

## استفاده از روش پلاریزاسیونی برای انتخاب معیار حفاظت کاتدیک کف تانک

مهدی عطارچی<sup>1</sup> \* سیدمحمدصادق میرغفوریان<sup>2</sup> محسن نصری<sup>3</sup> صالح نوروزی<sup>1</sup>

<sup>1</sup> کارشناس ارشد خوردگی و حفاظت مواد، شرکت برنا الکترونیک

<sup>2</sup> دکتری برق قدرت، شرکت برنا الکترونیک

<sup>3</sup> کارشناس برق قدرت، شرکت برنا الکترونیک

\*E-mail: attarchi@borna-co.com / attarchi@gmail.com

### چکیده

حفاظت کاتدیک یکی از روش های صنعتی شناخته شده کنترل خوردگی می باشد. در مقاله حاضر به بررسی معیارهای حفاظت کاتدیک کف مخزن های ذخیره در تماس با خاک به روش اعمال جریان پرداخته می شود. بررسی های انجام شده بر روی 3 تانک، استفاده از معیار پتانسل قطع 850- به عنوان سختگیرانه ترین معیار به صورت موفقیت آمیز را نشان می دهد. در یک نمونه تانک مشخص شد، به علت نشست جریان به سازه های اطراف استفاده از معیار حداکثری با ریسک های پیش بینی نشده ای همراه خواهد بود. واحد مهندسی شرکت برنا الکترونیک با توسعه روش های صنعتی مطالعه رفتار سازه های تحت حفاظت و اندازه گیری پلاریزاسیون در شرایط صنعتی، مشخص نمود که با استفاده از جریان کمتر و معیار شیفیت 100 هم می توان سرعت خوردگی را کنترل نمود.

**واژه های کلیدی:** حفاظت کاتدیک، خوردگی کف مخازن، معیار حفاظت، پلاریزاسیون.

## 1. مقدمه

ورقه های کف مخازن در تماس با خاک با تشکیل سل های خوردگی دچار تخریب و کاهش ضخامت می شوند [1]. در کشور ایران به علت عدم توجه به همین پدیده طبیعی و پیش بینی پذیر در برخی موارد موجب به تخریب ورقه ها کف مخازن و از بین رفتن حد مجاز های خوردگی (Corrosion Allowance) در زمان قبل از راه اندازی شده است. در برخی موارد حتی نیاز به اجرای مجدد کف تانک قبل از راه اندازی بوده است.

متداول ترین روش کنترل خوردگی ورقه کف مخازن (از طرف تماس با زمین) استفاده از پوشش و حفاظت کاتدیک همزمان می باشد. اگرچه اولین جبهه مقابله با خوردگی رنگ و پوشش کف می باشد اما در محل جوش ورقه ها و یا اعوجاج های متاثر از جوشکاری تخریب پوشش اجتناب ناپذیر است و به همین دلیل استفاده از حفاظت کاتدیک الزامیست [2]. در مواردی که ورقه های کف مخزن فاقد پوشش هستند حفاظت کاتدیک الزامی و زمان راه اندازی آن می بایست کوتاه شود. در روش حفاظت کاتدیک پتانسیل سطح مورد حفاظت در جهت منفی پلاریزه می شود. براساس تعریف NACE "حفاظت کاتدیک، پلاریزه کردن کل سطح به پتانسیلی منفی تر از فعال ترین آند" می باشد [3]. در این حالت اختلاف پتانسیل در میکروسول ها از بین می رود و کل سطح نسبت به یک آند پیش بینی شده کاتد می شود. از یک سو میکرو سل ها ی خوردگی به حداقل می رسد و از سوی دیگر کل سطح نسبت به یک آند پیش بینی شده کاتد می شود و تمایل کلی خوردگی از بین می رود.

معیار پتانسیل بر اساس مفهوم ترمودینامیکی "تمایل به خوردگی" و "انرژی آزاد گیبس" بنا نهاده شده است. پتانسیل واکنش ها و محدوده پایداری اجزا مختلف واکنش های خوردگی براساس pH و پتانسیل بر اساس معادلات ترمودینامیکی در نمودارهای پوربه ساده سازی شده است [4]. اگرچه این نمودارها براساس داده های آزمایشگاهی و معادلات ترمودینامیکی اثبات شده بوده اما توسعه آن در محیط های صنعتی به ندرت انجام شده است و در صنعت مورد استفاده قرار نمی گیرند. در صنعت کارشناسان خوردگی در طی سالیان دراز معیارهای پایداری فولاد و آلیاژهای مختلف در محیط های مختلف تحت حفاظت را بررسی و گزارش نموده اند و نتیجه این کار عظیم در کنار بنیانها و معادلات علمی در طی سالیان در استانداردهای معتبر گرد آورده شده است.

استانداردهای شناخته شده مانند ISO، DIN، API، BS، NACE و IPS، انواع معیار حفاظت کاتدیک برای ورقه های کف تانک دارند. معیارهایی که مستقیماً بر اساس ترمودینامیک واکنش خوردگی برای آلیاژ مورد نظر با خاک بوده و معیار شیفیت 100 که براساس کاهش سینتیک خوردگی حداقل به میزان ده برابر می باشد [5]. شناخته شده ترین معیار ترمودینامیکی حفاظت کاتدیک معیار 850- میلی ولت نسبت به الکترومد مرجع مس/سولفات مس (CSE) است که نتایج خوبی به همراه داشته و مورد اعتماد مهندسان خوردگی در سراسر دنیا قرار گرفته است. این معیار در دو حالت پتانسیل وصل و یا قطع لحظه ای مورد استفاده قرار می گیرد. استانداردهایی نظیر DIN و BS به جای معیار 850- برای گروه آلیاژهای مختلف و در شرایط مختلف خاک اعداد دیگری را نیز پیشنهاد می کنند [6-8]. استاندارد NACE به عنوان شناخته شده ترین استاندارد خوردگی بجز این، معیار شیفیت 100 را نیز پیشنهاد می کند. در این معیار پتانسیل سازه حداقل به میزان 100- میلی ولت پلاریزه می شود [9]. این معیار هم برای همه گروه های فولاد و هم برای غیر فولادی ها پیشنهاد شده است [10]. در استاندارد NACE SP-0169 برای انتخاب روش مناسب حفاظت، مطالعه مهندسی را پیش شرط می داند.

در مطالعه حاضر سیستم حفاظت کاتدیک 5 عدد تانک مورد بررسی قرار گرفت. سیستم همه این تانک ها برای رسیدن به معیار 850- طراحی شده بود. در زمان راه اندازی دو تانک از نمونه های مورد بررسی نیازمند جریان حفاظتی غیر عادی شدند. واحد مهندسی شرکت برنا الکترونیک با توسعه روش علمی اندازه گیری پلاریزاسیون در محیط صنعتی رفتار پلاریزاسیونی کف تانک ها را بررسی و رفتار آنها را در جریانهای بالا پیش بینی کرد.

## 2. روش تحقیق

**سیستم مورد بررسی** - در مطالعه حاضر عملکرد سامانه حفاظت کاتدیک 5 عدد تانک مورد بررسی قرار گرفته است. این تانک ها دارای قطر و سرویس های مختلف بودند. از لحاظ ساختاری تمامی این تانک ها بر روی یک فونداسیون بتنی بنا شده بودند. حفاصل لایه بتنی و کف تانک لایه های فشرده ماسه و یک لایه عایق ژئوممبران (Geo-membrane) در یک متری زیر تانک نصب شده بود. سیستم حفاظت کاتدیک شبکه مش آندی در عمق 60 سانتیمتری زیر ورقه تانک بوده است و هافسل های دائم CSE در عمق 30 سانتیمتری زیر ورقه کف و در شعاع ها مختلف زیر تانک دفن شده بود. ورقه زیرین کلیه تانکها با پوشش اپوکسی با ضخامت 400 میکرومتر قبل از جوشکاری پوشیده شده بود. مقاومت الکتریکی ماسه زیر تانکها به طور میانگین در حدود 2000 اهم سانتیمتر بوده است. سیستم های حفاظت کاتدیک در بازه یک سال پس از اجرای تانکها راه اندازی شدند. کلیه ترانسفورمر رکتیفایر های مورد استفاده ساخت شرکت برنا الکترونیک بوده است. ضخامت سنجی و وضعیت ورقه ها توسط گروهی دیگر مورد بررسی قرار گرفت. پتانسیل و جریان اعمالی و رفتار 3 تانک (محافظت شده با معیار 850-) در جدول 1 آورده شده است.

دانشیته جریان نرمال حفاظت 5-20 mA/m<sup>2</sup> است و به دفعات مورد استفاده قرار گرفته است. برای محاسبه جریان حفاظتی ابتدا میزان تخریب پوشش پیش بینی می شود و سپس با در نظر گرفتن دانشیته جریان نرمال، جریان کل محاسبه می شود. براساس استانداردها و رویه های مهندسی [11 و 12] به ازای 10 درجه سانتیگراد دمای بالاتر از دمای محیط (30 درجه)، 25 درصد به جریان حفاظتی اضافه می شود. در شرایط موجود تخریب اولیه پوشش 50 درصد در نظر گرفته شده است. به این معنی که نصف مساحت کف تانک جریان را جذب می کند و در محاسبات دانشیته جریان آورده می شود.

**رفتار غیرعادی** - دو تانک دیگر که در محدوده واحد آب پالایشگاه بودند رفتار غیر عادی داشته اند و با اعمال جریان های نرمال به حد حفاظت نمی رسیدند. اندازه گیری های پتانسیل به صورت CIPS در اطراف این دو تانک پروفیل های متغیری از نشت جریان را نشان داد. نمونه ای از پروفیل اندازه گیری شده در شکل 1 آورده شده است.

**بررسی رفتار پلاریزاسیونی** - ابتدا براساس رویه بررسی سیستم های کاتدیک واحد مهندسی شرکت برنا الکترونیک سیستم موجود مورد بررسی قرار گرفت. سپس زمان رسیدن به حد پایداری در چند پتانسیل مورد بررسی قرار گرفت و بعد از آن تغییرات جریان براساس تغییرات پله ای پتانسیل استخراج گردید. پروفیل رفتار پلاریزاسیونی در شکل 2 آورده شده است.

### 3. بحث و نتیجه گیری

**بررسی سیستم حفاظت کاتدیک تانکهای شماره 1 تا 3** - براساس اطلاعات و محاسبات ارائه شده در جدول 1، دانسیته جریان حفاظتی 3 تانک برای رسیدن به معیار حفاظتی 850- در بازه  $25-35 \text{ mA/m}^2$  قرارداد. اندازه گیری های انجام گرفته از کف تانک صحت عملکرد سامانه کاتدیک را نیز تایید کرده اند.

جدول 1: داده های عملکرد سیستم کاتدیک تانک شماره 1 تا 3

تجهیز	قطر تانک (m)	دمای کاری (°C)	جریان ترانس (I)	ولتاژ ترانس (V)	پتانسیل حالت وصل* (mV E <sub>on</sub> vs. CSE)	پتانسیل حالت قطع* (mV E <sub>off</sub> vs. CSE)	دانسیته جریان اعمالی** (mA/m <sup>2</sup> )
تانک 1	6/3	40	0/5	2	-1578	-892	32/1
تانک 2	12/2	70	1/6	2/8	-1805	-923	27/3
					-1885	-937	
					-1715	-908	
					-1875	-942	
تانک 3	36/9	45	17	8	-1693	-850	31/8
					-1515	-920	
					-1497	-845	
					-1513	-875	
					-1535	-905	
					-1786	-853	
-1860	-877						
-1852	-945						

\*پتانسیل های قرائت شده برای تمام هافسل ها جداگانه آورده شده است.

\*\* فرض شده جریان اعمالی تنها از سطح بدون پوشش عبور می کند. اثر دما در این دانسیته جریان در نظر گرفته نشده است.

**بررسی سیستم حفاظت کاتدیک تانکهای شماره 4 و 5** - براساس طراحی و محاسبات جدول 2 جریان 22 آمپر (معادل دانسیته جریان  $90-95 \text{ mA/m}^2$  با فرض 50 درصد تخریب پوشش) به تانک 4 و 5 اعمال شد. پتانسیل قطع لحظه ای تانک ها در محدوده 800- میلی ولت نسبت CSE قرار گرفت. با توجه به تجارب گذشته شرکت برنا الکترونیک و گزارشات دیگر شرکتها [2] نیاز به چنین جریانی غیر عادی ارزیابی شد.

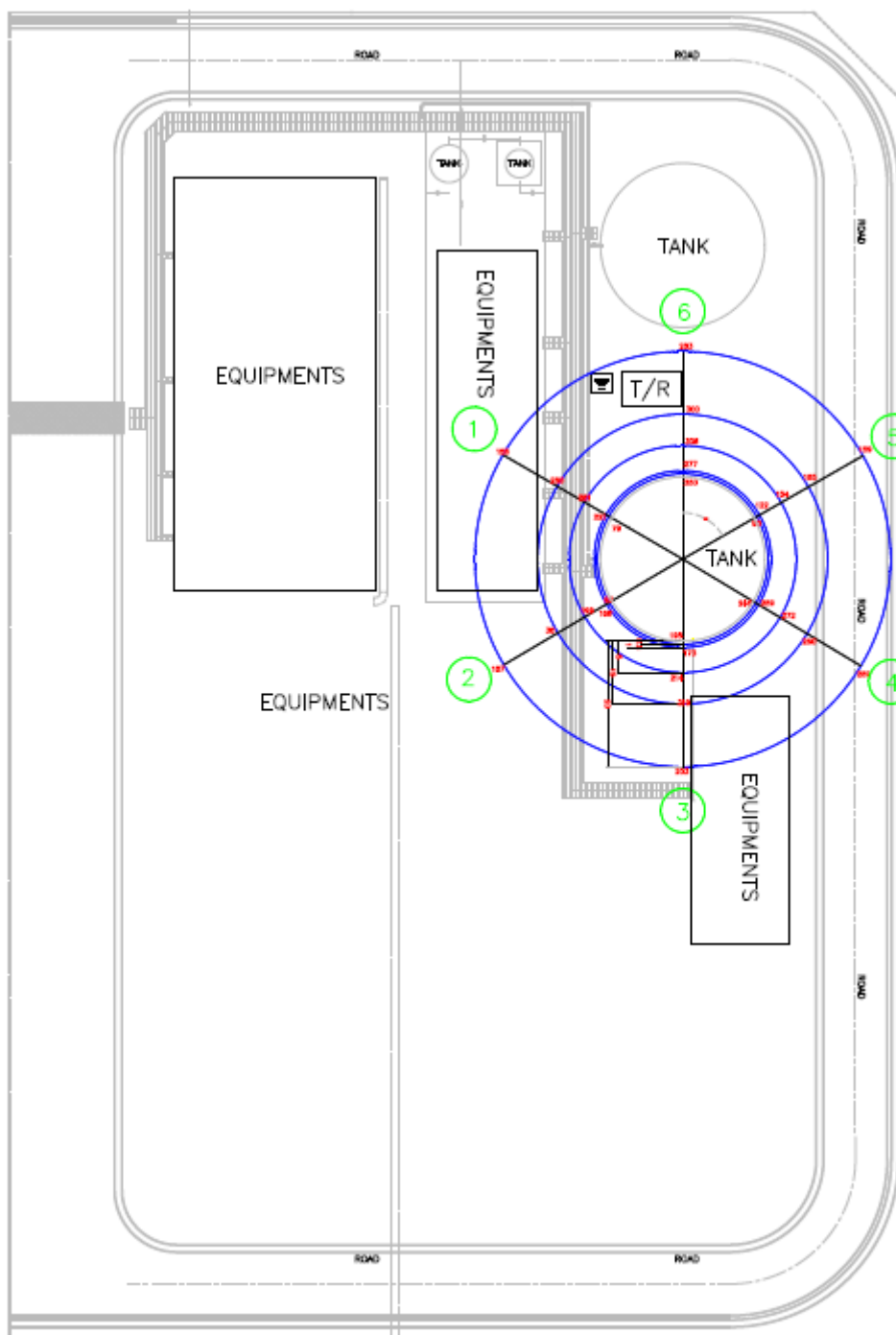
جدول 2: داده های عملکرد سیستم کاتدیک تانک شماره 4 و 5

تجهیز	قطر تانک (m)	دمای کاری (°C)	جریان ترانس (I)	ولتاژ ترانس (V)	پتانسیل حالت وصل* (mV E <sub>on</sub> vs. CSE)	پتانسیل حالت قطع* (mV E <sub>off</sub> vs. CSE)	دانسیته جریان اعمالی** (mA/m <sup>2</sup> )
تانک 4	24/9	50	22/0	7/0	-1856	-853	90/4
					-1754	-843	
					-1759	-770	
					-1873	-818	
					-1805	-827	
					-1736	-741	
تانک 5	24/9	50	23/2	7/2	-1844	-811	95/3
					-1803	-825	
					-1782	-820	
					-1819	-830	
					-1807	-901	
					-1977	-831	

\*پتانسیل های قرائت شده برای تمام هافسل ها جداگانه آورده شده است.

\*\* فرض شده جریان اعمالی تنها از سطح بدون پوشش عبور می کند. اثر دما در این دانسیته جریان در نظر گرفته نشده است.

وضعیت تانک براساس رویه داخلی شرکت برنا الکترونیک با عنوان "گزارش وضعیت تانکها" مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد علت قرائت جریان بالا نقص های سازه ای و اتصال کوتاه نیست. براساس تصمیم کمیته فنی پروژه، پروفیل پتانسیل به صورت CIPS در اطراف تانک تهیه شد. این پروفیل به همراه نقشه موقعیت تانک شماره 4 در شکل 1 آورده شده است.



شکل 1: موقعیت تانک شماره 4 و 5 و پروفیل پتانسیل اطراف

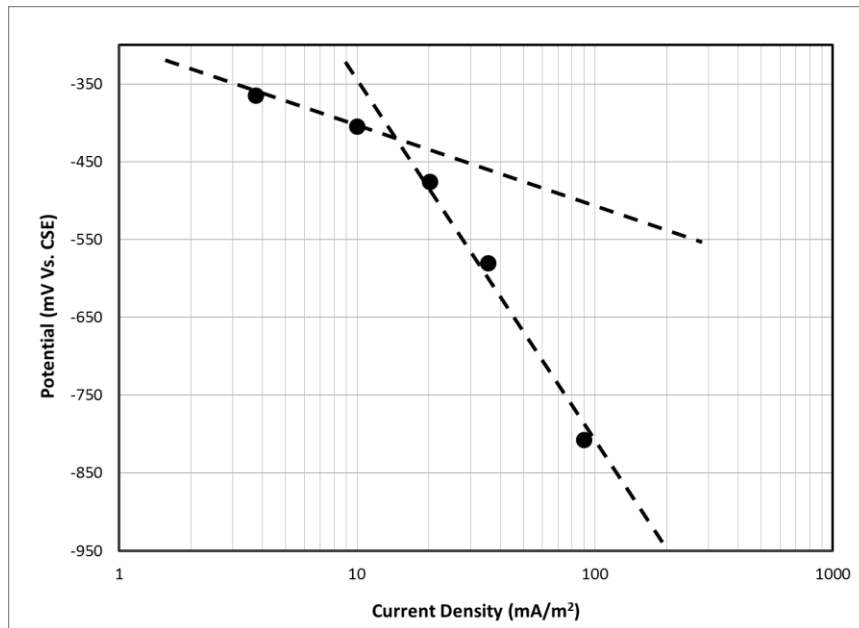
جدول 2 پتانسیل های قرائت شده در اطراف تانک 4 را نشان می دهد.

جدول 2: پتانسیل قرائت شده (CIPS) اطراف تانک 4 براساس جهت های مشخص شده در شکل 1.

پتانسیل براساس متر فاصله شعاعی از دیواره تانک (mV vs. CSE)					نوع اندازه گیری	جهت اندازه گیری در شکل 1
20	10	5	1	0/5		
-209	-316	-290	-227	-188	وصل	1
-51	-36	-9	-6	-109	قطع	
-192	-109	-213	-152	-102	وصل	2
-5	-71	-14	+16	-9	قطع	
-401	-311	-272	-243	-211	وصل	3
-198	-92	-58	-70	-16	قطع	
-318	-324	-352	-320	-309	وصل	4
-59	-64	-80	-61	-63	قطع	
-55	-84	-91	-67	-47	وصل	5
-104	+81	+63	+55	+43	قطع	
-306	-334	-358	-324	-293	وصل	6
-23	-34	-52	-47	-43	قطع	

براساس اطلاعات پتانسیل قرائت شده به روش CIPS که در شکل یک و جدول دو آورده شده است در اطراف تانک گرادیان پتانسیل متاثر از سیستم حفاظت کاتدیک کف تانک بوجود آمده است. این نوع گرادیان پتانسیل نشان دهنده نشت جریان است. براساس پیش فرض طراحی و جزئیات اجرایی، کف تانک بر روی یک لایه ماسه فشرده قرار گرفته است. در زیر این لایه ماسه یک ژئو ممبران با مقاومت الکتریکی بالا قرار دارد که معمولاً به عنوان عایق در نظر گرفته می شود. چنین نشت جریانی نشان می دهد که این لایه صدمه دیده است. اندازه گیری های صورت گرفته در اطراف دیگر تانک ها نشاندهنده گرادیان ناچیز میلی ولت بوده که خود تاییدی بر صحت عملکرد لایه زیرین برای 3 تانک اول دارد.

در مرحله بعد برای پیش بینی جریان حفاظتی مناسب و بازنگری معیار پتانسیل به صورت صنعتی رفتار پلاریزاسیونی کف تانک استخراج شد. برای استخراج داده های صحیح ابتدا سیستم حفاظت کاتدیک به مدت یک هفته خاموش شد تا به پتانسیل طبیعی برسد. سپس با اعمال جریان های مختلف و زمانهای طولانی زمان رسیدن به حد پایداری پتانسیل ها استخراج شد تا خطای اندازه گیری در اثر به پایداری نرسیدن سیستم تحت پلاریزاسیون به حداقل برسد. زمان پایداری برای سیستم موجود یک ساعت (60 دقیقه) بدست آمد. در زمان یکساعت تغییرات پتانسیل کمتر از 5 درصد نسبت به حالت نهایی بوده است. مجدداً سیستم به مدت سه روز خاموش شد و پتانسیل به حالت پله ای افزایش داده شد. شرایط خروجی ترانسفورمر رکتیفایر و پتانسیل قطع و وصل در هر مرحله قرائت شد. منحنی پلاریزاسیون به صورت صنعتی رسم گردید. نتایج قرائت شده بر روی کلیه هافسل ها رفتار یکسانی را نشان دادند و یکی از آنها به عنوان نمونه در شکل 2 آورده شده است.



شکل 2: منحنی پلاریزاسیون ورقه کف تانک

براساس نمودار بدست آمده شیب پلاریزاسیونی برای هافسل های مختلف در دانسیته جریان های پایین حدود  $100\text{mV/Decade}$  و در دانسیته جریانهای بالا و ورود به حالت نفوذی حدود  $450\text{mV/Decade}$  بدست آمد. این شیب در کلیه هافسل ها و دو تانک 4 و 5 در همین حدود بوده است. براساس تفسیر معیارهای حفاظت استاندارد NACE SP-0169 [10] که در مرجع پی بادی آمده است [5]، پایه انتخاب شیب 100، کمتر بودن شیب پلاریزاسیونی از  $100\text{mV/Decade}$  است. این حالت در بررسی تانک های شماره 4 و 5 در دانسیته جریانهای کم مشاهده شده است. نزدیک بودن شیب پلاریزاسیونی به  $100\text{mV/Decade}$  تایید می کند استفاده از شیب 100 سرعت خوردگی را بیشتر از 10 برابر کاهش می دهد و برای این شرایط قابل استفاده است [5]. براساس منحنی پلاریزاسیون (شکل 2) افزایش دانسیته جریان منجر به غلبه حالت نفوذی می شود. در این شرایط احتمال تخریب پوشش افزایش می یابد. علاوه براین پلاریزاسیون اضافه موجب تصاعد گاز در آند زیر کف تانک شده که این گاز خود به خود موجب دیپلاریزه شدن شده و نیاز به جریان برای پلاریزه شدن را افزایش میدهد.

با توجه به شیب پلاریزاسیونی برای رسیدن به معیار  $-850$  (در سال اول) پیش بینی می شود، میزان جریان مورد نیاز حدود 26 آمپر معادل دانسیته جریان  $105\text{mA/m}^2$  باشد. با در نظر گرفتن نتایج CIPS و مشاهده گرادیان پتانسیل این جریان قطعاً نشأت زیادی به سازه های اطراف دارد. هرچند که معیار  $-850$  معیار سختگیرانه تری در میان کارشناسان خوردگی است اما باید توجه داشت که رسیدن به این معیار مستلزم استفاده از جریان های بالاتری نسبت به معیار شیب 100 است. استفاده از جریان بیشتر می تواند خطرات متعددی را برای سازه های اطراف بوجود آورد. در نمونه مورد بررسی تانک های 4 و 5 حالت پلاریزاسیونی به حالت نفوذی میرسد که موجب تخریب پوشش و فعال شدن مکانیزم های دیپلاریزاسیون شده که در نتیجه آن در دراز مدت جریان مورد نیاز به طرز غیر واقعی افزایش یافته و در برخی موارد می تواند موجب از کار افتادن سیستم حفاظت کاتدیک شود. بنابراین به نظر می رسد استفاده از معیار شیب 100 علاوه بر کاهش سرعت خوردگی به میزان کافی باعث جلوگیری از آسیب دیدن سازه های مجاور شده و راه حل مناسبی برای حفاظت از سازه هایی است که به معیار  $-850$  نمی رسند و یا برای رسیدن به آن نیازمند دانسیته جریان های بسیار بالا هستند. معیار شیب 100 در پالایشگاه های متعددی استفاده شده است. نمونه ای از این گزارشات در مرجع 3 و 13 و 14 آورده شده است. یکی از نکات مثبت استفاده از شیب 100 به عنوان معیار حفاظت به خصوص در پالایشگاه های بزرگ کمتر شدن خطر نشأت به دیگر سازه ها بوده است.

**نتیجه** - نتایج بدست آمده به صورت خلاصه در زیر آورده شده است:

- 1- حفاظت کاتدیک یک راه موثر کنترل خوردگی کف تانک ها در تماس با زمین می باشد.
- 2- استفاده از روش پلاریزاسیونی می تواند به عنوان یک روش انتخاب معیار مورد استفاده قرار گیرد.
- 3- رسیدن به معیار  $-850$  (قطع لحظه ای) با دانسیته جریان پیش بینی شده قابل تحقق است به شرطی که میزان نشأت جریان کنترل شده باشد.
- 4- در حالت وجود نشأت جریان می توان با معیار شیب 100 به حفاظت رسید و سرعت خوردگی را کنترل نمود.
- 5- پلاریزاسیون بیش از حد منجر به رسیدن به حالت نفوذی شده که میتواند برای خود سازه تحت حفاظت نامناسب باشد.
- 6- استفاده از معیار  $-850$  همیشه مناسب نبوده و در بعضی مواقع می تواند موجب خسارت نیز بشود.
- 7- استفاده از معیار شیب 100، هم هزینه کمتری دارد و هم باعث عمر طولانی سازه خواهد شد.

## 4. مراجع

- 1) W. Von Baeckmann, W. Schwenk, W. Prinz, "Handbook of Cathodic Protection: Theory and Practice of Electrochemical Processes", 3<sup>rd</sup> Ed., 1997.
- 2) B. Chatterjee, "Prevention of External (Soil Side) Corrosion on Storage Tank Bottom Plates by Cathodic Protection System", NACE Corrosion Conference 2008, Paper No. 08058.
- 3) NACE CP3 Course Manual, 2011.
- 4) E. E. Stansbury, R. A. Buchanan, "Fundamentals of Electrochemical Corrosion", 1<sup>st</sup> Ed., 2000.
- 5) A. W. Peabody, "Peabody's Control of Pipeline Corrosion", 2ed Ed.
- 6) Standard DIN 30676, "Design and Application of Cathodic Protection of External Surface", 1985.
- 7) Standard BS EN 13636, "Cathodic Protection of Buried Metallic Tanks and Related Piping", 2004.
- 8) Standard BS EN 12954, "Cathodic Protection of Buried or Immersed-General Principles and Application for Pipeline", 2001.
- 9) Standard NACE RP0285, "Corrosion Control of Underground Storage Tank Systems by Cathodic Protection", 2002.
- 10) Standard NACE SP0169, "Corrosion of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping System",
- 11) Standard ISO 15589-1, "Petroleum and Natural Gas Industries-Cathodic Protection of Pipeline Transportation Systems-Part 1: On-Land Pipeline", 2003.
- 12) Shell DEP 30.10.73.10, "Cathodic Protection", 2003.
- 13) L. Koszewski, "Application of the 100 mV Polarization Criterion for Aboveground Storage Tank Bottoms", NACE Corrosion Conference 2001, Paper No. 01591.
- 14) T. J. Barlo, "Field Testing the Criteria for Cathodic Protection", American Gas Association, SAIC Interim Report, Dec. 1987, Cat. No. L51546, 1988.