

بررسی تأثیر حفاظت کاتدی پالسی بر میزان برد حفاظت کاتدی در زیر پوشش های نواری جدا شده از فولاد خطوط لوله

حسین نجفی محترم^۱، عبدالمجید اسلامی^{۲*}، محمدعلی گلغزار^۳، مهدی احمدی^۴، امین کاویان^۵

۱ کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲ دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۳ استاد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۴ و ۵ کارشناس ارشد حفاظت کاتدی، شرکت گاز استان اصفهان، اصفهان، ایران

* نویسنده مسئول: m.eslami@iut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۴

چکیده

در این پژوهش به بررسی تأثیر حفاظت کاتدی پالسی بر میزان برد حفاظت کاتدی در زیر پوشش نواری جدا شده از فولاد خط لوله پرداخته شده است و نتایج حاصله با حفاظت کاتدی به روش معمول مقایسه گردیده است. در این راستا تجهیزاتی که قادر به شبیه سازی شرایط زیر پوشش جدا شده از خط لوله به طول ۲۰۰۰ mm باشد، طراحی و ساخته شد. به منظور بررسی تأثیر عرض شیار در میزان برد حفاظت، کوپن های ساخته شده از جنس فولاد خط لوله API X-52 با ابعاد ۲۰۰۰×۱۰ mm و ۲۰۰۰×۵۰ mm، در زیر پوشش جدا شده با فاصله ۳ mm قرار گرفتند. با قرار دادن تجهیز در داخل محلول شبیه سازی شده خاک C2، پتانسیل $V_{SCE} - 1000$ m به دو روش حفاظت کاتدی معمول و پالسی با فرکانس ۱۰۰۰۰ هرتز به دهانه شیار پوشش جدا شده اعمال گردید. نتایج نشان داد که با اعمال روش معمول در هر دو عرض شیار، میزان پتانسیل در همان ابتدای شیار دچار افت شده و به مقادیر OCP می رسد در صورتی که در حفاظت پالسی بر خلاف روش معمول برد حفاظتی افزایش پیدا کرد. سطح حفاظت در شیار با عرض ۵۰ mm بیشتر از شیار با عرض ۱۰ mm اندازه گیری شد به گونه ای که سراسر طول جدایش در محدوده حفاظتی قرار گرفت. کم تر بودن سطح حفاظتی در شیار با عرض ۱۰ mm می تواند به دلیل بالا بودن مقاومت ناشی از پلاریزاسیون غلظتی باشد که انتقال جریان مثبت به داخل شیار را محدود می کند. همچنین مقادیر pH در اثر اعمال حفاظت پالسی در شیار با عرض ۵۰ mm به دلیل افزایش سطح حفاظت، دارای مقادیر بالاتری نسبت به شیار با عرض ۱۰ mm بود. به طور خلاصه نتایج نشان داد که علی رغم عدم کارایی روش حفاظت معمول در زیر پوشش جدا شده، اعمال حفاظت کاتدی پالسی با فرکانس بالا می تواند به عنوان یک روش موثر در افزایش برد حفاظت کاتدی در زیر پوشش های نواری جدا شده باشد.

کلیدواژه: خوردگی؛ پوشش جدا شده؛ حفاظت کاتدی پالسی؛ فولاد خط لوله

Investigation on Effect of Pulse Cathodic Protection on CP Penetration Depth Under the Tape Coating Disbondment on Pipeline Steel

H.Najafi¹, A.Eslami^{2*}, M.A.Golozar³, A. Kavian⁴, M.Ahmadi⁵

1. M.Sc Graduated, Department of Material Engineering, Isfahan University of Technology Isfahan, Iran
2. Associated Professor, Department of Material Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
3. Professor, Department of Material Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
- 4,5. Senior Cathodic Protection, Isfahan Gas Company, Isfahan, Iran

* Corresponding Author: m.eslami@iut.ac.ir

Submission: 2020, 12, 30 Acceptance: 2021, 09, 15

Abstract

The effect of pulse cathodic protection (CP) on CP penetration depth under tape coating disbondment of pipeline steel has been investigated in this study and results have been compared with conventional CP. In this regard, a laboratory cell with the length of 2000 mm that can simulate the underlying conditions by applying CP was designed and made. For investigation of crevice width on CP penetration depth coupons with dimensions of 2000×10 mm and 2000×50 mm made from API X-52 pipeline steel were placed under coating disbondment with the gap size of 3 mm and different widths. By placing the cell in a simulated soil solution C2, the potential of -1000mV_{SCE} through two methods of conventional & pulse CP with the frequency of 10000 Hz was applied to the open mouth (OM) of the simulated coating disbondment. Result showed by applying conventional CP for both the crevice widths, potential failed sharply to Open Circuit Potential (OCP) near to the OM while for pulse CP, in contrast to conventional CP, which CP penetration depth was increased. At the crevice with the width of 50 mm CP level was measured more than the width of 10 mm, such that the entire disbondment length was protected by CP. The lower CP level for the crevice with the width of 10 mm could be due to concentration polarization resistance which restricted the penetration of the positive current within the crevice. Also, pH value under the coating disbondment with applying pulse CP at the crevice with the width of 50 mm was measured more than the pH value for the disbondment with 30 mm width other due to higher CP level under this disbondment. In summary, results showed despite the conventional CP, applying pulse CP with high frequency could be an effective method in increase of the CP penetration depth under tape coating disbondments.

Keywords: Corrosion; Disbonded Coating; Pulse Cathodic Protection; Pipeline Steel

۱- مقدمه

خوردگی یکی از عوامل مهم تخریب و انهدام خطوط لوله های انتقال نفت و گاز می باشد که عمدتاً به صورت حفرات و ترک های ناشی از خوردگی موضعی و تنش بر روی سطح خارجی خطوط لوله مشاهده می گردند [۵-۱]. حفاظت کاتدی و اعمال پوشش های عایق به طور همزمان در کاهش میزان خوردگی مورد استفاده قرار می گیرند [۸-۶]. برخی از پوشش های عایق همانند پوشش های پلی اتیلنی و پلی الیفنی در صورت وجود آسیب و حفره بر روی سطح پوشش استحکام چسبندگی خود را با زیر لایه فلزی از دست می دهند، که این موضوع در صورت اعمال حفاظت کاتدی تشدید شده و در نهایت پوشش از سطح خطوط دچار جدایش می گردد [۹]. در این شرایط رطوبت و عوامل خورنده خاک به شیار ایجاد شده در فصل مشترک پوشش و سطح خارجی خط لوله نفوذ می کنند که با ایجاد شرایط موضعی و خورنده مانع از نفوذ جریان حفاظت کاتدی به این ناحیه شده و پتانسیل حفاظتی در فاصله اندکی از دهانه شیار^۱ به مقادیر نزدیک به پتانسیل مدار باز^۲ می رسد [۱۳-۱۰]. اعمال پتانسیل منفی تراز سوی رکتیفایر نیز به دلیل تشدید واکنش های کاتدی باعث تشکیل حباب های هیدروژن شده که علاوه بر بیشتر شدن جدایش پوشش، نفوذ جریان حفاظت کاتدی کاهش خواهد یافت [۱۴ و ۱۵]. پژوهش های زیادی در زمینه نحوه توزیع پتانسیل، تغییرات pH و شرایط الکتروشیمیایی در زیر پوشش جدا شده صورت گرفته است [۲۸-۱۶]. بررسی توزیع پتانسیل حفاظت کاتدی شده نشان می دهد که همواره گرادیان پتانسیل در سراسر طول پوشش جدا شده شکل می گیرد و انتهای شیار تحت حفاظت قرار نمی گیرد. چری و همکاران گرادیان پتانسیل را به کاهش شدید دانسیته جریان در زیر پوشش جدا شده ارتباط دادند [۱۶]. فینک و همکاران بیان کردند که علت کاهش دانسیته جریان در زیر پوشش به دلیل مقاومت بالای محلول حبس شده در محل عیب پوشش می باشد [۱۷]. بررسی تغییرات pH و غلظت اکسیژن توسط چن و همکاران نشان داد که این پارامترها با افزایش فاصله از دهانه شیار کاهش می یابند و در

انتهای پوشش جدا شده که حفاظت کاتدی کارایی موثری ندارد، به حداقل مقدار خود می رسند [۱۸]. پردومو و همکاران با بررسی تأثیر ارتفاع جدایش پوشش بر روی محلول حبس شده در زیر پوشش بیان کردند که کاهش ارتفاع جدایش شرایط محیطی مستعدتری را برای تغییرات شیمیایی و الکتروشیمیایی موضعی ایجاد می کند که علت خوردگی در زیر پوشش وابسته به همین تغییراتی است که به صورت گرادیانی در زیر پوشش رخ می دهد [۱۹]. همچنین فاتحی و همکاران نشان دادند که همزمان با افزایش فاصله از دهانه شیار و کاهش شدید pH و پتانسیل حفاظت کاتدی، نرخ خوردگی خط لوله به طور قابل توجهی افزایش می یابد [۲۹]. با توجه تحقیقات صورت گرفته، همچنان عدم کارایی حفاظت کاتدی به روش معمول در حفاظت از خطوط لوله در زیر پوشش جدا شده به عنوان یک مساله جدی پابرجا می باشد.

حفاظت کاتدی پالسی به عنوان یک روش موثر در حفاظت از بدنه فلزی چاه ها مورد استفاده قرار گرفته است [۳۰ و ۳۱]. در این راستا متویلی و همکاران با اعمال حفاظت کاتدی پالسی در حفاظت از لوله جداری به طول یک کیلومتر نشان دادند که در صورت استفاده از روش پالسی، سطح جریان حفاظتی در نقاط مختلف بخصوص در فواصل دورتر و انتهایی لوله بیشتر از حفاظت کاتدی به روش معمول می باشد. همچنین نتایج پژوهش آن ها نشان داد که در روش پالسی برای تامین سطح حفاظتی یکسان در مقایسه با روش معمول، جریان کمتری مورد نیاز می باشد [۳۱]. نجفی و همکاران به بررسی تأثیر حفاظت کاتدی پالسی بر شرایط الکتروشیمیایی در زیر پوشش جدا شده از خطوط لوله پرداختند. این محققین پتانسیل $870\text{ mV}_{\text{SCE}}$ را به دو روش معمول و پالسی به دهانه شیاری به طول ۲۰ سانتی متر اعمال کردند و نتایج حاصله را بررسی نمودند. نتایج آن ها نشان داد که با اعمال ولتاژ پالسی با شکل موج مربعی و سیکل کاری ۵۰ درصد افت پتانسیل در زیر پوشش جدا شده کاهش می یابد به گونه ای که در فرکانس ۱۰۰۰۰ هرتز گرادیان پتانسیل که در روش معمول همواره مشاهده می شد، حذف می گردد و پتانسیل

¹Open Mouth (OM)²Open Circuit Potential (OCP)

جدول ۱. ترکیب شیمیایی محلول C2 استفاده شده در این پژوهش.

غلظت (g/l)	ترکیب
۰/۰۲۷۴	MgSO ₄ .7H ₂ O
۰/۰۲۵۵	CaCl ₂
۰/۰۰۳۵	KCl
۰/۰۱۹۵	NaHCO ₃
۰/۰۶۰۶	CaCO ₃

۳-۲- طراحی سل خوردگی

برای شبیه سازی شرایط پوشش جدا شده از سطح فولاد خط لوله، تجهیز از جنس تفلون طراحی و ساخته شد (شکل ۱). سل های طراحی شده دارای شیار به طول ۲۰۰۰ میلی متر و عرض ۲۰ و ۵۰ میلی متر جهت قرار گیری کوپن های فولادی می باشند. در ابتدا با قرار گیری کوپن ها در داخل شیار تعبیه شده و اطمینان از برقرار بودن اتصال الکتریکی با رکتیفایر، یک اورینگ لاستیکی جهت جلوگیری از ورود و خروج محلول از اطراف سل، دور شیار ایجاد شده قرارداد گرفت. سپس برای شبیه سازی پوشش جدا شده از خط لوله به گونه ای که داخل شیار قابل رؤیت و در عین حال فاقد نفوذ پذیری یونی باشد، از شیشه های سکوریت استفاده شد. به منظور اطمینان از عدم نشست محلول از درون شیار، پوشش شبیه ساز و بدنه با اتصالات مکانیکی مستحکم شدند و در ادامه توسط چسب و اشرساز مایع، عایق بندی شدند. در نهایت با قرار گیری سل آماده شده درون محلول C2، محلول از طریق دهانه شیار با قطر ۲ سانتی متر واقع در ابتدای شیار وارد زیر پوشش شد و در حالی که گاز ۵٪ CO₂ / N₂ مداوم به درون آن دمیده می شد سیستم حفاظت کاتدی به روش معمول و پالس برای مدت زمان ۲۴۰ ساعت (۱۰ روز) اعمال و مانیتور گردید.

۴-۲- اعمال حفاظت کاتدی پالسی

جهت اعمال حفاظت کاتدی پالسی همانند پژوهش قبلی از رکتیفایر پالسی با قابلیت اعمال فرکانس حداکثری ۱۰ kHz استفاده شد. در این روش پتانسیل حفاظتی به صورت شکل موج مربعی و سیکل کاری ۵۰٪ با فرکانس ۱۰ کیلوهرتز بر روی کوپن های قرار داده شده در زیر پوشش، اعمال گردید. مشابه با

حفاظتی در سراسر نقاط شیار ۲۰ سانتی متری با یکدیگر برابر می شوند [۳۲].

روش حفاظت کاتدی پالسی در راستای کاهش شدت خوردگی در مقیاس کوچک (حدود ۲۰ سانتی متر) به میزان چشم گیری موفقیت آمیز بوده است، اما با توجه به این که ابعاد پوشش های جدا شده از خط لوله بسیار بزرگ تر از ۲۰ سانتی متر می باشد و عمدتاً به چندین متر می رسند، لذا هدف از این پژوهش بررسی عملکرد حفاظت کاتدی پالسی بر میزان برد جریان حفاظتی در زیر پوشش های نواری جدا شده در طول های بیشتر و در ابعادی نزدیک به شرایط واقعی می باشد. همچنین در این پژوهش عرض پوشش جدا شده نیز به عنوان یکی از عوامل تأثیر گذار بر روی سطح حفاظت در زیر پوشش های جدا شده مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش آزمایش

۲-۱- فولاد پایه

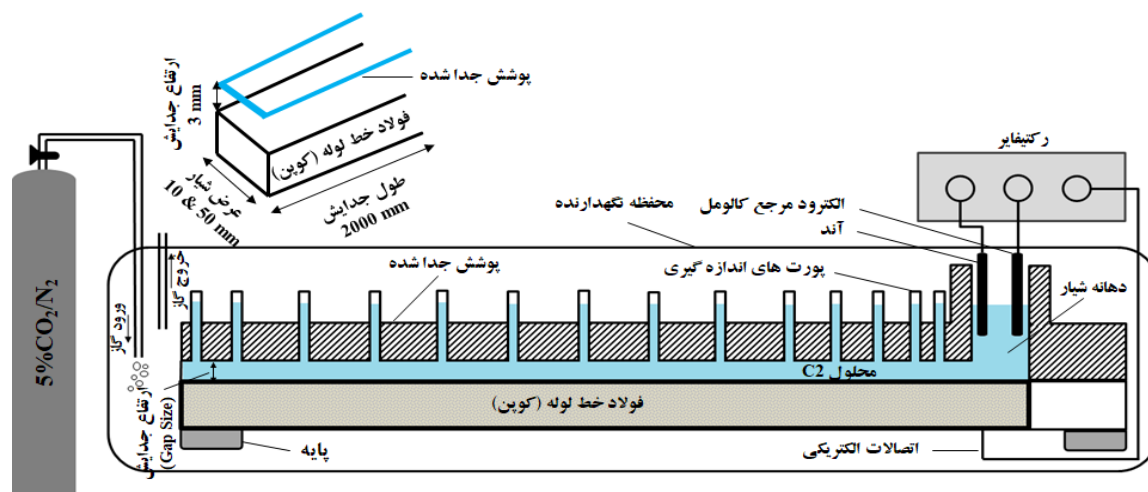
کوپن های فولادی از جنس فولاد خط لوله API X-52 به طول ۲۰۰۰ میلی متر که نزدیک به مشاهدات میدانی از پوشش جدا شده با طول زیاد از خط لوله می باشد، تهیه گردیدند. به منظور بررسی عرض شیار بر سطح پتانسیل حفاظتی، کوپن های مذکور با ابعاد ۲۰۰×۲۰×۱۰ و ۲۰۰×۵۰×۱۰ میلی متر ساخته شدند. همچنین به جهت حذف آلودگی های سطحی، کوپن ها طبق استاندارد ASTM E3-11 تا سنباده ۶۰۰ سنباده زده شدند.

۲-۲- محلول شبیه ساز خاک (محلول C2)

جهت شبیه سازی محیط خاک از محلول C2 با ترکیب ذکر شده در جدول ۱، استفاده شد. ترکیب شیمیایی این محلول که میزان pH آن نزدیک به خنثی می باشد از آنالیز خاکی که در تماس با خط لوله می باشد به دست آمده است. تحقیقات نشان می دهد که میزان CO₂ موجود در خاک می تواند تا مقادیر (۲۰-۵)٪ متغیر باشد [۳۳]، به همین دلیل به منظور ایجاد شرایط مشابه با خاکی که در تماس با خط لوله می باشد، ۴۸ ساعت قبل از شروع آزمایش، گاز ۵٪ CO₂ / N₂ داخل محلول C2 دمیده شد.

کمکی و الکترود کالومل به عنوان الکترود مرجع بهره گرفته شد. آزمایش های طراحی شده در هر دو سیستم حفاظت کاتدی در جدول ۲ نمایش داده شده است.

شرایط پالسی، پتانسیل $mV_{SCE} - 1000$ به روش معمول نیز اعمال شد که برای این امر از یک سیستم سه الکترودی شامل؛ فولاد X-52 به عنوان الکترود کاری، الکترود پلاتین به عنوان الکترود



شکل ۱. تجهیز آزمایشگاهی ساخته شده جهت شبیه سازی پوشش جدا شده از فولاد خط لوله.

جدول ۲. آزمایش های طراحی شده در سیستم حفاظت کاتدی معمول و پالسی.

پتانسیل اعمالی	نوع سیستم حفاظت کاتدی	فرکانس (Hz)	پهنای شیار (mm)	ارتفاع جدایش پوشش (mm)
$-1000 mV_{SCE}$	پالسی	۱۰۰۰۰	۱۰	۳
	معمول (ولتاژ یکنواخت DC)	-	۵۰	

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تغییرات پتانسیل در زیر پوشش جدا شده با عرض

جدایش ۱۰ و ۵۰ میلی متر

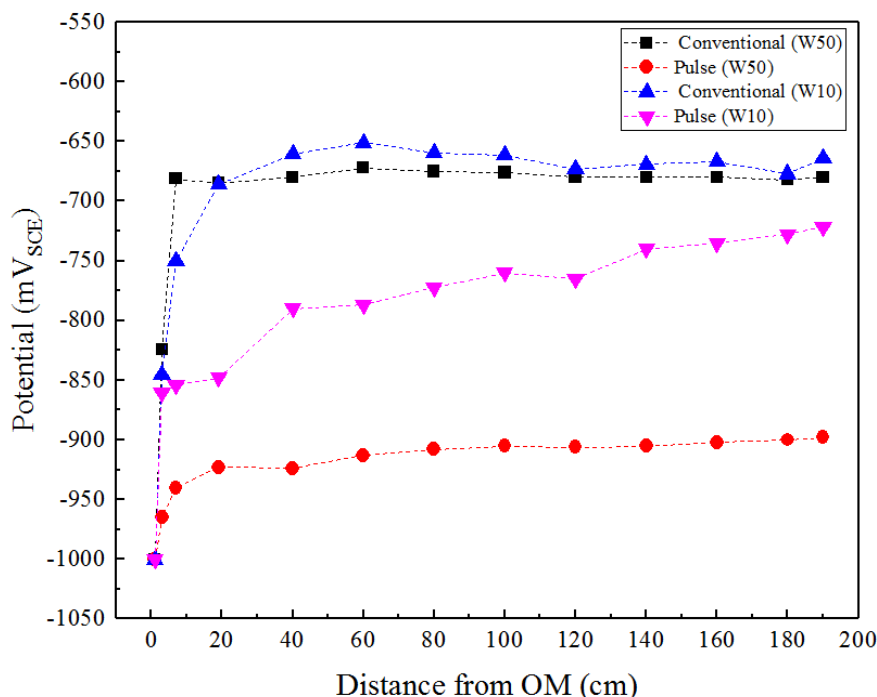
نتایج مربوط به اعمال حفاظت کاتدی با پتانسیل اعمالی $mV_{SCE} - 1000$ به دو روش معمول و پالسی با فرکانس ۱۰۰۰۰ هرتز در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می گردد، تغییرات پتانسیل بر حسب فاصله از دهانه شیار پس از ۲۴۰ ساعت از شروع آزمون در هر دو روش حفاظتی در شیار با عرض ۱۰ و ۵۰ میلی متر نشان می دهد که در هر دو عرض شیار و در حالتی که سیستم حفاظتی به روش معمول می باشد، میزان پتانسیل در همان ابتدای شیار دچار افت شده و به مقادیر OCP می رسد. اگرچه میزان این افت در شیار با عرض ۵۰ میلی متر به نسبت شیار ۱۰ میلی متری به صورت جزئی کم تر است. با اعمال حفاظت کاتدی پالسی با فرکانس ۱۰ کیلوهرتز شرایط در هر دو شیار متفاوت

۲-۵- اندازه گیری ها در حین آزمایش

جهت بررسی و اندازه گیری دقیق محیط زیر پوشش، تعداد ۱۳ درگاه برای اندازه گیری پتانسیل و pH در طول پوشش جدا شده ایجاد گردید. این درگاه ها به ترتیب در فاصله های ۱، ۳، ۷، ۱۹، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰، ۱۴۰، ۱۶۰، ۱۸۰ و ۱۹۰ سانتی متری از دهانه جدایش قرارداد شدند. تغییرات پتانسیل و pH در حین هر آزمون با قرار دادن الکترود مرجع کالومل و pH درون این درگاه های اندازه گیری انجام شد. در این پژوهش از pH متر Metrohm جهت اندازه گیری pH و همچنین برای تعیین مقاومت الکتریکی محلول از دستگاه کندانداکومتتر SCHOTT CG 857 استفاده گردید.

روش پالسی می باشد. همچنین مشاهده می شود که حفاظت پالسی برای شیار با عرض ۵۰ میلی متر نتایج بهتری ارائه می دهد و پتانسیل منفی تری را بر روی سطح فلز تأمین می نماید.

می گردد و به دلیل افزایش عمق نفوذ جریان حفاظتی، گرادیان پتانسیل به میزان چشم گیری کاهش و سراسر طول دو متری شیار ایجاد شده در محدوده حفاظتی قرار می گیرد که این امر نشان دهنده افزایش چشم گیر برد حفاظت در



شکل ۲. تغییرات پتانسیل نسبت به فاصله از دهانه شیار با عرض ۱۰ و ۵۰ mm در دو حالت حفاظت کاتدی به روش معمول و پالسی با فرکانس ۱۰۰۰۰ Hz در زمان ۲۴۰ ساعت.

پالسی به دلیل متفاوت بودن شکل موج اعمالی در مقایسه با روش معمول، علت کاهش گرادیان پتانسیل در این روش را می توان این گونه بیان کرد که که اولاً به دلیل کم تر بودن زمان روشنی و خاموشی در فرکانس یادشده، احتمال تشکیل پلاریزاسیون غلظتی حتی در زمان روشنی نیز کاهش می دهد، ثانیاً به دلیل کم تر بودن زمان خاموشی کاتیون ها فاصله بسیار کم تری از سطح می گیرند و درعین حال نفوذ کاتیون ها به سمت درون شیار تا رسیدن به یک غلظت تعادلی ادامه پیدا می کند [۳۲]. درنهایت این امر باعث می شود که بار مثبت بیشتری نزدیک به سطح فلز تجمع نماید با رسیدن به زمان روشنی، الکترون های ارسالی از سوی رکتیفایر مصرف گردند. این امر باعث حفظ پیوسته اختلاف پتانسیل بین فولاد و رکتیفایر گردیده و موجب شار بیشتر جریان و افت کم تر پتانسیل در طول شیار می شود.

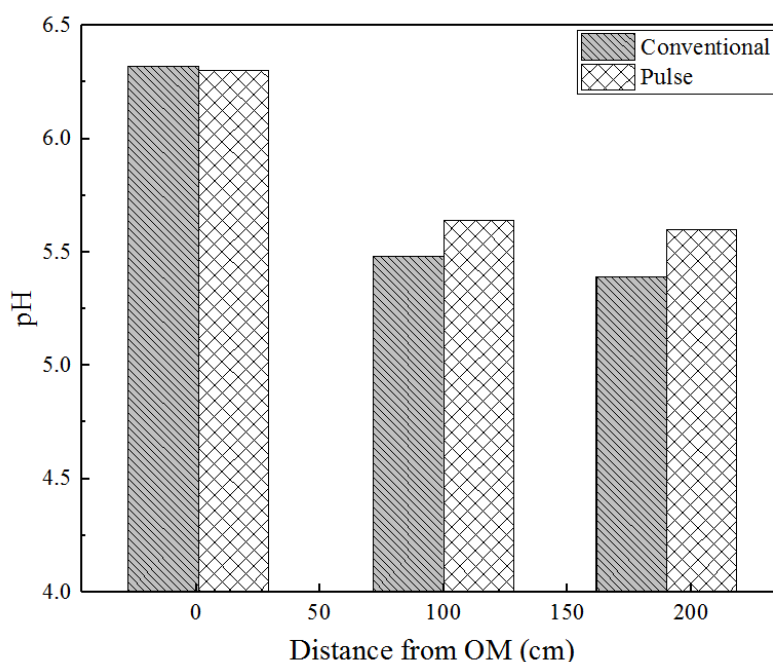
پلاریزاسیون در سطح یک الکتروود به عواملی همانند پلاریزاسیون غلظتی که به دلیل تجمع یون ها و محصولات در اطراف الکتروود به وجود می آید، پلاریزاسیون اکتیواسیون که ناشی از انرژی اکتیواسیون لازم جهت انتقال بار می باشد و پلاریزاسیون مقاومتی که در اثر مقاومت اهمی الکترولیت ایجاد می گردد، وابسته می باشد [۳۴]. همچنین تحقیقات نشان می دهد در شرایط افت پتانسیل در زیر پوشش، غلظت اجزای محلول در نقاط مختلف زیر پوشش جدا شده متفاوت بوده که وابسته به هندسه شیار ایجاد شده می باشد [۲۰، ۲۱، ۲۲]. از طرفی حفاظت کاتدی تمایل دارد از طریق فرآیند مهاجرت، کاتیون های موجود در محلول را به سمت درون شیار سوق دهد اما به دلیل دانسیته بالای جریان در محل عیب و به وجود آمدن پلاریزاسیون غلظتی در محل دهانه، شار جریان حفاظتی به درون شیار محدود می گردد [۲۲]. در روش

افزایش یافته است ولی باین وجود که طول شیار ده برابر افزایش پیدا کرده است با اعمال پتانسیل $1000 \text{ mV}_{\text{SCE}}$ - تمامی طول شیار ۲ متری با عرض ۵۰ میلی متر در محدوده پتانسیل حفاظتی فولاد خط لوله قرار گرفته است ولی در شیار با عرض ۱۰ میلی متر، سطح حفاظت کم تری مشاهده می گردد. علت کم تر بودن سطح حفاظتی در شیار با عرض ۱۰ میلی متر در مقایسه با عرض ۵۰ میلی متری می تواند به دلیل بالا بودن مقاومت ناشی از پلاریزاسیون غلظتی باشد که انتقال جریان مثبت از دهانه به سمت انتهای شیار را محدود کرده و باعث ایجاد گرادیان پتانسیل بزرگ تری می شود [۳۲].

۲-۳- تغییرات pH در زیر پوشش جدا شده در شیار با عرض ۱۰ میلی متر

تغییرات pH در روش حفاظتی معمول و پالس در سه موقعیت ابتدا، میانه و انتهای شیار در پایان تست در شکل ۳ نشان داده است. همان طور که مشاهده می گردد در روش حفاظت معمول به دلیل عدم انجام واکنش های کاتدی و توزیع غیریکنواخت پتانسیل، بین مقادیر pH در ابتدا و انتهای شیار اختلاف ایجاد شده و شرایط اسیدی تری در مقایسه با روش پالس به وجود آمده است [۱۸ و ۲۰].

در پژوهش قبلی [۳۲] فرکانس 10000 Hz تمامی طول شیار ۲۰ سانتی متری را تحت حفاظت کامل قرارداد که با توجه به افزایش طول شیار در پژوهش حاضر نتایج از چندین جهت قابل بررسی می باشد. از یک طرف افزایش عرض شیار رابطه مستقیمی با سطح پتانسیل حفاظتی دارد چرا که به دلیل افزایش عرض شیار حجم محلول حبس شده در واحد طول در زیر پوشش جدا شده افزایش می یابد و با بیشتر شدن مقاومت محلول، پتانسیل افت می کند. اما تحقیقات پردومو و همکاران نشان می دهد افزایش مقاومت محلول در مقایسه با سایر پارامترها، تأثیر اندکی در تغییرات پتانسیل در زیر پوشش دارد [۱۹]. بنابراین از بین عوامل تأثیر گذار ذکر شده در میزان پلاریزاسیون و با توجه به تحقیقات و پژوهش های صورت گرفته در این رابطه، احتمالاً مقاومت ناشی از پلاریزاسیون غلظتی تأثیر بیشتری نسبت به سایر پارامترها در افت پتانسیل دارد که با کم تر شدن اثر این عامل، برد حفاظتی در زیر پوشش جدا شده افزایش پیدا کرده است. این موضوع در بالاتر بودن برد حفاظتی در شیار با عرض ۵۰ نسبت به شیار ۱۰ میلی متری به وضوح دیده می شود. در پژوهش حاضر به دلیل افزایش طول جدایش به ۲ متر و بیشتر شدن مقاومت اهمی سیستم، گرادیان پتانسیل در مقایسه با پژوهش قبلی نسبتاً



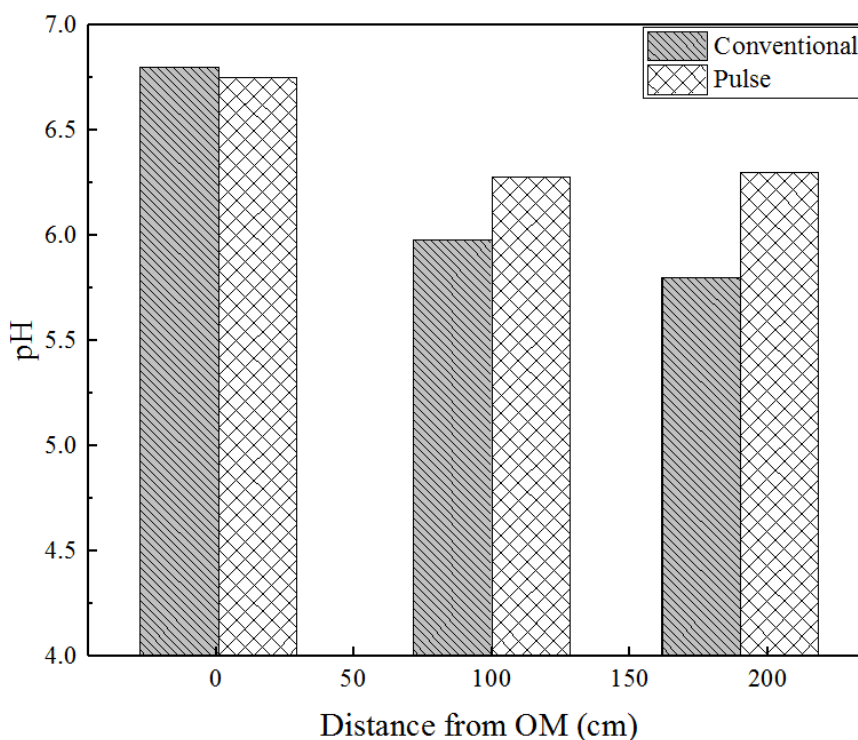
شکل ۳. تغییرات pH در موقعیت های دهانه، میانه و انتهای شیار با عرض ۱۰ mm پس از ۲۴۰ ساعت در اثر اعمال حفاظت کاتدی به روش معمول و پالس.

در روش پالسی توزیع پتانسیل درون شیار بخصوص در فواصل بیشتر از ۱۰۰ سانتی متری شرایط انتهایی شیار همانند شرایط حفاظت به روش معمول شده است اگرچه مقادیر pH در این حالت به نسبت روش معمول کمی بیشتر (بیشتر از مقدار ۵/۵) می باشد ولی گرادیان pH همچنان در طول شیار مشاهده می گردد. بنابراین احتمالاً به دلیل تأثیر مقاومت پلاریزاسیون در کاهش سطح حفاظتی، عمق نفوذ حفاظت کاتدی پالسی در فواصل بیشتر از ۱۰۰ سانتی متر کاهش می یابد که همین موضوع باعث توزیع غیریکنواخت پتانسیل شده و نهایتاً گرادیان غلظتی در نقاط انتهایی شیار رخ می دهد به طوری که مقادیر pH ابتدا و انتها متفاوت خواهند شد اگرچه باگذشت زمان سیستم به تعادل می رسد و احتمال یکنواختی اجزا در زیرپوشش افزایش می یابد [۳۵ و ۳۶].

۳-۳- تغییرات pH در زیرپوشش جداشده در شیار با عرض ۵۰ میلی متر

تغییرات pH در روش معمول و پالس در سه موقعیت ابتدا، میانه و انتهایی شیار در پایان تست در شکل ۴ نشان داده است.

نکته قابل تأمل در این شرایط مقادیر مربوط به pH میانه و انتهایی شیار می باشد که در روش پالس نمود بیشتری دارد. در این عرض شیار، مقدار pH در حالت پالسی در نقاط میانی و انتهایی تقریباً برابر بوده و معادل با ۶/۲۵ می باشد که در مقایسه با شیار ۱۰ میلی متری (معادل با ۵/۵ در شکل ۳) افزایش قابل توجهی نشان می دهد. این موضوع متأثر از برد بیشتر و توزیع بهتر جریان حفاظتی در این شرایط می باشد که باعث انجام شدن بیشتر واکنش های کاتدی (نرخ احیای بالای مولکول های آب و اکسیژن) و متعاقباً افزایش pH می گردد. همان طور که ذکر گردید افزایش عرض شیار اگرچه باعث افزایش حجم محلول حبس شده در زیرپوشش می گردد اما از طرفی احتمالاً اثر مقاومت پلاریزاسیون غلظتی را که منجر به کاهش شدید سطح حفاظتی در زیرپوشش می شود را کاهش می دهد. بنابراین افزایش عرض شیار تأثیر قابل توجهی در بهبود برد حفاظتی و در پی آن افزایش pH خواهد داشت. قابل ذکر است که باگذشت زمان هنگامی که مقدار pH درون شیار افزایش می یابد، فرآیند نفوذ و مهاجرت هیدروژن به درون شیار به منظور حفظ تعادل بار شدت می گیرد [۲۲].

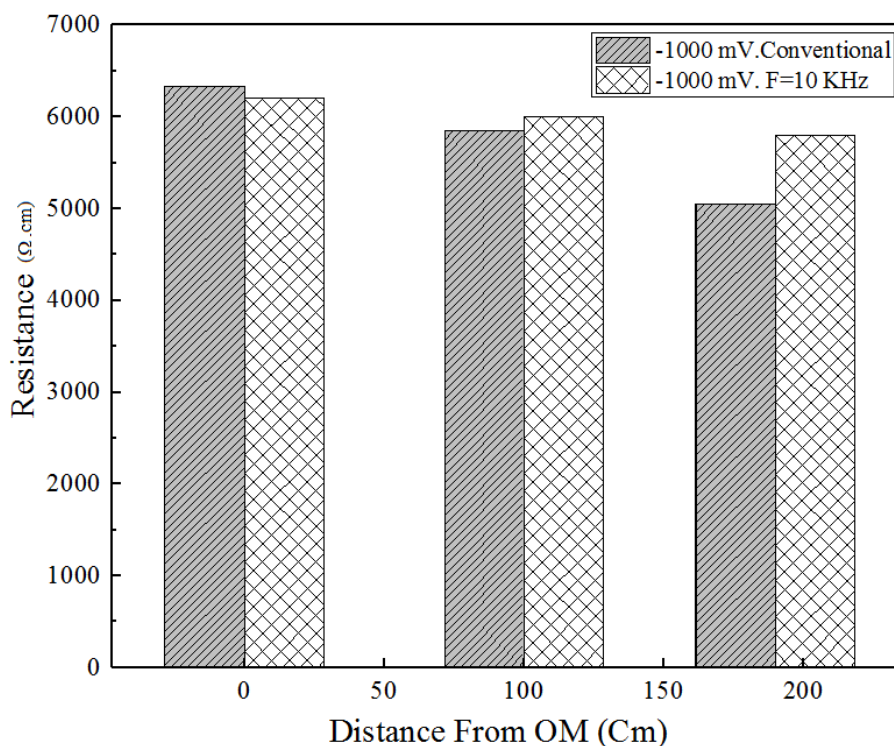


شکل ۴. تغییرات pH در موقعیت های دهانه، میانه و انتهایی شیار با عرض ۵۰ mm پس از ۲۴۰ ساعت در اثر اعمال حفاظت کاتدی به روش معمول و پالس.

۳-۴- تغییرات مقاومت در زیر پوشش جدا شده

تغییرات مقاومت محلول در زیرپوشش جدا شده برحسب فاصله از دهانه شیار در پایان آزمون به دو روش حفاظتی معمول و پالس در موقعیت های ابتدا، میانه و انتهای شیار با عرض ۵۰ میلی متر، در شکل ۵ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می گردد مقاومت محلول زیرپوشش در روش حفاظت معمول با افزایش فاصله از دهانه کاهش پیدا کرده است. علت این امر کاهش pH متأثر از عدم حفاظت کامل و اسیدی تر شدن شرایط زیرپوشش می باشد [۲۰ و ۳۵] که نهایتاً منجر به کاهش مقاومت می گردد [۳۷]. کاهش مقاومت در نقاط انتهایی شیار و در فاصله دو متری از

دهانه شیار بارزتر می باشد. اما در اثر اعمال حفاظت کاتدی پالسی شرایط متفاوت می باشد، به گونه ای که با افزایش فاصله افت مقاومت در مقایسه با روش معمول کم تر می گردد. مقدار مقاومت در نقطه انتهایی شیار قابل توجه می باشد و تفاوت ۱۰۰۰ اهم. سانتی متری با حفاظت به روش معمول از خود نشان می دهد. این موضوع با توجه به سطح حفاظتی بالاتر در این روش و در این عرض جدایش (شکل ۲) قابل تفسیر می باشد. حفاظت بیشتر منجر به انجام هر چه بهتر واکنش های کاتدی و تولید یون های هیدروکسیل شده که این موضوع باعث کم تر شدن غلظت یون های H^+ و عدم افت شدید مقاومت محلول در زیرپوشش جدا شده می گردد [۳۲ و ۳۵].



شکل ۵. تغییرات مقاومت محلول زیرپوشش جدا شده برحسب فاصله از دهانه شیار (عرض ۵۰ میلی متر) در موقعیت های ابتدا، میانه و انتهای شیار با اعمال حفاظت کاتدی به روش معمول و پالس در زمان ۲۴۰ ساعت.

۳-۵- تأثیر مقاومت محلول شبیه سازی شده خاک

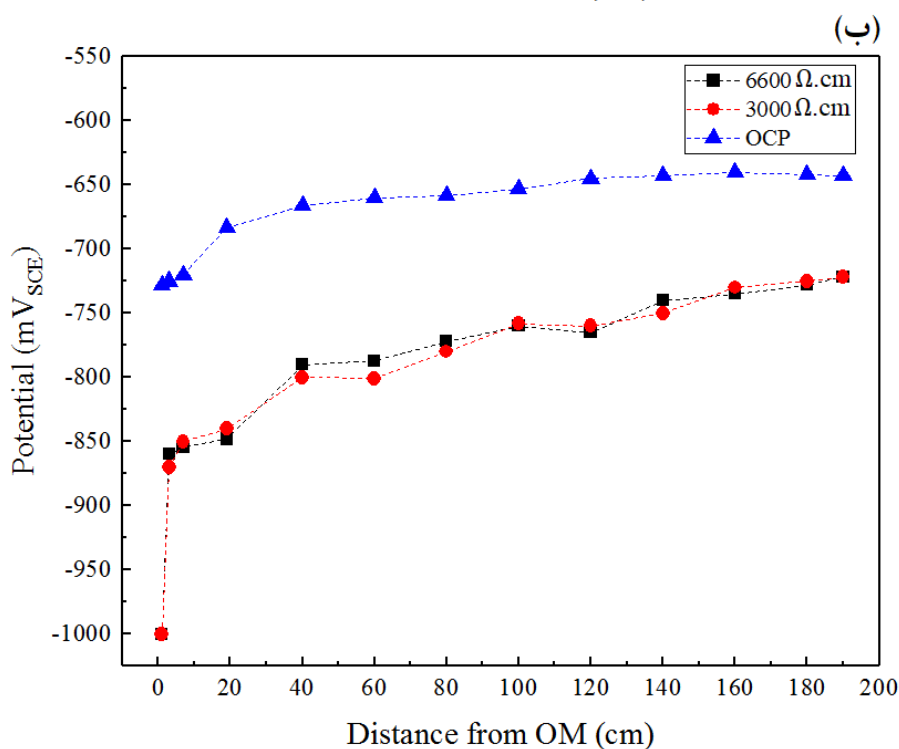
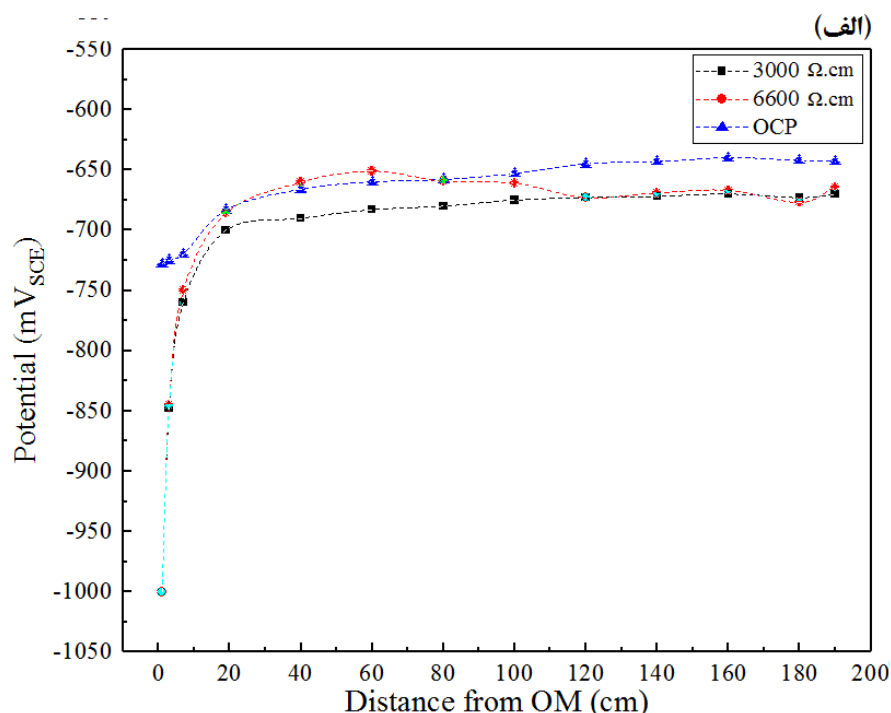
در میزان برد حفاظت

به منظور بررسی تأثیر مقاومت خاک در میزان برد حفاظت کاتدی پالسی مقاومت های $6600 \Omega.cm$ و $3000 \Omega.cm$ و عرض شیار ۱۰ mm مورد مطالعه قرار گرفتند. همان طور که در شکل ۶ ملاحظه می گردد در روش حفاظتی معمول (شکل

الف) در مقاومت $6600 \Omega.cm$ میزان پتانسیل در همان ۲۰ سانتی متر ابتدایی دچار افت شده و به مقادیر نزدیک به OCP رسیده است و با کاهش مقاومت محلول به $3000 \Omega.cm$ اگرچه سطح حفاظت به مقدار ۵۰ میلی ولت بهبود یافته است اما در فاصله ۱۲ سانتی متری از دهانه دچار افت شده و در انتهای شیار رفتاری همانند مقاومت $6600 \Omega.cm$ مشاهده

حفاظت در زیرپوشش اثرپذیری بیشتری را از عرض شیار و پلاریزاسیون غلظتی دارد.

می گردد. در روش پالسی نیز (شکل ب) تفاوت مشهودی در سطح حفاظتی مشاهده نمی گردد که با نتایج مطالعات انجام شده تطابق دارد [۱۹]. بنابراین با مقایسه نتایج قبلی و اثر جزیی مقاومت محلول در برد حفاظت کاتدی احتمالاً سطح



شکل ۶. تأثیر مقاومت محلول شبیه سازی C2 در میزان برد حفاظت کاتدی پس از ۲۴۰ ساعت در زیرپوشش جداشده در حالت های حفاظت 1000 mV_{SCE} - (الف) به روش معمول، (ب) روش پالسی.

نتیجه گیری

- ۱- با اعمال حفاظت کاتدی $1000 \text{ mV}_{\text{SCE}}$ به روش معمول در هر دو عرض جدایش از پوشش نواری جدا شده از فولاد خط لوله، میزان پتانسیل در همان ابتدای شیار دچار افت شد و به مقادیر OCP رسید. میزان این افت در جدایش با عرض ۵۰ میلی متر به نسبت شیار ۱۰ میلی متری به صورت جزئی کم تر بود.
- ۲- با اعمال حفاظت کاتدی پالسی $1000 \text{ mV}_{\text{SCE}}$ با فرکانس ۱۰۰۰۰ هرتز در شیار با عرض ۵۰ mm در پوشش نواری جدا شده از فولاد خط لوله، گرادیان پتانسیل به دلیل افزایش عمق نفوذ جریان حفاظتی در مقایسه با عرض ۱۰ mm به میزان چشم گیری کاهش و سراسر طول دو متری جدایش پس از ۲۴۰ ساعت در محدوده حفاظتی قرار گرفت.
- ۳- مقاومت غالب در سیستم با افزایش عرض شیار در زیر پوشش نواری جدا شده از فولاد خط لوله، از مقاومت پلاریزاسیون به مقاومت الکترولیتی (اهمی) تغییر می کند به گونه ای که در این حالت حجم محلول حبس شده در زیرپوشش افزایش می یابد و اثر مقاومت پلاریزاسیون که منجر به کاهش شدید سطح حفاظتی در زیرپوشش می شد، کاهش می یابد.
- ۴- مقادیر pH در اثر اعمال حفاظت پالسی $1000 \text{ mV}_{\text{SCE}}$ با فرکانس ۱۰۰۰۰ هرتز در شیار با عرض ۵۰ mm در زیر پوشش نواری جدا شده از فولاد خط لوله، به دلیل افزایش برد جریان حفاظتی بیشتر از شیار با عرض ۱۰ mm اندازه گیری شد.

مراجع

- [1] F. Kajiya and K. Okamura, "Evaluating cathodic protection reliability on steel pipe in microbially active soils," *Corrosion*, vol. 55, no. 1, 1999, pp. 74-80.
- [2] S. S. Abedi, A. Abdolmaleki, and N. Adibi, "Failure analysis of SCC and SRB induced cracking of a transmission oil products pipeline," *Engineering Failure Analysis*, vol. 14, no. 1, 2007, pp. 250-261.
- [3] Y. F. Cheng, "Fundamentals of hydrogen evolution reaction and its implications on near-neutral pH stress corrosion cracking of pipelines," *Electrochimica Acta*, vol. 52, no. 7, 2007, pp. 2661-2667.
- [4] E. S. Meresht, T. S. Farahani, and J. Neshati, "Failure analysis of stress corrosion cracking occurred in a gas transmission steel pipeline," *Engineering Failure Analysis*, vol. 18, no. 3, 2011, pp. 963-970.
- [5] S. A. Shipilov and I. Le May, "Structural integrity of aging buried pipelines having cathodic protection," *Engineering Failure Analysis*, vol. 13, no. 7, 2006, pp. 1159-1176.
- [6] W. von Baekmann, W. Schwenk, and W. Prinz, *Handbook of cathodic corrosion protection*. Gulf Professional Publishing, 1997.
- [7] M. Parker and E. G. Peattie, *Pipeline Corrosion and Cathodic Protection: A Practical Manual for Corrosion Engineers, Technicians, and Field Personnel*. Gulf Professional Publishing, 1984.
- [8] P. R. Roberge, *Handbook of corrosion engineering*. McGraw-Hill, 2000.
- [9] E. L. Koehler, "The mechanism of cathodic disbondment of protective organic coatings, aqueous displacement at elevated pH," *Corrosion*, vol. 40, no. 1, 1984, pp. 5-8.
- [10] D.-T. Chin and G. M. Sabde, "Current distribution and electrochemical environment in a cathodically protected crevice," *Corrosion*, vol. 55, no. 3, 1999, pp. 229-237.
- [11] R. Brousseau and S. Qian, "Distribution of steady-state cathodic currents underneath a disbonded coating," *Corrosion*, vol. 50, no. 12, 1994, pp. 907-911.
- [12] B. Vuillemin, R. Oltra, R. Cottis, and D. Crusset, "Consideration of the formation of solids and gases in steady state modelling of crevice corrosion propagation," *Electrochimica Acta*, vol. 52, no. 27, 2007, pp. 7570-7576.
- [13] T. R. Jack, G. Van Boven, M. Wilmott, R. L. Sutherby, and R. G. Worthingham, "Cathodic protection potential penetration under disbonded pipeline coating," *Materials Performance; (United States)*, vol. 33, no. 8, 1994.
- [14] R. N. Parkins, A. J. Markworth, J. H. Holbrook, and R. R. Fessler, "Hydrogen gas evolution from cathodically protected surfaces," *Corrosion*, vol. 41, no. 7, 1985, pp. 389-397.

- [15] M. Xu, C. N. C. Lam, D. Wong, and E. Asselin, "Evaluation of the cathodic disbondment resistance of pipeline coatings-A review," *Progress in Organic Coatings*, vol. 146, p. 105728, 2020.
 - [16] B. W. Cherry and A. N. Gould, "Disbondment mechanisms for a heat shrink polyethylene coating on a cathodically protected hot pipeline," *The Journal of Adhesion*, vol. 33, no. 4, 1991, pp. 223-237.
 - [17] K. Fink, J. H. Payer, and R. Savinell, "Mitigation of corrosion by modification of the environment beneath disbonded coatings on pipelines," *K. Fink, J. H. Payer, R. Savinell, Paper*, no. 578, 1993.
 - [18] X. Chen, X. G. Li, C. W. Du, and Y. F. Cheng, "Effect of cathodic protection on corrosion of pipeline steel under disbonded coating," *Corrosion Science*, vol. 51, no. 9, 2009, pp. 2242-2245.
 - [19] J. J. Perdomo and I. Song, "Chemical and electrochemical conditions on steel under disbonded coatings: the effect of applied potential, solution resistivity, crevice thickness and holiday size," *Corrosion Science*, vol. 42, no. 8, 2000, pp. 1389-1415.
 - [20] M. Yan, J. Wang, E. Han, and W. Ke, "Local environment under simulated disbonded coating on steel pipelines in soil solution," *corrosion science*, vol. 50, no. 5, 2008, pp. 1331-1339.
 - [21] P. F. Lara and E. W. Klechka, "Corrosion mitigation under disbonded coating," *CORROSION* 98, 1998.
 - [22] F. M. Song, "Predicting the chemistry, corrosion potential and corrosion rate in a crevice formed between substrate steel and a disbonded permeable coating with a mouth," *Corrosion Science*, vol. 55, 2012, pp. 107-115.
 - [23] W. Wang, K. Shen, J. Yi, and Q. Wang, "A mathematical model of crevice corrosion for buried pipeline with disbonded coatings under cathodic protection," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 41, 2016, pp. 270-281.
 - [24] A. J. Markworth, "Evaluation of the spatiotemporal distribution of electrostatic potential within a solution-filled crevice," *Corrosion*, vol. 47, no. 3, 1991, pp. 200-201.
 - [25] F. Gan, Z.-W. Sun, G. Sabde, and D.-T. Chin, "Cathodic protection to mitigate external corrosion of underground steel pipe beneath disbonded coating," *Corrosion*, vol. 50, no. 10, 1994, pp. 804-816.
 - [26] S. Y. Li, Y. G. Kim, Y. T. Kho, and T. Kang, "Statistical approach to corrosion under disbonded coating on cathodically protected line pipe steel," *Corrosion*, vol. 60, no. 11, 2004, pp. 1058-1071.
 - [27] R. R. Fessler, A. J. Markworth, and R. N. Parkins, "Cathodic protection levels under disbonded coatings," *Corrosion*, vol. 39, no. 1, 1983, pp. 20-25.
 - [28] N. Sridhar, D. S. Dunn, and M. Seth, "Application of a general reactive transport model to predict environment under disbonded coatings," *Corrosion*, vol. 57, no. 7, 2001, pp. 598-613.
 - [29] A. Fatehi, A. Eslami, M. ali Golozar, K. Raeissi, and R. Ashari, "Cathodic protection under a simulated coating disbondment: effect of SRB," *Corrosion*, 2019.
 - [30] N. N. Bich and J. Bauman, "Cathodic protection of well casings by pulsed current," NACE International, Houston, TX (United States), 1994.
 - [31] I. A. Metwally and A. H. Al-Badi, "Analysis of different factors affecting cathodic protection for deep well casings," *Materials and corrosion*, vol. 61, no. 3, 2010, pp. 245-251.
- [۳۲] نجفی، ح.، اسلامی، ع.، گلغذار، م.، احمدی، م.، کاویان، الف.، بررسی تأثیر حفاظت کاتدی پالسی بر خوردگی و شرایط الکتروشیمیایی در زیرپوشش جداشده از فولاد خط لوله، فصل نامه علوم ومهندسی خوردگی، شماره ۱۸، ۱۳۹۷.
- [33] R. N. Parkins, W. K. Blanchard Jr, and B. S. Delanty, "Transgranular stress corrosion cracking of high-pressure pipelines in contact with solutions of near neutral pH," *Corrosion*, vol. 50, no. 5, 1994, pp. 394-408.
 - [34] A. J. Bard and L. R. Faulkner, "Fundamentals and applications. Electrochem," *Methods*, vol. 2, 2001, p. 482.
 - [35] X. Chen, C. Du, X. Li, and Y. Huang, "Effects of cathodic potential on the local electrochemical environment under a disbonded coating," *Journal of applied electrochemistry*, vol. 39, no. 5, 2009, pp. 697-704.
 - [36] R. Ashari, A. Eslami, and M. Shamanian, "Corrosion and Electrochemical Conditions of Pipeline Steel

under Tape Coating Disbondments: Effect of Disbondment Gap Size and Morphology,” *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, vol. 11, no. 1, 2020, p. 4019051.

- [37] R. Ashari, A. Eslami, M. Shamanian, and S. Asghari, “Effect of weld heat input on corrosion of dissimilar welded pipeline steels under simulated coating disbondment protected by cathodic protection,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 2, 2020, pp. 2136–2145.

