Archive OF SID

سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.

سازمان بنادر و دریانوردی

مرکز بررسی اطلاعات علمی

ICOPMAS

www.SID.ir

Archive of SID

بررسی روشهای کنترل خوردگی سازه‌های فولادی در دریا

محمود پاکشیر[1] - سید محمودکثیریها[2] - امیر صالح قربانی[3]

چکیده:

سازه‌های فولادی در دریا شامل نواحی داخل آب - جزر و مدی - پاشش آب و اتمسفری می‌باشند که هر یک از این نواحی در معرض شرایط حاد خورنده قرار دارند. بنابراین روشهای متفاوتی جهت کنترل خوردگی نواحی مختلف سازه‌های فوق می‌بایست بکارگرفته شود.

پوششها و حفاظت کاتدی روشهای مهندسی هستند که به منظور کاهش و یا متوقف کردن خوردگی در سازه‌های فولادی در دریا بکار گرفته می‌شوند. سیستم حفاظت کاتدی با اعمال جریان الکتریکی از طریق منابع خارجی و پوششها بعنوان یک سد در برابر جریانهای خوردگی حاصل از تشکیل آندها و کاتدها و یا زوجهای گالوانیکی از خوردگی سازه‌های فوق جلوگیری می‌کنند.

این مقاله روشهایی جهت برقراری یک سیستم مؤثر و اقتصادی جهت کنترل خوردگی سازه‌های فولادی در دریا ارائه می‌دهد. همچنین دو روش مؤثر جهت حفاظت ناحیه داخل آب سازه‌های فولادی با هدف کاهش مقدار آند مصرفی و در نتیجه کاهش هزینه‌های برقراری سیستم حفاظت کاتدی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۱- استادیار بخش مواد - دانشگاه شیراز

۲- عضو هیئت علمی دانشکده پلیمر - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد بخش مواد - دانشگاه شیراز.

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

سازه‌های دریایی اعم از سکوها و اسکله‌ها که در معرض عوامل خورنده محیطی قرار دارند، می‌بایست سالها باقی مانده وکارآیی لازم را داشته باشند. این سازه‌ها بخصوص در خلیج فارس با توجه به شرایط حاد محیطی شدیداً مورد حمله خوردگی قرار می‌گیرند که می‌بایست با بکارگیری روشهای علمی و عملی مناسب، از این پدیده مخرب جلوگیری گردد. کنترل خوردگی سازه‌های فولادی در دریا به دو روش کلی حفاظت کاتدی ناحیه غوطه‌ور (Immersed zone) و اعمال پوشهای آلی در نواحی جزر و مدی (Tidal zone) - پاشش آب (Splash zone) - و آتمسفری (Atmospheric zone) صورت می‌گیرد.

طراحی یک سیستم حفاظت کاتدی جهت کنترل خوردگی باید با توجه به شرایط محیطی، تجهیزات موجود، چگونگی نصب سازه، مدت زمان بهره‌برداری از سازه و .... صورت گیرد. در نظر گرفتن کلیه فاکتورها، موجب عملکرد مناسبتر سیستم حفاظت کاتدی، کاهش هزینه‌های خوردگی و افزایش عمر مفید سازه خواهد بود.

امروزه استفاده از پوششهای آلی در ناحیه زیر آب سازه‌های فولادی علاوه بر بکارگیری سیستمهای حفاظت کاتدی و همچنین استفاده از آندهای فدا شونده دوتایی در سیستم حفاظت کاتدی در حال توسعه می‌باشند. بکارگیری هر یک از روشهای فوق موجب کاهش وزن آندهای مورد نیاز جهت حفاظت سازه و در نتیجه کاهش هزینه‌های کنترل خوردگی می‌گردد.

در این مقاله اطلاعات علمی و تجربیات عملی بدست آمده در خصوص سیستم‌های حفاظت کاتدی و پوشش‌های آلی جهت کنترل مؤثر خوردگی در سازه‌های دریایی و در نتیجه کاهش هزینه‌های ناشی از تعمیر و بازسازی سازه‌های فوق و همچنین افزایش عمر مفید آنها ارائه میگردد.

www.SID.ir

Archive of SID

بررسی و روشها

سازه‌های دریایی از قبیل کشتی‌ها، سکوهای ثابت و شناور، پلها و اسکله‌ها عموماً از فولاد ساخته شده و در معرض محیط خورنده دریایی قرار دارند. در چنین محیطی فولاد شدیداً تمایل دارد به حالت اولیه خود یعنی اکسیدآهن باز گردد. با استفاده از روشهای کنترل خوردگی می‌بایست از این بازگشت جلوگیری کرد. استفاده از پوششهای آلی (Organic Coatings) و بکارگیری حفاظت کاتدی (Cathodic Protection) مؤثرترین روشهای کنترل خوردگی سازه‌های فولادی در دریا می‌باشند.

اتمسفر دریایی با وجود عواملی مانند آب دریا، نمک، رطوبت نسبی بالا و اکسیژن بسیار خورنده بوده و باعث خوردگی سریع فولاد می‌شود. پوششهای آلی بصورت لایه نازکی با ضخامت 500-125 میکرون (μ) روی سطح فلز قرار گرفته و از تماس عوامل خورنده محیطی با فلز جلوگیری می‌کنند. مقاومت در برابر مواد شیمیایی، چسبندگی، سختی، مقاومت در برابر آب، رطوبت، پرتوهای خورشیدی، نفوذ یونها و گازها از جمله خواصی است که این پوششها می‌بایست دارا باشند.

مهمترین خواص یک پوشش جهت حفاظت سازه‌های دریایی جلوگیری از نفوذ خوردگی به زیر پوشش (Undercutting) و جلوگیری از بروز خوردگی در زیر پوشش (Underfilm Corrosion) است. بدون داشتن چنین خواصی محصولات خوردگی و عوامل خورنده محیطی از مناطقی که پوشش صدمه دیده است به زیر پوشش نفوذ کرده و باعث گسترش خوردگی در تمام سطح سازه می‌شود. پوششهای غیرآلی روی (Inorganic Zinc Coatings) با برقراری پیوند شیمیایی و پیوند فیزیکی، چسبندگی زیادی به سطح فلز داشته و علاوه بر اینکه بعنوان یک سد در برابر نفوذ عوامل خورنده عمل می‌کنند بعلت وجود روی (Zn) درون پوشش به طریق کاتدی نیز از سطح فلز محافظت می‌کنند.

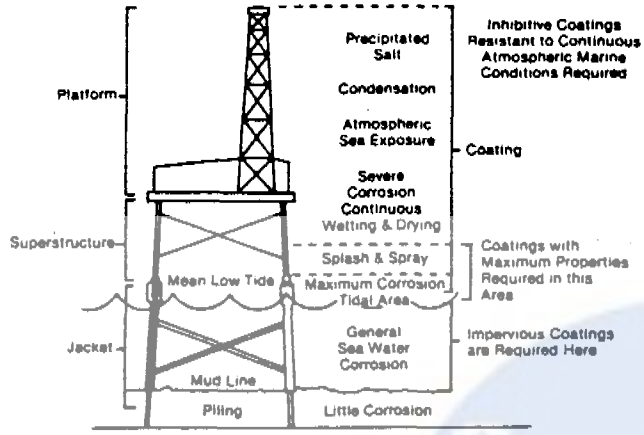
چسبندگی زیاد این پوششها باعث عدم پیشرفت خوردگی در فصل مشترک فلز و پوشش شده و مانع از تاول زدن (blistering)و یا پوسته شدن (peeling) پوشش می‌شود. این مشخصه‌ها باعث می‌شود پوششهای غیرآلی روی از کلیه پوششهای آلی متمایز گردد.

هنگامیکه پوششهای آلی در معرض محیط دریایی در ناحیه بسیار کوچکی دچار صدمه می‌شوند در اثر نفوذ عوامل خورنده و محصولات خوردگی به زیر پوشش به تدریج چسبندگی از بین رفته و پوشش از روی سطح کنده می‌شود.

مناطق مختلف خوردگی در یک سازه دریایی به همراه شرایط محیطی که هر یک از این مناطق در آن قرار دارند در شکل ۱ نشان داده شده است. خواص و نوع پوششهای انتخابی در هر یک از این مناطق با توجه به تغییر شرایط محیطی متفاوت می‌باشد.[1]

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱ : مناطق خوردگی در یک سازه دریایی

ناحیه اتمسفری

ناحیه اتمسفری در معرض پاشش نمک - رسوب نمک - تر و خشک شدن -گرم و سرد شدن - ذرات معلق - پرتوهای خورشیدی و باران می‌باشد. پوششهای غیرآلی روی از نوع Post - Cured بطور گسترده و موفقیت‌آمیزی جهت حفاظت این ناحیه از اواسط دهه ۱۹۵۰ تاکنون استفاده شده‌اند. حفاظت بسیاری از سازه‌ها در خلیج مکزیک تنها با اعمال یک لایه از این پوشش به مدت ۲۰-۱۵ سال صورت گرفته است.[1]

معمولترین سیستم پوشش (Coating system)که امروزه جهت حفاظت ناحیه اتمسفری سازه‌های فولادی در دریا بکار می‌رود بصورت زیر است.

COAT	*DFT**(microns)
Inorganic Znic Primer (either waterbase or Solventbase)	75
High - build epoxy Intermediate	150-200
Aliphatic Polyurethane (1 or 2 coats)	50(+50)

این سیستم سالهاست جهت حفاظت ناحیه اتمسفری سکوها در خلیج تگزاس - خلیج مکزیک - دریای شمال - دریای مدیترانه و خلیج فارس بکار رفته و بطور مؤثری از بروز خوردگی در سازه‌های فوق جلوگیری نموده است. مهمترین خواص این سیستم عبارتند از چسبندگی زیاد - سختی - مقاومت سایشی مقاومت در برابر نفوذ خوردگی - مقاومت در برابر مواد شیمیایی و مقاومت در برابر پرتوهای خورشیدی.[1]

---

*-DFT : Dry film Thickness

www.SID.ir

Archive of SID

سیستم دیگری که امروزه جهت حفاظت ناحیه اتمسفری بکار می‌رود بصورت زیر است.

COAT	DFT (microns)
Inorganic Zinc - Rich Self - Cured Primer	75
Vinyl high - build intermediate coat	100-150
Vinyl top coat (2 Coats)	50(+50)

تراکم رطوبت (Condensation) و رسوب نمکها روی سطح سازه همواره سبب بروز مشکل در اعمال پوششها بر روی سازه‌های دریایی شده است. اخیراً پوششهایی تولید شده‌اند که ادعا می‌شود می‌توان آنها را بر روی سطوحی که بطریقه مکانیکی آماده‌سازی شده‌اند (mechanically cleaned) و یا در شرایطی که سطح سازه تا اندازه‌ای مرطوب است اعمال کرد. این پوششها معمولاً از رزینهای مایع اپوکسی ساخته شده و خاصیت ترکنندگی و نفوذ بسیار بالایی دارند. استفاده از پوششهای فوق جهت حفاظت طولانی مدت سازه توصیه نمی‌شود مگر در مواردی که ماسه‌پاشی (Sandblasting) و یا آماده‌سازی مناسب سطح میسر نبوده و تعمیرات متناوب پوشش متداول باشد. عملکرد پوششهای غیرآلی روی، اپوکسی‌ها و وینیلها در صورتی که آماده‌سازی سطح و یا روش اعمال پوشش مناسب نباشد بسیار نامطلوب بوده و استفاده از آنها تنها موجب صرف هزینه‌های گزاف می‌شود.

مهمترین عوامل در عملکرد مطلوب یک پوشش آماده‌سازی مناسب سطح و اعمال صحیح پوشش می‌باشند. سازه‌ای که سطح آن بدرستی آماده‌سازی شده و پوشش نیز یکنواخت و بدون نقص (holiday) روی آن اعمال شده برای مدت طولانی در برابر خوردگی حفاظت می‌شود. در هنگام آماده‌سازی کلیه تراشه‌ها -گل جوشها و محصولات خوردگی می‌بایست از بین رفته و سطح از هرگونه آلودگی و چربی پاک گردد. آماده‌سازی سطح باید در طول روز به گونه‌ای خاتمه یابد که زمان کافی جهت اعمال پوشش بر روی مناطق آماده‌سازی شده وجود داشته باشد. در هنگام آماده‌سازی سطح لازم است دمای سطح سازه حداقل 3^{oc} بیشتر از نقطه شبنم باشد. چگونگی آماده‌سازی سطح برحسب نوع پوشش اعمالی و براساس استانداردهای NACE و یا SSPC صورت می‌گیرد. سطحی که پوشش بر روی آن اعمال می‌شود بسته به ضخامت پوشش باید دارای حداقل ناهمواری سطحی (Surface Profile) باشد. ناهمواری سطحی مناسب در یک سطح آماده‌سازی شده تقریباً $\frac{1}{4}-\frac{1}{3}$ ضخامت پوشش است. البته در پوششهای ضخیم (high - build Coatings) با ضخامت بیشتر از 300 میکرون برجستگی سطحی در حدود 100-75 میکرون کافی است. آماده‌سازی نامناسب سطح و عدم اعمال صحیح همواره سبب تخریب سریع پوششها در خلیج فارس شده است.[4] [2]

ناحیه جزر و مدی و پاشش آب

ناحیه جزر و مدی سازه‌های دریایی یکی از آسیب‌پذیرترین قسمتهای این تأسیسات می‌باشد. ضربات ممتد و شدید امواج با اکسیژن فراوان، فقدان حفاظت کاتدی، اسپری نمک که دائماً بر روی این

www.SID.ir

Archive of SID

سطوح خیس و خشک می‌گردد و دشواری دسترسی به این قسمت همگی تأکید بر اهمیت حفاظت ناحیه جزر و مدی سازه‌های دریایی دارند. سیستم حفاظت کاتدی بدلیل عدم وجود یک الکترولیت دائمی در این ناحیه نمی‌تواند برقرار گردد.

ناحیه بالای قسمت جزر و مدی یعنی ناحیه اسپری و پاشش آب دریا ماکزیمم خوردگی را دارا است زیرا از یکسو دائماً با رطوبت حاوی اکسیژن فراوان در تماس است و از سوی دیگر در معرض فرسایش توسط امواج دریا در زمان طوفانی بودن دریا است. در این ناحیه نیز امکان حفاظت کاتدی وجود ندارد، همچنین ضربات حاصل از شناورها و برداشتن محصولات خوردگی که بنوبهٔ خود پوشش محسوب می‌گردد شدیداً در افزایش نرخ خوردگی تأثیر دارد.

جهت حفاظت ناحیه جزر و مدی و پاشش آب از روشهای مختلفی استفاده می‌شود این روشها عبارتند از بکارگیری رنگهای دریایی، پوششهای فلزی، غلافهای حرارتی، نوارهای پوششی، پوششهای لاستیکی، چسبهای خمیری، افزایش ضخامت اولیه فلز و استفاده از روکشهای مونل (90/10 Copper Nickel alloy). بکار بردن پوشش‌های فلزی دارای مشکلات ثانویه‌ای می‌باشد. فلز پوششی دارای جنس خیلی بهتری از فلزی است که آن را حفاظت می‌کند، لذا قسمت‌هایی از فلز عضو که درست در پایین‌تر از انتهای فلز پوششی قرار دارد نسبت به این پوشش حالت آندی پیدا می‌کند که این اثرات را بایستی در طراحی کلی خوردگی در نظر گرفت. فلز مونل نیز بسیار آسیب‌پذیر است، اشیاء شناور در آب با واردکردن ضربات و یا سایش یخ‌ها می‌تواند باعث صدمه دیدن این پوشش شود. طراحی سازه در ناحیه جزر و مدی باید بگونه‌ای باشد که سطح سازه در این ناحیه حداقل ممکن بوده و می‌بایست از اتصالات T و K و Y و داشتن مهارهای افقی در این ناحیه حتی‌المقدور اجتناب کرد. افزایش ضخامت اجزاء در این ناحیه در حدود 13-19mm تا حدی نرخ بالای خوردگی در این ناحیه را جبران می‌کند.

جهت حفاظت این ناحیه عمدتاً از پوششهای آلی ضخیم (high - build organic coatings) استفاده می‌شود که معمولاً حاوی پولکهای شیشه‌ای (silica-glass flake) و یا پشم شیشه (fiberglass) می‌باشند. ضخامت این پوششها معمولاً 1-5mm است. [4]

یکی از سیستمها که بطور گسترده‌ای بکار رفته و عملکرد آن مناسب بوده از یک لایه اپوکسی به ضخامت حداکثر 6000میکرون(6mm) تشکیل شده است. این پوشش توسط اسپری بر روی سطوح استوانه‌ای و حتی سطوح با اشکال پیچیده اعمال می‌شود. سطحی که پوشش بر روی آن اعمال می‌شود باید دارای ناهمواری سطحی لازم باشد. پوشش اعمال شده روی این سطح تشکیل یک لایه چسبنده و سخت می‌دهد که توسط پودر شیشه داخل رزین تقویت شده است. این پوشش حتی در مواقعی که فولاد تحت تنش است چسبندگی خوبی دارد. این پوشش با بکارگیری خاصیت نفوذناپذیری از سطح فولاد محافظت می‌کند و می‌توان آنرا علاوه بر سطوحی که تحت سایش و ضربه هستند بر روی سطوح

www.SID.ir

Archive of SID

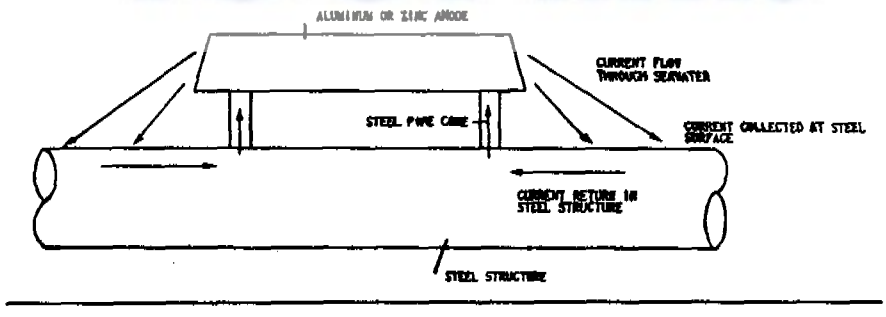
زیر آب نیز اعمال کرد. سیستمهای پوشش که در ناحیه اتمسفری بکار می‌روند اگرچه در برخی موارد در ناحیه جزر و مدی و پاشش آب عملکرد مناسبی داشته‌اند اما جهت حفاظت این نواحی در طولانی مدت نمی‌توان از آنها عملکرد مطلوبی انتظار داشت.

ناحیه زیر آب

ناحیه زیر آب همواره در تماس با آب دریا با هدایت الکتریکی و مقدار اکسیژن محلول بالا می‌باشد. آب در سطح دریا بوسیله حرکت موجها ناشی از وزش باد و در عمق در اثر جریانهای جزر و مدی دائماً در حرکت می‌باشد. بیشتر سطح سازه در این ناحیه توسط صدفها (barnacles) و دیگر جانداران دریایی پوشیده شده است. در این ناحیه خوردگی عموماً یکنواخت بوده و با گذشت زمان کاهش می‌یابد. عوامل مؤثر بر نرخ خوردگی فولاد در این ناحیه عبارتند از - مقدار نمک محلول - هدایت الکتریکی - دما - اکسیژن محلول - سرعت آب و عوامل بیولوژیکی.

خوردگی فولاد در آب دریا یک واکنش الکتروشیمیایی است. در اثر انحلال فلز در آند و احیاء اکسیژن و یا هیدروژن در کاتد جریان الکترونها از آند به کاتد در داخل فلز برقرار شده و یک پیل خوردگی روی سازه تشکیل می‌شود. اگر فرض کنیم جریان الکتریکی از قطب مثبت به قطب منفی می‌رود - مطابق قرارداد در قوانین الکتریسیته - در پیل خوردگی تشکیل شده جریان از آند خارج شده و با عبور از الکترولیت (آب دریا) وارد کاتد می‌شود. بنابراین در صورتیکه جریان از الکترولیت وارد سطح فلز گردد باعث محافظت آن می‌شود و برعکس اگر جریان از سطح فلز وارد الکترولیت شود خوردگی شدید واقع می‌گردد.

در حفاظت کاتدی به روش آندهای فدا شونده (Sacrificial anodes) با اتصال یک فلز فعال مانند آلیاژهای آلومینیم، روی و یا منیزیم به سازه در اثر اختلاف پتانسیل طبیعی که بین سازه و فلز برقرار می‌گردد جریان الکتریکی از الکترولیت وارد سازه شده و خوردگی سازه متوقف می‌شود. در روش جریان اعمالی (impressed Current) نیز با استفاده از یک منبع خارجی مانند باطری و یارکتیفایر و یک آند کمکی جریان از طریق الکترولیت وارد سازه شده و کنترل خوردگی سازه صورت می‌گیرد. شکل ۴ مکانیزم حفاظت کاتدی به روش آندهای فدا شونده را نشان می‌دهد.[3]



شکل ۲: مکانیزم حفاظت کاتدی بروش آندهای فدا شونده

www.SID.ir

Archive of SID

در هر دو روش اصول حفاظت یکسان بوده و جریان الکتریکی از آند خارج شده و با عبور از الکترولیت توسط سطح سازه جمع‌آوری می‌شود.

مناسبترین معیار جهت تشخیص میزان حفاظت کاتدی یک سازه اندازه‌گیری پتانسیل الکتریکی سازه نسبت به آب دریا بوسیله الکترود مرجع (reference electrode) است. حداقل پتانسیل لازم جهت حفاظت فولاد در آب دریا (V)0.8- نسبت به الکترود مرجع نقره - کلرور نقره (Ag/AgCl) می‌باشد. مقدار پتانسیل لازم در آبهای شور و یا در حضور باکتریهای احیاکننده سولفات (V)0.9- است. مطابق با یک معیار دیگر اعمال جریان حفاظت کاتدی می‌بایست موجب کاهش پتانسیل سازه به میزان حداقل (V)0.3 نسبت به قبل از اعمال جریان حفاظت کاتدی شود.[4]

طراحی یک سیستم حفاظت کاتدی مناسب جهت کنترل خوردگی سازه‌های دریایی به عوامل زیادی بستگی دارد. این عوامل عبارتنداز موقعیت جغرافیایی، شرایط محیطی، شرایط سطوح در تماس با آب، شکل اجزاء سازه، کیفیت پوشش و یک گروه مهندسی متخصص که کلیه عوامل مرتبط را در هنگام طراحی سیستم حفاظت کاتدی مد نظر داشته باشد.

در گذشته انتخاب هر یک از دو روش حفاظت کاتدی به نظر طراح بستگی داشت. برخی از طراحان تنها از روش آندهای فدا شونده استفاده می‌کردند و هیچ حالت دیگری را در نظر نمی‌گرفتند. برخی دیگر نیز تبحر خود را در طراحی حفاظت کاتدی سازه‌های ساحلی و اسکله‌ها به روش جریانهای اعمالی به سازه‌های فراساحلی گسترش داده و همواره از این روش استفاده می‌کردند. در برخی موارد نیز هزینه‌های اولیه تعیین‌کننده روش حفاظت کاتدی سازه بود. اگر چه طراحی هر دو روش حفاظت کاتدی ممکن است به گونه‌ای باشد که یک سازه بطورکامل حفاظت شود و یا حفاظت سازه بطور ناقص صورت گیرد اما می‌توان با توجه به تجربیات گذشته به نکات زیر اشاره کرد.[5]

۱- در مناطق با شرایط محیطی حاد مانند دریای شمال، آسیب‌پذیری مکانیکی سیستم حفاظت کاتدی با جریان اعمالی باعث می‌شود این روش همواره پس از روش آندهای فدا شونده مدنظر قرار گیرد. بکارگیری این روش در چنین محیطهایی ممکن است منجر به اجرای عملیات بازسازی سیستم در مدت زمان نسبتاً کوتاهی شود. در مناطقی که شرایط محیطی کمتر حاد می‌باشد مانند خلیج مکزیک و یا خلیج فارس سیستم جریان اعمالی پیچیدگی کمتری داشته و عموماً عملکرد آن مناسب بوده است. در این سیستم آندها بوسیله کابل در اطراف سازه آویزان شده و در مواقع طوفانی و یا بازبینی، آندها از آب بیرون کشیده می‌شوند. کمبود متخصص خوردگی در خلیج فارس ممکن است منجر به عدم نگه‌داری صحیح سیستم جریان اعمالی و در نتیجه عدم کارآئی مناسب آن جهت حفاظت سازه شود.

۲- از آنجائیکه جریان خروجی هر یک از آندهای فدا شونده کم است، تعداد آندهایی که در سطح سازه پراکنده‌اند زیاد می‌باشد. این امر سبب می‌شود توزیع جریان بر روی سطح سازه یکنواخت‌تر از روش جریان اعمالی باشد.

www.SID.ir

Archive of SID

۳- مهمترین عیب سیستم حفاظت کاتدی با آندهای فدا شونده وزن آندها است. امروزه با اعمال پوشش مناسب در نواحی زیر آب و یا استفاده از آندهای دوتایی وزن آندهای موردنیاز جهت حفاظت سازه را تا اندازه زیادی کاهش داده‌اند.

بکارگیری سیستم جریان اعمالی می‌بایست به همراه آندهای فدا شونده با تعداد و وزن کافی پراکنده در تمام قسمتهای زیر آب سازه باشد. این آندها مناطق مهم سازه را در مدتی که تأسیسات لازم جهت برقراری سیستم جریان اعمالی کامل نشده است و همچنین در مواردی از قبیل عملیات غواصی در اطراف سازه و یا تعمیرات و بازسازی که سیستم جریان اعمالی خاموش است از خوردگی سازه جلوگیری می‌کنند.

مقدار دانسیته جریان لازم جهت کاهش پتانسیل سازه به کمتر از (V)0.8- نسبت به الکترودنقره - کلرورنقره (Ag/AgCl) در نقاط مختلف کره زمین متفاوت بوده و عمدتاً به مقدار اکسیژن محلول در آب دریا بستگی دارد. کاهش دما باعث افزایش مقاومت الکتریکی آب و افزایش حد حلالیت اکسیژن در آب می‌شود. همچنین تلاطم و جریانهای سطحی آب مقدار اکسیژن در تماس با سطح سازه را افزایش می‌دهد.[4]

جدول ۱ مقدار دانسیته جریان لازم جهت حفاظت کاتدی سازه‌های فولادی در دریا و همچنین عوامل محیطی مؤثر بر آن را نشان می‌دهد.

برای محاسبه مقدار وزن آند مورد نیاز دانسیته جریان میانگین (mean current density) لازم است در حالیکه عملکرد سیستم حفاظت کاتدی به دانسیته جریانهای اولیه و نهایی (Initial and Final current densities) بستگی دارد. این مورد در نمودار ۱ نشان داده شده است. همانطورکه ملاحظه می‌شود مقدار دانسیته جریان میانگین نسبتاً کم است در صورتی که مقدار جریان خروجی آندها می‌بایست به اندازه‌ای باشد که دانسیته جریان نهایی را تأمین نماید.

اگر دانسیته جریان اولیه زیاد باشد مقدار دانسیته جریان نگه‌داری (Mean or maintenance Current density) کاهش می‌یابد.[3]

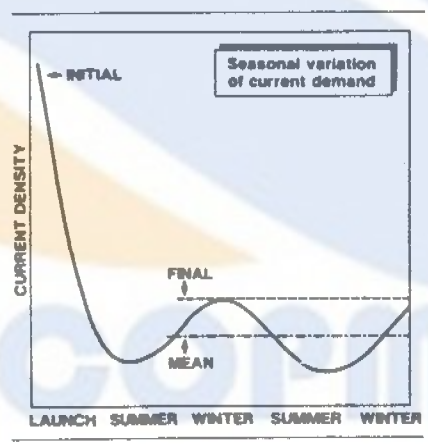
کاهش دانسیته جریان میانگین (نگهداری) بعلت تشکیل رسوبات متراکم‌تر و پیوسته‌تر می‌باشد. اکثر رسوبات آهکی محافظ (Protective Calcarous deposits) به هنگام اعمال دانسیته جریان اولیه $500\text{-}3000\frac{mA}{m^2}$ تشکیل می‌شوند. همچنین دانسیته جریان در این محدوده سبب قطبی‌شدن سریع (Polarization) سازه و کاهش احتمال بوجود آمدن خوردگی حفره‌ای (Pitting Corrosion) می‌شود. دانسیته جریانهای اولیه کمتر از این محدوده باعث تشکیل رسوبات متخلخل روی سازه شده و جهت نگهداری آن در پتانسیل حفاظتی به مقدار دانسیته جریان میانگین بیشتری در طول عمر سازه نیاز است.

www.SID.ir

Archive of SID

Production Area	Water Resistivity (ohm-cm)	Water Temp. (°C)	Environmental Factors: Turbulence Factor (Wave Action)	Environmental Factors: Lateral Water Flow	Typical Design Current Density mA/m² (mA/ft²): Initial	Mean	Final
Gulf of Mexico	20	22	Moderate	Moderate	110 (10)	55 (5)	75 (7)
U.S. West Coast	24	15	Moderate	Moderate	150 (14)	90 (8)	100 (9)
Cook Inlet	50	2	Low	High	430 (40)	380 (35)	380 (35)
Northern North Sea	26-33	0-12	High	Moderate	180 (17)	90 (8)	120 (11)
Southern North Sea	26-33	0-12	High	Moderate	150 (14)	90 (8)	100 (9)
Arabian Gulf	15	30	Moderate	Low	130 (12)	65 (6)	90 (8)
Australia	23-30	12-18	High	Moderate	130 (12)	90 (8)	90 (8)
Brazil	20	15-20	Moderate	High	180 (17)	65 (6)	90 (8)
West Africa	20-30	5-21			130 (12)	65 (6)	90 (8)
Indonesia	19	24	Moderate	Moderate	110 (10)	55 (5)	75 (7)

جدول ۱ : دانسیته جریان لازم جهت حفاظت سازه‌های دریایی



نمودار ۱ : تغییرات دانسیته جریان لازم در فصول مختلف

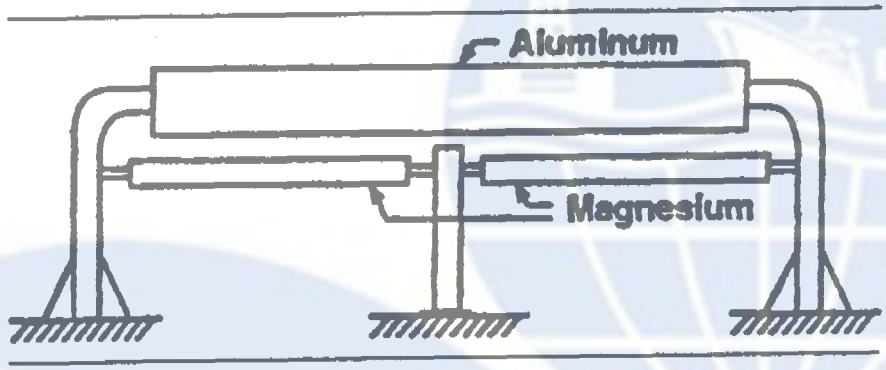
دانسیته جریان اولیه‌ای که در استانداردها جهت حفاظت کاتدی سازه‌های دریایی توصیه شده بسیار کمتر از $500\frac{mA}{m^2}$ است. این مقادیر سبب تشکیل رسوبات غیر محافظ می‌شود. بدین ترتیب استفاده از دانسیته جریان اولیه بالا سبب کاهش دانسیته جریان میانگین لازم و در نتیجه کاهش وزن آندهای

www.SID.ir

Archive of SID

مصرفی در روش آندهای فدا شونده می‌شود.

در سال 1984 برای اولین بار این روش به منظور کاهش وزن آندهای مصرفی جهت حفاظت یک سازه فولادی در دریای شمال بکار گرفته شد. به منظور دستیابی به دانسیته جریان اولیه بالا و قطبی شدن سریع سازه از آندهای منیزیمی استفاده شد. آندهای آلومینیمی (Al) نیز جهت برقراری جریان نگه‌داری در مدت بهره‌برداری از سازه لازم بود. طراحی آندهای منیزیمی براساس ایجاد دانسیته جریان $500\frac{mA}{m^2}$ به مدت یکماه پس از قرار گرفتن سازه در دریا و طراحی آندهای Al براساس دانسیته جریان $45\frac{mA}{m^2}$ جهت نگه‌داری سازه در پتانسیل حفاظتی در طول مدت زمان بهره‌برداری از سازه صورت گرفت. طراحی آندها بصورت دوتایی بگونه‌ای بود که آندهای منیزیمی به موازات آندهای آلومینیمی در زیر آنها قرار گرفته بودند. شکل ۳ بطور شماتیک چگونگی طراحی آندها را نشان می‌دهد.[7]



شکل ۳: طراحی آندهای دوتایی

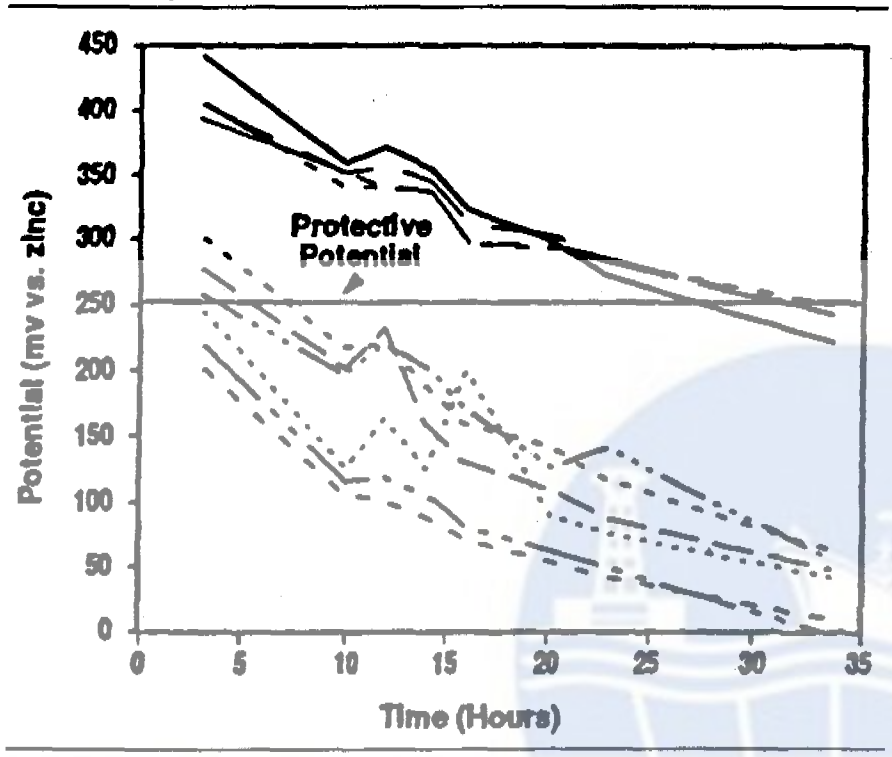
جهت بررسی عملکرد آندها تعدادی الکترود مرجع روی در اطراف سازه نصب شدند. نمودار ۲ تغییرات پتانسیل سازه را در مدت 35 ساعت پس از قرار گرفتن سازه در دریا نشان می‌دهد. برخی از الکترودها پتانسیل کمتر از 250mv را در مدت کمتر از 3 ساعت نشان دادند و پس از 35 ساعت پتانسیل اندازه‌گیری شده بوسیله تمامی الکترودها کمتر از 250mv بود. پتانسیل اندازه‌گیری شده توسط الکترودهای مرجع نقره-کلرور نقره (Ag/AgCl) در سالهای بعد در تمام مناطق در محدوده 1.01- تا 1.03- قرار داشته و سازه همواره تحت حفاظت قرار گرفته بود. با استفاده از این روش اگرچه هزینه نصب آندها تا اندازه‌ای افزایش یافت اما وزن آندهای مصرفی و همچنین هزینه تهیه آندها به میزان قابل توجهی کاهش یافت.[7]

به منظور کاهش وزن آندهای مصرفی جهت حفاظت یک سازه دریایی همچنین می‌توان از سیستم حفاظت کاتدی به همراه اعمال پوشش در ناحیه زیر آب سازه استفاده کرد. بکارگیری این روش با دو سوال همراه است. اولاً چه پوششی روی سطح سازه اعمال شود و ثانیاً چگونه تأثیر پوشش در طراحی سیستم حفاظت کاتدی لحاظ گردد. مطابق استاندارد Dnv می‌توان درصد تخریب پوشش اعمال شده

www.SID.ir

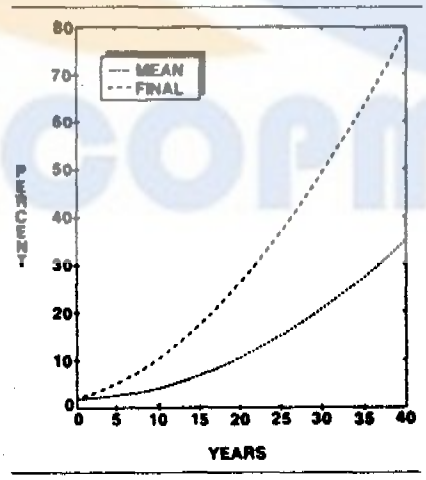
Archive of SID

در ناحیه زیر آب را پس از مدت زمان معینی پیش‌بینی کرد.



نمودار ۲ : تغییرات پتانسیل سازه در مدت ۳۵ ساعت

نمودار ۳ درصد تخریب پوشش را برحسب سال مطابق استاندارد فوق نشان می‌دهد. این نمودار شامل دو منحنی است. منحنی میانگین (mean) جهت تعیین مقدار وزن آند لازم بکار می‌رود و براساس آن فاکتور کاهش دانسیته جریان میانگین (mean Current density) بدست می‌آید. این منحنی میانگین سطح بدون پوشش سازه را در طول عمر آن نشان می‌دهد.[8]



نمودار ۳ : منحنی تخریب پوشش بر حسب زمان

منحنی دوم (final) نشان دهنده درصد سطح بدون پوشش سازه پس از یک مدت زمان معین است.

www.SID.ir

Archive of SID

روش استفاده از نمودار فوق بدین صورت است. فرض کنیم مقدار دانسیته جریان میانگین لازم جهت حفاظت یک سازه بدون پوشش مطابق جدول ۱ $105\frac{mA}{m^2}$ بوده و طراحی سیستم براساس عمر 40 سال باشد. این مقدار دانسیته جریان در عددی که از تقاطع منحنی mean با خط عمودی 40 سال بدست می‌آید ضرب می‌شود.

$$105\frac{mA}{m^2} \times 35\% = 36.75\ \frac{mA}{m^2}$$

با فرض اینکه مقدار دانسیته جریان نهایی لازم جهت حفاظت سازه مطابق جدول ۱ $110\frac{mA}{m^2}$ باشد به منظور بدست آوردن مقدار جریان مصرفی در پایان عمر سازه سطح کل سازه را در عدد حاصل از تقاطع منحنی final با خط عمودی 40 سال ضرب می‌کنیم

$$80\% \times \text{immersed area} \times 110\frac{mA}{m^2}$$

همانطورکه ملاحظه می‌شود به این ترتیب مقدار جریان میانگین و نهایی و در نتیجه مقدار وزن آند مصرفی جهت حفاظت سازه به مقدار زیادی کاهش می‌یابد.

نکته مهم اینکه پوشش دادن سازه موجب کاهش تعداد آندها نشده و تنها سبب کاهش وزن آندهای مصرفی می‌شود. برخی از آندهای از جنس آلیاژهای آلومینیوم در سالهای اولیه بهره‌برداری از سازه که پوشش سالم بوده و مقدار جریان مصرفی کم است غیر فعال (Passive) شده و جریان خروجی آنها به شدت کاهش می‌یابد. اگر چه در سالهای اخیر با تغییر ترکیب و درصد عناصر آلیاژی و چگونگی عملیات ریخته‌گری و تولید آندها خطر غیر فعال شدن آنها از بین رفته است ولی همواره توجه کامل به موارد فوق ضروری است.

سیستمهای پوششی بسیاری به همراه سیستم حفاظت کاتدی تاکنون در ناحیه زیر آب سازه‌های دریایی اعمال شده‌اند. یکی از این سیستمها بصورت زیر است.

Coat	
Inorganic Zinc Primer	
Epoxy intermediate Coat	
Coal tar epoxy top Coat (2 Coats)	
Total Dry Film thickness	500-625 micron

این سیستم به همراه 30 سیستم دیگر در آب دریا و در معرض پتانسیل کاتدی 1200mv- قرارگرفته و تنها سیستمی بوده که پس از 4 سال هیچ اثری از تاول (blister) و یا برآمدگی (disbondment) روی پوشش مشاهده نشد. دو عامل مؤثر بر مقاومت پوشش در برابر پتانسیل کاتدی ضخامت و نفوذناپذیری آن نسبت به آب و یونها می‌باشد.[9]

www.SID.ir

Archive of SID

نتیجه‌گیری :

۱- هزینه گزافی که برای ساخت سازه‌های دریایی صرف می‌شود ایجاب می‌کند خوردگی آنها بطور مؤثری کنترل شود. کنترل خوردگی سازه‌های دریایی مستلزم شناخت کامل هر یک از محیطهایی است که در تماس با نواحی مختلف سازه‌های فوق می‌باشند.

۲- انتخاب پوشش‌های آلی جهت حفاظت نواحی جزر و مدی، پاشش آب، و اتمسفری سازه‌های دریایی می‌بایست براساس مکانیزم حفاظتی پوششها، خواص فیزیکی و شیمیایی، و عملکرد شناخته شده آنها در شرایط محیطی مشابه باشد. توجه به چگونگی آماده‌سازی سطح و روش اعمال پوشش نقش بسیار مهمی در عملکرد یک پوشش دارد.

۳- استفاده از آندهای دوتایی در سیستم حفاظت کاتدی سازه‌های دریایی دانسیته جریان اولیه را افزایش داده و علاوه بر قطبی شدن سریع سازه رسوبات محافظ روی سطح سازه بوجود می‌آیند. قطبی شدن سریع سازه باعث کاهش احتمال وقوع خوردگی حفره‌ای می‌شود. همچنین تشکیل رسوبات محافظ باعث کاهش دانسیته جریان نگهداری و در نتیجه کاهش وزن آندهای مصرفی جهت حفاظت سازه در مدت زمان بهره‌برداری می‌گردد.

۴- استفاده از پوششهای آلی به همراه حافظت کاتدی باعث کاهش وزن آندهای مصرفی جهت حفاظت ناحیه زیر آب سازه‌های دریایی می‌شود. بکارگیری روش فوق علاوه بر کاهش هزینه نصب سیستم حفاظت کاتدی وزن کلی سازه را نیز کاهش می‌دهد.

ICOPMAS

تشکر و قدردانی :

در خاتمه از افراد و مؤسسات زیر که صمیمانه اینجانب را در امر تهیه این مقاله یاری نموده‌اند تشکر و قدردانی می‌شود.

۱- آقای مهندس شمس‌الدین استوار مدیرعامل محترم و پرسنل آزمایشگاه شرکت رنگ همپل - باژاک

۲- آقایان مهندس محمدحسین منذری و مهندس رحیم مالکی - شرکت مهندسی و ساخت تأسیسات دریایی

www.SID.ir

Archive of SID

مراجع:

1- C.G.Munger , "coating Requirements for offshore structures" Materials Performance , June 1992.

2- Kenneth I. Rhods and E. Michael Moore, "Performance of Marine and Industrial coatings in the persian Glulf" conference on corrosion control by organic coating 1981.

3- Rolf E.Lye, "A corrosion protection System for a North Sea Jacket" Materials Performance , May 1990.

4- Corrosion Control of Steel Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production " , NACE Recommended Practice RPO176-94, NACE International Standard 1994.

5- B.S.Wyatt," Cathodic Protection of Fixed Offshore Structures" , conference on Cathodic Protection , coventry, April 1982.

6- Jim N.Britton, "Monitoring Offshore Cathodic Protection systems - Technologies and Regulatory Requirements", Materials Perfomance, August 1991.

7- Kingstey C.Lunden, "Rapid Polarization Cathodic Protection in the Rijn Field", Materials Performance , November 1991.

8- sheldon Evans, "Deep Water Platform Protection Using Coatings Combined with Cathodic Protection" , Materials Performance, April 1992.

9- C.G.Munger , "Coatings and Cathodic Protection" , Materials Performance, July 1981.

10-Metals Handbook, Ninth Edition, Volum 13, corrosion, ASM 1995

www.SID.ir

Archive of SID

Erosion Control Strategies for Steel Maritime Structures

M. Pakshir – Assistant Professor in Material Department, Shiraz University

S. M. Kasiriha – Faculty Member of Polymer Faculty, Amirkabir University of Technology

A. S. Ghurbani – Master's Student in Material Department, Shiraz University

Abstract

The maritime steel structures need to survive in water, tidal, water spray and atmospheric conditions that are highly erosive. Thus, different erosion controlling strategies must be used for the steel structures that are installed and erected in the mentioned environments. Coatings and cathode preservation are two engineering strategies which are implemented in order to decrease or stop the erosion in the maritime steel structures. The cathode protection system stops the erosion of the mentioned structures by applying an electrical current from outside sources and using the coatings as an obstacle against the erosive currents generated by anodes and cathodes or galvanic pairs. In this article, the strategies for establishing an effective and economic system in order to control the erosion of the steel maritime structures are presented. Moreover, two effective methods are being studied in order to protect the steel structure parts which are under the water, with the aim of decreasing the used anode and consequently decreasing the costs of establishing a cathode preserving system.

Keywords: steel maritime structures; cathode protection; erosion

www.SID.ir