

ریشه‌یابی علت نشئی سیال از کف مخزن ذخیره‌سازی کاستیک با استفاده از شبیه‌سازی سیستم حفاظت کاتدی

محمد هوشمند^{۱*}، علی داودی^۲، مهرداد کاشفی تربتی^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۷، ش.ص: ۱۳۲-۱۱۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۰۹)

چکیده

در این پژوهش به بررسی علت وقوع نشئی سیال از کف مخزن کاستیک با استفاده از شبیه‌سازی سیستم حفاظت کاتدی و همچنین توسعه رابطه توزیع جریان با یک فاصله نزدیک آند به سازه پرداخته شده است. از روش المان محدود برای حل عددی سیستم حفاظت کاتدی استفاده شد و مطابقت ۹۴٪ نتایج شبیه‌سازی با نتایج میدانی نشان دهنده دقت نتایج است. اگرچه اندازه گیری‌های میدانی نشان دهنده حفاظت کف مخزن بوده؛ ولی نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که فقط یک ناحیه محدود از کف مخزن تحت حفاظت بوده است که این ناحیه از رابطه توزیع جریان پیروی می‌کند و نشئی از مناطق اطراف که سطح حفاظت پایین‌تری داشته رخ داده است. چندین راه برای افزایش سطح حفاظت وجود دارد، یکی از راه‌ها افزایش فاصله آند از کف مخزن مطابق با رابطه توزیع جریان بوده؛ اما نتایج شبیه‌سازی خلاف آن را نشان می‌دهد. هر آند یک گرادیان پتانسیل ایجاد می‌کند که می‌تواند از یک آند به آند دیگر متفاوت باشد. بنابراین رابطه توزیع جریان تا زمانی قابل استفاده خواهد بود که با افزایش فاصله آند از کف مخزن، کف مخزن از گرادیان پتانسیل ایجاد شده توسط آند خارج نشود. به همین دلیل در این پژوهش، رابطه توزیع جریان با استفاده از یک رابطه مکمل دیگر و با در نظر گرفتن شرایط مرزی توسعه پیدا کرده است.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی حفاظت کاتدی، روش المان محدود، توزیع پتانسیل.

^۱- کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مواد

^۲- دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مواد

^۳- استاد دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مواد

*- نویسنده مسئول پژوهش: Houshmand.roham@yahoo.com

پیشگفتار

تجهیزات ذخیره‌سازی برای محصولات نفتی شامل مجموعه‌ای از مخازن ذخیره‌سازی است. این مخازن در اندازه‌های مختلف از فولاد ساخته شده و بر روی زمین قرار دارند. کف مخزن که بر روی خاک قرار دارد، مشابه لوله‌های بدون پوشش خورده می‌شود و اجرای سیستم حفاظت کاتدی برای آن‌ها حیاتی‌تر از خط لوله است. کف مخزن توسط زمین احاطه شده است. فلز به کار رفته در کف مخزن از ضخامت پایینی برخوردار بوده و به همین دلیل به شدت تحت تاثیر خوردگی، آسیب پذیر است [۱]. اجرای سیستم حفاظت کاتدی برای مخازن ذخیره سازی مورد نیاز است و نیازمند طراحی منحصر به فرد در مقایسه با خطوط لوله است.

در حالی که توزیع جریان بر روی خط لوله یکنواخت است، توزیع جریان برای مخازن ذخیره استوانه‌ای شکل، ذاتا غیر یکنواخت است. محدودیت سینتیک و انتقال جرم ممکن است، باعث توزیع جریان یکنواخت گردد. برای توزیع جریان یکنواخت به یک سیستم حفاظت کاتدی در زیر مخزن نیاز است. با این حال، توزیع جریان یکنواخت در کف مخزن باعث می‌شود که جریان‌های حفاظتی به طور مناسب بر روی کف مخزن اعمال شوند. تحویل جریان می‌تواند با استفاده از لایه عایق الکتریکی تحت تاثیر قرار گیرد. نصب لایه عایق، باعث جلوگیری از آلودگی محیط زیست در هنگام نشت مخزن خواهد شد که در هنگام نصب مخازن ذخیره‌سازی جدید مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲]. حفاظت کاتدی مخازن ذخیره با استفاده از لایه عایق و همچنین قرارگیری آند بین مخزن و لایه فراهم می‌شود [۳]. مدل‌سازی عددی می‌تواند به طور موثر مناطقی را که توسط حفاظت کاتدی تحت حفاظت قرار ندارند (منجر به خوردگی خواهد شد) و همچنین نواحی که تحت حفاظت بیش از حد می‌باشند (منجر به تردی هیدروژنی خواهد شد) پیش بینی و شبیه‌سازی کند. بنابراین، مدل‌سازی عددی می‌تواند طراحی، نصب، تعمیر و نگهداری را بهینه سازد. علاوه بر این، نتایج شبیه سازی می‌تواند نقاط نظارت مطلوب در سیستم، توانایی یافتن و حل هرگونه مشکل را فراهم کند [۴].

روش‌هایی که بیش‌ترین کاربرد را در حفاظت کاتدی دارند، شامل روش المان محدود و روش المان مرزی می‌باشد. اولین مطالعه گسترده تاثیر پلاریزاسیون با استفاده از روش المان محدود برای فضای الکترولیت/الکتروود دو بعدی ابتدا در سال ۱۹۷۷ تکمیل و سپس در سال ۱۹۸۱ نهایی شد [۵]. مدل ریاضی یک ابزار طراحی مناسب برای پیش بینی توزیع پتانسیل و جریان بر اساس مقاومت خاک و رفتار الکتروشیمیایی الکتروودها است. مطالعه توزیع پتانسیل و جریان بر روی کف مخزن اخیرا توسط Reimer و Orazem [۶] انجام شده است. آن‌ها نتیجه گرفتند که عملکرد پیش بینی به شدت به موقعیت آند، مقدار اکسیژن و حضور لایه عایق بستگی دارد. تنها ترکیبی از آندهای نواری و لایه عایق محافظت کافی را برای کف مخازن که در تماس با خاک هستند را فراهم می‌کند. در حالی که مدل‌های ریاضی دقیق برای حفاظت کاتدی خطوط لوله و دیگر سازه‌ها توسعه داده شده است، تنها تعداد کمی از مدل‌ها برای ارزیابی رفتار خوردگی کف مخزن که تحت حفاظت کاتدی هستند، توسعه داده شده است [۷-۱۵]. Friesen و Demoz [۱۶] روش ساده‌ای را جهت محاسبه فضای بین آندهای نواری براساس هندسه مورد نیاز و جریان حفاظت کاتدی تعریف نموده‌اند. با این حال، Bazzoni و Lorenzi [۱۷]، طراحی و شبیه‌سازی مدل برای تعیین توزیع جریان و پتانسیل در یک سیستم حفاظت کاتدی با آندهای نواری را تنظیم کرده‌اند. آن‌ها توزیع جریان و پتانسیل را با استفاده از روش المان محدود و تاثیر فاصله بین آندها، منبع ولتاژ و جریان، مقاومت خاک و میزان افت پتانسیل (IRDrop) در آندها را بررسی کرده‌اند و همچنین شبیه‌سازی را در هندسه دو بعدی و سه بعدی انجام داده‌اند. پیش بینی اثر نهایی سیستم حفاظت کاتدی براساس برآورد رابطه‌های تجربی و تجربیات میدانی مهندسی حفاظت کاتدی دشوار است [۱۸].

تعریف مدل

رابطه توزیع جریان ثانویه برای حل پتانسیل الکترولیت بر روی کف مخزن $(\Phi_1(V))$ ، در حوزه الکترولیت بر اساس:

$$i_l = -\sigma_1 \nabla \Phi_1 \quad (1)$$

$$\nabla i_l = 0 \quad (2)$$

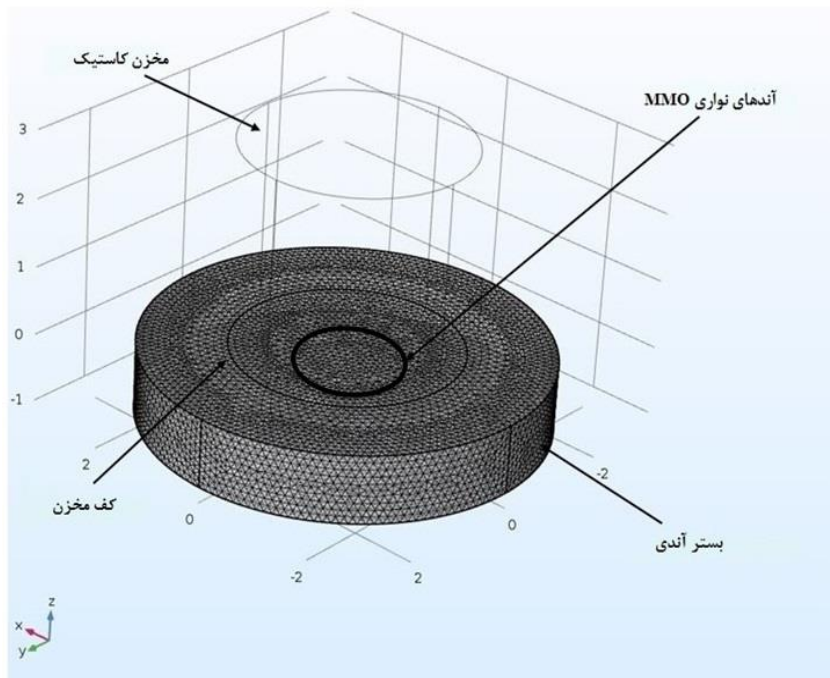
در این معادله i_l دانسیته جریان الکترولیت (A/m^2) و σ_1 رسانندگی الکترولیت خاک (S/m) است. گره مرزی سطح الکتروود که بر روی کف مخزن استفاده شده است به منظور اضافه نمودن واکنش الکتروود و تنظیم شرایط مرزی برای پتانسیل الکترولیت می باشد که در آن i_l (loc, m) چگالی جریان واکنش الکتروود موضعی (A/m^2) است.

$$n \cdot i_l = \sum_m i_{loc,m} \quad (3)$$

مدل ریاضی

مش بندی کف مخزن

مش بندی کف مخزن با استفاده از نرم افزار کامسول انجام شده است. مدل کف مخزن به صورت دایره‌ای شکل بوده به همین دلیل از مش مثلث استفاده شده است. با توجه به اینکه هدف از این پژوهش توزیع پتانسیل بر روی کف مخزن و در ناحیه الکترولیت زیر مخزن است، اندازه المان مش خیلی کوچک انتخاب شده است. استفاده از این المان‌های کوچک، منجر به دقت بیشتر شبیه‌سازی شده است. تصویر سه بعدی مدل مش بندی شده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- مش بندی مدل در سه بعد که از المان‌های مثلث برای تولید مش یکنواخت در منطقه حفاظت کاتدی استفاده شده است

استفاده از تکنیک‌های آنالیز عددی و نرم افزارهای برنامه نویسی شده بهبود یافته‌اند [۲۸]. برنامه‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی حفاظت کاتدی باید دارای سازگاری کافی جهت محاسبه توزیع جریان و پتانسیل برای سازه‌های پیچیده که به صورت کاتدیک حفاظت می‌شوند را داشته باشند. این برنامه‌های عددی با مجموعه‌ای از اطلاعات اولیه و شرایط مرزی الکتروشیمیایی ترکیب شده‌اند. روش اختلاف محدود یکی از اولین تکنیک‌ها است که اگرچه راندمان عددی بالا دارد؛ ولی استفاده از آن در حل سیستم‌های پیچیده مشکل است. بخشی از این مشکل توسط روش المان محدود رفع شده است [۲۹]. روش المان محدود یک تکنیک عددی برای یافتن راه حل تقریبی با استفاده از رابطه دیفرانسیل جزئی^۴ و همچنین رابطه انتگرال است. روش المان محدود به طور گسترده در مهندسی کاربرد دارد؛ زیرا به راحتی اشکال پیچیده را توصیف می‌کند، سازگاری بالایی دارد و به طور خودکار برای شرایط مرزی آزاد بهینه می‌شود [۳۰-۳۱].

مواد و روش‌ها

فلز مورد استفاده در مخزن شبیه سازی شده فولاد A283 Grade C است. از آزمون اسپکترومتری به منظور بررسی صحت فولاد، استفاده شده و نتایج ترکیب شیمیایی فولاد اشاره شده در جدول ۱ گزارش و با نتایج آنالیز بر اساس استاندارد مرجع مطابق با جدول ۲ مقایسه شده است.

شبیه سازی با استفاده از نرم افزار شبیه‌سازی Comsol بر پایه المان محدود انجام شده است. اطلاعات مورد نیاز انجام شبیه‌سازی شامل: رسانندگی خاک (S/m)، پتانسیل تعادلی فولاد A283 Grade C نسبت به الکتروود مرجع مس/سولفات مس، دانسیته جریان تبادل (i₀)، ضریب انتقال آندی (α_a)، ضریب انتقال کاتدی (α_c) است.

از معادله باتلر-ولمر برای مدل سازی پلاریزاسیون الکتروود در سطح کف مخزن استفاده شده است.

$$i_{loc} = i_0 \left(\exp\left(\frac{\alpha_a F \eta}{RT}\right) - \exp\left(\frac{\alpha_c F \eta}{RT}\right) \right) \quad (4)$$

در این معادله i_{loc} چگالی جریان سینتیک موضعی به کف مخزن است که در اینجا فولاد کربنی در نظر گرفته شده است. پارامترهای سینتیک الکتروود استفاده شده در معادله باتلر-ولمر برای کف مخزن شامل: پتانسیل تعادلی (Eq)، دانسیته جریان تبدالی (i₀)، ضریب انتقال آندی (α_a) و ضریب انتقال کاتدی (α_c) است. از آنجایی که سینتیک آندی این مدل شناخته شده نیست (و از نظر جزئی برای این تجزیه و تحلیل)، از گره پتانسیل الکتروولیت برای سطح آندی استفاده می‌شود و پتانسیل را صفر قرار می‌دهد. شرایط عایق پیش فرض برای تمام مرزهای سطح کف مخزن استفاده شده است که در آن n بردار نرمال خارج از دامنه را نشان می‌دهد.

$$n \cdot i = 0 \quad (5)$$

یک شرط الکتروولیت بی نهایت برای مرزهای خارجی به زمین مورد استفاده قرار گرفته که برای توصیف گسترش نامحدود زمین است. سطح زمین و کف مخزن به صورت تقارن بررسی شده است [۱۹].

روش شبیه سازی عددی

روش‌های عددی که برای طراحی سیستم حفاظت کاتدی و سیستم‌های الکتروشیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل: روش اختلاف محدود^۱، روش المان مرزی^۲ و روش المان محدود^۳ است [۲۰]. این روش‌ها برای محاسبه توزیع پتانسیل و جریان بر روی سازه استفاده می‌شوند. با این حال، روش‌های المان محدود و المان مرزی برای مدل سازی عددی خوردگی گالوانیک و سیستم حفاظت کاتدی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۷-۲۱]. تجزیه و تحلیل سیستم‌های حفاظت کاتدی با

1-Finite Different Method

2-Boundary Element Method

3-Finite Element Method

4-Partial differential equation

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد A283 Grade C

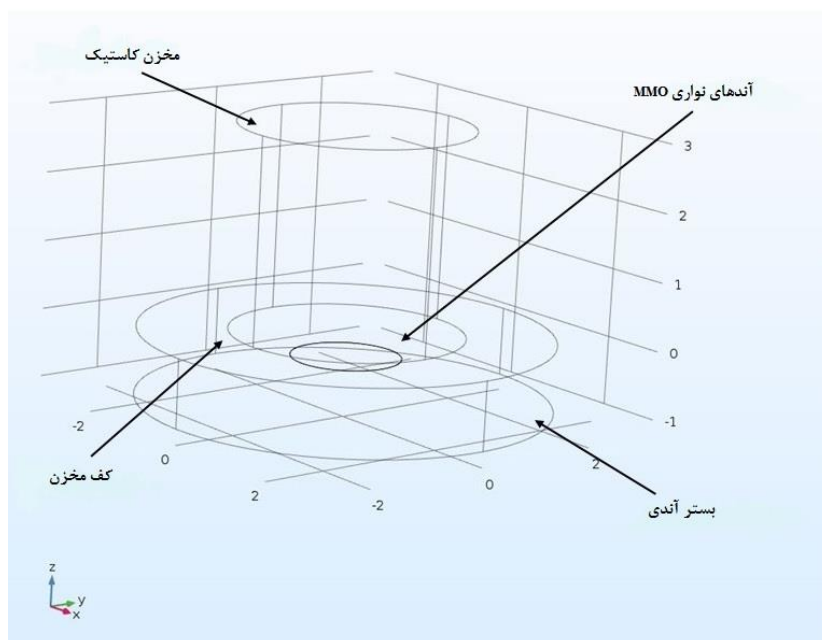
| ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------|
| Fe | Cr | Co | Al | Ni | Mo | Cu | S | P | Mn | Si | C | عناصر |
| ۹۹,۲ | ۰,۰۰۶ | ۰,۰۰۹ | ۰,۰۴۷ | ۰/۰۰۸ | ۰/۰۰۳ | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۱۶ | ۰/۴۸۲ | ۰/۰۰۷ | ۰/۱۵۱ | نتایج آنالیز نمونه |

جدول ۲- ترکیب شیمیایی بر اساس استاندارد مرجع

| ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) | | | | | | |
|---------------------------|------|------|------|-----|------|----------------------------------------|
| Cu | S | P | Mn | Si | C | عناصر |
| ۰,۲ | ۰,۰۳ | ۰,۰۳ | ۰,۹۰ | ۰,۴ | ۰,۲۴ | آنالیز بر اساس استاندارد مرجع (حداکثر) |
| * | * | * | * | * | * | آنالیز بر اساس استاندارد مرجع (حداقل) |

الکتروده شمارنده و نمونه فولاد A283 Grade C به عنوان الکتروده کاری که سطح آن $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ است انجام شد. همچنین نتایج شبیه سازی خاک نیز به صورت 0.483 NaHCO_3 , $0.131 \text{ MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.122 KCl , $0.181 \text{ CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $0.083 \text{ Distillate water}$ گرم بر لیتر است [۳۲]. هندسه سه بعدی مورد استفاده برای شبیه سازی در شکل ۲ نشان داده شده است.

به منظور به دست آوردن ضریب انتقال آندی، ضریب انتقال کاتدی و دانسیته جریان تبادلی، آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک بر روی نمونه مورد استفاده در کف مخزن که فولاد A283 Grade C است، در محیط محلول آبی شبیه سازی شده خاک انجام شد. نرخ روبش 1mV/s انتخاب شد و در نهایت آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک با استفاده از دستگاه EG&G مدل 273A در سل سه الکترودی الکتروشیمیایی شامل الکتروده کالومل اشباع شده (SCE) به عنوان الکتروده مرجع،



شکل ۲- هندسه سه بعدی مورد استفاده در آنالیز المان محدود

مخزن از شکل ۵ استخراج و در جدول ۴ نشان داده شده است.

نتایج میدانی بازرسی حفاظت کاتدی

بازرسی از وضعیت حفاظت کاتدی مخزن ذخیره کاستیک با استفاده از یک دستگاه مولتی متر با مقاومت داخلی بالا و رفرنس الکتروود دائمی مس/سولفات مس که بین کف مخزن و لوپ آندی قرار گرفته بود، انجام شد. نتایج پتانسیل در جدول ۵ نشان داده شده است. نتایج پتانسیل نشان می‌دهد که مخزن تحت حفاظت قرار دارد و توزیع جریان مناسب به کف مخزن صورت می‌گیرد. به منظور بررسی سلامت رفرنس الکتروود قرار گرفته در زیر مخزن، پتانسیل رفرنس الکتروود قرار گرفته در زیر مخزن نسبت به رفرنس الکتروود قابل حمل کالیبره شده اندازه گیری شد که نشان دهنده اختلاف کم‌تر از ۵ میلی ولت بوده است.

نتایج پتانسیل نشان می‌دهد که سطح حفاظت مطابق با معیار استاندارد NACE SP0285 است. علی‌رغم اینکه مخزن دارای سطح خوبی از حفاظت است، کف مخزن دچار نشتی و سوراخ گردید که به منظور ریشه‌یابی علت خوردگی رخ داده از شبیه سازی استفاده شده است.

نتایج شبیه سازی سیستم حفاظت کاتدی

نتیجه توزیع پتانسیل نمونه شبیه سازی شده در سه بعد در شکل ۶ نشان داده شده است. ابعاد مدل شبیه سازی شده دقیقاً مطابق با نمونه واقعی مخزن ذخیره کاستیک بوده است. اطلاعاتی مانند ولتاژ و جریان اعمال شده به مخزن مطابق با اطلاعات ترانس رکتیفایر مخزن است که در شبیه سازی استفاده شده است.

همان‌گونه که در شکل ۶ نشان داده شده است، توزیع پتانسیل بر روی کف مخزن در بازه ۰/۶ تا ۱/۱ میلی ولت است. آند نواری استفاده شده در کف مخزن تنها یک منطقه محدود از کف مخزن را حفاظت می‌کند که این موضوع می‌تواند به دلیل قرارگیری آند در فاصله نزدیک از مخزن باشد. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، توزیع جریان با فاصله نزدیک آند به سازه می‌تواند از

یکی از پارامترهای موثر در نرخ خوردگی در خاک، مقاومت خاک است که در شبیه سازی تحت عنوان سیگما بیان شده است. از دستگاه MC^۱ بر پایه روش چهار میله‌ای ونر^۲ به منظور تعیین مقاومت خاک در عمق ۱ متری زمین استفاده شده است. مطابق با این روش اندازه گیری مقاومت خاک در سه نوبت انجام شد و در نهایت میانگین این سه مقدار به عنوان مقاومت نهایی برای شبیه سازی در نظر گرفته شد. نتایج اندازه گیری در جدول ۳ نشان داده شده است.

قطر مخزن مورد نظر ۳/۴ متر و سطح مقطع آن ۹ متر مربع است که در واحد ۱۲۹ پالایشگاه دوم قرار گرفته است. سیستم حفاظت کاتدی این مخزن از نوع جریان اعمالی و شامل ۱ لوپ آندی MMO است که به همراه رفرنس الکتروود مس/سولفات مس در زیر مخزن قرار گرفته است. موقعیت قرارگیری لوپ آندی و رفرنس الکتروود در شبیه سازی دقیقاً مشابه با شرایط واقعی بوده و نحوه قرارگیری آن‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین، فاصله رفرنس الکتروود و لوپ آندی از کف مخزن در شکل ۴ نشان داده شده است.

بحث و نتایج

روش شبیه سازی عددی

منحنی پلاریزاسیون کاتدی فولاد A283 Grade C با استفاده از آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک تعیین شده است. به منظور تعیین نرخ خوردگی فولاد در خاک منطقه و همچنین اطلاعات مورد نیاز برای تکمیل رابطه باتلر-ولمر برای شبیه سازی کف مخزن از فولاد مورد استفاده در کف مخزن کاستیک موجود در پالایشگاه استفاده شده است. شکل ۵ (الف) منحنی پلاریزاسیون بدست آمده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۵ (ب) نشان داده شده به منظور تعیین پارامترهای سینتیکی الکتروود در رابطه باتلر-ولمر، این رابطه بر روی منحنی پلاریزاسیون رسم گردید. پارامترهای سینتیکی الکتروود مورد استفاده در رابطه باتلر-ولمر برای کف

¹ -Miller Soil Resistivity Kit

² -Wenner 4-point soil resistivity test

$$L=2d \tan 60^\circ$$

(6)

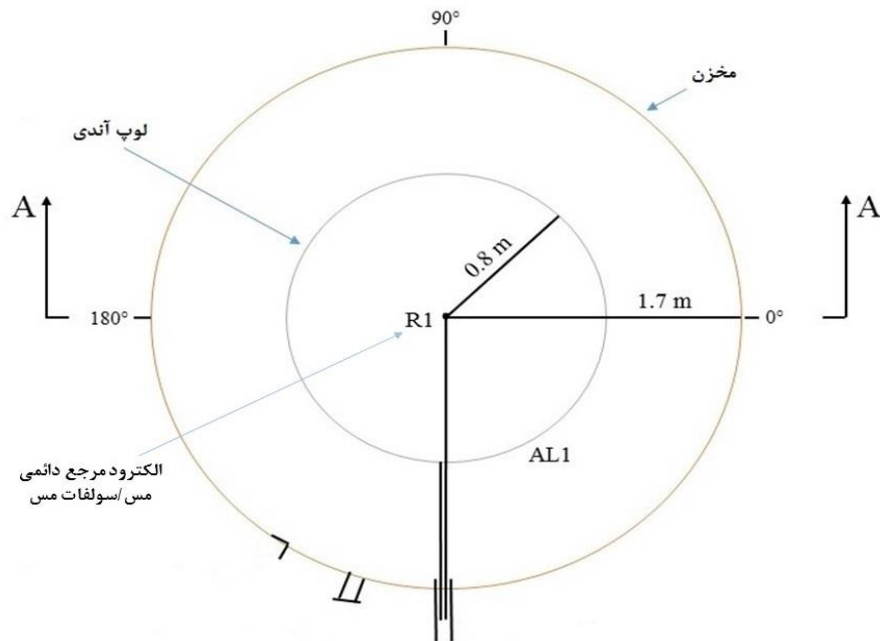
طریق رابطه توزیع جریان (۶) [۳۳] محاسبه شود؛ اما سوالی که در اینجا به وجود می‌آید این است که چگونه این فاصله برای محافظت از سازه تعیین می‌شود؟

L: ناحیه متأثر از آند

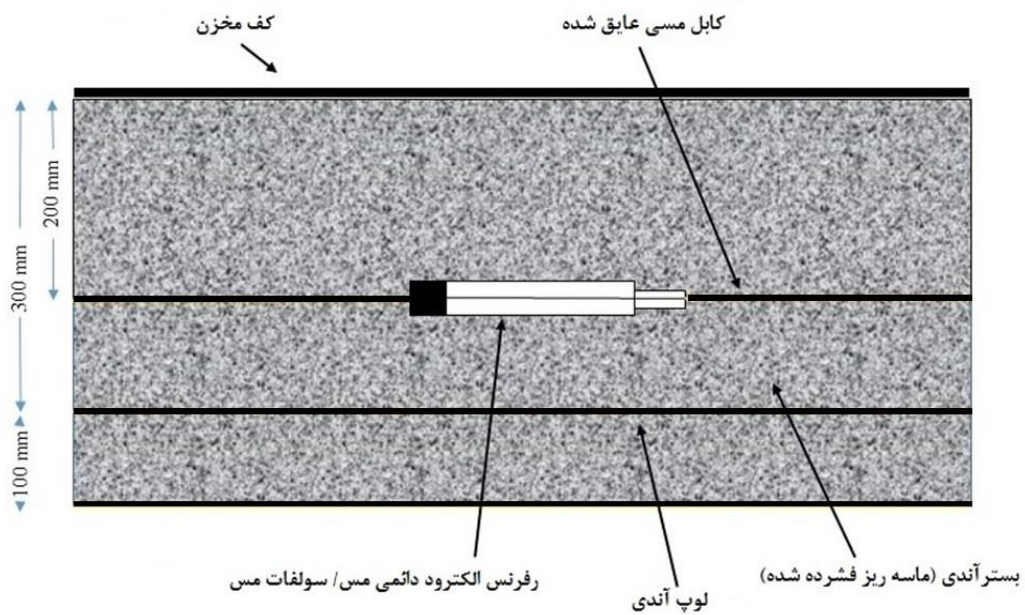
d: فاصله آند از سازه

جدول ۳- میزان مقاومت خاک اندازه گیری شده

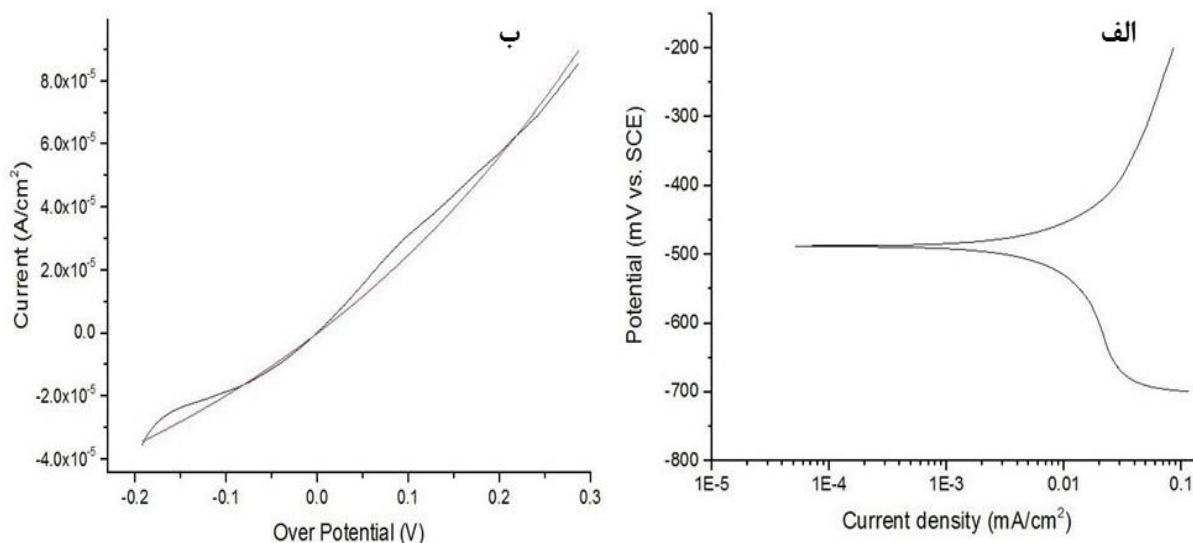
| | | | |
|------|------|------|------------------------|
| ۱۱۷۱ | ۱۱۷۶ | ۱۱۷۹ | مقاومت خاک (ohm.cm) |
| ۱۱۷۵ | | | مقدار میانگین (ohm.cm) |



شکل ۳- نحوه نصب رفرنس الکتروود دائمی و لوپ آندی



شکل ۴- فاصله رفرنس الکتروود و لوپ آندی از کف مخزن



شکل ۵- الف) منحنی پلاریزاسیون دینامیک فولاد A283 Grade C در محلول خاک شبیه سازی شده در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد ب) تطبیق رابطه باتلر-ولمر روی منحنی پلاریزاسیون دینامیک

جدول ۴- پارامترهای سینتیک الکتروود استخراج شده در آزمون پلاریزاسیون

| پارامتر | واحد | فولاد A283 C |
|----------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| پتانسیل تعادلی (E_{eq}) | نسبت به مس / سولفات مس (mV) | -۳۶۷ |
| دانشیته جریان تبدالی (i_0) | mA/cm^2 | 1.0×10^{-5} |
| ضریب انتقال آندی (α_a) | - | ۰/۱۹۳ |
| ضریب انتقال کاتدی (α_c) | - | ۰/۷۷ |

که به اندازه کافی تحت حفاظت نیستند، توسط مدل شبیه سازی، شناسایی شده‌اند و احتمالاً نشتی از همین مناطق رخ داده است. همان‌گونه که در شکل ۸ نشان داده شده است، به منظور بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی، مخزن کاستیک از روی بستر آندی برداشته شد تا بازرسی مورد نظر از کف مخزن انجام گیرد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که آندهای استفاده شده در زیر مخزن تنها می‌تواند ناحیه محدود از کف مخزن را تحت تاثیر قرار داده و حفاظت کند و سایر بخش‌های کف مخزن بدون حفاظت باقی بماند. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، تقریباً ۰/۵ متر از کناره‌ها و مرکز مخزن بدون حفاظت بوده که احتمالاً نشتی از همین مکان‌ها رخ داده است. پس از برداشتن مخزن از روی بستر آندی، کف مخزن مورد بازرسی قرار گرفت. بر اساس بررسی‌های

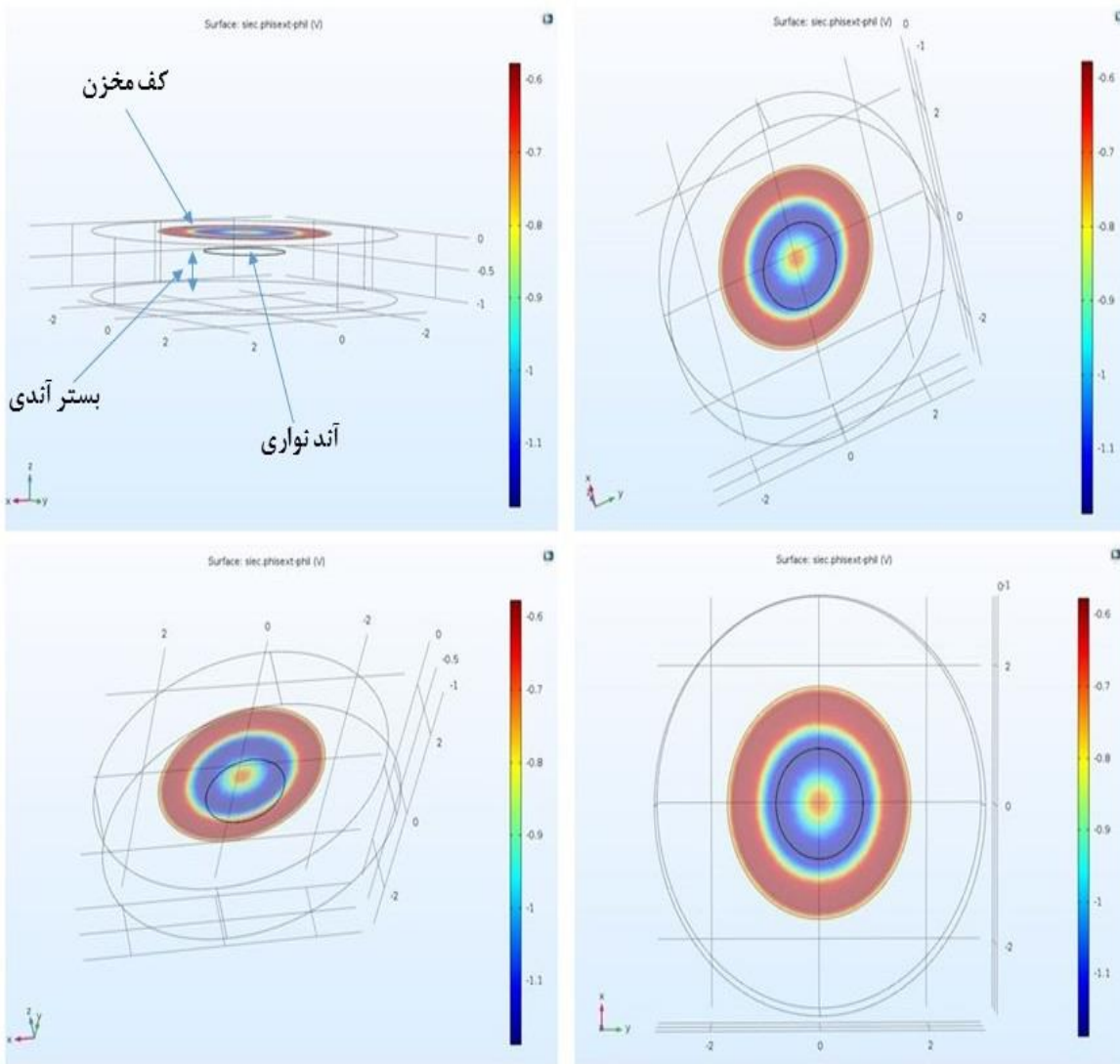
با توجه به اینکه آند در عمق ۰/۳ متری دفن شده است، محدوده‌ای از کف مخزن که تحت تاثیر آند قرار دارد، ۱/۲ متر است و با توجه به اینکه قطر مخزن کاستیک ۳/۴ متر است و آند حداکثر ۱/۲ متر از کف مخزن را تحت پوشش حفاظت کاتدی قرار می‌دهد؛ بنابراین بخش‌هایی از کف مخزن تحت حفاظت کاتدی نیست. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که نشتی کف مخزن به دلیل توزیع نامناسب جریان و عدم حفاظت کافی سایر بخش‌های کف مخزن می‌باشد درحالی که نتایج بازرسی‌ها از سال ۲۰۱۴ نشان می‌دهد که کف مخزن از حفاظت مطلوب برخوردار بوده است. از سوی دیگر، توزیع نامناسب جریان و عدم حفاظت کافی در نتیجه طراحی نامناسب و قرار دادن آند در فاصله نزدیک به کف مخزن است. مناطقی را

شده بود و این موضوع می‌تواند صحت نتایج شبیه‌سازی را نشان دهد.

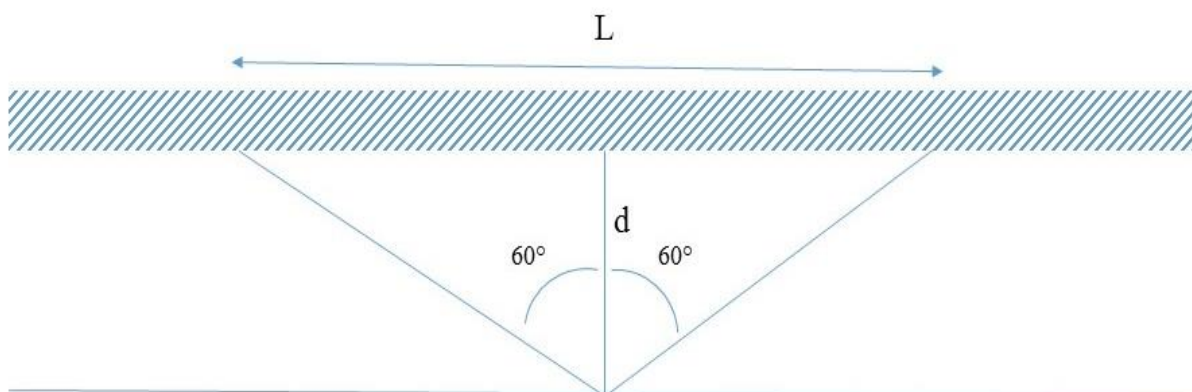
صورت گرفته و مطابق با شکل ۹، نشتی در کف مخزن دیده شد. نشتی در ناحیه‌ای از کف مخزن به وجود آمده بود که سطح حفاظت کمتری داشت که این نواحی با سطح حفاظت کمتر توسط نتایج شبیه‌سازی نشان داده

جدول ۵- نتایج پتانسیل کف مخزن نسبت به الکتروود مرجع مس / سولفات مس

| پتانسیل (میلی ولت) نسبت به الکتروود مرجع مس/سولفات مس | تاریخ | ردیف |
|-------------------------------------------------------|-----------|------|
| -۱۰۵۰ | 25-Oct-14 | ۱ |
| -۱۰۳۵ | 26-Dec-14 | ۲ |
| -۱۰۳۰ | 26-Feb-15 | ۳ |
| -۱۰۲۴ | 26-Apr-15 | ۴ |
| -۱۰۲۴ | 26-Jun-15 | ۵ |
| -۱۰۲۰ | 26-Aug-15 | ۶ |
| -۱۰۳۶ | 25-Oct-15 | ۷ |
| -۱۰۲۸ | 24-Dec-15 | ۸ |
| -۱۰۲۰ | 24-Feb-16 | ۹ |
| -۱۰۱۸ | 26-Apr-16 | ۱۰ |
| -۱۰۲۰ | 26-Jun-16 | ۱۱ |
| -۱۰۲۳ | 25-Aug-16 | ۱۲ |
| -۱۰۲۰ | 26-Oct-16 | ۱۳ |
| -۱۰۱۵ | 26-Dec-16 | ۱۴ |
| -۱۰۱۵ | 26-Feb-17 | ۱۵ |
| -۱۰۱۷ | 26-Apr-17 | ۱۶ |
| -۱۰۲۰ | 26-Jun-17 | ۱۷ |
| -۱۰۱۵ | 26-Aug-17 | ۱۸ |
| -۱۰۱۵ | 25-Oct-17 | ۱۹ |
| -۱۰۱۶ | 27-Dec-17 | ۲۰ |



شکل ۶- نتایج توزیع پتانسیل بر روی کف مخزن



شکل ۷- نحوه توزیع جریان با یک فاصله نزدیک آند به سازه



شکل ۸- مخزن کاستیک قرار گرفته در واحد ۱۲۹ پس از برداشتن از روی بستر آندی



شکل ۹- نشتی مشاهده شده بر روی کف مخزن

که مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله آند، محدوده توزیع پتانسیل افزایش پیدا نکرد و ثابت ماند؛ ولی توزیع پتانسیل یکنواخت‌تر شد. مطابق با رابطه ارائه شده توسط NACE، در فاصله ۰/۵ متری آند نسبت به کف مخزن، باید محدوده ۱/۷۳ متری از کف مخزن تحت تاثیر گرادیان ایجاد شده ناشی از آند قرار بگیرد و حفاظت شود درحالی که نتایج شبیه‌سازی خلاف این موضوع را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که در شکل ۱۰ (د) نشان داده شده است، با افزایش فاصله آند و قرار گرفتن در فاصله ۰/۶ متری نسبت به کف مخزن، آند توانایی حفاظت از کف مخزن را ندارد. به دلیل اینکه کف مخزن در گرادیان پتانسیل ایجاد شده ناشی از آند قرار ندارد.

تطابق ۹۴٪ نتایج شبیه‌سازی با نتایج رابطه (۶)، نشان دهنده صحت نتایج شبیه‌سازی است؛ اما باید توجه داشت که هر آند یک گرادیان پتانسیل ایجاد می‌کند که با اثربخشی سازه‌های حفاظت شده با فاصله گرفتن از گرادیان پتانسیل کاهش می‌یابد و به همین دلیل نیاز به توسعه رابطه (۶) است؛ زیرا همان‌طور که نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد، با افزایش فاصله آند از کف مخزن تا یک حد مشخص، محدوده‌ای که تحت حفاظت قرار می‌گیرد، گسترش پیدا می‌کند و سپس با دست یافتن به توزیع پتانسیل یکنواخت در محدوده اشاره شده، افزایش فاصله آند از کف مخزن، باعث می‌شود که کف مخزن در گرادیان ایجاد شده ناشی از آند قرار نگیرد و حفاظت نشود. شکل ۱۱ منحنی گرادیان پتانسیل آند با افزایش فاصله نسبت به سازه با استفاده از رابطه (۷) [۳۴] را نشان می‌دهد. مطابق با این منحنی زمانی که آند در فاصله ۰/۵ متری نسبت به کف مخزن قرار دارد، میزان گرادیان پتانسیل در حدود ۹۰۰ میلی‌ولت است.

$$V_d = \frac{0.038Ip}{\pi} \log_{10} \frac{(y + \sqrt{y^2 + d^2})}{d} \quad (7)$$

V_d : پتانسیل در فاصله d بر حسب ولت، ایجاد شده توسط جریان بستر آندی

I : جریان بستر آندی بر حسب آمپر

p : مقاومت زمین بر حسب اهم- سانتی متر

y : طول آند در زمین بر حسب فوت

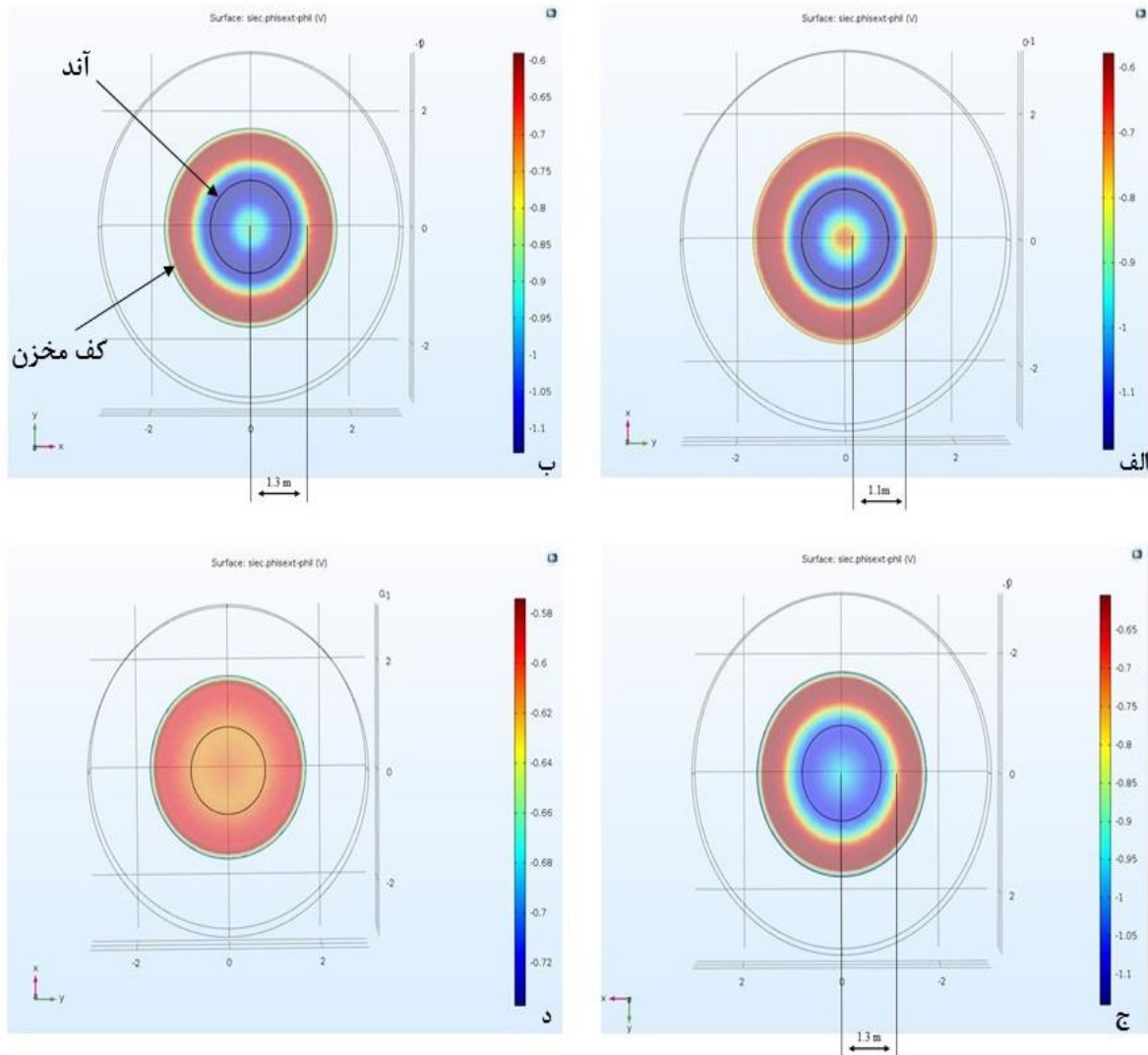
d : فاصله از آند بر حسب فوت

طراحی نامناسب سیستم حفاظت کاتدی کف مخزن، منجر به توزیع غیر یکنواخت پتانسیل در کف مخزن شده است. به منظور رفع این مشکل پیشنهاد می‌شود که فاصله آند از کف مخزن افزایش یابد (مطابق با رابطه (۶) که پیش‌تر در خصوص آن صحبت شد) و همچنین از ۲ لوپ آندی به جای ۱ لوپ آندی استفاده شود. با قرارگیری آند در یک فاصله نسبت به سازه، گرادیان پتانسیل به وجود می‌آید که با فاصله گرفتن آند نسبت به سازه شدت گرادیان بر روی سازه کاهش می‌یابد در حالی که رابطه (۶)، تنها نشان دهنده این است که با افزایش آند، محدوده وسیعی از سازه تحت تاثیر گرادیان ناشی از آند قرار می‌گیرد و اشاره‌ای به میزان شدت این گرادیان نشده است.

مطابق با طراحی، آند در فاصله ۰/۳ متری از کف مخزن قرار گرفته است در حالی که آند می‌تواند در فاصله بیش‌تر نسبت به کف مخزن قرار گیرد و ناحیه بیشتری از کف مخزن را تحت حفاظت قرار دهد. به منظور بررسی صحت این موضوع، شبیه‌سازی سیستم حفاظت کاتدی کف مخزن با افزایش فاصله آند از کف مخزن انجام شد. در مرحله اول آند در فاصله ۰/۳ متری از کف مخزن قرار گرفت. همان‌گونه که در شکل ۱۰ (الف) نشان داده شده است با این فاصله، حداقل می‌تواند فاصله ۱/۱ متری از کف مخزن را حفاظت کند، میزان محدوده حفاظت تعیین شده توسط نتایج شبیه سازی با رابطه توزیع جریان که برای تعیین محدوده تحت حفاظت توسط آند بود، مقایسه گردید که تنها ۶٪ اختلاف بین نتایج حاصل از شبیه سازی و رابطه توزیع جریان مشاهده گردید. آندها باید به گونه‌ای قرار داده شوند که با یکدیگر هم‌پوشانی داشته باشند و این اختلاف جزئی می‌تواند نادیده گرفته شود.

در حالت بعد، شبیه‌سازی با افزایش فاصله آند و در حالتی که آند در فاصله ۰/۴ متری از کف مخزن قرار داشت، انجام شد. نتیجه شبیه‌سازی در شکل ۱۰ (ب) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله آند، ناحیه بیشتری از کف مخزن تحت حفاظت قرار می‌گیرد.

فاصله آند نسبت به کف مخزن افزایش یافت و در فاصله ۰/۵ متری کف مخزن قرار گرفت و نتیجه شبیه‌سازی در شکل ۱۰ (ج) نشان داده شده است. همان‌طور



شکل ۱۰- شبیه سازی سیستم حفاظت کاتدی کف مخزن الف) در حالت قرار گیری آند در فاصله ۰٫۳ متری از کف مخزن، ب) در حالت قرار گیری آند در فاصله ۰٫۴ متری از کف مخزن، ج) در حالت قرار گیری آند در فاصله ۰٫۵ متری از کف مخزن، د) در حالت قرار گیری آند در فاصله ۰٫۶ متری از کف مخزن

پتانسیل کاهش قابل ملاحظه‌ای از خود نشان می‌دهد که این موضوع دقت نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

رابطه توسعه یافته (۸) با استفاده از رابطه رادبرگ [۳۴] به منظور محاسبه فاصله مناسب آند از کف مخزن و همچنین تعیین میزان محدوده تحت حفاظت نوشته شده است. این رابطه با شرایط مرزی بیان شده می‌تواند به منظور تکمیل رابطه (۶) استفاده گردد.

$$L = 2 \frac{2y10^{\left(\frac{V_d \pi y}{0.0391\rho}\right)}}{10^{2\left(\frac{V_d \pi y}{0.0391\rho}\right)} - 1} \tan 60 \text{ if } -850 \leq V_d \leq -1200 \quad (8)$$

L: ناحیه متأثر از آند

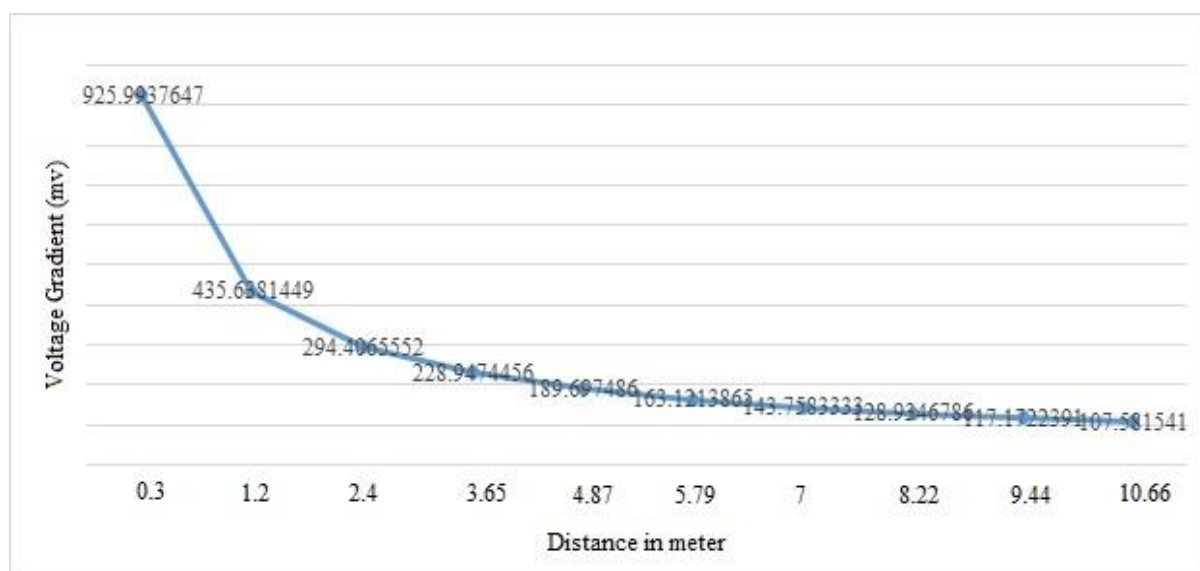
مطابق با نتایج شبیه‌سازی، زمانی که آند در فاصله ۰٫۳ تا ۰٫۵ متری از کف مخزن قرار می‌گیرد با توجه به اینکه گرادیان پتانسیل ایجاد شده، شدت کافی را دارد و می‌تواند کف مخزن را تحت حفاظت قرار دهد. با افزایش این فاصله، میزان حفاظت به دلیل کاهش شدت گرادیان بر روی کف مخزن کاهش می‌یابد. نمودار ارائه شده در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که در فاصله ۰٫۳ متری آند از کف مخزن، گرادیان پتانسیل ۹۵۰ میلی ولت است که با افزایش فاصله آند از کف مخزن به فاصله ۰٫۵ متری این مقدار به ۹۰۰ میلی ولت کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش فاصله آند از کف مخزن به ۰٫۶ متر، گرادیان

کف مخزن که می‌تواند در محدوده معیار حفاظت کاتدی قرار گیرد، تعیین شد. تطابق ۹۴٪ نتایج شبیه‌سازی با نتایج میدانی، دقت و صحت نتایج را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، آند توانایی حفاظت ناحیه‌ای محدود از کف مخزن را دارد. این محدوده توسط رابطه توزیع جریان ارائه شده توسط NACE CP3 محاسبه گردید که تقریباً برابر با نتایج حاصل از شبیه‌سازی بود. براساس این رابطه، با افزایش فاصله آند از کف مخزن، محدوده وسیع‌تری از کف مخزن تحت حفاظت قرار می‌گیرد؛ اما نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش فاصله آند از کف مخزن، تنها تا یک فاصله معین، محدوده تحت حفاظت افزایش می‌یابد و پس از آن با افزایش فاصله آند، به دلیل خارج شدن کف مخزن از گرادیان پتانسیل ناشی از آند، کف مخزن دیگر حفاظت نمی‌شود و به همین دلیل این رابطه قابل استفاده نمی‌باشد. بنابراین، این رابطه با استفاده از یک رابطه تکمیلی و تعریف شرایط مرزی اصلاح گردید که بازدهی بالاتری نسبت به رابطه قبلی دارد و می‌توان از آن در جهت تعیین فاصله مناسب آند از کف مخزن و همچنین تعیین فاصله آند تا آند استفاده نمود.

بر اساس رابطه (۶)، با افزایش فاصله آند از کف مخزن، محدوده تحت حفاظت کف مخزن افزایش می‌یابد؛ اما نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این رابطه تا زمانی قابل پذیرش است که کف مخزن از گرادیان پتانسیل ایجاد شده توسط آند خارج نشود. به همین دلیل رابطه (۶) نیاز به تکمیل شدن دارد. براساس رابطه توسعه یافته (۷)، جهت حفاظت نواحی بیش‌تر از کف مخزن، آند باید در فاصله کمی نسبت به کف مخزن قرار گیرد. به منظور تعیین فاصله مناسب آند از کف مخزن با بیش‌ترین میزان محدوده تحت حفاظت، می‌توان از رابطه توسعه یافته استفاده نمود. رابطه با شرط مرزی تعریف شده در بالا نشان می‌دهد که با افزایش فاصله آند از کف مخزن، امکان دستیابی به بالاترین محدوده حفاظت وجود دارد تا زمانی که سازه از گرادیان پتانسیل ایجاد شده توسط آند خارج نشده و مطابق با معیار حفاظت کاتدی باشد.

نتیجه گیری

در این پژوهش، با در نظر گرفتن رابطه توزیع جریان با یک فاصله نزدیک آند به سازه در حفاظت کاتدی و استفاده از نرم افزار شبیه‌سازی بر پایه المان محدود، محدوده توزیع پتانسیل و همچنین فاصله مناسب آند از



شکل ۱۱- منحنی گرادیان آند در فاصله ۰,۵ متری نسبت به کف مخزن

References:

- [1] P.A. Collins, K.C. Garrity, C.J. Pieper, R.P. Siegel, P.J. Smith, G.E. Tesch (Eds.), *Aboveground Storage Tanks: Current Issues—Design, Operations, Maintenance, Inspection and the Environment*, NACE, Houston, TX, 1992.
- [2] US EPA, Title 40 code of federal regulations, parts 280 and 281, September 1988.
- [3] L. Koszewski, Retrofitting asphalt storage tanks with an improved cathodic protection system, *Materials Performance* 38 (6) (1999) 20–24.
- [4] E. Kurgan, “Influence of electrolyte conductivity on cathodic protection with sacrificial anode,” *Acta Technica CSAV*, vol. 49, 365–382, 2004(4).
- [5] R. G. Kasper, M. G. April, *Corrosion* 1983, 39, 181.
- [6] D.P. Riemer, M.E. Orazem, *Corros. Sci.* 47 (2005): p. 849–868.
- [7] C.A. Brebbia, J. Dominguez, Boundary element methods for potential problems, *Applied Mathematical Modelling* 1 (7) (1977) 371–378.
- [8] S. Aoki, K. Kishimoto, M. Sakata, Boundary element analysis of galvanic corrosion, in: C.A. Brebbia, G. Maier (Eds.), *Boundary Elements VII*, vol. 1, Springer-Verlag, Heidelberg, 1985, pp. 73–83.
- [9] J.C.F. Telles, W.J. Mansur, L.C. Wrobel, M.G. Marinho, Numerical simulation of a cathodically protected semisubmersible platform using the procat system, *Corrosion* 46 (6) (1990) 513–518.
- [10] N. Zamani, J. Chuang, Optimal-control of current in a cathodic protection system—a numerical investigation, *Optimal Control Applications Methods* 8 (4) (1987) 339–350.
- [11] F. Brichau, J. Deconinck, Numerical model for cathodic protection of buried pipes, *Corrosion* 50 (1) (1994) 39–49.
- [12] F. Brichau, J. Deconinck, T. Driesens, Modeling of underground cathodic protection stray currents, *Corrosion* 52 (1996) 480–488.
- [13] S. Aoki, K. Amaya, Optimization of cathodic protection system by BEM, *Engineering Analysis with Boundary Elements* 19 (2) (1997) 147–156.
- [14] S. Aoki, K. Amaya, M. Miyasaka, Boundary element analysis of cathodic protection for complicated structures, in: M.E. Orazem (Ed.), *Proceedings of the NACE99 Topical Research Symposium: Cathodic Protection: Modeling and Experiment*, NACE, NACE International, Houston, TX, 1999, pp. 45–65.
- [15] D.P. Riemer, M.E. Orazem, Application of boundary element models to predict effectiveness of coupons for assessing cathodic protection of buried structures, *Corrosion* 56 (8) (2000) 794–800.
- [16] A. Demoz, W. Friesen, *Corrosion* 64, 2 (2008): p. 138–142.
- [17] B. Bazzoni, S. Lorenzi, P. Marcassoli, and T. Pastore, “Current and Potential Distribution Modeling for Cathodic Protection of Tank Bottoms,” *Corrosion—Vol. 67, No. 2* (2011)
- [18] A.W. Peabody, “Control of Pipeline Corrosion,” 2nd ed., Beijing: Chemical Industry Press, 2004, pp. 5–6, 21–46.
- [19] Comsol Multiphysics 5.2a, Application Library, Corrosion Module/Cathodic Protection.
- [20] R.D. Strommen, R.S. Munn (Eds.), *Computer Modelling in Corrosion*, ASTM STP 1154, Philadelphia, PA, USA, 1992, pp. 229–447.

- [21] R.S. Munn, O.F. Devereux, Numerical modelling and solution of galvanic corrosion systems 1. Governing differential-formula and electrodicboundaryconditions, Corrosion 47 (1991) 612–618.
- [22] J.X. Jia, G. Song, A. Atrens, D.S. John, J. Baynham, G. Chandler, Evaluation of the BEASY program using linear and piecewise linear approaches for the boundary conditions, Mater. Corros. 55 (2004) 845–852.
- [23] A. Canelas, J. Herskovits, J.C.F. Telles, Shape optimization using the boundary element method and a SAND interior point algorithm for constrained optimization, Comput. Struct. 86 (2008) 1517–1526.
- [24] V.G. DeGiorgi, S.A. Wimmer, Geometric details and modelling accuracy requirements for shipboard impressed current cathodic protection system modelling, Eng. Anal. Boundary Elem. 29 (2005) 15–28.
- [25] S.H. Lee, D.W. Townley, K.O. Eshun, A boundary element model of cathodic well casing protection, J. Comput. Phys. 107 (1993) 338–347.
- [26] R. Montoya, O. Rendón, J. Genesca, Mathematical simulation of cathodic protection system by finite element method, Mater. Corros. 56 (2005) 404–411.
- [27] P. Lambert, P.S. Mangat, F.J. O’Flaherty, Y.-Y. Wu, Influence of resistivity on current and potential distribution of cathodic protection systems for steel framed masonry structures, Corros. Eng. Sci. Technol. 43 (2008) 16–22.
- [28] A. J. Denny, Principles and prevention of corrosion, Prentice Hall, New York 1996, 440 – 449.
- [29] R. D. Strommen, In: Computer Modeling in Corrosion (Ed.R.S. Munn), STP 1154, ASTM, Philadelphia 1992, 229 – 447.
- [30] Dhatt G, Touzot G. Finite element method. John Wiley & Sons; 2012 Dec 27.
- [31] Zienkiewicz OC, Taylor RL, Zienkiewicz OC, Taylor RL. The finite element method. London: McGraw-hill; 1977.
- [32] G. Gabetta, "Transgranular stress corrosion cracking of low-alloy steels in diluted solutions," Corrosion, 1997, Vol. 53, pp. 516-524.
- [33] NACE International, Cathodic Protection Technologist, NACE, 2005, 4:68 – 4:70.
- [34] A.W. Peabody, "Peabody’s Control of Pipeline Corrosion," NACE International, 2011, Second Edition, pp. 29-33.