

پوشش‌های هوشمند؛ فرصتی نوین برای حفاظت از تأسیسات صنعت نفت و گاز

هادی ابراهیم فتح‌آبادی*، محمد قربانی دانشگاه صنعتی شریف ■ ناهید پیرهادی تواندشتی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

چکیده

نیاز به پوششی که بتواند حفاظت همزمان پسیو و اکتیو را فراهم کند صنعت را به سمت استفاده از پوشش‌های هوشمند سوق داده است. پوشش هوشمند به پوششی گفته می‌شود که می‌تواند تولید محیط خورنده را احساس کرده، به‌طور خودبه‌خودی و بر حسب نیاز به وقوع خوردگی پاسخ دهد. این مقاله انواع ممانعت‌کننده‌های قابل‌استفاده برای فولاد، اهمیت کپسوله‌کردن ممانعت‌کننده‌ها در پوشش زمینه، اهمیت سازگاری نگهدارنده‌های دوپ‌شده با پوشش زمینه، مکانیزم‌های تحریک برای خودرساناسازی ممانعت‌کننده و برخی از فعالیت‌های شرکت‌های بین‌المللی معتبر نفت و گاز در خصوص استفاده از پوشش‌های هوشمند را مرور کرده است. دستیابی به پوششی هوشمند و بهینه علاوه بر مزایای زیست‌محیطی، به‌طرز چشمگیری هزینه‌های تعمیراتی تأسیسات صنایع را کاهش داده و دستاوردی شگرف برای صنعت پوشش‌دهی خواهد بود.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۷/۱۰/۲۹

تاریخ ارسال به داور: ۹۷/۱۱/۰۲

تاریخ پذیرش داور: ۹۷/۱۱/۲۴

واژگان کلیدی:

ممانعت‌کننده‌ی خوردگی، کپسوله‌کردن، پوشش هوشمند، فولاد

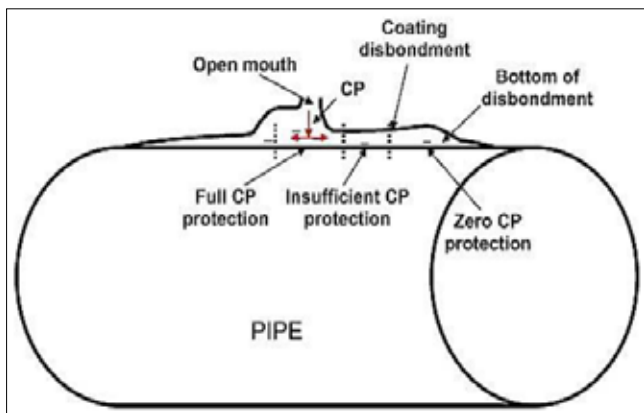
مقدمه

بسیاری از زیرساخت‌های صنعتی به‌ویژه در صنعت نفت و گاز همانند خطوط لوله‌ی انتقال نفت و گاز، سکوهای نفتی و گازی، اسکله‌ها، مخازن ذخیره‌سازی و ... عموماً از جنس فلز (به‌ویژه فولاد) ساخته می‌شوند. خوردگی از مکانیزم‌های اصلی حوادث صنعت نفت و گاز است که می‌تواند باعث نشستی، آتش و انفجار گردد و خسارات اقتصادی و زیست‌محیطی زیادی به‌همراه داشته باشد. هزینه‌ی سالیانه‌ی خوردگی در صنعت نفت و گاز حدود ۱/۳۷ میلیارد دلار تخمین زده شده است. بنابراین حفاظت در برابر خوردگی از مسائل بسیار مهم جهت مدیریت هزینه‌های تأسیسات و نیز تضمین تولید پایدار است [۱].

دو روش کلی اکتیو و پسیو برای حفاظت در برابر خوردگی به‌کار می‌روند. روش پسیو، حفاظت در مقابل خوردگی با به‌کارگیری یک لایه سد جلوگیری‌کننده برای تماس یک ماده با محیط‌های خورنده است. وقتی سدی اصلی (مانند پوشش) آسیب می‌بیند و عوامل خورنده در تماس با ماده‌ی زمینه قرار می‌گیرند روش حفاظتی اکتیو سرعت خوردگی را کاهش می‌دهد.

کاربرد پوشش‌های محافظ، متداول‌ترین روش حفاظتی پسیو برای حفاظت از فلزات در مقابل خوردگی است. پوشش‌های مورد استفاده بسیار متنوعند و به انواع پوشش‌های فلزی، معدنی و آلی تقسیم می‌شوند. امروزه پوشش‌های آلی به‌گسترده‌تری در صنایع مختلف، به‌ویژه نفت و گاز به‌کار می‌روند. مثلاً پوشش‌های پلیمری (به‌عنوان روش حفاظتی پسیو) در کنار حفاظت کاتدی (به‌عنوان روش حفاظتی اکتیو)، راهکاری مناسب برای حفاظت خطوط لوله‌ی انتقال در برابر خوردگی است (شکل-۱). اساس این استراتژی کاملاً مشخص است؛ پوشش خوردگی را کاهش می‌دهد.

کاربند پوشش‌های محافظ، متداول‌ترین روش حفاظتی پسیو برای حفاظت از فلزات در مقابل خوردگی است. پوشش‌های مورد استفاده بسیار متنوعند و به انواع پوشش‌های فلزی، معدنی و آلی تقسیم می‌شوند. امروزه پوشش‌های آلی به‌گسترده‌تری در صنایع مختلف، به‌ویژه نفت و گاز به‌کار می‌روند. مثلاً پوشش‌های پلیمری (به‌عنوان روش حفاظتی پسیو) در کنار حفاظت کاتدی (به‌عنوان روش حفاظتی اکتیو)، راهکاری مناسب برای حفاظت خطوط لوله‌ی انتقال در برابر خوردگی است (شکل-۱). اساس این استراتژی کاملاً مشخص است؛ پوشش خوردگی را کاهش می‌دهد.



شکل ۱ | اثر حفاظت کاتدی در زیر پوشش جدا شده [۱]

* نویسنده‌ی عهد‌دار مکاتبات (hadifathabadi@yahoo.com)

البته این امر هنگامی اتفاق خواهد افتاد که عیب پوشش یا پوسیدگی پوشش و محیطی خوردنده روی فلز وجود داشته باشد [۲].

۱- ممانعت‌کننده‌های قابل استفاده در پوشش‌های هوشمند

برای فولادها طیف گسترده‌ای از ترکیبات آلی به‌عنوان ممانعت‌کننده‌ی خوردگی استفاده می‌شود که با توجه به محیط موردنظر متفاوت هستند. الکل‌های استیلنیک، آلدئیدهای آروماتیک، فنون‌های آلکنیل، آمین‌ها، آمیدها، ایمیدوزالین‌ها، نیتریل‌ها، تری‌آزول‌ها، پیریدین و مشتقات و نمک‌های آن، مشتقات کوئینولین، مشتقات تیواوره و ... از این نمونه ترکیبات هستند. بسیاری از ممانعت‌کننده‌های خوردگی معدنی نیز برای فولادها کاربرد فراوان دارند که می‌توان به کرومات‌ها، فسفات‌ها، نیترات‌ها، کربنات‌ها و ... اشاره کرد.

بسیاری از ممانعت‌کننده‌های مؤثر خوردگی مورد استفاده در صنعت نفت و گاز، مواد آلی و حاوی اکسیژن، نیتروژن، سولفور و فسفر هستند که در کنار حلقه‌های آروماتیک، جذب سطحی و تشکیل لایه روی سطح را تسهیل می‌کنند. با هدف برآورده کردن برخی نیازهای خاص در موقعیت‌های مختلف، فن آوری کپسوله کردن برای ممانعت‌کننده‌های خوردگی جهت کنترل نرخ رهاسازی توسعه یافته است.

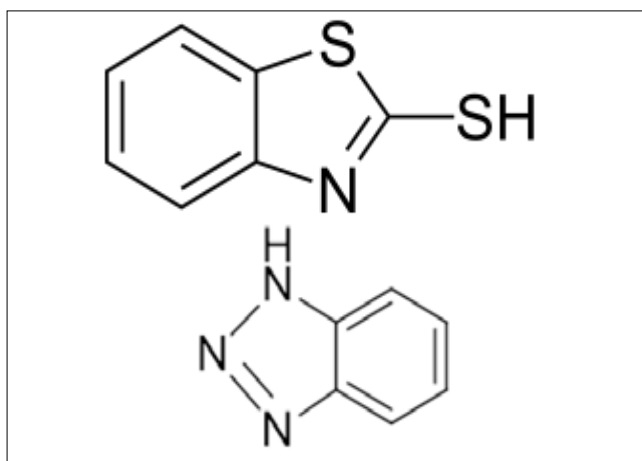
بنزوتتری‌آزول (BTA) و مرکاپتوبنزوتیازول (MBT) که حاوی مولکول‌های آلی بر پایه‌ی نیتروژن هستند برای ممانعت‌کننده‌های خوردگی عالی هستند و در پوشش‌های هوشمند به‌صورت کپسوله استفاده می‌شوند. به‌طور کلی آزول‌ها و مشتقات آنها از مؤثرترین و متداول‌ترین ممانعت‌کننده‌های قابل استفاده برای حفاظت از خوردگی فولادها، مس و آلیاژهای آن هستند [۳].

ممانعت‌کننده‌های خوردگی بر اساس نیتروژن، قادر به جذب روی سطح فولاد با تشکیل لایه‌ای محافظ توسط مولکول‌های ممانعت‌کننده شامل اتم‌های الکترون‌گاتیوی مانند نیتروژن، پیوندهای اشباع نشده (مانند پیوندهای دوگانه یا سه‌گانه) و سیستم‌های صفحه‌ای درهم‌آمیخته شامل حلقه آروماتیک هستند [۴].

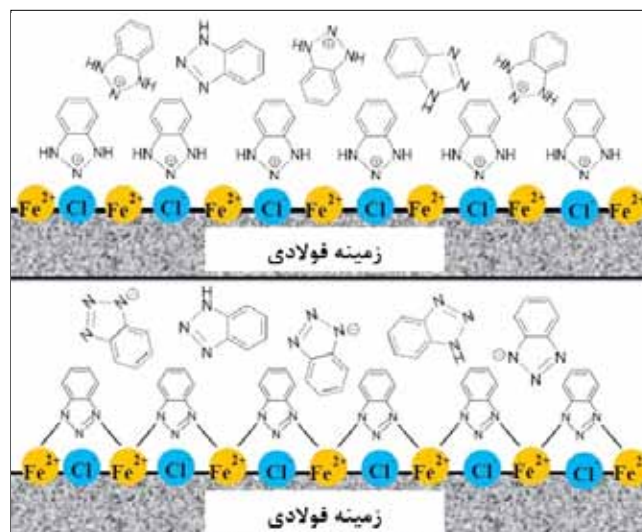
در شکل‌های ۲ و ۳ ساختار مولکولی و عملکرد MBT و BTA که می‌توانند به‌عنوان ممانعت‌کننده‌های آندی، جذب سطحی فلز شوند و مقاومت در برابر خوردگی را بهبود دهند نشان داده شده است.

کیانگ و همکارانش [۵] نشان دادند اگر پوشش مستقیماً با ممانعت‌کننده‌های خوردگی مخلوط شود مولکول‌های BTA به‌راحتی در محیط آبی حل خواهند شد و میکروحفره‌هایی در پوشش به‌وجود خواهد آمد. در نگهدارنده‌های میکرو یا نانو که نسبت به پوشش زمینه خنثی هستند کپسوله کردن ممانعت‌کننده‌ی خوردگی روشی

از دیگر روش‌های حفاظت اکتیو، استفاده از ممانعت‌کننده‌های خوردگی در محیط خوردنده است. قرار دادن ممانعت‌کننده‌ی خوردگی در پوشش‌ها به‌عنوان راه‌حلی جهت ترکیب هر دو روش اکتیو و پسیو برای مقابله با خوردگی مدنظر قرار گرفته تا ممانعت‌کننده‌ها بتوانند به‌صورت هوشمند در پاسخ به آسیب پوشش، رها شوند. بنابراین در ناحیه‌ی آسیب‌دیده، محیطی محافظ ایجاد شده که از خوردگی فلز زمینه جلوگیری کرده یا آنرا کاهش می‌دهد. به‌عبارت دیگر، پوشش‌های هوشمند به سیستم‌های پوششی گفته می‌شود که با خواص "حس کردن خوردگی" و "آزاد کردن محتویات درون خود" نه تنها سدی در مقابل محیط ایجاد می‌کنند بلکه ممانعت‌کننده‌ی خوردگی که از قبل در پوشش قرار داده شده (بارگذاری شده) را از خود آزاد می‌نمایند.



شکل ۲ | ساختار مولکولی ممانعت‌کننده‌ی خوردگی مرکاپتوبنزوتیازول (MBT) (شکل بالا) و بنزوتتری‌آزول (BTA) (شکل پایین) [۴]



شکل ۳ | شماتیک جذب سطحی BTA روی سطح فولاد، در محلول اسیدی (شکل بالا) و در محیط بازی (شکل پایین) [۴]

علاوه بر موضوع کپسوله کردن، سازگاری پوشش زمینه با کپسول‌های نگهدارنده‌ی ممانعت‌کننده نیز در کارایی یک پوشش هوشمند بسیار مؤثر است.

۳- سازگاری پوشش زمینه با نگهدارنده‌های میکرو/نانویی دوپ شده

یکی از جنبه‌های مهم در پوشش‌های هوشمند، سازگاری نگهدارنده‌های دوپ شده با پوشش زمینه است. اثر سازگاری با نگهدارنده‌های نانویی استفاده شده برای کپسوله کردن ممانعت‌کننده (عامل اکتیو) بر خواص سدکنندگی لایه‌ی پلیمری می‌تواند منفی باشد و چسبندگی آنرا به فلز کاهش دهد. شکل ۴- سه حالت مختلف این سازگاری را نشان می‌دهد. در حالت سازگاری کم، وقتی نگهدارنده‌ی نانویی اضافه می‌شود تمامی کارایی سیستم پوشش کاهش می‌یابد. این کاهش در خواص چسبندگی و سدکنندگی به‌راحتی با اثر حفاظتی اکتیو ممانعت‌کننده جبران نخواهد شد. حالت سازگاری محدود زمانی اتفاق می‌افتد که سیستم حفاظتی یا جزء اکتیو، لایه‌ی پسیوی در محدوده‌ی مشخصی از غلظت تشکیل می‌دهد. سازگاری زیاد می‌تواند در خصوص اثر هم‌افزایی نگهدارنده‌های نانویی با پوشش پلیمری پسیو اطمینان داده و کارایی را به‌شدت افزایش دهد.

اضافه کردن نگهدارنده‌ها ممکن است به‌علت اندازه و ناسازگاری آنها با زمینه، خواص سدکنندگی پوشش را کاهش دهد. بنابراین اندازه‌ی نگهدارنده‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. بوریسووا و همکارانش اثر نگهدارنده‌های نانویی سیلیکای مزوپوروس با اندازه‌های مختلف (۸۰ و ۷۰۰ نانومتر) با MBT (۲-مرکاپتوبنزوتری‌آزول) را آزمایش کردند و دریافتند که نگهدارنده‌های بزرگ‌تر، کرنش و عیوب بیشتری در زمینه‌ی پوشش ایجاد کرده و خاصیت سدکنندگی آن را کاهش می‌دهند؛ در حالی که افزودن کپسول‌های کوچک‌تر اثری بر خواص سدکنندگی پوشش‌ها نخواهد داشت [۹].

مفید است که می‌توان ممانعت‌کننده را از قبل در نگهدارنده‌های نانو قرار داد. این پوشش می‌تواند محیط‌های خورنده را احساس کرده و خود، ممانعت‌کننده را رها کرده و از خوردگی ممانعت به‌عمل آورد. کپسوله کردن ممانعت‌کننده عامل بسیار مهمی در کنترل نرخ رهاسازی پوشش هوشمند و افزایش کارایی آنست.

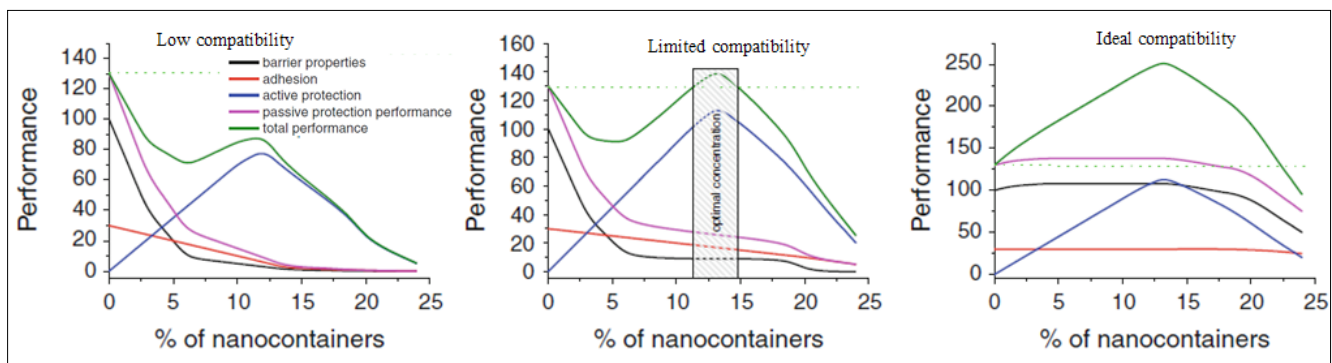
۲- اهمیت کپسوله کردن ممانعت‌کننده در پوشش‌های هوشمند

بوریسووا و همکارانش [۶] نانوذرات سیلیکای مزوپوروس حاوی BTA با پراکنش یکسان را بررسی کردند. نتایج نشان داد که دوپ کردن مناسب نگهدارنده‌های نانویی حاوی BTA، مقاومت آلیاژ آلومینیوم AA۲۰۲۴ در مقابل خوردگی را در یک محلول ۰/۱M NaCl با به‌کار بردن سیستم شامل یک لایه‌ی $\text{SiO}_x/\text{ZrO}_x$ حاوی سیلیکای مزوپوروس محتوی BTA بهبود داد. اگرچه کپسوله‌نکردن، مانع از قابلیت کنترل رهاسازی BTA شد.

هولامبی و همکارانش [۷] نانو ذرات سیلیکای مزوپوروس حاوی BTA را در حالتی که جهت بهبود پخش شدن در زمینه‌ی پوششی بر پایه‌ی روغن، سطح خارجی با گروه‌های اکتیل تغییر داده شده بود را بررسی کردند.

پوشش هیبریدی حاصل روی سطح فولاد گالوانیزه اعمال و خواص خوردگی آن بررسی شد. نتایج نشان داد وقتی BTA مستقیماً به زمینه‌ی پوشش اضافه می‌شود در مقایسه با حالت کپسوله شدن کارایی بسیار کمتر است؛ به‌خصوص از لحاظ کنترل خودرهاسازی. این موضوع حتی با ده برابر کردن غلظت BTA نیز جبران نمی‌شود.

فالكون و همکارانش [۸] نانوذرات مزوپوروس با دودکیلامین و رهاسازی ممانعت‌کننده را به صورت تابعی از pH بررسی کردند که مشخص شد سریع‌ترین رهاسازی در pH=۲ در مقایسه با pH=۶/۲ و pH=۹ اتفاق افتاد. در این حالت نیز کپسوله نکردن ممانعت‌کننده، علت عدم کنترل مناسب رهاسازی تشخیص داده شد.



شکل ۴ | اثر سازگاری نگهدارنده‌های نانویی دوپ‌شده با زمینه‌ی پلیمری بر کارایی سیستم حفاظتی پوشش

۴- مکانیزم‌های تحریک برای رهاسازی ممانعت کننده

pH، دما، نور، غلظت یون مهاجم، پتانسیل رد اکس، وجود آنزیم خاص و ... برای تحریک خودرهاسازی ممانعت کننده از پوشش هوشمند بررسی شده‌اند. شاید در فرآیندهای خوردگی مناسب‌ترین تحریک کننده pH باشد [۱۰ و ۱۱]؛ زیرا در آغاز این فرآیند، pH به صورت موضعی در سایت‌های آندی و کاتدی تغییر می‌کند. پوشش‌های هوشمند به نحوی ساخته می‌شوند که در شرایط عادی هیچ‌گونه رهاسازی ممانعت کننده از پوشش وجود نخواهد داشت.

آندریوا و همکارانش [۱۲] ممانعت کننده‌های خوردگی کپسوله شده‌ای در نگهدارنده‌های نانویی پلی‌الکترولیت چندلایه ساختند که در آنها هنگام پاسخ به تغییرات pH محلول، برای کاهش سریع اکتیویته‌ی آندی فلزات، ممانعت کننده‌ی خوردگی آزاد می‌شود. ممانعت کننده‌های خوردگی مانند BTA قرار گرفته بین لایه‌های پلی‌الکترولیت باردار مثبت روی یک حامل غیرآلی قرار گرفتند.

مکانیزم این روش، استفاده از وابستگی به نفوذپذیری پوسته‌های پلی‌الکترولیت به pH است که رها شدن ممانعت کننده‌های خوردگی را امکان پذیر می‌کند. وقتی خوردگی در حال آغاز است یا تازه شروع شده این پوشش از طریق احساس تغییرات pH اطراف محل خوردگی، ممانعت کننده‌ها را رها می‌کند. در این روش ذرات باردار شده‌ی منفی اول با یک لایه‌ی باردار مثبت الکترولیت پوشش داده می‌شوند و سپس با لایه‌ی باردار مثبتی از BTA به عنوان ممانعت کننده‌ی خوردگی پوشش داده خواهد شد. شی و همکارانش [۱۳] نشان دادند پلی‌الکترولیت‌ها به تغییرات pH حساسند و به باز و بسته شدن دیواره (متورم و ضخیم شدن یا منقبض و نازک شدن دیواره) واکنش نشان می‌دهند. همچنین پلی‌الکترولیت‌ها یک اکتیویته‌ی بافر pH دارند و می‌توانند در محیط خوردنده مقادیر pH بین ۵-۷/۵ را در سطح فلز، پایدار کنند (شکل-۵). نحوه‌ی آزاد شدن ممانعت کننده‌ها از کپسول‌های دوپ شده در شکل-۶ نشان داده شده است.

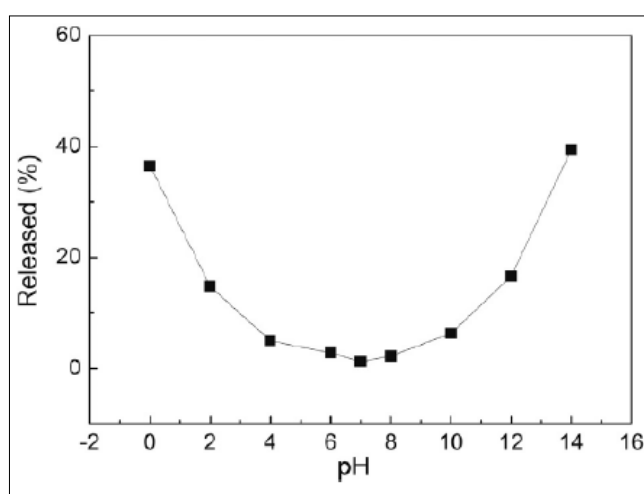
چن و فو کپسول‌های حاوی ممانعت کننده‌ای بر اساس مزوحفره‌های خالی کروی سیلیکا تهیه کردند. در ممانعت کننده‌های از قبیل ذخیره شده، BTA بر اساس تغییرات pH موضعی که به علت خوردگی فلزات رخ می‌دهد می‌تواند از کره‌های سیلیکا آزاد گردد [۱۴].

کوپک و همکارانش [۱۵] با رسوب دادن پلی‌الکترولیت در یک پوشش اپوکسی بر اساس آب، نانوکپسول‌های حاوی ممانعت کننده‌ای تهیه کردند که به تغییرات pH حساس بودند.

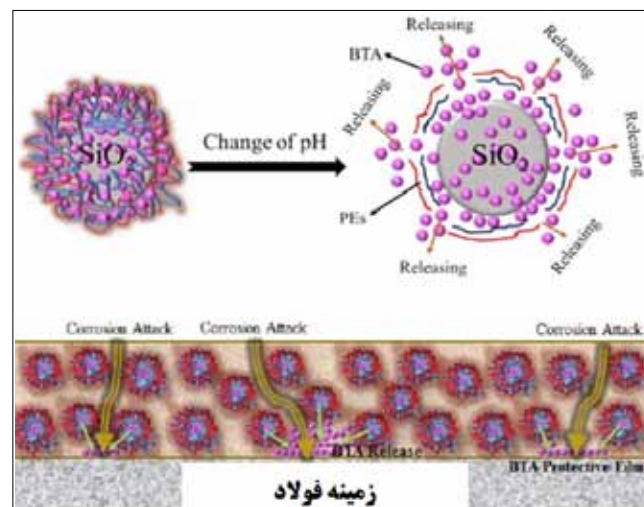
در حالی که پوشش‌های هوشمند بر اساس کپسوله کردن ممانعت کننده‌های خوردگی در نگهدارنده‌های میکرو یا نانو به عنوان پوششی مطمئن برای پیشگیری از خوردگی پیشنهاد و آزمایش شده‌اند،

بسیاری از استراتژی‌های کپسوله کردن مطالعه یا استفاده شده‌اند؛ از جمله روش امولسیون کپسوله کردن در پلیمریزاسیون، روش خودمونتاژی پلی‌الکترولیت‌ها، فن آوری جذب اکسید متخلخل فلز و ... اساس این روش‌ها مشابه است؛ قرار دادن مولکول‌های ممانعت کننده در میکروکپسول‌ها یا نگهدارنده‌های نانویی و فرآیند رهاسازی که عمدتاً با نفوذ کنترل می‌شود. البته باید مکانیزم‌های تحریک برای رهاسازی مدنظر قرار گیرند.

طی مطالعه‌ی پوشش‌های هوشمند، عوامل مختلفی از جمله تغییرات



شکل ۵ | آزاد شدن BTA از میکروکپسول‌های PEI/PSS/Benzotriazole/PSS/PEI در محلول‌های آبی با pH های متفاوت [۱۳]

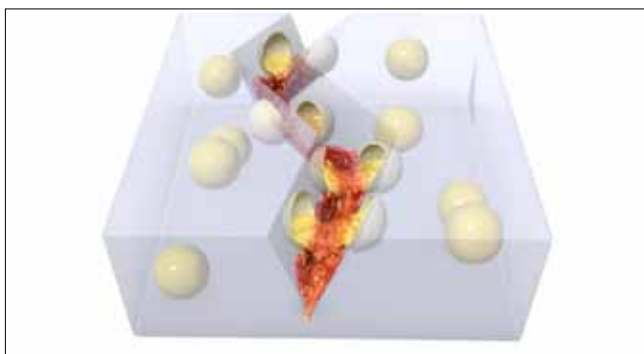


شکل ۶ | شکل بالا: تورم پلی‌الکترولیت‌ها در پاسخ به تغییرات pH و رهاسازی ممانعت کننده‌های BTA های کپسوله شده / شکل پایین: اساس حفاظت از خوردگی فولاد توسط پوشش هوشمند دوپ شده با نگهدارنده‌های نانویی دارای ممانعت کننده‌ی کپسوله شده [۱۳]

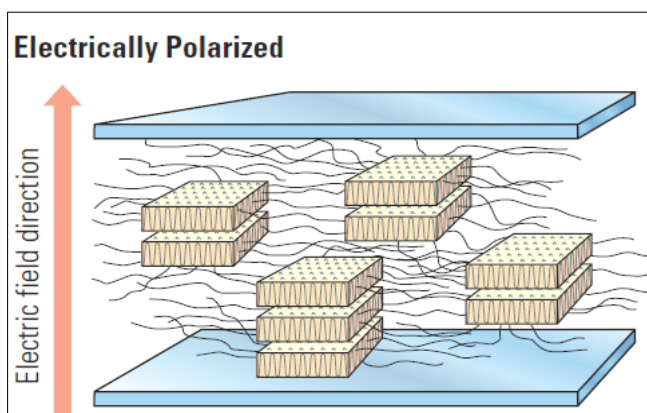
در کاربردی دیگر با افزودن عوامل متورم‌کننده به پلیمرها، این شرکت در پکرهای هوشمند در چاه‌های نفت و گاز از این فن‌آوری بهره برده است (شکل-۹).

این شرکت همچنین از پوشش‌های هوشمند خودترمیم‌شونده برای نشت‌بندی مخازن کمک گرفته است. پلیمرهای به‌کار رفته در پوشش داخلی این مخازن به‌نحوی است که در صورت ایجاد سوراخ در پوشش و هرگونه نشت نفت در تماس با لایه‌های زیرین پوشش، با پلیمریزه شدن پوشش، سوراخ، نشت‌بندی خواهد شد. در این حالت کاتالیست‌های موردنیاز برای پلیمریزاسیون در پوشش‌های مذکور دپوشده‌اند (شکل-۱۰) [۱۸].

از دیگر موارد استفاده‌ی این شرکت از پلیمرهای هوشمند، کاربرد آنها در سیستم سیمان پشت لوله‌های جداری برای پر کردن ترک‌های احتمالی در این سیستم است. پس این نوع سیمان می‌تواند در صورت وجود ترک یا نشستی سیال به پشت لوله‌ی جداری، متورم شده و مسیر



۷ میکروکپسول‌های دارای نشان‌دهنده‌های مرئی در محیط‌های تاریک یا زیر نور ماورا بنفش که در پوشش دپوشده‌اند و در آسیب‌های مکانیکی خودبه‌خود رها می‌شوند [۱۷]



۸ پوشش‌های پیزوالکتریک (پلی‌ونیل‌ایدن در فلوراید - PVDF) که قابلیت احساس فشار، شتاب و ضربه و ... را دارند و به‌عنوان سنسور استفاده می‌شوند [۱۸]

هیچ‌کدام از آنها در مقیاس صنعتی گسترش قابل توجهی نیافته‌اند. تا کنون اکثریت تحقیقات در آزمایشگاه انجام شده که زمینه‌ی میزبان پوشش‌ها، از انواع صنعتی مورد استفاده در صنعت نبوده است. علاوه بر این، فن‌آوری‌ها برای کپسوله‌کردن ممانعت‌کننده در نگهدارنده‌ها، مانند روش خلأ، بسیار پیچیده و غیرعملی بوده و در مقیاس صنعتی از لحاظ اقتصادی به‌صرفه نیستند. با وجود این چالش‌ها، فنگ و همکارانش [۱۶] از یک پوشش اپوکسی مورد استفاده در میدان به‌عنوان پوشش میزبان را به‌کار برده و سازگاری آن با کپسول‌های ممانعت‌کننده‌ی تهیه شده را بررسی کردند. نتیجه‌ی تحقیقات آنها نشان داد که دپوش کردن کپسول‌های نانو اثری بر خواص پوشش ندارد. این موضوع قبلاً نیز مورد توجه قرار گرفته بود و تلاش‌هایی برای توسعه‌ی یک پوشش هوشمند صنعتی انجام شده بود که با کپسوله‌کردن ممانعت‌کننده در نگهدارنده‌های نانویی که به‌طور یکنواخت در پوشش خط‌لوله‌ی مورد استفاده در میدان دپوشده باشد با خودآزادسازی ممانعت‌کننده‌های کپسوله‌شده، خوردگی را کنترل کند.

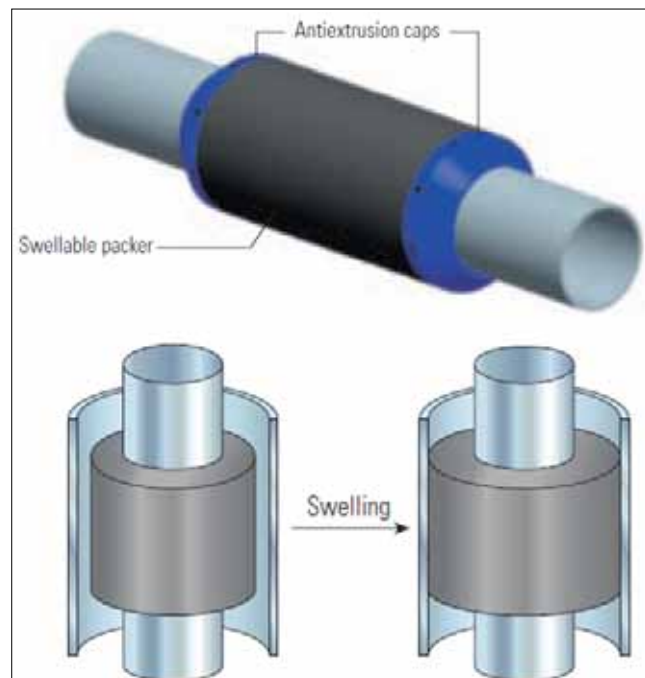
۵- برخی فعالیت‌های شرکت‌های فعال در صنعت نفت و گاز در خصوص پوشش‌های هوشمند

در سال‌های اخیر پوشش‌های هوشمند مورد توجه شرکت‌های معتبر بین‌المللی نفت و گاز قرار گرفته است. بریتیش پترولیوم (BP) بروز عیب در پوشش خطوط لوله، مخازن ذخیره و ... را به‌عنوان مشکلی طرح کرده که در بازرسی‌های فنی به‌راحتی قابل تشخیص نیستند و می‌توانند منشأ بسیاری از تخریب‌ها یا حوادث شوند. این شرکت با حمایت از تحقیقات دانشگاه ایلینویز در UIUC (مشاور BP در زمینه‌ی مواد پیشرفته) در مورد ساخت پوشش‌های هوشمند خودکنترل برای حل مشکلات مذکور تحقیقاتی انجام داده است. ناسی اسکاتس، رئیس تحقیقات UIUC عقیده دارد این تیم با دپوش کردن میکروکپسول‌هایی شامل عوامل نشان‌دهنده در هسته‌ی آنها، در یک پوشش پلیمری که در اثر آسیب مکانیکی محتویات هسته خارج شده و با ایجاد رنگ قرمز روشن، قابل‌رؤیت در محیط‌های تاریک (مانند داخل مخازن و ...) یا زیر نور ماورا بنفش به این موفقیت دست یافته است (شکل-۷) [۱۷]. او در ادامه افزود: پوشش‌های دارای مکانیزم خودترمیم‌شونده نیز در دست بررسی این شرکت قرار دارد.

شلمبرگر استفاده از مواد هوشمند به‌ویژه پوشش‌های هوشمند را مدنظر قرار داده و پوشش‌های پیزوالکتریک (پلی‌ونیل‌ایدن در فلوراید - PVDF) که قابلیت احساس فشار، شتاب و ضربه و ... را دارند به‌عنوان سنسور استفاده می‌کند (شکل-۸).

را نشت‌بندی کند [۱۸].

شرکت SINTEF از شرکت‌های تحقیق و توسعه در نروژ که فعالیت‌های تحقیقاتی زیادی نیز در صنعت انرژی و نفت و گاز این کشور انجام



شکل ۹ | پکرهای هوشمند قابل استفاده در چاه‌های نفت و گاز [۱۸]

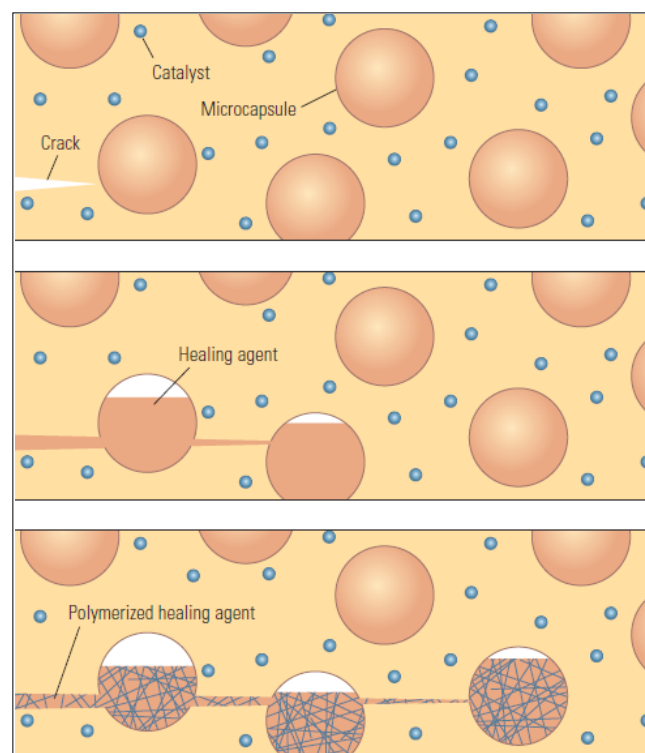
داده، در حال بررسی پوشش‌های هوشمند است. این شرکت کاربردهای متفاوتی از این پوشش‌ها را مدنظر قرار داده که شامل پوشش‌های داخلی کلاه‌های ایمنی، پوشش سلول‌های خورشیدی، شیشه‌های هوشمند و ... است [۱۹].

در ایالات متحده‌ی آمریکا تحقیقات وسیعی در زمینه‌ی انواع پوشش‌های هوشمند در حال انجام است. از پوشش‌هایی که قابلیت تغییر رنگ و استتار دارند و برای پوشش‌دهی تجهیزات نظامی به کار می‌روند تا پوشش‌های ضدسایش و ضدجلبک و خوردگی میکروبی که برای پوشش‌دهی بدنه‌ی کشتی‌ها و نفتکش‌ها کاربرد دارند. شکل-۱۱ نمایی از خوردگی‌های میکروبی روی بدنه‌ی نفتکش‌ها بر اثر چسبیدن جلبک‌ها را نشان می‌دهد. پوشش‌های هوشمند جدید ضدجلبک معمولاً ذرات نانورسی دارند که در صورت چسبیدن جلبک‌ها به سطح، رها شده و لایه‌ی پسیوی با اصطکاک بسیار کم روی سطح ایجاد می‌کنند. اصطکاک بسیار کم این لایه باعث جدایش جلبک‌ها از سطح می‌شود. سابق بر این پوشش‌های ضدجلبک باعث رهاسازی بایوسایدها در آب می‌شد که این موضوع تبعات زیست‌محیطی زیادی به‌همراه داشت. امروزه در پوشش‌های ضدجلبکی جدید این معضل مرتفع شده است. همچنین عمر خاصیت ضدجلبکی در پوشش‌های جدید چندین برابر افزایش یافته است. پوشش‌های ضدسایش نیز با قرار دادن به‌صورت پیگمنت یا دوپ کردن ذرات نانویی با مقاومت در مقابل سایش زیاد در زمینه‌ی پوشش تولید می‌شوند. سوسیک، استادیار دانشگاه آکرون از کسانی است که به‌همراه تیم تحقیقاتی خود در خصوص پوشش‌های هوشمند ضدخوردگی تحقیقات انجام می‌دهند [۲۰].

شرکت اوونیک در آلمان نیز برای پوشش بدنه‌ی کشتی‌ها به‌دنبال ساخت پوشش‌هایی هوشمند است که علاوه بر سازگاری زیست‌محیطی،



شکل ۱۱ | نمایی از خوردگی‌های میکروبی روی بدنه‌ی نفتکش‌ها بر اثر چسبیدن جلبک‌ها [۲۰]



شکل ۱۰ | پوشش‌های هوشمند خودترمیم‌شونده قابل استفاده برای نشت‌بندی مخازن [۱۸]

■ کپسوله کردن ممانعت‌کننده عامل بسیار مهمی در کنترل نرخ رهاسازی پوشش هوشمند و افزایش کارایی آنست. اگر پوشش مستقیماً با ممانعت‌کننده‌های خوردگی مخلوط شود مولکول‌های ممانعت‌کننده به راحتی در محیط آبی حل خواهند شد و میکروحفره‌هایی در پوشش به وجود خواهد آمد.

■ تغییرات pH، دما، نور، غلظت یون مهاجم، پتانسیل رد اکس، وجود آنزیم خاص و ... می‌توانند مکانیزم‌های تحریک در پوشش‌های هوشمند باشند. در فرآیندهای خوردگی، مناسب‌ترین تحریک‌کننده pH است؛ زیرا در آغاز فرآیند خوردگی، pH به صورت موضعی در سایت‌های آندی و کاتدی تغییر می‌کند.

■ شرکت‌های مطرح بین‌المللی نفت و گاز سال‌هاست تحقیقات خود در خصوص ساخت و کاربرد انواع پوشش‌های هوشمند را آغاز کرده‌اند. بنابراین ضروری است این موضوع در صنعت نفت و گاز کشور نیز مورد توجه قرار گیرند تا از ویژگی‌های ارزشمند این گونه پوشش‌ها استفاده گردد. ■

خواص ضدیخی، ضد میکروبی و ضدلک داشته باشند. این شرکت برای دستیابی به این هدف از ترکیب یک سیلیکون آب‌گریز با پلیمری آب‌دوست استفاده کرده است. بدین ترتیب پلیمرهایی آمفیفیلیکی به وجود خواهند آمد که هر دو بخش آب‌دوست و آب‌گریز را در ساختار خود دارند [۲۱].

نتیجه‌گیری

■ قرار دادن ممانعت‌کننده‌های خوردگی در پوشش‌ها به‌عنوان راه‌حلی برای به‌کارگیری ترکیبی هر دو روش اکتیو و پسیو برای مقابله با خوردگی مدنظر قرار گرفته تا ممانعت‌کننده‌ها بتوانند به‌صورت هوشمند در پاسخ به آسیب پوشش رها شوند. این پوشش‌ها را هوشمند می‌نامند. ■ به‌طور کلی آژول‌ها و مشتقات آنها از مؤثرترین و متداول‌ترین ممانعت‌کننده‌های قابل‌استفاده برای حفاظت از خوردگی فولادها و مس و آلیاژهای آن هستند و برای ساخت پوشش‌های هوشمند به‌کار رفته‌اند.

منابع

- [1] Y. Frank Cheng, Stress Corrosion Cracking of Pipelines, John Wiley Publishing, Hoboken, NJ, 2013.
- [2] Xue-Zhen Gao, Hua-Ji Liu, Fa Cheng, Yu Chen, Thermoresponsive polyaniline nanoparticles: preparation, characterization, and their potential application in waterborne anticorrosion coatings, Chem. Eng. J. 283 (2016) 682–691.
- [3] Y. Qiang, S. Zhang, S. Xu, W. Li, Experimental and theoretical studies on the corrosion inhibition of copper by two indazole derivatives in 3.0% NaCl solution, J. Colloid Interface Sci. 472 (2016) 52–59.
- [4] V. Pandarinathan, K. Lepkova, S.I. Bailey, T. Becker, R. Gubner, Adsorption of corrosion inhibitor 1-dodecylpyridinium chloride on carbon steel studied by in situ AFM and electrochemical methods, Industrial & Engineering Chemistry Research, 53 (2014) 5858–5865.
- [5] Y. Qiang, S. Zhang, S. Xu, W. Li, Experimental and theoretical studies on the corrosion inhibition of copper by two indazole derivatives in 3.0% NaCl solution, J. Colloid Interface Sci. 472 (2016) 52–59.
- [6] D. Borisova, H. Möhwald, D.G. Shchukin, ACS Nano 5 (2011) 1939–1946.
- [7] M. J. Hollamby, D. Fix, I. Dönch, D. Borisova, H. Möhwald, D. Shchukin, Adv. Mater. 23 (2011) 1361–1365.
- [8] J. M. Falcón, L.M. Otubo, I.V. Aoki, Surf. Coat. Tech. 303 (Part B) (2016) 3193–29.
- [9] D. Borisova, D. Akcakayiran, M. Schenderlein, H. Mohwald, D.G. Shchukin, Nanocontainer-based anticorrosive coatings: effect of the container size on the self-healing performance, Adv. Funct. Mater. 23 (2013) 3799–3812.
- [10] M.D. Wang, M.Y. Liu, J.J. Fu, An intelligent anticorrosion coating based on pH-responsive smart nanocontainers fabricated via a facile method for protection of carbon steel, Journal of Materials Chemistry A, 3 (2015) 6423–6431.
- [11] J. Fu, T. Chen, M. Wang, N. Yang, S. Li, Y. Wang, X. Liu, Acid and alkaline dual stimuli-responsive mechanized hollow mesoporous silica nanoparticles as smart nanocontainers for intelligent anticorrosion coatings, ACS Nano, 7 (2013) 11397–11408.
- [12] D.V. Andreeva, D. Fix, H. Mohwald, D.G. Shchukin, Self-healing anticorrosion coatings based on pH-sensitive polyelectrolyte/inhibitor sandwich like nanostructures, Adv. Mater. 20 (2008) 2789–2794.
- [13] H. Shi, F. Liu, E.-H. Han, Surface-engineered microcapsules by layer-by-layer assembling for entrapment of corrosion inhibitor, Journal of Materials Science & Technology, 31 (2015) 5125–16.
- [14] T. Chen, J. Fu, PH-responsive nanovalves based on hollow mesoporous silicaspheres for controlled release of corrosion inhibitor, Nanotechnology 23(2012) 235605.
- [15] M. Kopeck, K. Szczepanowicz, G. Mordarski, K. Podgorna, R.P. Socha, P. Nowak, P. Warszynski, T. Hack, Self-healing epoxy coatings loaded with inhibitor-containing polyelectrolyte nanocapsules, Prog. Org. Coat. 84 (2015) 97–106.
- [16] Yuanchao Feng, Y. Frank Cheng, Fabrication of Halloysite nanoparticles and their compatibility with epoxy coating for anticorrosion performance, Corros. Eng. Sci. Technol. 51 (2016) 489–497.
- [17] <https://www.bp.com/en/global/corporate/bp-magazine/innovations/icam-making-the-invisible-visible-corrosion.html>
- [18] Intelligence in Novel materials, Rashmi Bhavsar, Nitin Y. Vaidya, Partha Ganguly, Alan Humphreys, Agathe Robisson, Huilin Tu, Nathan Wicks, Gareth H. McKinley, Frederic Pauchet, Oil Field Review, Schlumberger, 2008.
- [19] <https://www.sintef.no/en/latest-news/smart-materials/>
- [20] The intelligence behind smart coatings, Cynthia Challenger, JCT Coating tech, January 2006.
- [21] https://corporate.evonik.com/en/media/press_releases/corporate/pages/news-details.aspx?NewsId=70350