

مرور تحلیلی بر کاربردهای نانولوله‌های کربنی در حفاظت از خوردگی سازه‌های دریایی

زینب مکرمی^{۱*}

۱- کارشناسی ارشد شیمی فیزیک، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

رایانامه: mokarrami7220@gmail.com

خلاصه

خوردگی سازه‌ها در محیط‌های دریایی یکی از چالش‌های اصلی اقتصادی و ایمنی در صنایع دریایی است. روش‌های سنتی حفاظت در برابر خوردگی نظیر پوشش‌های پلیمری و حفاظت کاتدی با محدودیت‌هایی مانند دوام کوتاه و کاهش کارایی در شرایط سخت دریایی مواجه هستند. نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر نانولوله‌های کربنی به‌عنوان پوشش‌های ضد خوردگی نوین، با ایجاد مسیرهای نفوذ پیچیده و بهبود خواص مکانیکی، عملکرد حفاظتی پوشش‌ها را به‌طور قابل‌توجهی ارتقا می‌دهند. این مقاله به بررسی نظام‌مند مطالعات اخیر در زمینه خواص فیزیکی و شیمیایی CNTها، چالش‌های خوردگی در صنایع دریایی و مزایای استفاده از نانوکامپوزیت‌های CNT به‌عنوان پوشش محافظت تحلیل شده است. همچنین، روش‌های ساخت و پردازش این نانوکامپوزیت‌ها، مکانیسم‌های حفاظت در برابر خوردگی و عملکرد آن‌ها در شرایط آزمایشگاهی و محیط‌های دریایی واقعی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که این نانوکامپوزیت‌ها با افزایش مقاومت خوردگی و کاهش رسوب زیستی، عملکرد بلندمدت مناسبی ارائه می‌کنند. با وجود این، بهینه‌سازی فرآیند ساخت و توسعه پوشش‌های هیبریدی مسیرهای پژوهشی آینده برای افزایش اثربخشی حفاظت در برابر خوردگی در محیط‌های دریایی محسوب می‌شوند.

کلمات کلیدی: نانولوله‌های کربنی، خوردگی دریایی، پوشش‌های ضد خوردگی، محیط‌های کلریدی

۱. مقدمه

خوردگی فلزات یک پدیده طبیعی و اجتناب‌ناپذیر است که در اثر برهم‌کنش مواد فلزی با محیط اطراف رخ می‌دهد و به‌تدریج موجب افت خواص مکانیکی و تخریب ساختاری آن‌ها می‌شود. این پدیده در محیط‌های دریایی به‌دلیل ماهیت به‌شدت خورنده آب شور شدت بیشتری دارد و می‌تواند منجر به آسیب جدی سازه‌ها، ازکارافتادگی تجهیزات و تحمیل هزینه‌های قابل‌توجه تعمیر و نگهداری شود که به‌طور مستقیم ایمنی و بهره‌وری عملیات دریایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. حضور نمک‌های محلول، به‌ویژه یون‌های کلرید، موجب افزایش رسانایی الکترولیتی آب دریا شده و با تسهیل انتقال یون‌ها، تشکیل سلول‌های الکتروشیمیایی و تسریع واکنش‌های خوردگی را به‌دنبال دارد. علاوه بر این، وجود اکسیژن محلول، نوسانات دمایی و شرایط مرطوب مداوم، فرآیندهای اکسیداسیون را تشدید می‌کند. از سوی دیگر، فعالیت موجودات زنده

دریایی و تشکیل زیست‌لایه‌ها می‌تواند شرایط مساعدی برای خوردگی میکروبی فراهم آورد و بر شدت و پیچیدگی فرآیند خوردگی در محیط‌های دریایی بیفزاید [۱-۳].

روش‌های متداول حفاظت در برابر خوردگی نظیر پوشش‌های پلیمری، حفاظت کاتدی و استفاده از بازدارنده‌ها، علی‌رغم کاربرد گسترده، با محدودیت‌هایی از جمله دوام محدود و کاهش کارایی در شرایط سخت دریایی مواجه هستند. محیط‌های دریایی به دلیل شرایط خورنده شدید، یکی از مهم‌ترین عوامل کاهش دوام و طول عمر سازه‌ها و تجهیزات محسوب می‌شوند و خسارات اقتصادی و ایمنی قابل توجهی را به صنایع دریایی تحمیل می‌کنند. خوردگی می‌تواند موجب تضعیف سازه‌های کشتی‌ها، سکوها، فراساحلی و خطوط لوله شده و در مواردی به حوادث و آلودگی‌های زیست‌محیطی منجر شود [۴]؛ علاوه بر این، رسوب زیستی ناشی از فعالیت موجودات میکرو و ماکروسکوپی، چالش‌های عملیاتی متعددی از جمله افزایش مصرف سوخت و دشواری نگهداری سازه‌های غوطه‌ور را ایجاد می‌کند. خوردگی تحت تأثیر میکروبی به عنوان یکی از مخرب‌ترین انواع خوردگی، سهم قابل توجهی در هزینه‌های جهانی خوردگی دارد و زیرساخت‌های حیاتی دریایی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. گستردگی این پیامدها، ضرورت توسعه راهکارهای مؤثر و پایدار برای حفاظت از مواد در محیط‌های دریایی را بیش از پیش برجسته می‌سازد [۱-۵]. در شکل ۱، نمایی شماتیک از عوامل خورنده محیط دریایی، ساختار پوشش‌های نانوکامپوزیتی مبتنی بر نانولوله‌های کربنی، مکانیسم‌های حفاظت در برابر خوردگی و کاربردهای بالقوه آن‌ها ارائه شده است.

در سال‌های اخیر، استفاده از نانومواد به‌ویژه نانولوله‌های کربنی به عنوان تقویت‌کننده در پوشش‌های ضد خوردگی مورد توجه قرار گرفته است، زیرا این مواد با ایجاد مسیرهای نفوذ پیچیده و بهبود خواص مکانیکی پوشش‌ها می‌توانند عملکرد حفاظتی آن‌ها را به‌طور قابل توجهی ارتقا دهند. ارزیابی عملکرد نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر نانولوله‌های کربنی در محیط‌های آزمایشگاهی و دریایی نشان داده است که این پوشش‌ها می‌توانند مقاومت قابل توجهی در برابر خوردگی ارائه دهند. به عنوان مثال، پوشش‌های CNT با خواص فوق‌آبگریز بر روی فولاد نشان داده‌اند که مقاومت خوردگی تا چند برابر افزایش می‌یابد و حتی در آزمون‌های طولانی مدت غوطه‌وری در آب دریا عملکرد حفاظتی پایداری را حفظ می‌کنند، در حالی که خاصیت ضد رسوب آن‌ها نیز قابل توجه است (مطالعه‌ای اخیر) [۶] همچنین، در بررسی‌های آزمایشگاهی دیگر، افزودن نانولوله‌های کربنی به پوشش‌های اپوکسی باعث بهبود قابل توجه مقاومت خوردگی در آزمون‌های اسپری نمک و افزایش کارایی پوشش در شرایط نمک‌پاشی می‌شود [۷].

با وجود تعداد قابل توجهی از مطالعات در زمینه استفاده از نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر نانولوله‌های کربنی برای حفاظت در برابر خوردگی، یافته‌ها اغلب پراکنده و ناسازگار هستند و تفاوت در نوع ماتریس، روش‌های ساخت و شرایط آزمایش، مقایسه مستقیم نتایج را دشوار می‌سازد. این چالش‌ها ضرورت یک بررسی مروری تحلیلی و نظام‌مند را برای جمع‌بندی دانش موجود و شناسایی روندها و خلأهای پژوهشی برجسته می‌کند.

هدف این مقاله مروری، ارائه یک تحلیل جامع از مطالعات اخیر پیرامون نانوکامپوزیت‌های CNT در حفاظت از سازه‌های دریایی است. در این راستا، ابتدا خواص فیزیکی و شیمیایی نانولوله‌های کربنی و روش‌های مختلف ساخت و پردازش نانوکامپوزیت‌ها مرور می‌شود و سپس عوامل مؤثر بر عملکرد حفاظتی، ارزیابی عملکرد در محیط‌های آزمایشگاهی

و دریایی و کاربردهای بالقوه این پوشش‌ها تحلیل و مقایسه می‌گردد. این رویکرد به ارائه بینشی روشن از وضعیت فعلی تحقیقات و مسیرهای بالقوه پژوهشی آینده کمک می‌کند.



شکل ۱- شماتیک مفهومی مکانیسم‌های حفاظت در برابر خوردگی پوشش‌های نانوکامپوزیتی مبتنی بر نانولوله‌های کربنی در محیط‌های دریایی

۲. روش شناسی مطالعه مروری

این پژوهش به صورت یک مطالعه مروری تحلیلی با رویکرد نیمه‌نظام‌مند و با هدف بررسی و ارزیابی عملکرد نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر نانولوله‌های کربنی در حفاظت در برابر خوردگی در کاربردهای دریایی انجام شده است. به منظور گردآوری منابع علمی، پایگاه‌های اطلاعاتی معتبر بین‌المللی شامل ScienceDirect, Web of Science, Scopus, Google Scholar و SpringerLink و همچنین پایگاه اطلاعاتی داخلی SID مورد جست‌وجوی نظام‌مند قرار گرفتند. جست‌وجوی مقالات با استفاده از کلیدواژه‌هایی نظیر carbon nanotube, CNT nanocomposite coatings, marine environment و protection و ترکیب‌های مختلف آن‌ها انجام شد.

در مرحله نخست جست‌وجو، تعداد قابل توجهی از مقالات مرتبط شناسایی گردید که پس از حذف موارد تکراری، عناوین و چکیده‌ها مورد بررسی اولیه قرار گرفتند. مقالات منتشرشده در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۵ که به بررسی پوشش‌ها یا نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر CNT و ارزیابی عملکرد ضدخوردگی آن‌ها در محیط‌های دریایی واقعی یا شرایط شبیه‌سازی شده پرداخته بودند، به عنوان معیارهای اصلی انتخاب در نظر گرفته شدند. در مقابل، مقالات غیرمرتبط با موضوع، گزارش‌های غیرعلمی، مقالات کنفرانسی فاقد داوری معتبر و مطالعاتی که داده‌های عملکردی مشخصی ارائه نکرده بودند، از فرآیند مرور حذف شدند.

در مرحله نهایی، مقالات منتخب به طور کامل مطالعه شده و اطلاعات استخراج‌شده بر اساس نوع ماتریس پلیمری، میزان و نحوه به کارگیری نانولوله‌های کربنی، روش‌های ساخت و پردازش، آزمون‌های ارزیابی عملکرد ضدخوردگی (نظیر

آزمون‌های الکتروشیمیایی و تسریع‌شده) و حوزه‌های کاربردی دریایی دسته‌بندی شدند. سپس نتایج مطالعات مختلف به‌صورت تطبیقی و تحلیلی مورد مقایسه قرار گرفت تا روندهای غالب، نقاط قوت، چالش‌ها و خلأهای پژوهشی موجود در زمینه استفاده از نانوکامپوزیت‌های CNT برای حفاظت در برابر خوردگی شناسایی شود.

۳. معرفی نانولوله‌های کربنی و ویژگی مرتبط با خوردگی

۳-۱ انواع نانولوله‌های کربنی

نانولوله‌های کربنی (Carbon Nanotubes, CNTs) نانوساختارهایی توخالی و استوانه‌ای شکل هستند که از لایه‌ای گرافنی تشکیل شده‌اند که به‌صورت لوله‌ای پیچیده شده است. این ساختارها از اتم‌های کربن با هیبریداسیون sp^2 ساخته شده‌اند که در آرایشی شش‌ضلعی به یکدیگر متصل بوده و هر اتم کربن از طریق پیوندهای کووالانسی به سه اتم کربن مجاور متصل می‌شود. آرایش منظم شبکه شش‌ضلعی گرافنی موجب ایجاد خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد در نانولوله‌های کربنی می‌شود.

نانولوله‌های کربنی بر اساس تعداد دیواره‌ها به نانولوله‌های تک‌جداره (SWCNTs) و چندجداره (MWCNTs) تقسیم می‌شوند؛ به‌طوری‌که نوع تک‌جداره از یک لایه گرافنی منفرد تشکیل شده است، در حالی که نوع چندجداره شامل چندین لایه گرافنی هم‌مرکز است که پیرامون یکدیگر قرار گرفته‌اند. این تفاوت ساختاری، منجر به اختلاف در خواص مکانیکی، الکتریکی و پایداری شیمیایی آن‌ها می‌شود [۸-۱۰].

۳-۲ نقش آن‌ها در نانوکامپوزیت‌های محافظ خوردگی

نانولوله‌های کربنی به دلیل استحکام مکانیکی استثنایی، هدایت الکتریکی و خواص حرارتی عالی خود یک نانوپرکننده مهم هستند، بنابراین اغلب برای بهبود خواص مواد پلیمری به پلیمرها اضافه می‌شوند [۱۱]. تحقیقات به سمت توسعه نانومواد مبتنی بر CNT ها به دلیل ویژگی‌های شیمیایی، الکترونیکی، مکانیکی و ساختاری پیشرفته و منحصر به فرد آن‌ها در حال تغییر است. نانوکامپوزیت‌های CNT موادی هستند که از ترکیب نانولوله‌های کربنی در یک ماده ماتریکس مانند پلیمرها، فلزات یا سرامیک‌ها ایجاد می‌شوند. این نانوکامپوزیت‌ها خواص ذاتی نانولوله‌های کربنی را با خواص مواد ماتریکس ترکیب می‌کنند و در نتیجه ویژگی‌های عملکردی افزایش می‌یابند. وجود CNT ها در ماتریس می‌تواند به طور قابل توجهی استحکام مکانیکی، رسانایی الکتریکی، هدایت حرارتی و ویژگی‌های مانع مواد کامپوزیت را بهبود بخشد که آن‌ها را به عنوان نمونه‌ای ایده‌آل برای کاربردهای مختلف از جمله حفاظت در برابر خوردگی تبدیل می‌کند. ساختار منحصر به فرد نانولوله‌های کربنی استحکام قابل توجهی به آن‌ها می‌دهد و چندین مرتبه از فولاد پیشی می‌گیرد. این استحکام استثنایی ناشی از پیوندهای کووالانسی قوی بین اتم‌های کربن در صفحه گرافن است که لوله را تشکیل می‌دهد. همچنین CNT ها بسیار انعطاف پذیر هستند و به آن‌ها اجازه می‌دهد تا در برابر تغییر شکل قابل توجهی بدون شکستگی مقاومت کنند. نانولوله‌های کربنی رسانایی الکتریکی بسیار خوبی را به دلیل الکترون‌های غیرمحصلی در ساختار گرافن خود نشان می‌دهند. این ویژگی آن‌ها را برای استفاده در دستگاه‌های الکترونیکی، حسگرها و به عنوان پرکننده‌های رسانا در مواد کامپوزیتی مناسب می‌کند. رسانایی حرارتی آن‌ها نیز فوق‌العاده است و باعث می‌شود که اتلاف کننده‌های گرما مؤثری داشته باشند و آن‌ها را قادر می‌سازد تا گرما را به طور مؤثر انتقال دهند. همچنین پوشش‌های پلیمری به عنوان ماده‌ای

امیدوارکننده برای به تاخیر انداختن رسیدن یونها و مولکولهای آب به سطح فلزات، مانند یک مانع فیزیکی عمل می کنند [۷، ۱۲].

۳-۳- محدودیتها و چالشهای CNT ها در پوششهای خوردگی

با پیشرفت در فناوری نانو و علوم نانو، تحولی شگرف در حوزه علوم مواد مشاهده می شود. نانوذرات از نظر اندازه کوچک و نسبت سطح به حجم بالا (SVR) توجه زیادی را در زمینه الکترونیک، پزشکی و پاکسازی محیط به خود جلب کرده اند [۸]. در میان تمام نانوذرات، نانوذرات مبتنی بر کربن مانند گرافن و نانولوله های کربنی بیشترین استفاده را برای کاربردهای صنعتی دارند. در حال حاضر، CNT ها به دلیل خواص منحصر به فرد و قابل توجه خود مانند استحکام مکانیکی بالا و سبک وزن، بر تمام نانوذرات مبتنی بر کربن و فلز غلبه کرده اند. نانولوله کربنی حداقل ۵ برابر قوی تر از فولاد با استحکام بالا است. با این حال، چگالی نانولوله کربنی تک جداره گزارش شده که حدود تقریباً نیمی از چگالی آلومینیوم است [۱۳]. با توجه به خواص قوی و سبک وزن، نانولوله کربنی می تواند به عنوان عامل تقویت کننده برای ایجاد مواد کامپوزیتی با استحکام بالا بدون تأثیر قابل توجهی بر وزن نهایی محصول استفاده شود. نانوکامپوزیت های مبتنی بر CNT در مقایسه با پوشش های سنتی مزایای متعددی برای محافظت در برابر خوردگی در صنایع دریایی ارائه می دهند. خواص منحصر به فرد آنها، از جمله استحکام بالا، خواص مانع عالی و افزایش هدایت الکتریکی، به اثربخشی آنها در مهار خوردگی کمک می کند. همچنین CNT ها به عنوان یک لایه مانع عمل می کنند و از نفوذ گونه های خورنده مانند یون های اکسیژن و کلرید به سطح فلز زیرین جلوگیری می کنند. نسبت ابعاد بالای نانولوله های کربنی شبکه ای متراکم ایجاد می کند که به طور موثر مسیرهای ورود عوامل خورنده را مسدود می کند و سرعت خوردگی را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد.

✓ بهبود خواص مانع: CNT ها یک شبکه متراکم تر و غیرقابل نفوذتر در برابر عوامل خورنده ایجاد می کنند که به طور موثر مسیرهای عوامل خورنده را مسدود و سرعت انتشار گونه های خورنده را به سمت سطح فلز کاهش می دهد.

✓ رسانایی الکتریکی افزایش یافته: CNT ها می توانند به عنوان یک مسیر رسانا برای الکترون ها عمل کنند و به طور بالقوه فرآیند خوردگی را از سطح فلز دور کنند. همچنین رسانایی الکتریکی بالای CNT ها می تواند به از بین بردن جریان های الکتریکی موضعی کمک کند و از تشکیل خوردگی گالوانیکی جلوگیری کند.

✓ استحکام مکانیکی بهبود یافته: CNT ها به طور قابل توجهی استحکام و چقرمگی مواد کامپوزیت را افزایش می دهند، آن را در برابر ضربه و سایش که می تواند فلز زیرین را در معرض خوردگی قرار دهد، مقاوم تر می کنند و طول عمر آن را افزایش می دهند.

✓ خواص ضد رسوب زیستی: CNT ها می توانند خواص ضد میکروبی از خود نشان دهند و در جلوگیری از چسبیدن و رشد موجودات دریایی موثر باشند که می تواند خوردگی را تسریع کند.

علاوه بر این، CNT ها می توانند به عنوان یک آند قربانی عمل کنند و از سطح فلز زیرین در برابر خوردگی محافظت کنند. نانولوله های کربنی با ایجاد یک مکان مطلوب تر برای اکسیداسیون، حمله خورنده را به سمت خود منحرف می کنند و

ساختار خود را برای محافظت از فلز قربانی می‌کنند. این مکانیسم یک لایه حفاظتی اضافی در برابر خوردگی ایجاد می‌کند [۱۵، ۱۴]. علاوه بر این، سونی و همکاران کامپوزیت‌های تقویت شده CNT با درجه بندی عملکردی را به طور جامع بررسی می‌کند و خواص ارتعاشی، مکانیکی و حرارتی کامپوزیت‌های حاصل را مورد بحث قرار می‌دهد [۱۶].

۴. سنتز و طراحی پوشش‌های نانوکامپوزیتی مبتنی بر CNT

۴-۱- روش‌های سنتز و عامل‌دار سازی CNT

ساخت نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر نانولوله‌های کربنی مستلزم پراکنش یکنواخت CNT‌ها در ماتریس پلیمری و غلبه بر تمایل ذاتی آن‌ها به تجمع است که نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد نهایی دارد. برای این منظور، روش‌های مختلفی گزارش شده است که به‌طور کلی به دو دسته سنتز درجا و روش خارج از محل تقسیم می‌شوند. در روش خارج از محل، از تکنیک‌هایی مانند اختلاط محلولی و اختلاط مذاب استفاده می‌شود که به‌ترتیب از نظر سهولت اجرا و قابلیت تولید انبوه مزایا و محدودیت‌هایی دارند. اختلاط محلولی اگرچه کنترل‌پذیر و رایج است، اما در دستیابی به مقادیر بالای CNT با چالش مواجه است. در مقابل، اختلاط مذاب با حذف حلال‌ها برای مقیاس صنعتی مناسب‌تر است، هرچند پراکنش یکنواخت در بارگذاری‌های بالا دشوار می‌باشد. پلیمریزاسیون درجا به‌عنوان روشی نویدبخش، امکان کنترل بهتر ساختار و خواص نانوکامپوزیت‌های با کارایی بالا را فراهم می‌کند. [۱۷].

۴-۲- روش‌های توزیع CNT در چارچوب پلیمری

پوشش‌های نانوکامپوزیت CNT معمولاً با استفاده از تکنیک‌های مختلفی ساخته می‌شوند، از جمله:

- روش Sol-Gel: این روش شامل تشکیل یک سل (یک سوسپانسیون کلئوئیدی) حاوی CNT‌ها و یک پیش ماده برای ماده ماتریس است. سپس سل بر روی سطح فلز رسوب می‌کند و اجازه می‌دهد تا خشک شود و یک پوشش تشکیل می‌دهد.
- Electrospinning: این تکنیک از یک میدان الکتریکی برای کشیدن جریان ریز محلول CNT-پلیمر استفاده می‌کند که در حین حرکت جامد می‌شود و یک تشک نانوالیافی ایجاد می‌کند که می‌تواند به عنوان یک پوشش محافظ استفاده شود.
- Dip-Coating: این روش شامل غوطه ور کردن بستر فلزی در محلولی حاوی CNT و مواد ماتریس است. پوشش با تبخیر حلال تشکیل می‌شود.
- پوشش اسپری: این روش شامل پاشیدن سوسپانسیونی از نانولوله‌های کربنی و مواد ماتریکس بر روی سطح فلز است. سپس پوشش خشک شده و خشک می‌شود [۱۸-۱۹].

۵. عوامل موثر بر عملکرد پوشش نانوکامپوزیت CNT

عملکرد پوشش‌های نانوکامپوزیت CNT تحت تأثیر عوامل مختلفی است:

- غلظت CNT: غلظت بالاتر CNT به طور کلی منجر به بهبود خواص مانع و مقاومت در برابر خوردگی می‌شود، اما بارگذاری بیش از حد CNT می‌تواند منجر به پراکندگی ضعیف و نقص پوشش شود [۲۰].
- پراکندگی CNT: CNT‌های پراکنده خوب در سراسر مواد ماتریس حفاظت و عملکرد بهتری را ارائه می‌دهند [۲۱].
- مواد ماتریس: انتخاب ماده ماتریس بر خواص کلی پوشش کامپوزیت از جمله استحکام مکانیکی، چسبندگی و ویژگی‌های مانع تأثیر می‌گذارد [۲۱].
- روش ساخت: روش ساخت مورد استفاده برای ایجاد پوشش می‌تواند بر یکنواختی، ضخامت و چسبندگی آن به زیرلایه فلزی تأثیر بگذارد [۲۲].
- شرایط محیطی: عواملی مانند دما، رطوبت و وجود عوامل خوردنده می‌توانند به طور قابل توجهی بر عملکرد طولانی مدت پوشش تأثیر بگذارند [۲۱].

۶. مکانیسم‌های حفاظت در برابر خوردگی توسط نانوکامپوزیت‌های CNT

۶-۱- مکانیسم سدکنندگی و کاهش نفوذ یون‌های کلریدی

نانوکامپوزیت‌های CNT از طریق ترکیبی از مکانیسم‌ها، از جمله حفاظت مانع، حفاظت کاتدی و محافظ تنش، حفاظت در برابر خوردگی را ارائه می‌کنند. خواص منحصر به فرد CNT‌ها به این مکانیسم‌ها کمک می‌کند و در نتیجه مقاومت در برابر خوردگی در محیط‌های دریایی افزایش می‌یابد.

حفاظت از سد (اثر مانع) مکانیزم اولیه‌ای است که شبکه متراکم CNT‌ها به عنوان موانع فیزیکی عمل می‌کنند و از انتشار عوامل خوردنده مانند یون‌های کلرید و اکسیژن به سطح فلز جلوگیری می‌کنند که از طریق آن خوردگی را مهار می‌کنند این اثر مانع با محدود کردن در دسترس بودن واکنش‌دهنده‌ها، فرآیند خوردگی را به طور موثری کند می‌کند.

حفاظت کاتدی شامل استفاده از آند قربانی برای محافظت از سطح فلز است. همچنین رسانایی الکتریکی بالای CNT‌ها می‌تواند یک اثر حفاظتی کاتدی ایجاد کند که به عنوان یک آند قربانی عمل کنند و فرآیند خوردگی را به سمت خود منحرف کنند. نانولوله‌های کربنی با ایجاد محل مناسب‌تری برای اکسیداسیون، فلز را از خوردگی محافظت می‌کنند. این مکانیسم محافظت بیشتری در برابر خوردگی به ویژه در حضور غلظت بالای الکترولیت ارائه می‌دهد [۷، ۲۳، ۲۴].

۶-۲- تأثیر CNT بر عملکرد حفاظتی از خوردگی

محافظت تنش یکی دیگر از مکانیسم‌های مهمی است که CNT‌ها مقاومت در برابر خوردگی را افزایش می‌دهند. وجود CNT‌ها می‌تواند غلظت تنش را در سطح فلز کاهش دهد و مقاومت آن را در برابر ترک خوردگی و خستگی بهبود بخشد. این اثر تنش‌زدایی به‌ویژه در محیط‌هایی که فلز در معرض بارگذاری و تنش چرخه‌ای قرار می‌گیرد مفید است.

مهار محصول خوردگی که CNTها می‌توانند با به دام انداختن محصولات خوردگی در ماتریس نانوکامپوزیت، از تشکیل محصولات خوردگی مانند زنگ زدگی جلوگیری کنند. در اصلاح ریزساختاری نانولوله‌های کربنی می‌توانند ریزساختار ماده ماتریس را تغییر دهند و منجر به ایجاد سطحی یکنواخت‌تر و فشرده‌تر شوند که کمتر در معرض خوردگی هستند. اثر ترکیبی این مکانیسم‌ها، یعنی حفاظت از سد، حفاظت کاتدی، محافظ تنش، مهار محصول خوردگی و اصلاح ریزساختاری به افزایش مقاومت در برابر خوردگی نانوکامپوزیت‌های CNT کمک می‌کند و آنها را به ماده‌ای امیدوارکننده برای محافظت از سازه‌های فلزی در محیط‌های دریایی تبدیل می‌کند [۲۵-۲۷].

۷. مزایا و قابلیت‌های نانوکامپوزیت‌های CNT در حفاظت خوردگی

با پیشرفت در فناوری نانو و علوم نانو، تحولی شگرف در حوزه علوم مواد مشاهده می‌شود. نانوذرات از نظر اندازه کوچک و نسبت سطح به حجم بالا (SVR) توجه زیادی را در زمینه الکترونیک، پزشکی و پاکسازی محیط به خود جلب کرده‌اند [۸]. در میان تمام نانوذرات، نانوذرات مبتنی بر کربن مانند گرافن و نانولوله‌های کربنی بیشترین استفاده را برای کاربردهای صنعتی دارند. در حال حاضر، CNTها به دلیل خواص منحصر به فرد و قابل توجه خود مانند استحکام مکانیکی بالا و سبک وزن، بر تمام نانوذرات مبتنی بر کربن و فلز غلبه کرده‌اند. نانولوله کربنی حداقل ۵ برابر قوی‌تر از فولاد با استحکام بالا است. با این حال، چگالی نانولوله کربنی تک جداره گزارش شده که حدود تقریباً نیمی از چگالی آلومینیوم است [۱۳]. با توجه به خواص قوی و سبک وزن، نانولوله کربنی می‌تواند به عنوان عامل تقویت کننده برای ایجاد مواد کامپوزیتی با استحکام بالا بدون تأثیر قابل توجهی بر وزن نهایی محصول استفاده شود. نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر CNT در مقایسه با پوشش‌های سنتی مزایای متعددی برای محافظت در برابر خوردگی در صنایع دریایی ارائه می‌دهند. خواص منحصر به فرد آنها، از جمله استحکام بالا، خواص مانع عالی و افزایش هدایت الکتریکی، به اثربخشی آنها در مهار خوردگی کمک می‌کند. همچنین CNTها به عنوان یک لایه مانع عمل می‌کنند و از نفوذ گونه‌های خورنده مانند یون‌های اکسیژن و کلرید به سطح فلز زیرین جلوگیری می‌کنند. نسبت ابعاد بالای نانولوله‌های کربنی شبکه‌ای متراکم ایجاد می‌کند که به طور موثر مسیرهای ورود عوامل خورنده را مسدود می‌کند و سرعت خوردگی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد.

✓ بهبود خواص مانع: CNTها یک شبکه متراکم‌تر و غیرقابل نفوذتر در برابر عوامل خورنده ایجاد می‌کنند که به طور موثر مسیرهای عوامل خورنده را مسدود و سرعت انتشار گونه‌های خورنده را به سمت سطح فلز کاهش می‌دهد.

✓ رسانایی الکتریکی افزایش یافته: CNTها می‌توانند به عنوان یک مسیر رسانا برای الکترون‌ها عمل کنند و به طور بالقوه فرآیند خوردگی را از سطح فلز دور کنند. همچنین رسانایی الکتریکی بالای CNTها می‌تواند به از بین بردن جریان‌های الکتریکی موضعی کمک کند و از تشکیل خوردگی گالوانیکی جلوگیری کند.

✓ استحکام مکانیکی بهبود یافته: CNTها به طور قابل توجهی استحکام و چقرمگی مواد کامپوزیت را افزایش می‌دهند، آن را در برابر ضربه و سایش که می‌تواند فلز زیرین را در معرض خوردگی قرار دهد، مقاوم‌تر می‌کنند و طول عمر آن را افزایش می‌دهند.

✓ خواص ضد رسوب زیستی: CNT ها می توانند خواص ضد میکروبی از خود نشان دهند و در جلوگیری از چسبیدن و رشد موجودات دریایی موثر باشند که می تواند خوردگی را تسریع کند.

علاوه بر این، CNT ها می توانند به عنوان یک آند قربانی عمل کنند و از سطح فلز زیرین در برابر خوردگی محافظت کنند. نانولوله های کربنی با ایجاد یک مکان مطلوب تر برای اکسیداسیون، حمله خورنده را به سمت خود منحرف می کنند و ساختار خود را برای محافظت از فلز قربانی می کنند. این مکانیسم یک لایه حفاظتی اضافی در برابر خوردگی ایجاد می کند [۱۴]. علاوه بر این، سونی و همکاران کامپوزیت های تقویت شده CNT با درجه بندی عملکردی را به طور جامع بررسی می کند و خواص ارتعاشی، مکانیکی و حرارتی کامپوزیت های حاصل را مورد بحث قرار می دهد [۱۶].

۸. کاربردهای بالقوه پوشش های نانوکامپوزیت CNT در صنایع دریایی

پوشش های نانوکامپوزیت مبتنی بر نانولوله های کربنی (CNT) به دلیل ترکیب همزمان خواص مکانیکی بالا، نفوذپذیری پایین و پایداری شیمیایی مناسب، به عنوان گزینه ای نوین برای کاربردهای مختلف در صنایع دریایی مورد توجه گسترده قرار گرفته اند.

- بدنه کشتی ها: استفاده از نانوکامپوزیت های CNT به عنوان پوشش محافظ بدنه کشتی ها می تواند با بهبود خاصیت سدکنندگی و کاهش نفوذ یون های کلرید، نرخ خوردگی را به طور قابل توجهی کاهش دهد. علاوه بر این، اصلاح ریزساختار سطح توسط CNT ها موجب کاهش زبری سطح و در نتیجه کاهش کشش هیدرودینامیکی می شود که این امر به بهبود بهره وری سوخت و کاهش مصرف انرژی منجر خواهد شد [۲۸، ۲۹].
- سکوها دریایی: در محیط های دریایی با شرایط خورنده شدید، از جمله سکوها فراساحلی نفت و گاز، پوشش های نانوکامپوزیت CNT با افزایش مقاومت به خوردگی و کاهش پدیده رسوب زیستی، نقش مهمی در افزایش عمر مفید سازه ها و کاهش هزینه های تعمیر و نگهداری ایفا می کنند [۳۰، ۳۱].
- تجهیزات دریایی: پوشش دهی تجهیزات دریایی نظیر پمپ ها، شیرآلات و خطوط لوله با نانوکامپوزیت های CNT، علاوه بر افزایش مقاومت به خوردگی، می تواند موجب بهبود مقاومت سایشی و پایداری عملکردی در تماس مداوم با آب دریا و سیالات خورنده شود [۳۲، ۳۳].
- حسگرهای دریایی: به دلیل رسانایی الکتریکی مناسب و پایداری شیمیایی بالا، نانوکامپوزیت های CNT بستر مناسبی برای توسعه حسگرهای دریایی مقاوم در برابر خوردگی فراهم می کنند که قابلیت استفاده در پایش خوردگی، شرایط محیطی و آلودگی های زیستی را در محیط های دریایی دارند [۳۴].

۹. ارزیابی عملکرد نانوکامپوزیت های CNT در محیط های دریایی

مطالعات متعددی عملکرد CNT ها را با استفاده از طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی و آزمون اسپری نمک در محیط های کلیدی (شبیه سازی محیط دریایی) بررسی کرده اند. برخی مطالعات [۲۰، ۲۹، ۳۵، ۳۶] گزارش کرده اند که

افزودن CNT به پوشش‌ها منجر به افزایش محافظت از سطح فلز در برابر خوردگی شده است که این امر به دلیل افزایش قابل توجه مقدار امپدانس در فرکانس‌های پایین می‌شود که بیانگر بهبود خاصیت سدکنندگی پوشش است. با این حال، در مطالعه‌ای [۲۴] نتایج نشان داده است که افزایش درصد مقدار افزودن CNT به پوشش به دلیل تجمع و ناهمبندی در توزیع یکنواخت، عملکرد حفاظتی از سطح فلز در برابر خوردگی کاهش می‌یابد.

در آزمون‌های تسریع شده نظیر مهنمکی و غوطه‌وری در محلول NaCl، عملکرد پوشش‌های CNT وابستگی زیادی به نوع پوشش پلیمری و روش توزیع نانولوله‌ها نشان داده است. به عنوان مثال در مطالعه‌ای [۳۵] گزارش کرده‌اند که پوشش‌های اپوکسی CNT در مقایسه با پوشش‌های بدون نانوپرکننده، زمان شروع خوردگی را به‌طور محسوسی افزایش می‌دهند. در مقابل، در مواردی که پراکنش CNT یکنواخت نبوده است، ترک‌های موضعی و افت سریع عملکرد مشاهده شده است که اهمیت کنترل فرآیند ساخت را برجسته می‌کند. بزکستی و همکارانش [۳۷] تاثیر عملکرد عامل دار کردن CNT را با استفاده از آزمون‌های طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در محیط کلریدی به روش لایه‌نشانی الکتروفوریتیک مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاکی از این آزمون‌ها نشان داد که عامل دار کردن CNT تاثیر ضعیفی بر خواص مقاومت خوردگی دارد.

همچنین در مطالعاتی [۳۸، ۳۰] که همراه با خاصیت ضد خوردگی، خواص ضدباکتری و ضد خزه بودن CNT را بررسی کرده‌اند. تحقیقات نشان داده است که با رسوب دادن CNT روی سطح فلز به دلیل اعمال ولتاژ پایین، یک لایه حباب هیدروژن روی سطح پوشش ایجاد می‌شود که به عنوان یک مانع فیزیکی چسبندگی باکتری‌ها را تا حدود ۹۹/۵٪ کاهش می‌دهد.

نتایج متناقض نشان می‌دهد که پژوهش‌ها همواره همسو نیستند. برخی پژوهش‌ها نقش رسانایی الکتریکی CNT را در تسهیل خوردگی گالوانیکی مطرح کرده‌اند، در حالی که مطالعات دیگر نشان داده‌اند که در صورت اصلاح سطح (عامل دار کردن) CNT و توزیع یکنواخت، این اثر منفی قابل کنترل است. این اختلاف عمدتاً به تفاوت در روش پوشش‌دهی و لایه‌نشانی روی سطح فلز نسبت داده می‌شود. با وجود نتایج مثبت فراوان اما، این تناقض‌ها نشان‌دهنده نیاز به استانداردسازی روش‌های ارزیابی و گزارش‌دهی در مطالعات آینده است.

۱۰. نتیجه‌گیری

مرور و تحلیل مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر نانولوله‌های کربنی، در صورت طراحی و فرآوری مناسب، می‌توانند به‌طور مؤثری مقاومت به خوردگی پوشش‌ها را در محیط‌های دریایی بهبود بخشند. با این حال، دستیابی به عملکرد پایدار و قابل‌اعتماد این پوشش‌ها به مجموعه‌ای از عوامل از جمله نوع ماتریس پلیمری، میزان و نحوه پراکنش نانولوله‌های کربنی و شرایط محیطی وابسته است. نانوکامپوزیت‌های CNT به‌عنوان مواد نویدبخش برای حفاظت در برابر خوردگی در محیط‌های دریایی مطرح شده‌اند و خواص منحصر به فرد آن‌ها، نظیر بهبود خاصیت سدکنندگی، افزایش استحکام مکانیکی و هدایت الکتریکی مناسب، نقش مؤثری در مهار فرآیندهای خوردگی ایفا می‌کند.

در مقایسه با روش‌های سنتی پیشگیری از خوردگی، نانوکامپوزیت‌های CNT مزایای متعددی از جمله عملکرد بالاتر، افزایش طول عمر پوشش‌ها و کاهش هزینه‌های نگهداری ارائه می‌دهند. با وجود این مزایا، چالش‌هایی نظیر تجمع

نانولوله‌ها، دشواری دستیابی به پراکندگی یکنواخت و محدودیت‌های مرتبط با دوام بلندمدت همچنان نیازمند توجه پژوهشی هستند. در این راستا، جهت‌گیری‌های پژوهشی آینده بر بهینه‌سازی فرآیندهای ساخت و پردازش با هدف دستیابی به توزیع یکنواخت CNTها در ماتریس پلیمری و بهینه‌سازی اثربخشی آنها در حفاظت از سطوح فلزی متمرکز خواهد بود. این امر مستلزم توسعه روش‌های نوین فرآوری و رویکردهای خلاقانه برای غلبه بر چالش‌های پراکنش نانولوله‌های کربنی است.

علاوه بر این، تحقیقات اخیر به سمت طراحی و توسعه انواع جدید نانولوله‌های کربنی با اصلاحات سطحی هدفمند، مورفولوژی کنترل‌شده و رسانایی بهبودیافته برای ارتقای عملکرد ضد خوردگی سوق یافته است. از سوی دیگر، توسعه نانوکامپوزیت‌های هیبریدی با ترکیب CNTها و سایر نانومواد نظیر اکسید گرافن یا چارچوب‌های فلزی-آلی (MOFs) امکان ایجاد پوشش‌های چندعملکردی با خاصیت سدکنندگی قوی‌تر و اثرات هم‌افزایی قابل‌توجه را فراهم می‌کند. این رویکرد می‌تواند منجر به افزایش مقاومت به خوردگی و بهبود دوام پوشش‌ها در شرایط سخت دریایی شود.

در مجموع، اگرچه برای بهینه‌سازی روش‌های ساخت، ارتقای پایداری بلندمدت و کاهش هزینه‌های کلی پوشش‌های نانوکامپوزیت CNT به تحقیقات بیشتری نیاز است، اما چشم‌انداز کاربرد این مواد در صنعت دریایی روشن و امیدوارکننده ارزیابی می‌شود. ادامه پژوهش‌ها و نوآوری‌ها در این حوزه می‌تواند به توسعه راهکارهای کارآمدتر و پایدارتر برای حفاظت در برابر خوردگی منجر شود و نقش مهمی در افزایش دوام سازه‌های دریایی، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و تضمین ایمنی و پایداری صنایع دریایی ایفا کند.

۱۱. مراجع

1. Liu, P. Zhang, H. Fan, Y. and Xu, D. (2023), "Microbially influenced corrosion of steel in marine environments: A review from mechanisms to prevention", *Microorganisms* 11(9) , pp 2299.
2. Xu, Y. Huang, Y. Cai, F. Lu, D. and Wang, X. (2022), "Study on corrosion behavior and mechanism of AISI 4135 steel in marine environments based on field exposure experiment", *Science of the Total Environment* 830, pp 154864.
3. Wang, Z. Zhou, Z. Xu, W. Yang, D. Xu, Y. Yang, L. Ren, J. Li, Y. Huang Y. (2021), "Research status and development trends in the field of marine environment corrosion: a new perspective", *Environmental Science and Pollution Research* 28(39), pp 54403-54428.
4. Fayomi, O. Agboola, O. Akande, I. Emmanuel, A. (2020) ,"Challenges of coatings in aerospace, automobile and marine industries", *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing.
5. Refait, P. -M. Grolleau, A. Jeannin, M. Rémaizeilles, C. Sabot, R. (2020) , "Corrosion of carbon steel in marine environments: role of the corrosion product layer", *Corrosion and Materials Degradation* 1(1), pp 10.
6. abdel Mouez, F. Halfa, H. Yahia, A. Hussien, H. Gaber, M. Ali, H.H. (2025) "Development and evaluation of superhydrophobic carbon nanotube coatings onmaraging steel: Corrosion protection, and anti-fouling characteristics", *Journal of Alloys and Metallurgical Systems* 10, pp 100188.
7. Abdi, J. Izadi, M. Bozorg, M. (2022),"Improvement of anti-corrosion performance of an epoxy coating using hybrid UiO-66-NH₂/carbon nanotubes nanocomposite", *Scientific Reports* 12(1), pp 10660.
8. Gacem, A. Modi, S. Yadav, V.K. Islam, S. Patel, A. Dawane, V. Jameel, M. Inwati, G.K. Piplode S., Solanki, V.S. (2022),"Recent advances in methods for synthesis of carbon nanotubes and carbon nanocomposite and their emerging applications: A descriptive review", *Journal of Nanomaterials* 2022(1),pp 7238602.

9. Guo, H.-l. Zhang, Q.-x. Liu, Y.-p. Zhao, D.-k. (2023), "Properties and defence applications of carbon nanotubes", Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, pp 042010.
۱۰. سلطانی، ج. وکیلی، ب. و سلیمانی، ش. (۱۴۰۲)، "نانولوله های کربنی: مروری بر سنتز، خواص و کاربردها"، هشتمین کنفرانس بین المللی مطالعات بین رشته ای در مدیریت و مهندسی، تهران، ۱۹۲۱۱۷۹.
11. Yan, D. Zhang, Z. Zhang, W. Wang, Y. Zhang, M. Zhang, T. Wang, J. (2022) , "Smart self-healing coating based on the highly dispersed silica/carbon nanotube nanomaterial for corrosion protection of steel", Progress in Organic Coatings 164, pp 106694.
12. Aigbodion, V.S. Alayyaf, A.A. Ozoude, C.J. (2024), "Understanding the anti-corrosion characteristics of surface modification of h-BN and carbon nanotubes/magnesium composites in simulated seawater", RSC advances 14(33), pp 24152-24164.
13. Ng, K.-W Lam, W.-H. Pichiah, S. (2013), "A review on potential applications of carbon nanotubes in marine current turbines", Renewable and Sustainable Energy Reviews 28, pp 331-339.
14. Yang, S. (2023), "Properties, applications, and prospects of carbon nanotubes in the construction industry", Architecture, Structures and Construction 3(3), pp 289-298.
۱۵. توکلی، ا. صفایی، خ. و بابالو، ع.ا. (۱۳۹۵)، "خالص سازی و عامل دار کردن نانولوله های کربنی"، فرایند نو، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، دوره ۱۰ شماره ۵۲، صفحات ۱۴۹-۱۶۶.
16. Soni, S.K. Thomas, B. Swain, A. Roy, T. (2022), "Functionally graded carbon nanotubes reinforced composite structures: An extensive review, Composite Structures 299, pp 116075.
17. Sousani, A. Motiei, H. Najafimoghadam, P. Hasanzade, R. (2017), "Synthesis of nanocomposites based on carbon nanotube/smart copolymer with nonlinear optical properties, Optical Materials 67, pp 172-179.
18. Nguyen-Tri, P. Nguyen, T.A. Carriere, P. Ngo Xuan, C. (2018), "Nanocomposite coatings: preparation, characterization, properties, and applications, International Journal of Corrosion 2018(1), pp 4749501.
۱۹. مهرانز قراگوزلو، بهزاد شیرکوند هداوند، کیمیا مهدوی جاوید. (۱۳۹۵)، "بررسی روش های پراکنش نانولوله های کربنی در پوشش های نانوکامپوزیت های پلیمری"، نشریه مطالعات در دنیای رنگ، دوره ۴، شماره ۲.
20. Zhang, R. Yang, K. Dang, B. Zhan, M. Zhang, P. Li, S. (2024) , "Anti-Corrosion and Wave-Absorbing Properties of Epoxy-Based Coatings on Q235 Steel", Coatings 14(10), pp 1315.
21. Liu, M. Liu, X. Wang, S. Tao, B. Zhang, Y. Bi, X. (2025), "A Review on High-Performance Conductive Anti-Corrosion Coatings: From Material Innovations to Practical Implementation", Journal of Applied Polymer Science, pp e58153.
22. Kumar, D. Kumar, D. Singh, P. Chauhan, A.S. Kapoor, S. Bansal, S.A. (2025), "Polymer/carbon nanotube composites: A comprehensive review on fabrication techniques and their consequences", AIMS Materials Science 12(4), pp 813-844.
23. Cubides, Y. Castaneda, H. (2016), "Corrosion protection mechanisms of carbon nanotube and zinc-rich epoxy primers on carbon steel in simulated concrete pore solutions in the presence of chloride ions", Corrosion Science 109, pp 145-161.
24. Calabrese, L. Khaskoussi, A. Proverbio, E. (2020), "Wettability and anti-corrosion performances of carbon nanotube-silane composite coatings", Fibers 8(9), pp 57.
25. Othman, N.H. Ismail, M.C. Mustapha, M. Sallih, N. Kee, K.E. Jaal, R.A. (2019), "Graphene-based polymer nanocomposites as barrier coatings for corrosion protection", Progress in Organic Coatings 135 , pp 82-99.
26. Xu, Y. Zhang, W. Yu, W. Ding, J. Sun, H. (2021), "Polythiophene-sensitized TiO₂ nanotube arrays for photo-generated cathodic protection of 304 stainless steel", Journal of Materials Science 56 , pp 4470-4483.
27. Hussain, A.K. Seetharamaiah, N. Pichumani, M. Chakra, C.S. (2021), "Research progress in organic zinc rich primer coatings for cathodic protection of metals—A comprehensive review", Progress in Organic Coatings 153, pp 106040.

28. Sharma, A.R. Goyal, R. (2021), "Study of corrosion behaviour of Al₂O₃-13% TiO₂ and Cr₂O₃ coated ship hull steel in 3.5% NaCl solution", Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, pp 012021.
29. Huang, X. Yang, C. Chen, J. Qiao, X. Zhang, S. Song, D. (2024), "Enhanced Protective Performance of Carbon Nanotube-Reinforced Waterborne Epoxy Zinc-Rich Coatings for Corrosion Protection of Steel Structures", Coatings 14(12), pp (2079-6412).
30. Liang, H. Shi, X. Li, Y. (2024), "Technologies in marine antifouling and anti-corrosion coatings: a comprehensive review", Coatings 14(12), pp 1487.
31. Amendola, E. Palmieri, B. Dello Iacono, S. Martone, A. (2023), "Thermally mendable self-healing epoxy coating for corrosion protection in marine environments", Materials 16(5), pp 1775.
32. Almurtaji, S. Ali, N. Teixeira, J.A. Addali, A. (2021), "Effect of multi-walled carbon nanotubes-based nanofluids on marine gas turbine intercooler performance", Nanomaterials 11(9), pp 2300.
33. Shetty, A.R. Hegde, A.C. (2022), "Development of Ni-Co-CNT composite coatings for corrosion protection of mild steel in 5% NaCl", Chemical Data Collections 42, pp 100953.
34. Tang, J. Li, R. Mahmood, S. Li, J. Yao, S. (2025), "Carbon nanotube-based chemical sensors: Sensing mechanism, functionalization and applications", Chemosensors 13(10), pp 367.
35. Lv, X. Jin, X. Zhang, Z. Bai, Y. Guo, T. Zhang, L. Zhang, H. Zhu, J. Shao, Y. Zhang, H. (2022), "Comparative study of carbonaceous and polymer conductive additives on anticorrosion performance of epoxy Zinc-rich primer", Coatings 12(10), pp 1473.
36. Li, Y. Liu, S. Feng, F. Li, Y. Han, Y. Tong, X. Gao, X. (2024), "Preparation and characterization of graphene oxide/carbon nanotube/polyaniline composite and conductive and anticorrosive properties of its waterborne epoxy composite coatings", Polymers 16(18), pp 2641.
37. Bezkosty, P. Długóń, E. Sowa, M. Nizioł, J. Jeleń, P. Marchewka, J. Błażewicz, M. Sitarz, M. (2022), "Corrosion resistance and electrical conductivity of hybrid coatings obtained from polysiloxane and carbon nanotubes by electrophoretic co-deposition", International Journal of Molecular Sciences 23(5), pp 2897.
38. Sousa-Cardoso, F. Teixeira-Santos, R. Mergulhão, F.J. (2022), "Antifouling performance of carbon-based coatings for marine applications: a systematic review", Antibiotics 11(8), pp 1102.