

# استفاده از حفاظت کاتدی برای کنترل خوردگی سازه های بتن آرمه در محیط های دریایی

میرشریف حسن پور ، دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران\*  
دکتر حبیب شاه نظری ، استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران  
تلفن : ۰۱۱۱-۲۲۵۰۸۵۲ ، پست الکترونیکی : [m\\_hassanpour@CivilEng.iust.ac.ir](mailto:m_hassanpour@CivilEng.iust.ac.ir)

## چکیده

خوردگی فولاد در بتن فرایندی است الکتروشیمیایی (مشابه با عملکرد باتری) که منجر به جریان الکترونها از نواحی آندی ؛ که خوردگی در آنجا صورت می گیرد ، به نواحی کاتدی آرماتورها می شود. مؤثرترین شیوه مقابله با این مکانیزم (که یکی از مهمترین و رایج ترین عوامل تخریب سازه های بتنی در محیط های دریایی می باشد) استفاده از روش های حفاظت کاتدی است. در این مقاله سعی بر این است که روش های مختلف حفاظت کاتدی ؛ که در دو گروه کلی سیستم های مبتنی بر جریان دهی و سیستم های مبتنی بر قربانی شدن آند طبقه بندی می شوند، معرفی گردیده و مزایا و محدودیتهای هر یک (با توجه به محل مورد استفاده) مورد بحث قرار گیرد.

**کلیدواژه ها :** خوردگی ، حفاظت کاتدی ، سازه های بتنی ، محیط های دریایی

## ۱- مقدمه

نفوذپذیری بالای بتن و طراحی ضعیف جزئیات؛ مانند پوشش با ضخامت کم ، از مشکلاتی هستند که باعث ورود نمکها و رطوبت به داخل بتن می شوند. افزایش تجمع نمک و رطوبت می تواند خوردگی فولاد مسلح کننده را تشدید کند و موجب تخریب قابل ملاحظه در سازه های بتنی شود. این تخریب علاوه بر خوردگی فولاد و اضافه شدن حجم آن ، منجر به ترک خوردن پوشش بتنی روی آرماتور نیز می شود. بررسی ها حاکی از این واقعیت است که روش های متداول ترمیم (برداشتن بتن آسیب دیده و جایگزینی آن بوسیله مواد پرکننده ترمیمی) در کنترل خوردگی تحت این شرایط اثر کمی دارند.

در طول ده سال اخیر، حفاظت کاتدی (CP) بطور فزاینده ای برای کاهش آهنگ خوردگی در سازه های بتن مسلح در محیط های دریایی مورد استفاده قرار گرفته است. حفاظت کاتدی یک روش الکتروشیمیایی است که بطور مؤثری می تواند خوردگی فولاد مسلح کننده را (علیرغم وجود درصدی نمک در بتن) کاهش داده و حتی متوقف کند. سیستم هایی که هم از آند قربانی شونده و هم از آند تحت اعمال جریان الکتریکی استفاده می کنند، بطور موفقیت آمیزی در قسمتهای لکه شده (خیس) و نواحی تحت جزر و مد ، و نیز بخش های (تقریباً) خشک سازه های دریایی بکار رفته اند. سازه های بتنی در محیط های دریایی را می توان براساس موقعیت شان نسبت به آب دریا به دو دسته تقسیم کرد : مستقیم و غیرمستقیم.

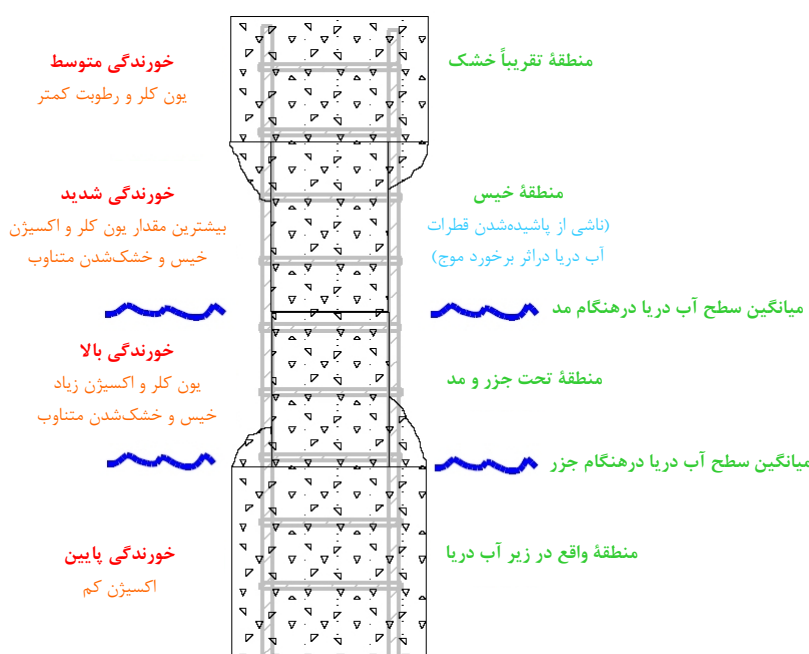
دسته با موقعیت مستقیم شامل سازه هایی است که قسمتی از سازه یا کل آن در آب فرو رفته است، و دسته غیرمستقیم شامل سازه هایی است که در امتداد خط ساحلی قرار دارند؛ ولی در ارتباط مستقیم با آب دریا نیستند. دیوارهای دریایی، اسکله ها، اجزاء زیرساختی (شالوده ای) پلها و دیوارهای حائل مثالهایی از سازه های با موقعیت مستقیم هستند، درحالی که ساختمانهای آپارتمانی چندین طبقه و دیگر ساختمانهایی که در امتداد ساحل قرار دارند، نمونه هایی از

سازه‌های با موقعیت غیرمستقیم هستند. هرچند نتیجه فرایند خوردگی برای همه سازه‌های بتن مسلح مشابه است، اما فرایندی که طی آن خوردگی رخ می‌دهد، سرعت خوردگی و روشهای مناسب مرمت انواع مختلف سازه‌ها می‌تواند بسیار متفاوت باشد.

## ۲- سازه‌های نیمه‌مستغرق

سازه‌های بتن مسلحی که قسمتی یا کل آنها در آب دریا فرو رفته‌است، به دلایل مختلف مستعد خوردگی فولاد مسلح‌کننده هستند. این علل شامل سطوح بالای تجمع کلرید (ناشی از آب دریا)، تر و خشک شدن متوالی بتن، میزان رطوبت بالا و در دسترس بودن اکسیژن می‌باشد. در سازه‌های بتنی واقع در محیط‌های دریایی می‌توان از حیث خوردگی سه حوزه را در نظر گرفت:

- (۱) منطقه همیشه در زیر آب دریا
  - (۲) قسمت‌های لکه‌دار شده (خیس) و تحت جزر و مد (که متناوباً تر و خشک می‌شوند)
  - (۳) منطقه تقریباً خشک (که به میزان کافی بالاتر از میانگین سطح آب دریا در هنگام مد می‌باشد و لذا به ندرت خیس می‌شود).
- شکل ۱ مقطعی از نواحی مختلف خوردگی را که به یک شمع بتنی واقع در محیط دریایی مربوط است، نشان می‌دهد.



شکل ۱: مقطعی از نواحی مختلف خوردگی یک شمع بتنی واقع در محیط دریایی

هر یک از نواحی فوق، خصوصیات خوردگی بسیار متفاوتی دارند. برای مثال، سرعت خوردگی در زیر سطح آب به علت کم در دسترس بودن اکسیژن محدود شده‌است، و برعکس کم‌تر بودن مقدار یون کلرید و رطوبت، سرعت خوردگی در منطقه تقریباً خشک را محدود می‌کند. خوردگی در قسمت‌های لکه‌دار شده و تحت جزر و مد؛ که تر و خشک شدن‌های متناوب منجر به بالا بودن میزان یون کلرید و اکسیژن در این نواحی می‌شود، بسیار شدید است. مقدار رطوبت زیاد در این منطقه سبب رسانایی الکتریکی بالای بتن می‌شود. جفت شدن الکتروشیمیایی این منطقه با سایر نواحی موجود در سازه، فعالیت خوردگی این پیل عظیم را توسعه خواهد داد.

## ۳- سازه‌های در معرض هوای محیط

آن دسته از سازه‌هایی که در معرض غیرمستقیم آب قرار دارند، تحت اثر نمک‌های تولید شده در هوا و رطوبت محیط دستخوش خوردگی می‌شوند. کیفیت بتن و ضخامت پوشش، نقش عمده‌ای در ورود یونهای کلرید و زمان خوردگی بازی می‌کنند. کربناسیون؛ فرایندی که بوسیله آن دی‌اکسید کربن هوای محیط در داخل بتن متخلخل پخش شده و خاصیت قلیایی آن را خنثی می‌کند، به تخریب روکش فلزی فولاد مسلح‌کننده (که عملکرد آن جلوگیری از خوردگی است) کمک کرده و به حمله کلریدها که سبب خوردگی می‌شود، منجر می‌گردد. سازه‌های بتنی، مخصوصاً در

محیط‌های گرم و مرطوب ، مستعد تخریب بتن هستند ؛ زیرا مقادیر خوردگی به میزان زیادی تحت تأثیر درجهٔ رطوبت هوا ، دما و مقاومت ویژه می‌باشد [۱].

## ۴- تعمیرات متداول

مشخص شده‌است که شیوه‌های متعارف ترمیم ؛ شامل کندن نواحی لایه‌لایه‌شدهٔ بتن ، پاکسازی قسمتهای خورده‌شدهٔ فولاد و بتونه‌کاری این نواحی با ملات سیمان پورتلند ، برای سازه‌های دریایی بی‌اثر هستند. تعمیرات غالباً هر چند سال تکرار شده و منطقهٔ نیازمند ترمیم ، در هر مرتبه نسبت به دفعهٔ قبل ، از حیث وسعت به میزان زیادی افزایش نشان می‌دهد. حضور سطوح بالای یونهای کلرید باقیمانده در بتن مادر ، اجازه خواهد داد که فرایند خوردگی بدون کاسته‌شدن از شدت آن ، ادامه یابد. همچنین ثابت شده است که پس از ترمیم قسمتی از بتن با مواد پرکننده ، بدلیل آنکه بخشی از فولاد در داخل این مواد عاری از کلرید بوده و بخش دیگر آن در بتن حاوی کلرید قرار دارد ، لذا بین این دو حوزه پیل خوردگی تشکیل می‌شود که این یکی از مشکلات عمدهٔ روشهای معمول ترمیم است. این مسأله به ایجاد آسیب‌دیدگی ناشی از خوردگی در امتداد سطح خارجی قسمت لکه‌گیری و بتونه‌کاری شده ، و نهایتاً وقوع خرابی کامل بخش ترمیم‌شده و مصالح پیرامونی منجر خواهد شد. شکل ۲ مثالی از پایهٔ بتنی پیش‌تنیدهٔ یک پل در فلوریدا می‌باشد که قبلاً با روکش متعارف مربوط به پایه‌های بتنی تعمیر شده‌است.



شکل ۲: پایهٔ بتنی قبلاً تعمیر شدهٔ یک پل در فلوریدا

اهمیت این مسأله ، ادارهٔ کل ترابری فلوریدا را به بررسی و پژوهش در مورد راههای کاهش خوردگی فولاد مسلح‌کننده در سازه‌های دریایی وادار کرده‌است. این ادارهٔ کل مسئول نگهداری و حفاظت از حدود ۳۰۰۰ پلی می‌باشد که در امتداد خط ساحلی (به طول ۲۰۰۰ کیلومتر) واقع شده‌اند. براساس نتایج بدست‌آمدهٔ کارگاهی و آزمایشگاهی ، ادارهٔ کل ترابری فلوریدا تصمیم گرفت که حفاظت کاتدی را بعنوان یک راهکار کنترل خوردگی اعضای بتن مسلح در نواحی لکه‌شده و تحت جزر و مد این اعضاء بکاربرد [۲]. با این وجود ، سروکارداشتن با جزر و مد بر پیچیدگی شرایط می‌افزاید؛ چرا که باید در طراحی سیستم حفاظت کاتدی ، هم فولاد مسلح‌کنندهٔ واقع در بالای تراز آب و هم فولاد مسلح‌کنندهٔ واقع در زیر سطح آب را در نظر گرفت.

## ۵- حفاظت کاتدی در محیط‌های دریایی

حفاظت کاتدی، هم به روش جریان‌دهی و هم با استفاده از آندهای قربانی‌شونده، برای کنترل خوردگی در سازه‌های بتنی واقع در محیط‌های دریایی استفاده شده‌اند. سیستمهای مبتنی بر جریان‌دهی، از یک مادهٔ فاقد قدرت کنش و واکنش شیمیایی (مانند شبکه‌ای از جنس تیتانیوم) بعنوان آند استفاده می‌کنند؛ که این ماده در جهت کمک به فولاد مسلح‌کننده ، آن را وادار می‌کند که به آهستگی اکسید شود. از دستگاه یکسوکنندهٔ جریان برای برق‌دهی به سیستم استفاده می‌شود. این وسیله جریان متناوب را به جریان مستقیم تبدیل می‌کند. یکی از مزایای عمدهٔ سیستم حفاظت کاتدی به روش جریان‌دهی، توانایی یکسوکننده در تنظیم و کنترل جریان برق می‌باشد. در محیط‌های دریایی، سرعت خوردگی می‌تواند به میزان قابل ملاحظه‌ای بین نواحی فقط در معرض هوا ، مناطق لکه‌شده و قسمتهای تحت جزر و مد متغیر باشد. تغییرات در تراکم فولاد هم می‌تواند توزیع جریان را تحت تأثیر قرار دهد. در نتیجه ناحیه‌بندیهای مستقل از هم و کنترل سیستم آند ، یکی از عوامل مهم طراحی است. ایجاد عایق الکتریکی بین آند و فولاد مسلح‌کننده ، جهت مطمئن‌شدن از عملکرد مناسب یک سیستم مبتنی بر جریان‌دهی، بسیار مهم می‌باشد. اگر تماسی

برقرار شود، مدار کوتاه ایجاد شده می‌تواند قسمتی از ناحیه آندی یا کل آن را بی‌اثر کند. بسته به اینکه از چه آندی استفاده شود، عمر مورد انتظار آندهای بکار رفته در حفاظت کاتدی به روش جریان‌دهی، به نوبه خود بسیار بیشتر از آندهای قربانی‌شونده است. برای مثال، عمر یک سیستم روکش رسانا در یک محیط دریایی کمتر از ۱۰ سال می‌باشد، درحالی‌که شبکه‌های تیتانیومی به‌راحتی بیش از ۷۵ سال عمر می‌کنند.

سیستمهای حفاظت کاتدی به روش آندهای قربانی‌شونده این مزیت را دارند که نیازی به تأمین‌کننده‌های یدکی برق نداشته، و همچنین می‌توانند برای بتن‌های پیش‌تنیده و پس‌تنیده مورد استفاده قرار بگیرند؛ بدون اینکه خطر ایجاد سطوح بالای پتانسیل که می‌تواند به شکنندگی هیدروژنی فولاد منجر شود، وجود داشته باشد. جریانی که از یک آند قربانی‌شونده تولید می‌شود، مستقیماً به محیطی که در آن واقع شده است ارتباط دارد. آندهایی که در محیط‌های نمدار و شرجی واقع‌اند، معمولاً جریان بیشتری تولید می‌کنند. بعلاوه پایین‌بودن ولتاژ دریافت‌شده از آندهای قربانی‌شونده، استفاده از آنها (تنها) در سازه‌هایی که شبکه‌های منفرد فولادی دارند (مانند اجزای زیرساختی پلها) مناسب می‌باشد. همچنین از آنجا که آند قربانی‌شونده مستقیماً به فولاد مسلح‌کننده متصل می‌شود، بنابراین اتصال‌کردن آند جای نگرانی ندارد. جدول ۱ امکان مقایسه بین مزایا و معایب این دو سیستم را فراهم می‌کند.

| سیستم مبتنی بر جریان‌دهی                                                                                                                                                                                                                       | سیستم مبتنی بر قربانی‌شدن آند                                                                                                                                                                                                                                                                   |              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>طول عمر بیشتر آند</li> <li>امکان کنترل جریان</li> <li>سابقه طولانی در استفاده از این سیستم</li> </ul>                                                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>ساده بودن سیستم</li> <li>عدم نیاز به تنظیم، کنترل و نگهداری</li> <li>عدم نیاز به عایق‌بندی الکتریکی</li> <li>ناچیزبودن احتمال خطر شکنندگی هیدروژنی در فولاد پر مقاومت</li> <li>عدم نیاز به ایجاد شیار جهت استقرار آندها و نیز اجرای پوشش بتنی</li> </ul> | <b>مزایا</b> |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>نیاز به تنظیم، کنترل و نگهداری</li> <li>لزوم ایجاد عایق الکتریکی بین آند و فولاد</li> <li>نیاز به شبکه سیم‌کشی و تعبیه حفاظ برای سیمها</li> <li>لزوم تنظیم و کنترل دقیق در بتن‌های پیش‌تنیده</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>طول عمر کوتاه‌تر آند</li> <li>وابسته‌بودن جریان خروجی از آند به خواص شیمیایی آن و نیز به محیط اطراف</li> <li>عدم امکان تنظیم یا کنترل جریان</li> </ul>                                                                                                   | <b>معایب</b> |

**جدول ۱: مقایسه سیستمهای حفاظت کاتدی**

سیستمهای حفاظت کاتدی برای سازه‌های بتنی واقع در محیط‌های دریایی به سه دسته طبقه‌بندی می‌شوند: در سطح بکار رونده، با پوشش احاطه‌شونده، و زیر آب بدون وجود پوشش. سیستمهای بکار رونده در سطح شامل استفاده از مواد آندی بر روی کل سطح یا نواحی خاصی که بیشترین نیاز را به حفاظت کاتدی دارند، می‌باشد. جدول ۲ خلاصه‌ای از انواع مختلف آندها را از طریق دسته‌بندی آنها نشان می‌دهد.

| در سطح بکار رونده                                                                                                                                                                                                                                | با پوشش احاطه‌شونده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | مستغرق                                                                                                                                             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>روکش رسانا</li> <li>ذرات فلز روی پاشیده‌شده</li> <li>با استفاده از قوس الکتریکی</li> <li>تیتانیوم اسپری‌شده تحت حرارت</li> </ul>                                                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>شبکه آند تیتانیومی که بر روی آن یک لایه روکش اجرا می‌شود</li> <li>شبکه متشکل از نوارهای تیتانیومی که درون شیارهای ایجادشده در سطح بتن قرار داده می‌شوند</li> <li>سیستم آندهای جدا از هم (غیر وابسته)</li> <li>پوشش یکپارچه برای پایه‌های بتنی</li> <li>با استفاده از شبکه آند تیتانیومی</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>آندهای از جنس چدن (فولاد متراکم)، یا آند تیتانیومی که با مخلوطی از اکسید فلزات روکش داده شده است</li> </ul> |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>ذرات فلز روی پاشیده‌شده</li> <li>با استفاده از قوس الکتریکی</li> <li>ذرات آلیاژ فلزات آلومینیوم، روی و ایندیوم که با استفاده از قوس الکتریکی پاشیده شده‌اند</li> <li>آند چسبندۀ از جنس فلز روی</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>پوشش یکپارچه برای پایه‌های بتنی</li> <li>با استفاده از شبکه فلز روی</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>آندهای متشکل از روی یا آلومینیوم متراکم</li> </ul>                                                          |

**جدول ۲: دسته‌بندی انواع آندها**

بکاربردن حفاظت کاتدی در قسمتهای لکه‌شده و نواحی تحت جزر و مد سازه‌های بتنی، به علت تر و خشک‌شدن‌های مداوم، افزایش سطح آب دریا و احتمال ایجاد خراشیدگی و اصابت با اجسام شناور، بسیار دشوار است. از سوی دیگر، در نواحی لکه‌شده و تحت جزر و مد، در صورتی که به آند نصب‌شده اجازه داده‌شود تا مستقیماً با آب دریا تماس پیدا کند، تحت تخلیه جریان شدیدی قرار خواهد گرفت. این عارضه به علت تمایل آند به صدور جریان شدید به آب دریا؛ در اثر وجود مسیر عبور جریان منتهی به فولاد (با کمترین مقاومت) در قسمتهایی از سازه که زیر آب دریا هستند، پدید می‌آید. بسیاری از مهندسان متخصص در خوردگی این اثر را تأیید کرده، و طراحان روشهایی را برای مقابله با این مشکل ایجاد نموده‌اند. صدور جریان ممکن است با استفاده از یک عایق الکتریکی بر روی آند، یا با اعمال جریان اضافی حاصل از یک سیستم حفاظت کاتدی نصب‌شده در زیر سطح آب، کاهش یابد.

## ۶- سیستمهای مبتنی بر جریان‌دهی

### ۶-۱- ایجاد روکش رسانا

یکی از اولین سیستمهای آندی که در سازه‌های بتنی استفاده شد، روکش‌های رسانا یا رنگ‌کردن با رنگهای حاوی کربن است. یکی از مزایای روکش‌های رسانا، قابلیت بکارگیری آسان این سیستم در سطوح ناهموار؛ مثل زیر عرشه‌ها و پایه‌های پل می‌باشد. بوسیله اسپری یا غلتک‌کاری یا با استفاده از قلم‌مو، عمل رنگ‌کردن بر روی سیمه‌هایی از جنس نیوبیوم پلاتینی که قطری تقریباً ۳۰۰ میکرونی دارد، صورت می‌پذیرد. سیمه‌ها معمولاً در فواصل ۳ الی ۶ متری قرار داده می‌شوند. روکش رسانا سیاه‌رنگ است؛ بنابراین به یک رنگ تزئینی بعنوان پوشش خارجی نیاز داریم. بطور عمده، سیستمهای مبتنی بر استفاده از رنگ‌های رسانا از جانب مدارهای کوتاه تشکیل‌شده در فولاد لخت (مثل آرماتوربندی‌هایی که در قسمتهای زیرین اجزاء سازه‌ای وجود دارند) در معرض تهدید می‌باشند. علاوه بر این، دوام طولانی‌مدت این سیستمها در محیط‌های دریایی؛ خصوصاً در نواحی‌ای که در معرض مرطوب‌شدن سطح می‌باشند، مورد تردید است.

### ۶-۲- ذرات فلز روی پاشیده شده با استفاده از قوس الکتریکی (حفاظت کاتدی به روش جریان‌دهی)

تکنیک پوشش‌دادن با فلز روی در حفاظت کاتدی بتن مسلح اولین بار در سال ۱۹۸۳ بوسیله اداره کل حمل و نقل ایالت کالیفرنیا توسعه پیدا کرد [۳]. در حال حاضر، اداره کل ترابری ایالت Oregon از چنین سیستمی برای کنترل خوردگی در پلهای قوسی تاریخی واقع در امتداد بزرگراه ساحلی پاسیفیک استفاده می‌کند. فرایند پوشش‌دادن با روی مشتمل بر ذوب آن بوسیله قوس الکتریکی با شدت جریان بالا، و سپس پاشیدن فلز مذاب بر روی بتن (همراه با فشار هوا) می‌باشد. پوشش فلز روی معمولاً به شکل یک لایه نازک خشک به ضخامت ۴۰۰-۳۰۰ میکرون بکاربرده می‌شود. عملکرد این سیستم مشابه با یک روکش رسانا می‌باشد؛ با این تفاوت که بجای سیم نیوبیومی (Niobium) آبکاری‌شده با پلاتین، یک لایه فلزی جایگزین شده‌است. بررسی این سیستمها نشانگر افزایش طول عمر سازه‌ها در برابر خوردگی است (به این دلیل که استحکام چسبندگی‌ها با گذشت زمان؛ در اثر سخت‌شدن ثانویه محصولات واکنش‌های شیمیایی فلز روی، بطور محسوسی افزایش می‌یابد) [۴]. باید توجه داشت که این سیستمها نیز، همچون روکش‌های رسانا، از جانب مدارهای کوتاه تشکیل‌شده در فولاد لخت واقع در سطح بتن در معرض تهدید هستند.

### ۶-۳- شبکه آند تیتانیومی که بر روی آن یک لایه روکش اجرا می‌شود

این سیستم شامل شبکه تیتانیومی گسترده‌ای است که به‌همراه کاتالیزوری از جنس اکسید فلزهای مخلوط‌شده با یکدیگر، در سطح (بتن) بکاربرده می‌شود. این شبکه معمولاً بوسیله گیره‌های غیر فلزی به سطح ترمیم‌یافته و آماده‌شده بتن وصل شده و سپس روی آن با رنگ و یا با بتن سیمان پرتلند یا شاتکریت، روکش می‌شود (شکل ۳). این سیستمها بطور معمول به‌گونه‌ای طراحی و نصب می‌شوند که متوسط چگالی جریان در آند از ۱۱۰ میلی‌آمپر بر متر مربع تجاوز نکند. همانگونه که پیش‌تر گفته‌شد، طول عمر مورد انتظار این آندها به راحتی می‌تواند از ۷۵ سال نیز فراتر رود. جریان برق بوسیله سیمهای اصلی و میله‌های تیتانیومی توزیع‌کننده جریان، به شبکه فرستاده می‌شود. چنین سیستمهایی به‌خوبی کار می‌کنند؛ زیرا پوشش اکسید فلزی گرانبهایی که بعنوان آند فعال عمل می‌کند، با گذشت زمان به آرامی اکسید می‌شود. تحت شرایط معمولی برای آند، شبکه تیتانیومی بعنوان یک سطح خنثی (در برابر واکنش‌های شیمیایی) عمل کرده و از بین نخواهد رفت. بنابراین آند از لحاظ ابعادی پایدار محسوب می‌شود.



شکل ۳: شبکه آند تیتانیومی که بر روی آن یک لایه روکش اجرا می‌شود

#### ۶-۴- سیستم پوشش یکپارچه برای پایه‌های بتنی با استفاده از شبکه آند تیتانیومی

سیستم حفاظت کاتدی دیگری که با نام پوشش یکپارچه برای پایه‌های بتنی شناخته شده است، بر روی بیش از ۸۰۰ پایه بتنی مربوط به پلها در ایالت فلوریدا بکار رفته است. این سیستم از یک پوشش فایبرگلاس پیش‌ساخته استفاده می‌کند که با شبکه آندی که به کمک بست‌های ویژه به وجه داخلی این پوشش وصل‌گردیده، مجهز شده است. این سیستم پوششی با استفاده از نوارهای متراکم بر روی پایه‌های مذکور مستقر شده و فضای خالی بین پوشش و سطح بتن با یک ملات رقیق (دوغاب) سیمانی پر می‌شود. سیستمهایی که با در نظر گرفتن پوشش برای پایه‌های بتنی نصب گردیدند، در کنترل خوردگی پایه‌های پلها در قسمتهای لکه‌شده و نواحی تحت جزر و مد موفق عمل کرده‌اند. این پوشش‌ها مزیت افزوده‌ای دارند که همانا عملکرد آنها بعنوان عایق الکتریکی است و در نتیجه مانع برقراری جریان الکتریکی از آب دریا به فولاد مستغرق در آب می‌شوند [۵]. از آنجاکه آندهای تیتانیومی کاتالیز شده دارای سرعت تحلیل بسیار پایین و عمر مورد انتظار طولانی (به عبارت دیگر بیش از ۷۵ سال) می‌باشند، بنابراین با توجه به عملکردشان بطور کلی از نظر هزینه مقرون به صرفه‌اند.

#### ۶-۵- شبکه متشکل از نوارهای تیتانیومی که درون شیارهای ایجاد شده در سطح بتن قرار داده می‌شوند

این سیستم شامل استفاده از نوارهای تیتانیومی کاتالیز شده و یک دوغاب سیمانی بدون خاصیت جمع‌شدگی (بعنوان ماده پرکننده درزها) می‌باشد. پهنای این نوارها معمولاً ۱۳ و ۱۹ میلیمتر است. فاصله شیارها از یکدیگر به تراکم فولاد بستگی دارد، اما معمولاً بین ۲۰۰ الی ۴۰۰ میلیمتر می‌باشد. میله‌های تیتانیومی پخش‌کننده جریان، پیوستگی بین تسمه‌ها را فراهم کرده و در جهت عرضی با استفاده از خال جوش به شبکه نوار متصل می‌شوند. این سیستم بویژه برای آن دسته از سازه‌های بتنی که نمی‌توانند بار مرده اضافی ناشی از یک لایه روکش بتنی را تحمل کنند، و یا هنگامی که برای استفاده از شبکه آند تیتانیومی روکش‌دار شوند، خوب چسبیدن لایه روکش ایجاد شده بر روی شبکه مسأله‌ای نگران‌کننده محسوب می‌شود، مناسب می‌باشد. برای استفاده از این سیستم باید آرماتورهای داخل بتن پوشش کافی داشته باشند، در غیر این صورت لازم است محل آرماتورها را بوسیله یک ترمیم‌سنگ مشخص کرد تا در نهایت بتوان شیارها را در فواصل بین آنها تعبیه نمود. شکل‌های ۴ و ۵ نصب دو سیستم حفاظت کاتدی به روش ایجاد شیار را که در آنها از شبکه نوارهای تیتانیومی استفاده می‌شود، نشان می‌دهد.



شکل ۴: ایجاد شیار در سطح فوقانی یک بالکن آپارتمانی

شکل ۵: ایجاد شیار در سطح زیرین یک اسکله آبی

## ۶-۶- سیستم آندهای جدا از هم (غیر وابسته)

این سیستم یکی از اقتصادی‌ترین سیستمها برای حفاظت کاتدی در تیرها، پایه‌ها و ستونها می‌باشد. نصب این آندها نسبتاً ساده می‌باشد و به برشکاریهای گسترده یا استفاده از روکش‌های بتنی نیاز نیست. این آندهای مجزا معمولاً درون سوراخهای دریل‌شده که قطرشان ۲۰ تا ۲۵ میلیمتر است فرو برده شده و فضای خالی بین آند و سوراخ با دوغاب سیمانی بدون انقباض پر می‌شود. طول آندها و فاصله آنها از یکدیگر به تراکم فولاد موجود در بتن و الزامات مربوط به نوع سیستم حفاظت کاتدی بکار رفته بستگی دارد. سیستمهای متعددی قابل حصول می‌باشند؛ که هر کدام شامل یک شبکه از نوارهای تیتانیومی جدا از هم، آندهای سرامیکی و رشته‌سیمهای تیتانیومی آبکاری‌شده با پلاتین به همراه یک ماده پرکننده درز غنی‌شده با کربن‌اند. چگالی جریان در مرز بین آند و بتن می‌بایست به ۲۲۰ میلی‌آمپر بر متر مربع محدود شود؛ چرا که در غیر اینصورت ممکن است فساد خمیر سیمان را در این منطقه به همراه داشته باشد.

## ۶-۷- تیتانیوم تحت حرارت اسپری‌شده

استفاده از این آندها جهت حفاظت کاتدی بتن‌های مسلح، بر روی چندین سازه مورد مطالعه بطور آزمایشی انجام شده است. نصب این سیستم برای اولین بار در سال ۱۹۹۴ میلادی بر روی پل Depoe Bay در ایالت Oregon آمریکا صورت پذیرفت. نتایج حاصل از نمونه‌های مورد آزمایش تا به امروز حاکی از سطوح بازدهی نسبتاً پایین این سیستمهاست که فعلاً در حال دستیابی به معیارهای مربوط به حفاظت کاتدی فولاد موجود در بتن می‌باشند. افشاندن تیتانیوم به وسیله ایجاد قوس الکتریکی در اجرا قدری مشکل‌تر از افشاندن فلز روی با استفاده از قوس الکتریکی می‌باشد؛ و این به جهت سختی رشته‌سیمها و کارکردهای بعدی نوکهای افشانه است. همچنین تیتانیوم نسبتاً فاقد قدرت واکنش شیمیایی در محیط می‌باشد و هیچ اثرات زیست‌محیطی ناشی از استفاده از این نوع سیستم تاکنون دیده نشده است. از نظر تئوری طول عمر مورد انتظار این آندها بسیار زیاد می‌باشد (بعبارتی بیشتر از ۱۰۰ سال) و ممکن است که در صورت نیاز مجدداً سطح تیتانیومی به کاتالیزور مایع آغشته شود.

## ۶-۸- آندهای چدنی و آند تیتانیومی که با مخلوطی از اکسید فلزات روکش داده شده است

سیستمهای مبتنی بر اعمال جریان الکتریکی که از این نوع آندها استفاده می‌کنند، جهت حفاظت کاتدی نواحی تحت جزر و مد سازه‌های بتنی و همچنین قسمت‌های همواره مستغرق این سازه‌ها که در زیر میانگین سطح آب پایین (سطح آب در هنگام جزر) واقع هستند، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این آندها، هم بصورت لوله‌ای شکل و هم میله‌ای بکار می‌روند. آنها بطور منفرد در گل و لای یا مخصوصاً در محیطهای شناوری که به این منظور احداث شده‌اند، جهت توزیع و پخش جریان الکتریکی گرفته‌شده از آب به آرماتورهای موجود در بتن، کار گذاشته می‌شوند. کابل‌های قوی که از طریق این آندها تغذیه می‌شوند، جریان الکتریکی را از میان گل و لای انتقال داده و به دستگاه یکسوکنده جریان هدایت می‌کنند.

## ۷- سیستمهای حفاظت کاتدی مبتنی بر قربانی شدن آند

### ۷-۱- ذرات فلز روی پاشیده شده با استفاده از قوس الکتریکی (در موقعیت آند قربانی‌شونده)

نزدیک به نیمی از این سیستمها در محیطهای گرم دریایی فلوریدای جنوبی بکار رفته‌اند. اداره کل حمل و نقل ایالت فلوریدا از فلز روی تحت حرارت پاشیده شده به عنوان یک آند قربانی‌شونده در قسمت‌های لکه‌دار و نواحی دارای شرایط ویژه سازه‌های دریایی استفاده کرده است [۶]. در نواحی‌ای که بتن آسیب‌دیده برداشته شده است، فلز روی مستقیماً به فولاد تمیزشده و در مجاورت سطح بتن پاشیده می‌شود. با این وجود، نمونه‌های کارگاهی و مطالعات آزمایشگاهی نشان داده است که عملکرد فلز روی خالص بعنوان یک آند قربانی‌شونده، به شدت تحت تأثیر حضور رطوبت در مرز بین آند و بتن است [۷]. در قسمت‌های بالای نواحی لکه‌شده که بتن نسبتاً خشک می‌باشد، جریان خروجی از فلز روی با گذشت زمان و به علت خاصیت ضد خوردگی لایه اکسید روی، شدیداً کاهش خواهد یافت. این حالت می‌تواند موجب تأمین‌نشدن جریان کافی برای حفاظت کاتدی فولاد مسلح‌کننده شود.

## ۷-۲- ذرات آلیاژ فلزات آلومینیوم، روی و ایندیوم که با استفاده از قوس الکتریکی پاشیده شده‌اند

براساس پژوهشی که با سفارش اداره فدرال بزرگراه‌های ایالات متحده به عمل آمد، آلیاژ جدیدی به عنوان یک آند قربانی شونده جهت حفاظت کاتدی بتن، تولید شده است. این آند شامل یک سیم از جنس آلیاژ فلزات آلومینیوم، روی و ایندیوم می‌باشد که با تبدیل به ذرات بسیار ریز تحت اثر حرارت، بر روی بتن پاشیده می‌شود (مشابه با فلز روی). نتایج حاصل از نمونه‌های کارگاهی و مطالعات آزمایشگاهی بسیار امیدوارکننده بوده و در مقایسه با فلز روی خالص، افزایش چشمگیری در جریان خروجی مشاهده شده است [۸]. این افزایش راندمان به عامل فعال‌کننده مربوط به فلز ایندیوم که کاهش اثر ضد خوردگی آند را در پی دارد، وابسته است. این آندها امروزه به شکل سیمهای مغزدار تولید می‌شوند. روکش بیرونی آنها از جنس آلومینیوم بوده و هسته میانی از پودر مخلوط فلزات روی و ایندیوم پر شده است. شکل ۶، بکاربردن سیستم آلیاژ قربانی شونده آلومینیوم - روی - ایندیوم را بر روی پایه پلی واقع در امتداد ساحل خلیج تگزاس نشان می‌دهد.



شکل ۶: اعمال سیستم آلیاژ قربانی شونده آلومینیوم - روی - ایندیوم بر روی پایه پلی واقع در امتداد ساحل خلیج تگزاس

## ۷-۳- آند چسبنده از جنس فلز روی

شامل یک ورق روی به ضخامت ۰/۲۵ میلیمتر می‌باشد که در طرف متصل شونده آن ژل چسبنده هیدروژن‌دار (که دارای خاصیت رسانایی یونی می‌باشد) قرار دارد. هیچ تجهیزات ویژه یا مهارت‌های مهندسی برای نصب این آند نیاز نیست. یک آستر به آسانی از روی ژل برداشته می‌شود و ورق مذکور با فشار به سطح بتن متصل می‌گردد. به این منظور سطح بتن باید نسبتاً صاف و هموار بوده و تمیز باشد. لبه‌های ورق پس از نصب باید برای جلوگیری از ورود رطوبت با بتونه سیلیسیومی آب‌بندی شوند. این سیستم حفاظت کاتدی در طرح‌های زیرسازی پلهای متعدد و بالکن‌های آپارتمانی واقع در امتداد ساحل فلوریدا بکار رفته است.

## ۷-۴- پوشش یکپارچه برای پایه‌های بتنی با استفاده از شبکه فلز روی

این سیستم جهت حفاظت کاتدی قسمتهای تحت جزر و مد و لکه‌شده پایه‌های بتنی پلها استفاده می‌شود؛ که مشتمل است بر پوششهای فایبرگلاس چفت و بست‌شده به یکدیگر همراه با شبکه گسترده‌ای از جنس فلز روی که به وجه داخلی دستگاه پوشش‌دهنده متصل شده است. فضای خالی حلقوی شکل میان پوشش و پایه بتنی با یک ملات رقیق (دوغاب) سیمانی پر می‌شود. از آنجا که این سیستم بصورت پیش‌ساخته می‌باشد، بنابراین نصب آن کاملاً ساده است.

## ۷-۵- آندهای متشکل از روی یا آلومینیوم متراکم

تعداد زیادی از این نوع آندها جهت حفاظت کاتدی نواحی تحت جزر و مد سازه‌های بتنی و همچنین قسمتهای همواره مستغرق این سازه‌ها که در زیر میانگین سطح آب پایین (سطح آب در هنگام جزر) واقع هستند، با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این آندها شامل روی یا آلومینیوم ریخته‌گری شده (متراکم) می‌باشند که در مجاورت پایه‌های بتنی در زیر آب قرار داده می‌شوند.

## ۸- خلاصه و نتیجه‌گیری

جهت انتخاب سیستم حفاظت کاتدی مناسب برای یک سازه بتنی واقع در یک محیط دریایی، کارفرمایان و مهندسان مشاور باید تفاوت بین انواع مختلف آندها و زمان و مکان استفاده از آنها را بشناسند. در نظر گرفتن عوامل گوناگون از

قبیل روشهای نصب، راندمان، نیازمندیهای طرح، مسائل زیست‌محیطی، تغییرات ناشی از جزر و مد، نظارت، نگهداری و زیبایی ظاهری، اهمیت دارند.

سیستم‌های مشخصی در محیطهایی که سازه مستقیماً در تماس با آب دریا می‌باشد بخوبی عمل می‌کنند، درحالی‌که سایر سیستم‌ها بیشتر برای محیطهایی که سازه چنین وضعیتی ندارد مناسب‌ترند. برای مثال، روکش‌های رسانا ممکن است از لحاظ چسبیدن به بتن در نواحی لکه‌شده و تحت جزر و مد پایه‌های بتنی مشکل داشته باشند و لذا برای چنین کاربردهایی توصیه نمی‌شوند. سیستم‌های با عملکرد ایجاد شیار در سطح بتن شاید در ارتباط با پوشش بتن محدودیت داشته باشند، اما محدودیتهای آستانه‌ای ندارند. سیستم‌های شامل شبکه تیتانیومی همراه با اندودهای بتنی نیازمند آماده‌سازی مناسب سطوح جهت اطمینان از چسبیدن اندود می‌باشند. آندهای تیتانیومی برای مقادیر بالای چگالی جریان مناسب هستند، و همینطور در مواردی که طول عمر بیشتری برای سیستم حفاظت کاتدی مورد نیاز باشد. همانگونه که قبلاً بیان شد، اگر در سازه‌های خاصی نتوان از سیستم‌های با عملکرد آند قربانی‌شونده استفاده کرد، در عوض سیستم‌های مبتنی بر جریان‌دهی می‌توانند برای مرتفع کردن کمبود جریان الکتریکی مورد نیاز جهت حفاظت کاتدی در این سازه‌ها بکار برده شوند.

فلز روی در مقادیر کافی به‌عنوان یک ماده سمی برای حیات آبریان شناخته شده است، بنابراین سیستم‌های مبتنی بر عملکرد فلز روی تحت حرارت پاشیده‌شده، نیاز به جایگاههایی برای نگهداری گرد این فلز و مهار واکنش‌های آن دارند. آماده‌سازی سطوح، خشک‌بودن بتن و مهارت شخص اجراکننده عوامل مهمی هستند که برای خوب چسبیده شدن روکش‌های ایجاد شده با ذرات تحت حرارت پاشیده‌شده باید مورد توجه قرارگیرند. همچنین، سیستم‌های در سطح بکار رونده در مقایسه با سیستم‌های با پوشش احاطه‌شونده، از نظر اجرا در سطوح قائم و سقفی آسانتر می‌باشند. با این حال برای سیستم‌های در سطح بکار رونده معمولاً عمر کوتاهتری انتظار می‌رود. همه این نکات باید هنگام انتخاب یک سیستم خاص در یک محیط دریایی مورد ملاحظه قرارگیرند.

## ۹- مراجع

- [1] Andrade, C., Alonso, C. and Sarria, J (1997)  
*Influence of Relative Humidity and Temperature on the On-Site Corrosion Rebars*  
Fourth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Sydney, Australia.
- [2] Kessler, R.J. and Powers, R.G. (1994)  
*Use of Marine Substructure Cathodic Protection in Florida, Past and Present*  
Paper No. 910727, Transportation Research Board, 70<sup>th</sup> Annual Meeting, Washington.
- [3] Apostolos, J.A., Parks, D.M., Carello, R.A. (1987)  
*Cathodic Protection of Reinforced Concrete Using Metallized Zinc*  
Paper No. 137, NACE Corrosion/87.
- [4] Covino, B.S., Bullard, S.J., Holcomb, G.R., Cramer, S.D., McGill, G.E., Cryer, C.B. (1996)  
*Bond Strength of Electrochemically-Aged Arc-Sprayed Zinc Coatings on Concrete*  
Paper No. 308, NACE Corrosion/96.
- [5] Martin, B.L., Arase, K. and Kawamata, K. (1994)  
*Cathodic Protection of Structures Containing Prestressed Steel in USA*  
Japan Concrete Institute, Tokyo.
- [6] Kessler, R.J., Powers, R.G. and Lasa, I.R. (1990)  
*Zinc Metallizing for Galvanic Cathodic Protection of Steel Reinforced Concrete in a Marine Environment*  
Paper No. 324, NACE Corrosion/90.
- [7] Funahashi, M. and Young, W.T. (1995)  
*Development of New Sacrificial Anode Reinforced and Prestressed Concrete Structures*  
Second CANMET/ACI International Symposium on Advances in Concrete Technology, Las Vegas.
- [8] Funahashi, M., Young, W.T., (1998)  
*Field Evaluation of a New Aluminum Alloy as a Sacrificial Anode for Steel Embedded in Concrete*  
FHWA, Publication No. FHWA-RD-98-058.