

بررسی نقش فناوری نانو در بهبود خواص مکانیکی پوشش های ضد خوردگی در صنایع نفت و گاز

زهرا شیخانی^۱، رضا فراهانی^۲

^۱ گروه مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد امیدیه، امیدیه، ایران (نویسنده مسئول)

^۲ گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

خوردگی تجهیزات فلزی در صنایع نفت و گاز سالانه خسارات مالی و جانی جبران ناپذیری را به زیرساخت های انرژی تحمیل می کند. استفاده از پوشش های پلیمری ضد خوردگی یکی از رایج ترین روش های مقابله با این پدیده است؛ با این حال، ضعف خواص مکانیکی این پوشش ها مانند مقاومت کم در برابر سایش، ترک خوردگی تحت تنش و نفوذ پذیری عوامل خوردنده، کارایی بلندمدت آن ها را محدود می سازد. پژوهش حاضر با هدف بررسی نقش فناوری نانو در بهبود و ارتقای خواص مکانیکی پوشش های ضد خوردگی پایه پلیمری (اپوکسی و پلی اورتان) مورد استفاده در خطوط لوله و تاسیسات انتقال نفت و گاز انجام شده است. روش تحقیق در این مطالعه از نوع تجربی-آزمایشگاهی بوده که در آن نانوذرات سیلیکا، گرافن و اکسید روی با درصدهای وزنی مختلف (۰.۵ تا ۳ درصد) به ماتریس پلیمری افزوده شدند. ارزیابی خواص مکانیکی از طریق آزمون های کشش، سختی سنجی نانوفوروروندگی، مقاومت به ضربه و آزمون چسبندگی انجام گرفت. یافته های پژوهش نشان داد که افزودن ۲ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا و گرافن به طور هم زمان، مقاومت کششی پوشش را تا ۴۲ درصد و سختی سطحی آن را تا ۳۵ درصد نسبت به نمونه خالص بهبود می بخشد. همچنین نتایج آزمون مه نمکی و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی تایید کرد که افزایش استحکام مکانیکی ماتریس و انسداد مسیرهای نفوذ ریزترک ها توسط نانومواد، مقاومت ضد خوردگی پوشش را به طور چشمگیری افزایش می دهد. در نهایت، این تحقیق نتیجه می گیرد که تلفیق بهینه نانوذرات ساختاری می تواند به عنوان راهکاری پایدار برای افزایش طول عمر تاسیسات نفت و گاز مورد استفاده قرار گیرد.

واژه های کلیدی: فناوری نانو، خواص مکانیکی، پوشش ضد خوردگی، صنایع نفت و گاز، مقاومت کششی، نانوکامپوزیت پلیمری.

مقدمه

صنایع نفت، گاز و پتروشیمی به عنوان شریان های اصلی اقتصاد و انرژی جهانی، همواره با چالش های عملیاتی و محیطی متعددی روبرو هستند که در این میان، پدیده خوردگی تجهیزات فلزی و خطوط لوله انتقال به عنوان یکی از جدی ترین مخاطرات ایمنی، زیست محیطی و اقتصادی شناخته می شود (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۸). شرایط سخت عملیاتی از جمله حضور گازهای ترش، اسیدهای آلی، نمک های محلول، تغییرات شدید دما و فشارهای بالا، سرعت فرآیندهای تخریب خوردگی را در این صنایع به شدت شتاب می بخشد (رستمی و رضایی، ۱۴۰۰). بر اساس گزارش های بین المللی، بخش عمده ای از بودجه های تعمیر و نگهداری در مجتمع های پالایشگاهی صرف جایگزینی قطعات فرسوده و بازسازی پوشش های حفاظتی تخریب شده می شود (احمدی، ۱۳۹۹). در این میان، اعمال پوشش های پلیمری مانند رزین های اپوکسی، پلی اورتان و چسب های پایه قطران به عنوان خط مقدم دفاع فیزیکی و شیمیایی در برابر ورود عوامل خورنده نظیر رطوبت، اکسیژن و کلرایدها عمل می کنند (اسمیت و همکاران، ۲۰۱۸). با این وجود، پوشش های سنتی پلیمری علیرغم مقاومت شیمیایی مناسب در ابتدای چرخه عمر خود، در درازمدت به دلیل ضعف در خواص مکانیکی دچار شکست ساختاری می شوند (جونز و ویلیامز، ۲۰۲۰). ضعف در مقاومت سایشی، چقرمگی پایین، شکنندگی در برابر ضربات فیزیکی ناشی از حمل و نقل یا رانش زمین، و ایجاد ترک های میکروسکوپی در اثر تنش های حرارتی، از جمله مهم ترین نقاط ضعف پوشش های مرسوم هستند که مسیرهای همواری را برای نفوذ سریع گونه های خورنده به سطح زیرآیند فلزی فراهم می سازند (زارع و حسینی، ۱۴۰۱). شکاف دانشی موجود در این حوزه، عدم دستیابی به یک فرمولاسیون بهینه است که بتواند همزمان خواص مکانیکی (نظیر انعطاف پذیری و چسبندگی) و خواص سدی (مقاومت الکتروشیمیایی) پوشش را بدون کاهش کیفیت یکی به نفع دیگری ارتقا دهد (کانگ و لی، ۲۰۲۲). برای حل این چالش، فناوری نانو به عنوان یک ابزار نوین و تحول آفرین وارد عرصه مهندسی مواد و متالورژی شده است؛ زیرا ورود نانومواد با نسبت سطح به حجم بسیار بالا می تواند به عنوان پرکننده های تقویت کننده عمل کرده و رفتار تغییر شکل پلاستیک ماتریس پلیمری را بهبود بخشد (موسوی و علوی، ۱۴۰۲). اهمیت این تحقیق در آن است که با تمرکز بر نانومواد پیشرفته مانند نانوصفحات گرافن و نانوذرات سیلیکا، تلاش می کند مکانیزم های بهبود خواص چسبندگی و استحکام کششی را تبیین نموده و با ارائه داده های تجربی دقیق، زمینه ساز بومی سازی پوشش های نانوکامپوزیتی با طول عمر بالا در خطوط انتقال نفت و گاز شود (پاتل و همکاران، ۲۰۲۴). هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی کمی و کیفی اثر افزودن درصد های مختلف نانوذرات بر تغییرات سختی نانوفوروروندگی، مقاومت به ضربه و چسبندگی پوشش های اپوکسی اصلاح شده و در نهایت، تحلیل رابطه میان ارتقای خواص مکانیکی و افزایش پایداری ضدخوردگی سیستم های پوششی تحت شرایط شبیه سازی شده محیطی نفت و گاز است (ژانگ و وانگ، ۲۰۲۵).

مبانی نظری

پژوهش در زمینه پوشش های ضدخوردگی نانو ساختار در صنایع نفت و گاز در تقاطع چند حوزه دانشی شامل مهندسی مواد، مهندسی شیمی، مهندسی سطح، الکتروشیمی، فناوری نانو و تحلیل رفتار مکانیکی پلیمرها قرار می گیرد و از این رو، تبیین مبانی نظری آن مستلزم درک همزمان سازوکارهای خوردگی، اصول عملکرد پوشش های حفاظتی، ویژگی های نانومواد و مکانیزم های تقویت مکانیکی در سامانه های نانوکامپوزیتی است. در صنایع نفت و گاز، تجهیزات فلزی شامل خطوط لوله، مخازن ذخیره، مبدل های حرارتی، شیرآلات، اتصالات و سازه های فراساحلی به طور مستمر در معرض محیط هایی قرار دارند که از نظر شیمیایی خورنده و از نظر مکانیکی تنش زا هستند؛ محیط هایی که معمولاً حاوی آب شور، یون کلرید، دی اکسید کربن، سولفید هیدروژن، اکسیژن محلول، ترکیبات اسیدی و نوسانات دمایی اند و همین عوامل سبب می شود خوردگی نه فقط یک

مسئله شیمیایی، بلکه یک مسئله چندبعدی مرتبط با انتقال جرم، تنش مکانیکی و تخریب ریزساختاری تلقی شود (فونتانا، ۲۰۰۵؛ ریوره و همکاران، ۲۰۱۶). هرچند کنترل خوردگی از طریق روش‌هایی مانند حفاظت کاتدی، انتخاب مواد مقاوم و بازدارنده‌های شیمیایی امکان‌پذیر است، اما پوشش‌های سطحی همچنان یکی از اقتصادی‌ترین و پرکاربردترین راهکارها برای کاهش تماس مستقیم زیرلایه فلزی با محیط خورنده محسوب می‌شوند، زیرا نقش سد فیزیکی، شیمیایی و در برخی موارد الکتروشیمیایی را به‌طور هم‌زمان ایفا می‌کنند (لاندولت، ۲۰۰۷؛ فدریززی و دفلورین، ۲۰۱۱).

پوشش‌های ضدخوردگی متداول در صنعت نفت و گاز غالباً بر پایه رزین‌های اپوکسی، پلی‌یورتان، وینیل‌استر، آلکیدی و سامانه‌های چندلایه طراحی می‌شوند که هر یک مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند. رزین‌های اپوکسی به‌دلیل چسبندگی مناسب به زیرلایه فلزی، مقاومت شیمیایی مطلوب و قابلیت فرآوری بالا، از رایج‌ترین گزینه‌ها در پوشش‌دهی داخلی و خارجی تجهیزات صنعتی به‌شمار می‌آیند؛ با این حال، ساختار نسبتاً شکننده، حساسیت به ریزترک‌های ناشی از تنش حرارتی و محدودیت در مقاومت سایشی، عملکرد بلندمدت آن‌ها را در محیط‌های بهره‌برداری شدید محدود می‌کند (مایر، ۲۰۰۳؛ پترسون و همکاران، ۲۰۱۹). در مبانی نظری پوشش‌های حفاظتی، اصل اساسی آن است که هرگونه ضعف در یکپارچگی مکانیکی فیلم پوششی، از جمله وجود تخلخل، ترک، حفره، ناحیه‌های با چسبندگی ضعیف یا تنش پسماند بالا، می‌تواند منجر به آغاز نفوذ رطوبت و یون‌های مهاجم شود و در نتیجه، تخریب سدی پوشش پیش از آنکه از نظر ظاهری آشکار شود، در مقیاس میکروسکوپی آغاز گردد (فونسکا و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین، مقاومت ضدخوردگی تنها تابع ماهیت شیمیایی پوشش نیست، بلکه به‌شدت به خواص مکانیکی و ریزساختاری آن وابسته است. به بیان دیگر، هرچه فیلم پوششی از نظر استحکام کششی، مدول مناسب، چقرمگی شکست، چسبندگی بین‌سطحی و مقاومت در برابر سایش و ضربه عملکرد بهتری داشته باشد، احتمال شکل‌گیری مسیرهای نفوذ برای عوامل خورنده کاهش می‌یابد و دوام خوردگی-مکانیکی سامانه افزایش پیدا می‌کند (یانگ و همکاران، ۲۰۲۰).

در این چارچوب، فناوری نانو به‌عنوان یکی از مهم‌ترین رویکردهای نوآورانه برای بازطراحی پوشش‌های مهندسی مطرح شده است. نانومواد به دلیل ابعاد کمتر از ۱۰۰ نانومتر، نسبت سطح به حجم بسیار بالا، انرژی سطحی زیاد و قابلیت برهم‌کنش مؤثر با ماتریس‌های پلیمری می‌توانند نقش پرکننده‌های فعال، تقویت‌کننده‌های ساختاری و حتی عوامل عملکردی چندمنظوره را در پوشش‌ها ایفا کنند (پول و اوونز، ۲۰۰۳؛ لی و همکاران، ۲۰۱۷). برخلاف پرکننده‌های میکرومتری سنتی که عمدتاً با هدف کاهش هزینه یا ایجاد برخی خواص حجمی به کار می‌رفتند، نانوذرات قادرند در مقادیر کم، تغییرات چشمگیری در رفتار مکانیکی، حرارتی، نفوذپذیری و پایداری الکتروشیمیایی پوشش ایجاد کنند. از منظر نظری، علت اصلی این موضوع آن است که پراکندگی مناسب نانوذرات در ماتریس پلیمر می‌تواند باعث انتقال تنش مؤثرتر، محدودسازی حرکت زنجیره‌های پلیمری، بهبود شبکه اتصالات فیزیکی و شیمیایی، کاهش حجم آزاد و ایجاد مسیرهای پرپیچ‌وخم برای نفوذ گونه‌های خورنده شود (گاورنر و همکاران، ۲۰۱۵؛ ژائو و همکاران، ۲۰۲۱). این پدیده که گاه با عنوان اثر مانع پیچاپیچ یا *Tortuous Path Effect* توصیف می‌شود، از اصول محوری در توجیه عملکرد بهتر پوشش‌های نانوکامپوزیتی در برابر رطوبت و یون‌هاست.

از نظر نظریه تقویت مکانیکی، رفتار نانوذرات در پوشش‌ها تابعی از چند متغیر کلیدی شامل اندازه ذره، مورفولوژی، نسبت منظر، انرژی سطحی، اصلاح شیمی سطح، سازگاری با ماتریس، درصد وزنی و کیفیت پراکنش است. برای مثال، نانوذرات کروی مانند نانوسیلیکا معمولاً باعث افزایش سختی، مدول و مقاومت به سایش می‌شوند، زیرا حضور آن‌ها حرکت موضعی زنجیره‌های پلیمر را محدود کرده و توزیع تنش را یکنواخت‌تر می‌کند (سولیوان و همکاران، ۲۰۱۸). در مقابل، نانومواد صفحه‌ای مانند گرافن، اکسید گرافن و نانورس‌ها علاوه بر بهبود مکانیکی، به دلیل نسبت منظر بالا، توان بسیار بیشتری در افزایش طول مسیر نفوذ عوامل خورنده دارند و به همین دلیل، از دیدگاه سدگری نیز بسیار مؤثرند (رافعی‌طبار و همکاران، ۲۰۲۰؛ چن و همکاران، ۲۰۲۲). نانولوله‌های کربنی نیز از منظر مکانیکی اهمیت ویژه‌ای دارند، زیرا مدول و استحکام ذاتی

بالای آن‌ها در صورت ایجاد چسبندگی بین سطحی مناسب با پلیمر می‌تواند باعث ارتقای محسوس استحکام کششی، مقاومت به ترک و حتی خواص خستگی پوشش شود؛ هرچند چالش اصلی در استفاده از آن‌ها، تمایل شدید به تجمع و دشواری پراکندگی یکنواخت است (عبداللهی و همکاران، ۱۳۹۹؛ بکس و همکاران، ۲۰۱۹). در نتیجه، مبنای نظری موفقیت فناوری نانو در پوشش‌های ضد خوردگی نه صرفاً افزودن نانوذره، بلکه «مهندسی رابط» بین نانوذره و ماتریس است؛ زیرا در صورت عدم اصلاح سطح و توزیع نامناسب، همان نانوذرات می‌توانند به مراکز تمرکز تنش یا نواحی ضعف موضعی تبدیل شوند.

در سطح مفهومی، پیوند بین خواص مکانیکی و عملکرد ضد خوردگی در پوشش‌های نانوکامپوزیتی را می‌توان بر اساس چند سازوکار مکمل توضیح داد. نخست آنکه بهبود مدول، سختی و استحکام کششی به کاهش تغییر شکل موضعی پوشش تحت بارهای بهره‌برداری منجر می‌شود و این امر احتمال ایجاد ترک و ریزشکاف را کاهش می‌دهد. دوم آنکه افزایش چسبندگی به زیرلایه از جداسدگی بین سطحی، تاول زدگی و نفوذ موضعی الکترولیت در مرز فلز/پوشش جلوگیری می‌کند. سوم آنکه افزایش چقرمگی و مقاومت به ضربه از شکست ترد پوشش در زمان حمل و نقل، نصب یا سرویس جلوگیری می‌کند. چهارم آنکه حضور نانوذرات می‌تواند با کاهش تخلخل، اصلاح ریزساختار و افزایش تراکم شبکه پلیمری، نرخ انتقال جرم خوردنده را محدود کند (روخاس و همکاران، ۲۰۱۷؛ پارک و همکاران، ۲۰۲۳). بدین ترتیب، خواص مکانیکی مطلوب نه تنها یک مزیت مستقل به شمار می‌رود، بلکه یک متغیر واسطه کلیدی در حفظ یکپارچگی ضد خوردگی پوشش در طول زمان است. این پیوند نظری، اساس منطقی پژوهش حاضر را تشکیل می‌دهد؛ زیرا بررسی نقش فناوری نانو در بهبود خواص مکانیکی بدون تحلیل اثر آن بر پایداری خوردگی، تحلیلی ناقص خواهد بود.

از منظر طبقه‌بندی نانومواد مورد استفاده در پوشش‌های ضد خوردگی، می‌توان آن‌ها را به چند دسته عمده تقسیم کرد: نانوذرات اکسیدی مانند سیلیکا، آلومینا، تیتانیا، اکسید روی و اکسید آهن؛ نانوساختارهای کربنی مانند گرافن، اکسید گرافن، نانولوله‌های کربنی و نانوالیاف کربنی؛ نانوسیلیکات‌ها و نانورس‌های لایه‌ای؛ و نانوذرات هیبریدی یا اصلاح سطح‌شده که برای ایجاد هم‌افزایی بین خواص مکانیکی، حرارتی و سدگری طراحی می‌شوند (یان و همکاران، ۲۰۱۹؛ کاظمی و همکاران، ۱۴۰۱). نانوسیلیکا به دلیل پایداری شیمیایی، هزینه مناسب‌تر، دسترس‌پذیری و قابلیت اصلاح سطح با عوامل سیلانی، یکی از رایج‌ترین تقویت‌کننده‌ها در پوشش‌های اپوکسی است. این ماده معمولاً موجب افزایش سختی، مقاومت خراش و پایداری حرارتی می‌شود و در صورت پراکنش مناسب، تخلخل ساختار را کاهش می‌دهد (حسینی و کریمی، ۱۴۰۰). گرافن و مشتقات آن، به واسطه استحکام مکانیکی ذاتی بسیار بالا، هدایت حرارتی مناسب و ساختار دوبعدی نفوذناپذیر، در سال‌های اخیر به یکی از جذاب‌ترین گزینه‌ها در مهندسی پوشش‌های ضد خوردگی تبدیل شده‌اند؛ هرچند در کاربردهای صنعتی، چالش‌هایی مانند اطمینان از پراکنش یکنواخت، کنترل رسانایی الکتریکی و پیشگیری از ایجاد سلول‌های گالوانیکی موضعی باید مدنظر قرار گیرد (بیتسو و همکاران، ۲۰۱۸؛ ژو و همکاران، ۲۰۲۴). نانورس‌ها نیز بر اساس مبانی نظری ریزلایه‌ای خود، با ایجاد ساختارهای بین‌لایه‌ای یا ورقه‌ورقه در ماتریس پلیمری، مسیر نفوذ آب و یون‌ها را افزایش می‌دهند و در عین حال می‌توانند بر مدول و مقاومت مکانیکی اثر مثبت داشته باشند (فروغی و همکاران، ۱۳۹۷).

در تحلیل مبانی نظری این حوزه، مفهوم درصد بهینه نانوذرات اهمیت اساسی دارد. برخلاف تصور اولیه که افزایش مقدار نانوماده را همواره مفید می‌داند، شواهد نظری و تجربی نشان می‌دهد که پس از یک آستانه مشخص، افزایش غلظت نانوذره می‌تواند به تجمع، ایجاد عیوب موضعی، افزایش ویسکوزیته سامانه، کاهش کیفیت پوشش‌دهی و حتی افت خواص مکانیکی منجر شود (کیم و همکاران، ۲۰۱۹؛ جعفری و همکاران، ۱۴۰۲). این موضوع در نظریه سامانه‌های پلیمری پر شده با مفهوم رقابت بین «تقویت بین سطحی» و «تمرکز تنش ناشی از آگلومراسیون» توضیح داده می‌شود. بر این اساس، تأثیر واقعی فناوری نانو بر خواص مکانیکی تنها زمانی مثبت و پایدار است که میان مقدار نانوماده، سازگاری شیمیایی، روش اختلاط، پارامترهای پخت و شرایط اعمال پوشش یک تعادل طراحی شده برقرار باشد. به همین دلیل، در ادبیات این حوزه، روش‌های فراصوت،

اختلاط برشی بالا، اصلاح سطحی با عوامل آلی-سیلانی و استفاده از نانوذرات هیبریدی به عنوان راهکارهایی برای بهبود پراکنش و افزایش کارایی نانومواد مورد توجه قرار گرفته‌اند (محمدی و همکاران، ۱۳۹۹؛ سان و همکاران، ۲۰۲۳).

از زاویه نظریه ارزیابی عملکرد، بهبود خواص مکانیکی پوشش‌های نانوکامپوزیتی معمولاً با آزمون‌هایی نظیر کشش، خمش، سختی، چسبندگی، ضربه، خراش و سایش بررسی می‌شود، در حالی که پایداری ضدخوردگی از طریق آزمون مه نمکی، پلاریزاسیون تافل، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، آزمون غوطه‌وری بلندمدت و ارزیابی نفوذپذیری سنجیده می‌شود (استانداردهای ای‌اس‌تی‌ام، ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴). مبنای نظری اعتبار این آزمون‌ها آن است که خواص مکانیکی و الکتروشیمیایی پوشش باید نه به صورت منفرد، بلکه در قالب یک سامانه عملکردی یکپارچه تحلیل شوند. به عنوان مثال، پوششی که سختی بالایی دارد اما چسبندگی ضعیفی به زیرلایه نشان می‌دهد، در شرایط واقعی ممکن است شکست بین سطحی زود هنگام داشته باشد. همچنین پوششی که مقاومت الکتروشیمیایی اولیه بالایی دارد اما در برابر ضربه یا تنش حرارتی شکننده است، در بهره‌برداری صنعتی عملکرد پایدار نخواهد داشت. از این رو، در مبنای نظری این پژوهش، فرض مرکزی آن است که «بهبود هدفمند و متوازن خواص مکانیکی از طریق بهره‌گیری از فناوری نانو، پیش‌شرط افزایش دوام ضدخوردگی پوشش‌ها در محیط‌های پیچیده صنایع نفت و گاز است».

در نهایت، چارچوب نظری این تحقیق را می‌توان بر پایه یک مدل علی چندسطحی خلاصه کرد که در آن، ویژگی‌های نانوماده شامل نوع، اندازه، مورفولوژی و اصلاح سطح، بر کیفیت پراکنش و ریزساختار پوشش اثر می‌گذارند؛ ریزساختار اصلاح‌شده، به نوبه خود موجب ارتقای خواص مکانیکی کلیدی مانند استحکام کششی، سختی، چسبندگی و مقاومت به ضربه می‌شود؛ و این ارتقا در سطح بالاتر، از طریق کاهش ترک، کاهش تخلخل، افزایش پایداری مرز بین‌سطحی و محدودسازی نفوذ عوامل خوردنده، عملکرد ضدخوردگی و دوام سرویس را بهبود می‌بخشد. به این ترتیب، فناوری نانو در این پژوهش نه صرفاً یک افزودنی مواد، بلکه یک رویکرد طراحی مهندسی برای بازآرایی روابط ساختار-فرآیند-ویژگی-عملکرد در پوشش‌های ضدخوردگی محسوب می‌شود.

پیشینه پژوهش

مرور پیشینه پژوهش در زمینه نقش فناوری نانو در بهبود خواص مکانیکی پوشش‌های ضدخوردگی نشان می‌دهد که این حوزه طی حدود یک دهه اخیر از مطالعات توصیفی و آزمایش‌های محدود آزمایشگاهی به سمت پژوهش‌های عمیق‌تر درباره رابطه میان نوع نانوماده، سازوکارهای پراکنش، برهم‌کنش‌های بین‌سطحی و عملکرد چندمعیاره پوشش‌ها حرکت کرده است. در سال‌های ابتدایی این مسیر، بخش بزرگی از مطالعات بر این فرض استوار بود که افزودن نانوذرات به ماتریس‌های پلیمری ذاتاً به افزایش مقاومت خوردگی منجر می‌شود، اما به تدریج روشن شد که کارایی واقعی چنین سامانه‌هایی به شدت تابع اثرات هم‌زمان مکانیکی، ریزساختاری و فرآیندی است و نمی‌توان تنها بر یک شاخص مانند امپدانس الکتروشیمیایی یا زمان شکست در مه نمکی تکیه کرد (وانگ و همکاران، ۲۰۱۶؛ علوی طباطبایی و همکاران، ۱۳۹۸). به همین دلیل، پژوهش‌های جدیدتر با رویکردی جامع‌تر، ارتباط بین استحکام مکانیکی، چسبندگی، مقاومت سایشی و دوام خوردگی را مورد توجه قرار داده‌اند و این دقیقاً همان حوزه‌ای است که مقاله حاضر در آن قرار می‌گیرد.

در میان مطالعات بین‌المللی، نانوسیلیکا یکی از پرکاربردترین نانومواد در پوشش‌های اپوکسی ضدخوردگی بوده است. پژوهش‌های متعددی نشان داده‌اند که افزودن مقادیر کم نانوسیلیکا، به‌ویژه زمانی که سطح ذرات با ترکیبات سیلانی اصلاح

شده باشد، می تواند به افزایش سختی، مقاومت خراش، مدول کششی و پایداری حرارتی منجر شود و در عین حال نفوذپذیری پوشش را کاهش دهد (لی و همکاران، ۲۰۱۷؛ سیلوا و همکاران، ۲۰۲۰). در یک مطالعه، گزارش شد که حضور نانوسیلیکا در بازه های بهینه ۱ تا ۳ درصد وزنی موجب بهبود یکنواختی فیلم و کاهش ریزتخلخل ها شده و همین موضوع توانسته است عملکرد ضد خوردگی پوشش اپوکسی را در محیط های حاوی کلرید افزایش دهد (حسن پور و همکاران، ۱۴۰۰). با این حال، برخی پژوهشگران تأکید کرده اند که افزایش بیش از حد نانوسیلیکا می تواند به تجمع موضعی، افت چسبندگی و شکننده تر شدن پوشش منجر شود؛ موضوعی که نشان می دهد رابطه میان مقدار نانوماده و کارایی پوشش غیرخطی است و نیاز به بهینه سازی دقیق دارد (کیم و همکاران، ۲۰۱۹). این یافته ها از نظر نظری و کاربردی اهمیت زیادی دارند، زیرا در صنایع نفت و گاز انتخاب نادرست غلظت نانوذره می تواند نه فقط بهبود ایجاد نکند، بلکه باعث افزایش ریسک تخریب در سرویس شود.

مطالعات مربوط به گرافن و مشتقات آن نیز در سال های اخیر رشد چشمگیری داشته است. گرافن به دلیل استحکام ذاتی بسیار بالا، ساختار لایه ای نفوذناپذیر و سطح ویژه زیاد، به عنوان یکی از امیدبخش ترین نانومواد برای ساخت پوشش های فوق مانع معرفی شده است (نووسلف و همکاران، ۲۰۱۲؛ چن و همکاران، ۲۰۲۲). بررسی ها نشان داده اند که افزودن مقدار کنترل شده ای از گرافن یا اکسید گرافن به رزین اپوکسی می تواند همزمان موجب افزایش مدول، مقاومت کششی، سختی و عملکرد سدی در برابر آب و یون کلرید شود (پارک و همکاران، ۲۰۲۳). در برخی مطالعات، پوشش های تقویت شده با اکسید گرافن اصلاح شده توانسته اند در آزمون های امپدانس الکتروشیمیایی رفتار بسیار پایداری نسبت به اپوکسی خالص نشان دهند و همچنین ترک خوردگی ناشی از تنش های مکانیکی را با تأخیر بیشتری تجربه کنند (ژو و همکاران، ۲۰۲۴). با این وجود، ادبیات این حوزه یکدست نیست؛ برخی پژوهش ها هشدار داده اند که در صورت عدم کنترل مناسب پراکنش، گرافن می تواند به علت تجمع ورقه ها، نقص های موضعی در فیلم ایجاد کند یا حتی در برخی شرایط خاص، به واسطه رسانایی بالا، زمینه ایجاد ریزسلول های گالوانیکی را فراهم آورد (بیتسو و همکاران، ۲۰۱۸). این دوگانگی در نتایج نشان می دهد که موفقیت گرافن نه به نام ماده، بلکه به کیفیت مهندسی سامانه بستگی دارد.

نانوذرات اکسید روی، تیتانیا و آلومینا نیز در پیشینه پژوهش جایگاه قابل توجهی دارند. نانواکسید روی به دلیل ویژگی های ضدباکتری، پایداری شیمیایی و اثر بر سختی و مقاومت سطحی، در برخی پوشش های صنعتی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج نشان داده است که در غلظت های پایین می تواند چسبندگی و مقاومت سایشی را بهبود بخشد، هرچند در برخی موارد اثر آن بر رفتار الکتروشیمیایی کمتر از نانوسیلیکا و گرافن گزارش شده است (رامیرز و همکاران، ۲۰۱۹). نانوتیتانیا نیز علاوه بر نقش پرکننده، در برخی مطالعات به علت ویژگی های فوتوکاتالیستی و توان اصلاح ساختار پلیمری مورد استفاده قرار گرفته، اما کاربرد آن در پوشش های نفت و گاز نیازمند کنترل دقیق است تا اثرات جانبی احتمالی بر پایداری ماتریس به حداقل برسد (یان و همکاران، ۲۰۱۹). نانوالومینا بیشتر با هدف افزایش سختی، مقاومت فرسایشی و پایداری مکانیکی به کار رفته و برخی مطالعات نشان داده اند که در شرایط سایشی شدید می تواند مزیت هایی نسبت به سایر نانوذرات داشته باشد، ولی از نظر سدگری خوردگی همواره بهترین گزینه نبوده است (بهرامی و همکاران، ۱۳۹۹).

در کنار نانوذرات منفرد، مطالعات هیبریدی نیز سهم فزاینده ای در ادبیات علمی پیدا کرده اند. در این پژوهش ها، ترکیب دو یا چند نانوماده با مورفولوژی های متفاوت، مانند نانوسیلیکا به همراه گرافن یا نانورس در کنار نانولوله های کربنی، با هدف دستیابی به اثر هم افزایی بررسی شده است. نتایج چنین مطالعاتی غالباً نشان داده اند که اگر نسبت اختلاط به درستی انتخاب شود، می توان هم زمان از مزیت سختی افزایی ذرات کروی، اثر سدگری ورقه ای مواد دوبعدی و تقویت بین سطحی نانو ساختارهای فیبری بهره برد (سان و همکاران، ۲۰۲۳؛ نادری و همکاران، ۱۴۰۲). برای نمونه، در برخی پوشش های اپوکسی هیبریدی گزارش شده است که ترکیب مقادیر کم نانوسیلیکا و اکسید گرافن نسبت به استفاده جداگانه از هر کدام، باعث افزایش بیشتر

استحکام کششی، کاهش نفوذپذیری و بهبود مقاومت به مه نمکی شده است. این یافته‌ها برای پژوهش حاضر اهمیت مستقیم دارند، زیرا فرضیه استفاده از نانوذرات ترکیبی برای ایجاد توازن بهتر میان خواص مکانیکی و ضد خوردگی را تقویت می‌کنند.

در سطح روش‌شناسی، پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که یکی از ضعف‌های مهم بخشی از مطالعات گذشته، تمرکز افراطی بر یک یا دو آزمون محدود بوده است. برای مثال، برخی مقالات فقط به نتایج EIS پرداخته‌اند و برخی دیگر صرفاً افزایش سختی یا مدول را گزارش کرده‌اند، بدون آنکه نشان دهند این بهبودها در شرایط شبه‌واقعی بهره‌برداری چه اثری بر دوام پوشش دارد (روخاس و همکاران، ۲۰۱۷). در مقابل، مطالعات جامع‌تر سعی کرده‌اند از رویکرد چندآزمونی استفاده کنند و آزمون‌های مکانیکی، حرارتی، ریزساختاری و الکتروشیمیایی را به‌صورت هم‌زمان تحلیل نمایند. این گرایش جدید ارزش بالایی دارد، زیرا عملکرد واقعی پوشش ضد خوردگی در صنایع نفت و گاز نتیجه تعامل میان چندین متغیر است و هرگونه نتیجه‌گیری تک‌بعدی می‌تواند گمراه‌کننده باشد (پترسون و همکاران، ۲۰۱۹؛ محمدی و همکاران، ۱۳۹۹). علاوه بر این، در برخی تحقیقات جدید از روش‌های تصویربرداری مانند میکروسکوپ الکترونی روبشی، نگاشت عنصری و تحلیل سطح شکست استفاده شده تا سازوکارهای تخریب و نقش نانوذرات در کنترل ریزترک‌ها به‌صورت مستقیم مشاهده شود. این رویکردها به غنای نظری و تجربی این حوزه افزوده‌اند.

در ادبیات فارسی نیز هرچند نسبت به متون بین‌المللی حجم پژوهش‌ها کمتر است، اما در سال‌های اخیر مطالعات ارزشمندی درباره پوشش‌های نانوکامپوزیتی ضد خوردگی، به‌ویژه بر پایه اپوکسی/نانوسیلیکا، اپوکسی/اکسیدگرافن و نانوذرات اکسیدی انجام شده است. برخی پژوهش‌های داخلی بر بهبود خواص چسبندگی و سختی پوشش‌های اپوکسی حاوی نانوذرات تمرکز داشته‌اند و گزارش کرده‌اند که اصلاح سطح نانوذرات و استفاده از اختلاط فراصوتی نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت نهایی سامانه دارد (حسینی و کریمی، ۱۴۰۰؛ جعفری و همکاران، ۱۴۰۲). در برخی دیگر از مطالعات، اثر نانومواد بر مقاومت به خوردگی فولادهای مورد استفاده در خطوط لوله و سازه‌های صنعتی بررسی شده و نتایج کلی بیانگر آن بوده است که پوشش‌های نانوکامپوزیتی، در صورت طراحی درست، نسبت به پوشش‌های متداول از نظر دوام عملکرد برتری دارند (کاظمی و همکاران، ۱۴۰۱؛ نادری و همکاران، ۱۴۰۲). با این حال، در ادبیات داخلی نیز مانند ادبیات خارجی، یک شکاف مهم دیده می‌شود: تعداد کمی از مطالعات به‌طور نظام‌مند رابطه میان «بهبود خواص مکانیکی» و «افزایش کارایی ضد خوردگی» را در بستر واقعی صنایع نفت و گاز تحلیل کرده‌اند. بسیاری از پژوهش‌ها یا بر آزمون‌های خوردگی متمرکز شده‌اند یا صرفاً خواص مکانیکی را گزارش کرده‌اند، در حالی که مسئله اصلی در کاربرد صنعتی، هم‌افزایی این دو گروه ویژگی است.

یکی دیگر از محورهای مهم پیشینه پژوهش، بحث مقیاس‌پذیری صنعتی و انتقال از آزمایشگاه به میدان است. بخش قابل‌توجهی از مطالعات موجود، در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی و روی نمونه‌های کوچک انجام شده‌اند، اما تبدیل این نتایج به پوشش‌های قابل اعمال در خطوط لوله، مخازن و سازه‌های عظیم نفتی مستلزم توجه به چالش‌هایی مانند پایداری فرمولاسیون، هزینه نانومواد، سازگاری با فرآیندهای اعمال صنعتی، ایمنی زیست‌محیطی، قابلیت تعمیرپذیری و عملکرد طولانی‌مدت در سرویس است (گاورنر و همکاران، ۲۰۱۵؛ ژانگ و وانگ، ۲۰۲۵). به بیان دیگر، بخشی از شکاف دانشی موجود نه در سطح اثبات اصل کارایی نانومواد، بلکه در سطح بهینه‌سازی مهندسی برای کاربرد وسیع صنعتی نهفته است. این موضوع برای صنعت نفت و گاز ایران نیز اهمیت زیادی دارد، زیرا شرایط اقلیمی، شیمی سیالات، محدودیت‌های اقتصادی و الزامات تعمیر و نگهداری، نیازمند راه‌حل‌هایی بومی، پایدار و اقتصادی هستند.

در جمع‌بندی پیشینه پژوهش می‌توان گفت که اجماع عمومی مطالعات گذشته بر این نکته استوار است که فناوری نانو ظرفیت بالایی برای ارتقای عملکرد پوشش‌های ضد خوردگی دارد، اما اختلاف میان نتایج درباره میزان و پایداری این اثر، ناشی از تفاوت در نوع نانوماده، کیفیت پراکنش، نوع ماتریس، درصد مصرف، روش ساخت و شاخص‌های ارزیابی است. همچنین شواهد

پژوهشی نشان می دهد که نانوسیلیکا، گرافن و سامانه های هیبریدی از امیدبخش ترین گزینه ها برای بهبود همزمان خواص مکانیکی و مقاومت خوردگی به شمار می روند، اما هنوز نیاز به مطالعاتی وجود دارد که این اثرات را به صورت یکپارچه، مقایسه ای و با رویکردی نزدیک تر به شرایط واقعی بهره برداری در صنایع نفت و گاز بررسی کند. بنابراین، جایگاه پژوهش حاضر در ادبیات علمی آن است که با تمرکز بر پیوند ساختاری میان فناوری نانو، خواص مکانیکی و دوام ضد خوردگی، می کوشد این خلأ تحلیلی را تا حدی پوشش دهد و چارچوبی منسجم تر برای فهم و ارزیابی پوشش های نانوکامپوزیتی ارائه دهد.

روش شناسی

این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر شیوه اجرا، در زمره پژوهش های کمی با رویکرد تجربی-آزمایشگاهی و تحلیل مقایسه ای قرار می گیرد؛ زیرا مسئله اصلی آن سنجش و تبیین اثر افزودن نانومواد منتخب بر بهبود خواص مکانیکی پوشش های ضد خوردگی و تحلیل ارتباط این بهبود با عملکرد حفاظتی در شرایط مرتبط با صنایع نفت و گاز است. از آنجا که در این حوزه، ارزیابی دقیق عملکرد پوشش ها مستلزم کنترل متغیرهای ساخت، اعمال، پخت، نوع زیرلایه و شرایط آزمون است، طراحی پژوهش به گونه ای انجام شد که امکان مقایسه همزمان چند فرمولاسیون پوششی در بستری استاندارد، قابل تکرار و نزدیک به شرایط صنعتی فراهم شود. جامعه تجربی پژوهش شامل پوشش های اپوکسی ضد خوردگی مورد استفاده یا قابل استفاده در تجهیزات و خطوط انتقال صنایع نفت و گاز است و واحد تحلیل، نمونه های پوشش داده شده بر روی زیرلایه فولادی کربنی است. با توجه به شیوع کاربرد فولادهای کربنی در خطوط لوله، مخازن و سازه های فرایندی، زیرلایه اصلی این پژوهش ورق فولادی از گرید صنعتی رایج برای کاربردهای انتقال و نگهداری سیالات هیدروکربنی در نظر گرفته شد تا نتایج از حیث کاربردی بودن، نزدیک تر به واقعیت صنعتی باشند. نمونه گیری در این پژوهش از نوع هدفمند و مبتنی بر طراحی آزمایش بوده است؛ بدین معنا که به جای نمونه گیری از افراد یا واحدهای اجتماعی، فرمولاسیون های مشخصی از پوشش به عنوان تیمارهای آزمایشی انتخاب شدند و برای هر تیمار، تعداد تکرار کافی جهت تحلیل آماری در نظر گرفته شد.

در این مطالعه، یک پوشش پایه اپوکسی به عنوان گروه شاهد و چند پوشش نانوکامپوزیتی به عنوان گروه های آزمایشی در نظر گرفته شد. انتخاب اپوکسی به دلیل کاربرد گسترده آن در پوشش های صنعتی، چسبندگی مناسب به فولاد، مقاومت شیمیایی قابل قبول و سابقه فراوان آن در پژوهش های ضد خوردگی انجام گرفت. نانومواد منتخب شامل نانوسیلیکا و اکسید گرافن بودند که انتخاب آن ها بر مبنای دو معیار اصلی صورت گرفت: نخست، شواهد پژوهشی فراوان مبنی بر تأثیر مثبت آن ها بر خواص مکانیکی و سدی پوشش ها، و دوم، تفاوت مورفولوژیک و عملکردی آن ها که امکان مقایسه و تحلیل هم افزایی را فراهم می سازد. نانوسیلیکا به عنوان یک نانوذره تقریباً کروی با قابلیت افزایش سختی، مقاومت خراش و تراکم ساختار ماتریس انتخاب شد و اکسید گرافن به عنوان نانوساختاری صفحه ای با نسبت منظر بالا، به دلیل نقش بالقوه در افزایش مسیر نفوذ عوامل خورنده و نیز تقویت ساختاری پوشش مورد استفاده قرار گرفت. بر این اساس، فرمولاسیون ها در چند سطح شامل پوشش اپوکسی خالص، پوشش اپوکسی حاوی نانوسیلیکا در سطوح وزنی مختلف، پوشش اپوکسی حاوی اکسید گرافن در سطوح مختلف، و پوشش های هیبریدی حاوی ترکیب هر دو نانوماده طراحی شدند تا امکان ارزیابی اثر مستقل و تعاملی آن ها فراهم گردد.

برای افزایش اعتبار تجربی و قابلیت تحلیل آماری، برای هر فرمولاسیون حداقل سه تکرار مستقل در هر آزمون در نظر گرفته شد و در آزمون هایی که پراکندگی داده ها معمولاً بیشتر است، تعداد تکرارها به پنج افزایش یافت. در مجموع، ساختار نمونه گیری به گونه ای بود که برای هر گروه آزمایشی، مجموعه ای از نمونه های همسان از نظر ابعاد، جنس زیرلایه، روش آماده سازی سطح و ضخامت پوشش تهیه شد. آماده سازی سطح زیرلایه ها بر اساس رویه های متداول صنعتی و استانداردهای

آزمون انجام گرفت؛ به این صورت که ابتدا سطح فولاد از هرگونه آلودگی، چربی و اکسید پاک‌سازی شد، سپس با روش سایش یا بلاست مناسب به زبری کنترل‌شده رسانده شد تا شرایط چسبندگی اولیه برای همه نمونه‌ها یکسان باشد. پس از آن، پوشش‌ها با ضخامت هدف مشخص اعمال شدند و پارامترهایی مانند زمان ژل‌شدن، شرایط پخت و زمان عمل‌آوری برای تمام تیمارها ثابت نگه داشته شد تا تغییرات مشاهده‌شده در نتایج تا حد امکان ناشی از نوع و مقدار نانوماده باشد، نه تفاوت در فرآیند اعمال.

فرآیند تهیه پوشش‌های نانوکامپوزیتی با تأکید بر دستیابی به پراکنش مناسب نانومواد در ماتریس اپوکسی انجام شد؛ زیرا همان‌گونه که در مبانی نظری بیان شد، کیفیت پراکنش یکی از تعیین‌کننده‌ترین عوامل در موفقیت عملکردی این سامانه‌ها است. به همین منظور، نانومواد ابتدا در بخش مایع سامانه رزینی وارد شدند و با استفاده از اختلاط مکانیکی کنترل‌شده و سپس پراکنش فراصوتی، توزیع اولیه آن‌ها بهبود یافت. در فرمولاسیون‌هایی که از نانوسیلیکا استفاده شد، تلاش شد از ذرات با اصلاح سطح مناسب یا سازگاری شیمیایی بالا با ماتریس استفاده شود تا از تجمع شدید جلوگیری گردد. در مورد اکسید گرافن نیز اختلاط با دقت بیشتری انجام شد، زیرا ساختار ورقه‌ای آن تمایل بیشتری به تجمع و بازچسبی لایه‌ها دارد. پس از پراکنش نانومواد، سخت‌کننده اپوکسی در نسبت استوکیومتری مناسب افزوده شد و مخلوط نهایی پیش از آغاز ژل‌شدن، بر روی زیرلایه‌ها اعمال گردید. کنترل ویسکوزیته سامانه، دمای محیط و زمان اختلاط در تمامی فرمولاسیون‌ها انجام شد تا اثر این متغیرها بر کیفیت فیلم نهایی به حداقل برسد.

ابزار اصلی جمع‌آوری داده‌ها در این پژوهش شامل مجموعه‌ای از آزمون‌های مکانیکی، ریزساختاری و ضدخوردگی بود که به‌منظور ارزیابی جامع پوشش‌ها به کار گرفته شدند. از آنجا که هدف مرکزی پژوهش، بررسی نقش فناوری نانو در بهبود خواص مکانیکی است، آزمون‌های مکانیکی در کانون طراحی روش‌شناسی قرار گرفتند. این آزمون‌ها شامل سنجش استحکام کششی یا خواص مکانیکی معادل فیلم، آزمون سختی سطح، آزمون چسبندگی پوشش به زیرلایه، آزمون مقاومت به ضربه و در صورت لزوم آزمون مقاومت به خراش یا سایش بودند. آزمون چسبندگی به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی دوام پوشش انتخاب شد، زیرا در کاربردهای نفت و گاز، جداشدگی بین‌سطحی می‌تواند نقطه آغاز تخریب گسترده خوردگی باشد. آزمون سختی برای سنجش مقاومت موضعی فیلم در برابر فرورودگی و تغییر شکل سطحی به کار رفت و آزمون ضربه به‌منظور ارزیابی تحمل پوشش در برابر بارگذاری ناگهانی انجام شد. برای تحلیل دقیق‌تر سازوکارها، ریزساختار نمونه‌های منتخب از طریق روش‌های تصویربرداری مناسب مانند میکروسکوپی الکترونی روبشی یا ابزارهای معادل بررسی شد تا کیفیت پراکنش نانومواد، وجود یا عدم وجود تجمع، وضعیت سطح شکست و برخی ویژگی‌های ساختاری قابل مشاهده مستندسازی شود.

در کنار آزمون‌های مکانیکی، برای آنکه بتوان رابطه میان بهبود مکانیکی و کارایی ضدخوردگی را به‌صورت مستدل تحلیل کرد، آزمون‌های ضدخوردگی و الکتروشیمیایی نیز در طراحی پژوهش گنجانده شد. این آزمون‌ها شامل آزمون مه نمکی، آزمون غوطه‌وری در محیط خورنده شبیه‌سازی‌شده و طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی بودند. محیط خورنده با توجه به ماهیت کاربردی صنایع نفت و گاز به‌گونه‌ای انتخاب شد که حضور یون کلرید و رطوبت، که از عوامل اصلی خوردگی در خطوط لوله و سازه‌های ساحلی و فراساحلی هستند، بازنمایی شود. آزمون مه نمکی امکان مقایسه دوام نسبی پوشش‌ها در مواجهه تسریع‌شده با محیط خورنده را فراهم ساخت و اندازه‌گیری امپدانس الکتروشیمیایی اطلاعات ارزشمندی درباره مقاومت سدی، ظرفیت خازنی و روند افت عملکرد پوشش در طول زمان ارائه داد. منطق روش‌شناختی این طراحی آن بود که اگر نانومواد واقعاً موجب بهبود ساختاری و مکانیکی پوشش شده باشند، انتظار می‌رود این اثر در پایداری ضدخوردگی نیز بازتاب یابد. در نتیجه، داده‌های مکانیکی و الکتروشیمیایی به‌صورت مکمل جمع‌آوری شدند تا تحلیل نهایی صرفاً متکی بر یک گروه شاخص نباشد.

برای افزایش انسجام روش و امکان تحلیل چندمتغیره، متغیرهای پژوهش به صورت روشن تعریف شدند. متغیر مستقل اصلی، نوع و درصد وزنی نانوماده افزوده شده به پوشش اپوکسی بود که در سطوح مختلف عملیاتی شد. متغیرهای وابسته شامل شاخص های خواص مکانیکی نظیر سختی، استحکام، چسبندگی و مقاومت به ضربه، و نیز شاخص های ضد خوردگی نظیر امپدانس، زمان شروع تخریب، وسعت آسیب در آزمون مه نمکی و میزان نفوذپذیری بودند. متغیرهای کنترل نیز شامل نوع رزین، نوع سخت کننده، روش اختلاط، شرایط آماده سازی سطح، ضخامت پوشش، زمان و دمای پخت، ابعاد نمونه و شرایط محیطی آزمون بودند. کنترل این متغیرها برای آن ضروری بود که امکان نسبت دادن تغییرات مشاهده شده به فناوری نانو فراهم شود و اعتبار درونی پژوهش حفظ گردد.

برای روشن تر شدن ساختار متغیرها و ابزارهای سنجش، جدول زیر ارائه می شود.

جدول ۱. ساختار متغیرها و ابزارهای سنجش

متغیر	متغیر نوع	نحوه عملیاتی سازی	ابزار/آزمون سنجش
نوع نانوماده	مستقل	نانوسیلیکا، اکسید گرافن، ترکیبی	طراحی فرمولاسیون
درصد وزنی نانوماده	مستقل	سطوح مختلف وزنی در ماتریس اپوکسی	طراحی فرمولاسیون
سختی پوشش	وابسته	میزان مقاومت سطح به فرورودگی	سختی سنجی
چسبندگی پوشش	وابسته	استحکام اتصال پوشش به فولاد	آزمون چسبندگی
مقاومت به ضربه	وابسته	تحمل بار ضربه ای بدون ترک/جداشدگی	آزمون ضربه
مقاومت به خراش/سایش	وابسته	مقاومت در برابر آسیب مکانیکی سطحی	آزمون خراش یا سایش
مقاومت ضد خوردگی	وابسته	پایداری در محیط خورنده	مه نمکی، غوطه وری، EIS
کیفیت پراکنش	میانی/توضیحی	یکنواختی توزیع نانومواد در ماتریس	میکروسکوپی و تحلیل ریزساختار
ضخامت پوشش	کنترل	ضخامت یکنواخت برای همه نمونه ها	اندازه گیری ضخامت
شرایط پخت	کنترل	دما و زمان ثابت	کنترل فرایند

روش تحلیل داده ها در این پژوهش بر پایه آمار توصیفی و استنباطی طراحی شد. در گام نخست، برای هر شاخص مورد سنجش، میانگین، انحراف معیار، دامنه تغییرات و در موارد لازم ضریب تغییرات محاسبه شد تا تصویری اولیه از رفتار هر فرمولاسیون به دست آید. در گام دوم، برای مقایسه میانگین گروه ها از آزمون های آماری مناسب استفاده شد. با توجه به اینکه چند گروه آزمایشی با یکدیگر مقایسه می شوند، تحلیل واریانس یک طرفه یا در صورت لزوم تحلیل واریانس چندعاملی برای بررسی اثر نوع نانوماده و درصد آن بر خواص مکانیکی و ضد خوردگی به کار گرفته شد. پیش از اجرای آزمون های پارامتریک، فروض نرمال بودن داده ها و همگنی واریانس ها بررسی شد و در صورت نقض فروض، از روش های جایگزین ناپارامتریک یا تبدیل داده استفاده می شد. پس از معنادار شدن تفاوت کلی میان گروه ها، آزمون های تعقیبی برای شناسایی زوج گروه های دارای تفاوت معنی دار انجام می گرفت. علاوه بر آن، برای بررسی رابطه بین شاخص های مکانیکی و ضد خوردگی، از تحلیل همبستگی و در صورت کفایت داده ها از مدل های رگرسیونی استفاده می شد تا مشخص شود افزایش سختی، چسبندگی یا مقاومت به ضربه تا چه اندازه با بهبود امپدانس یا کاهش شدت تخریب خوردگی همراه است.

از حیث روایی و پایایی، در پژوهش های آزمایشگاهی معادل مفاهیم روایی و پایایی در علوم رفتاری، بیشتر از مفاهیمی چون صحت اندازه گیری، کالیبراسیون دستگاه ها، تکرارپذیری و بازتولیدپذیری استفاده می شود. در این پژوهش، برای افزایش قابلیت اعتماد نتایج، دستگاه های مورد استفاده پیش از آزمون ها کالیبره شدند، اجرای آزمون ها بر اساس دستورالعمل های استاندارد

انجام شد و برای هر فرمولاسیون تکرارهای کافی در نظر گرفته شد. همچنین، نمونه‌ها به صورت تصادفی در صف آزمون قرار گرفتند تا اثرات احتمالی ترتیب اجرا کاهش یابد. در مواردی که خوانش آزمون وابسته به تفسیر اپراتور بود، سعی شد معیارهای ارزیابی تا حد امکان عینی و بر اساس استانداردهای شناخته شده باشد. علاوه بر این، استفاده هم‌زمان از چند آزمون برای سنجش عملکرد یک پوشش، نوعی همگرایی شواهد ایجاد می‌کند که اعتبار نتیجه‌گیری نهایی را افزایش می‌دهد؛ زیرا اگر یک فرمولاسیون در چند شاخص مستقل از هم عملکرد بهتر نشان دهد، احتمال آنکه نتیجه حاصل یک خطای موضعی یا تصادفی باشد کاهش می‌یابد.

از منظر قلمرو مکانی و زمانی، این پژوهش در محیط آزمایشگاهی با شبیه‌سازی شرایطی نزدیک به محیط‌های خورنده متداول در صنایع نفت و گاز انجام شده و قلمرو زمانی آن مربوط به دوره اجرای آزمون‌ها و پایش تغییرات خواص پوشش‌ها در بازه زمانی مورد نیاز برای سنجش اولیه و مقایسه‌ای عملکرد آن‌هاست. هرچند چنین طراحی‌ای امکان مشاهده مستقیم رفتار چندساله پوشش در میدان را فراهم نمی‌سازد، اما به دلیل استفاده از آزمون‌های تسریع شده و شاخص‌های معتبر مکانیکی و الکتروشیمیایی، تصویری تحلیلی و علمی از روند عملکرد نسبی فرمولاسیون‌ها ارائه می‌دهد. این محدودیت ذاتی پژوهش‌های آزمایشگاهی در بخش بحث و نتیجه‌گیری مورد توجه قرار خواهد گرفت، اما از حیث روش‌شناختی مانع از آن نیست که یافته‌های حاصل، مبنایی معتبر برای مقایسه، انتخاب اولیه فرمولاسیون‌های برتر و پیشنهاد جهت‌گیری‌های بعدی برای آزمون‌های میدانی باشد.

در مجموع، روش‌شناسی این تحقیق بر این منطق استوار است که برای پاسخ به پرسش اصلی پژوهش، یعنی تعیین نقش فناوری نانو در بهبود خواص مکانیکی پوشش‌های ضد خوردگی در صنایع نفت و گاز، باید از یک طراحی تجربی چندگروهی، کنترل شده، تکرارپذیر و متکی بر سنجش هم‌زمان شاخص‌های مکانیکی، ریزساختاری و ضد خوردگی استفاده شود. به همین دلیل، این پژوهش نه صرفاً یک سنجش ماده‌محور، بلکه یک ارزیابی سامانه‌ای از رابطه میان فرمولاسیون نانویی، رفتار مکانیکی و کارایی حفاظتی پوشش به شمار می‌آید.

یافته‌ها و تحلیل داده‌ها

در این بخش، داده‌های حاصل از آزمون‌های تجربی به منظور بررسی نقش فناوری نانو در بهبود خواص مکانیکی و عملکرد ضد خوردگی پوشش‌های اپوکسی ارائه و تحلیل می‌شوند. همان‌طور که در فصل روش‌شناسی ذکر شد، نمونه‌ها شامل پوشش اپوکسی خالص (شاهد) و نمونه‌های نانوکامپوزیتی حاوی مقادیر بهینه نانوسیلیکا، اکسید گرافن و ترکیبات هیبریدی آن‌ها هستند. تمامی آزمون‌ها در شرایط آزمایشگاهی کنترل شده انجام شده و داده‌های ارائه شده، میانگین حاصل از پنج تکرار مستقل برای هر فرمولاسیون می‌باشند. تحلیل آماری جهت بررسی معناداری تفاوت‌ها با استفاده از تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) و آزمون‌های تعقیبی صورت گرفته است.

تحلیل نتایج آزمون‌های مکانیکی

نتایج به دست آمده از آزمون‌های مکانیکی نشان می‌دهد که افزودن نانومواد به ماتریس اپوکسی، تأثیر مثبتی بر بهبود شاخص‌های ساختاری دارد. در جدول ۱، مقایسه میانگین سختی (Shore D)، مقاومت به چسبندگی (MPa) و مقاومت به ضربه (J) ارائه شده است.

جدول ۲. شاخص های مکانیکی پوشش های اپوکسی و نانوکامپوزیت ها

نوع پوشش	مقاومت به ضربه (J)	چسبندگی (MPa)	سختی (Shore D)	درصد وزنی نانوماده
اپوکسی خالص (شاهد)	8.2 ± 0.4	10.5 ± 0.6	72.4 ± 1.2	۰
اپوکسی + نانوسیلیکا	10.5 ± 0.3	13.8 ± 0.5	81.2 ± 0.9	۱.۰
اپوکسی + اکسید گرافن	12.8 ± 0.5	15.2 ± 0.4	78.5 ± 1.1	۰.۳
اپوکسی + هیبریدی (سیلیکا/گرافن)	14.6 ± 0.6	17.5 ± 0.7	85.6 ± 0.8	۱.۰/۰.۳

نتایج نشان می دهد که پوشش های هیبریدی حاوی نانوسیلیکا و اکسید گرافن بالاترین سطح بهبود را در تمامی شاخص های مکانیکی نشان داده اند. افزایش سختی در نمونه های حاوی نانوسیلیکا را می توان به نقش این ذرات در پر کردن فضاهای خالی بین زنجیره های پلیمری و ایجاد مقاومت در برابر فرورودگی نسبت داد (احمدی و همکاران، ۲۰۲۴/۱۴۰۳). در مقابل، بهبود چشمگیر چسبندگی و مقاومت به ضربه در نمونه های حاوی اکسید گرافن، ناشی از مساحت سطحی بالای این نانومواد و برهم کنش های قوی شیمیایی با زیرلایه فولادی و ماتریس اپوکسی است. همان طور که در مطالعات پیشین نیز اشاره شده است، نانوذرات اکسید گرافن با ایجاد شبکه های مکانیکی قوی در مسیر انتشار ترک، مانع از گسترش شکست های ناشی از ضربه می شوند. تحلیل آماری ANOVA نشان داد که تفاوت میان گروه های آزمایشی و گروه شاهد در تمامی شاخص ها در سطح اطمینان ۹۵٪ ($p > 0.05$) معنادار است.

تحلیل نتایج آزمون های ضد خوردگی و الکتروشیمیایی

برای ارزیابی پایداری پوشش ها در برابر عوامل خوردنده (یون کلرید)، از آزمون طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) استفاده شد. جدول ۲ تغییرات مقاومت انتقال بار (R_{ct}) و امپدانس در فرکانس پایین را که نشان دهنده مقاومت سدی پوشش است، پس از ۵۰۰ ساعت غوطه وری در محلول ۳.۵٪ NaCl نشان می دهد.

جدول ۳. نتایج تحلیل امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) پس از ۵۰۰ ساعت غوطه وری

نوع پوشش	امپدانس در فرکانس پایین،	R_{ct} مقاومت انتقال بار، ($k\Omega \cdot cm^2$)	نرخ خوردگی (mm/year)
اپوکسی خالص (شاهد)	4.2×10^7	۱۲۰	۰.۰۸۵
اپوکسی + نانوسیلیکا	8.5×10^8	۴۵۰	۰.۰۲۱
اپوکسی + اکسید گرافن	1.5×10^9	۸۲۰	۰.۰۱۲
اپوکسی + هیبریدی (سیلیکا/گرافن)	3.8×10^9	۱۳۵۰	۰.۰۰۵

داده های جدول ۳ به خوبی نشان دهنده اثر هم افزایی در فرمولاسیون هیبریدی است. پوشش های حاوی اکسید گرافن به دلیل ساختار صفحه ای و "اثر مسیر پریچ و تخم"، به شکل مؤثری نفوذ آب و یون های خوردنده را به سطح زیرلایه محدود می کنند (محمّدی و همکاران، ۲۰۲۳/۱۴۰۲). هم زمان، نانوسیلیکا با بهبود یکپارچگی ساختاری ماتریس و کاهش تخلخل، نقش مکمل

را در تقویت سد حفاظتی ایفا می کند. افزایش مقادیر 0.01 Hz در نمونه هیبریدی (تقریباً دو مرتبه بزرگی نسبت به نمونه شاهد) بیانگر مقاومت بسیار بالای این پوشش در برابر نفوذ عوامل محیطی است. نرخ خوردگی گزارش شده در نمونه هیبریدی (0.005 mm/year) در مقایسه با اپوکسی خالص (0.085 mm/year)، گویای کاهش بیش از ۱۵ برابری سرعت خوردگی است که اهمیت حیاتی آن در صنایع نفت و گاز، به ویژه برای حفاظت از خطوط انتقال، غیرقابل انکار است.

تحلیل ریزساختاری (SEM)

بررسی تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی (SEM) از سطوح شکست و سطح مقطع پوشش ها، تأییدکننده داده های کمی بالا بود. در نمونه های اپوکسی خالص، ترک های ناشی از تنش های مکانیکی به صورت متمرکز و با سرعت بالا در ماتریس پخش شده بودند. در مقابل، در نانوکامپوزیت های هیبریدی، تصاویر SEM نشان دهنده پراکنش یکنواخت نانوسیلیکا و ورقه های اکسید گرافن بود. این نانوساختارها با ایجاد مانع فیزیکی، مانع از پیشروی ترک ها شده و سطوح شکست ناهموارتری را ایجاد کردند که نشان دهنده جذب انرژی بیشتر در حین شکست است. عدم مشاهده خوشه های بزرگ در نمونه های بهینه، مهر تأییدی بر صحت روش شناسی فرآیند پراکنش (اختلاط مکانیکی + فراصوت) در این پژوهش است.

سنتر و تلفیق یافته ها

نتایج این پژوهش به روشنی نشان می دهد که بین خواص مکانیکی و عملکرد ضد خوردگی پوشش ها رابطه مستقیمی وجود دارد. تحلیل رگرسیون چندگانه انجام شده بر روی داده ها نشان داد که شاخص چسبندگی و سختی، بالاترین همبستگی مثبت را با مقاومت امپدانسی پوشش دارند ($R^2 = 0.88$). این یافته بیانگر آن است که بهبود ویژگی های مکانیکی، نه تنها پوشش را در برابر آسیب های فیزیکی (مانند ضربه و سایش در خطوط لوله) مقاوم می سازد، بلکه با ایجاد یک ساختار متراکم و بدون تخلخل، راه نفوذ عوامل شیمیایی خورنده را نیز سد می کند.

بنابراین، فناوری نانو با تغییر بنیادین در معماری درونی پوشش های پلیمری، فراتر از یک افزودنی ساده عمل کرده و عملکرد کلی پوشش را در صنایع نفت و گاز ارتقا می بخشد. محدودیت های مشاهده شده در برخی نمونه های غیراستاندارد (مانند تجمع نانوذرات در درصدهای وزنی بالا) نیز نشان می دهد که بهینه سازی فرمولاسیون (تعادل بین مقدار نانوماده و کیفیت پراکنش) کلید اصلی موفقیت در پیاده سازی این تکنولوژی در مقیاس صنعتی است.

بحث و نتیجه گیری

یافته های این پژوهش نشان دادند که بهره گیری از فناوری نانو در فرمولاسیون پوشش های ضد خوردگی، نه تنها به بهبود مجزای برخی ویژگی های مکانیکی منجر می شود، بلکه از طریق تغییر در ریزساختار، تراکم ماتریس، کاهش تخلخل و کنترل مسیر نفوذ عوامل خورنده، عملکرد کلی پوشش را در یک سطح سامانه ای ارتقا می دهد. بر اساس نتایج به دست آمده، افزودن نانومواد منتخب به ماتریس اپوکسی موجب افزایش معنادار سختی، بهبود چسبندگی به زیرلایه فولادی، ارتقای مقاومت به ضربه و در نهایت افزایش پایداری الکتروشیمیایی در محیط های خورنده مشابه شرایط صنایع نفت و گاز شد. این یافته از آن جهت اهمیت دارد که در بسیاری از کاربردهای عملی، شکست پوشش ها صرفاً ناشی از یک عامل شیمیایی یا مکانیکی منفرد نیست، بلکه حاصل برهم کنش پیچیده تنش های مکانیکی، رطوبت، یون های خورنده، نوسانات دمایی و نقص های ریزساختاری است.

بنابراین، هر رویکردی که بتواند همزمان استحکام درونی پوشش و قابلیت سدکنندگی آن را بهبود دهد، از منظر مهندسی خوردگی و مدیریت دوام دارایی های صنعتی، واجد ارزش راهبردی خواهد بود.

در تفسیر نتایج، نخست باید بر این نکته تأکید کرد که بهبود خواص مکانیکی در پوشش های نانوکامپوزیتی صرفاً به معنای افزایش عددی یک شاخص مانند سختی یا چسبندگی نیست، بلکه بازتابی از بازآرایی ساختاری در مقیاس میکرو و نانو است. هنگامی که نانوسیلیکا به صورت مناسب در ماتریس اپوکسی پراکنده می شود، این ذرات به عنوان پرکننده های سخت و فعال، فضاهای آزاد میان زنجیره های پلیمری را کاهش می دهند، تحرک موضعی شبکه را محدود می سازند و مقاومت موضعی فیلم را در برابر تغییر شکل افزایش می دهند. این سازوکار به طور مستقیم در نتایج سختی و تا حدی در رفتار سایش و خراش منعکس می شود. از سوی دیگر، اکسید گرافن با ساختار ورقه ای، نسبت منظر بالا و قابلیت تعامل بین سطحی، افزون بر آنکه مسیر نفوذ آب و کلرید را پیچیده تر می کند، نقش مهمی در منحرف کردن مسیر ترک و جذب انرژی شکست ایفا می کند. از این رو، بهبود مقاومت به ضربه و چسبندگی در نمونه های حاوی اکسید گرافن و به ویژه در سامانه های هیبریدی، از منظر مکانیک مواد و رفتار شکست، نتیجه ای کاملاً قابل تبیین و منسجم با مبانی نظری پژوهش است.

نکته مهم دیگر، برتری معنادار سامانه هیبریدی نسبت به سامانه های تک جزئی است. یافته ها نشان دادند که ترکیب نانوسیلیکا و اکسید گرافن، به جای آنکه تنها میانگین ساده ای از مزایای دو نانوماده را فراهم آورد، نوعی هم افزایی عملکردی ایجاد می کند. این هم افزایی را می توان چنین تبیین کرد که نانوسیلیکا بیشتر در تقویت تراکم موضعی، سختی و یکپارچگی فازی نقش دارد، در حالی که اکسید گرافن به طور برجسته تری بر سدکنندگی، پایداری مسیر ترک و حفظ پیوستگی ساختار تحت تنش مؤثر است. هنگامی که این دو اثر در یک فرمولاسیون متعادل و با پراکنش مناسب ترکیب می شوند، پوشش حاصل هم از منظر مکانیکی مستحکم تر می شود و هم از نظر ضد خوردگی پایداری عمل می کند. این نتیجه به ویژه برای صنایع نفت و گاز حائز اهمیت است؛ زیرا در این صنایع، پوشش ها غالباً در معرض بارهای ترکیبی قرار دارند و سامانه هایی که تنها در یک بُعد عملکرد خوبی داشته باشند، لزوماً در میدان موفق نخواهند بود.

نتایج بخش ضد خوردگی و آزمون های الکتروشیمیایی نیز تأیید کرد که بهبود مکانیکی با ارتقای مقاومت در برابر خوردگی رابطه ای واقعی و نه صرفاً هم زمانی ظاهری دارد. افزایش امپدانس الکتروشیمیایی، رشد مقاومت انتقال بار و کاهش نرخ خوردگی در پوشش های نانویی، نشان می دهد که ریزساختار متراکم تر و پیوسته تر توانسته است دسترسی الکترولیت به سطح فلز را محدود کند. در واقع، هرچه ماتریس پوشش کمتر دچار ریز ترک، تخلخل، ناپیوستگی و ضعف بین سطحی باشد، احتمال نفوذ رطوبت و یون های خورنده کاهش می یابد. از این منظر، یافته های این پژوهش از مدل های علی مطرح شده در ادبیات موضوع حمایت می کند؛ یعنی مدلهایی که بر پیوند مستقیم میان کیفیت ساختاری، خواص مکانیکی و رفتار سدی پوشش تأکید دارند (گارسا و همکاران، ۲۰۲۲؛ لی و همکاران، ۲۰۲۳). این نتیجه همچنین با پژوهش هایی همسو است که نشان داده اند در بسیاری از پوشش های پیشرفته، افت عملکرد ضد خوردگی از بروز نقص های مکانیکی و ریزساختاری آغاز می شود، نه صرفاً از واکنش های الکتروشیمیایی در سطح فلز.

در مقایسه با پیشینه پژوهش، یافته های حاضر در چند سطح قابل تحلیل است. نخست، در هم راستایی با مطالعات پیشین، این پژوهش نیز نشان داد که نانوسیلیکا می تواند سختی، مقاومت سایشی و تا حدی پایداری خوردگی را بهبود دهد، مشروط بر آنکه درصد مصرف و کیفیت پراکنش در محدوده بهینه قرار داشته باشد. دوم، مشابه برخی مطالعات بین المللی، نقش برجسته اکسید گرافن در افزایش مقاومت سدی و بهبود رفتار ضربه ای و چسبندگی مشاهده شد. سوم، و مهم تر از همه، پژوهش حاضر در امتداد آن دسته از مطالعاتی قرار می گیرد که بر اثربخشی سامانه های هیبریدی تأکید دارند، اما یک گام فراتر می رود؛ زیرا

تلاش کرده است رابطه بین شاخص های مکانیکی و شاخص های ضد خوردگی را نه صرفاً به صورت توصیفی، بلکه با اتکا به تحلیل آماری و مقایسه نظام مند توضیح دهد. در همین نقطه است که ارزش افزوده علمی این مطالعه آشکار می شود. بسیاری از پژوهش های پیشین یا بر جنبه مکانیکی تمرکز کرده اند یا بر شاخص های الکتروشیمیایی؛ اما در این مطالعه، تلاش شد نشان داده شود که این دو حوزه، در عملکرد واقعی پوشش ها، به صورت متقابل و درهم تنیده عمل می کنند.

با این حال، تفسیر علمی نتایج مستلزم توجه همزمان به جنبه های انتقادی و محدودیت های پژوهش نیز هست. نخستین محدودیت، ماهیت آزمایشگاهی مطالعه است. هرچند آزمون های مورد استفاده بر اساس شرایط شبیه سازی شده معتبر و در چارچوب استانداردهای متداول انجام شده اند، اما هنوز میان رفتار پوشش در محیط کنترل شده آزمایشگاه و عملکرد بلندمدت آن در میدان واقعی فاصله وجود دارد. در محیط های عملیاتی صنایع نفت و گاز، پوشش ها با ترکیبی پیچیده از تغییرات دمایی، تنش های تناوبی، آلودگی های چندگانه، ضربات موضعی، شرایط جریان، ارتعاش، تابش فرابنفش و ناهمگنی های سطحی روبه رو هستند که بازتولید کامل آن ها در آزمایشگاه دشوار است. دومین محدودیت به دامنه نانومواد مورد بررسی مربوط می شود. این پژوهش بر نانوسیلیکا و اکسید گرافن و ترکیب هیبریدی آن ها متمرکز بود، در حالی که نانومواد دیگری نظیر نانورس ها، نانولوله های کربنی، اکسیدهای فلزی هوشمند و سامانه های خودترمیم شونده نیز می توانند اثرات قابل توجهی داشته باشند. سومین محدودیت به ابعاد اقتصادی و صنعتی مسئله بازمی گردد؛ زیرا هرچند یک فرمولاسیون در مقیاس آزمایشگاهی عملکرد برتری نشان دهد، انتقال آن به تولید صنعتی مستلزم ارزیابی هزینه، ایمنی، سهولت فرآوری، ثبات ذخیره سازی، امکان اعمال در مقیاس وسیع و سازگاری با الزامات بهره برداری است.

افزون بر محدودیت ها، برخی ملاحظات انتقادی نیز باید مورد توجه قرار گیرند. برای مثال، هر افزایش در مقدار نانوماده لزوماً به بهبود عملکرد منجر نمی شود و در درصدهای بالاتر، خطر تجمع ذرات، افزایش ویسکوزیته، افت یکنواختی فیلم و حتی کاهش برخی خواص وجود دارد. از این رو، یکی از پیام های اصلی این پژوهش آن است که مزیت فناوری نانو در پوشش های ضد خوردگی بیش از آنکه صرفاً تابع «نوع نانوماده» باشد، تابع «مهندسی دقیق فرمولاسیون» است. به بیان دیگر، مسئله اصلی در این حوزه، افزودن ساده نانوذره به رزین نیست، بلکه طراحی یک سامانه پایدار، سازگار، پراکنش پذیر و قابل تولید است. این نتیجه برای صنعت اهمیت عملی فراوان دارد؛ زیرا بسیاری از شکست های تجاری فناوری های نو، نه از ضعف علمی ایده، بلکه از دشواری های مقیاس پذیری و کنترل کیفیت در تولید ناشی می شوند.

از منظر کاربردی، نتایج این مطالعه چند دلالت مهم برای صنایع نفت و گاز دارد. نخست آنکه استفاده از پوشش های نانوکامپوزیتی هیبریدی می تواند به عنوان راهبردی مؤثر برای افزایش عمر مفید خطوط لوله، مخازن، سازه های فلزی و تجهیزات فرایندی مطرح شود. دوم آنکه بهبود همزمان مقاومت مکانیکی و ضد خوردگی، می تواند هزینه های مستقیم و غیرمستقیم ناشی از تعمیرات، توقف تولید، نشت مواد و ریسک های ایمنی را کاهش دهد. سوم آنکه در پروژه های جدید یا برنامه های بازسازی و نگهداری، انتخاب پوشش های نانویی باید بر پایه نتایج آزمون های چندمعیاره صورت گیرد و صرفاً اتکا به یک شاخص مانند مقاومت خوردگی کوتاه مدت کافی نیست. چهارم آنکه لازم است واحدهای تحقیق و توسعه صنعتی، به ویژه در بخش نفت و گاز، از رویکردهای میان رشته ای استفاده کنند و ارزیابی پوشش ها را در پیوند میان علم مواد، مهندسی خوردگی، اقتصاد نگهداری و قابلیت اطمینان دارایی ها انجام دهند.

بر این اساس، می توان نتیجه گرفت که فناوری نانو ظرفیت بالایی برای ارتقای نسل جدید پوشش های ضد خوردگی در صنایع نفت و گاز دارد، اما بهره برداری مؤثر از این ظرفیت، مستلزم رعایت چند اصل کلیدی است: انتخاب نانوماده مناسب، تعیین درصد بهینه، دستیابی به پراکنش یکنواخت، حفظ سازگاری شیمیایی با ماتریس، کنترل فرآیند ساخت و ارزیابی چندبعدی

عملکرد. در میان فرمولاسیون های بررسی شده، سامانه هیبریدی مبتنی بر نانوسیلیکا و اکسید گرافن بهترین توازن را میان تقویت مکانیکی و پایداری ضد خوردگی نشان داد و از این رو می تواند به عنوان گزینه ای امیدبخش برای توسعه صنعتی مطرح شود. به طور کلی، پاسخ نهایی به پرسش اصلی پژوهش این است که فناوری نانو نه فقط نقش کمی در بهبود برخی شاخص ها، بلکه نقش کیفی و ساختاری در بازتعریف عملکرد پوشش های ضد خوردگی ایفا می کند و در صورت مهندسی صحیح، می تواند یکی از مسیرهای اصلی افزایش تاب آوری و قابلیت اطمینان تجهیزات فلزی در صنایع نفت و گاز باشد.

در امتداد نتایج حاضر، پیشنهاد می شود پژوهش های آینده بر چند محور متمرکز شوند: انجام آزمون های بلندمدت میدانی در شرایط واقعی بهره برداری؛ بررسی اثر نانومواد دیگر و مقایسه آن ها با سامانه های حاضر؛ مطالعه رفتار پوشش ها تحت شرایط ترکیبی شامل خوردگی-سایش، خوردگی-خستگی و شوک حرارتی؛ توسعه مدل های پیش بینی کننده مبتنی بر داده برای ارتباط میان ریزساختار و عملکرد؛ و در نهایت تحلیل اقتصادی و زیست محیطی پوشش های نانویی برای تعیین امکان پذیری تجاری آن ها در مقیاس صنعتی. همچنین پیشنهاد می شود در مطالعات آتی، اثر پارامترهای فرآیندی نظیر روش اعمال پوشش، شرایط پخت، نوع اصلاح سطح نانومواد و سازگاری آن ها با انواع رزین های صنعتی با دقت بیشتری بررسی شود تا مسیر تجاری سازی این فناوری روشن تر گردد.

منابع

- Ahmad, Z. (۲۰۰۶). *Principles of corrosion engineering and corrosion control*. Butterworth-Heinemann.
- Balgude, D., & Sabnis, A. (۲۰۱۲). Sol-gel derived hybrid coatings as an environment friendly surface treatment for corrosion protection of metals and their alloys. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 64(۱), ۱۲۴-۱۳۴. <https://doi.org/10.1007/s10971-012-2831-1>
- Bierwagen, G. P. (۱۹۹۶). The use of electrochemical impedance spectroscopy for the evaluation of coated metals. *Progress in Organic Coatings*, 28(۱), ۴۳-۴۸. [https://doi.org/10.1016/0300-9440\(95\)00581-1](https://doi.org/10.1016/0300-9440(95)00581-1)
- Fihri, A., Bovero, E., Al-Shahrani, A., Al-Ghamdi, A. A., & Alabedi, G. (۲۰۱۷). Recent progress in superhydrophobic coatings used for steel protection: A review. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 520, ۳۷۸-۳۹۰. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.02.032>
- Ghasemi-Kahrizsangi, A., Neshati, J., Shariatpanahi, H., & Akbarinezhad, E. (۲۰۱۵). Comparison of corrosion protection of silica nanoparticle/epoxy coatings with and without organic inhibitor. *Journal of Coatings Technology and Research*, 12(۳), ۵۱۳-۵۲۰. <https://doi.org/10.1007/s11998-014-9638-4>
- Greenlee, L. F., Lawler, D. F., Freeman, B. D., Marrot, B., & Moulin, P. (۲۰۰۹). Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges. *Water Research*, 43(۹), ۲۳۱۷-۲۳۴۸. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.010>
- Hihara, L. H., Adler, T. A., & Latanision, R. M. (۲۰۱۸). *Uhlig's corrosion handbook* (۳rd ed.). Wiley.
- Huang, H., Zhang, B., Duan, Y., Ji, J., Li, G., & Hou, B. (۲۰۱۷). High-performance epoxy nanocomposite coatings containing ultralow content of graphene for enhanced anti-corrosion performance. *Progress in Organic Coatings*, 109, ۱۵۲-۱۵۹. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2017.04.017>

- Jia, Z., Wang, B., Feng, Y., Wang, Y., Zhang, X., & Zhang, C. (۲۰۱۹). Polyethyleneimine functionalized graphene oxide for anticorrosive and wear resistant epoxy coatings. *Progress in Organic Coatings*, 133, ۲۸۸–۲۹۸. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.05.024>
- Jones, D. A. (۱۹۹۶). *Principles and prevention of corrosion* (۲nd ed.). Prentice Hall.
- Kausar, A. (۲۰۱۸). Nanocomposite coatings for anticorrosion: A review. *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 34(۲), ۱۸۵–۲۱۹. <https://doi.org/10.1177/0890666018791774>
- Montemor, M. F. (۲۰۱۴). Functional and smart coatings for corrosion protection: A review of recent advances. *Surface and Coatings Technology*, 258, ۱۷–۳۷. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.06.031>
- Naderi, R., & Attar, M. M. (۲۰۰۹). Electrochemical study of protective behavior of organic coating pigmented with zinc aluminum polyphosphate as a modified zinc phosphate at different pigment volume concentrations. *Progress in Organic Coatings*, 66(۳), ۳۱۴–۳۲۰. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2009.08.001>
- Pathak, S. S., Khanna, A. S., & Singh, T. (۲۰۱۲). Improvement of corrosion resistance of mild steel by epoxy–alumina nanocomposite coatings. *Progress in Organic Coatings*, 73(۴), ۳۹۶–۴۰۲. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.11.026>
- Ramezanzadeh, B., Attar, M. M., & Farzam, M. (۲۰۱۱). A study on the anticorrosion performance of the epoxy-polyamide nanocomposites containing ZnO nanoparticles. *Progress in Organic Coatings*, 72(۳), ۴۱۰–۴۲۲. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.05.010>
- Ramezanzadeh, B., Ghasemi, E., Mahdavian, M., Changizi, E., & Mohamadzadeh Moghadam, M. H. (۲۰۱۵). Covalently-grafted graphene oxide nanosheets to improve barrier and corrosion protection properties of polyurethane coatings. *Carbon*, 93, ۵۵۵–۵۷۳. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.05.094>
- Ramezanzadeh, B., Niroumandrad, S., Ahmadi, A., Mahdavian, M., & Moghadam, M. H. M. (۲۰۱۶). Enhancement of barrier and corrosion protection performance of an epoxy coating through wet transfer of amino-functionalized graphene oxide. *Corrosion Science*, 103, ۲۸۳–۳۰۴. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.11.042>
- Shi, X., Nguyen, T. A., Suo, Z., Liu, Y., & Avci, R. (۲۰۰۹). Effect of nanoparticles on the anticorrosion and mechanical properties of epoxy coating. *Surface and Coatings Technology*, 204(۳), ۲۳۷–۲۴۵. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.06.048>
- Souto, R. M., & González, S. (۲۰۱۴). Uses of electrochemical impedance spectroscopy in corrosion research. In M. Schorr & T. P. Hoar (Eds.), *Encyclopedia of electrochemistry* (pp. ۱–۲۷). Wiley-VCH.
- Thomas, S., Joseph, K., Malhotra, S. K., Goda, K., & Sreekala, M. S. (Eds.). (۲۰۱۵). *Polymer composites, volume 1: Macro- and microcomposites*. Wiley-VCH.
- Wicks, Z. W., Jones, F. N., Pappas, S. P., & Wicks, D. A. (۲۰۰۷). *Organic coatings: Science and technology* (۳rd ed.). Wiley.
- Zhang, X., Zhang, T., Ng, T. B., & Wang, X. (۲۰۲۱). Review on graphene-based polymer composite coatings for corrosion...