J. of Marine Eng. Vol. 22, Iss. 49, 2026. (39-49)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

# Fabrication of coatings based on polyaniline nanofibers with anti-corrosion properties and reduction of drag force in vessels

**Maryam Abdolvand[1], Alireza Zahedi[2], Sina Tamiz[3]**

[1] *Master student of Iran University of Science and Technology; m_abdolvand@nt.iust.ac.ir*
[2] *Faculty member of Iran University of Science and Technology; zahediar@iust.ac.ir*
[3] *Master student of Iran University of Science and Technology; sina_tamiz@nt.iust.ac.ir*

## ARTICLE INFO

*Article History*
Received: 19 Dec 2023
Last modification: 8 Jul 2026
Accepted: 10 Jul 2026
Available online: 12 Jul 2026

*Article type:*
Research paper

*Keywords:*
Drag force reduction
Anti-corrosion
Reduce fuel and energy consumption
Environmental effects
Polyaniline nanofiber

## ABSTRACT

The drag force is created due to the physical dimensions of the object, which causes obstruction and changes in the fluid flow. The drag force for marine vehicles causes problems such as the inability to achieve high speeds, high fuel consumption, and as a result, the resulting environmental effects. Also, the floats are exposed to corrosion due to contact with corrosive agents. Corrosion of the floating body leads to material loss and very high costs. In the current research, taking into account the serious needs to reduce fuel and energy consumption, cost and environmental effects, new coatings with anti-corrosion properties and reduction of drag force containing polyaniline nanofibers were produced. According to the tests, the effectiveness of these coatings in preventing surface corrosion and reducing drag force was determined. Results show 27.84% drag reduction and excellent corrosion protection.

ISSN: 2645-8136

**DOI:**

**Copyright:** © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license [https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/]

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23 ]

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

# ساخت پوشش‌های بر پایه نانوالیاف پلی‌آنیلینی با خواص ضد خوردگی و کاهش نیروی درگ در شناورها

**مریم عبدالوند[۱] ، علیرضا زاهدی[۲]، سینا تمیز[۳]**

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه علم و صنعت ایران، m_abdolvand@nt.iust.ac.ir

[۲] عضو هیئت علمی دانشگاه علم و صنعت ایران، zahediar@iust.ac.ir

[۳] دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه علم و صنعت ایران، sina_tamiz@nt.iust.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

*تاریخچه مقاله:*

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۲۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۵/۰۴/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۴/۱۹

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۵/۰۴/۲۱

*نوع مقاله:*

مقاله پژوهشی

*کلمات کلیدی:*

کاهش نیروی درگ

ضد خوردگی

کاهش مصرف سوخت و انرژی

اثرات زیست محیطی

نانوالیاف پلی‌آنیلین

**چکیده**

نیروی درگ به دلیل ابعاد فیزیکی جسم ایجاد می‌شود که باعث انسداد و تغییر جریان سیال می‌شود. نیروی درگ برای وسایل نقلیه دریایی باعث ایجاد مشکلاتی از قبیل ناتوانی در دستیابی به سرعت‌های بالا، مصرف زیاد سوخت و در نتیجه اثرات زیست محیطی ناشی از آن می‌شود. همچنین، شناورها به دلیل تماس با عوامل خورنده در معرض خوردگی قرار دارند. خوردگی بدنه شناور منجر به از دست رفتن مواد و هزینه‌های بسیار بالا می‌شود. در پژوهش حاضر با در نظر گرفتن نیازهای جدی برای کاهش مصرف سوخت و انرژی، هزینه و اثرات زیست محیطی، پوشش‌های نوین با خاصیت ضد خوردگی و کاهندگی نیروی درگ حاوی نانوالیاف پلی‌آنیلین تولید شد. با توجه به آزمون‌های صورت گرفته کارایی این پوشش‌ها در جلوگیری از خوردگی سطح و کاهش نیروی درگ مشخص شد. درنهایت، کاهش نیروی درگ ۲۷/۸۴ درصدی و محافظت در برابر خوردگی عالی مشاهده شد.

ISSN: 2645-8136

**DOI:**

**حق نشر:** © ۲۰۲۶ توسط نویسندگان. این اثر برای انتشار با دسترسی آزاد، تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY) ارسال شده است.



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23 ]

## ۱ - مقدمه

طبق گزارش آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده، بزرگترین منبع انتشار کربن دی اکسید، احتراق سوخت‌های فسیلی مانند بنزین و گازوئیل برای حمل و نقل است. در این میان، صنعت دریایی ۹۵٪ از حمل و نقل کالاهای جهانی را به خود اختصاص داده است. در طول حرکت شناورها، مقاومت آب نقش مهمی در مصرف انرژی ایفا می‌کند و ۸۵٪ از مصرف کل انرژی را به خود اختصاص می‌دهد [۱]. مقاومت یا درگ نیرویی است که در برابر حرکت یک شناور عمل می‌کند [۲]. کاهش نیروی درگ شناور در حال حرکت در آب می‌تواند باعث صرفه جویی قابل توجهی در سوخت شناور شود. با به حداقل رساندن نیروی درگ شناور در حال حرکت در آب، انرژی کمتری برای حفظ سرعت مطلوب مورد نیاز است. در عین حال، کارایی و پاسخگویی سیستم‌های هیدرولیک را می‌توان بهبود بخشید. این امر به ویژه با توجه به افزایش هزینه‌های سوخت و نگرانی‌های زیست محیطی مرتبط با احتراق آن بسیار مهم است [۱].

تجهیزات دریانوردی از جمله کشتی‌ها و زیردریایی‌ها در توسعه و پایداری و دفاع از اقتصاد اقیانوس‌ها نقش تعیین کننده‌ای دارند. سرعت سفر و مصرف انرژی پارامترهای مهمی هستند که عملکرد عملیاتی اشیاء ناوبری را تعیین می‌کند. برای کشتی جنگی بسیار مهم است که سرعت را بهبود بخشند و صرفه‌جویی در مصرف انرژی برای تجارت دریایی سودمند و ضروری است. اجزای نیروی درگ را می‌توان به سه جزء خلاصه کرد: درگ اصطکاکی، درگ فشاری و درگ موج. درگ اصطکاکی ناشی از تنش برشی بین سیال و بدنه است. درگ فشاری منعکس کننده تغییرات فشار روی بدنه به دلیل اثرات جریان چسبناک است. درگ موج مرتبط با امواج تولید شده توسط بدنه کشتی است.

در سرعت‌های معمولی، درگ اصطکاکی بزرگترین مؤلفه نیروی درگ است. در سرعت‌های پایین (اعداد فرود کمتر از ۰/۱۲)، درگ موج ناچیز است. در اعداد فرود بالای ۰/۳۵، درگ موج برای اکثر شناورها از درگ اصطکاکی فراتر خواهد رفت [۲]. کاهش درگ موج و درگ فشار به دلیل طراحی بهینه مداوم ساختار شناور دشوار است. بنابراین، کاهش درگ اصطکاکی به یک پیشرفت مهم در کاهش درگ شناورها تبدیل شده است. طبق آمار، درگ اصطکاکی حدود ۵۰ درصد از کل درگ کشتی‌های جهانی و حدود ۶۰ تا ۸۰ درصد درگ وسایل نقلیه دریایی را به خود اختصاص می‌دهد [۳]. در نتیجه، کاهش نیروی درگ اصطکاکی برای افزایش سرعت ناوبری و کاهش مصرف انرژی اهمیت ویژه‌ای دارد. روش‌های مختلفی برای کاهش نیروی درگ اصطکاکی شناورها وجود دارد. برخی از مهم‌ترین روش‌های کاهش نیروی درگ اصطکاکی شناورها شامل کاهش نیروی درگ با استفاده از سطوح فوق آبگریز، روانکاری هوا، سطح جت بیونیک، میکروساختارهای سطح، دیواره‌های قابل انطباق کاهنده درگ و پوشش هستند.

در روش سطوح فوق آبگریز، با به دام انداختن هوا در ریزساختارها، نیروی درگ کاهش می‌یابد. از سطوح فوق آبگریز در طبیعت می‌توان به برگ نیلوفر آبی، برگ برنج، بال پروانه اشاره کرد. با الهام از سطوح طبیعی فوق آبگریز، سطوح مصنوعی ساخته شدند. برخی از روش‌های ساخت سطوح مصنوعی فوق آبگریز می‌توان به روش پوشش با استفاده از اسپری [۴]، سل- ژل [۵]، پوشش غوطه‌وری [۶]، هیدروترمال [۷]، رسوب الکتروشیمیایی [۸]، رسوب بخار شیمیایی [۹]، رسوب لایه به لایه [۱۰]، الکتروریسی [۱۱] و... اشاره کرد.

در روش روانکاری هوا، کاهش درگ اصطکاکی از طریق کاهش تماس مستقیم با آب است. روانکاری هوا را می‌توان به سه تکنیک مختلف طبقه‌بندی کرد: ۱- حباب هوا ۲- لایه هوا ۳- حفره هوا. روش حباب هوا با تزریق میکروحباب‌های متعدد به لایه مرزی، چگالی موضعی را کاهش می‌دهد و در نتیجه تنش رینولدز را کاهش می‌دهد. اولین کار آزمایشگاهی بر روی این روش بوسیله مک کورمیک و بتاچاریا [۱۲] ارائه شد. حباب‌های کوچک پیرامون بدنه‌ای با قابلیت کاملاً قرار گرفتن زیر آب با استفاده از یک سیم مسی که دورش پیچیده شده بود، ایجاد شدند. ژو و همکاران [۱۳] به بررسی مشکل کاهش درگ جریان با راندمان بالا برای وسایل نقلیه زیر آب با استفاده از آرایه‌های میکروحباب پرداختند. برای این منظور، قطعات آزمایشی برای آرایه‌های ریز منفذی که قادر به تشکیل آرایه‌های خود-تثبیت کننده میکروحباب‌ها از طریق الکترولیز هستند، تهیه کردند. آن‌ها از یک آرایه ریز منفذ الکترود-دیوار برای دستیابی به کنترل شروع و توقف خود-تطبیقی الکترولیز میکروحباب استفاده کردند. میانگین نرخ کاهش درگ اندازه‌گیری شده در یک آرایه میکروحباب با ریز منافذ ۲۵۰ میکرومتر حدود ۲۶ درصد بود. مکیهارجو و همکاران [۱۴] و [۱۵] تزریق همزمان حفره‌های جت دایره‌ای متعدد را مورد مطالعه قرار دادند. وجود حفره‌های متعدد منجر به برهمکنش‌های پیچیده بین کاویتاسیون تزریق شده و در نتیجه راندمان جت کم می‌شود.

در روش استفاده از سطح جت بیونیک که بر اساس ساختار آبشش کوسه طراحی شده است، جت آب یک نیروی رانش اضافی برای کوسه فراهم می‌کند که باعث افزایش سرعت حرکت کوسه می‌شود. ژائو و همکاران [۱۶] یک مدل جت بیونیک ساختند و نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد که در سرعت جریان ۵ متر بر ثانیه، نرخ کاهش درگ ۱۷/۱۵ درصد حاصل شد.

در روش میکروساختارها دندانه‌های موجود بر روی پوست کوسه به عنوان یکی از انواع میکروساختار به آب اجازه می‌دهد تا به طور

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23 ]

موثر روی سطح حرکت کند و با الهام از این، مفهوم ریبلت تکامل یافت. استفاده از سطوح میکروساختار با ایجاد بی‌نظمی‌های سطحی باعث کاهش تنش برشی دیواره می‌گردد. شارما و دوتا [۱۷] طراحی ریبلت را در شرایط جریان خارجی با سیال آب (برای کشتی‌ها، زیردریایی‌ها و غیره) بهینه سازی کردند. آن‌ها ریبلت دندان اره‌ای را به دلیل سهولت ساخت، استحکام و دوام، مورد مطالعه قرار دادند. حداکثر کاهش درگ به میزان ۹/۴۶ درصد برای عدد رینولدز ۰/۵ میلیون مشاهده شد، درحالی که این کاهش برای عدد رینولدز یک میلیون، ۹/۱ درصد است.

در روش دیواره‌های قابل انطباق با به تأخیر انداختن جریان آرام به آشفته، کاهش درگ رخ می‌دهد. چن و همکاران [۱۸] مدل پوست ماهی انعطاف‌پذیر بیونیک را با الهام از پوست ماهی تونا ساختند. پس از انجام تست درگ در یک تونل آب در گردش، کاهش درگ ۱۳/۸ درصدی مشاهده شد.

در میان روش‌های مختلف کاهش درگ، پوشش یک روش ساده و کم هزینه است و به راحتی در ابعاد بزرگ اجرا می‌شود. چن و همکاران [۱۹] یک پوشش پلی دی متیل سیلوکسان/ آهن (III) اکسید حاوی روغن سیلیکون فنیل متیل، روغن سیلیکون متیل و ترکیبی از روغن سیلیکون فنیل متیل و متیل ساختند. خواص ضد خوردگی و کاهش درگ پوشش با روغن سیلیکون فنیل متیل بهتر از روغن سیلیکون متیل بود. بیشترین نرخ کاهش درگ پوشش با روغن سیلیکون فنیل متیل در سرعت ۱۶۰۰ دور در دقیقه ۳/۵۲ درصد در مقایسه با پوشش اپوکسی حاصل شد.

در پژوهش حاضر، برای اولین بار پوشش‌های بر پایه نانوالیاف پلی‌آنیلینی با خواص ضد خوردگی و کاهش نیروی درگ ساخته شد. خوردگی بدنه شناور منجر به از دست رفتن مواد و هزینه‌های بسیار بالا می‌شود. بنابراین، پوشش بدنه شناور علاوه بر خاصیت کاهندگی نیروی درگ، باید بتواند از خوردگی بدنه دربرابر عوامل خورنده موجود در آب دریا محافظت نماید. برای ساخت این پوشش، پلی‌آنیلین با چهار دوپنت متان سولفونیک اسید، هیدروکلریک اسید، سولفوریک اسید و نیتریک اسید سنتز شد. به منظور بررسی خواص شیمیایی و فیزیکی پلی آنیلین‌های سنتز شده و صحت سنتز آن‌ها، طیف تبدیل فوریه مادون قرمز و میکروسکوپ الکترونی روبشی از پلی‌آنیلین‌های سنتز شده به دست آمد. سپس پوشش‌های حاوی نانوالیاف پلی‌آنیلین تهیه شد و آزمون خوردگی به منظور انتخاب بهترین دوپنت انجام گردید. پس از انتخاب بهترین دوپنت، آزمون درگ انجام شد. لازم به ذکر است که تمرکز اصلی این پژوهش بر توسعه و ارزیابی یک پوشش نوین بر پایه نانوالیاف پلی‌آنیلین با خواص ضد خوردگی می‌باشد و بررسی کاهش نیروی درگ شناور در این مطالعه، با هدف ارزیابی امکان‌پذیری کاربرد این پوشش در سامانه‌های دریایی انجام شده است. بدین ترتیب، این پژوهش در زمره مطالعات طراحی یا بهینه‌سازی هیدرودینامیکی شناورها قرار نمی‌گیرد و آزمون نیروی درگ صرفاً به‌عنوان یک ابزار تجربی برای مقایسه اثر شرایط سطحی پوشش‌ها در یک رژیم حرکتی مشخص مورد استفاده قرار گرفته است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲- ۱- مواد

آنیلین محصول مرک، آمونیوم پروکسی دی سولفات محصول مرک، متان سولفونیک اسید محصول مرک، نیتریک اسید محصول دکتر مجللی، سولفوریک اسید محصول دکتر مجللی، هیدروکلریک اسید محصول دکتر مجللی، اپوکسی پایه حلالی، کیسه دیالیز ۱۲ کیلو دالتون. تمام مواد به جز آنیلین به همان شکل خریداری شده، مورد استفاده قرار گرفتند. آنیلین قبل از استفاده تقطیر شد.

### ۲- ۲- آزمون‌ها و روش‌ها

#### ۲- ۲- ۱- سنتز پلی‌آنیلین

از چهار نوع اسید عامل مختلف به نام‌های متان سولفونیک اسید، نیتریک اسید، هیدروکلریک اسید و سولفوریک اسید جهت سنتز پلی‌آنیلین استفاده شد. برای سنتز پلی‌آنیلین با دوپنت متان سولفونیک اسید، ۱۵۰ میلی گرم آنیلین در ۳ میلی لیتر متان سولفونیک اسید ۱ مولار حل شد. سپس بادقت به کیسه دیالیز ۱۲ کیلو دالتون که دو سر آن با گیره مخصوص مسدود شده، منتقل شد. جهت تهیه محلول اکسیدان، ۱۸۴ میلی گرم آمونیوم پرسولفات در ۲۰۰ میلی لیتر متان سولفونیک اسید ۱ مولار مخلوط شد. کیسه دیالیز حاوی محلول آنیلین و متان سولفونیک اسید، در یک بشر حاوی محلول اکسیدان قرار داده شد. واکنش در دمای اتاق انجام شد. با گذشت زمان لایه‌های سبز رنگ بر روی سطح کیسه و محلول اکسیدان تشکیل شد که نشان دهنده‌ی شروع تشکیل پلی‌آنیلین می‌باشد. پس از ۲۴ ساعت پلی آنیلین سبز تیره رسوب شده در کف بشر جمع‌آوری گشت و به منظور خالص‌سازی و خارج کردن اسید اضافی، در سانتریفیوژ با دور ۳۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه قرار گرفت. سه نوع پلی‌آنیلین دیگر با استفاده از اسیدهای هیدروکلریک اسید، سولفوریک اسید و نیتریک اسید ۰/۲ مولار با تکرار مراحل ذکر شده برای پلی‌آنیلین سنتز شده با متان سولفونیک اسید تهیه شد.

#### ۲- ۲- ۲- شست و شوی و خشک‌سازی پلی‌آنیلین

به منظور شست و شوی پلی‌آنیلین، پلی‌آنیلین جمع آوری شده به کیسه دیالیز ۱۲۰۰۰ دالتون منتقل شد و درون محفظه ۶ لیتری



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23 ]

آب مقطر قرار داده شد. پس از هر ۲۴ ساعت، pH محلول پلی‌آنیلین اندازه گیری شد و در صورت خنثی نبودن این مدت به ۲۴ ساعت دیگر تمدید شد. این شستشو تکرار شد تا مقدار pH به عدد ۷ که نشان دهنده‌ی محلول خنثی است، برسد. پس از رسیدن به pH خنثی، پلی‌آنیلین جمع‌آوری گشت. به منظور خشک‌سازی پلی‌آنیلین سنتز شده با متان سولفونیک اسید و سولفوریک اسید، نمونه به مدت ۳ ساعت با دمای ۶۰ درجه سانتی گراد در آون خلأ قرار داده شد. برای خشک‌سازی پلی‌آنیلین سنتز شده با هیدروکلریک اسید، نمونه به مدت ۲ ساعت در آون خلأ با دمای ۵۰ درجه سانتی گراد قرار داده شد. به منظور خشک‌سازی پلی‌آنیلین با نیتریک اسید، نمونه به مدت ۲ ساعت در آون خلأ با دمای ۴۰ درجه سانتی گراد قرار داده شد.

### ۲- ۲- ۳- تهیه پوشش

نانوالیاف پلی‌آنیلین به غلظت ۰/۴ درصد وزنی به وسیله پروب التراسونیک (همگن‌ساز فراصوتی) در اپوکسی دیسپرس شد. با توجه به ویسکوزیته بالای اپوکسی، قبل از قرار دادن نمونه در التراسونیک، اقدام به رقیق‌سازی اپوکسی توسط مقدار ۳ سی‌سی حلال مخصوص اپوکسی شد. پس از رقیق شدن اپوکسی، پروب که از قبل استریل شده بود، داخل ظرف حاوی مواد قرار گرفت. همچنین ظرف حاوی مواد به دلیل جلوگیری از بالا رفتن ناگهانی دمای مجموعه، درون حمام آب و یخ قرار گرفت. نمونه‌ها به مدت ۲۰ دقیقه و با توان ۲۰۰ وات تحت همگن‌سازی قرار گرفتند. اعمال پوشش نهایی به روش اسپری انجام شد.

### ۲- ۲- ۴- آزمون طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز

در این پژوهش، به منظور بررسی خواص شیمیایی نمونه‌های پلی‌آنیلین سنتز شده و حصول اطمینان از صحت پلیمریزاسیون آن‌ها از طیف سنجی مادون قرمز استفاده شد. در این پژوهش از دستگاه طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز مدل OA 1045 ساخت کشور ایران بهره گرفته شد. برای طیف سنجی، نانوالیاف پلی‌آنیلین در آون خلأ خشک شد و به صورت پودر درآمد. سپس طیف سنجی از آن‌ها به عمل آمد. طیف الیاف حاصل با طیف‌های منابع مقایسه گردید که نشان داد طیف به دست آمده با طیف سنجی مربوط به پلی آنیلین‌ها همخوانی دارد.

### ۲- ۲- ۵- آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی

به منظور بررسی مورفولوژی و ویژگی‌های ساختاری نمونه‌های پلی‌آنیلین از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. در این پژوهش، از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Perseus Edu ساخت کشور ایران بهره گرفته شد. قبل از تهیه تصاویر، نمونه‌ها با طلا پوشش داده شدند.

### ۲- ۲- ۶- آزمون مقاومت خوردگی در محیط مه نمکی

در این پژوهش به منظور ارزیابی سیستم پوششی اپوکسی- پلی آمید در محیط‌های خورنده از استاندارد SSPC NO:13 بهره گرفته شد. در این استاندارد میزان آماده‌سازی سطح فولاد SA 2.5 و ضخامت سیستم پوششی بین ۲۲۵-۱۷۵ میکرون پیشنهاد شده است. مدت ارزیابی سیستم پوششی در محیط مه نمکی ۱۰۰۰ ساعت پیش‌بینی شده است. سایز تاول مطابق استاندارد ASTM D714 تعیین شده است.

برای بررسی مقاومت پوشش در مقابل عوامل خورنده محیط از دستگاه مه نمکی مطابق استاندارد ASTM B-117 (۵ درصد محلول نمک طعام در دمای ۳۵ درجه سلسیوس) استفاده شد. اندازه‌گیری ضخامت فیلم خشک مطابق روش استاندارد ASTM D-1186 است. جهت بررسی نفوذ عوامل خورنده از محل عوارض ایجاد شده در پوشش، قبل از قرار گرفتن نمونه‌ها در محیط خورنده، خراش مطابق با استاندارد ASTMD 1654 به صورت برش ایکس در پایین صفحه نمونه ایجاد شد. در این پژوهش، از دستگاه مه نمکی مدل SS200L ساخت کشور ایران استفاده شد.

### ۲- ۲- ۷- مشخصات هندسی و هیدرواستاتیکی مدل شناور

مدل مورد استفاده در آزمون نیروی درگ، یک شناور آزمایشگاهی کوچک‌مقیاس با بدنه صلب و متقارن نسبت به صفحه مرکزی طولی می‌باشد. فرم کلی بدنه از نوع گُوه‌ای شکل با دماغه تیز و سطوح چندوجهی تخت طراحی شده است. کف بدنه صاف بوده و مدل فاقد هرگونه افزایه شامل سکان، کیل، پروانه یا سامانه رانش می‌باشد.

طول کلی مدل برابر با ۱/۱ متر، عرض بیشینه ۰/۲۸ متر و ارتفاع بدنه ۰/۲۳ متر می‌باشد. نسبت طول به عرض مدل برابر با ۳/۹ است که منجر به غالب بودن سهم نیروی درگ اصطکاکی نسبت به سایر مؤلفه‌های نیروی درگ در محدوده سرعت‌های آزمون می‌گردد.

### ۲- ۲- ۸- آزمون نیروی درگ

در پژوهش حاضر به منظور اندازه‌گیری نیروی درگ از روش حوضچه کشش مطابق با استاندارد ITTC 7.5-02-02-01 بهره گرفته شد [۲۰]. در این روش، مقاومت با اندازه‌گیری نیروی کشش (بکسل) تعیین می‌شود. دینامومتر مقاومتی، نیروی بکسل افقی را اندازه‌گیری می‌کند. ممکن است راهنماهایی تعبیه شوند تا

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23 ]

از تاب خوردن یا خمیده شدن مدل جلوگیری کنند؛ این ابزارها نباید مدل را در جهت‌های دیگر حرکت مهار کرده و نیروی لحظه‌ای به مدل تحمیل کنند که باعث غلت زدن یا پاشنه آن شود.

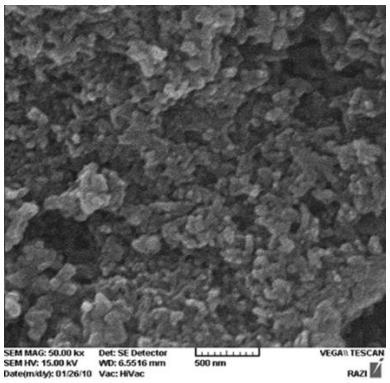
اگر ابزارها توسط کابل‌های انعطاف‌پذیر به کالسکه متصل می‌شوند، باید اطمینان حاصل شود که کابل‌ها هیچ نیرویی به مدل وارد نمی‌کنند. همچنین، مدل باید طوری قرار گیرد که در خط مرکزی مخزن و موازی با ریل‌های کالسکه باشد.

مدل مورد آزمایش مطابق با استاندارد ذکر شده ساخته و نصب شد و آزمون نیروی درگ مطابق روش حوضچه کشش در دانشگاه امام حسین انجام گرفت. آزمون نیروی درگ در سرعت ثابت ۰/۹ متر بر ثانیه انجام شد.

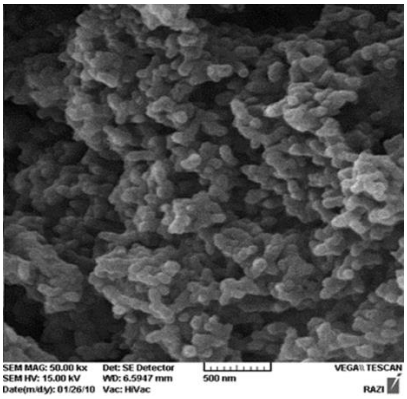
## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- بررسی ساختار پلی‌آنیلین

ابتدا تأثیر دو مؤلفه دمای واکنش و سرعت همزن بر مورفولوژی پلی‌آنیلین بررسی گردید. برای بررسی تأثیر دمای واکنش، پلی‌آنیلین در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد سنتز شد. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پلی‌آنیلین سنتز شده در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد مطابق شکل ۱ می‌باشد. برای بررسی تأثیر سرعت همزن، پلی‌آنیلین در دور همزن ۱۲۰ دور بر دقیقه سنتز شد. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پلی‌آنیلین سنتز شده در دور همزن ۱۲۰ دور بر دقیقه مطابق شکل ۲ می‌باشد. مطابق شکل ۱ و شکل ۲، در دمای بالا و شرایط اختلاط، مورفولوژی از حالت نانوالیاف خارج می‌شود بنابراین سنتز پلی‌آنیلین در دمای محیط و بدون همزن انجام شد.




**شکل ۱- پلی‌آنیلین سنتز شده در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد**

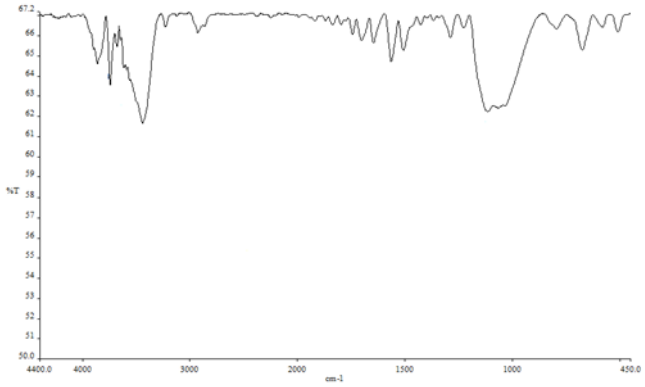



**شکل ۲- پلی‌آنیلین سنتز شده در دور همزن ۱۲۰ دور بر دقیقه**

### ۳-۱-۱- طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز

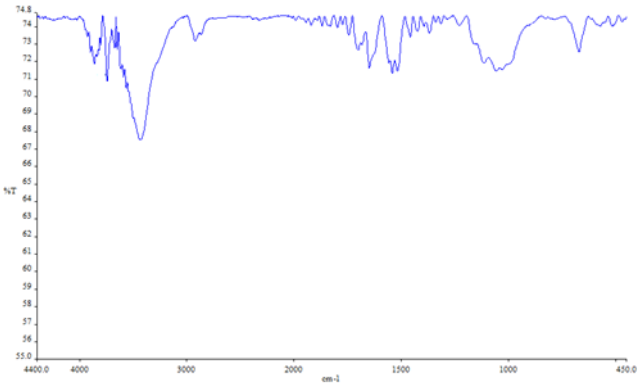
جهت بررسی خواص شیمیایی نمونه‌های سنتز شده و صحت سنتز آن‌ها از طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز بهره گرفته شد و نتایج آن در شکل ۳، شکل ۴، شکل ۵ وشکل ۶ ارائه شده است. پیک جذبی مشاهده شده در ۱۵۶۰ $cm^{-1}$ و ۱۴۷۰ $cm^{-1}$ به ترتیب مربوط به باند دو گانه C=C در حلقه کوئینوئید و بنزونوئید می‌باشد که با طیف‌سنجی مربوط به پلی‌آنیلین‌ها همخوانی دارد. باند جذب در ۱۲۹۰ $cm^{-1}$ مطابق با الکترون‌های $\pi$ نامتمرکز برانگیخته شده در پلیمر ناشی از پروتون دار کردن است.

باند جذب در ۷۹۰ $cm^{-1}$ مربوط به باند خمشی خارج از صفحه C-H می‌باشد. به طور کلی چهار باند ارتعاشی اصلی در $cm^{-1}$ ۱۵۶۰، ۱۴۷۰ $cm^{-1}$، ۱۲۹۰ $cm^{-1}$ و ۷۹۰ $cm^{-1}$ طیف‌های جذبی شاخص مربوط به نمک پلی‌آنیلین هستند.

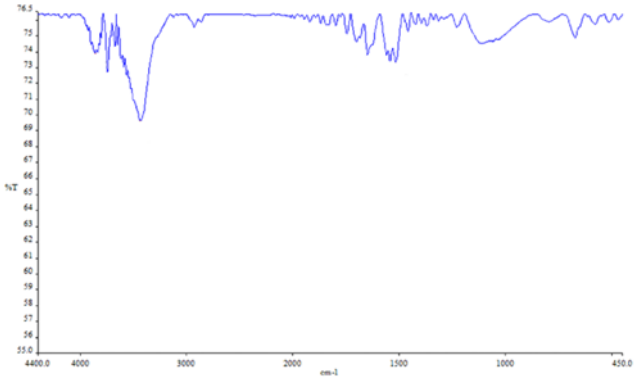



**شکل ۳- طیف مادون قرمز تبدیل فوریه برای پلی‌آنیلین سنتز شده با دوپنت متان سولفونیک اسید**

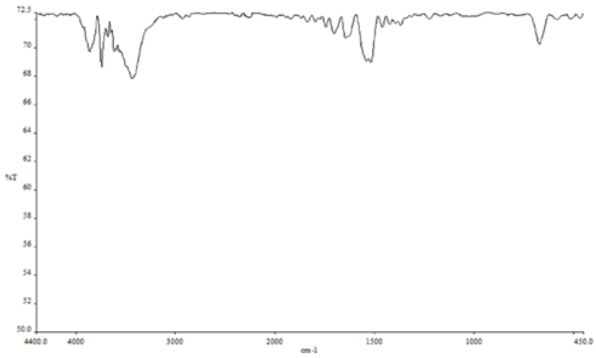
[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23 ]



**شکل ۴- طیف مادون قرمز تبدیل فوریه برای پلی‌آنیلین سنتز شده با دوپنت هیدروکلریک اسید**



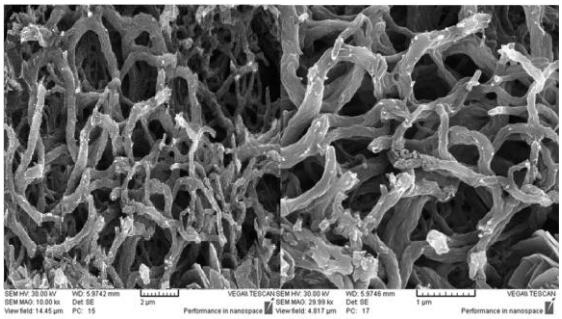
**شکل ۵- طیف مادون قرمز تبدیل فوریه برای پلی‌آنیلین سنتز شده با دوپنت نیتریک اسید**



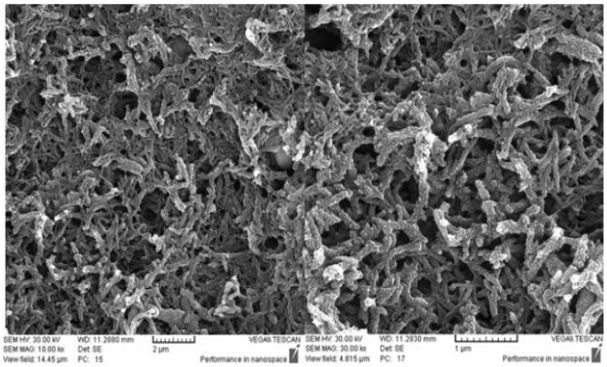
**شکل ۶- طیف مادون قرمز تبدیل فوریه برای پلی‌آنیلین سنتز شده با دوپنت سولفوریک اسید**

### ۳- ۱- ۲- میکروسکوپ الکترونی روبشی

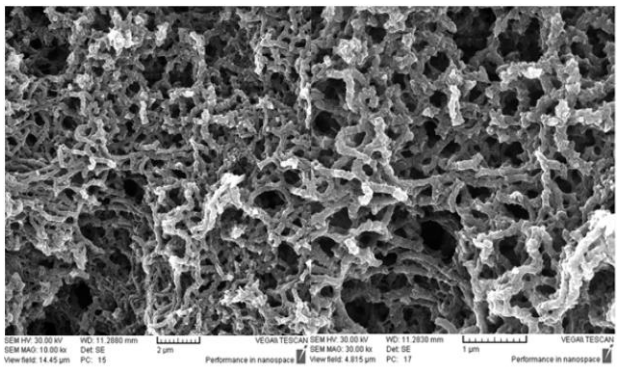
به منظور بررسی مورفولوژی ساختاری پلی‌آنیلین‌های سنتز شده با دوپنت‌های مختلف، تصاویری از نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گرفته شد. نمونه‌ها ابتدا با طلا پوشش داده شدند سپس تصویر برداری انجام شد. همان طور که در شکل ۷، شکل ۸، شکل ۹ و شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، مورفولوژی پلی‌آنیلین سنتز شده با دوپنت متان سولفونیک اسید به صورت نانوالیاف با ساختار لیفی است و نسبت به سایر دوپنت‌ها ساختار متخلخل‌تر، منظم‌تر و یکنواخت‌تر دارد. این از پارامترهای اصلی و مثبت در محافظت در برابر خوردگی و کاهش نیروی درگ به شمار می‌رود.



**شکل ۷- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای پلی‌آنیلین سنتز شده با دوپنت متان سولفونیک اسید**

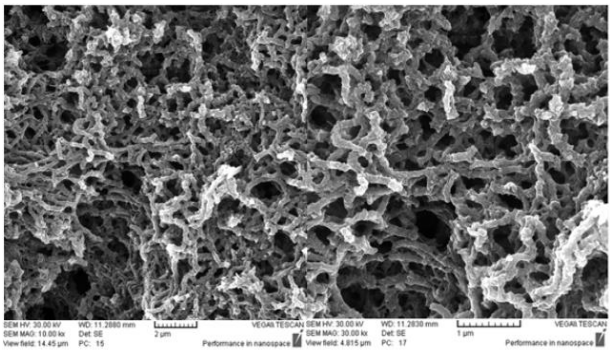


**شکل ۸- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای پلی‌آنیلین سنتز شده با دوپنت هیدروکلریک اسید**



**شکل ۹- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای پلی‌آنیلین سنتز شده با دوپنت نیتریک اسید**

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23 ]



**شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای پلی‌آنیلین سنتز شده با دوپنت سولفوریک اسید**

### ۳-۱-۳- نتایج آزمون مه نمکی

به منظور انتخاب بهترین دوپنت برای استفاده در پوشش‌های دریایی، آزمون خوردگی انجام شد. نتایج حاصل از آزمون خوردگی پوشش حاوی نانوالیاف پلی‌آنیلین با دوپنت‌های مختلف در ادامه ارائه خواهد شد. لازم به ذکر است دوپنت نیتریک اسید به علت عملکرد نامطلوب و خوردگی کیسه دیالیز حذف شد و آزمون خوردگی برای پوشش حاوی نانوالیاف پلی‌آنیلین سنتز شده با دوپنت نیتریک اسید صورت نگرفت.

الف) ارزیابی پوشش حاوی پلی‌آنیلین با دوپنت متان سولفونیک اسید

آثار جدایش پوشش در اطراف محل خراش بعد از حدود ۱۵۰ ساعت به اندازه ۰/۲ سانتی متر قابل مشاهده است. ادامه آزمایش تعدادی تاول کوچک (تاول شماره ۸) در ناحیه جدایش ایجاد می‌شود و با تداوم آزمایش ناحیه جدایش اطراف خراش افزایش می‌یابد و حتی در اطراف حاشیه پانل نیز جدایش مشاهده می‌شود در پایان چند تاول شماره ۶ و ۸ در اطراف خراش مشاهده شد (شکل ۱۱).



**شکل ۱۱- وضعیت سطح پانل پس از اتمام آزمایش مه نمکی**

همان طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، در اطراف خراش پیش‌روی زنگ نداریم. البته در اطراف خراش چسبندگی لایه پوشش کاهش یافته است و با حذف پوشش مختصری تغییر رنگ (سیاه شدن) قابل مشاهده است که نشان دهنده سطح فولاد در حالت غیر فعال است.



**شکل ۱۲- وضعیت سطح فلز پس از اتمام آزمایش مه نمکی و حذف لایه پوشش**

ب) ارزیابی پوشش حاوی پلی‌آنیلین با دوپنت هیدروکلریک اسید

آثار جدایش پوشش در اطراف محل خراش بعد از حدود ۱۵۰ ساعت به اندازه ۱ سانتی متر قابل مشاهده است. در ادامه آزمایش تعدادی تاول کوچک (تاول شماره ۸) در ناحیه جدایش ایجاد شده و با تداوم آزمایش ناحیه جدایش اطراف خراش تا ۲ سانتی متر افزایش یافته است و حتی در اطراف حاشیه پانل نیز جدایش مشاهده می‌شود (شکل ۱۳). در پایان چند تاول شماره ۶ در اطراف خراش ایجاد شده است.



**شکل ۱۳- وضعیت سطح پانل پس از اتمام آزمایش مه نمکی**

همان طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، پس از حذف لایه پوشش، ارزیابی وضعیت سطح فلز نشان می‌دهد که در اطراف خراش کاهش چسبندگی نسبت به چسبندگی در شروع آزمایش ایجاد شده و مختصری تغییر رنگ به سمت سیاه شدن ناشی از ایجاد لایه محافظ غیر فعال روی سطح فلز است. پیش‌روی زنگ به جز در محل تاول اطراف خراش قابل مشاهده نیست.



[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23 ]



**شکل ۱۴- ارزیابی سطح فلز پس از اتمام آزمایش مه نمکی و حذف لایه پوشش**

ج) ارزیابی پوشش حاوی پلی‌آنیلین با دوپنت سولفوریک اسید

در پایان آزمایش مه نمکی، چسبندگی پوشش مطلوب بوده است و سه تاول شماره ۸ روی پوشش مشاهده شد. سطح فلز پس از حذف پوشش، بدون عارضه زنگ است. پیش‌روی زنگ در ناحیه خراش در حد ۲- ۳ میلی متر قابل مشاهده است. شکل ۱۵ و شکل ۱۶نتایج آزمون مه نمکی برای پوشش حاوی پلی‌آنیلین با دوپنت سولفوریک اسید را نشان می‌دهد.



**شکل ۱۵- وضعیت سطح پانل پس از اتمام آزمایش مه نمکی**



**شکل ۱۶- ارزیابی سطح فلز پس از اتمام آزمایش مه نمکی و حذف لایه پوشش**

با توجه به قطر نانوالیاف کم، مورفولوژی منظم و یکنواخت و ساختار لیفی شکل پلی‌آنیلین سنتز شده با دوپنت متان سولفونیک اسید، این ماده کمترین خوردگی روی سطح فولاد را نسبت به سایر دوپنت‌ها از خود نشان داد. با هدف تولید بهترین پوشش روی سطح شناورها، پس از انجام آزمون خوردگی و انتخاب بهترین دوپنت به لحاظ خواص ضد خوردگی، آزمون درگ انجام شد.

### ۳- ۱- ۴- نتایج آزمون نیروی درگ

شکل ۱۷ قایقک با پوشش فاقد نانوالیاف پلی‌آنیلین و حاوی نانوالیاف پلی‌آنیلین را نشان می‌دهد. میزان نیروی درگ نمونه فاقد نانوالیاف پلی‌آنیلین ۱۷/۶ نیوتن و نمونه حاوی نانوالیاف پلی‌آنیلین ۱۲/۷ نیوتن به دست آمد. نتایج آزمون درگ، کاهش درگ ۲۷/۸۴ درصدی را نشان می دهد. لازم به ذکر است که میزان کاهش نیروی درگ گزارش‌شده در این پژوهش صرفاً مربوط به شرایط آزمایشگاهی و سرعت آزمون بوده و تعمیم این نتایج به سایر سرعت‌ها یا رژیم‌های جریان نیازمند انجام آزمون‌ها و تحلیل‌های تکمیلی می‌باشد.




**شکل ۱۷- پوشش الف) فاقد نانوالیاف پلی‌آنیلین ب) حاوی نانوالیاف پلی‌آنیلین**

## ۴ - نتیجه گیری

امروزه افزایش فعالیت‌های حمل و نقل جهانی منجر به افزایش آلاینده‌های زیست محیطی و افزایش مصرف سوخت شده است. کشتی‌ها سهم عمده‌ای در حمل کالاها در سراسر جهان و در نتیجه آلودگی‌های زیست محیطی و مصرف سوخت دارند. دستیابی به سرعت بالاتر و مصرف سوخت کمتر در شناورها و همچنین کاهش اثرات زیست محیطی شناورها با چالش فناورانه جدی مواجه است و تولید دانش فنی و فناوری افزایش سرعت سامانه‌های دریایی دارای اهمیت می‌باشد. کاهش نیروی درگ در شناورها به خصوص نیروی درگ اصطکاکی که بیشترین مقدار را در میان نیروهای وارد بر شناور به خود اختصاص داده است، نقش مهم و بسزایی در کاهش مصرف سوخت، کاهش اثرات زیست محیطی ناشی از آن‌ها و افزایش سرعت شناورها دارد. همچنین، شناورها به دلیل تماس با عوامل خورنده در معرض خوردگی قرار

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23 ]

دارند. خوردگی بدنه شناور منجر به از دست رفتن مواد و هزینه‌های بسیار بالا می‌شود. در پژوهش حاضر با در نظر گرفتن نیازهای جدی برای کاهش مصرف سوخت و انرژی، هزینه و اثرات زیست محیطی، پوشش‌های نوین حاوی نانوالیاف پلی‌آنیلین با خواص ضدخوردگی و کاهنده نیروی درگ تولید شد. با توجه به آزمون‌های انجام شده، کارایی این پوشش‌های نوین در کاهش نیروی درگ و جلوگیری از خوردگی سطح مشخص شد.

با استفاده از نانوالیاف پلی‌آنیلین اقدام به اصلاح ساختار پوشش‌های اپوکسی گردید که همین امر باعث بهبود کارایی پوشش‌های اپوکسی در کاهش نیروی درگ و خواص ضد خوردگی گردید. به طوری که می‌توان شاهد افزایش قابل توجه در میزان کاهش نیروی درگ وارد بر شناور نسبت به نمونه پوشش خالص اپوکسی بود.

در این پژوهش ابتدا نانوالیاف پلی‌آنیلین با چهار دوپنت مختلف متان سولفونیک اسید، نیتریک اسید، هیدروکلریک اسید و سولفوریک اسید تولید شد. سپس آزمون خوردگی به منظور انتخاب بهترین دوپنت انجام شد. نتایج آزمون خوردگی نشان داد که پلی‌آنیلین با دوپنت متان سولفونیک اسید بهترین عملکرد را در خواص ضد خوردگی از خود نشان داد. سپس برای بررسی خواص کاهندگی نیروی درگ پوشش حاوی نانوالیاف پلی‌آنیلین با دوپنت متان سولفونیک اسید، آزمون درگ انجام شد. نتایج آزمون درگ، کاهش درگ ۲۷/۸۴ درصدی را نشان می دهد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اصلاح شرایط سطحی پوشش‌های اپوکسی با استفاده از نانوالیاف پلی‌آنیلین، پتانسیل کاهش نیروی درگ و بهبود مقاومت به خوردگی را در شرایط آزمایشگاهی مشخص دارا می‌باشد. با این حال، ارزیابی عملکرد این پوشش در دامنه وسیع‌تری از سرعت‌ها و شرایط عملیاتی، نیازمند مطالعات و آزمون‌های تکمیلی خواهد بود.

## ۵- مشارکت نویسندگان

خانم مریم عبدالوند مسئول جمع‌آوری داده‌ها، انجام آزمایش‌ها، تحلیل نتایج و نگارش نسخه اولیه مقاله بوده است. آقای علیرضا زاهدی مسئول ارائه ایده و مفهوم اصلی پژوهش، طراحی کلی مطالعه و راهبری و نظارت علمی بر تمامی مراحل تحقیق بوده است. آقای سینا تمیز مسئول آماده‌سازی نسخه نهایی مقاله، بازبینی علمی و زبانی، اعمال اصلاحات و ویرایش نهایی پیش از ارسال مقاله بوده است. تمامی نویسندگان نسخه نهایی مقاله را مطالعه کرده و با انتشار آن موافقت کرده‌اند.

## ۶- بیانه دسترسی به داده‌ها

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش به‌صورت عمومی در دسترس نیستند. با این حال، در صورت ارائه درخواست موجه، داده‌ها با هماهنگی نویسنده مسئول و در چارچوب ملاحظات پژوهشی قابل ارائه خواهند بود.

## ۷- بیانیه ناشر

هرگونه دیدگاه و اطلاعات بیان‌شده در این نشریه متعلق به نویسندگان است و لزوماً دیدگاه‌های ناشر را منعکس نمی‌کند.

## ۸ - مراجع


1- X. Du, H. Mutsuda, Y. Wasada, and T. Nakashima (2023), *Hybrid simulation of dissipative particle dynamics and computational fluid dynamics for friction drag reduction of polymer coatings*, Ocean Engineering, vol. 285, p. 115415. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115415

2- L. Birk (2019), *Fundamentals of Ship Hydrodynamics: Fluid Mechanics, Ship Resistance and Propulsion*, John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9781119191575

3- W. Xia, W. Song, C. Wang, W. Yi, Q. Meng, and H. Deng (2023), *Microbubbles drag reduction characteristics of underwater vehicle during pitching movement*, Ocean Engineering, vol. 285, p. 115350. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115350

4- M. Li, W. Xiao, Z. Yin, Y. Chen, Y. Luo, Z. Hong, and M. Xue (2024), *Construction of a robust MOF-based superhydrophobic composite coating with the excellent performance in antifouling, drag reduction, and organic photodegradation*, Progress in Organic Coatings, vol. 186, p. 108086. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.108086

5- J. Li, S. Li, C. Chen, H. Guo, B. Lei, P. Zhang, G. Meng, and Z. Feng (2023), *Dopamine self-polymerized sol-gel coating for corrosion protection of AZ31 Mg Alloy*, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, vol. 666, p. 131283. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131283

6- W. Jia, H. Cao, T. Wang, Y. Min, and Q. Xu (2023), *Electrochemical behavior and anti-corrosion property of $Ti_3C_2T_x$ MXene/LDH heterostructured coating on aluminum alloy*, Surface and Coatings Technology, vol. 463, p. 129551. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129551

7- Y. Xia, L. Tong, X. Feng, H. Xiang, Y. He, and X. Liu (2024), *Effects of polydopamine functionalized graphitic carbon nitride–cerium oxide nanofiller on the corrosion resistance of epoxy coating*, Progress in Organic Coatings, vol. 187, p. 108111. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.108111

8- J. Fu, Y. Sun, J. Wang, H. Zhang, J. Zhang, and Y. Ji (2023), *Fabrication of fluorine-free superhydrophobic surface on aluminum substrate for corrosion protection and drag reduction*, Journal of Marine Science and Engineering, vol. 11, no. 3, p. 520. https://doi.org/10.3390/jmse11030520




[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23 ]

9- W. Tang, Y. Jian, M. Shao, Y. Cheng, J. Liu, Y. Liu, D. W. Hess, H. Wan, and L. Xie (2023), *A novel two-step strategy to construct multifunctional superhydrophobic wood by liquid-vapor phase deposition of methyltrimethoxysilane for improving moisture resistance, anti-corrosion and mechanical strength*, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, vol. 666, p. 131314. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131314

10- S. Song, X. Fan, H. Yan, M. Cai, Y. Huang, C. He, and M. Zhu (2023), *Facile fabrication of continuous graphene nanolayer in epoxy coating towards efficient corrosion/wear protection*, Composites Communications, vol. 37, p. 101437. https://doi.org/10.1016/j.coco.2022.101437

11- S. Wu, J. Zhang, X. Wang, Y. Liu, and Co-authors (2023), *An ecofriendly coaxial antibacterial and anticorrosion nanofiber pullulan-ethyl cellulose embedded with carvacrol coating for protection against marine corrosion*, International Journal of Biological Macromolecules, vol. 246, p. 125653. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125653

12- M. E. McCormick and R. Bhattacharyya (1973), *Drag reduction of a submersible hull by electrolysis*, Naval Engineers Journal, vol. 85, no. 2, pp. 11–16. https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1973.tb04788.x

13- R. Zhu, H. Zhang, W. Wen, X. He, C. Zhao, Y. Liu, Q. Zhuang, and Z. Liu (2023), *Flow-drag reduction performance of a resident electrolytic microbubble array and its mechanisms*, Ocean Engineering, vol. 268, p. 113496. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113496

14- S. A. Mäkiharju and S. L. Ceccio (2018), *On multi-point gas injection to form an air layer for frictional drag reduction*, Ocean Engineering, vol. 147, pp. 206–214. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.10.041

15- S. A. Mäkiharju, I.-H. R. Lee, G. P. Filip, K. J. Maki, and S. L. Ceccio (2017), *The topology of gas jets injected beneath a surface and subject to liquid cross-flow*, Journal of Fluid Mechanics, vol. 818, pp. 141–183. https://doi.org/10.1017/jfm.2017.98

16- Z. Gang, F. Li, W. X. Liu, M. M. Liu, and H. S. Bi (2014), *Research on drag reduction performance of bionic shark gill jet surface*, Applied Mechanics and Materials, vol. 654, pp. 57–60. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.654.57

17- V. Sharma and S. Dutta (2023), *Investigation of Bio-inspired Sawtooth Riblets for Boundary Layer Flow Over a Flat Surface*, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering, vol. 47, pp. 1417–1435. https://doi.org/10.1007/s40997-023-00612-6

18- D. Chen, X. Cui, X. Liu, and H. Chen (2023), *Bionic gradient flexible fish skin acts as a passive dynamic micro-roughness to drag reduction*, Surface and Coatings Technology, vol. 457, p. 129337. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129337

19- Q. A. Chen, Z. Zhang, S. Hao, and Y. Qi (2023), *Effects of incorporated silicone oils on the antifouling and drag reduction of $Fe_2O_3$/PDMS coatings*, Materials Today Communications, vol. 37, p. 107409. https://doi.org/10.5988/jime.48.300

[ Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-23 ]