

محاسبه مقاومت الکتریکی سیستم حفاظت کاتدی داخلی تانک آب آتش‌نشانی با استفاده از روش المان محدود

هادی رحیمی^۱، محمد لونی^۲، فریدون قرلجه^{۳*}

^۱مدیر بخش برق و مخابرات، ^۲کارشناس ارشد، شرکت نارگان، تهران، ایران

^۳کارشناس ارشد، شرکت ال پی آی، ایرلند جنوبی

* نویسنده مسئول: f.ghezeljeh@nargan.com

تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۱۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۰

چکیده

سطوح داخلی تانک‌های آب آتش‌نشانی به دلیل تماس با آب در معرض خوردگی قرار دارند. در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی علاوه بر استفاده از پوشش عایقی از سیستم حفاظت کاتدی جهت کاهش و یا حذف خوردگی داخلی تانک‌ها استفاده می‌نماییم، با توجه به ابعاد تانک‌های آب آتش‌نشانی در صنایع پتروشیمی و پالایشگاه‌ها و همچنین نیاز به چگالی جریان الکتریکی بالا از سیستم حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان جهت حفاظت سطوح داخلی تانک‌ها استفاده می‌گردد، بدین منظور معمولاً از آندهای اکسید فلزی مختلط لوله‌ای شکل (Tubular MMO) که به صورت رشته در آمده‌اند بهره گرفته می‌شود. جهت توزیع یکنواخت جریان و پتانسیل، این رشته‌ها بر روی یک دایره با فاصله از دیواره تانک نصب می‌شوند. با توجه به فاصله کم آندها از دیواره و کف تانک استفاده از روابط مرسوم در محاسبه مقاومت الکتریکی که در آن نقطه مرجع در بی نهایت در نظر گرفته می‌شود، باعث ایجاد خطا در محاسبات خواهد گردید. همچنین نحوه توزیع آندها در طول رشته در روابط معمول در نظر گرفته نشده است. در سیستم حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان، مقاومت سیستم آندی بر سائز ترانس - رکتیفایر تاثیر می‌گذارد، در رابطه با حفاظت سطوح داخلی تانک‌ها این موضوع با توجه به تاثیری که در تعداد و موقعیت نازل‌ها بر روی سقف تانک جهت آویختن رشته‌های آندی می‌گذارد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این تحقیق از آنالیز المان محدود با استفاده از نرم افزار COMSOL جهت محاسبه مقاومت سیستم آندی استفاده گردید همچنین رابطه‌ای ریاضی جهت محاسبه مقاومت سیستم آندی توسعه یافت. نتایج نشان داد خطا در محاسبه مقاومت با استفاده از روابط مرسوم بیشتر از ۱۷٪ در مقایسه با نتایج حاصل از آنالیز به روش المان محدود می‌باشد.

کلیدواژه: سطح داخلی تانک، رشته آندی، مقاومت سیستم آندی، آند اکسید فلزی مختلط لوله ای شکل، المان محدود

Case Study

Fire Water Storage Tank Internal Cathodic Protection System Resistance Calculation Using Finite Element Analysis

H.Rahimi¹, M.Loni², F.Ghezeljeh^{*3}

¹ Manger of Electrical and Departman, ³ Senior Engineer, NARGAN Company, Tehran, Iran

² Senior Engineer, LPI Group, Dublin, Ireland

* **Corresponding Author:** f.ghezeljeh@nargan.com

Submission: 2022, 03, 11 **Acceptance:** 2022, 06, 10

Abstract

For fire water storage tanks internal corrosion will occur due to internal surfaces are in contact with water. In oil and gas industry in addition of coating, cathodic protection is used to reduce or mitigate internal corrosion. According to dimensions of fire water tanks in petrochemical plants and refineries and high current density requirements, impressed current system used for tanks internal protection. Generally suspended MMO tubular anodes in string form used. These strings placed on circle with some offset from tank wall for uniform distribution of current and potential. Due to close distance between anodes to tank shell and bottom plates, using conventional formulas that assume reference potential at infinite distance will introduce error in calculated resistance, also anodes distribution along string is not addressed in conventional methods. Anode system resistance affect transformer-rectifier size in impressed current system, for tank internal cathodic protection this matter is important due to effect on nozzles quantity and location for suspending anode strings that affect tank construction. In this paper finite element analysis by COMSOL software and mathematical derivation used for calculation of anode system resistance and results compared by conventional methods. According to the results it is observed that error in calculated anode system resistance by conventional methods is more than 17% in comparison with finite element analysis results.

Keywords: Tank internal, Anode string, Anode system resistance, MMO tubular anode, Finite element

۱- مقدمه

در پلنت‌های پتروشیمی و پالایشگاه‌ها، در مخازن و تانک‌های حاوی آب از حفاظت کاتدی به همراه پوشش و رنگ جهت مقاله با خوردگی بهره گرفته می‌شود. در مورد تانک‌ها و مخازن حاوی هیدروکربن خالص با توجه به اینکه این سیالات معمولاً خورنده نیستند در نتیجه نیازی به کنترل خوردگی سطوح داخلی نمی‌باشد. در مورد تانک‌ها و مخازن حاوی آب، با توجه به ابعاد تانک و مشخصات آب (از قبیل مقاومت الکتریکی، دما، اسیدیته و غلظت یون‌های اکسیژن و کلر) ممکن است از سیستم حفاظت کاتدی با استفاده از آندهای فدا شونده و یا سیستم به روش اعمال جریان استفاده گردد. استفاده از سیستم حفاظت کاتدی باعث کاهش تعمیرات و همچنین افزایش دوره‌های زمانی پوشش‌دهی و یا رنگ‌آمیزی مجدد سطوح خواهد شد [۱-۳].

در این تحقیق به بررسی سیستم حفاظت کاتدی سطوح داخلی تانک‌ها به روش اعمال جریان، محاسبه مقاومت سیستم آندی و آرایش آن‌ها پرداختیم. بدین منظور از چندین آند اکسید فلزی مختلط لوله‌ای شکل با طول کوتاه که بر روی طناب از جنس پلی پروپیلن قرار می‌گیرند و تشکیل یک رشته می‌دهند استفاده گردید. تعداد آندهای اکسید فلزی مختلط در هر رشته و همچنین تعداد رشته‌ها در مرحله اول با توجه به جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی تعیین می‌گردد. جهت توزیع یکنواخت جریان و پتانسیل چندین رشته استفاده شد، فاصله رشته‌ها از دیواره تانک به گونه‌ای تعیین می‌گردد که حفاظت اضافی باعث جدایش پوشش و یا تاول زدن رنگ سطوح داخلی نگردد، به طور معمول قطر دایره‌ای که رشته‌ها بر روی آن قرار می‌گیرند ۱ تا ۳ متر کمتر از قطر تانک در نظر گرفته می‌شود. این رشته‌ها به سقف و کف تانک محکم می‌شوند تا از حرکت و تاب خوردن رشته‌های آندی در هنگام پر و خالی شدن تانک جلوگیری شود، آرایش رشته‌های آندی در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. با توجه به تغییرات مقاومت الکترولیت (آب) و همچنین مساحت ناحیه تحت پوشش (به دلیل متغیر بودن سطح آب در تانک) بایستی از سیستم حفاظت کاتدی اتوماتیک استفاده گردد، بدین منظور الکترومتر مرجع جهت کنترل

اتوماتیک جریان خروجی از ترانس - رکتیفایر باید پایین‌تر از حداقل سطح قابل انتظار الکترولیت در تانک قرار گیرد [۴]. در یک روش ساده جهت محاسبه مقاومت سیستم آندی، رشته‌های آندی که بر روی محیط یک دایره قرار گرفته‌اند را می‌توانیم یک استوانه کامل در نظر بگیریم، این استوانه با تانک هم محور بوده در نتیجه می‌توان مقاومت را از رابطه (۱) محاسبه کرد.

$$R = \frac{\rho}{2\pi H} \ln \frac{D}{D_A} \quad (1)$$

که در آن R مقاومت سیستم آندی، ρ مقاومت ویژه الکترولیت (آب)، H ارتفاع الکترولیت در داخل تانک، D قطر تانک و D_A قطر دایره مربوط به رشته‌های آندی می‌باشد. با فرض نصب ترانس - رکتیفایر در نزدیکی تانک می‌توان از مقاومت الکتریکی کابل‌های مثبت و منفی به دلیل طول کم صرف نظر نمود، همچنین مقاومت پوشش و رنگ از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

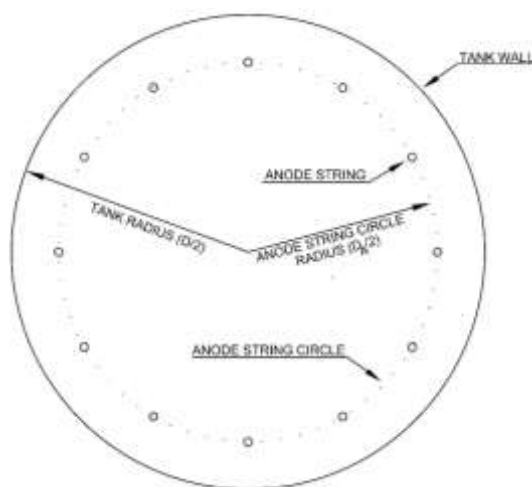
$$R_{coating} = \frac{\rho_c t}{2\pi DH} \quad (2)$$

که در آن ρ_c ، t، D و H به ترتیب مقاومت ویژه پوشش (رنگ)، ضخامت رنگ (پوشش)، قطر تانک و ارتفاع الکترولیت در تانک می‌باشد. با توجه به اینکه ضخامت رنگ (پوشش) در مقایسه با قطر تانک و ارتفاع آب بسیار ناچیز است می‌توان از مقاومت پوشش عایقی نیز صرف نظر نمود، در نتیجه مقاومت کل سیستم تقریباً با مقاومت سیستم آندی برابر خواهد بود. مقدار مقاومت محاسبه شده با استفاده از رابطه (۱) حداقل مقدار مقاومتی است که می‌توان به آن دست یافت، در عمل مقاومت سیستم آندی بیشتر از مقدار محاسبه شده با رابطه (۱) خواهد بود. حداقل طول آند مورد نیاز با توجه به جریان الکتریکی مورد نیاز سیستم حفاظت کاتدی و جریان خروجی از هر آند اکسید فلزی مختلط لوله‌ای شکل که توسط سازنده داده می‌شود تعیین می‌گردد. در محاسبه جریان مورد نیاز، مساحت تحت پوشش، چگالی جریان، دمای کاری تانک و بازدهی پوشش (رنگ) پارامترهای اثرگذار می‌باشند. در تانک‌های آب آتش‌نشانی

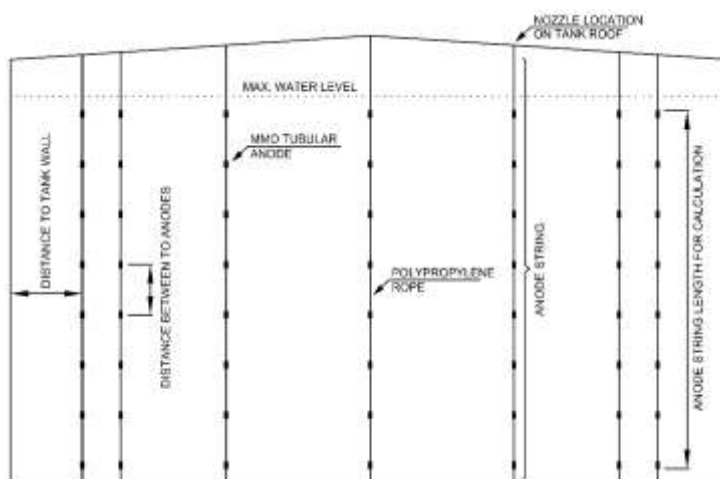
$$R \leq \frac{V_{TR}}{I} \quad (3)$$

که در آن V_{TR} حداکثر ولتاژ خروجی ترانس - رکتیفایر و I جریان مورد نیاز سیستم حفاظت کاتدی می‌باشد، در نتیجه اگر حداقل مقدار آند مورد نیاز رابطه (۳) را بر آورده نسازد، لازم است تعداد رشته‌های آندی آویخته شده از سقف تانک را افزایش دهیم.

مورد استفاده در صنایع نفت و گاز به دلیل ابعاد بالای تانک و چگالی جریان مورد نیاز بالا (۱۰۰ میلی آمپر بر متر مربع) جهت برآورده ساختن معیار حفاظت کاتدی نیاز به استفاده از سیستم حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان می‌باشد [۴-۵]. به دلایل ایمنی، حداکثر ولتاژ خروجی ترانس - رکتیفایرها توسط مراجع و استانداردها محدود گردیده، بنابراین می‌توان حداکثر مقدار قابل پذیرش مقاومت سیستم را از رابطه ۳ به دست آورد:



شکل ۱ - آرایش رشته‌های آندی جهت سیستم حفاظت کاتدی سطوح داخلی تانک به روش اعمال جریان [نویسنده]



شکل ۲ - دید جانبی از رشته‌های آندی جهت سیستم حفاظت کاتدی سطوح داخلی تانک به روش اعمال جریان
[نویسنده]

$$V_r = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (10)$$

برای N رشته آندی که به پتانسیل V متصل می‌باشند و جریان تزریقی I ، با توجه به تقارن هندسی، جریان در هر کدام از رشته‌ها برابر I/N خواهد بود، بنابراین پتانسیل هر رشته ناشی از جریان خودش و سایر رشته‌ها با اعمال روابط (۹) و (۱۰) به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$V = \frac{\rho}{2\pi a} \frac{I}{N} + \frac{\rho}{2\pi S_{12}} \frac{I}{N} + \dots + \frac{\rho}{2\pi S_{1N}} \frac{I}{N} \quad (11)$$

در نتیجه مقاومت سیستم آندی به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{\rho}{2\pi a N} \sum_{i=1}^N \left(1 + \frac{a}{S_{1i}}\right) = \frac{R_{string}}{N} \times \left(\sum_{i=1}^N \left\{1 + \frac{a}{S_{1i}}\right\}\right) \quad (12)$$

که در آن S_{1i} فاصله بین رشته آندی ۱ و رشته آندی i می‌باشد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S_{1i} = D_A \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = D_A \sin\left(\frac{180^\circ}{N}(i-1)\right) \quad (13)$$

۴- مدل کردن سیستم حفاظت کاتدی جهت آنالیز المان محدود:

توزیع پتانسیل و جریان الکتریکی در الکترولیت همگن با استفاده از معادله لاپلاس و قانون اهم تعیین می‌گردد:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (14)$$

$$i = \frac{-1}{\rho} \nabla V \quad (15)$$

که در آن V پتانسیل، i چگالی جریان و ρ مقاومت ویژه الکترولیت (آب) است. جهت حل معادلات دیفرانسیل فوق و به دست آوردن توزیع پتانسیل و جریان الکتریکی از نرم افزار COMSOL Multiphysics استفاده شد. دیواره تانک با پتانسیل صفر و آندها با پتانسیل V به عنوان شرایط مرزی تعیین گردیدند. مش‌بندی هندسه سه بعدی با استفاده از المان‌های سه ضلعی و چهار ضلعی و رشته‌های آندی آویخته شده از سقف تانک در شکل ۳ قابل مشاهده است.

۲- بررسی روابط متداول در محاسبه مقاومت سیستم آندی:

مقاومت یک رشته آندی مجزا که به صورت عمودی در داخل الکترولیت قرار می‌گیرد از رابطه (۴) قابل محاسبه است [۶]:

$$R_{string} = \frac{\rho}{2\pi L} \left\{ \ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1 \right\} \quad (4)$$

مقاومت سیستمی متشکل از N رشته آندی که به صورت عمودی در داخل الکترولیت قرار می‌گیرند با صرف نظر از اثر تداخلی آندها بر یکدیگر از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$R = \frac{R_{string}}{N} = \frac{\rho}{2\pi LN} \left\{ \ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1 \right\} \quad (5)$$

اثر تداخلی آندها بر مقاومت سیستم آندی در رابطه (۶) در نظر گرفته شده است:

$$R = \frac{\rho}{2\pi LN} \left\{ \ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1 + \frac{2L}{S} \ln(0.66N) \right\} \quad (6)$$

که در آن L طول رشته آندی، N تعداد رشته‌های آندی، d قطر آند، ρ مقاومت ویژه الکترولیت، S فاصله آندها از یکدیگر، R_{string} مقاومت هر رشته آندی و R مقاومت الکتریکی کل سیستم می‌باشد.

۳- محاسبه رابطه ریاضی با استفاده از الکتروود نیمکره معادل:

مقاومت الکتروود به شکل نیمکره نسبت به زمین راه دور از رابطه (۷) به دست می‌آید [۷]:

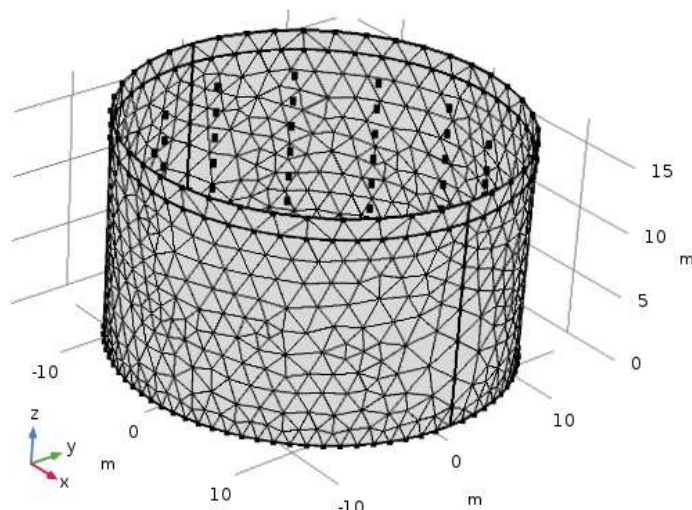
$$R_h = \frac{\rho}{2\pi a} \quad (7)$$

در نتیجه شعاع الکتروود نیمکره معادل هر رشته آندی از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$a = \frac{\rho}{2\pi R_{string}} \quad (8)$$

که در آن a شعاع نیمکره، ρ مقاومت ویژه الکترولیت و R_{string} مقاومت رشته آندی می‌باشد که از رابطه (۴) به دست می‌آید. پتانسیل سطح الکتروود به شکل نیمکره و همچنین نقطه‌ای به فاصله r از مرکز الکتروود نسبت به نقطه مرجع (که در پی‌نهایت فرض می‌شود) ناشی از تزریق جریان I به ترتیب از روابط (۹) و (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$V_a = \frac{\rho I}{2\pi a} \quad (9)$$

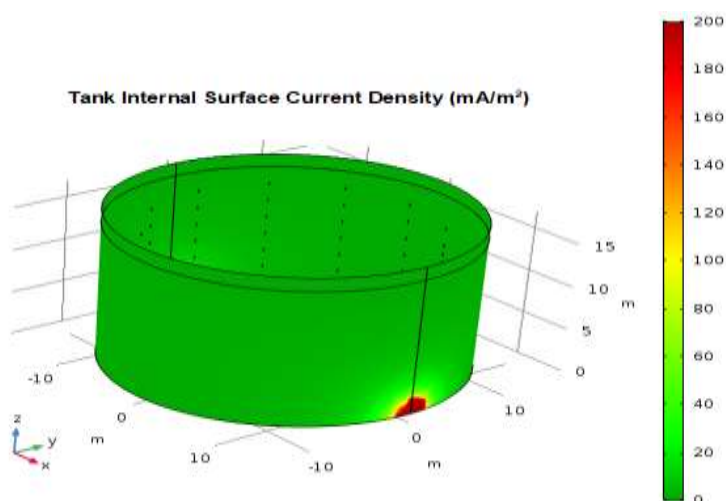


شکل ۳ - مش بندی هندسه با استفاده از المان‌های سه و چهار ضلعی

۴- مطالعه موردی:

در این تحقیق، تانک آب آتش‌نشانی مربوط به پلنت C2+ Recovery واقع در عسلویه مورد مطالعه قرار گرفت. قطر و ارتفاع تانک به ترتیب ۳۰ و ۱۶٫۹ متر می‌باشد و کف تانک در تماس با آسفالت قرار دارد. همچنین پایین‌ترین و بالاترین ارتفاع آب در تانک به ترتیب ۲ و ۱۵٫۴ متر می‌باشد، بنابراین آندهای اکسید فلزی مختلط با طول کوتاه در هر رشته آندی باید پایین‌تر از بالاترین سطح آب قرار گیرند. همچنین حداقل یک آند و الکتروود مرجع پایین‌تر از کمترین ارتفاع آب نصب گردد. مقاومت ویژه آب ۳۰ اهم‌متر گزارش گردید. جنس بدنه و کف تانک A-283C و حداکثر دمای

کاری تانک ۴۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. آرایش آندها برای این تانک در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است. از ۱۲ رشته آندی با فاصله ۳ متر از دیواره تانک جهت سیستم حفاظت کاتدی استفاده شد، هر رشته آندی شامل ۸ عدد آند اکسید فلزی مختلط لوله‌ای شکل (Tubular MMO) به طول ۲۵۰ میلی‌متر و قطر ۲۵ میلی‌متر است که فاصله مراکز این آندها بر روی رشته آندی از همدیگر ۲ متر می‌باشد. در شکل ۴ توزیع جریان بر روی سطوح داخلی تانک نشان داده شده است، مشاهده گردید چگالی جریان در حوالی نقطه اتصال کابل منفی به بدنه تانک (drain point) بیشتر می‌باشد.



شکل ۴ - توزیع جریان الکتریکی بر روی سطوح داخلی تانک

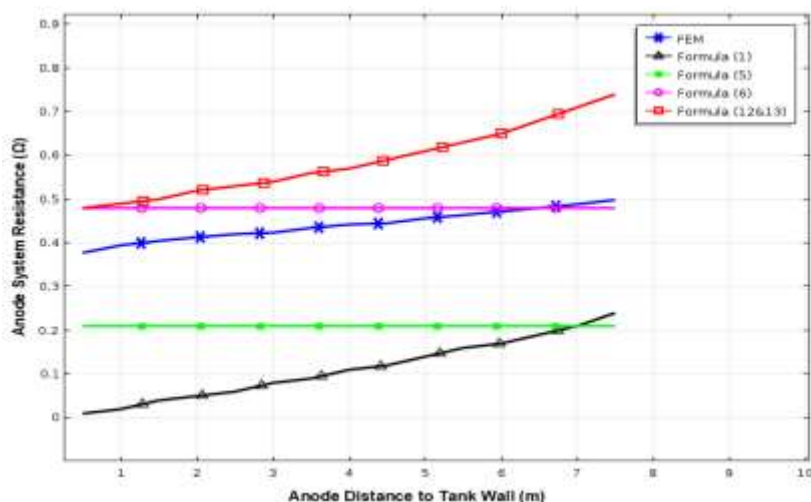
۵- نتایج و بحث:

برای تانک تحت مطالعه، مقاومت الکتریکی سیستم آندی با روابط و روش‌های مختلف بحث شده در این تحقیق محاسبه و نتایج در جدول شماره ۱ آورده شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد در محاسبه مقاومت الکتریکی سیستم آندی نباید از فرمول‌های (۱) و (۵) استفاده کرد، به بیان دیگر در نظر گرفتن رشته‌های آندی واقع بر محیط یک دایره به صورت یک استوانه کامل و همچنین صرف نظر کردن از اثرات تداخلی آندها بر یکدیگر فرضیات مناسبی نمی‌باشند. نتایج حاصل از روابط (۶) و (۱۲ و ۱۳) نشان داد مقاومت به دست آمده به

ترتیب ۱۷ و ۳۱ درصد خطا نسبت به روش المان محدود دارد. نکته مهم در استفاده از فرمول‌های (۶) و (۱۲ و ۱۳) مقداری است که به عنوان طول رشته آندی در نظر گرفته می‌شود. بر اساس نتایج حاصل از جدول ۱ و شکل‌های ۵ و ۶ در نظر گرفتن فاصله بین مرکز بالاترین آند و پایین‌ترین آند نصب شده در هر رشته به عنوان طول آند منجر به نتایج قابل قبول می‌گردد. همچنین مقاومت سیستم آندی برای فواصل مختلف رشته آندی از دیواره تانک برای آب با مقاومت ۳۰ اهم‌تر از روش‌های ارایه شده در این تحقیق محاسبه و در شکل ۶ نشان داده شد.

جدول ۱ - مقاومت محاسبه شده برای سیستم آندی با فرمول‌ها و روش‌های مختلف (برای آب با مقاومت ویژه ۳۰ اهم‌متر و فاصله ۳ متری رشته‌های آندی از دیواره تانک)

مقاومت نسبت به روش المان محدود بر حسب درصد	مقدار محاسبه شده مقاومت سیستم آندی بر حسب اهم	فرمول و یا روش مورد استفاده
۱۹٫۵	۰٫۰۸	۱
۵۱٫۲	۰٫۲۱	۵
۱۱۷	۰٫۴۸	۶
۱۳۱	۰٫۵۴	۱۲ و ۱۳
۱۰۰	۰٫۴۱	روش المان محدود

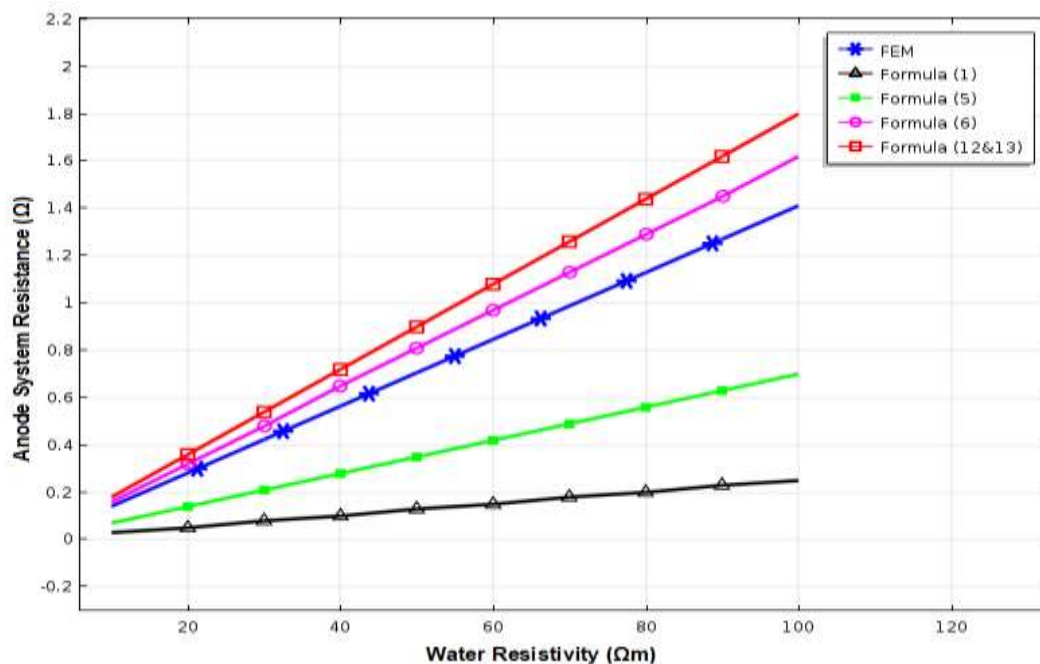


شکل ۶ - مقاومت سیستم آندی برای فواصل متفاوت رشته آندی از دیواره تانک (برای مقاومت ویژه آب ۳۰ اهم‌متر)

می‌تواند انتخاب مناسبی باشد. بر اساس نتایج حاصل از شکل ۷ و روابط بحث شده در این تحقیق، مشاهده گردید رابطه خطی بین مقاومت ویژه آب و مقاومت سیستم آندی وجود دارد، در نتیجه محدوده تغییرات مقاومت الکتریکی ویژه آب (با توجه به تامین آب از منابع مختلف در طول عمر تانک) بایستی در طراحی سیستم حفاظت کاتدی سطوح داخلی تانک مورد توجه قرار گیرد.

بر اساس نتایج حاصله دو نقطه ضعف در فرمول‌ها و روابط متداول مورد استفاده مشاهده شد، مورد اول در نظر نگرفتن فاصله رشته‌های آندی از دیواره تانک در این فرمول‌ها می‌باشد و مورد دوم عدم حساسیت این فرمول‌ها و روابط به تعداد و توزیع آندهای اکسید فلزی مختلط لوله‌ای شکل در طول هر رشته است، در نتیجه برای حذف و کاهش خطا در طراحی سیستم حفاظت کاتدی سطوح داخلی تانک‌ها لازم است از روش آنالیز المان محدود استفاده گردد.

علاوه بر این مقاومت سیستم آندی برای رشته‌های آندی با فاصله ۳ متر از دیواره تانک برای آب با مقاومت الکتریکی ویژه در محدوده ۳۰ اهم‌متر تا ۱۰۰ اهم‌متر محاسبه گردید و نتایج در شکل شماره ۷ نشان داده شد. بر اساس نتایج حاصل از روش المان محدود که در شکل ۶ نشان داده شد، همان‌طور که انتظار می‌رفت مقاومت سیستم آندی با افزایش فاصله رشته‌های آندی از دیواره تانک افزایش می‌یابد این در حالی است که در فرمول‌های (۵) و (۶) پارامتری برای در نظر گرفتن فاصله آند از دیواره تانک در نظر گرفته نشده که این امر منجر به مقاومت با مقدار ثابت برای فواصل مختلف رشته آندی از دیواره تانک می‌گردد. از رابطه شماره (۵) به دلیل خطای زیاد و همچنین در نظر نگرفتن فاصله آندها از دیواره تانک نباید در طراحی سیستم حفاظت کاتدی سطوح داخلی تانک استفاده گردد. در طراحی سیستم حفاظت کاتدی بدون استفاده از روش آنالیز المان محدود، متوسط مقادیر مقاومت الکتریکی محاسبه شده از فرمول‌های (۶) و (۱۲) و (۱۳)



شکل ۷ - مقاومت سیستم آندی برای مقادیر متفاوت مقاومت الکتریکی ویژه آب
(برای فاصله ۳ متری رشته‌های آندی از دیواره تانک)

نتیجه‌گیری

در این تحقیق نشان داده شد، فرمول‌های متداول و مرسوم جهت محاسبه مقاومت سیستم آندی باعث ایجاد خطای قابل توجه در طراحی سیستم حفاظت کاتدی سطوح داخلی تانک‌ها می‌شوند، مقدار خطا به فاصله آندها از دیواره تانک و طول موثر رشته آندی که در محاسبات به روش متداول مورد استفاده قرار می‌گیرد بستگی دارد. بنابراین در طراحی سیستم حفاظت کاتدی سطوح داخلی تانک‌های آب آتش‌نشانی با توجه به هندسه ساده و مقارن توصیه می‌گردد از نرم افزارهای آنالیز المان محدود جهت تصدیق سیستم حفاظت کاتدی طراحی شده با استفاده از روش‌های متداول استفاده گردد. با استفاده از تحلیل المان محدود علاوه بر محاسبه مقاومت سیستم آندی، توزیع پتانسیل و جریان الکتریکی در سطوح داخلی تانک‌ها نیز مشخص می‌گردد. طراحی سیستم حفاظت کاتدی با استفاده از تحلیل المان محدود منجر به استفاده بهینه از آندها، ساینز بهینه ترانس - رکتیفایر، تعیین فاصله مناسب آندها از دیواره تانک و در نتیجه موقعیت نازل‌ها بر روی سقف تانک در پروژه‌ها خواهد گردید.

مراجع

- [1] NACE SP0388, Impressed Current Cathodic Protection of Internal Submerged Surfaces of Carbon Steel Water Storage Tanks, 2018.
- [2] API RP 651, Cathodic Protection of Aboveground Petroleum Storage Tanks, 4th Ed., 2014.
- [3] EN 12499, Internal Cathodic Protection of Metallic Structures - General Principles, 2003.
- [4] EN 17243, Cathodic Protection of Internal Surfaces of Metallic Tanks, Structures, Equipment and Piping Containing Seawater, 2020.
- [5] IPS-E-TP-820: Engineering Standard for Cathodic Protection, 1st Rev., 2010.
- [6] BS 7430, Code of Practice for Protective Earthing of Electrical Installations, 2011.
- [7] W.von Baeckmann, W. Schwenk and W. Prinz, Handbook of Cathodic Corrosion Protection: Theory and Practice of Electrochemical Protection Processes, 3rd Ed., Gulf Professional Publishing, 1997.

