

بررسی علت خوردگی ناچیز آندهای فداشونده روی (Zn-Al-Cd) نصب شده بر بدنه یک شناور در آب‌های خلیج فارس

علی امیرعبداللهیان^{۱*}، سیدمحمدصادق میرغفوریان^۲، محسن نصری^۳، علی اصغر رحمانی^۴

^۱ کارشناس ارشد خوردگی و حفاظت از مواد، شرکت برناگداز

^۲ دکتری برق قدرت، شرکت برناگداز

^۳ کارشناس برق قدرت، شرکت برناگداز

^۴ کارشناس متالورژی صنعتی و کارشناس ارشد MBA، شرکت برناگداز

*E-mail: amirabdollahian_ali@yahoo.com

چکیده

هدف از تحقیق حاضر، بررسی علت خوردگی ناچیز آندهای فداشونده روی (Zn-Al-Cd) نصب شده بر بدنه یک شناور پس از حدود ۲ سال عملکرد در آب‌های خلیج فارس است. بررسی‌های سایتی نشان داد که پتانسیل بدنه شناور در محدوده حفاظت قرار داشته و بدنه شناور عاری از هرگونه خوردگی قابل توجه بود. بررسی‌های آزمایشگاهی آندهای روی نیز، تطابق ترکیب شیمیایی و خواص الکتروشیمیایی آن‌ها را با استانداردهای بین‌المللی تأیید نمود. دلیل اصلی خوردگی ناچیز آندهای روی نصب شده بر بدنه شناور می‌تواند ناشی از کیفیت بسیار بالای رنگ شناور، در نظر گرفتن ضرایب اطمینان بالا در طراحی حفاظت کاتدی و در پی آن محاسبه وزن بالایی از آندها و نصب تعداد زیادی از آن‌ها در فواصل نزدیک بهم باشد.

واژه‌های کلیدی: خوردگی ناچیز، آندهای فداشونده روی، بدنه شناور.

۱- مقدمه

حفاظت کاتدی روشی قابل اطمینان، مؤثر و اقتصادی برای حفاظت از خطوط لوله، مخازن، سازه‌های دریایی و بدنه شناورها در برابر خوردگی است. حفاظت کاتدی براساس کاهش پتانسیل طبیعی سازه تا محدوده‌ای که خورده نشده و حفاظت شود، عمل می‌کند. حفاظت کاتدی می‌تواند توسط کاربرد آندهای فداشونده و یا از طریق سیستم تزریق جریان مهیا شود [۱، ۲].

براساس تجربه ثابت شده است که خوردگی سازه فولادی زمانی که پتانسیل آن در -850 میلی ولت نسبت به الکترود مرجع مس/ سولفات مس، -800 میلی ولت نسبت به الکترود مرجع نقره/ کلرید نقره و $+250$ میلی ولت نسبت به الکترود مرجع روی قرار دارد، متوقف می‌شود [۲، ۳]. جدول (۱) پتانسیل سازه فولادی را تحت شرایط مختلف (خوردگی، حفاظت بهینه و حفاظت بیش از حد) نسبت به سه الکترود مرجع متفاوت نشان می‌دهد.

جدول (۱) - پتانسیل سازه فولادی تحت شرایط خوردگی، حفاظت بهینه و حفاظت بیش از حد [۲]

Reference electrode	Corroding potential	Optimum potential	Overprotection potential
Copper/copper sulphate	-0.65 or more	-0.85 to -1.0 V	-1.05 or higher
Silver/silver chloride	-0.60 V or more	-0.80 to -0.95 V	-1.00 V or higher
Zinc	$+0.45$ V or higher	$+0.150$ to 0.250 V	$+0.10$ or less

ضروری است که پتانسیل سازه در محدوده حفاظت باقی بماند زیرا محدوده پایین و بالای آن مضر است. حفاظت کم^۱ نمی‌تواند سازه را بطور کامل از خوردگی محافظت کند در حالی که حفاظت بیش از حد^۲ در نتیجه آزادسازی هیدروژن بیشتر در سطح سازه، منجر به جدایش پوشش‌های آلی اعمال شده روی سطح و یا تردی هیدروژنی فولاد (کاهش قابلیت چکش‌خواری در پی نفوذ هیدروژن) می‌شود.

بنابراین طراحی سیستم حفاظت کاتدی برای سازه بمنظور اعمال دانسیته جریان مورد نیاز و نگهداری پتانسیل آن در محدوده حفاظت در طول مدت حفاظت، امری اجتناب ناپذیر است [۲].

بمنظور طراحی سیستم حفاظت کاتدی سازه‌های ثابت و متحرک دریایی باید عوامل مختلفی مورد نظر قرار گیرند. برخی از این عوامل عبارتند از:

مقاومت آب دریا: هرچه مقاومت آب دریا کمتر باشد توانایی هدایت جریان الکتریکی در آن بیشتر بوده و میزان خوردگی بیشتر خواهد شد [۴].

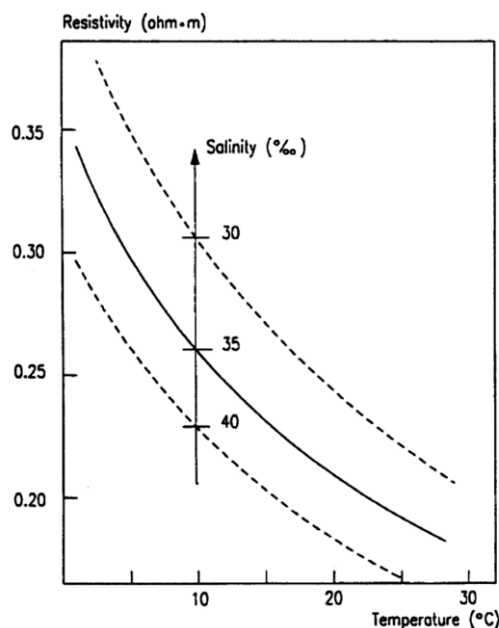
مقدار اکسیژن حل شده در آب دریا: میزان خوردگی با غلظت اکسیژن حل شده در آب دریا رابطه مستقیم دارد، بطوری که با افزایش غلظت اکسیژن حل شده در آب، میزان خوردگی نیز افزایش می‌یابد [۵].

دمای آب دریا: دما تأثیر دوگانه‌ای بر میزان خوردگی دارد. از یک طرف باعث سرعت بخشیدن به واکنش‌های خوردگی شده و میزان خوردگی را افزایش می‌دهد و از طرف دیگر باعث کاهش مقدار اکسیژن حل شده در آب شده و میزان خوردگی را کاهش می‌دهد. پس افزایش دما ابتدا باعث افزایش خوردگی شده و پس از رسیدن به دمایی مشخص، سبب کاهش خوردگی می‌گردد [۶].

pH آب دریا: میزان pH آب دریا با فعالیت فتوسنتز و تشعشعات خورشیدی تغییر می‌کند [۶]. برای pH بین ۴ تا ۱۰، میزان خوردگی مستقل از pH است ولی در pH کمتر از ۴، با کاهش pH خوردگی افزایش یافته و در pH بیشتر از ۱۰ با افزایش pH خوردگی کاهش می‌یابد [۷].

شوری آب دریا: با افزایش شوری آب دریا میزان خوردگی افزایش یافته تا به حداکثر مقدار خود برسد. سپس با افزایش شوری، میزان خوردگی کاهش می‌یابد [۶]. شکل (۱) منحنی ارتباط بین مقاومت آب دریا با دما و شوری را نشان می‌دهد.

1. Under Protection
2. Over Protection



شکل (۱) - منحنی ارتباط بین مقاومت آب دریا با دما و شوری [۸]

سرعت و تلاطم آب دریا: سرعت و تلاطم آب دریا می‌تواند باعث تأمین بیشتر اکسیژن در سطح شود و با شکستن لایه محافظ تشکیل شده بر سطح فلزات، میزان خوردگی را افزایش دهد [۶].

ریز موجودات دریایی^۱: مهم‌ترین موجودات دریایی که باعث افزایش میزان خوردگی می‌شوند صدف‌های چسبنده‌ای مانند بارناکل‌ها^۲ و ماسل‌ها^۳ هستند که با تغییر مقدار اکسیژن سطح، میزان خوردگی را افزایش می‌دهند [۴، ۶]. کل جریان مورد نیاز برای حفاظت بدنه شناور از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$(1) \quad I = i \times A$$

که در آن I جریان مورد نیاز برای حفاظت بدنه شناور (A)، i دانسیته جریان مورد نیاز برای حفاظت بدنه شناور (A/m^2) و A مساحت زیر خط آب‌خور شناور (m^2) می‌باشد.

دانسیته جریان مورد نیاز برای حفاظت بدنه هر شناور به نوع شناور و شرایط بدنه آن بستگی دارد. دانسیته جریان بشدت متأثر از کیفیت سیستم رنگ است. دانسیته جریان مورد نیاز برای سطح فلز رنگ نشده ممکن است تا 180 mA/m^2 افزایش یابد [۹]. بدنه شناورها باید مطابق با جدیدترین استانداردها، بوسیله رنگ‌های دریایی پوشش داده شود. همچنین جریان اضافه‌تری برای قسمت‌هایی از سطح شناور که در معرض شرایط سخت و شدید قرار دارند، مورد نیاز است. از این میان می‌توان به پروانه، سکان و قسمت‌های ضربه‌خورنده شناور اشاره کرد. پوشش بدنه شناورها با گذشت زمان تحت شرایط کاری دچار تخریب می‌شود لذا لازم است براساس استانداردها و یا تجربه‌های مشابه قبلی، دانسیته جریان صحیح حفاظت استخراج شده و در محاسبات لحاظ گردد [۶]. جدول (۲) دانسیته جریان مورد نیاز شناورهای مختلف را در دو شرایط جدید ساخت و در حال کار نشان می‌دهد.

جدول (۲) - دانسیته جریان مورد نیاز شناورهای مختلف

Vessel Type	New building mA/m ²	In service mA/m ²
Ocean-going ships (coated)	10	15
Other ocean going ships	12	15
Coasters	14	20
Ro-Ro ferries	14	20
Trawlers	22	24
Kort nozzle tugs	22	24
Dredgers	24	27
Ice breakers	25	30
Tugs	18	22

برای محاسبه مساحت زیر خط آب‌خور بدنه شناور از رابطه (۲) استفاده می‌شود:

$$(2) \quad A = (1.7 \times T \times L) + (\Delta / T)$$

که در آن A مساحت زیر خط آب‌خور شناور (m²)، T حداکثر عمق آب‌خور در بخش میانی شناور (m)، L طول خط آب‌خور شناور (m) و Δ حجم جابجایی آب توسط شناور (m³) می‌باشد.

در حفاظت کاتدی به روش آندهای فداشونده از یک فلز با پتانسیل منفی‌تر در اتصال با فلز مورد نظر برای حفاظت استفاده می‌شود. در حفاظت بوسیله این روش، سرعت خوردگی در آند فداشونده بالا رفته و دانسیته جریان خوردگی روی آن افزایش می‌یابد. در رابطه با انتخاب و ساخت آندهای فداشونده، عواملی چون ترکیب شیمیایی آند، پتانسیل، میزان جریان خروجی، ظرفیت الکتروشیمیایی، نرخ مصرف و راندمان، شکل و نحوه اتصال آن به سازه باید مورد توجه قرار گیرد [۶].

وزن آند مورد نیاز در حفاظت کاتدی به روش آندهای فداشونده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$(3) \quad M = (I \times t \times 8760) / (u \times \varepsilon)$$

که در آن M وزن آند فداشونده (kg)، I جریان مورد نیاز برای حفاظت بدنه شناور (A)، u ضریب بهره‌وری و ε ظرفیت الکتروشیمیایی آند (A.h/kg) می‌باشد. ضریب بهره‌وری آندا تابعی از شکل هندسی و ابعاد آن‌ها بوده و از جدول (۳) قابل استخراج است.

جدول (۳) - ضریب بهره‌وری آندهای مختلف [۸]

Anode Type	Anode Utilisation Factor
Long slender stand-off L ≥ 4r	0.90
Short slender stand-off L < 4r	0.85
Long flush mounted L ≥ 4 width and L ≥ 4 thickness	0.85
Short flush-mounted, bracelet and other types	0.80

فلز روی از سال ۱۸۲۴ میلادی برای حفاظت در آب دریا مورد استفاده قرار گرفت. روی خلوص بالا اغلب درشت دانه بوده و ساختار ستونی دارد که منجر به خورده شدن غیر یکنواخت آن می‌شود. افزودن عناصر آلومینیم (تا ۰/۵ درصد وزنی) و کادمیم (تا ۰/۰۷ درصد وزنی) برای ریزدانه‌سازی روی مناسب است. بعلاوه تأثیر مخرب میزان آهن بالا (تا ۰/۰۵ درصد وزنی) را خنثی می‌کند [۱۰]. شکل (۲) تفاوت ساختار روی خالص با آند روی را نشان می‌دهد.



شکل (۲) - ساختار ستونی روی خالص (تصویر بالا) و ساختار ریزدانه آند روی (تصویر پایین) [۱۰]

ترکیب شیمیایی و خواص الکتروشیمیایی آند روی جهت کاربرد در دریا برطبق استانداردهای مختلف بترتیب در جداول (۴) و (۵) آورده شده است.

جدول (۴) - ترکیب شیمیایی آند روی برطبق استانداردهای مختلف [۸، ۱۱-۱۴]

استاندارد	Al	Cd	Fe	Pb	Cu	Others, total	Zn
ASTM B418	۰/۱-۰/۵	۰/۰۲۵-۰/۰۷	max ۰/۰۰۵	max ۰/۰۰۶	max ۰/۰۰۵	۰/۱ max	باقیمانده
DNV-RP-B401	۰/۱-۰/۵	۰/۰۷ max	max ۰/۰۰۵	max ۰/۰۰۶	max ۰/۰۰۵	---	باقیمانده
IPS-M-TP-750	۰/۱-۰/۵	۰/۰۲۵-۰/۰۷	max ۰/۰۰۵	max ۰/۰۰۶	max ۰/۰۰۵	---	۹۹/۳۱۴
MIL-A-18001K	۰/۱-۰/۵	۰/۰۲۵-۰/۰۷	max ۰/۰۰۵	max ۰/۰۰۶	max ۰/۰۰۵	max ۰/۰۰۵	۹۹/۳۱۴
NORSOK M-503	۰/۱-۰/۵	۰/۰۲۵-۰/۰۷	max ۰/۰۰۵	max ۰/۰۰۶	max ۰/۰۰۵	---	باقیمانده

جدول (۵) - خواص الکتروشیمیایی آند روی برطبق استانداردهای مختلف [۳، ۸، ۱۲، ۱۴]

استاندارد	پتانسیل مدار بسته نسبت به الکترود مرجع Ag/AgCl (V)	پتانسیل مدار باز نسبت به الکترود مرجع Ag/AgCl (V)	ظرفیت الکتروشیمیایی (A.h/kg)	سرعت مصرف (kg/A.Year)
BS 7361	---	$\leq -۱/۰۵$	۷۸۰ min	۱۱/۲۵ max
DNV-RP-B401	≤ -۱	---	۷۸۰ min	---
IPS-M-TP-750	≤ -۱	$\leq -۱/۰۵$	---	۱۱/۲ max
NORSOK M-503	-۱/۰۳	---	۷۸۰ min	---

اختلاف پتانسیل بین فولاد و روی به درجه حرارت بستگی دارد. در درجه حرارت‌های بالاتر از درجه حرارت محیط، اختلاف پتانسیل بین فولاد و روی کاهش یافته و در درجه حرارت‌های بالاتر از ۶۰ درجه سانتی‌گراد پلاریته بین فولاد و روی عکس می‌شود. یعنی روی نسبت به فولاد از لحاظ پتانسیل کاتدی‌تر شده و نه تنها به صورت فداشونده قادر به حفاظت از فولاد نمی‌باشد بلکه باعث خوردگی سریع‌تر آن نیز می‌شود. بنابراین در محیط‌های آبی با درجه حرارت‌های بالاتر از ۶۰ درجه سانتی‌گراد نباید از روی برای حفاظت فولاد استفاده نمود [۲، ۳، ۱۰، ۱۵].

در این مقاله سعی شده است علت خوردگی ناچیز آندهای فداشونده روی نصب شده بر بدنه یک شناور پس از حدود ۲ سال عملکرد در آب‌های خلیج فارس با استفاده از بررسی‌های سایتی و آزمایشگاهی مشخص شود.

۲- مواد و روش تحقیق

پس از دریافت گزارشی مبنی بر عدم خوردگی آندهای روی نصب شده بر بدنه یک شناور در آب‌های خلیج فارس، کارشناسان فنی شرکت سازنده آند (شرکت برناگاز) در سایت مربوطه حاضر شده و علاوه بر ارزیابی کیفیت رنگ و وضعیت بدنه شناور از لحاظ خوردگی، پتانسیل بدنه شناور را نسبت به الکتروود مرجع روی اندازه‌گیری نمودند. هم‌چنین پس از بررسی وضعیت اتصال الکتریکی آندها به بدنه، بمنظور انجام آزمون‌های آزمایشگاهی لازم، از آندها نمونه‌برداری شد. شکل (۳) تصویر آند روی نمونه‌برداری شده را نشان می‌دهد.



شکل (۳) - تصویر آند روی

جهت بررسی عملکرد آندهای روی، دو آزمون تعیین ترکیب شیمیایی و تعیین خواص الکتروشیمیایی جزو اصلی‌ترین آزمون‌ها بوده که می‌توانند نحوه عملکرد آندها را مشخص نمایند. تعیین ترکیب شیمیایی (آنالیز عنصری) توسط آزمون طیف‌سنجی جذب اتمی^۱ روی این نمونه انجام و میزان دقیق عناصر موجود در آن مشخص شد.

آزمون الکتروشیمیایی برطبق استاندارد DNV-RP-B401 روی دو نمونه از این آند انجام شد. براساس این آزمون، نمونه‌های استاندارد بصورت استوانه‌هایی با قطر ۱/۱± و طول ۵/۵± سانتی‌متر تراشکاری شده و حفره‌ای با قطر تقریبی ۲ میلی‌متر در انتهای نمونه‌ها بمنظور اتصال میله نگهدارنده تیتانیومی تعبیه شد. در این آزمون از یک ظرف فولادی استوانه‌ای با قطر ۲۰ و طول ۳۰ سانتی‌متر بعنوان کاتد و آب دریای شبیه سازی شده مطابق با استاندارد ASTM D1141 بمنظور الکترولیت استفاده شد. با بکارگیری یک منبع تغذیه DC در طول ۴ روز (۹۶ ساعت) مدت زمان آزمون، دانسیته جریان‌های مختلفی بصورت زیر به نمونه‌ها اعمال گردید:

روز اول: ۱/۵ mA/cm²

روز دوم: ۰/۴ mA/cm²

روز سوم: ۴ mA/cm²

روز چهارم: ۱/۵ mA/cm²

در مدار از یک کولومتر مسی جهت محاسبه میزان آمپر ساعت جریان عبور یافته از آن استفاده گردید. دمای آزمون ۲۰±۳ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده و قبل از شروع آزمون وزن اولیه و پس از پایان آزمون وزن ثانویه هر یک از نمونه‌ها ثبت گردید. شکل (۴) تصویر تجهیزات آزمون الکتروشیمیایی آندهای روی را برطبق استاندارد DNV-RP-B401 نشان می‌دهد.

1. Atomic Adsorption Spectroscopy (AAS)



شکل (۴) - تصویر آزمون الکتروشیمیایی آندهای روی

برای محاسبه ظرفیت الکتروشیمیایی و نرخ مصرف آندهای روی به ترتیب از روابط (۴) و (۵) استفاده می‌شود:

$$(4) \quad \varepsilon_{Zn} = (0.8433 \times \Delta W_{Cu} \times 1000) / \Delta W_{Zn}$$

$$(5) \quad C_{Zn} = 8760 / \varepsilon_{Zn}$$

که در آن ε_{Zn} ظرفیت الکتروشیمیایی آند روی (A.h/kg)، C_{Zn} سرعت مصرف آند روی (kg/A.Year)، ΔW_{Cu} اختلاف وزن سیم مسی کولومتر (gr) و ΔW_{Zn} اختلاف وزن نمونه (gr) پس از گذشت ۴ روز می‌باشد.

براساس استاندارد DNV-RP-B401 بمنظور تعیین پتانسیل مدار بسته آندها، در پایان آزمون الکتروشیمیایی و پیش از خاموش نمودن منبع تغذیه و باز کردن مدار، پتانسیل هر آند نسبت به الکتروود مرجع نقره/ کلرید نقره اندازه‌گیری و ثبت گردید. پتانسیل مدار باز آندها نیز یک ساعت پس از باز کردن مدار اندازه‌گیری شد.

در پایان و پس از بررسی‌های سایتی و انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، طراحی سیستم حفاظت کاتدی شناور با توجه عواملی چون مساحت شناور، نوع، تعداد و فاصله آندها، عوامل محیطی و غیره بررسی شد.

۳- نتایج و بحث

بررسی‌های چشمی آندهای بدنه شناور، میزان خوردگی حدود ۵ تا ۱۵ درصدی آندها را نشان داد. کیفیت رنگ بدنه از لحاظ ضخامت و میزان چسبندگی در حد مطلوبی قرار داشته و هیچ گونه خوردگی قابل توجهی در بدنه شناور مشاهده نشد. پتانسیل بدنه شناور نیز نسبت به الکتروود مرجع روی حدود $+0.2$ ولت اندازه‌گیری شد که با توجه به جدول (۱) در محدوده حفاظت قرار دارد. بعلاوه برقراری اتصال الکتریکی بین کلیه آندها و بدنه شناور مورد تأیید قرار گرفت.

جدول (۶) ترکیب شیمیایی آند روی شناور را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، میزان عناصر آلیاژی آند روی (آلومینیم و کادمیم) در محدوده استانداردهای ASTM B418، DNV-RP-B401، JPS-M-TP-750، MIL-A-18001K و NORSOK M503 (جدول (۴)) قرار داشته و میزان ناخالصی‌های آن (آهن، سرب و مس) از حداکثر میزان ذکر شده در استانداردهای فوق تجاوز نمی‌نماید.

جدول (۶) - ترکیب شیمیایی آند روی شناور

Zn	Cu	Pb	Fe	Cd	Al
باقیمانده	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۴	۰/۰۰۶	۰/۴

در جدول (۷) میزان وزن اولیه و ثانویه نمونه‌های استاندارد، مقدار پتانسیل مدار بسته و مدار باز، ظرفیت الکتروشیمیایی و نرخ مصرف آندهای روی شناور آورده شده است. بررسی جدول (۷) نشان می‌دهد که نه تنها میزان پتانسیل مدار بسته و مدار باز، ظرفیت الکتروشیمیایی و نرخ مصرف آندهای روی در محدوده استانداردهای BS 7361، DNV-RP-B401، IPS-M-TP-750 و NORSOK M503 (جدول (۵)) قرار دارد، بلکه اعداد مربوط به خواص الکتروشیمیایی این دو نمونه نیز بسیار نزدیک به هم بوده که معرف تکرار پذیری این آزمون است.

جدول (۷) - خواص الکتروشیمیایی نمونه‌های استاندارد آند روی شناور

نمونه	پتانسیل مدار بسته نسبت به مرجع Ag/AgCl (V)	پتانسیل مدار باز نسبت به الکترود مرجع Ag/AgCl (V)	وزن اولیه نمونه (gr)	وزن ثانویه نمونه (gr)	کاهش وزن نمونه (gr)	ظرفیت الکتروشیمیایی* (A.h/kg)	سرعت مصرف (kg/A.Year)
نمونه ۱	-۱/۰۴	-۱/۰۶	۲۸/۲۵۲۴	۲۴/۹۰۸۰	۳/۳۴۴۴	۸۰۵/۹۸	۱۰/۸۷
نمونه ۲	-۱/۰۳	-۱/۰۵	۲۸/۶۸۲۴	۲۵/۳۲۵۵	۳/۳۵۶۹	۸۰۲/۹۸	۱۰/۹۱

* وزن اولیه، ثانویه و میزان افزایش وزن سیم مسی کولومتر به ترتیب ۳/۱۲۷۳، ۶/۳۲۳۷ و ۳/۱۹۶۴ گرم اندازه‌گیری شد.

شکل (۵) تصویر نمونه‌های استاندارد آند روی خورده شده پس از آزمون الکتروشیمیایی را نشان می‌دهد. بررسی چشمی سطح نمونه‌ها حاکی از خوردگی یکنواخت آن‌ها بوده و هیچ گونه خوردگی موضعی در نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود.



شکل (۵) - تصویر نمونه‌های استاندارد آند روی خورده شده

با توجه به این که از یک طرف خوردگی قابل توجهی در بدنه شناور مشاهده نشده و پتانسیل آن در محدوده حفاظت قرار دارد و از طرفی دیگر براساس استاندارد DNV-RP-B401، آندهایی که آزمون‌های آزمایشگاهی فوق را گذرانده و با معیارهای آن در تطابق هستند، در محیط دریا هیچ مشکلی اعم از خورده نشدن و یا خودخوری^۱ نخواهند داشت پس بایستی به منظور تعیین علت خوردگی ناچیز آندهای روی، طراحی سیستم حفاظت کاتدی شناور را نیز مورد ارزیابی قرار داد.

بررسی طراحی سیستم حفاظت کاتدی شناور براساس مفروضات موجود بصورت زیر است:

محاسبه مساحت زیر خط آبخور شناور

حداکثر عمق آبخور در بخش میانی شناور ۴/۵ متر، طول خط آبخور شناور ۱۱۳ متر و حجم جابجایی آب توسط شناور ۱۶۰۰ متر مکعب می‌باشد که با استفاده از رابطه (۲) میزان مساحت زیر خط آبخور شناور حدود ۱۲۲۰ مترمربع بدست می‌آید.

محاسبه جریان مورد نیاز برای حفاظت بدنه شناور

شناور از نوع یدک‌کش بوده و فرض می‌شود سیستم رنگ اجرا شده بر سطح بدنه شناور دارای دوام متوسط باشد. در این صورت با توجه به جدول (۲) و در نظر گرفتن فاکتور شکست سیستم رنگ در طول ۲ سال، میزان دانسیته جریان مورد نیاز حدود 22 mA/m^2 می‌باشد. جریان مورد نیاز برای حفاظت بدنه شناور با استفاده از رابطه (۱) حدود ۲۷ آمپر حاصل می‌شود.

محاسبه وزن آند روی مورد نیاز برای حفاظت بدنه شناور

با توجه به این که جریان مورد نیاز برای حفاظت بدنه شناور ۲۷ آمپر و مدت زمان حفاظت ۲ سال بوده و آندهای روی با ظرفیت الکتروشیمیایی متوسط حدود $804/5 \text{ A.h/kg}$ با شکل هندسی تخت^۱ (ضریب بهره‌وری ۰/۸۵) در این شناور بکار گرفته شده‌اند پس وزن آندهای روی مورد نیاز حدود ۶۹۲ کیلوگرم بدست می‌آید.

وزن آندهای روی مورد نیاز برای حفاظت بدنه این شناور در شرایط عملکردی مذکور حدود ۶۹۲ کیلوگرم محاسبه شد در حالی که در این شناور ۱۴۶ عدد آند روی با وزن خالص ۱۰ کیلوگرم (با وزن خالص مجموع ۱۴۶۰ کیلوگرم) مورد استفاده قرار گرفته است که بیش از ۲/۱ برابر میزان مورد نیاز جهت حفاظت بوده است؛ یعنی بیش از ۲/۱ برابر آند به بدنه شناور متصل شده است. پس دلیل اصلی خوردگی ناچیز آندهای روی نصب شده بر بدنه شناور، کیفیت بسیار بالای رنگ شناور، در نظر گرفتن ضرایب اطمینان بالا در طراحی حفاظت کاتدی و در پی آن محاسبه وزن بالایی از آندها و نصب تعداد زیادی از آن‌ها در فواصل نزدیک بهم می‌باشد؛ عبارت دیگر با توجه به میزان جریان مورد نیاز بدنه شناور در شرایط عملکردی، تعداد زیادی از آندها در فواصل نزدیک بهم نصب شده و این موضوع باعث به حداقل رسیدن جریان‌دهی و خوردگی آندها شده است. نصب بیش از حد آندها بر بدنه شناور علاوه بر افزایش وزن شناور، مشکلات دیگری را در پی داشته که هزینه‌ها را بالا می‌برد.

نتیجه‌گیری

خوردگی کمتر از حد انتظار آندهای فداشونده روی نصب شده بر بدنه شناورها در صورتی که آندها از لحاظ ترکیب شیمیایی و خواص الکتروشیمیایی در تطابق کامل با استانداردهای بین‌المللی قرار داشته، اتصال الکتریکی بین آندها و بدنه شناور برقرار بوده و سطح آندها با آب دریا کاملاً در تماس باشد بشرطی که پتانسیل بدنه در محدوده حفاظت قرار داشته و خوردگی قابل توجهی در شناور مشاهده نشود، می‌تواند به وجود مشکل در طراحی حفاظت کاتدی و در نظر گرفتن تعداد زیادی از آندها در فواصل نزدیک بهم نسبت داده شود که این موضوع افزایش وزن شناور را بدنبال داشته و از لحاظ اقتصادی مقرون بصرفه نخواهد بود.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از کلیه همکاران واحد مهندسی و توسعه و آزمایشگاه خوردگی شرکت برناگاز که ما را در انجام آزمون‌ها و تألیف این مقاله یاری نمودند، سپاسگزاری می‌نمایم.

مراجع

- 1) C. Rousseau, F. Baraud, L. leleyter and O. Gil, Cathodic Protection by Zinc Sacrificial Anodes: Impact on Marine Sediment Metallic Contamination, Journal of Hazardous Materials, Vol. 167, 2009, Pp. 953-958.
- 2) I. Gurrappa, Cathodic Protection of Cooling Water System and Selection of Appropriate Materials, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 166, 2005, Pp. 256-267.
- 3) BS Standard 7361, Cathodic Protection, 1991.
- 4) S. Nikolakas, Cathodic Protection System Design for Steel Piling of Ahward Structures, Designing Cathodic Protection for Marine Structures and Vehicles, ASTM 1370, H. P. Hack Ed., .American Society for testing and Materials, West Conshohocken, 1999.
- 5) F. G. Frese, Effect of Oxigen on the Corrosion of steels, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 30, 1998, Pp. 83-85.
- ۶) ر. مظفری‌نیا، خوردگی سازه‌های دریایی، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۸۶.
- 7) G. W. Whitman, R. P. Russel and V. J. Altieri, Effect of Hydrogen Ion concentration on the submerged Corrosion of steel, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 16, 1984, Pp. 665-670.
- 8) DNV Standard RP-B-401, Cathodic Protection Design, 2010.
- 9) T. Tezdogan and Y. K. Demirel, An Overview of Marine Corrosion Protection with a Focus on Cathodic Protection and Coatings, Journal of Brodogradnja (Shipbuilding), Vol. 65 (2), 2014, Pp. 49-59
- 10) W. V. Beackmann, W. Schwenk and W. Prinz, Handbook of Cathodic Corrosion Protection. Gulf professional publishing, 3th Ed., 1997.
- 11) ASTM Standard B 418, Standard Specification for Cast and Wrought Galvanic Zinc Anodes, 2001.
- 12) IPS Standard M-TP-750, Material and Equipment Standard for Cathodic Protection, 1997.
- 13) Military Specification Anodes A-18001k, Sacrificial Zinc Alloy, 2005.
- 14) NORSOK Standard M-503, Cathodic Protection, 2007.
- 15) IPS Standard E-TP-820, Engineering Standard for Cathodic Protection, 2010.