

شبیه‌سازی سیستم‌های حفاظت کاتدی مخزن ذخیره واحد سردکننده کمکی نیروگاه سیکل ترکیبی خیام نیشابور به روش المان محدود

علی داودی

کارترمان مهندسی مواد و متالورژی

دانشکده مهندسی

دانشگاه فردوسی مشهد

مشهد، ایران

a.davodi@um.ac.ir

منوچهر غفاریان شعاعی

واحد شیمی، آزمایشگاه

شرکت مدیریت تولید برق خیام

و

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نیشابور

نیشابور، ایران

manoochehr_ghafarian@yahoo.com

کار از محاسبه ساده خصوصیات ترموفیزیکی جریان‌ها یا حتی مواد خالص شروع شده و به طراحی کارخانه‌های کامل با در نظر گرفتن تأسیسات جانبی، خطوط لوله تأمین خوراک، یا انتقال محصول، و بررسی سیستم‌های کنترل می‌رسد. از آنجاکه این روش از محاسبات دستی ساده‌تر، سریع‌تر و دقیق‌تر است، با تکرار آن در شرایط مختلف به سهولت و با صرف زمان بسیار کمتری می‌تواند مجموعه کاملی از عملکرد فرآیند در حالت‌های مختلف را پیش‌بینی کرده و از این طریق، ضمن کاهش هزینه‌های اضافی سرمایه‌گذاری ثابت (دستگاه‌های اضافی) و کاستن از هزینه‌های عملیاتی (مصرف آب، انرژی و...)، قابلیت انعطاف بیشتری را در طرح فرایند به وجود آورده و نقطه بهینه‌ای از لحاظ هزینه‌های مالی و روانی عملیات، ایمنی، محیط‌زیست و غیره را به دست آورد.

۲. حفاظت کاتدی

۲.۱. مقدمه

از روش‌های اصلی کاهش خوردگی در سازه‌های مدفون در خاک، پوشش‌ها و حفاظت کاتدی هستند. اولین وظیفه‌ی پوشش در سازه‌هایی که به‌صورت کاتدی حفاظت می‌شوند کاهش سطح فلز در معرض قرار گرفته و در نتیجه کاهش جریانی است که برای حفاظت کاتدی آن مورد نیاز است. حفاظت کاتدی به‌عنوان مکمل، باعث تکمیل حفاظت و تأثیر ۱۰۰٪ آن می‌گردد.

چکیده- در این مقاله، به یک روش عددی جهت حل معادلات حاکم بر حفاظت کاتدی جریان اعمالی برای یک مخزن ذخیره واحد سردکننده (Auxiliary Cooling) نیروگاه سیکل ترکیبی نیشابور پرداخته شده است.

شبهه محاسبه و شبیه‌سازی بر اساس تقریب عددی به روش المان محدود (FEM) می‌باشد که توسط نرم‌افزار شبیه‌ساز COMSOL Multiphysics انجام گرفته است.

ابتدا به بررسی معادلات ریاضی و شرایط مرزی حاکم بر معادلات المان محدود خواهیم پرداخت و فرایندهای حاکم بر مسیر حل مسئله در این روش را مورد بحث قرار خواهیم داد و به چهارچوبی کلی برای تقریب عددی حل معادلات خواهیم رسید و در ادامه به تجزیه و تحلیل سیستم و تأثیر عوامل مختلف و شرایط محیطی بر حل مسئله پرداخته شده است تا بهترین نتیجه ممکن حاصل گردد.

واژه‌های کلیدی — حفاظت کاتدی؛ FEM؛ COMSOL؛

Auxiliary Cooling

۱. مقدمه

امروزه به نحو گسترده‌ای از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی در طراحی فرایند استفاده می‌شود. کاربردهای این نرم‌افزارها در این حوزه از حیث گستردگی

نظر می‌آید که این مقدار کاهش معمولاً برای حفاظت اکثر سازه‌ها کافی است.

۲.۴. انواع حفاظت کاتدی

حفاظت کاتدی به دو شیوه اعمال می‌گردد [۱]:

- جریان اعمالی (Impressed current)
- آند فدا شونده (Sacrificial anode)

۲.۵. سیستم اعمال جریان

مقدار جابه‌جایی موردنیاز در پتانسیل می‌تواند از طریق یک منبع تغذیه‌ی خارجی یا مصرف یک آند فداشونده تأمین شود. حفاظت کاتدی به وسیله جریان اعمالی در حقیقت ساخت و کنترل یک سلول خوردگی بزرگ است. سیستم اعمال جریان از یک منبع اعمال جریان که یکسو کننده نامیده می‌شود و یک آند مدفون در خاک به منظور اعمال جریان به سازه، استفاده می‌کند. در این سلول پایانه منفی جریان مستقیماً به خط لوله و پایانه مثبت به آند وصل می‌شود و در حقیقت یک مدار الکتریکی به وسیله عبور جریان توسط خاک از آند به خط لوله به وجود می‌آید.

سیستم آند فدا شونده از ارتباط گالوانیکی میان ماده آند فداشونده نظیر روی یا منیزیم و لوله فولادی به منظور اعمال جریان حفاظت کاتدی موردنیاز بهره می‌برد.

۳. اصول شبیه‌سازی

۳.۱. مدل ریاضی ساده

مدل ریاضی توسعه‌یافته در این بخش بر پایه بقای بار الکتریکی است. یک المان مکعبی حاوی الکترولیت که در شکل (۲) نشان داده شده را در نظر بگیرید. کناره‌های مکعب به ترتیب ابعاد Δx ، Δy و Δz را دارد. در نبود شارژ تولیدی (در داخل مکعب)، جریان شارژ به داخل و بیرون باید مساوی باشد [بر اساس اصل بقای شارژ، شارژ تولید نمی‌شود]. بنابراین بردار دانسیته شارژ $\vec{i} = (i_x, i_y, i_z)$ را می‌دهد، که می‌توان نوشت [۳]:

$$i_x \Delta A_x - \left(i_x + \frac{\partial i_x}{\partial x} \Delta x \right) \Delta A_x + i_y \Delta A_y - \left(i_y + \frac{\partial i_y}{\partial y} \Delta y \right) \Delta A_y + i_z \Delta A_z - \left(i_z + \frac{\partial i_z}{\partial z} \Delta z \right) \Delta A_z = 0, \quad (2)$$

ورودی: $i_{\vec{x}}$ ، سطح: $A_{\vec{x}}$ ، خروجی: $i_{\vec{x}} + (\partial i_{\vec{x}} / \partial x) \Delta x$

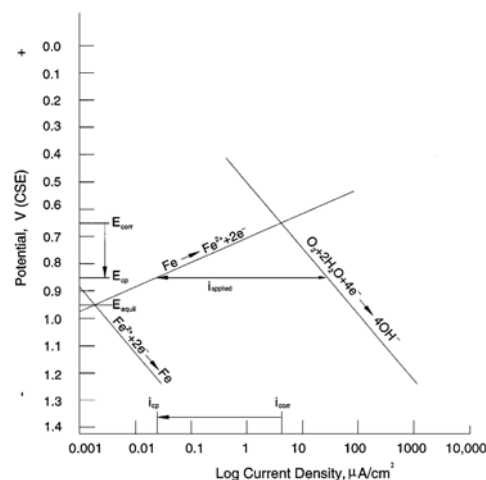


۲.۲. اصول کار

یک تعریف از حفاظت کاتدی عبارت است از: ((کاهش سرعت خوردگی به واسطه‌ی جابجایی پتانسیل سازه به سمت پتانسیل‌های اکسیدی کمتر از طریق اعمال یک جریان خارجی)). این تعریف را می‌توان به صورت گرافیکی بر روی یک دیاگرام ایوانس، مشابه شکل (۱) نشان داد.

۲.۳. دیاگرام ایوانس

در دیاگرام ایوانس از طریق اعمال جریان حفاظت کاتدی i_{applied} پتانسیل فلز از پتانسیل آزاد خوردگی E_{corr} به پتانسیل حفاظت کاتدی E_{Cp} جابه‌جا شده است. با منفی‌تر شدن پتانسیل و همان‌گونه که از سینتیک آندی برمی‌آید، سرعت خوردگی کاهش و میزان جریان کاتدی افزایش می‌یابد. این اختلاف بین سینتیک آندی و کاتدی همان مقدار جریان موردنیاز جهت حفظ پتانسیل موردنظر است و معادل با جریان حفاظت کاتدی اعمال شده به سازه می‌باشد. [۱، ۲]



شکل ۱: دیاگرام ایوانس (pH خنثی یا قلیایی)

توجه به این نکته حائز اهمیت است که حفاظت کامل تنها زمانی حاصل می‌شود که پتانسیل فلز به پتانسیل تعادلی E_{equil} رسیده باشد. در این پتانسیل سرعت خالص خوردگی صفر است. معمولاً دستیابی به حفاظت کامل، به علت نیاز به جریان زیاد، عملی نیست زیرا با کاهش پتانسیل، جریان اعمالی به صورت نمایی افزایش می‌یابد. از آنجایی که شیب تافل آندی معمولاً در حدود ۱۰۰ میلی ولت هستند، جابه‌جایی پتانسیل به اندازه ۱۰۰ میلی ولت به سمت مقادیر منفی سرعت خوردگی را با ضریب ۱۰ کاهش خواهد داد. به

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + S = 0. \quad (8)$$

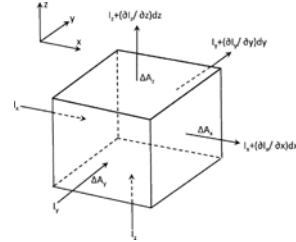
و به‌سادگی عبارت زیر به دست می‌آید.

$$-\left(\frac{\partial i_x}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z\right) - \left(-\frac{\partial i_y}{\partial y} \Delta y \Delta x \Delta z\right) - \left(-\frac{\partial i_z}{\partial z} \Delta z \Delta x \Delta y\right) = 0. \quad (3)$$

نهایتاً، به‌واسطه تقسیم سطوح به $\Delta x \Delta y \Delta z$ صفحات با شارژ مداوم

(پیوستگی شارژ) بدین صورت است:

$$\frac{\partial i_x}{\partial x} + \frac{\partial i_y}{\partial y} + \frac{\partial i_z}{\partial z} = \text{div}(i) = 0. \quad (4)$$



شکل ۲: حجم کنترل مورد استفاده برای بقاء شارژ

اگرچه که شارژ بردار دانسیته (i) متناسب است با گرادین پتانسیل

الکتریکی ψ .

$$(i_x, i_y, i_z) = -\sigma \left(\frac{\partial \psi}{\partial x}, \frac{\partial \psi}{\partial y}, \frac{\partial \psi}{\partial z} \right). \quad (5)$$

بنابراین در (5)، ثابت σ ، رسانایی الکترولیت و واحدهای آن بر

اهم‌متر و آمپر بر ولت‌متر است. با جانشین کردن اجزاء (i_x, i_y, i_z) در

(5) و تقسیم کردن به σ ، معادله لاپلاس مشهور به دست می‌آید.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0. \quad (6)$$

معادله ۶ ممکن است در شرایط پتانسیل الکتروشیمی ϕ نوشته شود، که

به پتانسیل الکتریکی ψ مطابق با $\psi = c - \phi$ وابسته است. این

جانشین‌سازی به نوع مشابهی از معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی

توصیف شده زیر منتهی می‌شود.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0. \quad (7)$$

از این جهت ما فقط با پتانسیل الکتروشیمیایی ϕ سروکار داریم و

به‌آسانی با عبارت "پتانسیل" به آن رجوع می‌کنیم. در صورتی که منبع تولید

جریان داشته باشیم S اضافه می‌گردد. [مخفف source]، بر این اساس (7)

اصلاح شده و به شکل زیر تبدیل می‌شود. این معادله به معادله پواسون

مشهور است:

۳.۲. شرایط مرزی

در مدل‌سازی الکتروشیمیایی، انواع شرایط مرزی وجود دارد که می‌تواند

تعیین گردد. اگر مقدار تابع پتانسیل در یک نقطه معلوم باشد، وضعیت مطابق

شکل زیر است، که در آن ϕ_{constant} ثابت است:

$$\phi(x, y, z) = \phi_{\text{constant}}. \quad (9)$$

وضعیت فوق، معمولاً به‌عنوان شرط مرزی دیریکله اشاره دارد. میزان

پتانسیل معمول، معمولاً از جدول سری نیروی محرکه الکتریکی انتخاب

می‌گردد. وضعیتی که در یک نقطه داده شده، به‌عنوان شرط مرزی نیومان

شناخته شده است. شرط مرزی نیومان از نظر ریاضی این‌گونه بیان می‌شود:

$$-\sigma \frac{\partial \phi}{\partial n} = i_c. \quad (10)$$

در سطوح کاملاً رنگ‌شده (که به‌عنوان "سطوح عایق شده" نامیده

می‌شود) جریان نرمال اعمالی به سطح، صفر است. بنابراین:

$$-\sigma \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0. \quad (11)$$

در سطوح روباز، جریان در مسیر عادی به یک‌میزان ثابت دوام ندارد

ولی به میزان پتانسیل محلی بستگی دارد. این نوع، شرط مرزی مخلوط و یا

نوع رابین است:

$$-\sigma \frac{\partial \phi}{\partial n} = i_0 g(\phi - \phi_0) = i_0 g(\eta). \quad (12)$$

اصطلاح $\eta = \phi - \phi_0$ به‌عنوان اور پتانسیل مشهور است، که در آن

ϕ_0 پتانسیل تعادل الکتروود است. تابع $g(\eta)$ دارای بیان شرح داده شده در

(14) می‌باشد و با این نوع انتخاب از تابع (13) "معادله بوتلر-ولمر"

نامیده می‌شود.

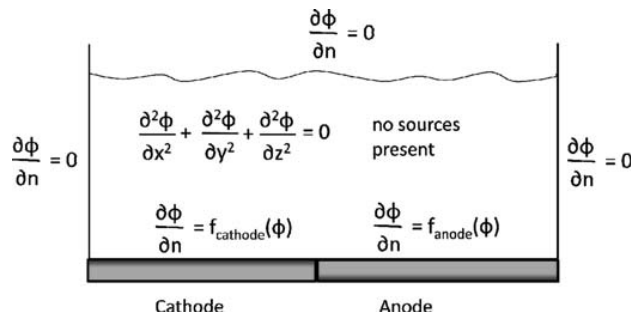
$$g(\eta) = e^{\left(\frac{\gamma F}{RT}\right)\eta} - e^{-\left(\frac{(1-\gamma)F}{RT}\right)\eta}. \quad (13)$$

در این رابطه، R ثابت جهانی گاز است، T دمای مطلق الکتروود است

، F ثابت فارادی است، و γ یک پارامتر تقارن است.

۴. پیاده‌سازی

شبیه‌سازی حفاظت کاتدی به صورت جریان اعمالی برای یک واحد Storage Tank Auxiliary Cooling نیروگاه خیام انجام گردید.



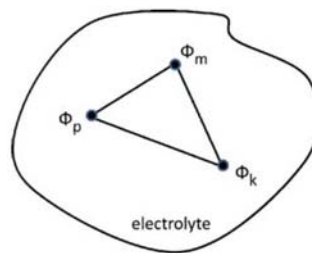
شکل ۳: یک سیستم حفاظت کاتدی فدا شونده.

در شکل طرح کلی یک سیستم حفاظت کاتدی فدا شونده‌ی محدود شده به ظرف را به تصویر می‌کشد. در این شکل، فرض شده است که ظرف نارسانا است و بنابراین دانسیته جریان در مرز ظرف صفر است. معادله دیفرانسیل جزئی حاکم و وابستگی شرایط مرزی در شکل نمایش داده شده است [3].

۳,۴. چارچوب کلی تقریب عددی

یک روش عددی برای حل معادله دیفرانسیلی با مشتقات جزئی در مورد حفاظت کاتدیک، معادله لاپلاس با روش عناصر محدود یا روش المان محدود (FEM) است.

FEM یک عنصر معمولی نشان داده شده در شکل ۴، یک مثلث سه‌گوش است که یک تقریب خطی به $\phi(x, y)$ در درون آن است. به محض استفاده از شرایط مرزی، این سیستم حل معادلات می‌تواند نتیجه حل سیستم معادلات جبری با استفاده از روش مستقیم یا تکرارشونده را به دست آورد. با توجه به ماهیت FEM، هندسه‌های پیچیده به راحتی کنترل می‌شوند. به خاطر داشته باشید که در حفاظت کاتدیک، میزان پتانسیل بر روی سطوح متصل اصلی‌ترین هدف است [۳].



شکل ۴: یک عنصر مثلثی سه گرهی در روش عناصر محدود.

هندس محیط، با استفاده از نرم‌افزار AutoCAD ایجاد گردید. سعی گردید مدلینگ به صورت کاملاً واقعی و برگرفته از سایت موجود نیروگاه سیکل ترکیبی خیام صورت گیرد.

اندازه‌ها دقیقاً مطابق با اندازه‌های واقعی، برگرفته از نقشه‌ها و نماهای مربوط به Auxiliary Cooling شرکت طراح و سازنده نیروگاه، موجود در دفتر مهندسی نیروگاه خیام و اندازه‌گیری‌های انجام شده در سایت نیروگاه خیام توسط این‌جانب می‌باشد. واحدها بر اساس دستگاه Si و در نرم‌افزار AutoCAD بر مبنای واحد سانتیمتر و در نرم‌افزار Comsol بر مبنای واحد متر می‌باشد.

۴,۱. مقیاس

طراحی شامل دو تانک ذخیره می‌باشد که در دو سمت اتاقک کنترل سیستم Auxiliary Cooling هستند با مقیاس‌هایی به شرح زیر:

جدول ۱: مقیاس تانک‌های ذخیره

ارتفاع یا قطر تانک‌های ذخیره	۲۰۰cm	طول تانک ذخیره	۵۵۰cm
طول تانک‌های ذخیره + نیم‌دایره‌های ابتدا و انتها	۶۲۴cm		

دو تانک ذخیره و ساختمان مربوط به آن در فونداسیونی بتونی به شکل ظرف قرار گرفته‌اند. بنابراین مرزبندی محیط و انجام محاسبات بر اساس نقشه آن و در فضای کم موجود انجام گرفت.

جدول ۲: مقیاس‌های فضای مورد محاسبه (الکترولیت محیط - در اینجا خاک)

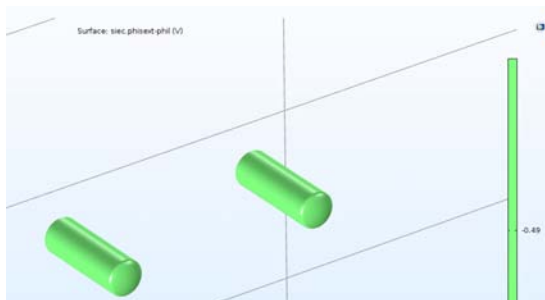
عرض قسمت فوقانی محیط	۱۵ متر	عرض کف محیط	۱۱ متر
طول قسمت فوقانی محیط	۱۹ متر	طول کف محیط	۱۵ متر
قسمت فوقانی محیط (سطح زمین) با کف محیط زاویه ۱۲۰ درجه دارد.			

۶. انواع طراحی حفاظت

۶.۱. بدون حفاظت کاتدی

اگر هیچ حفاظت کاتدی اعمال نشده باشد نتیجه حاصله به صورت زیر

است:



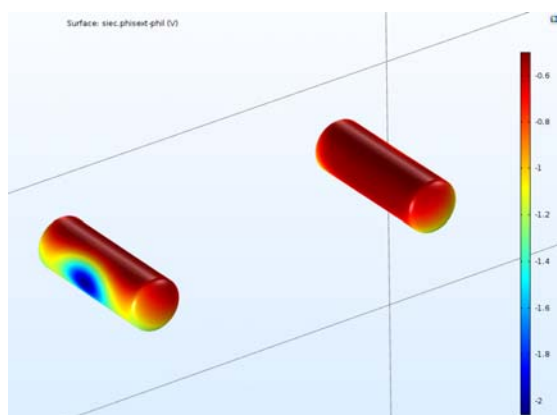
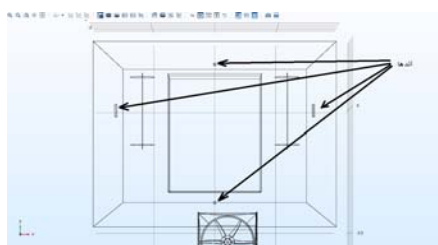
وضعیت تانک‌های ذخیره بدون اعمال حفاظت

از نتیجه پتانسیل به دست آمده (-0.49V)، این نتیجه حاصل می‌گردد که مخازن مستعد خوردگی هستند و باید حفاظت شوند.

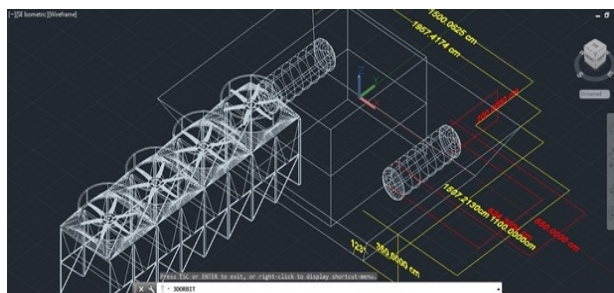
۶.۲. چهار آند داخل فونداسیون

بستر آندی به صورت چهار آند به صورت شکل زیر با اعمال ولتاژ 7V و

جریان 7A نتایج زیر را رقم زد:



نتیجه پتانسیل اعمال شده (چهار آند با پتانسیل ۷ ولت و ۷ آمپر)



۴.۲. Comsol

پس از طراحی و انجام مدلینگ در نرم‌افزار AutoCAD از آن خروجی مناسب برای نرم‌افزار Comsol گرفته شد.

فایل ساخته شده به داخل محیط Comsol وارد گردید و ایجاد مرزبندی‌ها و تعریف محیط جهت انجام محاسبه انجام شد. [۴-۶]

۴.۳. شرایط مرزی

شرایط مرزی استفاده شده برای دو تانک ذخیره (الکتروود کاتد) اکسیداسیون فلز و احیاء اکسیژن می‌باشد؛ که از حل معادله تافل، با وارد کردن E_{eq} ، i_0 و شیب‌های تافل آهن و اکسیژن در نرم‌افزار و دانسیته جریان حدی اکسیژن در واکنش احیاء اکسیژن استفاده گردید. اعداد استفاده شده در محاسبات مانند رسانایی خاک، پتانسیل‌ها، شیب‌های تافل و ... از منابع و مقالات معتبر گرفته شده است. [۱، ۵-۸]

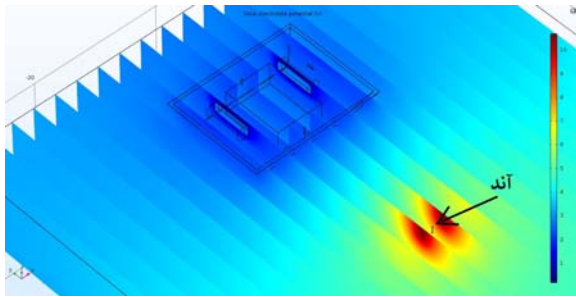
برای اعمال شرایط جریان اعمالی (ICCP) - جهت شبیه‌سازی رکتیفایر - از ماژول مناسب برای آن که قادر به انتخاب ولتاژ و آمپر مورد نیاز جهت شبیه‌سازی می‌باشد (الکتروود آند) استفاده شد. [۴، ۷، ۹]

پتانسیل‌های خوانده شده بر اساس الکتروود مرجع مس - سولفات مس (CSE) می‌باشد. $[E_{vs\ ref}] [۲]$

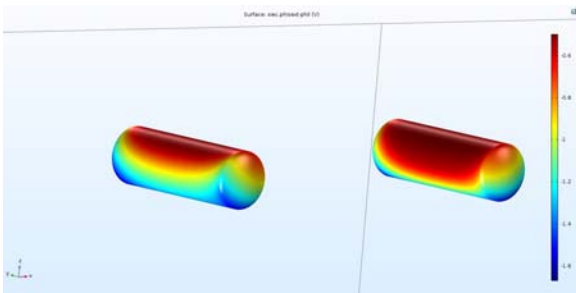
۵. واکنش‌ها

اکسیداسیون آهن و احیاء اکسیژن دو واکنش الکتروود مختلف در مرز تانک‌های ذخیره





پتانسیل الکترولیت

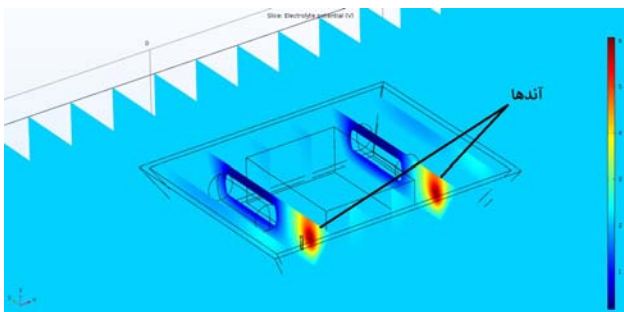


پتانسیل سطح تانک‌های ذخیره (کاتدها)

نتایج پتانسیل برای این نوع آند گذاری برای قسمت‌های مختلف تانک ذخیره از 0.6- تا 1.6- ولت متغیر است.

۶.۴. یک آند در جلوی هر تانک ذخیره

نتیجه پتانسیل سطحی برای تانک‌های ذخیره با اعمال ۷ ولت و ۷ آمپر به دو آند در جلوی تانک‌های ذخیره (جلوی هر تانک ذخیره یک آند داخل فونداسیون بتنی) بافاصله ۷ متری از مرکز تانک‌های ذخیره با در نظر گرفتن رسانایی 10^7 S/m برای فونداسیون بتنی و اعمال واکنش‌های اکسیداسیون آهن و احیاء اکسیژن برای تانک‌های ذخیره، به شکل زیر است :



پتانسیل خاک با اعمال دو آند

نتایج پتانسیل برای این نوع آند گذاری برای قسمت‌های مختلف تانک ذخیره از 0.6- تا 2- ولت متغیر است.

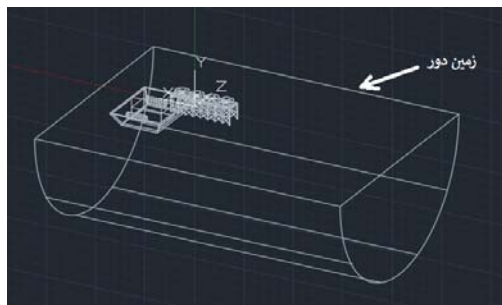
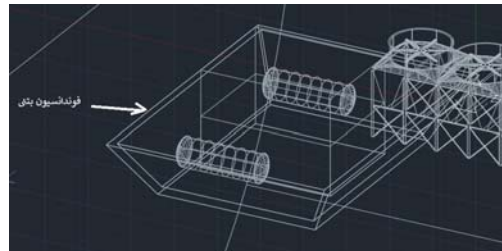
۶.۳. آند خارج فونداسیون در زمین دور

حال اگر بستر آندی را خارج از فونداسیون و در محلی دورتر قرار دهیم نتایج چگونه خواهد بود؟

از آنجایی که درون فونداسیون شامل دو نوع ماده بتون و میلگرد آهنی می باشد در صورتی که میلگردها توسط بست‌هایشان یا به هر صورت دیگری با خاک در تماس باشند چون رسانایی آهن نسبت به بتن بسیار بیشتر است، الکترون‌ها جهت ساری شدن، مسیر ساده‌تر یعنی فلز آهن را برخواهند گزید ؛ بنابراین جهت ساده‌سازی رسانایی فونداسیون بتونی را برابر رسانایی آهن یعنی 10^7 S/m انتخاب می‌نماییم. در حقیقت فونداسیون را به‌عنوان خاکی با هدایت بالا در نظر می‌گیریم.

اگر زمین دور را به مدل اضافه کنیم و رسانایی خاک زمین دور و رسانایی خاک درون فونداسیون بتنی را به یک‌میزان فرض کنیم (0.066667 S/m) و فاصله آند تا تانک‌های ذخیره را تقریباً 25m در نظر بگیریم و پتانسیل اعمالی به آند ۷ ولت و ۷ آمپر باشد نتایج به‌صورت زیر خواهد بود.

(با در نظر گرفتن رسانایی 10^7 S/m برای فونداسیون بتنی و اعمال واکنش‌های اکسیداسیون آهن و احیاء اکسیژن برای مرز تانک‌های ذخیره)



نتایج پتانسیل برای این نوع آند گذاری برای قسمت‌های مختلف تانک ذخیره از 0.8- تا 1.1- ولت متغیر است.

۷. نتیجه گیری

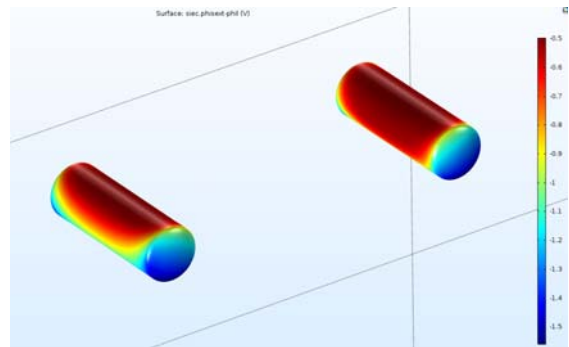
به علت شکل خاص تانک‌های ذخیره و عمق کم قرارگیری سازه در خاک، قسمت فوقانی تانک‌های ذخیره در اکثر روش‌های آندگذاری به‌طور کامل حفاظت نمی‌شود به‌طوری‌که اگر پتانسیل رکتیفایر را افزایش دهیم در سایر قسمت‌ها افزایش پتانسیل بیشتر از حد مجاز را شاهد خواهیم بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود شاید بتوان گفت در روش آخر، پوشش چتر آندی، مناسب‌تر است؛ و حفاظت کامل‌تری صورت می‌گیرد. پس برای چنین هندسه‌ای که سازه دارای عمق کم می‌باشد استفاده از آندهای فداشونده و یا روش جریان اعمالی با کمک تعداد زیاد آند میله‌ای به دور تانک ذخیره پیشنهاد می‌گردد.

قدردانی

با تشکر از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر علی داودی که از راهنمایی‌های ایشان در به ثمر رسیدن این مقاله استفاده کردم.

منابع

1. Peabody, A.W. and R.L. Bianchetti, *Peabody's Control of Pipeline Corrosion*. 2001: NACE International.
2. McCafferty, E., *Introduction to Corrosion Science*. 2010: Springer New York.
3. Zamani, N.G., *Numerical Modeling of Certain Electrochemical Processes*. 06 July 2009.
4. Gadala, I.M., M. Abdel Wahab, and A. Alfantazi, *Numerical simulations of soil physicochemistry and aeration influences on the external corrosion and cathodic protection design of buried pipeline steels*. *Materials & Design*, 2016. **97**(Supplement C): p. 287-299.
5. Multiphysics, C., *COMSOL Multiphysics Reference Manual*. 2013. **4.4**.
6. Pryor, R.W., *Multiphysics Modeling using COMSOL*. 2011.
7. Wang, X., *Magnetic Induction Based Energy Harvester for Sensor Networks and Impressed Current Cathodic Protection*. 2013.
8. Muehlenkamp, E.B., M.D. Koretsky, and J.C. Westall, *Effect of Moisture on the Spatial Uniformity of Cathodic Protection of Steel in Reinforced Concrete*. *CORROSION*, 2005. **61**(6): p. 519-533.
9. Huber, T. and Y. Wang, *Effect of Propeller Coating on Cathodic Protection Current Demand: Sea Trial and Modeling Studies*. *CORROSION*, 2012. **68**(5): p. 441-448.



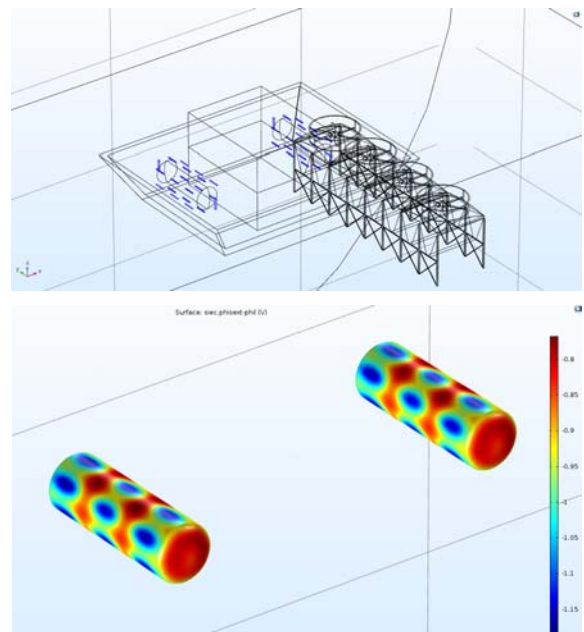
پتانسیل تانک‌های ذخیره با اعمال دو آند

نتایج پتانسیل برای این نوع آند گذاری برای قسمت‌های مختلف تانک ذخیره از 0.5- تا 1.5- ولت متغیر است.

۶.۵. استفاده از آندهای میله‌ای دور تانک ذخیره

روش پیشنهادی دیگر استفاده از آندهای میله‌ای دور تانک ذخیره به‌وسیله جریان اعمالی یا توسط آند فداشونده می‌باشد.

در روش جریان اعمالی از آندهای میله‌ای مشابه با نوع B آند (آند استاندارد چدن پر سیلیس صفحه ۲۰۱ کتاب پی بادی) به تعداد سه ردیف شش‌تایی به دور هر تانک ذخیره و دو آند، هریک در دو انتهای تانک ذخیره استفاده شده است. پتانسیل اعمالی برای آندها توسط یک رکتیفایر با اعمال 8.5V و 8.5A تأمین می‌گردد. نتایج حاصله به‌صورت زیر است :



پتانسیل تانک‌های ذخیره با اعمال آندهای میله‌ای دور تانک