

ساخت، مطالعه و مدل سازی سل پلاریزاسیون (ایزولاتور) مقرون به صرفه حفاظت کاتدی با پوشش دهی الکتروشیمیایی نیکل روی فولاد نرم

بتول عزیزی^۱، ایرج احدزاده^{۲*}

^۱ کارشناس، آزمایشگاه مرکزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۲ استادیار، گروه شیمی فیزیک، دانشکده شیمی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

* نویسنده مسئول: ahadzadeh@tabrizu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۳۰

چکیده

برای ایمنی سیستم های حفاظت کاتدی در جلوگیری از خوردگی خطوط لوله نفت و گاز از سل های پلاریزاسیون استفاده می شود که در بعضی از نقاط به خاطر رعد و برق و ولتاژ بالا می تواند ولتاژهای بالاتر از حد مجاز را ارت کند. این سل های پلاریزاسیون مایع از صفحات نیکلی تشکیل شده اند که گران قیمت هستند. برای این منظور در این مطالعه از فولاد نرم پوشش داده شده با نیکل به روش الکتروشیمیایی استفاده شد که خواص شیمیایی آن مانند صفحات نیکلی بود و می تواند در ولتاژهای بالاتر $1 \pm 65V$ مستقل از جریان رفتار کرده و جریان های AC را نیز عبور دهد. با توجه رفتار I-V بدست آمده مدار معادل مشابه با مدار پلاریزاسیون جامد بدست آمد و نشان داد که پوشش نیکل جایگزین مناسبی برای صفحات نیکلی در ساخت سل های پلاریزاسیون می باشد.

کلیدواژه: سل پلاریزاسیون، ایزولاتور کاتدی، خوردگی، حفاظت کاتدی، پوشش نیکل

Construction, Study and Modeling of Cost-Effective Cathodic Protection Polarization Cell (Isolator) by Nickel Electroplating of Mild Steel

B. Azizi ¹, I. Ahadzadeh ^{2*}

¹ Technician, Central Laboratory, University of Tabriz, Tabriz, Iran

² Assistant Professor, Department of Physical Chemistry, University of Tabriz, Tabriz, Iran

* **Corresponding Author:** ahadzadeh@tabrizu.ac.ir

Submission: 2022 , 04 , 06 **Acceptance:** 2023, 02 , 19

Abstract

To protect the prevent cathodic protection systems in of oil and gas pipelines corrosion prevention, polarization cells are employed, which in some conditions due to lightning and high voltage can ground voltages above the allowable limit. These liquid polarization cells are made of nickel plates which are expensive. For this purpose, in this study, electrochemical nickel-plated mild steel was used, whose chemical properties were similar to nickel plates and can act independently of currents at higher voltages of 1.65 V and also pass AC currents. According to the obtained I-V behavior, an equivalent circuit similar to the solid polarization circuit was obtained and showed that the nickel coating is a suitable alternative to nickel plates in the construction of polarization cells.

Keywords: Polarization cell, Cathodic isolator, Corrosion, Cathodic protection, Nickel plating

۱- مقدمه

خوردگی فلزات انواع مختلفی دارد و با نام های گوناگون مانند اکسیداسیون، زنگ زدگی، عملکرد شیمیایی و ... بیان می شود. صرف نظر از اینکه عامل تمام خوردگی ها شارش جریان الکتریکی است، از روش های مختلفی برای توقف خوردگی یا تلاش برای جلوگیری از آن استفاده می شود. این موارد عبارتند از عملیات شیمیایی، پوشش ها و جریان الکتریکی یا همان حفاظت کاتدی. جریان حفاظتی مناسب می تواند عملکرد محیط خورنده را روی سطح فلز محافظت شده تا حد بسیار زیادی متوقف کند. با این حال، حفاظت کاتدی ممکن است در برخی از محیط ها عملی نباشد. از روش حفاظت کاتدی به طور گسترده ای برای محافظت سازه ها در برابر خوردگی استفاده می شود [۱]. در حقیقت حفاظت کاتدی یک فرآیند الکتروشیمیایی است که با اعمال جریان مستقیم به فلز، جریان های خوردگی را کند یا متوقف می کند. اگر حفاظت کاتدی به درستی اعمال شود، واکنش خوردگی را متوقف می کند تا از یکپارچگی فلز محافظت کند. حفاظت کاتدی با قرار دادن یک آند فداشونده یا آند بی اثر (دستگاه های اعمال جریان خارجی) در یک الکترولیت برای تکمیل یک مدار الکتریکی عمل می کند. جریان الکتریکی از آند از طریق الکترولیت به سطح سازه می گذرد. گونه های ایجادکننده خوردگی به سمت آند حرکت می کنند تا از خوردگی بیشتر سازه جلوگیری کنند. گاهی اوقات سیستم تحت حفاظت کاتدی را به دلیل احتمال اصابت صاعقه و یا اتصال کوتاه تجهیزاتی مانند پمپ ها و تانک ها و ... ارت می کنند [۲]. هنگامی که جریان حفاظت از آند به سازه تحت حفاظت (کاتد در مدار) جریان می یابد، پتانسیل الکتریکی آن سازه به مقادیر منفی تر تغییر می کند که این تغییر معمولاً برحسب mV اندازه گیری می شود. که پلاریزه شدن (قطبش) نیز نامیده می شود. مقدار پلاریزاسیون معیاری از جریان حفاظت کاتدی است و هنگامی که پلاریزاسیون کافی باشد، سازه از نظر کاتدی محافظت شده تلقی می شود. هنگامی که جریان حفاظت کاتدی از آند به سازه ای که به صورت کاتدی محافظت می شود قطع شود، سازه پلاریزه شده شروع به دپلاریزه شدن (غیرقطبش) می کند. نرخ

دپلاریزاسیون بسته به ساختار و محیط می تواند مقادیر متفاوتی باشد [۳].

برای جداسازی سیستم حفاظت کاتدی از سیستم ارت از سل های (سلول های) پلاریزاسیون (PC) استفاده می شود، که اجازه عبور به جریان های اتصال کوتاه AC جهت ارتینگ می دهد ولی جلوی جریان های DC حفاظت کاتدی را می گیرد و این جریان ها را بلوکه می کند. استفاده از سیستم های پلاریزاسیون علاوه بر حفاظت از کشتی ها و چاه های نفت، یک عمل رایج در خطوط لوله نفت و گاز است. به دلیل ماهیت خطوط لوله، این خطوط از شرایط مختلف زمین عبور می کنند و در این مسیر وظیفه سل های پلاریزاسیون تخلیه ولتاژهای القایی به زمین است که این کار با قرار دادن چندین سل پلاریزه در طول خطوط انتقال نفت و گاز تحقق می یابد [۴ و ۵].

حفاظت کاتدی لوله های مدفون در حال حاضر روشی است که کارایی اطمینان بخش آن برای جلوگیری از خوردگی اثبات شده است. با این حال، نقطه ضعف اساسی این روش حفاظت آن است که هنگام اتصال مستقیم به زمین با سیستم ارتینگ برای محدود کردن ولتاژهای خطرناک در هنگام خطا جریان مستقیم زیادی برای حفظ پتانسیل لازم روی پوشش خط لوله مورد نیاز است. هنگامی که لوله ها ایزوله می شود، جریان های اتصال کوتاه می تواند به شدت به تاسیسات حفاظت کاتدی آسیب برساند [۶]. برای رفع این مشکل، از سلول های الکترولیتی به نام سل های پلاریزاسیون استفاده می شود. این روش اقتصادی ترین روشی است که جریان اتصال کوتاه را از لوله به زمین انتقال می دهند [۷، ۸].

ولتاژ ناشی از خط لوله و اثر تداخل با مکانیسم های مختلفی تعریف می شود، سه مکانیسم کوپلینگ القایی، خازنی و رسانش اهمی در این مورد وجود دارند. مکانیسم اول این است که ولتاژ AC توسط میدان الکتریکی القا می شود [۹]. در شرایط عادی مکانیزم القایی می تواند تأثیر شدیدی بر روی خط لوله ایجاد کند. اثر القایی قوی ترین مکانیسمی است که میدان مغناطیسی تولید شده توسط خط برق باعث جفت شدن القایی می شود مانند خطوط برق فشار قوی [۱۰]. این مکانیسم روی خط لوله در

مورد شرایط خطا یا خطوط لوله مدفون در یک سطح معین تأثیر نمی گذارد. کوپلینگ خازنی، در فرکانس برق شهری (۵۰ یا ۶۰ هرتز)، فقط در خطوط لوله هوایی ظاهر می شود [۱۱ و ۱۲]. مکانیسم نهایی کوپلینگ رسانش است که تنها در صورت بروز خطای زمین در خط هوایی اتفاق می افتد. مکانیسم کوپلینگ رسانش یک رویداد نادر است و تنها کسری از ثانیه طول می کشد. در مقابل، خوردگی AC یک "اثر بلندمدت" است، بنابراین تأثیر مکانیزم رسانش را می توان نادیده گرفت. در نتیجه، مکانیزم القایی تنها مورد در گیر در پدیده خوردگی AC است [۱۳].

ابزار و سیستم هایی که در سل های پلاریزاسیون مورد استفاده قرار می گیرد در برابر شکل موج DC ایجاد شده توسط سیستم حفاظت کاتدی عایق است و در عین حال در برابر شکل موج AC و گذرا هادی بوده، لذا ضمن اینکه از هدر رفتن جریان DC حفاظت کاتدی جلوگیری می نماید و مشکلی برای اتصال تجهیزات به سیستم ارت به وجود نمی آورد.

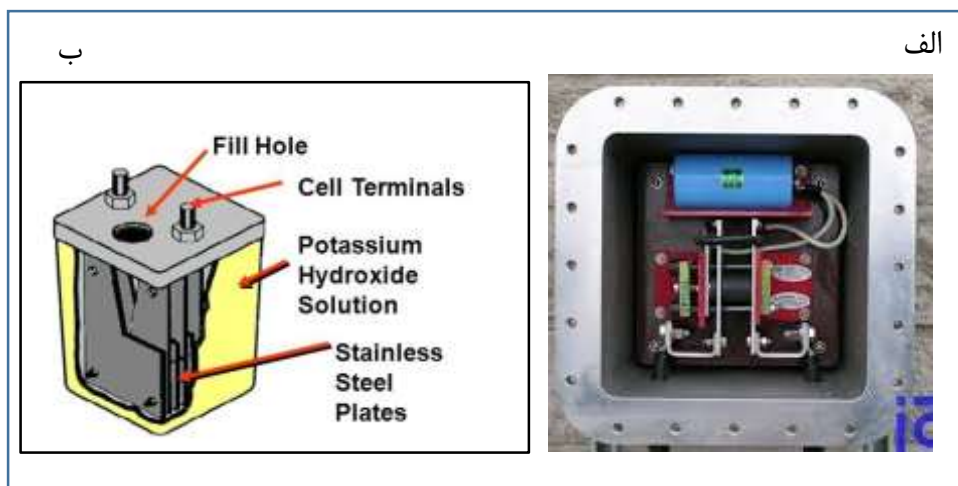
وظیفه اصلی این سل ها جلوگیری از عبور جریان کاتدی به سیستم ارتینگ می باشد. عملکرد این تجهیز به این صورت است که تا ولتاژ حدود $1/5V$ - الی $1/5V$ + در برابر عبور جریان از سیستم حفاظت کاتدی به سیستم ارتینگ ایزوله بوده و در صورت بروز خطا و مواردی مانند اصابت رعد و برق، جریان اتصال کوتاه داخلی و بر روی سازه تحت حفاظت مسیر جریان به سیستم ارتینگ را برقرار می نماید. این سل های پلاریزه به صورت سری در مسیر سازه تحت حفاظت و سیستم ارتینگ و یا به صورت موازی بین خط لوله و زمین نصب می شود.

این سل ها بدون آسیب دیدن می توانند ده کیلو آمپر را مدیریت کنند و ولتاژهای AC را به زمین منتقل کنند و ولتاژهای DC را مسدود کنند. سلول های پلاریزاسیون به دو صورت جامد و مایع هستند هدف اصلی این سل ها کاهش ولتاژ القایی AC

مانند یک شیر اطمینان و کلید الکتروشیمیایی و انتقال آن به زمین می باشد. سلول های پلاریزاسیون جامد از دهه ۱۹۸۰ به دلیل تعمیر و نگهداری مایع سل های مایع رواج یافتند چون مایعات تبخیر می شدند یا به جوش می آمدند و یک مدار باز نامطلوب ایجاد می شود.

در حقیقت سلول پلاریزاسیون هیدروکسید پتاسیم (KOH-PC) یک شیر اطمینان الکتروشیمیایی است که به عنوان نقطه اتصال زمین عمل می کند. بنابراین، وظیفه این سلول قطبی تخلیه ولتاژهای شدید متناوب القایی به زمین است. بنابراین، عملکرد این سلول پلاریزاسیون، عبوردهی ولتاژهای شدید متناوب القایی به زمین است. یکی از ترمینال های این سل به خط لوله و ترمینال دیگر به زمین متصل است. برای فرق گذاشتن بین ترمینال ها، ترمینال خط لوله را ترمینال بالایی و ترمینال زمین را ترمینال پایینی می نامند. با این حال، سلول اجازه می دهد تا جریان متناوب به سرعت تخلیه شود در حالی که عبور جریان مستقیم را مسدود می کند تا از عملکرد مطلوب حفاظت کاتدی اطمینان حاصل شود. یک KOH-PC از چندین جفت صفحات فولادی ضدزنگ یا نیکل تشکیل شده است که در یک محلول الکترولیت KOH ۳۰ درصد وزنی غوطه ور شده اند. این غلظت مسیر هادی با مقاومت بسیار پایین و سطح ایمنی در برابر خوردگی را برای فولاد یا نیکل فراهم می کند. این صفحات به صورت تو در تو چیده شده اند. به عبارت دیگر، فواصل جدایی بین صفحات وجود دارد و هر صفحه ترمینال بالایی یک صفحه ترمینال پایینی و غیره دنبال می شود. شکل (۱) شماتیکی از این سل پلاریزاسیون را نشان می دهد [۱۴].

سل پلاریزاسیون مایع شامل یک ظرف پلاستیکی مقاوم در برابر اسید است که با محلولی از هیدروکسید پتاسیم (الکترولیت) پر شده است. دو صفحه فلزی متصل به موازات در الکترولیت غوطه ور می شوند.



شکل ۱- الف) اجزا داخلی سل پلاریزاسیون کاتدی مایع ب) اجزا داخل سل پلاریزاسیون حالت جامد [14].

سانتی گراد می باشد و مورگان در این تحقیق سلی ارائه داده است که مقاومت سلول با کاهش فاصله بین الکترودها، افزایش قطر لوله یا افزایش غلظت کاهش یابد [۱۷].

نتایج تحقیقی که در سال ۲۰۲۲ برای مقایسه ی بین سل های جامد و مایع انجام شد، نشان داد تغییرات در تعداد و پیکربندی سل های پلاریزاسیون حالت جامد بر روی ولتاژ AC و عملکرد DC حفاظت کاتدی ضروری است و همچنین نشان دادند برای عملکرد بهتر در حفاظت کاتدی با استفاده از سل های پلاریزاسیون بهینه سازی هر دو سل جامد و مایع ضروری است. برای به دست آوردن ولتاژهای بالاتر، بیش از یک سلول باید به صورت سری وصل شود در حالی که برای به دست آوردن جریان های بالاتر باید به صورت موازی وصل شوند [۱۸].

هدف از انجام مطالعه حاضر ساخت سل پلاریزاسیون KOH با استفاده از پوشش نیکل روی صفحات فولاد نرم به دلیل گران قیمت بودن صفحات نیکلی و ایجاد یک سل پلاریزاسیون با استفاده از فولاد نرم با پوشش نیکل و مقایسه عملکرد آن با سل مایع KOH و مدل سازی رفتار الکتروشیمیایی آن مطابق با مدار معادل یک سل پلاریزاسیون حالت جامد است.

۲- مواد و روش ها

ابتدا دو قطعه فولاد نرم در ابعاد $2/7 \times 3/0 \text{ cm}^2$ برش داده شد بدین ترتیب دو قطعه همسان آماده شد. سپس برای تمیزکاری و سمباده زنی ابتدا کاغذهای سمباده آلومینا با نمره های ۴۰۰،

گابالوای و همکاران در سال ۲۰۲۰ مطالعه ای در مورد یک مدل ریاضی جامع با استفاده از نرم افزار مطلب ریاضی برای خطوط لوله و خطوط برق داشته اند که نتایج نشان دهنده پروفایل های ولتاژ AC القایی در طول خط لوله است، حفاظت کاتدی برای خط لوله با استفاده از سل های پلاریزاسیون KOH به حداقل رسیده و ضرورت حفاظت کاتدی را در طول مسیر خط لوله را ثابت می کنند [۱۵].

اکتای اکات و اوغور فیدان در سال ۲۰۰۸ تفاوت بین سل های پلاریزه جامد و مایع را بررسی کرده ند و نشان دادند که سیستم های پلاریزه جامد از نظر ایمنی و زمان و کار به سل های مایع برتری دارند چون سل های مایع ممکن است مایع آن ها کمتر یا سرریز شود و نیاز به تعویض و نگهداری داشته باشند [۱۶]. سلول پلاریزاسیون هیدروکسید پتاسیم با الکترودهای نیکل دارای ویژگی های الکتریکی مناسب برای استفاده در یک سیستم کابلی مدفون با محافظت کاتدی است. این سل ها به آسانی قطبی می شود تا مقاومت بالایی در برابر جریان مستقیم مورد نیاز برای حفظ سیستم در پتانسیل حفاظتی نسبت به زمین ارائه دهد. مورگان در سال ۱۹۶۵ نشان داد این سل ها برای سه ثانیه می توانند ۳۰۰۰ هزار آمپر را به زمین منتقل کنند. در سل های مایع نباید زمان بیشتر از این مقدار باشد چون باعث جوشیدن مایع می شود و حداکثر دمای مجاز آن ۵۰ درجه

۱۲۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ سمباده زده شد تا سطحی صاف و عاری از هر گونه زنگ زدگی به دست آید بعد از سمباده زدن، چربی گیری و زدودن آلودگی های سطحی به وسیله شستن و غوطه ور کردن نمونه ها در محلول تولوئن داغ در دمای 60°C به مدت ده ثانیه انجام شد.

در مرحله بعد برای آماده کردن نمونه ها، قطعه های فولادی پس از اتصال سیم مسی به صورت دو الکتروود با فاصله دو میلی متر آماده شدند، برای ثابت ماندن فاصله الکتروودها در تمامی مدت آزمون ها از فیلر پلی اتیلنی استفاده شد. برای بررسی های الکتروشیمیایی و انجام آزمایش های مربوطه از دستگاه پتانسیواستات گالوانواستات SAMA500 استفاده شد. قطعات فولادی که برای آزمایش آماده شده بود در سلول الکتروشیمیایی دو الکتروودی در محلول ۳۰ درصد وزنی KOH

مانند شکل (۲) مورد بررسی قرار گرفتند. ابتدا به منظور تثبیت پتانسیل مدار باز (OCP) قطعات به مدت ۳۰۰ ثانیه در KOH غوطه ور شد تا به حالت تعادل برسند. پتانسیل OCP نسبت به یک الکتروود مرجع کالومل اشباع اندازه گیری شد و برای بررسی خواص الکتروشیمیایی این دو قطعه از اندازه گیری ولتامتری چرخه ای (CV) در حالت دو الکتروودی استفاده گردید. یعنی ترمینال الکتروود مرجع و ترمینال الکتروود کمکی (کاتتر) دستگاه پتانسیواستات به همدیگر متصل شد و اتصال حاصل به یک الکتروود و ترمینال الکتروود کار به الکتروود دیگر وصل گردید. در این آزمایش آند و کاتد هر دو الکتروودهای فولاد نرم بودند که پتانسیل بین این دو الکتروود در محدوده ۲/۵- تا ۲/۵+ با سرعت روبش 100 mV/s تغییر داده شد و جریان عبوری از الکتروودها اندازه گیری و ثبت شد



شکل ۲ - ست آپ آزمایش های الکتروشیمیایی.

مرحله بعدی پوشش الکتروشیمیایی نیکل روی نمونه های فولادی بود که از روش حمام واتس به دلیل اقتصادی و ارزان بودن استفاده شد. ابتدا مقدار ۲۵۰ ml از محلول آبکاری نیکل با مشخصات جدول (۱) را در درون ظرف شیشه ای (بشر ۵۰۰ml) برای آبکاری ریخته شد. جریان برق مستقیم DC به وسیله منبع تغذیه بین دو الکترود فلزی آند و کاتد اعمال شد. الکترود آند یک قطعه نیکل است. برای اینکه حالت رسوبی دانه ریز ایجاد شود که موجب افزایش سختی پوشش نیز می شود از چگالی جریان مناسب استفاده شد.

از قطعات پوشش نیکل توسط میکروسکوپ الکترونی FE-SEM مدل Mira3-TESCAN برای بررسی پوشش تصویربرداری SEM شد.

بعد از این مرحله قطعه های فولادی پوشش داده شده با نیکل به صورت دو الکترود با فاصله ثابت تهیه شدند و در سلول الکتروشیمیایی دو الکترودی با محلول ۳۰ درصد وزنی KOH قرار داده و با دستگاه پتانسیواستات گالوانواستات SAMA500 ولتامتری چرخه ای انجام شد ابتدا در پتانسیل مدار باز به مدت ۳۰۰ ثانیه غوطه ور شد تا به حالت تعادل برسد و پتانسیل بین این دو الکترود در محدوده ۱/۶۵- تا ۱/۶۵+ با نرخ روبش ۱۰۰ mV/s تغییر داده شد و جریان

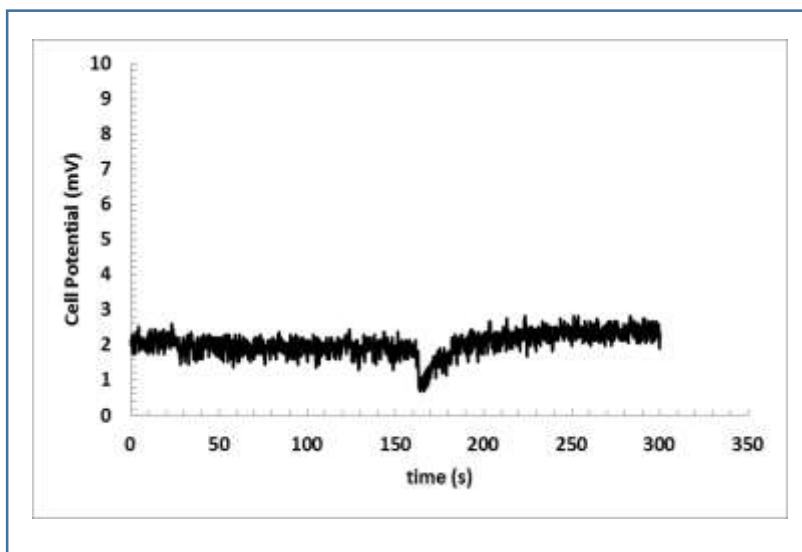
عبوری از الکترودها اندازه گیری و ثبت شد. برای شبیه سازی این آزمون ها، مدار معادل سل پلاریزاسیون در آزمایشگاه ساخته شد و از آن هم آزمون CV برای ترسیم منحنی I-V به عمل آمد تا تاییدی بر شبیه سازی و انتخاب مدار معادل به دست آمده باشد. از چهار عدد دیود تجاری یکسوساز 1N4007 و دو عدد خازن الکترولیتی 10000 میکروفارادی 50 ولتی برای ساخت این مدار شبیه سازی شده استفاده شد و آزمایش ولتامتری چرخه ای برای این مدار گرفته شد. در قسمت نتایج و بحث اشاره خواهد شد.

۳- نتایج و بحث

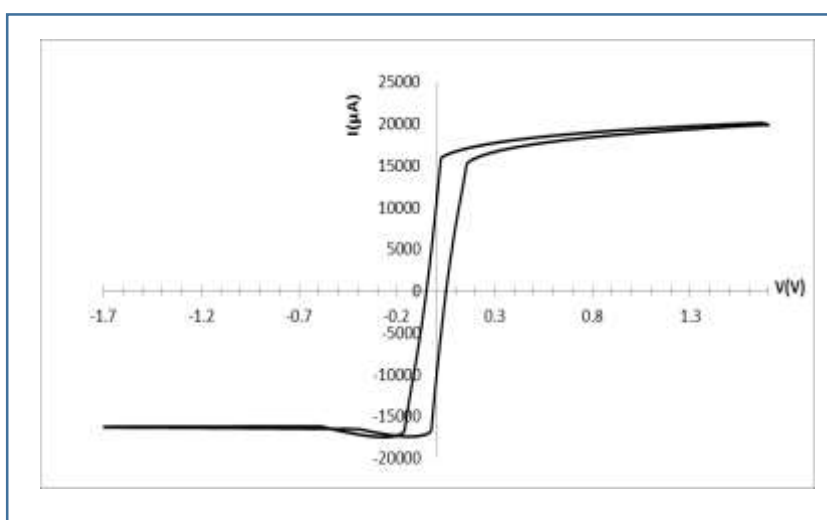
شکل (۳) تغییرات زمانی پتانسیل مدار باز (OCP) را در سل دو الکترودی فولادی در محلول ۳۰ درصد وزنی KOH را نشان می دهد که در مدت ۳۰۰ ثانیه دو الکترود نسبت به هم در حدود ۵ mV به حالت تعادل رسید و بعد از تعادل آزمون ولتامتری چرخه ای (CV) گرفته شد که نشان می دهد که ولتاژ در محدوده ۱/۷ V- تا ۱/۵ V+ مستقل از جریان می شود و سیستم مانند یک دیود عمل می کند و جریان های بین بازه این را بلاک می کند. یعنی جریان های خارج این بازه و جریان AC را رد می کند. شکل (۴) نمودار ولتامتری چرخه ای این سیستم را نشان می دهد.

جدول ۱- مشخصات محلول حمام واتس.

g/L ۳۰۰-۲۴۰	سولفات نیکل (NiSO ₄ .6H ₂ O)
g/L ۹۰-۳۰	کلرید نیکل (NiCl ₂ .6H ₂ O)
g/L ۴۰-۳۰	اسید بوریک (H ₃ BO ₃)
°C ۶۰-۴۰	دما
۴/۵-۳/۵	pH
Adm ⁻² ۷-۲	چگالی جریان
μ/h ۸۵-۲۵	نرخ ترسیب



شکل ۳ - نمودار پتانسیل مدار باز (OCP) برای الکترودهای فولاد نرم (Fe) به مدت ۳۰۰ ثانیه.



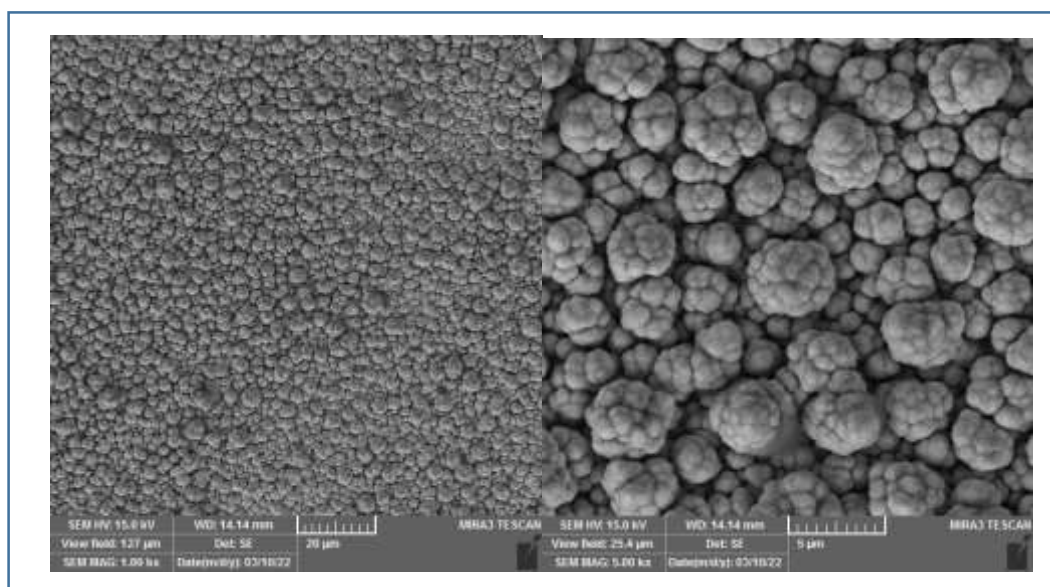
شکل ۴ - نمودار ولتامتری چرخه ای (CV) برای فولاد نرم (Fe) در محدوده پتانسیلی ۱/۷ V تا ۱/۵ V با سرعت روبش ۱۰۰ mV/s.

را محدود کنند نمونه ها با نیکل پوشش داده شد که مورفولوژی پوشش نیکل با استفاده از تصاویر SEM نشان می دهد که به صورت یک لایه یکنواخت بر روی قطعه فولادی تشکیل شده است (شکل ۵). این لایه یکنواخت بدون تخلخل می باشد که این باعث می شود به جای استفاده از صفحات گران قیمت نیکل در سل های پلاریزاسیون مایع از صفحات فولاد نرم با پوشش نیکل استفاده کرد.

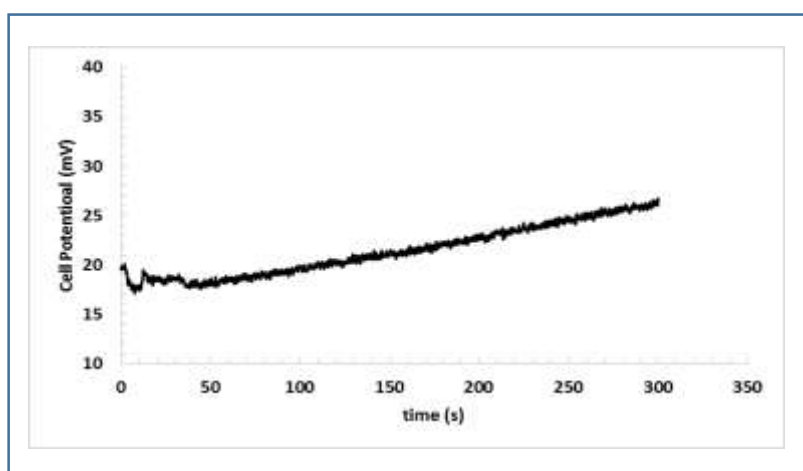
محدوده پتانسیل ۱/۷ V تا ۲/۵ V بدست آمده توسط الکترودهای فولادی در سل پلاریزاسیون برای مقاصد حفاظت کاتدی وسیع است و کارایی ایمنی آنچنانی ندارد بنابراین برای ابقا سطح حفاظت کاتدی بایستی این محدوده پتانسیل به حدود ۱/۵ V تا ۱/۵ V محدود شود. برای محدود کردن این بازه پتانسیل و امکان اینکه که صفحات فولادی به صورت یک دیود بتوانند جریان های DC

که از شکل (۷) برمی آید، ولتاژ در بازه $1/6V$ تا $1/4V$ مستقل از جریان می شود و سیستم مانند یک دیود عمل می کند و جریان های بین این بازه پتانسیل را بلوکه می کند. یعنی جریان های این بازه و جریان AC را رد می کند که این امر نشان می دهد که این سیستم می تواند اجازه عبور به جریان های اتصال کوتاه AC ارتینگ را بدهد و همچنین جریان های DC حاصل از هر گونه موارد مختل کننده را بلوکه کند. در نمودار CV رفت و برگشت رفتار خازنی برای الکترودها مشاهده می شود که این رفتار خازنی که در بازه پتانسیل $\pm 0/7V$ در شکل (۸) نشان داده شده است.

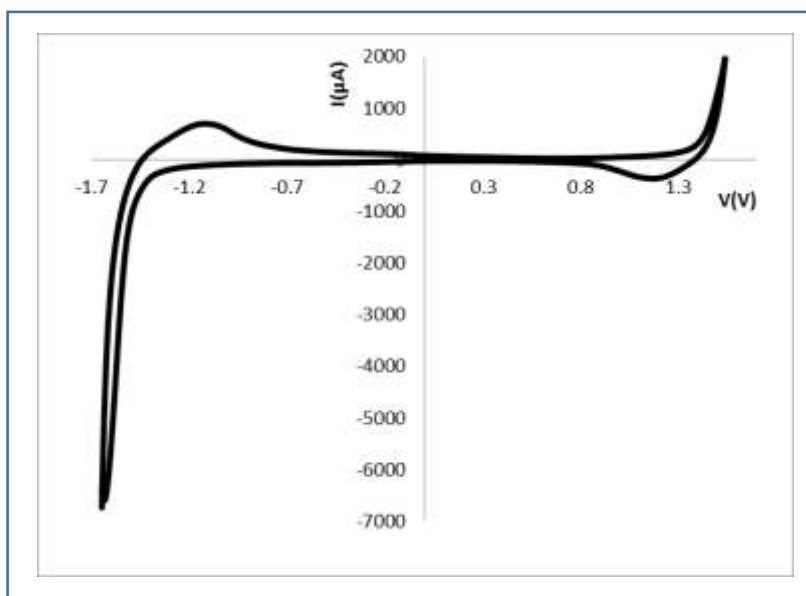
شکل (۶) منحنی پتانسیل مدار باز (OCP) را برای صفحات پوشش داده شده با نیکل را نشان می دهد. در اواخر مدت زمان غوطه وری یعنی حدود ۱۰۰ ثانیه آخر، تغییرات پتانسیل در حدود ۵ میلی ولت یا کمتر نسبت به الکتروود مرجع کالومل اشباع است. بنابراین از لحاظ عملی می توان این تغییرات را که حدود ۵۰ میکرو ولت بر ثانیه می شود، پایا فرض نمود. به عبارت دیگر در مدت ۳۰۰ ثانیه دو الکتروود نسبت به هم در حدود ۲۵ mV به حالت تعادل رسید و بعد از اینکه به تعادل رسید آزمون ولتامتری چرخه ای (CV) گرفته شد. شکل (۶) نمودار CV این سیستم را نشان می دهد همان طور



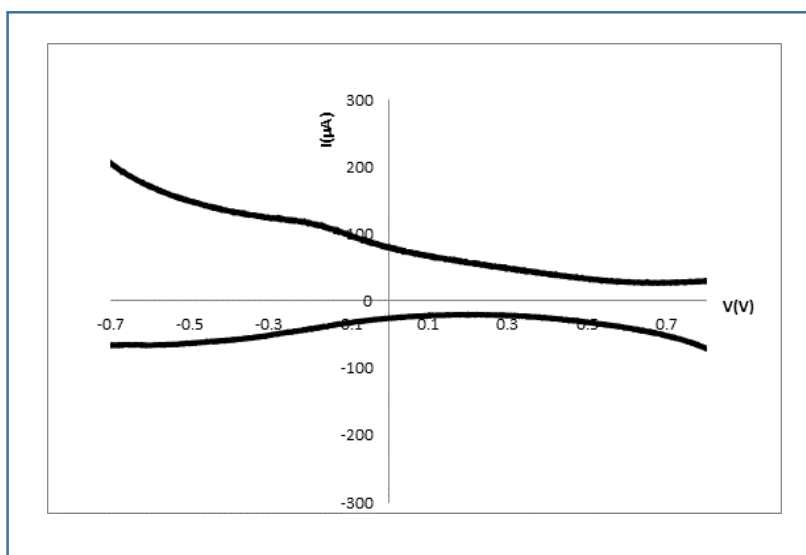
شکل ۵ - تصاویر FE-SEM پوشش نیکل.



شکل ۶ - مدار پتانسیل باز (OCP) برای الکترودهای فولادی آّبکاری شده با نیکل به مدت ۳۰۰ ثانیه.



شکل ۷ - نمودار ولتامتری چرخه‌ای (CV) نیکل در محدوده پتانسیلی $-1/65$ تا $+1/4$ V در با سرعت روبش 100 mV/S .



شکل ۸ - نمودار ولتامتری چرخه‌ای (CV) نیکل (بزرگ شده شکل ۷) در محدوده پتانسیلی $-0/7$ تا $+0/7$ V با نرخ روبش 100 mV/s .

یا به عبارت دیگر لگاریتم طبیعی جریان به ازای ولتاژ دوسر دیود در بایاس مستقیم بایستی در ولتاژهای به اندازه کافی بزرگ یک رابطه خطی نشان دهد برای این منظور در منتهی الیه ولتاژهای بسیار مثبت و بسیار منفی از رسم نمودار لگاریتم طبیعی جریان به ازای ولتاژ استفاده شد که منحنی کاملاً خطی ایجاد شد که دال بر رفتار دیودی این سل الکتروشیمیایی

برای حصول اطمینان از اینکه گنجانیدن عنصر دیود در مدار معادل مجاز است، بایستی ابتدا نشان داد که وابستگی جریان به ولتاژ در شاخه کاتدی و آنودی این سل پلاریزاسیون مشابه دیود است از روی معادله مشخص است که برای ولتاژهای به اندازه بزرگتر از آستانه شروع به هدایت کردن دیود جریان به صورت نمایی با ولتاژ اعمال شده در دو سر دیود رابطه دارد

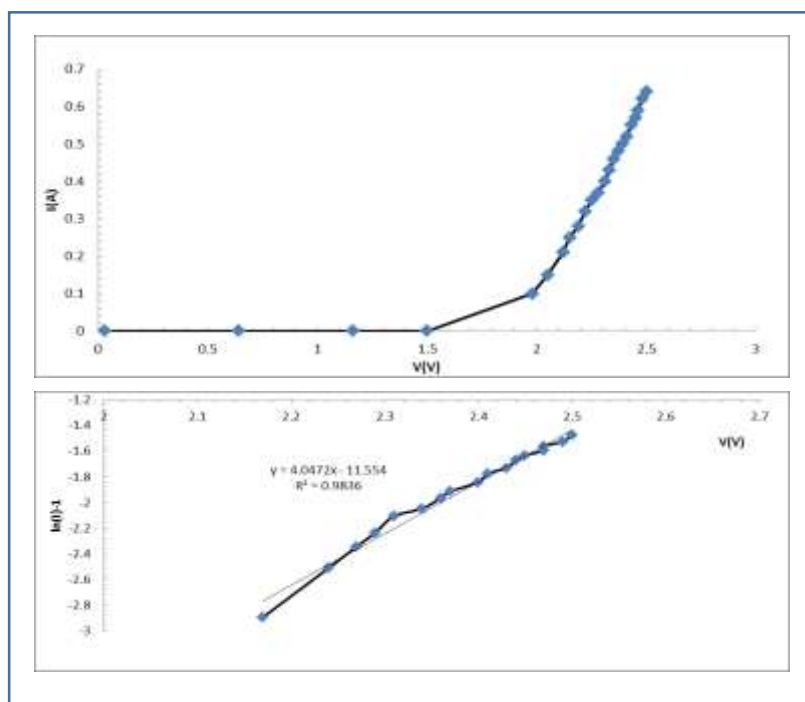
ساخته شده است (شکل ۹).

با توجه به اطلاعات بدست آمده از نمودار ولتاژمتری چرخه‌ای مدار معادلی برای نمونه‌های پوشش داده شده با نیکل مداری شامل چهار دیود که به صورت دوتایی موازی و سری که بتواند قطبیت از بین برود و جریان‌های موازی و سری را مانند همان صفحات پوشش نیکلی رد کند، و همچنین دو خازن که بتواند ولتاژهای متناوب را رد کند. خازن بدون قطبیت برای رد کردن ولتاژهای متناوب در نظر گرفته شد که از دو عدد خازن الکترولیت که برعکس بسته شده‌اند تشکیل شده است.

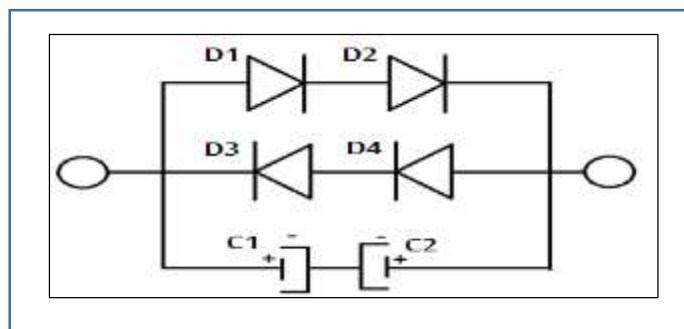
۳-۱- مدل مدار معادل الکتریکی جهت بررسی رفتار سل پلاریزاسیون

یکی از رهیافت‌های مهم و مرسوم تجزیه تحلیل داده‌های الکتروشیمیایی مخصوص منحنی‌های جریان ولتاژ (I-V) سیستم‌های الکتروشیمیایی مانند باتری‌ها، پیل‌های سوختی و ... استفاده از مفهوم مدار معادل الکتریکی (EEC) (Electrical Equivalent Circuit) است. در این رهیافت، مدار معادل مناسبی با استفاده از قطعات الکتریکی و

الکترونیکی با توجه به تصویر شیمی فیزیکی سیستم مورد بررسی طراحی می‌شود و سپس با توجه به رفتار هر قطعه، منحنی I-V کلی این مدار بدست می‌آید و این منحنی I-V با منحنی I-V سیستم الکتروشیمیایی مورد بحث متناظر ارتباط داده شده و بررسی می‌شود. لازم به ذکر است که در انتخاب قطعات مختلف و طراحی (سرهم بندی) یک مدار معادل معین بایستی نهایت دقت و احتیاط را نمود. چرا که از لحاظ نظری اثبات می‌شود که بی شمار مدار معادل معین با رعایت شروط خاصی می‌تواند با یک منحنی I-V بدست برای یک سیستم الکتروشیمیایی معین تطابق داشته باشد. بنابراین تناظر معقولی بایستی بین هر عنصر الکتریکی انتخاب شده برای طراحی مدار معادل و یک یا چند پدیده الکتروشیمیایی انجام یافته در سیستم مورد بحث وجود داشته باشد. در غیر این صورت مدار معادل صرفاً یک نمود تجربی و بی‌معنی از نظر فیزیکی برای سیستم مورد بحث خواهد بود. در مورد سل پلاریزاسیون حفاظت کاتدی ساخته، عرف بر این است که از مدار معادل نشان داده شده در شکل زیر جهت شبیه‌سازی منحنی I-V استفاده می‌شود.



شکل ۹- نمودارهای I-V و Ln I بر حسب V جهت تایید رفتار دیودی سل پلاریزاسیون نیکل.

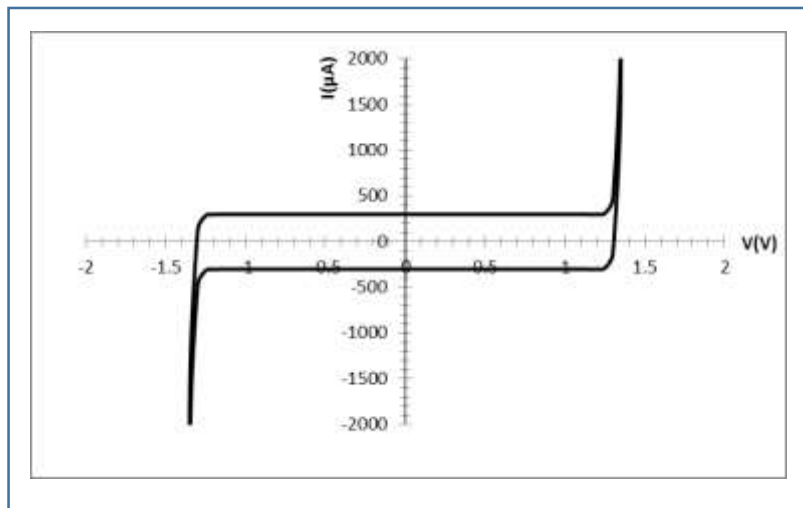


شکل ۱۰ - مدار معادل الکتریکی جهت شبیه سازی سل پلاریزاسیون.

لذا هیچ قطبیت ارجحی برای خازن های C_1 تا C_2 وجود ندارد یعنی به عبارت دیگر مجموعه سلول پلاریزاسیون به صورت یک خازن بدون قطب عمل می کند و می تواند مسیر عبور جریان AC را بدون توجه به قطبیت آن مهیا سازد. لذا در شکل (۱۰) برای مدار معادل الکتریکی سل پلاریزاسیون خازن های C_1 و C_2 به صورت پشت به پشت بسته شده اند تا یک خازن کلی C بدون قطبیت را ایجاد کنند. مسیر عبور جریان AC به زمین برای عبور دادن جریان های ناگهانی بسیار زیاد مانند آذرخش (صاعقه) و تداخل های الکترومغناطیسی مانند اثر دکل های فشار قوی و ... بایستی یک مسیر با امپدانس خیلی کوچک باشد. این امپدانس خیلی کوچک از طریق ظرفیت خازنی زیاد سل پلاریزاسیون واقعی تامین می شود. در یک سل پلاریزاسیون واقعی مساحت الکترودها بزرگ بوده و فاصله آن ها از همدیگر اندک است و یک محلول KOH غلیظ با مقاومت الکتریکی بسیار پایین مابین الکترودها قرار گرفته است.

با توجه به ظرفیت ویژه نسبتا بالای خازنی لایه دوگانه الکتریکی بین یک الکترود فلزی غوطه ور در یک محلول رسانا، انتظار ظرفیت خازنی بالا و بنابراین راکتانس خازنی بسیار پایین برای این خازن می رود که می تواند شدت جریان های AC بالایی را اصطلاحا زمین کند. در ولتاژهای DC بالاتر از $+1/4$ V و پایین تر $-1/4$ V مجموعه دیودهای D_1 - D_2 و D_3 - D_4 به ترتیب حالت هدایت به خود گرفته و شدت جریان عبوری از آن ها بطور نمایی با ولتاژ دو سر سل پلاریزاسیون افزایش می یابد. خازن C در مجموع اثر خود را به صورت یک ناحیه تقریبا مستطیلی شکل در منحنی I-V نشان می دهد که ناشی از عبور جریان ثابت از آن با تغییر ولتاژ دو سر خازن به صورت خطی با زمان است (شکل ۱۱).

در این مدار معادل هر یک از دیودهای D_1 تا D_4 بیانگر رفتار یکسوسازی سطح نیکل قرار گرفته در محلول KOH غلیظ هستند و به عبارت دیگر بیان می دارند که جریان DC کمتر از حدود $\pm 1/4$ V نمی تواند از فصل مشترک دو صفحه فولادی پوشش داده شده با نیکل غوطه ور در محلول KOH غلیظ بگذرد و این موضوع دقیقا رفتار بلوکه کننده سل پلاریزاسیون برای ولتاژهای پایین DC مورد استفاده در حفاظت کاتدی خط لوله (که عمدتا زیر حدود $\pm 1/2$ V هستند) تناظر دارد. علت استفاده از دو دیود به صورت سری و مجموعا چهار دیود به شکل ترکیبی در این مدار آنست که دیودهای معمولی سیلیکونی ولتاژ آستانه تحریک حدود ۰/۷ V را دارند و بنابراین برای شبیه سازی رفتار بلوکه کنندگی حدود $1/4$ V نیاز به سری بستن دو عدد از این دیودها است. موازی بستن دو خط دیود به صورت پلاریزاسیون معکوس امکان عبور دو طرفه جریان های با ولتاژ بیش از $\pm 1/4$ V را از خط لوله به زمین فراهم می سازد. با توجه به اینکه قطعه فولادی پوشش داده شده با نیکل در محلول KOH که به موازات هم قرار گرفته اند. ایجاد دو فصل مشترک خازنی (خازن لایه دوگانه الکتریکی) می نمایند که این دو خازن به صورت سری با هم قرار گرفته اند، انتظار می رود که از عنصرهای خازنی C_1 و C_2 به صورت سری در مدار معادل مطابق شکل (۱۰) استفاده شود. همانطور که در قسمت تجربی اشاره شده است، در مدار ساخته شده مطابق شکل (۱۰) از چهار عدد دیود تجاری یکسوساز 1N4007 و دو عدد خازن الکترولیتی 10000 میکروفارادی 50 ولتی برای بررسی رفتار جریان- ولتاژ استفاده شد. از آنجایی که سل پلاریزاسیون آرایش هندسی متقارن دارد و دو صفحه فولادی پوشش داده شده با نیکل به صورت متقارن در محلول KOH قرار گرفته اند



شکل ۱۱ - منحنی I-V مدار معادل ساخته شده.

نمایی صرف نظر کرد و بنابراین معادله دیودی به صورت زیر ساده می شود.

$$I = I_0 e^{\frac{V}{0.025}} \quad (2)$$

یا به عبارت دیگر

$$\ln(I) = \ln I_0 + \frac{V}{0.025} \quad (3)$$

یعنی لگاریتم طبیعی جریان عبوری از دیود به ازای ولتاژ دو سر آن یک خط راست با شیب $\frac{1}{0.025}$ و عرض از مبدا $\ln I_0$ خواهد داشت. جهت تحقیق این مورد، برای سل پلاریزاسیون ساخته شده در این پژوهش، منحنی $\ln I$ بر حسب V در ولتاژهای پلاریزاسیون مثبت از صفر تا حدود $1/6 V$ در شکل (۹) رسم شده اند. رابطه خطی بدست آمده از این شکل مخصوصا در محدوده ولتاژهای به اندازه کافی مثبت که به اصطلاح سل پلاریزاسیون جریان DC را زمین می کند بیانگر رفتار یکسوسازی (دیودی) و فصل مشترک غیراهمی نیکل/محلول KOH می باشد. با توجه به مساحت سطح

در توجیه رفتار دیودی مشاهده شده برای فصل مشترک الکتروود فولادی پوشش داده شده با نیکل محلول KOH غلیظ می توان اینگونه فرض کرد که الکتروود دارای پوشش نیکل در این محلول به نوعی پسو می شود و یک لایه عایق اکسید سطحی روی آن تشکیل می گردد و تا رسیدن پتانسیل الکتروود به یک سطح مشخص (در اینجا حدود $1/4 V$)، این لایه اکسیدی جریان خیلی کمی از خود عبور می دهد و بنابراین در حکم یک عایق تقریبی عمل می کند [16]. با گذشت پتانسیل از یک استانه مشخص جریان طبق معادله معروف باتلی - والمر به صورت نمایی با پتانسیل افزایش می یابد و این بسیار شبیه معادله دیودی است که در علم الکترونیک برای تقریب زدن منحنی I-V استفاده می شود. یک شکل معادله دیودی در دمای 25^0 به قرار زیر است:

$$I = I_0 (e^{\frac{V}{0.025}} - 1) \quad (1)$$

که در آن I_0 جریان نشتی دیود و V اختلاف پتانسیل دو سر دیود را نشان می دهد.

در ولتاژهای به اندازه کافی مثبت که دیود کاملا به اصطلاح هدایت می کند، می توان از مقدار عددی I در مقابل جمله

الکترودهای فولادی پوشش داده شده با نیکل در این آزمایش که برابر 16 cm^2 می باشند و نیز با استناد به شکل (۷) برای منحنی I-V گرفته شده برای سل پلاریزاسیون ساخته شده، می توان به نتایج جدول ۲ به عنوان پارامترهای عملکردی این سل پلاریزاسیون در حالت کلی رسید. بررسی تغییرات پارامترهای عملکردی این سل در دماهای مختلف و تست آن در شرایط شبیه کارکرد واقعی و تست عملکرد فرکانسی آن در آزمایشگاه در دست اجرا است.

جدول ۲ - پارامترهای عملکردی سل پلاریزاسیون.

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	DC ولتاژ بلوکه	$V \pm 1/4$
۲	DC جریان نشتی	$\text{mA/m}^2 2/25$
۳	ظرفیت خازنی	$\text{mF/m}^2 180$
۴	مقاومت ویژه اهمی الکتروولت	$\text{m}\Omega 5$

نتیجه گیری

با توجه به داده های بدست آمده از مطالعات الکتروشیمیایی و شبیه سازی رفتار پتانسیل جریان منحنی های (IV) سل و مدار معادل الکتریکی چنین نتیجه گیری می شود که می توان از ایجاد پوشش نیکل روی سوبسترای آهن نرم ارزان قیمت همان رفتار مورد انتظار از صفحات نیکل در ساخت سل پلاریزاسیون دست یافت بنابراین می توان از این روش برای ساخت سل های پلاریزاسیون با قیمت بسیار کمتر در مقایسه با نیکل و با رفتار الکتروشیمیایی مشابه و مطمئن جهت مقاصد حفاظت کاتدی خطوط لوله و ایزولاسیون خطوط لوله از زمین استفاده نمود لازم به ذکر است که مطالعه رفتار یک سلول پلاریزاسیون حالت جامد با استفاده از قطعات الکترونیکی قدرت مانند دیودهای پرتوان با جریان های گسیب بالا و نیز خازن الکترولیتی با مقادیر ظرفیت بسیار زیاد در حد چند دهم فاراد و بررسی رفتار آن مقایسه آن سلول جامد از لحاظ عملکرد واقعی محافظتی با این سلول مطالعه شده در مقاله حاضر در آزمایشگاه در دست اقدام است.

مراجع

- [1] G. Donald Fink and H. Wayne Beaty, Standard Handbook for Electrical Engineers, 13th ed. New York: McGraw Hill, 1993.
- [2] آقاجانی، عباس و ساعتچی، احمد، ۱۳۸۶، حفاظت خوردگی کف مخازن بزرگ ذخیره نفت و مایعات گازی، اولین کنفرانس لوله و صنایع وابسته، تهران، <https://civilica.com/doc/19153>
- [3] هاشمی مجد، سید علی، حفاظت کاتدیک لوله های مدفون، ویرایش دوم، مشهد، سخن گستر، ۱۳۸۶
- [4] Al-Gabalawy, M. A., Mostafa, M. A., Hamza, A. S., & Hussien, S. A. Modeling of the KOH-Polarization cells for mitigating the induced AC voltage in the metallic pipelines. Heliyon, ۲۰۲۰, 6(3), e03417.
- [5] G. Christoforidis, D. Labridis, P. Dokopoulos, Inductive interference on pipelines buried in multilayer soil due to magnetic fields from nearby faulted power lines, IEEE Trans. Electromagn C. 47 (2), 2005, Pp. 254-262.
- [6] H. Zhang, G. Karady, J. Hunt, Effect of various parameters on the inductive induced

- voltage and current on pipelines, IEEE Trans. Power Deliv. Ariz. State Univ. May, 2011, Pp, 1–7.
- [7] H.M. Ismail, S.M. Elkhodary, S.M. Mohamed, et al., Economic impact assessment technique on different mitigation methodologies of electromagnetic interference between special high voltage transmission lines& neighboring gas pipeline, Int. J. Eng. Res. Technol. 3 (9) ,2014, Pp 1419–1427.
- [8] N.M.K. Abdel-Gawad, A.Z. El Dein, M. Magdy, Mitigation of induced voltages and AC corrosion effects on buried gas pipeline near to OHTL under normal and fault conditions, Electric Power Syst. Res. 127 ,2015, Pp 297–306.
- [9] R. Bonds, The effect of overhead AC of power lines paralleling ductile iron pipelines, Ductile Iron Pipeline Research Association (DIPRA), Transactions on Power Apparatus, 1999.
- [10] G. Djogo, M.A. Salama, Calculation of inductive coupling produced from power lines into multiple pipelines and buried conductors, Electric Power Syst. Res., Elsevier 41 ,1997, Pp75–84.
- [11] R. Radwan, R. Amer, A. Emam, Combined electric and magnetic field on metallic pipelines near HV transmission lines, Cigre session ,2002, France.
- [12] M. Al-Gabalawy, Electrical Hazards on Natural Gas Metallic Pipelines Due to High Voltage Overhead Transmission Lines, Cairo University, Egypt, 2011 (M.Sc. thesis, Dept. Elect. Eng).
- [13] AS/NZS 4853: ' Electric Hazards on Metallic Pipelines, 2000.
- [14] <http://www.rustrol.com/pages/rustrol-systems-ci-rustrolcathodicisolator-ssp.aspx>, accessed on 22/01/2023.
- [15] Al-Gabalawy, M. A., Mostafa, M. A., Hamza, A. S., & Hussien, S. A. Modeling of the KOH-Polarization cells for mitigating the induced AC voltage in the metallic pipelines. Heliyon, 2020, 6(3), e03417.
- [16] FİDAN, U., & Oktay, A. K. A. T. KATODİK KORUMA İÇİN SULU-KATI DURUMLU POLARİZASYON HÜCRE TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2009, 24(4).
- [17] Morgan, V. T. Polarization cells for earthing cathodically protected cable systems. Corrosion Science, 1965, 5(3), Pp 225-237.
- [18] Mostafa, M. A., Al-Gabalawy, M., Shaalan, E. M., & Hamza, A. S. Mitigation of the AC corrosion of the metallic pipelines using the hydroxide and solid-state polarization cells; A comparative study. Electric Power Systems Research, 202, 107585, 2022.

