

# بررسی آنالیز کمی و کیفی اثر تجمعی فاکتورهای محیطی بر میزان جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی پوشش کلتار اپوکسی پلی آمید در آب دریای مصنوعی

هدا جمشیدنیا\*<sup>۱</sup>، محمود پاک شیر<sup>۲</sup>، محمد جعفر هادیان فرد<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد-گرایش خوردگی، بخش مهندسی و علم مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

<sup>۲</sup> دانشیار، بخش مهندسی و علم مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

<sup>۳</sup> استاد، بخش مهندسی و علم مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

\*نویسنده مسئول: h.jamshidnia@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۳/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۰۳

## چکیده:

در این تحقیق، میزان جریان مورد نیاز جهت حفاظت کاتدی فولاد کم کربن پوشش داده شده توسط کلتار اپوکسی پلی آمید تحت اثر تجمعی فاکتورهای محیطی از قبیل دما، سرعت، شوری و pH که از جمله مهمترین فاکتورهای اثرگذار بر جریان مورد نیاز جهت حفاظت کاتدی سازه‌ها در محیط‌های دریایی می‌باشند مورد مطالعه قرار گرفت. در این بررسی، درصد مشارکت هر یک از پارامترها به نحو انفرادی و تجمعی در تغییر میزان جریان حفاظتی توسط آنالیز کمی به روش آنالیز واریانس دو مرحله‌ای انجام گردید. علاوه بر آن، نحوه و پیش‌بینی مسیر تغییرات جریان مورد نیاز جهت حفاظت کاتدی توسط آنالیز کیفی سنجیده شد. مجموع نتایج حاصل شده از بررسی اثر هر یک از پارامترها به صورت انفرادی و تجمعی، نشان دهنده تاثیر بسیار مهم و متفاوت همراهی پارامترها نسبت به اعمال انفرادی آنها، بر میزان جریان حفاظت کاتدی می‌باشد. نتایج بررسی گویای این واقعیت است که در میان فاکتورهای اعمال شده، دما از عمده‌ترین پارامترهای اثرگذار بر میزان جریان مورد نیاز جهت حفاظت کاتدی است و کلتار اپوکسی پلی آمید مقاومت مناسبی از خود در مقابل تغییرات pH نشان می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** حفاظت کاتدی، کلتار اپوکسی پلی آمید، فاکتورهای محیطی، آنالیز کمی، آنالیز کیفی.

# An Investigation of quantitative and qualitative analysis of synergistic environmental effects on current requirement for cathodic protection of coal tar polyamide coating in artificial seawater

Hoda Jamshidnia <sup>\*1</sup>, Mahmood Pakshir <sup>2</sup>, MohammadJafar Hadianfard<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Student, Department of Materials Science and Engineering, Shiraz University

<sup>2</sup> Assistant professor, Department of Materials Science and Engineering, Shiraz University

<sup>3</sup> Professor, Department of Materials Science and Engineering, Shiraz University

\* Corresponding Author: [h.jamshidnia@yahoo.com](mailto:h.jamshidnia@yahoo.com)

Submission: 2014/02/22      Acceptance: 2014/06/02

## Abstract:

In this paper, current requirement for cathodic protection of low carbon steel that coated by coal tar polyamide coating under synergistic effect of environmental parameter has been studied. This project is mainly focused on the effect of temperature, velocity, salinity and pH, which are the most important factors, that can affect on protective current from corrosion. Assess the percentage of cumulative and individual effect of factors on protective current was computed by the analysis of variance (ANOVA) via full two-level factorial experiment. Moreover, qualitative analysis has been studied to predict the path variation of current required for cathodic protection under individual and cumulative parameters. The overall results, that get from these two analysis of individual and cumulative effect of parameters on protective current, was shown that cumulative effect of parameters are more important and effective than individual effect of parameters on current requirement for cathodic protection in seawater. Considerable, according to the results, among the factors, temperature is the most affecting factors on protective current for cathodic protection and coal tar polyamide coating has shown good resistance against pH variations.

**Keywords:** cathodic protection, coal tar polyamide, environmental parameters, quantitative analysis, qualitative analysis.

## ۱- مقدمه

ارزیابی محیط دریا به عنوان محیطی بسیار خورنده در دهه های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. به دلیل توسعه صنعت نفت و گاز، اهمیت مطالعه محیط دریایی به شدت افزایش یافته است. امروزه از آب دریا به عنوان یکی از منابع عمده تامین آب شیرین استفاده می شود. اما خوردگی در محیط های دریایی، از معضلات اصلی به شمار می آید و باعث کاهش ضخامت لوله های فولادی کربنی یا کم آلیاژ به کار رفته در سازه های دریایی می شود [۱]. لوله های فولاد کربنی به صورت گسترده برای سازه های دریایی کاملاً غوطه ور یا نیمه غوطه ور مورد استفاده قرار می گیرند و فولاد کربنی کم آلیاژ مقاومت بسیار بالایی را در مقابل خوردگی در آب دریا از خود نشان می دهد. از جمله فاکتورهای اثرگذار بر تسریع خوردگی فولاد در آب دریا می توان به میزان اکسیژن محلول، سرعت سیال، دما، pH و شوری (Salinity) اشاره کرد [۲ و ۳]. تمام لوله های دریایی به روش یکسان از خوردگی در آب دریا محافظت می شوند. برای حفاظت کامل معمولاً اعمال پوشش و حفاظت کاتدی به طور همزمان انجام می شود، زیرا اعمال پوشش مقدار جریان حفاظتی را کاهش داده و حفاظت کاتدی از خوردگی موضعی ناشی از تخلخل های میکروسکوپی و مایکروسکوپی موجود در پوشش جلوگیری می کند [۴ و ۵]. پوششهای آلی به همراه حفاظت کاتدی دو فاکتور موثر برای غلبه بر خوردگی سازه های فولادی غوطه ور در آب دریا بشمار می آیند. هر چند حفاظت کاتدی در سطح مشترک فلز/پوشش محیط را قلیایی کرده و همین امر باعث تخریب پوشش می شود، ایجاد روشی مناسب میان پوشش های آلی و حفاظت کاتدی می تواند سازه های دریایی را تا حد بسیار زیادی در محیط خورنده ایی همچون آب دریا محافظت کند [۶]. امروزه برای حفاظت سازه های دریایی به صورت گسترده از پوشش های حفاظتی بر پایه اپوکسی ها استفاده می شود. کلتار اپوکسیهای بهبود یافته مخلوطی کلونیدی از رزین اپوکسی و کلتار هستند و معمولاً عامل های سخت کننده برای این پوشش پلی آمین یا پلی آمید می باشد. کلتار اپوکسی مقاومت بسیار بالایی در آب دریا و آب شیرین از خود نشان می دهد و در مقابل جدایش کاتدی بسیار مقاوم است [۷]. متداول ترین روشهای حفاظت کاتدی سازه های دریایی و خطوط لوله غوطه ور شامل اعمال جریان، استفاده از آندهای فداشونده یا ترکیبی از هر دو می باشند. انتخاب روش حفاظت کاتدی و میزان جریان حفاظتی از میان روشهای ذکر شده به پارامترهای متعددی بستگی دارد، که می توان به برخی از آنها از جمله دمای آب، میزان اکسیژن، سرعت، ترکیب شیمیایی، فعالیت بیولوژیکی، pH و رسانایی اشاره کرد. پتانسیل

حفاظتی برای فولادهای کربنی کم آلیاژ که در سازه های دریایی مورد استفاده قرار می گیرند با توجه به الکتروم مرجع نقره-کلرور نقره ۰/۸- ولت می باشد [۸]. اثر فاکتورهای محیطی بر خوردگی، پوشش و حفاظت کاتدی در محیط دریایی و دیگر محیط ها در اکثر تحقیقات پیشین به صورت انفرادی مورد بررسی قرار گرفته است [۹-۱۷]. با توجه به تحقیقات انجام شده مشخص گردیده که فاکتورهای محیطی تاثیر بسیار مهمی بر شدت خوردگی سازه های فولادی و در نتیجه تاثیر بسیاری زیادی بر میزان جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی سازه های دریایی دارند. علی رغم این مطالعات، اثر تجمعی پارامترها به طور کامل بر روی میزان جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی نمونه پوشش داده شده مورد توجه قرار نگرفته است. لذا در این تحقیق برای اولین بار، میزان جریان مورد نیاز جهت حفاظت کاتدی نمونه های فولادی با پوشش کلتار اپوکسی پلی آمیدی تحت اثر تجمعی فاکتورهای محیطی با توجه به آنالیز کمی و کیفی مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف این تحقیق، بررسی تاثیر همزمانی فاکتورهای محیطی بر میزان جریان حفاظتی می باشد، از این روی نتایج حاصل از محاسبه درصد اثر پارامترها، در حالت انفرادی و تجمعی بر جریان مورد نیاز جهت حفاظت کاتدی با توجه به آنالیز کمی و پیش بینی مسیر تغییرات پارامترها در حالت انفرادی و تجمعی بر جریان حفاظتی با استناد به آنالیز کیفی در تحقیق آورده شده است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

## ۲-۱- نحوه تهیه محلول آزمایش

آب دریای مصنوعی بر اساس استاندارد ASTM D1141 با pH ۷/۵ تهیه گردید و برای ثابت نگه داشتن و تنظیم محلول در pH مورد نظر از محلول ۰/۱ نرمال هیدروکسید سدیم با توجه به استاندارد استفاده گردیده است [۱۸]. پارامتر شوری به صورت وزن کل نمک های محلول در ۱۰۰۰ گرم آب تعریف می شود. از آنجاییکه عمده ترین جزء موجود در آب دریا کلرید سدیم است، میزان شوری مورد نیاز از طریق افزایش کلرید سدیم در حد مورد نیاز و با ثابت نگاه داشتن مقدار سایر اجزاء، حاصل گردید. پارامتر شوری رابطه مستقیمی با میزان کلرینیت آب دارد، بنابراین میزان کلرور سدیم مورد نیاز برای حصول شوری در درجات مختلف می تواند مطابق با رابطه (۱) محاسبه گردد [۱۹-۲۲].

$$\text{Salinity} = 1.805 \text{ chlorinity} + 0.03 \quad (1)$$

در این رابطه شوری مقدار کل نمک های محلول بر حسب گرم در یک کیلو گرم آب و کلرینیت (chlorinity) مقدار کل یون کلر بر حسب گرم در یک کیلو گرم محلول است.

## ۲-۲- آماده سازی نمونه ها

### ۲-۲-۱- آماده سازی سطح

جهت آماده سازی، سطح نمونه با توجه به استاندارد سوئدی SIS-055900 تا سطح Sa2 1/2 به روش ماسه پاشی مورد آماده سازی قرار گرفته اند. نمونه های تحت آزمون از نوع تجاری فولاد کم کربن تهیه شده اند و درصد وزنی عناصر موجود در آلیاژ نمونه در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- درصد وزنی عناصر موجود در آلیاژ نمونه آماده سازی شده

Fe	C	Mn	Si	Ni	S	Cr	P
0.048	0.0048	0.221	0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.014

### ۲-۲-۲ اعمال پوشش

پوشش مورد بررسی در این تحقیق کلتار اپوکسی پلی آمید است. اعمال پوشش بر روی نمونه ها توسط پیستوله تحت فشار صورت گرفت. فشار تنظیم شده جهت پاشش رنگ بین ۵۰ تا ۱۰۰ (PSI) و فاصله سر پیستوله تا سطح نمونه ها حدود ۲۰ تا ۳۰ سانتیمتر تنظیم شد. پوشش مطابق با استاندارد IPS اعمال گردید و ضخامت پوشش کلتار اپوکسی پلی آمیدی براساس استاندارد IPS-m-tp 190، ۲۰۰ میکرون تهیه شد.

## ۲-۳- روش انجام آزمون های الکتروشیمیایی

برای انجام آزمون های الکتروشیمیایی از پیل سه الکترودی استفاده شد که در آن از الکتروود مرجع نقره-کلورور نقره به عنوان مرجع و از پلاتین به عنوان الکتروود کمکی استفاده گردید نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت پیش از آغاز آزمون در محلول با شرایط مورد نظر قرار گرفته و سپس به مدت ۶۰ دقیقه در پیل الکتروشیمیایی قرار گرفته و نمودار مربوط به میزان جریان مورد نیاز جهت حفاظت کاتدی آنها رسم گردیده است. آزمون ها توسط دستگاه پتانسیواستات-گالوانواستات مدل Autolab type III/FRA2 electrochemical interface potentiostat - galvanostats انجام گرفت، پتانسیل حفاظتی اعمال شده ۰/۸- ولت نسبت به الکتروود مرجع نقره - کلورور نقره اعمال گردید و تغییرات جریان بر حسب زمان در حالیکه پتانسیل حفاظتی اعمال شده، توسط دستگاه گزارش گردیده است. از نرم افزار GPES version 4.9 جهت تحلیل آزمایش های مرتبط استفاده شده و نتایج بر حسب میکرو آمپر بر سانتی متر مربع ارائه گردیده است.

## ۲-۴- روش آنالیز

بر اساس تحقیقات پیشین، به منظور بررسی اثر انفرادی و تجمعی هر یک از پارامترها بر میزان جریان حفاظتی، از آنالیز کمی و کیفی استفاده گردید [۲۳، ۲۴]. در این روش هر یک از پارامترهای مورد نظر در دو حالت بالا و پایین لحاظ می گردند، پارامترهای مورد بررسی عبارتند از دما در درجات ۵۰ و ۳۰ درجه سانتیگراد، سرعت سیال که توسط قرص مغناطیسی در دو حالت صفر و ۱۵۰ دور بر دقیقه دستگاه همزن، شوری در مقادیر ۴۰ و ۳۰ pH که در دو حالت ۷/۵ و ۹ مورد ارزیابی قرار گرفته اند. انتخاب این مقادیر براساس دامنه تغییرات فاکتورهای محیطی در آب دریایی طبیعی صورت گرفت و به منظور اعمال دقت کافی در حصول نتایج، هر آزمون ۲ مرتبه تکرار گردید. از آنجاییکه پارامترهای مورد بررسی در این مقاله شامل ۴ عامل دما، سرعت، شوری و pH می باشند، چنانچه هر یک از این عوامل در دو حالت ارزیابی شوند تعداد کل شرایط موجود که تمامی برهمکنش های ممکن بین عوامل را نشان دهد برابر  $2^4=16$  می باشد.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- نتایج حاصل از میزان جریان حفاظتی

مقادیر مربوط به جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی نمونه ها در شرایط مختلف بر حسب میکرو آمپر بر سانتی متر مربع در جدول شماره ۲ گردآوری شده است.

جدول ۲: شرایط آزمونها و جریان مورد نیاز حفاظتی

شرایط	pH	شوری	سرعت (rpm)	دما (°C)	جریان حفاظتی ( $\mu A/cm^2$ )
1	7.5	30	0	30	$i_1=0.89$
2	7.5	30	0	50	$i_2=2.5$
3	7.5	30	150	30	$i_3=1.8$
4	7.5	30	150	50	$i_4=3.8$
5	7.5	40	0	30	$i_5=1.3$
6	7.5	40	0	50	$i_6=3.8$
7	7.5	40	150	30	$i_7=2.6$
8	7.5	40	150	50	$i_8=4.95$
9	9	30	0	30	$i_9=1.45$
10	9	30	0	50	$i_{10}=3.05$
11	9	30	150	30	$i_{11}=2.25$
12	9	30	150	50	$i_{12}=4.54$
13	9	40	0	30	$i_{13}=2.03$
14	9	40	0	50	$i_{14}=4.33$
15	9	40	150	30	$i_{15}=3.48$
16	9	40	150	50	$i_{16}=5.9$

## ۳-۲- آنالیز کمی

محاسبه ی مجموع مربعات مربوط به فاکتور شوری از رابطه (۴) تبعیت می گردد.

در این محاسبات مقدار  $i_p$  برابر میانگین جریان حفاظتی در ۱۶ مرحله آورده شده در جدول ۲ بوده و برابر ۳/۰۴۲ است.

محاسبه درصد مشارکت هر یک از پارامترها در تغییر جریان حفاظتی به صورت انفرادی و تجمعی است بر اساس رابطه (۵) صورت گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده در جدول ۵ می توان به ارزیابی اثر تجمعی، مهمترین و کم اثرترین پارامترها پرداخت. در میان اثرات انفرادی ارائه شده، دما (T) و سرعت (V) بالاترین درصد مشارکت را داشته و همچنین می توان اشاره کرد که در میان

اثرات حاصل از عملکرد دوگانه پارامترها، فاکتور VT که نشان دهنده اثر عملکرد دما و سرعت می باشد، اثر گذارترین درصد را دارا بوده است. این مطلب بیانگر درصد اثر و اهمیت بالاتر پارامترهای سرعت و دما در مقایسه با شوری و pH بر اعمال تغییرات در میزان جریان حفاظتی پوشش کلتار اپوکسی پلی آمیدی می باشد. در بین پارامترهایی که اثرات عملکرد سه گانه را ارائه می دهند، SVT (اثر همزمان سرعت، دما، شوری)، VPT (اثر همزمان سرعت، دما، pH) و PST (اثر همزمان دما، شوری، pH)، به ترتیب بیشترین میزان درصد اثر بر تغییرات جریان حفاظتی را دارند. قابل توجه است که در تمامی موارد اثر پارامترهای دما و سرعت سیال در مقیاسه با دیگر پارامترها اهمیت و تاثیر بیشتری دارد. بالاترین درصد مشارکت مربوط به پارامتر VPST می باشد، این مطلب نشان دهنده تاثیر همراهی پارامترها بر میزان جریان حفاظتی نسبت به حالت انفرادی آنها است، که به واقعیت نزدیکتر می باشد. این نتایج همچنین بیان میدارد پوشش کلتار اپوکسی پلی آمیدی در مقابل تغییرات pH مقاوم تر بوده است و pH تغییر چندانی بر روی خصوصیات پوشش اعمال نکرده است، در صورتیکه این پوشش نسبت به دما حساس بوده، بنابراین در مناطقی که تغییرات دما شدید است، پوشش مناسبی نمی باشد.

## ۳-۳- آنالیز کیفی

آنالیز کیفی، پیش بینی مسیر تغییرات جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی را ضمن اعمال انفرادی و یا تجمعی پارامترها میسر می سازد، بدین معنا که اثر فاکتورها به تنهایی یا با همراهی یکدیگر سبب افزایش یا کاهش میزان جریان مورد نیاز حفاظت بوده و یا تاثیر چندانی

جهت انجام محاسبات و بررسی درصد اثر انفرادی و تجمعی فاکتورها بر تغییر میزان جریان حفاظتی، از روش آنالیز واریانس (ANOVA) (Analysis of variance) دو مرحله ای (Full two-level factorial) استفاده شده است. در ابتدا، اثر میانگین پارامترها در هر یک از درجات بالا و پایین محاسبه گردید، به عنوان مثال روش محاسبات درجات پایین و بالا برای شوری، به ترتیب در رابطه (۲) و (۳) آورده شده است.

نشان دهنده ی اثر میانگین جریان حفاظتی پارامتر n در شرایط پایین و بالا می باشد و هر یک از ۴ پارامتر مورد مطالعه می توانند به جای n قرار گیرند. مقادیر  $i_{1/16}, i_{1/15}, i_{1/14}, i_{1/13}, i_{1/12}, i_{1/11}, i_{1/10}, i_{1/9}, i_{1/8}, i_{1/7}, i_{1/6}$ ، جریان حفاظتی در مراحل 16، 15، 14، 13، 12، 11، 10، 9، 8، 7، 6، 5، 4، 3، 2، 1 بوده که در جدول ۲ آورده شده است. در این محاسبات S، V، T و P به ترتیب نماد دما، سرعت، شوری و pH می باشند. به عنوان مثال در محاسبه پارامتر  $i_{1/8}$ ، میانگین جریان حفاظتی در فرایندهایی که در آنها فاکتور شوری در سطح پایین خود اعمال گردیده، محاسبه شده است و  $i_{1/8}$ ، میانگین جریان حفاظتی در فرایندی که در آنها شوری در بالاترین سطح خود است. به همین ترتیب درجات بالا و پایین دیگر پارامترها نیز محاسبه و در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: اثر متوسط جریان حفاظتی برای هر پارامتر در درجات بالا و پایین

نتیجه	فرمول محاسبات	پارامترها
1.975	$(1/8)(i_1 + i_3 + i_5 + i_7 + i_9 + i_{11} + i_{13} + i_{15})$	$i_{1T}$
4.11	$(1/8)(i_2 + i_4 + i_6 + i_8 + i_{10} + i_{12} + i_{14} + i_{16})$	$i_{1bT}$
2.42	$(1/8)(i_1 + i_2 + i_5 + i_6 + i_9 + i_{10} + i_{13} + i_{14})$	$i_{1V}$
3.66	$(1/8)(i_3 + i_4 + i_7 + i_8 + i_{11} + i_{12} + i_{15} + i_{16})$	$i_{1bV}$
2.535	$(1/8)(i_1 + i_2 + i_3 + i_4 + i_9 + i_{10} + i_{11} + i_{12})$	$i_{1S}$
3.55	$(1/8)(i_5 + i_6 + i_7 + i_8 + i_{13} + i_{14} + i_{15} + i_{16})$	$i_{1bS}$
2.7	$(1/8)(i_1 + i_2 + i_3 + i_4 + i_5 + i_6 + i_7 + i_8)$	$i_{1p}$
3.38	$(1/8)(i_9 + i_{10} + i_{11} + i_{12} + i_{13} + i_{14} + i_{15} + i_{16})$	$i_{1bp}$

مرحله ی بعد در آنالیز واریانس، محاسبه ی مجموع مربعات است. فاکتور مجموع مربعات بایستی برای تمامی پارامترها و نیز کلیه برهمکنش های ممکن محاسبه شود. مجموع مربعات برای هر فاکتور و برآیند آنها در جدول ۴ آورده شده است. به عنوان مثال، جهت

$$i_{1s} = (1/8)(i_1 + i_2 + i_3 + i_4 + i_9 + i_{10} + i_{11} + i_{12}) \quad (2)$$

$$i_{1bs} = (1/8)(i_5 + i_6 + i_7 + i_8 + i_{13} + i_{14} + i_{15} + i_{16}) \quad (3)$$

$$SS_s = 2(i_{1s} - i_g)^2 + 2(i_{1bs} - i_g)^2 \quad (4)$$

$$K(\%) = SS_k / (SS_T + SS_V + SS_S + SS_P + SS_{VS} + SS_{VP} + SS_{PS} + SS_{ST} + SS_{PT} + SS_{VT} + SS_{SVT} + SS_{VPT} + SS_{PST} + SS_{VSP} + SS_{VPST}) \times 100\% \quad (5)$$

جدول ۴: مجموع مربعات برای تمام پارامترها

پارامترها	فرمول محاسبات	نتیجه
SS <sub>T</sub>	$2(i_{IT} - i_g)^2 + 2(i_{hT} - i_g)^2$	4.56
SS <sub>V</sub>	$2(i_{IV} - i_g)^2 + 2(i_{hV} - i_g)^2$	1.54
SS <sub>S</sub>	$2(i_{IS} - i_g)^2 + 2(i_{hS} - i_g)^2$	1.03
SS <sub>P</sub>	$2(i_{IP} - i_g)^2 + 2(i_{hp} - i_g)^2$	0.46
SS <sub>VS</sub>	$2(i_{IV} - i_g)^2 + 2(i_{hV} - i_g)^2 + 2(i_{IS} - i_g)^2 + 2(i_{hS} - i_g)^2$	2.57
SS <sub>VP</sub>	$2(i_{IV} - i_g)^2 + 2(i_{hV} - i_g)^2 + 2(i_{IP} - i_g)^2 + 2(i_{hp} - i_g)^2$	2
SS <sub>PS</sub>	$2(i_{IP} - i_g)^2 + 2(i_{hp} - i_g)^2 + 2(i_{IS} - i_g)^2 + 2(i_{hS} - i_g)^2$	1.49
SS <sub>ST</sub>	$2(i_{IS} - i_g)^2 + 2(i_{hS} - i_g)^2 + 2(i_{IT} - i_g)^2 + 2(i_{hT} - i_g)^2$	5.59
SS <sub>PT</sub>	$2(i_{IP} - i_g)^2 + 2(i_{hp} - i_g)^2 + 2(i_{IT} - i_g)^2 + 2(i_{hT} - i_g)^2$	5.02
SS <sub>VT</sub>	$2(i_{IV} - i_g)^2 + 2(i_{hV} - i_g)^2 + 2(i_{IT} - i_g)^2 + 2(i_{hT} - i_g)^2$	6.1
SS <sub>SVT</sub>	$2(i_{IV} - i_g)^2 + 2(i_{hV} - i_g)^2 + 2(i_{IS} - i_g)^2 + 2(i_{hS} - i_g)^2 + 2(i_{IT} - i_g)^2 + 2(i_{hT} - i_g)^2$	7.13
SS <sub>VPT</sub>	$2(i_{IV} - i_g)^2 + 2(i_{hV} - i_g)^2 + 2(i_{IP} - i_g)^2 + 2(i_{hp} - i_g)^2 + 2(i_{IT} - i_g)^2 + 2(i_{hT} - i_g)^2$	6.56
SS <sub>PST</sub>	$2(i_{IP} - i_g)^2 + 2(i_{hp} - i_g)^2 + 2(i_{IS} - i_g)^2 + 2(i_{hS} - i_g)^2 + 2(i_{IT} - i_g)^2 + 2(i_{hT} - i_g)^2$	6.05
SS <sub>VSP</sub>	$2(i_{IV} - i_g)^2 + 2(i_{hV} - i_g)^2 + 2(i_{IS} - i_g)^2 + 2(i_{hS} - i_g)^2 + 2(i_{IP} - i_g)^2 + 2(i_{hp} - i_g)^2$	3.03
SS <sub>VPST</sub>	$2(i_{IV} - i_g)^2 + 2(i_{hV} - i_g)^2 + 2(i_{IP} - i_g)^2 + 2(i_{hp} - i_g)^2 + 2(i_{IS} - i_g)^2 + 2(i_{hS} - i_g)^2 + 2(i_{IT} - i_g)^2 + 2(i_{hT} - i_g)^2$	7.59

جدول ۵: درصد اثر پارامترها

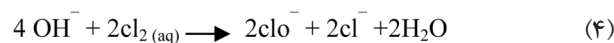
T(%)	V(%)	S(%)	P(%)	VS(%)
7.51	2.54	1.7	0.76	4.23
VP(%)	PS(%)	ST(%)	PT(%)	VT(%)
3.29	2.45	9.2	8.27	10.05
SVT(%)	VPT(%)	PST(%)	VSP(%)	VSPT(%)
11.74	10.8	9.96	4.99	12.5

ایجاد نکرده است، همچنین قیاس کیفی اثر فاکتورها از این روش امکان پذیر می باشد. جهت انجام این بررسی یک ماتریس  $16 \times 16$  طراحی گردید، که در آن تمامی اثرات ممکن بین پارامترها تعریف میشود، و در جدول ۶ آورده شده است. به منظور طراحی این ماتریس جریان حفاظتی محاسبه شده در شرایط ۱ که مشخصات آن در جدول ۲ آورده شده است، به عنوان حالت مرجع در نظر گرفته شده است و برای محاسبه آرایه سطر اول ماتریس جریان حفاظتی در سایر شرایط با این جریان مقایسه گردید. از آنجا که تمام فاکتورهای مورد نظر در سطح پایین خود اعمال گشته اند، این مقایسه امکان سنجش نحوه اثر پارامترهای مورد نظر را به نحوه انفرادی و یا تجمعی فراهم می آورد. به عنوان مثال در محاسبه آرایه  $A_{2,1}$ ، جریان حفاظتی در شرایط ۲ و ۱ مورد

مقایسه قرار گردیده اند. از آنجا که این دو حالت، تنها در پارامتر دما متفاوت می باشند، مقایسه جریان حفاظتی در این دو حالت مبین اثر دما بر میزان جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی است. بنابراین، اگر جریان حفاظتی در شرایط ۲ بیشتر از جریان در شرایط ۱ باشد، اثر افزایش دما بر جریان حفاظتی افزایشده و اگر جریان حفاظتی کمتر از شرایط مرجع باشد، اثر افزایش دما بر جریان حفاظتی کاهشده می باشد. به نحوه قراردادی، اثر افزایش دهنده ی پارامترها بر جریان حفاظتی به صورت " $0 >$ " و اثر کاهشده پارامترها به صورت " $0 <$ " تعریف شده است. سایر آرایه های ستون اول این جدول نیز مطابق روش آورده شده در تعریف آرایه  $A_{2,1}$ ، محاسبه شده اند. به منظور ادامه روند و محاسبه سایر آرایه های ماتریس تعریف شده در این نوع آنالیز کیفی، مقادیر  $|i_x - i_1|$  و  $|i_y - i_1|$  محاسبه و مورد بررسی قرار گرفته اند.

سرعت سیال می تواند تغییراتی را بر روی سطح پوشش ایجاد نماید [۱۴]. در حقیقت حرکت سیال به واسطه اعمال سرعت سبب ایجاد خراش و ساییدگی میکرونی بر روی سطح پوشش گردیده که همین امر با گذشت زمان کاهش ضخامت پوشش را به همراه دارد. در نتیجه خصوصیات حفاظتی پوشش با اعمال سرعت کاهش می یابد و با توجه به عیوب اجتناب ناپذیر در پوشش، زمینه برای نفوذ محلول فراهم میگردد. این امر کاهش چسبندگی میان پوشش و زیر لایه را به همراه دارد. از سوی دیگر افزایش سرعت سیال باعث افزایش نرخ اکسیژن رسانی به سطح کاتد میگردد و سرعت کلی فرایند را شدت می بخشد که این به معنای اعمال جریان بیشتر جهت حفاظت کامل می باشد.

فاکتور شوری سبب افزایش رسانایی الکترولیت میگردد و یون کلر را فعال تر میگردد. با افزایش شوری میزان کلر الکترولیت افزایش می یابد و واکنش های زیر رخ میدهد.



یون کلرید و هیپو کلرید تولید شده مطابق واکنش (۴) می تواند سبب تخریب و کاهش خصوصیات حفاظتی پوشش گردد. از سوی دیگر نفوذ یون کلر و هیپو کلراید از میان عیوب ذاتی و تخلخل های موجود در پوشش به زیر لایه، سبب افزایش نرخ خوردگی می شود و از این روی جهت حفاظت کاتدی به میزان جریان بیشتری احتیاج است. به عنوان آخرین فاکتور می توان به pH اشاره نمود که این فاکتور نیز همچون دیگر فاکتورها افزایش جریان حفاظتی را به همراه دارد. با توجه به پتانسیل اعمالی واکنش کاتدی غالب، احیاء اکسیژن می باشد (واکنش ۲). با افزایش pH، قلیابیت الکترولیت در فصل مشترک پوشش/زیر لایه به علت افزایش یون  $\text{OH}^-$  به شدت افزایش می یابد و با ایجاد خاصیت صابونی سبب تسهیل جدا شدن پوشش میگردد. در حقیقت افزایش pH زمینه را برای جدایش کاتدی فراهم میکند.

سایر آرایه های این ستون، اثر همزمانی پارامترها بر جریان حفاظتی را نشان میدهند که همراهی تمام پارامترها اثر افزایشده ای بر جریان حفاظتی داشته است.

در ادامه به بررسی آنالیز سایر آرایه های تعریف شده و اثر همزمانی پارامترها بر میزان جریان حفاظتی می پردازد. به عنوان مثال می توان آرایه  $A_{4,2}$  را عنوان نمود، این آرایه نیز مطابق با آنچه در قبل آورده شد محاسبه گردیده است و اثر همزمان پارامترهای دما و سرعت در قیاس با پارامتر دما به تنهایی را نشان میدهد. نتیجه

$i_x$ ،  $i_y$  و  $i_1$  به ترتیب میزان جریان حفاظتی در شرایط  $x$ ،  $y$  و  $1$  براساس جدول ۲ می باشند. نتایج حاصل از این قیاس، در آرایه  $A_{x,y}$  آورده شده اند. به عنوان مثال در محاسبه آرایه  $A_{4,2}$ ، مقادیر  $|i_2 - i_1|$  و  $|i_4 - i_1|$  محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفته اند. نتیجه آنالیز مقدار  $|i_2 - i_1|$  همانگونه که پیش از این توضیح داده شد، در آرایه  $A_{2,1}$  آورده شده که اثر پارامتر دما بر میزان جریان حفاظتی را نشان میدهد. به همین ترتیب مقدار  $|i_4 - i_1|$  نیز بیانگر آرایه  $A_{4,1}$  بوده و اثر پارامترهای سرعت و دما را بر میزان جریان حفاظتی نشان میدهد. چنانچه  $|i_4 - i_1| > |i_2 - i_1|$  باشد، نتیجه  $TV > T$  بدست می آید که افزون بودن اثر دما و سرعت نسبت به اثر دما را بر میزان جریان حفاظتی بیان میدارد و برعکس. سایر آرایه ها نیز با توجه به روند گفته شده آنالیز میشوند. با توجه به نتایج بدست آمده در ستون اول جدول ۶ ( $A_{2,1}$ ،  $A_{3,1}$ ،  $A_{5,1}$ ،  $A_{9,1}$ )، تمام فاکتورهای انفرادی لحاظ شده اثر افزایشده بر میزان جریان حفاظتی داشته داشته اند. اکنون با توجه به آنالیز کمی (جدول ۵)، میتوان عنوان نمود، دما بالاترین تاثیر را بر روی افزایش جریان حفاظتی دارد و پس از آن به ترتیب سرعت، شوری و pH اثر گذار هستند.

افزایش دما به علت تفاوت میان ضریب انبساط حرارتی زیر لایه و پوشش، سبب وارد شدن تنش به پوشش می شود. به عنوان مثال ضریب انبساط حرارتی پوشش اپوکسی برابر  $(1/^\circ\text{C}) \times 10^{-6} \times 65$  می باشد در حالیکه ضریب انبساط حرارتی فولاد برابر  $(1/^\circ\text{C}) \times 10^{-6} \times 16$  می باشد. بنابراین در اثر تغییرات دمایی بروز تنش اجتناب ناپذیر خواهد بود. البته تغییرات دما علاوه بر وارد کردن تنش، از طریق اثر بر خواص الاستیکی پوشش نیز بر روی خواص پوشش اثر گذار هستند. در مراحل اولیه به علت آرایش مجدد ملکولها اثر تنش حذف می شود ولیکن به مرور زمان در اثر تغییرات دما، مقاومت پوشش به علت آسیب های مکانیکی و شیمیایی پوشش کاهش می یابد. تخریب های مکانیکی سبب ایجاد ترکهای میکرونی شده و با ایجاد ترک جدایش نیز در اطراف این عیوب آغاز خواهد شد. بنابراین خواص محافظتی پوشش که مربوط به قدرت ممانعت کنندگی و چسبندگی پوشش ها میباشد، کاهش می یابد. از سوی دیگر فاکتور دما سبب افزایش سرعت واکنشهای شیمیایی و افزایش حرکت یونها در درون سیال میگردد که کاهش مقاومت محلول را به همراه دارد. با توجه به کاهش چسبندگی پوشش و افزایش هدایت الکترولیت نرخ خوردگی بالا رفته و در نتیجه به میزان جریان بیشتری جهت حفاظت احتیاج می باشد.

پارامتر سرعت نیز به عنوان دومین فاکتور اثر گذار سبب افزایش میزان جریان حفاظتی میگردد. با توجه به تحقیقات انجام شده،

سوی دیگر با توجه به نتایج، pH کمترین تاثیر را بر افزایش جریان حفاظتی دارا بوده است. بنابراین پوشش کلتار اپوکسی پلی آمیدی می تواند خصوصیات حفاظت کنندگی خود را در مقابل تغییرات pH حفظ نماید.

بالا ترین درصد اثر گذاری با توجه به آنالیز کمی (جدول ۵)، مربوط به اثر همزمان تمامی پارامترها می باشد. همچنین با توجه به آنالیز کیفی، آرایه هایی که مربوط به اثر همراهی تمامی پارامترها هستند (سطر ۱۶ مربوط به جدول ۶)، نشان دهنده ی اثر افزاینده ی همراهی پارامترها بر میزان جریان حفاظتی می باشند. نتایج فوق نشان دهنده ی این مطلب می باشد که فاکتورهای موثر بر جریان حفاظتی در محیط های دریایی به شدت به هم وابسته بوده و برای آرایه حفاظتی کامل، لازم است اثر همزمانی پارامترها در حین محاسبات برای تعیین میزان جریان مورد نیاز جهت حفاظت کاتدی سازه، مد نظر قرار گرفته شود.

محاسبه عبارت  $T < TV$  را نتیجه میدهد و بیان میدارد اثر همزمانی دما و سرعت میزان جریان بیشتری در قیاس با پارامتر دما برای حفاظت کاتدی نیاز دارد. به این معنا که همزمانی پارامترها در این حالت اثر افزاینده بر میزان جریان حفاظتی دارد. آرایه های که به این دسته تعلق دارند در جدول (۶) در درون کادر قرار گرفته اند.

### نتیجه گیری:

با توجه به آنالیز کیفی تمامی فاکتورهای اعمال شده در این تحقیق اثر افزاینده بر میزان جریان حفاظتی داشته اند و با استناد به نتایج مربوط به آنالیز کمی (جدول ۵)، می توان اظهار نمود که درصد اثر فاکتور دما ( $T\%$ ) بالاتر از فاکتورهای سرعت ( $V\%$ )، شوری ( $S\%$ ) و pH ( $p\%$ ) می باشد. این نتایج گویای این نکته می باشد که پوشش کلتار اپوکسی پلی آمید نسبت به دما بسیار حساس بوده و سرعت سیال می تواند زمینه تخریب پوشش را فراهم کند. از

جدول ۶: ماتریس نتایج آنالیز کیفی

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1																
2	$T > 0$															
3	$V > 0$	$T > V$														
4	$TV > 0$	$T < T$ $V$	$V < T$ $V$													
5	$S > 0$	$T > S$	$V > S$	$TV > S$												
6	$ST > 0$	$T < S$ $T$	$V < S$ $T$	$TV = ST$	$S < S$ $T$											
7	$SV > 0$	$T < S$ $V$	$V < S$ $V$	$TV > SV$	$S < S$ $V$	$ST > SV$										
8	$TVS > 0$	$T < T$ $VS$	$V < T$ $VS$	$TV < TVS$	$S < T$ $VS$	$ST < TVS$	$SV < T$ $VS$									
9	$P > 0$	$T > P$	$V > P$	$TV > P$	$S < P$	$ST > P$	$SV > P$	$TVS > P$								
10	$TP > 0$	$T < T$ $P$	$V < T$ $P$	$TV > TP$	$S < T$ $P$	$ST > TP$	$SV < T$ $P$	$TVS > TP$	$P < P$ $T$							
11	$VP > 0$	$T > V$ $P$	$V < V$ $VP$	$TV > VP$	$S < V$ $P$	$ST < VP$	$SV > VP$	$TVS > VP$	$P < V$ $P$	$TP > VP$						
12	$TVP > 0$	$T < T$ $VP$	$V < T$ $VP$	$TV < TVP$	$S < T$ $VP$	$ST < TVP$	$SV < T$ $VP$	$TVS > TVP$	$P < T$ $VP$	$TP < TVP$	$VP < TVP$					
13	$SP > 0$	$T > S$ $P$	$V < S$ $P$	$TV > SP$	$S < S$ $P$	$ST > SP$	$SV > S$ $P$	$TVS > SP$	$P < S$ $P$	$TP > SP$	$VP > SP$	$TVP > SP$				
14	$TSP > 0$	$T < T$ $SP$	$V < T$ $SP$	$TV < TSP$	$S < T$ $SP$	$ST < TSP$	$SV < T$ $SP$	$TVS > TSP$	$P < T$ $SP$	$TP < TSP$	$VP < TSP$	$TVP > TSP$	$SP < T$ $SP$			
15	$VSP > 0$	$T < V$ $SP$	$V < V$ $VSP$	$TV > VSP$	$S < V$ $SP$	$ST > VSP$	$SV < V$ $VSP$	$TVS > VSP$	$P < V$ $SP$	$TP < VSP$	$VP < VSP$	$TVP > VSP$	$SP < V$ $SP$	$TSP > VSP$		
16	$VSP > 0$	$T < V$ $SPT$	$V < V$ $VSP$ $T$	$TV < VSP$ $T$	$S < V$ $SPT$	$ST < VSP$ $T$	$SV < V$ $VSPT$	$TVS < VSPT$	$P < V$ $SPT$	$TP < VSP$ $T$	$VP < VSP$ $T$	$TVP < VSPT$	$SP < V$ $SPT$	$TSP < VSPT$	$VSP < VSPT$	



- [1] E. Bardal, corrosion and protection, London : Springer, 2004.
- [2] ASM, Corrosion, Vol .13, 1987.
- [3] F.R.Perez, etal; Marine corrosion of iron : Mathematical modeling of the process and measurement of lost mass .Revista colombiana De fisica.,Vol.3, 2006, Pp.1138-1141.
- [4] J. Britton, The role of cathodic protection in offshore pipeline integrity, www.stoprust.com/offshore-pipeline.htm,1998.
- [5] A.C.palmer ,etal; Subsea pipeline engineering, 2nd Ed, 2008.
- [6] S.Touzain , etal; Evaluation of thick organic coatings degradation in seawater using cathodic protection and accelerated tests .progress in organic coating, No.52, 2005, Pp. 311-319 .
- [7] Shervin ,Williams, Epoxy coating guide , <http://protective.sherwin-williams.com/industries>
- [8] W.von Baeckmann , etal; Handbook of cathodic corrosion protection , Theory and practice of electrochemical protection processes , 3nd Ed,1988.
- [9] Saleh A.Al-Fozan, etal; Effect of seawater level on corrosion behavior of different alloys, saline water desalination research institute saline water conversion corporation (SWCC), 2005 .
- [10] Dae-kyeong kim , etal; Electrochemical studies on the alternating current corrosion of mild steel under cathodic protection in marine environment, Vol. 15, No.25, 2006, Pp.5259-5267.
- [11] S. Abulnoun Ajeel, etal; variable conditions effect on polarization parameters of impress current cathodic protection of low carbon steel pipes, Eng & Tech. Vol.26 , No.6, 2007 ,Pp 636-647.
- [12] A.M. Badiea, K.N. Mohana, effect of temperature and fluid velocity on corrosion mechanism of low carbon steel in presencs of 2-hydrazino-4,7-diamethylbenzothiazole in industrial water medium, Corrosion Science, Vol. 51, No. 9, 2009, Pp. 2231-2241.
- [13] Miszczyk, K. Darowicki,Effect of environmentAl temperature variations on protective properties of organic coatings, Progress in Organic Coatings, Vol. 46,No. 1, 2003,Pp. 49-54.
- [14] Qixin Zhou, etal, influence of the composition of working fluids on flow-accelerated organic coating degradation: deionized water versus electrolyte solution, corrosion science, Vol. 55, 2011, Pp 97-106.
- [15] E.Broesder “ Coatings and Cathodic Disbondment - The True Story”. Pipelines, 2013, Pp. 1603-1610.
- [16] M. Pakshir, S. AtashinA. S. Toloee, corrosion rate vitiation of SS 316 under simultaneous factors c onsidering turbulence effect, corrosion engineering. Science and technology, Vol. 48, NO. 5, 2013, Pp. 327-333.
- [17] M. Pakshir, S. AtashinA.S. Toloee, simultaneous investigation of marine factors effect on corrosion rate of SS 304 in turbulent condition, materials engineering and performance, Vol. 22, NO. 7, 2013, Pp. 2038-2047.
- [18] Standard practice for the preparation of substitute ocean water, ASTM International D1141, 1999.
- [19] E. Brown, A.Colling, D.Park, J. Philips and J. Wright, Seawater: its composition, properties and behavior, London: Butterworth Heinmann, 2004.
- [20] T.R Crompton; Analysis of seawater: A guide for the Analytical and environmental chemist, London: Springer, 2006.
- [21] M.M Schumacher; Seawater corrosion handbook, noyes data corporation, 1979.
- [22] P.R.Robergr; Handbook of Corrosion Engineering, The McGraw-Hill companies, 2000.
- [23] D.A.Shifler, Understanding material interactions in marine environments to promote extended structural life, Corrosion Science, Vol. 47, No. 10, 2005, Pp. 2335-2352.
- [24] M.Pakshir, S.Atashin, A.Yazdani, synergetic investigation into the marine parameters’ effect on the corrosion rate of AISI 316 stainless steel , materials and design, Vol. 32, No.3, 2011, Pp.1315-1324.

