

# اثر پوششهای دریایی مختلف بر نیروی مقاومت اصطکاکی وارد بر بدنه شناور

## The Effect of Different Marine Coatings on the Frictional Drag Force of Vessel

سید مجتبی میرعابدینی<sup>۱\*</sup>، شهلا پازکی فرد<sup>۱</sup>، زهرا اکبری<sup>۱</sup>، محسن محسنی<sup>۲</sup>، حسین شایلو زاده<sup>۳</sup>

۱- تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشگاه فرایند، گروه رنگ و روکشهای سطح، صندوق پستی ۱۴۹۶۵/۱۱۵

۲- تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۱۵۸۷۵/۴۴۱۳

۳- تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، دانشکده علوم و فناوری دریایی، صندوق پستی ۱۵۸۷۵/۱۷۷۴

دریافت: ۸۴/۵/۲۵، پذیرش: ۸۴/۱۲/۲

### چکیده

در این پژوهش، اثر سه نوع پوشش مختلف شامل کوپلیمرهای آکرلی خود صیقل شونده، پوشش الاستومر سیلیکونی و پوششهای اپوکسی لینی شکل که در صنایع رنگ دریایی کاربرد دارند بر مقاومت اصطکاکی وارد بر بدنه شناور بررسی شد. با اندازه گیری گشتاور مورد نیاز برای چرخش استوانه بدون پوشش و با پوششهای مختلف در سرعتهای معین، تغییر در زبری (تابع زبری) که عامل اصلی ایجاد مقاومت اصطکاکی است، ارزیابی شد. با اندازه گیری زاویه تماس به روش ایستا، تغییر در انرژی سطحی پوششهای مختلف و همچنین، مقدار زبری و شکل شناسی سطح پوششهای مختلف با استفاده از میکروسکوپ الکترون پویشی بررسی شد. نتایج نشان می دهد که پوشش الاستومر سیلیکونی به دلیل برخورداری از صافی سطح بهتر و نیز انرژی کمتر، بهترین اثر را در کاهش مقاومت اصطکاکی، در مقایسه با پوششهای متداول خود صیقل شونده آکرلی دار است. این نوع پوشش در سرعتهای مختلف، بین ۱۰ تا ۲۱ درصد موجب کاهش مقاومت اصطکاکی می شود. اثر پوشش بر نیروی مقاومت اصطکاکی با افزایش سرعت شناور به دلیل کاهش سهم مقاومت اصطکاکی در مقاومت کل کاهش می یابد. همچنین، نتایج آزمون تعیین انرژی سطحی نشان می دهد که پوشش الاستومر سیلیکونی کمترین انرژی سطح را در مقایسه با سایر پوششها دارد. بنابراین، می توان پیش بینی کرد که در محیط دریا حداقل مقدار خزه ها و موجودات دریایی به سطح پوشش بچسبند.

### واژه های کلیدی

نیروی مقاومت، پوشش خزه رها ساز، پوشش خود صیقل شونده، الاستومر سیلیکونی، ترشوندگی

### مقدمه

سایر عوامل پیش بینی نشده دیگر قرار می گیرند. هر بخش از سطح شناور در معرض نوعی شرایط خاص قرار دارد. به همین دلیل برای هر بخش باید پوششی را انتخاب کرد که جوابگوی نیازهای ویژه آن محیط باشد. یکی از مهمترین بخشهای شناور، قسمت غوطه ور در آب یا زیر

معمولاً پوشش دهی بخشهای مختلف شناور دریایی با دو هدف اصلی حفاظت در برابر خوردگی و ایجاد خواص ویژه انجام می شود. سطح شناور در محیط دریا در معرض آب نمک، نور خورشید، سایش، باد و باران، شوکهای گرمایی، موجودات زنده دریایی و

### Key Words

drag force, foul release coating, self-polishing coating, silicon elastomer, wettability

$$\frac{\Delta u}{u_{\tau}} = f\left(\frac{hu_{\tau}}{v}\right) \quad (1)$$

در این معادله  $h$  مقیاس زبری،  $v$  گرانروی و  $u_{\tau}$  سرعت اصطکاکی است که با معادله (۲) تعریف می شود:

$$u_{\tau} = \sqrt{\frac{\tau_{\omega}}{\rho}} \quad (2)$$

$\tau_{\omega}$  تنش برشی در دیواره است. کمیت  $\Delta u/u_{\tau}$  عبارتست از تابع زبری و به شکل مقدار جابه جایی نسبت به خط مربوط به سطح بدون پوشش یا صاف در امتداد محور  $u/u_{\tau}$  نمودار لگاریتمی تعریف می شود (شکل ۱). با بازنویسی معادله (۱) معادله (۳) بدست می آید:

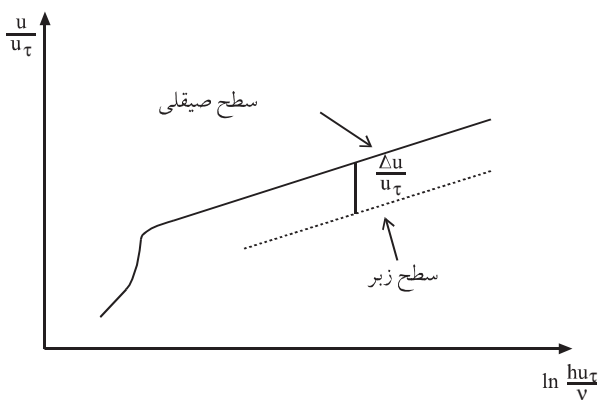
$$\frac{\Delta u}{u_{\tau}} = \left(\frac{u_1}{u_{\tau}}\right)_s - \left(\frac{u_1}{u_{\tau}}\right)_r \Rightarrow \left(\frac{u_1}{u_{\tau}}\right)_s - \left(\frac{u_1}{u_{\tau}}\right)_r = f\left(\frac{hu_{\tau}}{v}\right) \quad (3)$$

$s$  اختصار مربوط به سطح صیقلی (smooth، سطح بدون پوشش) و  $r$  اختصار مربوط به سطح زبر (rough، سطح با پوشش) است. تابع زبری طبق معادله (۴) به ضرایب اصطکاک سطحی موضعی برای سطوح صاف و زبر وابسته است:

$$\frac{\Delta u}{u_{\tau}} = \left(\sqrt{\frac{\gamma}{C_f}}\right)_s - \left(\sqrt{\frac{\gamma}{C_f}}\right)_r, \quad \frac{u_1}{u_{\tau}} = \sqrt{\frac{\gamma}{C_f}} \quad (4)$$

$u_1$  سرعت جریان آزاد (m/s) است و می توان به کمک معادله (۵) آن را از سرعت زاویه ای (rpm) استوانه محاسبه کرد [۱۰]:

$$u_1 = \frac{\gamma \pi r N}{6000} \quad (5)$$



شکل ۱ تعریف انتقال رو به پایین توزیع سرعت [۱۰].

بدنه آن است. در این بخش، نشست و رشد موجودات زنده روی بدنه که با عنوان آلودگی زیستی (bio-fouling) یا خز بستن شناخته شده، همواره به عنوان مشکلی اساسی مطرح بوده است. رسوب ترکیبات دریایی روی بدنه باعث کاهش قابلیت مانور، کاهش سرعت، افزایش مصرف سوخت و تغییر کارایی عمومی شناور می شود. این پدیده همچنین باعث افزایش نیروی مقاومت (drag force) و انتشار صوتی کشتیها و زیردریاییها و در نتیجه افزایش هزینه ها نیز می شود [۱]. مقدار دقیق این هزینه ها بستگی به اندازه و نوع شناور و محیط دریا دارد.

پوششهای اعمال شده در بخش مغروق شناور، بر اساس ویژگیهای سطحی آن، اثرهای متفاوتی بر اصطکاک شناور با آب و در نتیجه بر مقاومت اصطکاکی شناور دارند. مقاومت اصطکاکی درصدی از مقاومت کل وارد بر شناور را تشکیل می دهد. سهم مقاومت اصطکاکی در مقاومت کل از عوامل مختلفی مانند اندازه و سرعت حرکت شناور اثر می پذیرد. مثلاً در کشتیهای باربر و تانکرها، مقاومت اصطکاکی ۸۰-۹۰ درصد مقاومت کل و در شناورهای تندرو حداکثر ۳۰ درصد مقاومت کل را تشکیل می دهد [۸-۲].

بیش از صد و سی سال از آزمایش Froude مبنی بر پژوهش روی اثر زبری بر مقاومت سیال با استفاده از یدک کشی تانکهای مخصوص (towing tank experiment) می گذرد [۹]. از آن زمان تاکنون آزمایشهای زیادی برای تعیین مقاومت هیدرودینامیکی سطوح انجام شده است. بهترین روش برای بررسی اثر زبری بدنه بر کارایی هیدرودینامیکی کلی شناور، انجام آزمونها در مقیاس بزرگ با ایجاد شرایط سطحی مختلف در بدنه است. بدین معنا که با مقایسه کارایی سطوح صاف و زبر می توان به تغییر کارایی ناشی از زبری پی برد. در این راستا طی سالهای اخیر پیشرفتهای قابل ملاحظه ای حاصل شده است. در نتیجه، روشهای متعددی مانند اندازه گیری جریان روی سطوح صاف، درون لوله های زبر، در تونلهای باد و آب و اندازه گیری گشتاور در آزمونهای استوانه یا دیسک چرخان برای پژوهش روی مقاومت اصطکاکی عرضه شده است [۱۰-۱۳].

برای هر نوع سطحی اعم از صاف (بدون پوشش) یا زبر (با پوشش)، آزمون استوانه های هم محور در دو مرحله انجام می شود. ابتدا گشتاور اعمال شده بر استوانه بلند و سپس گشتاور اعمال شده بر استوانه کوتاه اندازه گیری می شود. با فرض یکسان بودن آثار انتهایی هر دو استوانه، در سرعتی خاص اختلاف در گشتاور ( $\Delta T$ ) برای این دو استوانه که مقاومت ناشی از سطح حاصل از تفاضل دو سطح استوانه بلند و کوتاه را نشان می دهد، اندازه گیری می شود. مشخص شده است که افزایش اصطکاک سطحی موضعی ناشی از زبری فقط به عدد رینولدز زبری یعنی  $hu_{\tau}/v$  بستگی دارد و طبق معادله (۱) به یکدیگر مربوطند [۱۴]:

$$\left(\frac{u_1}{u_\tau}\right)_s - \left(\frac{u_1}{u_\tau}\right)_r = f\left(\frac{hu}{\nu}\right) \quad (11)$$

با ثبت تعداد دور و گشتاور اعمال شده بر استوانه‌ها و استفاده از معادلات ذکر شده می‌توان اصطکاک موضعی بر سطوح با و بدون پوشش را در یک آزمون معین اندازه‌گیری کرده و با رسم داده‌های حاصل، تابع زیری را بدست آورد. در این پژوهش، با هدف کاهش مقاومت اصطکاکی در بدنه شناور، نمونه‌های مختلف پوشش‌های دریایی بررسی شد. برای این منظور از یک دستگاه چرخنده (rotor) با قابلیت اندازه‌گیری گشتاور در سرعت‌های مختلف استوانه‌های چرخان استفاده شده است.

## تجربی

### مواد

مشخصات پوشش‌های مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است. از ورق‌های آلومینیمی (آلیاژ ۱۰۵۰) با ۱۸ Temper H به عنوان زیریند و برای آماده‌سازی سطح آن از سود سوزآور و نیتریک اسید ۶۵ درصد محصول شرکت Merck استفاده شد.

### دستگاهها

همزن مکانیکی Heidolph مدل ۲۱۰۲ برای اندازه‌گیری گشتاور، دستگاه Kruss مدل G20/40 برای اندازه‌گیری زاویه تماس و میکروسکوپ الکترون پویشی (SEM) مدل JXA-840 از شرکت Jeol برای تعیین شکل شناسی سطح بکار گرفته شد. همچنین، برای تعیین گشتاور و مقاومت اصطکاکی از استوانه‌های تو خالی آلومینیمی با قطر ۶/۴ cm و ارتفاع‌های ۴ و ۸ cm استفاده شد.

در این معادله  $r$  شعاع استوانه (cm) و  $N$  تعداد دور در دقیقه است. سرعت اصطکاک ( $u_\tau$ ) را می‌توان از اختلاف گشتاور ( $\Delta T$ ) بدست آورد. اگر  $F$  نیروی اصطکاک اعمال شده بر تفاضل سطح دو استوانه بلند و کوتاه و  $A$  مساحت سطح استوانه چرخان باشد:

$$\Delta T = F \times r \quad (6)$$

$$\tau_w = \frac{F}{A} \quad (7)$$

از ترکیب دو معادله (۶) و (۷) معادله (۸) بدست می‌آید:

$$\tau_w = \frac{\Delta T}{rA} \Rightarrow \tau_w = \frac{\Delta T}{2\pi r^2 \Delta L} \quad (8)$$

$\Delta L$  اختلاف ارتفاع بین دو استوانه بلند و کوتاه است، چون  $\tau_w = u_\tau^2 \rho$ ، بنابراین:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\Delta T}{2\pi r^2 \Delta L \rho}} \quad (9)$$

در این معادله  $P$  چگالی سیال ( $g/cm^3$ ) است. معادله (۸) برای هر دو سطح با پوشش و بدون آن کاربردی است. با محاسبه  $u_\tau$  از معادله (۹) و  $u_1$  از معادله (۵) می‌توان ضریب اصطکاک سطحی موضعی را از معادله (۱۰) محاسبه کرد:

$$C_f = \frac{900 \times \Delta T}{\rho \pi^3 r^4 N^2 L} \quad (10)$$

با جمع بندی معادلات می‌توان نوشت:

جدول ۱ مشخصات پوشش‌های استفاده شده.

نمونه	ساختار شیمیایی	کد تجاری	وزن مخصوص (g/cm <sup>3</sup> )	خصوصیات فیزیکی	شرکت تولید کننده
۱	کوپلیمر آکریلی TBT	۲۸۲-۶۶	۱/۶۷	جامد حجمی ۴۵ درصد	پارس پامچال
۲	کوپلیمر آکریلی TBT	SP-SEA ۷۴۰۳۰	۱/۶۰	جامد حجمی ۵۵ درصد	همپل
۳	کوپلیمر آکریلی TBT	۰۷۲۸-۰۰۳۰۲	۱/۵۶	جامد حجمی ۵۰ درصد	رنگ آفرین
۴	الیاف آکریلی و پوشش اپوکسی	Seal Coat	۱/۵۵	۲۵ درصد الیاف	صنایع شیمیایی بوشهر
۵	الاستومر سیلیکونی دی متیل سیلوکسان	RTV ۴۵۱۱ (T ۲۱، سخت کننده)	۱/۲۲	گرانروی در ۲۳°C: ۲۵۰۰۰ cP	واکر

استوانه با استفاده از افشاندن معمولی (برای نمونه های خود صیقل شونده) و قلم مو (برای نمونه های سیلیکونی) اعمال شد. پس از خشک شدن پوششها در دما و رطوبت محیط، این آزمون از چرخش در دورهای کم یعنی ۱۰۰ rpm آغاز و تا دور ۲۰۰۰ rpm انجام شد. برای اندازه گیری گشتاور در ابتدا دور مورد نظر را روی صفحه نمایشگر انتخاب کرده و با روشن کردن دستگاه، پس از مدرج کردن آن، آزمون اندازه گیری گشتاور در دورهای مختلف حداقل با سه مرتبه تکرار صحیح برای نمونه های مختلف انجام شد. برای کاهش خطا در ثبت عدد گشتاور در یک دور مشخص، میانگین اعداد گشتاور در بازه زمانی حدود ۳۰ s محاسبه شده است.

### تعیین انرژی سطحی پوششهای مختلف

آزمون تعیین انرژی سطحی به روش اندازه گیری زاویه تماس مایعات مختلف با انرژیهای سطحی مختلف با اعمال پوششها روی سطوح صاف آلومینیمی انجام شد. مراحل آماده سازی سطح صفحات فلزی قبل از اعمال پوششها به شرح زیر بود:

در مرحله اول سطح فلز با استفاده از مواد شوینده چربی گیری، آبکشی و پس از خشک شدن، به مدت ۱ min در استون غوطه ور شد. سپس، فیلمی از پوششهای مختلف با ضخامت ۱۲۰ μm با استفاده از فیلم کش، روی زیریند آلومینیمی اعمال شد. نمونه ها به مدت ۲۴ h در دمای محیط در زیر هود نگهداری شدند. پس از خشک شدن پوشش و تشکیل فیلم جامد، انرژی سطحی یا قابلیت ترشوندگی پوششهای مختلف با اندازه گیری زاویه تماس ایستای مایعات مختلف روی سطح مورد آزمون با دستگاه Kruss معین شد. در این روش از مایعات آب، فرمامید، متان دی یدید، بنزیل الکل و گلیسرین استفاده شد.

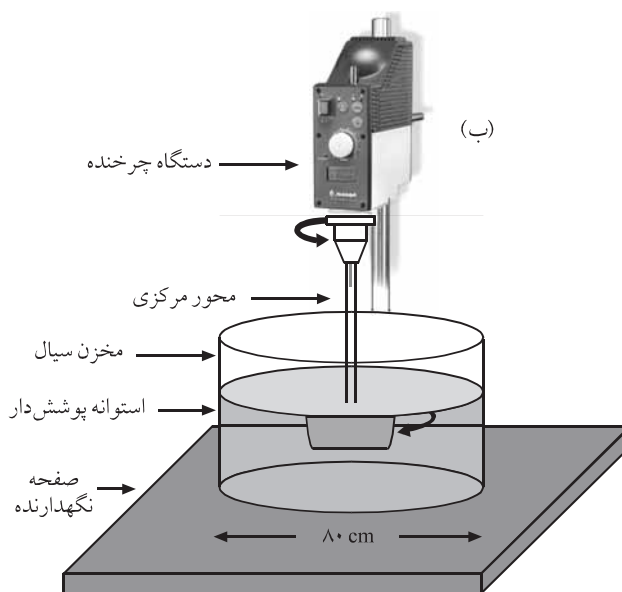
نمونه مورد آزمایش روی محل نگهدارنده قرار داده شده، سپس مایع مورد آزمایش با استفاده از سرنگ به شکل قطره ای با حجم معین (حدود ۰/۰۵ mL) روی سطح نمونه قرار گرفت. زاویه بین خط مبنای هر قطره و خط مماس از روی تصویر بزرگ شده آن در صفحه نمایشگر معین می شود. از آنجا که زاویه تماس در اثر تبخیر مایع با زمان کاهش می یابد، برای به حداقل رساندن خطا، تمام اندازه گیریها باید بعد از گذشت زمانی ثابت (۹۰ s) انجام شود. تعداد تکرار برای هر نمونه پنج مرتبه در نظر گرفته شد.

### بررسی شکل شناسی سطح با استفاده از SEM

به منظور بررسی شکل شناسی پوششهای مختلف، از میکروسکوپ الکترون پویشی استفاده شد. نمونه پوششهای مختلف روی لامل



(الف)



نمایی از سامانه ارزیابی مقاومت اصطکاکی

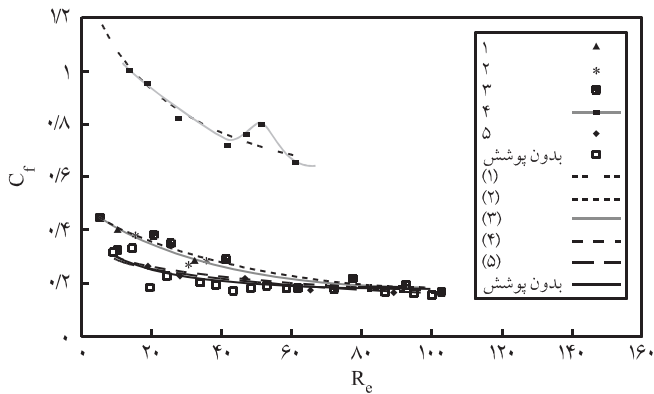
شکل ۲ نمای کلی: (الف) نمونه استوانه های طراحی شده و (ب) دستگاه چرخنده مورد استفاده.

### روشها

#### تعیین تابع زبری

در این پژوهش، برای اندازه گیری ضریب اصطکاک پوششهای مختلف، از روش استوانه چرخان استفاده شد. در شکل ۲ نمای کلی استوانه های طراحی شده و دستگاه اندازه گیری گشتاور نشان داده شده است. این دستگاه شامل همزن مکانیکی، مخزن آب به قطر ۸۰ cm (حاوی آب معمولی در دمای محیط)، گیره، پایه فلزی و چهار استوانه با قطرهای ۶۴ mm و ارتفاعهای ۴۰ mm و ۸۰ mm است.

برای حذف مشکلات ناشی از آثار انتهایی ابتدا گشتاور اعمال شده بر استوانه بلند (۸۰ mm) و سپس گشتاور اعمال شده بر استوانه کوتاه (۴۰ mm) اندازه گیری شد. با فرض یکسان بودن آثار انتهایی در هر دو استوانه، اختلاف در گشتاور ( $\Delta T$ )، در سرعتی خاص برای دو اندازه گیری، مقدار گشتاور مربوط به اختلاف سطح استوانه بلند و کوتاه را نشان می دهد. نمونه پوششهای مختلف روی سطوح جانبی دو

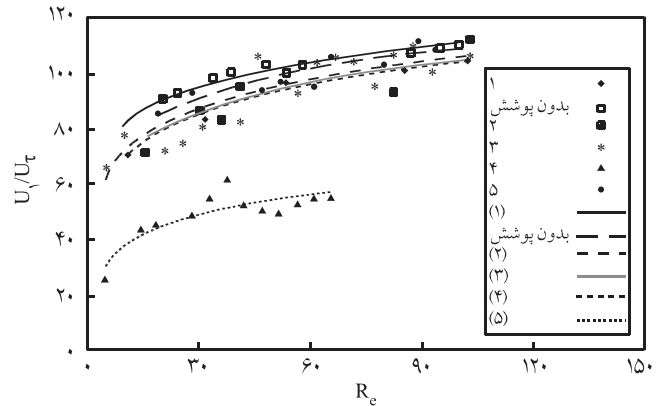


شکل ۴ ضریب مقاومت اصطکاکی پوششهای مختلف در مقابل عدد رینولدز.

پوشش الاستومر سیلیکونی انجام شد. برای به حداقل رساندن خطاهای احتمالی آزمون، تابع زبری برای سطحی با زبری مشخص با مقایسه اندازه گیریهای مناسب برای سطحی صاف (بدون پوشش) در شرایط مشابه بدست می آید. نمودارهای انتقال رو به پایین توزیع سرعت و ضریب اصطکاک در مقابل عدد رینولدز ( $Re = \frac{U_{th}}{\nu} \times 10^4$ ) برای پوششهای مختلف مورد آزمون در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود هر قدر انتقال رو به پایین استوانه‌های پوشش دار نسبت به استوانه بدون پوشش بیشتر باشد، زبری نمونه پوششی به طور مقایسه ای بیشتر بوده، در نتیجه اثر بیشتری در افزایش نیروی مقاومت اصطکاکی خواهد داشت. با مقایسه رفتار پوششهای مختلف در این آزمایش مشاهده می شود که رفتار پوشش الیافی نسبت به نمونه بدون پوشش اختلاف بیشتری دارد، در نتیجه نیروی مقاومت اصطکاکی بیشتری نسبت به سایر پوششها نشان می دهد. همچنین، نمونه پوشش الاستومر سیلیکونی نسبت به استوانه بدون پوشش فاصله کمتری دارد، در نتیجه نیروی مقاومت کمتری نسبت به سایر پوششها نشان می دهد.

در شکل ۴، با انتخاب چند نقطه از محور افقی (محور اعداد رینولدز) می توان ضریب مقاومت اصطکاکی مربوط را در پوششهای مورد آزمون از محور عمودی مربوط بدست آورد. در شکل ۵ و جدول ۲ ضریب مقاومت اصطکاکی مربوط به چهار عدد رینولدز متفاوت برای پوششهای مختلف آورده شده است. در این خصوص پوشش الاستومر سیلیکونی به عنوان مرجع انتخاب شده و درصد کاهش مقاومت نسبت به پوششهای سیلیکونی مقایسه و محاسبه شده است.

همان طور که از داده‌های جدول ۲، مشاهده می شود با جایگزینی پوششهای سیلیکونی به جای پوششهای خود صیقل شونده، در



شکل ۳ انتقال رو به پایین توزیع سرعت و تعیین تابع زبری پوششهای مختلف.

شیشه ای اعمال شد. پس از پوشش دهی نمونه‌ها با لایه نازکی از طلا، به وسیله SEM با بزرگنمایی ۵۰۰ و ۱۰۰۰ و ولتاژ ۱۵ kV از سطح آنها تصویربرداری شد.

## نتایج و بحث

### اندازه‌گیری مقاومت زبری سطوح رنگ آمیزی شده به وسیله دستگاه چرخنده

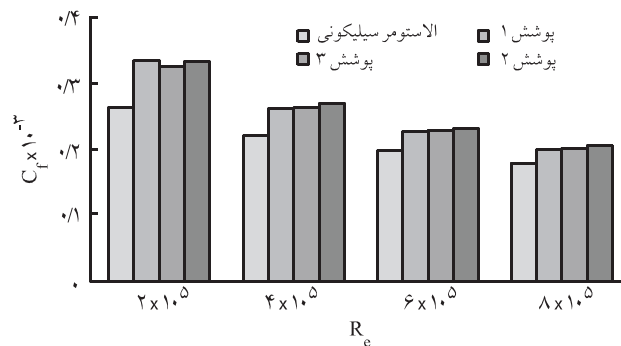
مناسب‌ترین روش بررسی اثر زبری سطح بر کارایی هیدرودینامیکی کلی کشتی و بررسی نیروی مقاوم آن، انجام آزمونها در مقیاس بزرگ با شرایط محیطی مختلف (با پوشش و بدون آن) بر بدنه است. اما، اصلی‌ترین و مهمترین مشکل در انجام این نوع آزمونها، هزینه زیاد و زمان بر بودن آنهاست. از میان روشهای آزمایشگاهی مختلفی که برای تعیین نیروی مقاومت اصطکاکی ارائه شده است، روش استوانه چرخان، بهترین نتایج را با کمترین مقدار خطا نشان داده است. مزیت این دستگاه هزینه کم، کارایی و نگهداری آسان آن است. افزون بر این، هیچ کدام از مشکلات مربوط به پیشرفت لایه مرزی در امتداد خط مورد آزمایش که در صفحه‌های اصطکاکی اتفاق می افتد، در بکارگیری این روش وجود ندارد. از جمله معایب این روش مشکل آثار انتهایی در بالا و پایین استوانه است، یعنی جایی که انتقال جریان از استوانه به دیسک باعث ایجاد اغتشاش می شود. بنابراین، با استفاده از دو استوانه با شعاع یکسان، ولی طول متفاوت می توان آثار انتهایی را به حداقل رساند. آزمایشهای استوانه چرخان روی سه نوع پوشش ضدخزه خودصیقل شونده با و بدون ماده زیست کش قلع تری بوتیل (TBT)، پوشش لیفی شکل و

حرکت شناور اثر می کنند، بسیار زیاد می شود. چنانچه در نتایج حاصل از اندازه گیری مقاومت مشاهده شد، با افزایش سرعت شناور، اثر نوع پوشش در مقاومت اصطکاکی کمتر می شود. به عبارت دیگر سهم مقاومت اصطکاکی در مقاومت کل کمتر می شود.

### بررسی انرژی سطحی پوششهای مختلف

انرژی سطحی پوششهای مختلف ضدخزّه خود صیقل شونده حاوی قلع (محصول پارس پامچال، همپل و رنگ آفرین) و پوششهای سیلیکونی تهیه شده در آزمایشگاه، با تعیین زوایای تماس مایعات مختلف روی سطح نمونه های مورد آزمایش اندازه گیری شد. مایعات مورد استفاده دارای اجزای قطبی و پراکنده بوده، همچنین محدوده وسیعی از انرژی سطحی را شامل می شوند. برای اندازه گیری زاویه تماس از مایعات آب و متان دی یدید استفاده شد، زیرا آب بیشترین جزء قطبی و متان دی یدید بیشترین جزء پراکنده از انرژی سطحی را دارند. برای افزایش دقت در محاسبه انرژی سطحی دامنه مقادیر انرژی سطحی گسترده تر در نظر گرفته شد. به همین علت از بنزیل الکل، فرامید و گلیسرین هم برای اندازه گیری زاویه تماس استفاده شد. در جدول ۳ مقادیر کشش سطحی مایعات مورد استفاده در اندازه گیری زاویه تماس آورده شده است.

در این پژوهش، برای بررسی قابلیت ترشوندگی نمونه پوششهای مختلف از روشهای زیسمن (Zisman) و آونز (Owenes) استفاده شد. در روش زیسمن که متداولترین روش اندازه گیری انرژی سطحی است، پارامتر تجربی انرژی سطحی بحرانی ( $\gamma_c$ ) بدست می آید که می توان از آن به عنوان معیاری برای بررسی قابلیت ترشوندگی سطح استفاده کرد.  $\gamma_c$  از لحاظ نظری مربوط به جامدی با زاویه تماس صفر است که ترشوندگی آن کامل باشد. هر قدر دامنه انرژی سطحی مایعات مورد استفاده وسیع تر و تعداد مایعات مورد آزمون بیشتر باشد، دقت آزمون بیشتر خواهد بود. در جدول ۴ مقادیر انرژی سطحی بحرانی تعیین شده



شکل ۵ تغییر ضریب مقاومت اصطکاکی در برابر عدد رینولدز برای پوششهای مختلف.

سرعتهای کم شناور (تقریباً ۶/۵ knot) حداکثر ۲۲ درصد و در سرعتهای زیاد (تقریباً ۲۵ knot) حداکثر ۱۲ درصد ضریب مقاومت اصطکاکی کاهش می یابد. در سرعتهای بیشتر مقدار کاهش مقاومت اصطکاکی کمتر می شود، زیرا در سرعتهای نسبتاً زیاد سهم مقاومت اصطکاکی در مقاومت کل کمتر می شود.

در هنگام حرکت شناور در محیط دریا، مقاومتها و نیروهای مختلفی در جهت خلاف حرکت شناور اثر می گذارند. از میان این مقاومتها، مقاومت اصطکاکی و مقاومت موج ساز بخش عمده مقاومت کل شناور را تشکیل می دهد. هر قدر سرعت شناور افزایش یابد، مقاومت کل شناور افزایش می یابد. اما در این میان، به دلیل اینکه مقدار مقاومت موج ساز نسبت به مقدار افزایش مقاومت اصطکاکی بیشتر است، اثر مقاومت اصطکاکی به مقاومت کل کمتر می شود. با افزایش سرعت حرکت شناور تا حدود ۳۰ knot، افزایش نیروی مقاومت ناشی از مقاومت موج ساز بسیار سریع است، این مسأله به دلیل تغییر حالت سیال (آب دریا) در اطراف شناور است. با افزایش سرعت و در نتیجه افزایش عدد رینولدز ( $Re > 10^5$ ) جریانهای اطراف شناور از حالت آرام (laminar) به حالت آشفته (turbulent) تغییر کرده، در نتیجه بر ایند نیروهایی که خلاف جهت

جدول ۲ درصد کاهش ضریب مقاومت اصطکاکی با انتخاب پوششهای سیلیکونی نسبت به پوششهای خود صیقل شونده در اعداد رینولدز مختلف.

عدد رینولدز	سرعت* (knot)	پوشش ۱		پوشش ۲		پوشش ۳	
		کاهش ضریب اصطکاک (%)	$C_f$	کاهش ضریب اصطکاک (%)	$C_f$	کاهش ضریب اصطکاک (%)	$C_f$
2x10 <sup>5</sup>	6/5	22	22	21	21	22	19
4x10 <sup>5</sup>	10/4	17	17	17	17	17	16
6x10 <sup>5</sup>	18/2	13	13	15	15	13	13
8x10 <sup>5</sup>	24/7	9	9	12	12	9	10

\* knot یا گره دریایی معادل ۱۷۸۵۲ km/h است.

به علت انرژی سطحی کم پوششهای سیلیکونی تمایل جذب و چسبیدن خزه‌های دریایی به سطح این نوع پوشش کمتر می‌شود، به علاوه ضخامت لایه مرزی سیال که همزمان با شناور در محیط دریا حرکت می‌کند نازکتر می‌شود، که این مسأله به افزایش قدرت مانور شناور کمک می‌کند.

پوششهای خود صیقل‌شونده اغلب دارای انرژی سطحی نسبتاً بیشتری هستند، بنابراین انتظار می‌رود که مقدار رسوب خزه روی سطح در این نوع پوششها نسبت به پوششهای سیلیکونی بیشتر باشد، اما از آنجا که این نوع پوشش در تماس با آب دریا قابلیت رهاسازی ترکیبات زیست‌کش را دارد. همچنین، بتدریج در آب دریا حل می‌شود، در نتیجه رسوب خزه‌های دریایی روی سطح شناور به حداقل می‌رسد.

به علت بیشتر بودن انرژی سطحی نسبتاً زیاد پوششهای خود صیقل‌شونده انتظار می‌رود که ضخامت لایه مرزی سیال (آب دریا) هنگام حرکت شناور بیش از پوششهای سیلیکونی باشد. بنابراین، نیروی مقاومی که در جهت مخالف حرکت شناور ایجاد می‌شود، بیش از نیروی مقاوم ایجاد شده در پوششهای سیلیکونی است.

در محدوده انرژی سطحی  $20-30 \text{ mN/m}$  (بهترین نتیجه  $25-23 \text{ mN/m}$ ) چسبندگی خزه‌ها و موجودات دریایی روی سطح شناور حداقل است [۱]. بنابراین، پوششهای سیلیکونی تهیه شده با انرژی سطحی بحرانی در محدوده  $26/6-23/7 \text{ mN/m}$  و حداقل چسبندگی خزه‌ها، در محدوده قابل قبول قرار دارند.

اساس کارایی پوششهای نجسب، داشتن حداقل انرژی سطحی لازم برای خنثی کردن یا مانع از چسبیدن موجودات دریایی به سطح است. پوششهای نجسب به دلیل دارا بودن سطحی با انرژی کم، چسبیدن موجودات را با مشکل مواجه می‌کنند. اگر شناور برای مدتی طولانی ساکن باشد، نشست موجودات روی بدنه شناور رخ می‌دهد. اما، اتصال بین آنها و سطح پوشش ضعیف بوده و در سرعتی بیشتر از سرعت آستانه بحرانی، نیروهای هیدرودینامیک که در خلاف جهت حرکت کشتی بر بدنه آن اعمال می‌شوند، هر نوع موجودی که بر سطح چسبیده باشد، جدا می‌کنند.

جدول ۳ کشش سطحی مایعات برای اندازه‌گیری زاویه تماس ایستا.

مایعات	$\gamma^D$	$\gamma^P$	$\gamma$ (mN/m <sup>2</sup> )
آب	۲۶	۴۶/۸	۷۲/۸
فرمامید	۲۸۷	۲۹/۵	۵۸۲
متان‌دی‌یدید	۴۸/۵	۲/۳	۵۰/۸
بنزین الکل	۳۰/۳	۸۷	۳۹
گلیسرین	۳۷	۲۶/۴	۶۳/۴

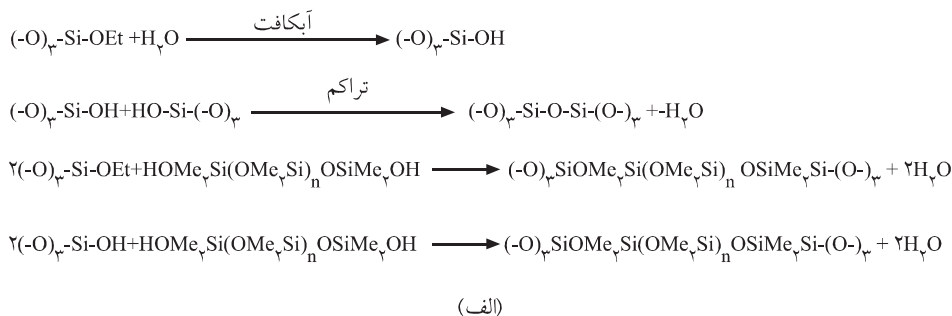
برای پوششهای مختلف آورده شده است. از آنجا که  $\gamma_c$  مقداری برون‌یابی شده است، ممکن است برای سطح یکسان بسته به مایعات مورد آزمون تغییر کند. بنابراین، برای به حداقل رساندن اختلافات بین مقادیر  $\gamma_c$  بدست آمده، آونز و همکاران انرژی سطحی را به عنوان ترکیبی از دو عامل جزء قطبی ( $\gamma^P$ ) و جزء پراکنده ( $\gamma^D$ ) در نظر گرفتند:

$$\gamma = \gamma^D + \gamma^P \quad (12)$$

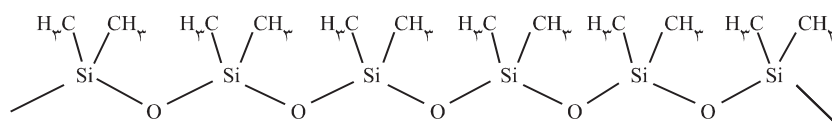
در جدول ۴ نتیجه محاسبات تعیین انرژی سطحی نمونه پوششهای مختلف به روشهای زیسمن و آونز آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد پوششهای سیلیکونی که انرژی سطحی کمتری دارند، در نتیجه قابلیت چسبیدن خزه‌های دریایی به سطح آنها کمتر خواهد بود. در پوششهای خود صیقل‌شونده آکریلی به علت وجود گروه‌های عاملی کربوکسیلی در ترکیب رزین، انرژی سطحی پوشش بیش از انرژی سطحی پوششهای سیلیکونی است. افزایش انرژی سطحی موجب بهبود خاصیت ترشوندگی سطح می‌شود، این امر به معنای افزایش تماس فیزیکی بین پوشش و لایه‌های سطحی آب دریا و در نتیجه جذب بیشتر خزه‌های دریایی است. بنابراین، اگر پوششهای مختلف خود صیقل‌شونده با پوششهای مختلف الاستومر سیلیکونی از نظر انرژی سطحی مقایسه شود، نتایج زیر به طور خلاصه بدست می‌آید:

جدول ۴ انرژی سطحی ( $\text{mN/m}$ ) نمونه پوششهای ضد خزه به روش آونز و زیسمن.

روش زیسمن	روش آونز			کد پوشش
	$\gamma_s^P$ (mN/m)	$\gamma_s^D$ (mN/m)	$\gamma_s$ (mN/m)	
۳۳/۸	۶/۸	۲۸۳	۳۵/۱	۱
۳۲/۷	۸/۵	۲۷/۶	۳۶/۱	۲
۳۲/۴	۵/۵	۲۸۲	۳۳/۷	۳
۲۴/۷	۰/۲	۶۵/۲	۲۶/۴	۵



(الف)



(ب)

طرح ۱ (الف) ساز و کار پخت تراکمی پوشش الاستومر سیلیکونی و (ب) تصویر نمایی PDMS در سطح مشترک هوا با زیرآیندی با انرژی سطحی زیاد.

حرکت شناور با مشکل مواجه می‌کند.

آونز ویژگیهای بنیادی PDMS را به شرح زیر بیان کرده است:

۱- انرژی سطحی کم در هوا (۲۳ mN/m) نتیجه مستقیمی از نیروهای مولکولی ضعیف در بین گروههای متیل است. گروههای فرعی متیل به شکل انباشتگی فشرده متیل در سطح مشترک هوا - PDMS بدون اثرپذیری از زنجیر اصلی سیلوکسان با قطبیت قابل ملاحظه‌ای (درصد یونی ۴۱) عمل می‌کند.

۲- زنجیر اصلی سیلوکسان انعطاف پذیری ویژه‌ای دارد که ناشی از عواملی از قبیل طول پیوند Si-O، زوایای پیوندی مسطح سیلوکسان و ماهیت تا حدی یونی پیوندهاست. در میان پلیمرها، PDMS با  $T_g$  برابر  $127^\circ\text{C}$  انعطاف پذیرترین زنجیر اصلی را داراست. در نتیجه به آسانی می‌تواند پیکربندی با کمترین انرژی سطحی را داشته باشد. فشردگی گروههای جانبی متیل در سطح مشترک PDMS - هوا به دلیل انعطاف پذیری آن ممکن می‌شود. البته این خاصیت موجب می‌شود مونومرهای PDMS پیکربندی متفاوتی در سطحی مشترک غیر از PDMS - هوا داشته باشند. درحالی که دوقطبی زنجیر اصلی اثر بسیار مهمی را در این برهمکنش دارد. این تغییر پیکربندی باید از کاهش کلی در انرژی سطحی پوشش ناشی شده باشد.

۳- انرژی پیوندی زیاد پیوند سیلوکسان ( $445 \text{ kg mol}^{-1}$ ) که بسیار بزرگتر از انرژی پیوند کربن - کربن یا اکسیژن - کربن است، موجب پایداری PDMS در مقابل اکسایش و گرما می‌شود.

۴- ماهیت تا حدی یونی (۴۱ درصد یونی) پیوند سیلوکسان نتیجه‌ای از اختلاف الکترون‌خواهی زیاد اتمهای سیلیکون و اکسیژن است. بنابراین، انعطاف پذیری مولکول منجر به پیکربندیهای می‌شود که از

PDMS پلیمری غیرقطبی با زنجیر اصلی بسیار انعطاف پذیر است ( $T_g$  کم) که همین امر این امکان را بوجود می‌آورد که آرایش فضایی زنجیر پلیمر طوری تغییر کند که از کمترین انرژی سطحی برخوردار شود. سیلوکسان جزء غیر معدنی پلیمر است، که انرژی سطحی زیاد و نیروهای بین مولکولی قوی دارد. گروههای متیل، هیدروکربنهای آلی هستند که انرژی سطحی کم و نیروهای بین مولکولی ضعیف دارند و آبگریزند. فشردگی گروههای متیل در سطح مشترک PDMS - هوا در مقایسه با هیدروکربنهای غیرقطبی معادل، باعث کشش سطحی کمتر ترکیبات سیلیکونی می‌شود. در طرح ۱ (الف) واکنشهای پخت تراکمی و طرح ۱ (ب) تصویر نمایی PDMS در سطح مشترک هوا با زیرآیندی با انرژی سطحی زیاد نشان داده شده است.

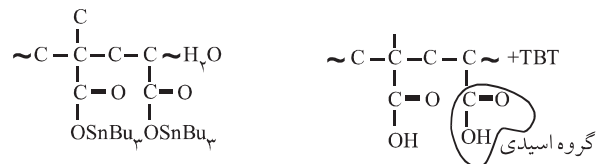
مقدار انرژی آزاد سطح نمایانگر قابلیت سطح در برخورد متقابل با سایر مواد است. انرژی آزاد سطحی PDMS در هوا برابر  $23 \text{ mN/m}$  است که بطور مستقیم به کم بودن نیروهای درون مولکولی بین گروههای متیل مربوط می‌شود.

علاوه بر انرژی سطحی، مدول کشسان و ضخامت، صافی سطح نیز عامل بسیار مهمی در مؤثر بودن پوشش خزه رها ساز محسوب می‌شود. مساحت سطح موجود برای چسبیدن فیزیکی و اتصال موجودات، با کاهش صافی سطح (یا افزایش زبری) افزایش می‌یابد. هرچه عمق زبری بیشتر باشد (زبری عمیق تر باشد)، مساحت سطح برای چسبندگی موجودات دریایی بیشتر می‌شود، چسبنده‌های دریایی بیشتر به آنها نفوذ می‌کنند. در نتیجه زمینه برای آلودگی مستعدتر می‌شود. در ضمن، موجودات از لحاظ قرار گرفتن در معرض برش و ساییش در خطر کمتری خواهند بود. بنابراین، زبری سطح جداسازی آلودگی را حین



مس اکسید و ترکیبات آلی - فلزی نظیر تری بوتیل قلع اکسید (TBTO)، تری بوتیل قلع فلوئورید (TBTF) یا تری فنیل قلع فلوئورید (TPTF) در لایه‌ای از آب در مجاورت سطوح مغروق کشتی، موجب از بین رفتن ریز موجودات و موجودات زنده دریایی چسبیده به سطح شده، بدین ترتیب در مقابله با پدیده آلودگی علاوه بر اینکه از افزایش مقاومت اصطکاک بین بدنه کشتی و آب دریا جلوگیری می‌کند، در گونه‌هایی که مواد زیست کش همراه با زنجیر پلیمری وارد لایه مرزی می‌شود، اغتشاشات لایه مرزی را کنترل کرده، باعث کاهش مقاومت اصطکاک می‌شود.

مواد زیست کش از راه اتصال شیمیایی به پیونده متصل شده‌اند. آب دریا به آرامی به اتصال شیمیایی بین ماده سمی و پیونده حمله کرده، باعث آزاد شدن مواد زیست کش و انحلال پوشش می‌شود. این نوع پوششها بر پایه پلیمرهای آلی - فلزی هستند که در ترکیب آلی - فلزی آن



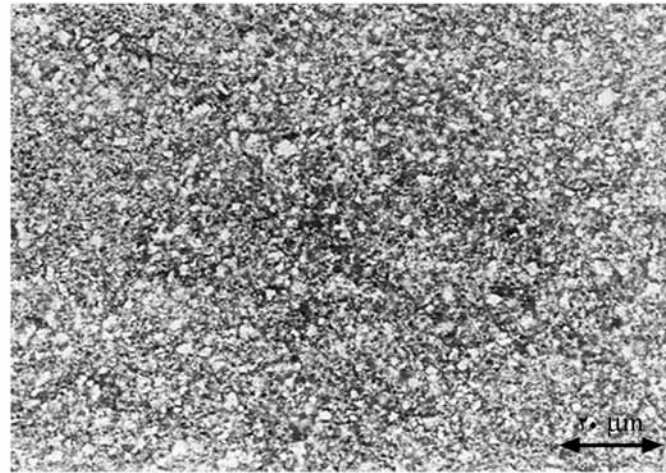
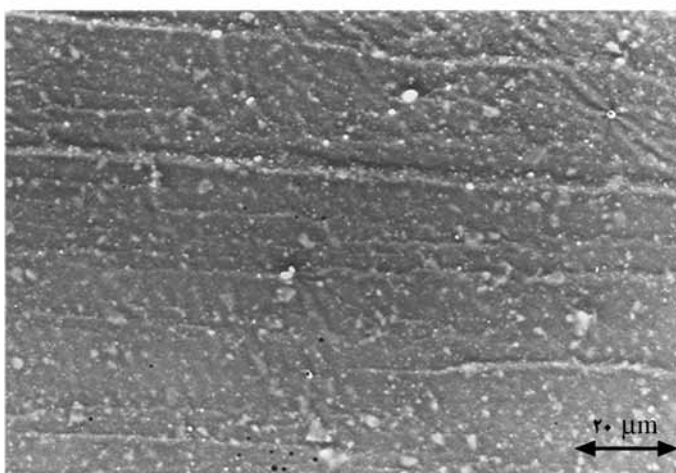
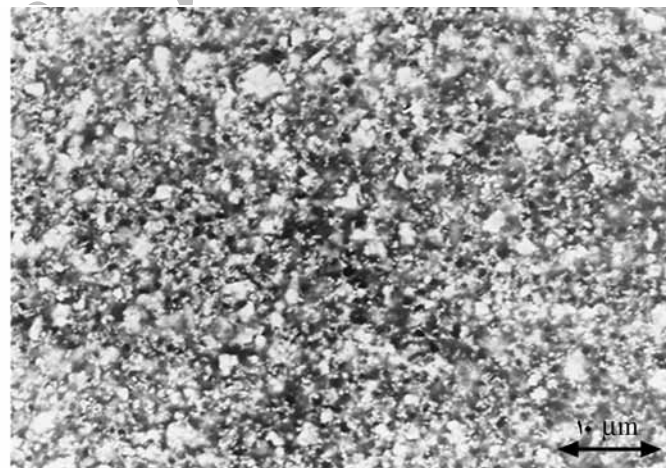
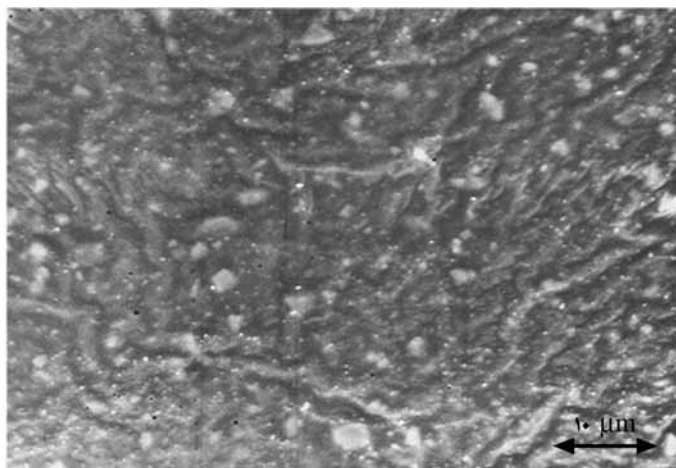
مقدار سایش x غلظت مواد سمی موجود در رنگ = مقدار تراوش مواد ضد خزه

طرح ۲ واکنش تری بوتیل قلع آکریلات در آب دریا در پوششهای خود صیقل شونده.

برهمکنش دوقطبی زنجیر اصلی با زیریند قطبی ایجاد شود.

### پوششهای خود صیقل شونده

پوششهای حاوی مواد زیست کش (که با عنوان رنگهای ضد خزه نیز شناخته می‌شوند)، با آزادسازی مواد سمی یا زیست کشها مانند



(ب)

(الف)

شکل ۶ تصاویر SEM: (الف) پوشش خود صیقل شونده و (ب) پوشش سیلیکونی.

نشان می دهند. نتایج این پژوهش نشان می دهد که استفاده از دستگاه استوانه چرخان، روش مؤثری در بررسی و اندازه گیری پوششهای مختلف است. با بکارگیری دستگاه استوانه چرخان، کاهش نیروی مقاومت اصطکاکی ناشی از جایگزینی پوششهای الاستومر سیلیکونی به جای پوششهای خود صیقل شونده حدود ۱۰ تا ۲۲ درصد کاهش می یابد. همچنین، در سرعتهای بیشتر مقدار کاهش مقاومت اصطکاکی کمتر می شود، زیرا با افزایش سرعت، جریان آرام لایه مرزی اطراف استوانه به سمت جریان آشفته تغییر می کند و در نهایت سهم مقاومت اصطکاکی در مقاومت کل شناور کمتر می شود.

همچنین، نتایج انرژی سطحی نیز نشان می دهد که پوششهای سیلیکونی انرژی سطحی کمتری نسبت به نمونه های خود صیقل شونده داشته، در نتیجه قابلیت چسبیدن خزه های دریایی به سطح آنها کمتر است، اگر هم خزه ها و سایر موجودات دریایی روی سطح بچسبند. به دلیل ضعیف بودن نیروی چسبندگی در اثر حرکت شناور در آب از روی سطح جدا خواهند شد.

در محدوده انرژی سطحی  $20-30 \text{ mN/m}$  (بهترین نتیجه  $23-25 \text{ mN/m}$ ) چسبندگی خزه ها و موجودات دریایی روی سطح شناور حداقل است. بنابراین، همه پوششهای سیلیکونی تهیه شده با انرژی سطحی بحرانی در محدوده  $23/7-26/6 \text{ mN/m}$  و حداقل چسبندگی خزه ها، در محدوده قابل قبول هستند.

پوشش الاستومر سیلیکونی فرمولبندی شده انرژی سطحی کمتر و زبری سطحی کمتر نسبت به سامانه های پوشش متداول خود صیقل شونده آکرلیلی دارند. بنابراین، با هدف کاهش مقاومت اصطکاکی این نوع پوشش می تواند جایگزین مناسبی برای پوششهای خود صیقل شونده باشد.

## مراجع

1. Candries M., *Drag, Boundary-layer and Roughness Characteristics of Marine Surfaces Coated with Antifouling*, PhD Thesis, Department of Marine Technology, University of Newcastle-upon-Tyne, UK, 2001.
2. Lackneby H., Resistance of Ships with Special Reference to Skin Friction and Hull Surface Condition, *34th Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, **176**, 981-1014, 1962.
3. Bertram V., Past, Present and Prospects of Antifouling, *32th WEGEMT School on Marine Coatings*, University of Plymouth, UK, 85-97, 2000.
4. Candries M. and Atlar M., Experimental Investigation of the

اکثر آکوپلیمرهای تری بوتیل قلع آکریلات استفاده می شود. در آب دریا ترکیبات آلی - قلع به شکل بخش به بخش در قسمت های مساوی آزاد می شوند و گروه های اسیدی به جا می گذارند (طرح ۲) و باعث ایجاد پلیمری می شود که در آب تا حدودی قلبایی دریا، انحلال پذیر است. بنابراین، وضعیتی ایجاد می شود که با سایش تدریجی لایه پوشش ضدخزه، محافظت در برابر رشد آلودگی انجام می گیرد و صیقلی بودن سطوح زیرآبی نیز حفظ می شود.

## بررسی مقدار زبری سطح با استفاده از SEM

تصاویر حاصل از بررسی میکروسکوپی الکترون پویشی (SEM) نمونه ها در شکل ۶ نشان داده شده است. این نتایج نشان می دهد که سطح پوششهای خود صیقل شونده تخلخل و زبری بیشتری نسبت به پوششهای سیلیکونی دارد. بنابراین، نتایج SEM هم تأییدی بر خصوصیات مناسب سطح پوشش الاستومر سیلیکونی برای کاهش مقاومت اصطکاکی نسبت به پوششهای خود صیقل شونده است.

## نتیجه گیری

در این پژوهش، اثر سه نوع پوشش مختلف که در صنایع رنگ دریایی کاربرد دارند روی مقاومت اصطکاکی وارد بر بدنه شناور بررسی شد. نتایج آزمون نشان می دهد که به غیر از پوششهای پرزدار، دو پوشش دیگر نتایج بهتری را در کاهش مقاومت اصطکاکی نشان می دهند. در مقایسه بین این دو پوشش نیز در منحنی انتقال رو به پایین توزیع سرعت، پوششهای سیلیکونی نتیجه بهتری را در کاهش مقاومت اصطکاکی

Turbulent Boundary Layer of Surfaces Coated with Marine Antifouling, *J. Fluid. Eng., Trans. ASME*, **127**, 219-232, 2005.

5. Candries M., Atlar M., Mesbahi E. and Pazouki K., The Measurement of the Drag Characteristics of Tin-free Self-polishing Co-polymers and Fouling Release Coatings Using a Rotor Apparatus, *Biofouling*, **19**, 27-36, 2003.
6. Graham D.P., Use of Plastic Ship Bottom Paints, *Trans. Soc. Nav. Archit. Marine Eng. (SNAME)*, **55**, 202-243, 1947.
7. Milne A., Roughness and Drag from the Marine Paint Chemist's Viewpoint, *Marine Roughness and Drag Workshop*, London, UK, Paper 12, 1990.

8. Anderson C.D., Self-polishing Antifoulings: A Scientific Perspective, *Proceedings of Ship Repair and Conversion* 93, BML Business Meetings, 1993.
9. Froud W., Experiments for the Frictional Resistance of Water on the Surface Under Various Condition, British Association for the Advancement of Science, Report 1874, 1985.
10. Townsin R.L. and Dey S.K., The Measurement of Roughness Drag of Painted Surfaces Using a Rotor Apparatus, *Int. J. Shipbuilding Prog.*, **40**, 227-245, 1993.
11. Medhurst J.S., *The Systematic Measurement and Correlation of the Frictional Resistance and Topography of Ship Hull Coatings, with Particular Reference to Ablative Antifoulings*, PhD Thesis, Department of Marine Technology, University of Newcastle-upon-Tyne, UK, 1989.
12. Medhurst J.S. and Townsin R.L., Indirect Measurement of the Velocity Loss Function Using a Rotor, *Marine Roughness and Drag Workshop*, London, UK, Paper 1, 1990.
13. Choi K.-S., Yang X., Clayton B.R., Glover E.J., Atlar M., Semenov B.N. and Kulik V.M., Turbulent Drag Reduction Using Compliant Surfaces, *Proceedings of the Royal Society of London*, **453**, 2229-2240, 1997.
14. Hama F.R., Boundary Layer Characteristics for Smooth and Rough Surface, *Trans. Soc. Nav. Archit. Marine Eng. (SNAME)*, **62**, 333-358, 1954.

Archive of SJU