارت بالا و همچنین قابلیت تحمل بیشترین مقدار تنش‌های وارده در سازه‌های بتنی نسبت به سایر سازه‌ها باعث افزایش کاربرد بتن در صنایع مختلف شده است [۴]. یکی از مهم‌ترین عوامل در خوردگی بتن‌ها حملات کلریدی هست. وجود کلراید آزاد در بتن، می‌تواند به لایه حفاظتی غیرفعالی که در اطراف میلگردها قرار دارد آسیب وارد نموده و آن را از بین ببرد. خوردگی کلرایدی با توجه به کیفیت بتن، وقتی که مقدار کلرید موجود در بتن بیش از ۰/۶ کیلوگرم در هر مترمکعب بتن باشد، اتفاق می‌افتد [۵]. در سازه‌های دریایی مناطق ساحلی، مشکل اصلی، خوردگی فولاد موجود در بتن به دلیل افزایش رطوبت، هم‌زمان حملات کلرایدی به دلیل شوری آب دریا می‌باشد که باعث تخریب شدیدتر سازه‌های بتنی می‌شود. همچنین عرشه پل‌ها و جاده‌ها به دلیل پاشش نمک جهت یخ‌زدایی، میل‌گردها در معرض حمله کلرایدی و در نتیجه خوردگی قرار می‌گیرند. اسیدی شدن بتن نیز در سرعت خوردگی تأثیرگذار است. در اثر خوردگی، میل‌گردها افزایش حجم پیدا می‌کنند و سبب متلاشی شدن سازه‌های بتنی می‌شوند [۶ و ۷].

برای کاهش و جلوگیری از خوردگی در بتن می‌توان از روش‌هایی از قبیل: آرماتورهای زنگ‌زن، آرماتورهای با الیاف پلاستیک، پوشش دهی میلگردها و حفاظت کاتدی استفاده

کرد. به دلیل اینکه خوردگی، یک فرآیند الکتروشیمیایی است، ثابت گردیده که سیستم حفاظت کاتدی تکنیکی موثر و قابل اطمینان در کنترل خوردگی می‌باشد. مشابه استفاده از سیستم حفاظت کاتدی در آب دریا و خاک، سازه‌های دریایی و حفاظت لوله‌های انتقال نفت، گاز و آب، در بتن نیز، برای حفاظت میل‌گردها، می‌توان از روش حفاظت کاتدی استفاده نمود. برای جلوگیری از خوردگی در بتن می‌توان از روش حفاظت کاتدی با آند فدا شونده و یا حفاظت کاتدی با اعمال جریان مستقیم استفاده کرد [۸].

حفاظت کامل و یکنواخت بتن در سیستم حفاظت کاتدی همیشه مورد توجه پژوهشگران بوده است. چراکه برای بعضی از میلگردها که در فاصله دورتری تا آند قرار دارند، احتمال عدم حفاظت و برای بعضی دیگر احتمال حفاظت اضافی وجود دارد. از این رو توزیع یکنواخت جریان حفاظتی در سیستم حفاظت کاتدی بتن در سال‌های گذشته، مورد توجه محققین بوده است. پژوهش‌های گسترده‌ای و در شرایط متفاوت محیطی بر روی روش حفاظت کاتدی با استفاده از آند فدا شونده و جریان اعمالی نیز انجام شده است [۹-۱۱]. که به عنوان نمونه می‌توان اشاره کرد به، گوی و همکاران [۱۲]، که روش‌های عددی برای بررسی توزیع جریان در حفاظت کاتدی بتن چندلایه بکار گرفتند. کارلو و همکاران [۱۳]، تأثیر حفاظت کاتدی را بر روی حملات کلرایدی در بتن مسلح را مورد مطالعه قرار دادند. آرپیت گویال و همکاران [۱۴]، حفاظت کاتدی در بتن مسلح با فولاد پوشش داده شده با رنگ را بررسی کردند. در این پژوهش از روش اعمال جریان، استفاده شده است. نحوه آند گذاری، از مباحث مهم و تأثیرگذار بر روی خوردگی آرماتورها در بتن مسلح می‌باشد که در پژوهش‌های انجام شده کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق، تأثیر تغییر در آرایش آندها در سیستم حفاظت کاتدی جریان اعمالی بر روی میزان چگالی

جریان و در نتیجه بر روی میزان خوردگی میلگردها، بررسی شده است.

۲- مواد و روش آزمایش

در این تحقیق ۱۲ عدد قالب بتنی به ابعاد (۲۲۰×۲۲۰×۲۲۰) و با نسبت استاندارد (سیمان/شن/ماسه)، برابر با (۱/۱/۵/۳) و چگالی ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب تهیه گردید و از سیمان پرتلند تیپ ۲ مطابق استاندارد ASTM C150 با نسبت آب به سیمان ۰/۵ استفاده شد، که در مقابل خوردگی های کلرایدی و سولفاتی، مقاوم است [۱۵]. حداکثر اندازه شن ۲۰ میلیمتر بود که با ماسه ریز مخلوط شد. قالب ها با توجه به وضعیت قرار گیری آندها نسبت به آرماتورها در دو گروه تهیه شدند. از میلگردهایی به قطر ۱۰ و طول ۲۰۰ میلیمتر در هر دو گروه استفاده شد همچنین از آب دریای خلیج فارس به عنوان محیط آزمایش استفاده گردید. ابعاد آندهای مورد استفاده با توجه به مقاومت محیط و سطح آرماتورها انتخاب شد. در این تحقیق از آندهایی با جنس چدن خاکستری پر سیلیس، با ابعاد اولیه ۱۰×۱۰×۶۰ سانتی متر استفاده شد. آندها مورد استفاده به دو صورت موازی و عمود بر آرماتورها در بتن قرار داده شدند. که در هر دو حالت با توجه به ثابت نگه داشتن سطح جانبی کل آندهای مورد استفاده، قالب ها از یک تا چهار آندی مورد آزمایش قرار گرفتند به طوری که در دو آندی، آند اولیه به دو قسمت، در سه آندی، آند اولیه به سه قسمت و در چهار آندی، آند اولیه به چهار قسمت تقسیم شد.

گروه اول: قالب های با شبکه میلگردهای افقی که با H نشان داده می شوند (الگوی از فوندانسیون)

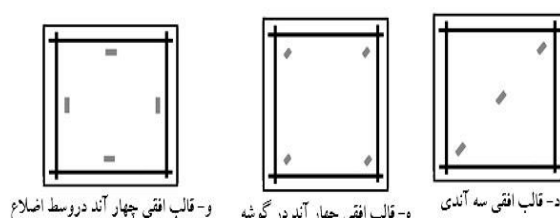
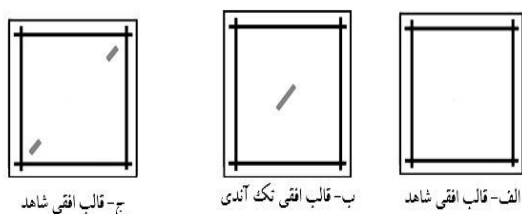
چهار میلگرد به صورت افقی، در ارتفاع ۱۰۰ میلیمتری از کف قالب، و به فاصله ۲۰۰ میلیمتر از یکدیگر و به طور متقارن، در قالب قرار گرفتند و توسط سیم فولادی نازک و نرمی به یکدیگر متصل شدند و آندها به صورت موازی با میلگردها در قالب قرار گرفتند.

گروه دوم: قالب هایی با شبکه میلگردی عمودی که با V نشان داده می شوند (الگوی از ستون بتنی)

در این گروه میلگردها به صورت عمودی، و به فاصله ۲۰۰ میلیمتر از یکدیگر در قالب قرار گرفتند و توسط سیم فولادی نازکی، به هم متصل شدند. در این حالت آندهای به صورت عمودی نسبت به آرماتورها و موازی با یکدیگر در قالب قرار گرفتند. جدول ۱ شرایط قرار گیری آندها را نسبت به میلگردها نشان می دهد.

در این جدول اندیس صفر به معنای قالب شاهد، که بدون آند است. اندیس ۱ به معنای قالب تک آندی است و ...
 V_4^* , H_4^* : دارای چهار آند با قرار گیری آندها در چهار گوشه قالب با استقرار افقی میلگردها می باشد.
 V_4^+ , H_4^+ : دارای چهار آند با قرار گیری آندها، در وسط چهار ضلع قالب می باشد.

در هر گروه یک قالب به عنوان شاهد و در ۵ قالب دیگر، سیستم حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان بکار گرفته شد، که شکل های ۱ و ۲ شماتیکی از وضعیت قرار گیری میلگردها و آندها را نسبت به یکدیگر نشان می دهد.



شکل ۱. نمایی از قرار گیری آندها در قالب های با میلگرد افقی

جدول ۱. مشخصات قالب‌ها

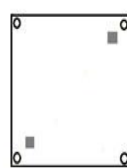
نام قالب	H ₀	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄ [*]	H ₄ ⁺	V ₀	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄ [*]	V ₄ ⁺
تعداد آند	۰	۱	۲	۳	۴	۴	۰	۱	۲	۳	۴	۴
وضعیت استقرار میلگرد	افقی	افقی	افقی	افقی	افقی	افقی	عمودی	عمودی	عمودی	عمودی	عمودی	عمودی
وضعیت استقرار آند(ها)	—	افقی	افقی	افقی	افقی	افقی	—	عمودی	عمودی	عمودی	عمودی	عمودی

یونی در محلول و بتن) اندازه‌گیری شد. ثبت نتایج هر ۱۲ ساعت و به مدت ۱۰۰۰۰ ساعت، انجام شد و تغییرات چگالی جریان در هر قالب، اندازه‌گیری شد. به‌منظور بررسی و مقایسه خوردگی در نمونه‌های حفاظت کاتدی شده و نمونه‌های بدون حفاظت از آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی استفاده شد. کلیه نمونه به مدت زمان دو ماه در محیط آزمایش، آب دریای خلیج فارس قرار داده شدند. امپدانس لکتروشیمیایی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد با الکتروود مرجع نقره - کلرید نقره و در محدوده فرکانس ۰/۱ Hz - ۱۰۰ KHz با دامنه پتانسیل ۱۰ mV از آب دریای خلیج فارس انجام شد. آزمایش امپدانس با استفاده از دستگاه Autolab type III (PGSTAT30) و با استفاده از نرم‌افزار Nova2.1 انجام شد.

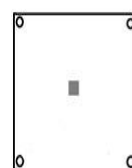
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی قالب‌ها با میل‌گردهای افقی

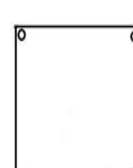
نتایج تغییرات چگالی جریان در قالب‌های افقی در شکل ۳ نشان داده شده است در قالب افقی تک آندی (H₁) خوردگی مشاهده نشد و نمودار تغییرات جریان آن در شکل ۳- (الف) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در ابتدای حفاظت کاتدی، چگالی جریان بالایی لازم بود که دلیل آن را می‌توان مدت‌زمانی دانست که جهت تعادل یونی بین سطح میلگردها و محیط اطراف لازم است صرف شود [۱۷].



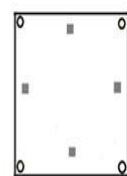
ج- قالب عمودی دو آندی



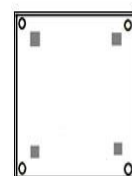
ب- قالب عمودی تک آندی



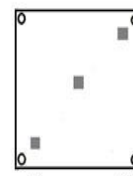
الف- قالب عمودی شاهد



و- قالب چهار آند در وسط اضلاع



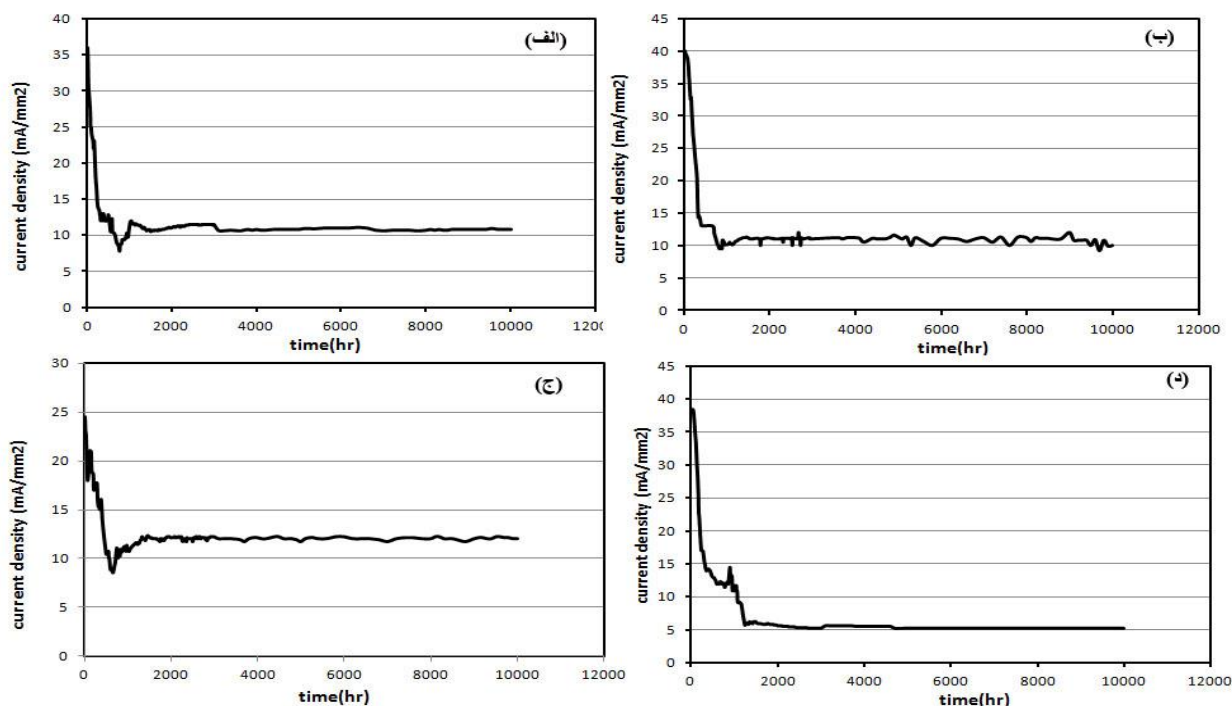
ه- قالب عمودی چهار آند در گوشه



د- قالب عمودی سه آندی

شکل ۲. نمایی از آند گذاری در قالب‌های با میلگردهای عمودی

این قالب‌ها به مدت ۱۰۰۰۰ ساعت، تقریباً ۴۱۷ روز در محیط آزمایش قرار گرفتند، میزان ولتاژ اعمالی ۱/۱- ولت نسبت به الکتروود مرجع نقره - کلرید نقره تثبیت شد و هر ۱۲ ساعت، چگالی جریان اندازه‌گیری شد. از سیم مسی روکش‌دار جهت اتصال دستگاه یکسو کننده به آندها و آرماتورها استفاده شد و در محل‌های اتصال، جهت ممانعت از نشتی جریان با اپوکسی رزین کاملاً ایزوله شدند. پس از آن، بتن‌ها کاملاً در فضای آزاد خشک شدند. سپس بتن‌ها تحت حفاظت کاتدی قرار گرفتند. چگالی جریان اولیه بر اساس حداقل و حداکثر میزان مقاومت الکتریکی بتن محاسبه و اعمال شد [۱۶]. چگالی جریان برای هر قالب توسط آمپر متر (پس از ۲۴ ساعت بعد از برقراری تعادل



شکل ۳. نمودار تغییرات چگالی جریان برحسب زمان (ساعت)، (الف) قالب H₁، (ب) قالب H₂، (ج) قالب H₃، (د) قالب H₄

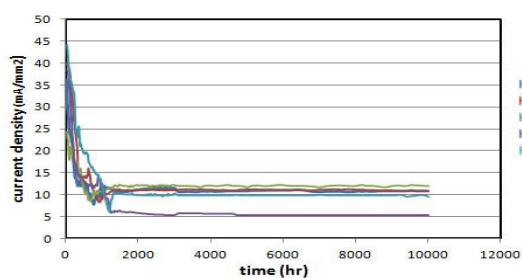
در ساعات اولیه آزمایش تغییرات چگالی جریان دارای شیب کند شونده‌ی شدیدی می‌باشد. اما با گذشت زمان چگالی جریان کاهش یافته و شیب نمودار کاهش داشته و به حالت پایداری خواهد رسید. در قالب دو آندی (H₂) پس از تخریب قالب، خوردگی در میلگردها مشاهده نشد. همان‌طوری که در نمودار شکل ۳- (ب) مشاهده می‌شود در ابتدا چگالی جریان اعمالی بالای مورد نیاز است که در ۲۰۰ ساعت اولیه، شیب تندی را شاهد بودیم. پس از حدود ۸۰۰ ساعت، چگالی جریان کاهش شدیدی داشت و به حالت پایداری نزدیک شد، و پس از حدود ۱۲۰۰ ساعت، کمینه دانسیته جریان ثبت گردید. و پس از آن، منحنی به تدریج به خط مستقیمی با نوسان خیلی کم، تبدیل شد.

در قالب سه آندی (H₃) به دلیل آرایش متقارن آندها روی قطر، میلگردها دچار خوردگی نشدند. در شکل ۳- (ج)

تغییرات چگالی جریان اعمالی برحسب زمان نشان داده شده است. در این قالب چگالی جریان اولیه کمتری نسبت به بقیه قالب‌ها ثبت گردید. که علت را می‌توان توزیع مناسب‌تر آندها نسبت به میلگردها در مقایسه با قالب‌های قبلی دانست. بعد از ساعات اولیه که جریان بالایی نیاز بود، در محدوده ۸۰۰ ساعت، کمینه جریان ثبت گردید، و از ۱۵۰۰ ساعت به بعد، تعادل نسبی برقرار گردید. در این مرحله شیب تغییرات چگالی جریان کاهش و در حال تبدیل شدن به یک خط شیب صفر می‌باشد. در مقایسه با قالب دو آندی، چگالی جریان اعمالی پس از تعادل، بیشتر شده، که احتمالاً به خاطر فاصله بیشتر آند مرکزی می‌باشد. به هر حال هرچه آند به میلگرد نزدیک‌تر باشد، کارایی سیستم حفاظت کاتدی بیشتر می‌شود. نکته مثبت در این قالب چگالی جریان اولیه کم در شروع حفاظت کاتدی می‌باشد.

بعد از ۱۵۰۰ ساعت، چگالی جریان به حالت پایدار خواهد رسید. اگر مقایسه‌ای بین این قالب با قالب چهار آند در گوشه داشته باشیم، به این نتیجه خواهیم رسید که با توجه به نزدیک بودن هر آند به یک میلگرد چگالی جریان بیشتری مورد نیاز بوده است.

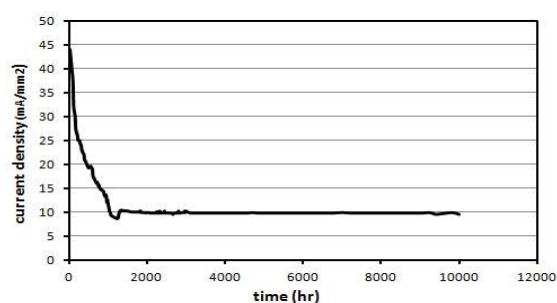
در شکل ۵، تغییرات چگالی جریان، در ۵ قالب افقی (مدلی از فونداسیون) نشان داده شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود در قالب‌های چهار آندی چگالی جریان کمتری نسبت به قالب‌های تک و دو آندی لازم است. علاوه بر این حفاظت بهتری از میلگردها در این قالب‌ها صورت گرفته بود. بهترین عملکرد و کمترین چگالی جریان مربوط به قالب چهار آند در گوشه‌ها می‌باشد. به‌طور کلی می‌توان گفت که زمان به تعادل رسیدن جریان در همه قالب‌ها تقریباً نزدیک به یکدیگر است با این توضیح که بیشترین چگالی جریان اولیه، مربوط به قالب بتنی چهار آند در چهار گوشه است و کمترین چگالی جریان اولیه، مربوط به قالب سه آندی است. نکته قابل توجه این است که با افزایش تعداد آندها، نوسانات چگالی جریان کمتر شده بود که این موضوع در قالب‌های چهار آندی به‌وضوح مشاهده شد.



شکل ۵. مقایسه تغییرات چگالی جریان در پنج قالب افقی

نمودار مقایسه چگالی جریان اولیه با چگالی جریان نهایی در کلیه قالب‌ها در شکل (۶) نشان داده شده است. کمترین میزان نوسان در چگالی جریان در قالب سه آندی اتفاق می‌افتد. یکی از دلایل، برای رخ دادن این پدیده آرایش

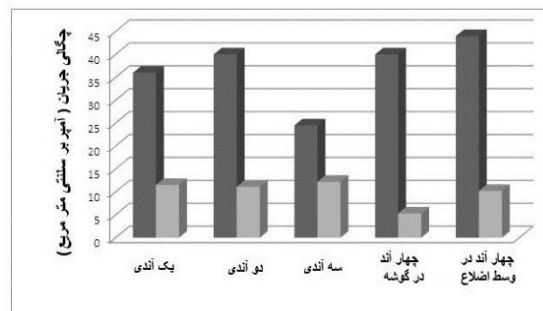
در قالب افقی با چهار آند در گوشه‌ها (H_4^*) خوردگی در میلگردها مشاهده نشد. شکل ۳- (د) بیانگر این است که بعد از ساعات اولیه یک تعادل نسبی در چگالی جریان برقرار شده است. در محدوده ۸۰۰ ساعت شیب منحنی کاهش و بعد از ۱۵۰۰ ساعت شیب منحنی، در حال تبدیل شدن به یک خط راست می‌باشد و محدوده نوسانات آن در محدوده‌ی 5 mA/mm^2 می‌باشد، که بهترین عملکرد، و کمترین نوسان در بین همه قالب‌ها را ثبت کرده است. مهم‌ترین دلیل برای کاهش چگالی جریان، نزدیکی آندها به محل اتصال دو میلگرد است و توزیع جریان یکنواخت‌تر نسبت به بقیه قالب‌ها به دلیل آرایش بهتر آندها می‌باشد همچنین در این قالب دو مورد قابل توجه است. اول حفاظت بسیار خوب میلگردها و دوم کمترین مقدار چگالی جریان اعمالی بعد از پایداری چگالی جریان در بین همه قالب‌های مورد آزمایش. در قالب چهار آند در وسط چهار ضلع (H_4^+) میلگردهای به‌خوبی حفاظت شده بودند. که این پدیده، بیانگر کارایی سیستم حفاظت کاتدی در این قالب بتنی می‌باشد. در شکل ۴، منحنی تغییرات چگالی جریان این قالب نشان داده شده است.



شکل ۴. نمودار منحنی تغییرات چگالی جریان در قالب افقی، چهار آند در وسط اضلاع

همان‌طوری که مشاهده می‌شود در ابتدا چگالی جریان بالا است، در ۲۰۰ ساعت اولیه، شاهد کاهش شدید چگالی جریان اولیه هستیم که بعد از ۸۰۰ ساعت، به تعادل رسیده و

متقارن آندها نسبت به موارد دیگر می باشد. که باعث رسانده شدن جریان لازم با توزیع مناسب تر به تمام قسمت های میلگردها خواهد شد [۱۳].



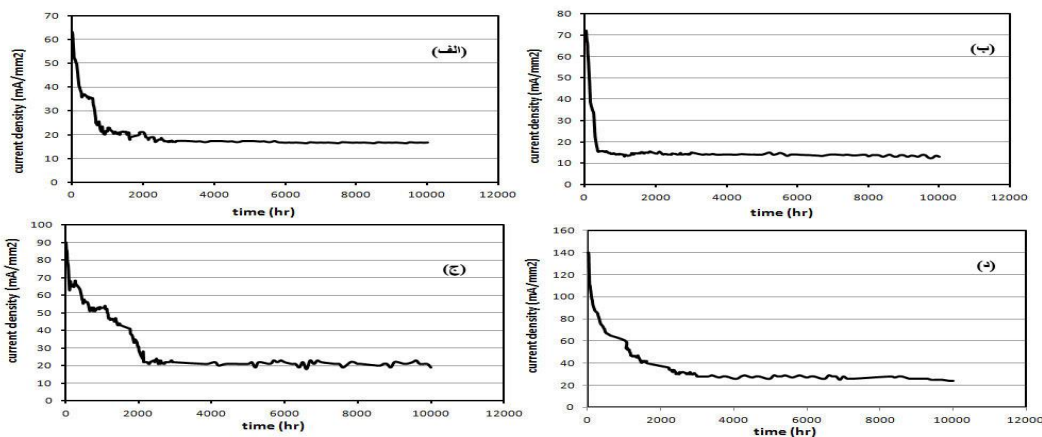
شکل ۶. نمودار مقایسه چگالی جریان اولیه و نهایی در کلیه قالب ها با میلگرد افقی (ستون تیره: چگالی جریان ابتدایی و ستون روشن: چگالی جریان نهایی)

۳-۲- بررسی قالب ها با میلگردهای عمودی

در قالب تک آندی در وسط قالب با میلگردهای عمودی (V1) اثری از خوردگی مشاهده نگردید، با توجه به شکل ۷- (الف)، می توان نتیجه گرفت که تقریباً ۲۰۰ تا ۲۵۰ ساعت لازم بوده تا سیستم به تعادل برسد. در این قالب تغییرات چگالی جریان شدید بود و منحنی با یک شیب منفی، به تعادل رسید. چگالی جریان از حدود 63 mA/mm^2 ، در شروع آزمایش به 36 mA/mm^2 رسید. بعد از ۸۰۰ ساعت،

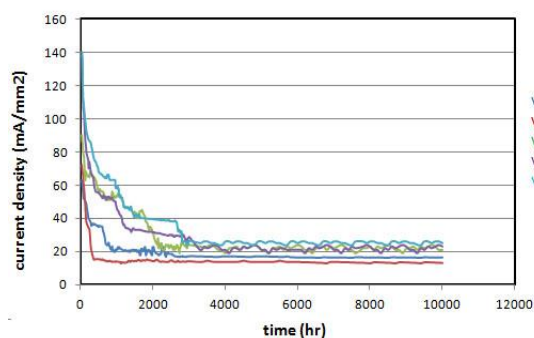
چگالی جریان تغییرات جزئی و نوسان اندکی داشت. از محدوده زمانی ۲۳۰۰ ساعت به بعد، سیستم حفاظت کاتدی به تعادل می رسد و چگالی جریان در محدوده 16 mA/mm^2 تا ۱۵، نوسان می کند. که در مقایسه با قالب افقی تک آندی چگالی جریان اولیه و چگالی جریان زمان پایداری سیستم، نزدیک دو برابر شده است.

در قالب با دو آند در گوشه ها با میلگردهای عمودی (V2)، پس از پایان آزمایش اثری از خوردگی در میلگردها مشاهده نشد و همان طوری که در شکل ۷- (ب) مشاهده می شود در محدوده ۳۰۰ ساعت اولیه، چگالی جریان اولیه در حدود 70 mA/mm^2 می باشد و منحنی چگالی جریان با شیب منفی نسبتاً بالا، تقریباً پس از ۴۰۰ ساعت به حالت پایدار رسیده است. اگر مقایسه ای بین این نمودار با قالب تک آند عمودی داشته باشیم، مشاهده می شود که چگالی جریان در این قالب کمتر بوده است. در قالب بتنی با سه آند در راستای قطر قالب و با میلگردهای عمودی (V3)، میلگردها، به خوبی حفاظت شده بودند، از منحنی چگالی جریان شکل ۷- (ج)، می توان نتیجه گرفت که چگالی جریان اولیه در مقایسه با قالب های افقی بیشتر بوده و در ۲۰۰ ساعت ابتدایی، چگالی جریان کاهش داشته است که پس از برقراری تعادل یونی، نمودار شیب منفی بالایی داشته است و در محدوده



شکل ۷. منحنی تغییرات چگالی جریان با میلگردهای عمودی (الف) قالب V1، (ب) قالب V2، (ج) قالب V3، (د) قالب V4

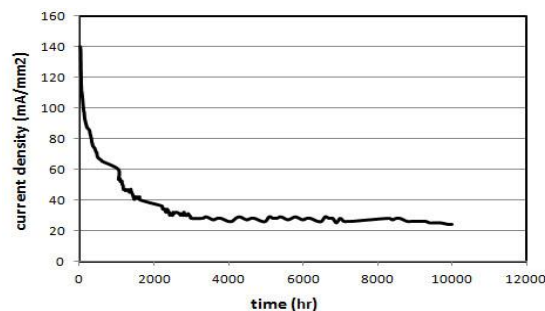
مقایسه کلی بین قالب‌ها با میلگردهای عمودی در شکل ۹ نشان داده شده است، همان‌طوری که مشاهده می‌شود زمان رسیدن به پایداری اولیه چگالی جریان، در همه قالب‌ها تقریباً نزدیک به یکدیگر است، بیشترین چگالی جریان اولیه مربوط به قالب بتنی چهار آند در وسط اضلاع، به میزان 140 mA/mm^2 و کمترین چگالی جریان اولیه، مربوط به قالب بتنی تک آندی است که بیش از 60 mA/mm^2 می‌باشد.



شکل ۹. مقایسه چگالی جریان در کلیه قالب‌های میل گرد عمودی

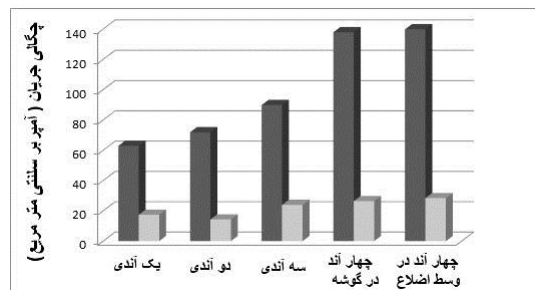
در شکل ۱۰ مقایسه‌ای بین چگالی جریان اولیه و نهایی نشان داده شده است. تغییرات چگالی جریان ابتدایی در مقایسه با چگالی جریان نهایی، زیاد بوده است و در انتهای پژوهش، میزان چگالی جریان کاهش چشم‌گیری داشته است. که علت را می‌توان شکل‌گیری فیلم‌های پایدار بر روی میل‌گردها در طی آزمایش در اثر حفاظت کاتدی دانست. چنانچه میانگین میزان چگالی جریان در همه قالب‌ها گرفته شود، به ترتیب، کمترین میزان میانگین چگالی جریان، در قالب دو آندی، تک آندی و سه آندی اتفاق افتاده است. کمترین میزان نوسان در چگالی جریان در قالب دو آندی اتفاق می‌افتد. یکی از دلایلی که، برای رخ دادن، این پدیده می‌توان ذکر نمود، توزیع یکنواخت جریان، بین آندها و کاتد (میلگرد) در این نوع آرایش در آند گذاری است. برخلاف انتظار با افزایش تعداد آندها، چگالی جریان کاهش پیدا نکرده، که به دلیل کوچک شدن آندها می‌باشد. البته در قالب‌های چند

۲۰۰۰ ساعت، با نوساناتی اندک به حالت پایدار رسیده است. در مقایسه با قالب عمودی دو آندی، هم‌چگالی جریان اولیه و هم‌چگالی جریان در زمان پایداری سیستم بیشتر بوده است که به دلیل فاصله بیشتر آند مرکزی تا میلگردها می‌باشد. در قالب بتنی عمودی با چهار آند در گوشه‌ها (V_4^*)، اثری از خوردگی در میلگردها مشاهده نشد. در شکل ۷- (ج) منحنی چگالی جریان این قالب نشان داده شده است. بررسی دقیق‌تر منحنی، مؤید این است که چگالی جریان ابتدایی بسیار بالا است، و در ۲۰۰ ساعت ابتدایی آزمایش، شیب نمودار کاهش شدید داشته است، تا حدود ۱۰۰۰ ساعت اولیه چگالی جریان بالاتر از 50 mA/mm^2 است. و از حدود ۳۰۰۰ ساعت به بعد حالت پایدار ایجاد شده است. در قالب بتنی چهار آندی عمودی در وسط اضلاع با میلگردهای عمودی (V_4^*) میلگردها، به‌خوبی در مقابل خوردگی محافظت شده بودند. از منحنی تغییرات چگالی جریان شکل ۸ مشخص می‌شود که در ابتدا چگالی جریان بالایی نیاز بود، با گذشت زمان و برقراری تعادل یونی، در ۲۰۰ ساعت اولیه، شیب نمودار منحنی کاهش یافته، علیرغم کاهش شدید شیب منحنی، تا حدود ۱۰۰۰ ساعت، چگالی جریان بالا است و در محدوده زمانی ۲۳۰۰ ساعت، سیستم به پایداری می‌رسد. که در مقایسه با قالب عمودی چهار آند در گوشه، چگالی جریان بیشتری نیاز بوده است که دلیل آن را می‌توان دور شدن آند از میلگرد دانست.



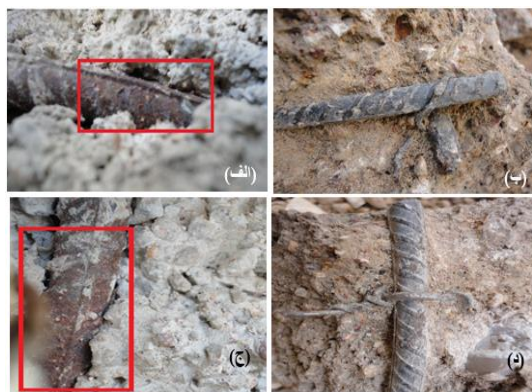
شکل ۸. تغییرات چگالی جریان در قالب چهار آند در وسط اضلاع قالب با میلگردهای عمودی

آندی با چگالی جریان اولیه بالا، حفاظت بهتری صورت گرفته بود.



شکل ۱۰- چگالی جریان در ابتدا و انتهای آزمایش قالب‌های با میلگرد عمودی (ستون تیره رنگ: چگالی جریان اولیه و ستون با رنگ روشن: چگالی جریان نهایی)

بررسی‌های ظاهری که پس از تخریب بتن‌ها در انتها آزمایش انجام شد تایید کننده نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری‌های چگالی جریان می‌باشد. شکل ۱۱، میزان خوردگی در قالب‌های حفاظت نشده و تاثیر حفاظت کاتدی را در قالب‌های حفاظت شده نشان می‌دهد.

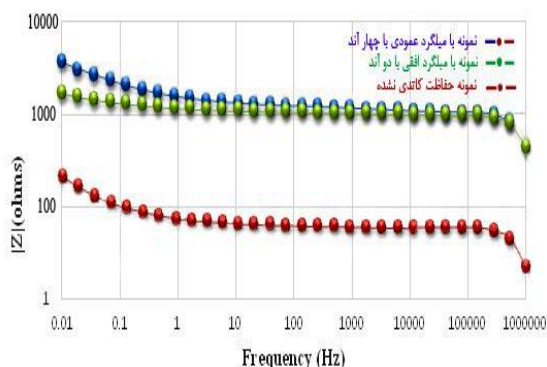


شکل ۱۱. بررسی خوردگی میلگردها پس از تخریب بتن، (الف) قالب افقی حفاظت نشده (ب) قالب افقی حفاظت شده با یک آند (ج) قالب عمودی حفاظت نشده (د) قالب عمودی حفاظت شده با دو آند

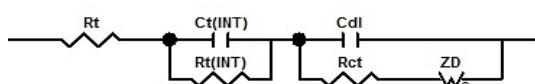
۳-۳- بررسی و تحلیل نتایج آزمایش امپدانس

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌های حفاظت کاتدی مشخص شد که کمترین میزان چگالی جریان در بین قالب‌ها

با میلگرد افقی مربوط به قالب بتنی با چهار آند در گوشه و همچنین در بین قالب‌ها با میلگرد عمودی مربوط به قالب با دو آند در گوشه می‌باشد. به همین جهت در آزمایش امپدانس این دو قالب با قالب بتنی که حفاظت کاتدی نشده بود مورد مقایسه قرار گرفتند. شکل ۱۲ نمودار نایکویست را پس از اتمام حفاظت کاتدی نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود طیف امپدانس نمونه‌های بتنی شامل دو ناحیه فرکانس پایین و فرکانس بالا است. طیف فرکانس بالا مرتبط با ساختار و خواص بتن و طیف فرکانس پایین مرتبط با خوردگی در سطح مشترک میلگرد با نمونه بتنی و خوردگی میلگرد می‌باشد [۲۰ - ۱۸]. منحنی امپدانس نمونه حفاظت کاتدی نشده دارای قوس فرکانس پایین کوچک‌تری در مقایسه با سایر نمونه‌های بتنی دیگر است که علت را می‌توان خوردگی بالای این میلگردها در طی آزمایش در مقایسه با نمونه‌های حفاظت کاتدی شده دانست. همچنین همان طوری که مشاهده می‌شود از دو قالب میلگرد افقی و عمودی حفاظت کاتدی شده، قالب میلگرد عمودی با چهار آند در گوشه، دارای قطر نمودار نایکویست بیشتری نسبت به دو نمونه دیگر می‌باشد. که می‌توان نتیجه گرفت که، نمونه بتنی با میلگرد عمودی با چهار آند در گوشه، دارای بیشترین مقاومت پلاریزاسیون و نمونه بتنی حفاظت کاتدی نشده، دارای کمترین مقاومت پلاریزاسیون می‌باشد. که نشان‌دهنده عملکرد مناسب سیستم حفاظت کاتدی در این نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشد. از طرف دیگر با توجه به نمودار نایکویست مشخص می‌شود که در محدوده فرکانس‌های پایین، پدیده واربرگ پدیده غالب است که آشکار شدن این پدیده در این محدوده از فرکانس نشان‌دهنده فرآیند خوردگی نفوذی می‌باشد که می‌توان نتیجه گرفت که نفوذ یون‌های خورنده نظیر یون کلر و نفوذ



شکل ۱۳. نمودار بد مقداری نمونه‌های با میل گرد افقی، عمودی و حفاظت کاتدی نشده



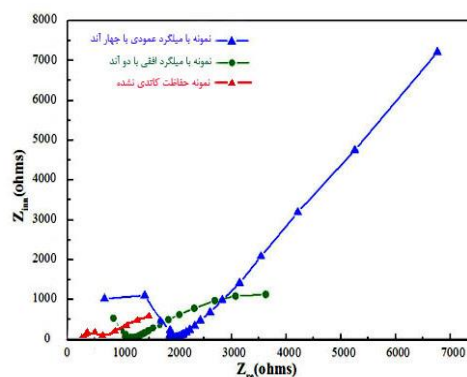
شکل ۱۴. مدار معادل با خوردگی در بتن مسلح

جدول ۲ مقادیر اندازه‌گیری شده R_c نشان می‌دهد همان‌طوری که مشاهده می‌شود بیشترین مقدار R_c مربوط به میل گرد عمودی با چهار آند در گوشه می‌باشد که تایید کننده نتایج به دست آمده از آزمایش‌های قبلی می‌باشد و نشان دهنده این موضوع است که بهترین آرایش قرار گرفتن آنها نسبت به میل گردها آرایش عمودی با چهار آند در گوشه می‌باشد.

جدول ۲. نتایج مقادیر R_c به دست آمده از آزمایش امدانس

نمونه	میلگرد عمودی با چهار آند	میلگرد افقی با دو آند	حفاظت کاتدی نشده
R_c (KΩ)	۱/۹۴۰	۱/۱۱۳	۷/۹۴

اکسیژن نقش اساسی را در فرآیند خوردگی بازی می‌کنند. به منظور بررسی دقیق تر طیف بد مقداری، در شکل ۱۳ نشان داده است. با توجه به نمودار بد در فرکانس بالا و نزدیک شدن به زاویه منفی چهل و پنج درجه می‌توان نتیجه گرفت که در مدار معادل بایستی از جزء فاز ثابت یا constant phase elements در مدار استفاده شود (مدار رندلز) به همین جهت بهترین مدار معادلی که می‌توان در نظر گرفت به صورت شکل ۱۴ می‌باشد. همچنین در فرکانس‌های پایین تر شیب به سمت صفر میل می‌کند، که نشان‌دهنده این است که در این محدوده از فرکانس مکانیزم غالب، مقاومت در برابر فرآیند انتقال بار است. بخش سمت راست منحنی نایکویست ناحیه کنترل نفوذی و سمت چپ آن ناحیه کنترل سینتیکی است، با توجه به اینکه در منحنی نایکویست فرکانس‌های بالا قابل مشاهده نیستند لذا از R_c در تفسیر نتایج بتن استفاده می‌شود. R_c مقاومت بتن برابر با مجموع مقاومت فازهای جامد و مایع بتن $R_t(S+L)$ و مقاومت فصل مشترک فازهای جامد و مایع $R_t(INT)$ است. R_{ct} مقاومت بتن، $C_t(INT)$ و C_{dl} به ترتیب ظرفیت خازنی کل فصل مشترک‌های جامد و مایع و ظرفیت خازنی لایه میان میل گرد و بتن و Z_D امدانس نفوذی یا امدانس واربرگ می‌باشد [۲۰ - ۱۸].



شکل ۱۲. نمودار نایکویست نمونه‌های با میلگرد افقی، عمودی و حفاظت کاتدی نشده

نتیجه گیری

- با بررسی های ظاهری انجام شده مشخص گردید که سیستم حفاظت کاتدی، به خوبی از خوردگی میلگردها، جلوگیری کرد. و کارایی سیستم حفاظت کاتدی اثبات گردید. همچنین با توجه به نمودارهای چگالی جریان، مشخص شد که توزیع جریان اعمالی در سیستم چند آندی با سطح یکسان، بهتر از تک آندی است و حفاظت بهتری از میلگردها، صورت می گیرد.

- میزان چگالی جریان، در قالب ها با میلگرد افقی کمتر از قالب ها با میلگرد عمودی بود. دلیل این امر شکل هندسی آندها می باشد. کمترین چگالی جریان اعمالی قالب های میلگرد افقی، مربوط به چهار آند در گوشه ها بود. و در مقایسه با قالب افقی چهار آند در وسط، علیرغم تعداد آند مساوی، میزان چگالی جریان در حدود نصف است، که به خاطر نزدیکی آندها به دو میلگرد در گوشه ها بود و باعث توزیع بهتر جریان می شود.

- کمترین چگالی جریان اعمالی، در بین قالب های با میلگرد عمودی، قالب دو آندی بود. که در مقایسه با تک آند، چگالی جریان کاهش پیدا کرد. که بیانگر کارایی سیستم حفاظت کاتدی با تعداد آند بیشتر و توزیع مناسب تر است. بیشترین چگالی جریان اعمالی، مربوط به قالب میلگرد عمودی چهار آندی بود. که علت را می توان: فاصله نامناسب و دوری آندها با میلگردها دانست.

- کمترین نوسان چگالی جریان در بین کل قالب ها، در قالب ها با میلگرد افقی چهار آندی بود و همچنین در بین قالب های عمودی، در قالب دو آندی بود که نمودار پس از پایداری چگالی جریان، تقریباً به یک خط با شیب صفر تبدیل شد.

مراجع

- [۱] حسن نوری، نقدعلی علوی فرد، عبدالله افشار، بررسی خوردگی بتن پوزولانی توسط آزمون تسریع شده خوردگی، فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی، شماره ۱۵، ۱۳۹۶، شماره صفحه ۳۵-۲۱.
- [2] F. Wang, J. xu, Y. Xu, L. Jiang, G. Ma. A comparative investigation on cathodic protections of three sacrificial anodes on chloride-contaminated reinforce concrete, Construction and building materials, Vol. 246, 2020, Pp1-10.
- [3] J.Xu, W. Yao. Electrochemical studies on the performance of conductive overlay material in cathodic protection of reinforced concrete, Construction and Building Material, Vol. 25, 2011, Pp 2655-2662.
- [4] A. Goyal, E. K. Olorunnipa, H. S. Pouya, E. Ganjian, A. O. Olubanaw, Potential and current distribution across different layers of reinforcement in reinforced concrete cathodic protection system- A numerical study, Construction and Building Material, Vol. 262, 2020, Pp1-10.
- [5] G .T Parthiban, T. Parthiban, R. Saraswathy, V. Palanismwamy, N. Sivan, Cathodic protection of steel in concrete using magnesium alloy anode, Corrosion Science, 2008, Vol. 50. Pp 3329-3335.
- [۶] علی فاتحی، عبدالحمید اسلامی، محمدعلی گلغذار، امین کاویان، سید داوود طاووسی، کیوان ریسی، بررسی تاثیر میزان حفاظت کاتدی بر خوردگی فولاد API X52 در زیر پوشش جدا شده، فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی، (پیاپی ۲۱- سال ششم) ۱۳۹۵، شماره صفحه ۶۵-۵۵.

- [7] C.Christodoulou, G.Glass ,J.Webb ,S.Austin, C.Goodier, Assessing the long term benefits of Impressed Current Cathodic Protection, Corrosion Science, Vol. 52, 2010, Pp 2671-2679.
- [8] K. Wilson, M. Jawed, V. Ngala, The selection and use of cathodic protection system for the repair of reinforced concrete structures, Construction and Building Material, Vol. 39, 2013, Pp 19-25.
- [9] J. Xu, W. Yao, Current distribution in reinforced concrete cathodic protection system with conductive mortar overlay anode, Construction and building materials, Vol. 23, 2009, Pp 2220-2226.
- [10] G. Qiao, B. Guo, J. Ou, F. Xu, Z. Li, Numerical optimization of an impressed current cathodic protection system for reinforced concrete structures. Construction and Building Materials, Vol. 119, 2016, Pp 260-267.
- [11] M. S. Anwar, B. Sujitha, R.vedalakshmi. Light-weight cementations conductive anode for impressed current cathodic protection of steel reinforced concrete application, Construction and Building Material, Vol. 71, 2014, Pp 167-180.
- [12] W. Guo, J. Hu, Y. Ma, H. Huang, S. Yin, J. Wei, The application of novel lightweight functional aggregates on the mitigation of acidification damage in the external anode mortar during cathodic protection for reinforced concrete, Corrosion Science, Vol.165, 2020, Pp 1-8.
- [13] J. C. Calero, M.A. Climent Liorca, P. G. Terradillos, Influence of different ways of chloride contamination on the efficiency of cathodic protection applied on structural concrete elements, Journal of Electrochemical Chemistry, Vol. 793, 2017, Pp. 8-17.
- [14] A. Goyal, H. S. Pouya, E. Ganjian, Performance assessment of specialist conductive paint for cathodic protection of steel in reinforced concrete structure, Construction and Building Material ,Vol. 223, 2019, Pp 1083-1094.
- [15] Standard Specification for Portland Cement, ASTM C150 – 02, ASTM International, 2020.
- [16] Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete, Edit 2020, ASTM C876-91.
- [17] W. von Baekmann, H. Bohnes, G. Franke, D. Funk, C. Gey, H. Grafen, G. Heim, V. Heinzelmann, Handbook of Cathodic Protection, Gulf Professional Publishing, Elsevier Science, 1997, Pp 427-439.
- [18] D.V. Ribeiro, J.C. Abrantes, Application of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) to monitor the corrosion of reinforced concrete: A new approach, Construction and Building Materials, Vol.111 (2016), Pp. 98–104.
- [19] A.S. Castela, B. Sena da Fonseca, R.G. Duarte, R. Neves, M.F. Montemor, Influence of Unsupported Concrete Media in Corrosion Assessment for Steel Reinforcing Concrete by Electrochemical Impedance Spectroscopy, Electrochimica Acta, Vol.124, (2014), Pp.52–60.
- [20] G.Muazzam, S. R. Kahraman, A.Nasser, C. Alnuaimi, B. Gencturk, W. Alnahhal, M. Dawood, A. Belarbi, Electrochemical behavior of mild and corrosion resistant concrete reinforcing steels, Construction and Building Materials, Vol.232, (2020), Pp 1-5.

