



## بررسی تاثیر نانو ذرات اروزیل R۹۷۲ بر خواص ترشوندگی پوشش نانو کامپوزیتی زمینه پلیمری اعمال شده روی زیرلایه کربن استیل

محمد قربان نژاد

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بازرسی فنی، دانشکده مکانیک و انرژی، دانشگاه شهیدبهشتی، تهران، ایران.

علی کلاکی

دکتری مهندسی مواد و متالورژی، رئیس دپارتمان بازرسی فنی، شرکت مهندسی و توسعه نفت، تهران، ایران.

### چکیده

پوشش‌های نانوکامپوزیتی آبریز در بسیاری از صنایع دریایی همانند بدنه شناورهای دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از پوشش‌های نانوکامپوزیتی آبریز در بدنه شناورهای دریایی سبب کاهش نیروی درگ ناشی از اصطکاک سطحی در بدنه شناور و افزایش بازده سوخت شناور می‌گردد. در این پژوهش پوشش نانوکامپوزیتی زمینه سیلیکونی تقویت شده با نانو ذرات فیوم سیلیکا اصلاح شده با کلروسیلان (اروزیل R۹۷۲) در چهار درصد ۰/۵، ۱، ۲ و ۵/۲٪ وزنی ساخته شده و پس از اعمال بر روی سطح کربن استیل با ضخامت  $120\text{ }\mu\text{m}$  خواص ترشوندگی آن جهت بدست آوردن بهینه میزان خواص آبریزی مورد بررسی قرار گرفته است. خواص ترشوندگی پوشش در این پژوهش با استفاده از آزمون زاویه تماس و محاسبه انرژی سطحی به وسیله مدل اונز و وندت بررسی گردید. نتایج حاصل از آزمون زاویه تماس نشان داد، پوشش نانوکامپوزیتی زمینه سیلیکونی حاوی ۲٪ وزنی نانو ذرات اروزیل R۹۷۲ بیشترین خواص آبریزی را نسبت به سایر نمونه‌های ساخته شده با زاویه تماس  $107^\circ$  و انرژی سطحی  $17/57\text{ mN/m}$  دارد. همچنین در نمونه حاوی ۵/۲٪ وزنی نانو ذرات اروزیل R۹۷۲ به دلیل کاهش انرژی سطحی تشکیل فیلم یکنواخت با ضخامت  $120\text{ }\mu\text{m}$  بر روی سطح کربن استیل امکان پذیر نبوده و فیلم حاصل دچار عیوبی می‌گردد.

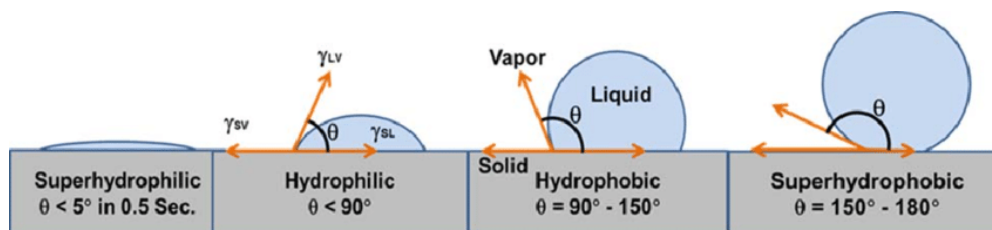
**واژگان کلیدی:** پوشش نانوکامپوزیتی، ترشوندگی، خواص سطحی، رزین سیلیکونی، اروزیل R۹۷۲.



## مقدمه

امروزه یکی از چالش‌های مهم در حرکت شناورهای دریایی، نیروی درگ اصطکاکی ایجاد شده در بدنه شناورهای دریایی می‌باشد (Liravi et al. 2020). کاهش نیروی درگ اصطکاکی سبب افزایش سرعت حرکت کشتی و در پی آن افزایش بازده سوخت کشتی می‌گردد. یکی از مهمترین روش‌ها برای کاهش نیروی درگ اصطکاکی استفاده از پوشش‌های نانوکامپوزیتی آبگریز جهت تغییر در ترشوندگی سطح بدنه کشتی می‌باشد (Online et al. 2013).

ترشوندگی توانایی یک مایع برای پخش شدن بر روی سطح جامد می‌باشد (Thiele and Que 2002). میزان ترشوندگی سطوح با استفاده از آزمون زاویه تماس اندازه‌گیری و نشان داده می‌شود (Yue et al. 2013). مطابق نتایج آزمون زاویه تماس، سطوح جامد بر اساس زاویه تماس قطره آب بر روی سطح آنها، به چند دسته مختلف سطوح آبدوست، آبگریز، فوق آبدوست و فوق آبگریز تقسیم می‌شوند. در جدول ۱ و شکل ۱ دسته‌بندی سطوح بر اساس زاویه تماس قطره آب ارائه شده است (Asmatulu et al. 2015).



شکل ۱. طرحواره زاویه تماس قطره آب بر روی سطح (Asmatulu et al. 2015).

جدول ۱. دسته‌بندی سطوح بر اساس زاویه تماس (Tlili and Alkanhal 2019).

زاویه تماس	$\theta < 5^\circ$	$5^\circ < \theta < 90^\circ$	$90^\circ < \theta < 150^\circ$	$\theta > 150^\circ$
نوع ترشوندگی سطح	فوق آبدوست <sup>۳</sup>	آبدوست <sup>۲</sup>	آبگریز <sup>۱</sup>	فوق آبگریز

در بحث ترشوندگی، مدل‌های مختلفی وجود دارد. مهمترین این مدل‌ها عبارتند از: ۱. مدل یانگ، ۲. مدل ونزل و ۳. مدل کاسی و بکستر. مدل یانگ در سال ۱۸۰۵ با فرض اعمال یک قطره مایع روی یک سطح صاف ایده آل ارائه شده است. در این مدل، ترشوندگی مطابق رابطه ۱ با انرژی آزاد سطح رابطه دارد (Manuscript 2016).

$$\cos\theta = (\gamma_{sv} - \gamma_{sl}) / \gamma_{lv} \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $\theta$ ، زاویه ترشوندگی،  $\gamma_{sv}$ ، نیروی کشش سطحی بین جامد و بخار،  $\gamma_{sl}$ ، نیروی کشش سطحی بین جامد و مایع و  $\gamma_{lv}$ ، نیروی کشش سطحی بین مایع و بخار است.

<sup>1</sup> Hydrophobic

<sup>2</sup> Hydrophilic

<sup>3</sup> Superhydrophilic



در مدل ونزل که در سال ۱۹۳۶ ارائه شده است علاوه بر تاثیر انرژی سطح، اثر زبری سطح نیز با زاویه تماس مورد بررسی قرار گرفته و مطابق رابطه (۲) بیان شده است (Wenzel 1936).

$$r(\gamma_{sv} - \gamma_{sl}) = \gamma_{lv} \cos \theta \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $\theta$ ، زاویه ترشوندگی تحت تاثیر پارامتر ناهمواری سطح،  $\gamma_{sv}$ ، نیروی کشش سطحی بین جامد و بخار،  $\gamma_{sl}$ ، نیروی کشش سطحی بین جامد و مایع،  $\gamma_{lv}$ ، نیروی کشش سطحی بین جامد و بخار و  $r$ ، پارامتر ناهمواری سطح ( $r$  همواره بزرگتر از یک) است.

مدل کاسی و بکستر نیز در سال ۱۹۴۴ ارائه شده است. در این مدل قطره آب بر روی کامپوزیتی از هوا و سطح جامد قرار دارد. زاویه تماس در این مدل از رابطه ۳ بدست می‌آید (Cassie and Baxter 1944).

$$\cos \theta = f_{SL} \cos \theta_1 + f_{LA} \cos \theta_2 \quad (3)$$

با مقایسه مدل‌های مختلف می‌توان بیان کرد مدل یانگ از آنجایی که تنها بحث انرژی سطحی را مدنظر قرار داده و از پارامتر زبری سطح صرفه نظر کرده است، در اکثر مواقع حالت‌های زاویه تماس را نمی‌تواند توجیه نماید. در مدل ونزل برخلاف حالت یانگ چون پارامتر زبری سطح در روابط مدنظر قرار داده شده در اکثر مواقع قابلیت توجیه زاویه تماس‌های آبگریز و آبدوست وجود دارد ولی چون از هوای بین قطرات آب و سطح صرف نظر شده است قابلیت توجیه فوق آبگریزی و فوق آبدوستی وجود ندارد، در حالی که در مدل کاسی بکستر با توجه به در نظر گرفته شدن هوای بین سطح و قطرات آب، قابلیت توجیه زاویه‌های فوق آبگریز و آبدوست وجود دارد (Barati Darband et al. 2020).

با توجه به مدل‌های بیان شده، پوشش‌های نانو کامپوزیتی آبگریز زمینه پلیمری با استفاده از دو پارامتر زبری سطح و شیمی سطح سبب تغییر در نوع ترشوندگی سطح می‌گردند. در واقع پوشش‌های نانو کامپوزیتی با افزودن نانو ذرات به زمینه پلیمری سبب مهاجرت نانو ذرات به سطح و به دنبال آن افزایش زبری سطح و کاهش انرژی سطح می‌گردند. به عنوان نمونه در پژوهش جیو و همکارانش (Guo et al. 2023). سوسپانسیونی از نانو ذرات سیلیس، پلی دی متیل سیلوکسان و رزین اپوکسی تهیه کرده‌اند و با استفاده از اسپری بر روی زیرلایه دارای پوشش اپوکسی اعمال کردند. پوشش حاصل دارای زاویه تماس  $163^\circ$  بوده که توانایی تحمل نور UV به مدت ۱۸۰ ساعت و همچنین غوطه‌ور شدن در محلول‌های اسیدی یا بازی به مدت ۱۶۸ ساعت را داشته است. در پژوهش دیگر هیو و همکارانش (Hou, Fan, and Yang 2024) پوشش کامپوزیتی پایه اپوکسی حاوی فلوئور P(GMA-R-DFMA) و نانوذرات سیلیس اصلاح شده با KH550 به عنوان یک پوشش فوق آبگریزی هیبریدی آلی-معدنی ساختند و بر روی الیاف کاغذ اعمال نمودند. نتایج حاصل نشان داد پوشش حاصل دارای زاویه تماس  $164^\circ$  می‌باشد. از سوی دیگر به علت فوق آبگریز شدن سطح کاغذ، کاغذ خاصیت خود تمیزشوندگی پیدا کرده در حالی که کاغذ پوشش داده شده و پوشش داده نشده سفیدی، صافی و براقی سطح آن تغییری نکرده است.

در این پژوهش به ساخت و بررسی خواص آبگریزی پوشش نانو کامپوزیتی زمینه پلیمری با هدف استفاده در بدنه کشتی پرداخته شده است. در بین زمینه‌های پلیمری مختلف رزین سیلیکونی به علت آبگریزی بالا، مقاومت به خوردگی مناسب، ویسکوزیته پایین، پایداری شیمیایی و سرعت پخت خوب به عنوان زمینه در این پژوهش انتخاب گردید (Jiang et al. 2020). از طرفی دیگر از نانوذرات فیوم سیلیکا اصلاح شده با کلروسیلان به عنوان نانو ذراتی که آبگریز می‌باشند به عنوان تقویت کننده استفاده شده است.



## روش تحقیق

### • مواد اولیه

در این پژوهش از رزین سیلیکونی با نام تجاری SILRES® REN 60 ساخت شرکت Wacker، فیوم سیلیکا اصلاح شده با کلروسیلان آبگریز با نام تجاری Aerosil R972 (اروزیل R۹۷۲) ساخت شرکت Evonic با سطح مخصوص ۱۱۰ مترمربع بر گرم و با قطر ۱۶ نانومتر و کربن استیل با ابعاد ۱۰\*۱۰ سانتی‌متر مربع به عنوان زیرلایه استفاده شده است.

### • روش ساخت و اعمال پوشش نانوکامپوزیتی

برای ساخت پوشش نانوکامپوزیتی در ابتدا رزین سیلیکونی و نانو ذرات اروزیل R۹۷۲ با درصدهای ۰/۵، ۱، ۲ و ۵/۲٪ وزنی با استفاده از ترازو به صورت جداگانه اندازه‌گیری شده و درون ظرفی در بسته ریخته شده است. در ادامه برای ساخت پوشش نانو کامپوزیتی زمینه سیلیکونی حاوی نانو ذرات فیوم سیلیکا، نانو ذرات اروزیل R۹۷۲ در چهار درصد ۰/۵، ۱، ۲ و ۵/۲٪ وزنی به صورت جداگانه به رزین سیلیکونی اضافه می‌گردد. سپس نمونه‌ها بر روی دستگاه همزن مغناطیسی با دور ۳۰۰ rpm به مدت ۱۰ دقیقه قرار داده شده است. در ادامه جهت اختلاط یکنواخت و همگن سازی از دستگاه آلتراسونیک به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۴۰ kHz و همزن مکانیکی و پرل زکونیا به مدت ۳۰ دقیقه با دور ۶۰۰۰ rpm استفاده شده است. پس از اتمام کار فرآیند اختلاط و همگن سازی، نمونه‌ها از دستگاه خارج شده و با استفاده از فیلم کش بر روی صفحه کربن استیل با ابعاد ۱۰\*۱۰ سانتی‌متر مربع با ضخامت ۱۲۰ میکرومتر اعمال شده است. در نهایت جهت انجام فرآیند پخت صفحات کربن استیل حاوی پوشش در داخل آون با دمای ۳۰۰°C به مدت ۱۲۰ دقیقه قرار داده شده است.

### • آزمون‌ها

#### ➤ آزمون زاویه تماس

در این پژوهش برای اندازه‌گیری میزان ترشوندگی پوشش، از آزمون زاویه تماس بر اساس استاندارد ASTM D7334 استفاده شده است. اندازه‌گیری زاویه تماس قطره بر روی پوشش‌ها توسط دستگاه زاویه تماس شرکت اطلس پوشش محافظ انجام شده است. در این آزمایش قطره‌های با حجم ۶ میکرولیتر بر روی سطح پوشش نانو کامپوزیتی قرار گرفته و پس از پایدار شدن قطرات بر روی سطح، تصویر قطرات برای اندازه‌گیری زاویه تماس تهیه شده است. اندازه‌گیری زاویه تماس در این پژوهش توسط نرم افزار ImageJ بدست آمده است. در این آزمایش هر اندازه‌گیری سه مرتبه تکرار شده است.

#### ➤ اندازه‌گیری انرژی سطحی

در این پژوهش برای محاسبه انرژی سطحی از آزمون زاویه تماس توسط دو سیال آب و نرمال هگزان و روابط اونز و وندت استفاده شده است. در واقع انرژی سطحی از دو مولفه‌ی پاشندگی و قطبی تشکیل شده است. مولفه‌ی قطبی ناشی از نیروی کولنی بین دو مولکول قطبی و مولفه‌ی پاشندگی ناشی از نیروی واندروالسی بین مولکولی/ اتمی دو فاز در برهمکنش با یکدیگر می‌باشد. بر این اساس همه‌ی مواد دارای مولفه‌ی پاشندگی بوده، اما تنها موادی دارای مولفه‌ی قطبی هستند که مولکول قطبی داشته باشند. انرژی هر سطح جامد و مایعی از طریق این دو مولفه طبق روابط (۴) و (۵) بدست می‌آید (Christopher Rulison and Manager, n.d.).

$$\gamma_s = \gamma_s^D + \gamma_s^P \quad (4)$$



$$\gamma_L = \gamma_L^D + \gamma_L^P \quad (5)$$

در رابطه (۴) و (۵)،  $\gamma_s$ ، انرژی سطحی کل جامد،  $\gamma_L$ ، انرژی سطحی کل مایع،  $\gamma_s^D$ ، مولفه‌ی پاشندگی انرژی سطحی جامد،  $\gamma_s^P$ ، مولفه‌ی قطبی انرژی سطحی جامد،  $\gamma_L^D$ ، مولفه‌ی پاشندگی انرژی سطحی مایع و  $\gamma_L^P$ ، مولفه‌ی قطبی انرژی سطحی مایع است.

همچنین اوزن و وندت مدلی بین انرژی سطحی و زاویه تماس دو فاز مایع و جامد معرفی کردند. در این مدل انرژی سطحی و زاویه تماس طبق معادله (۶) با یکدیگر رابطه دارند (Christopher Rulison and Manager, n.d.).

$$\gamma_L(1 + \cos\theta)/2 = \sqrt{(\gamma_s^D \times \gamma_L^D)} + \sqrt{(\gamma_s^P \times \gamma_L^P)} \quad (6)$$

در رابطه (۶)،  $\gamma_L$ ، انرژی سطحی کل مایع،  $\gamma_s^D$ ، مولفه‌ی پاشندگی انرژی سطحی جامد،  $\gamma_s^P$ ، مولفه‌ی قطبی انرژی سطحی جامد،  $\gamma_L^D$ ، مولفه‌ی پاشندگی انرژی سطحی مایع،  $\gamma_L^P$ ، مولفه‌ی قطبی انرژی سطحی مایع و  $\theta$ ، زاویه تماس ناشی از آزمون زاویه تماس می‌باشد.

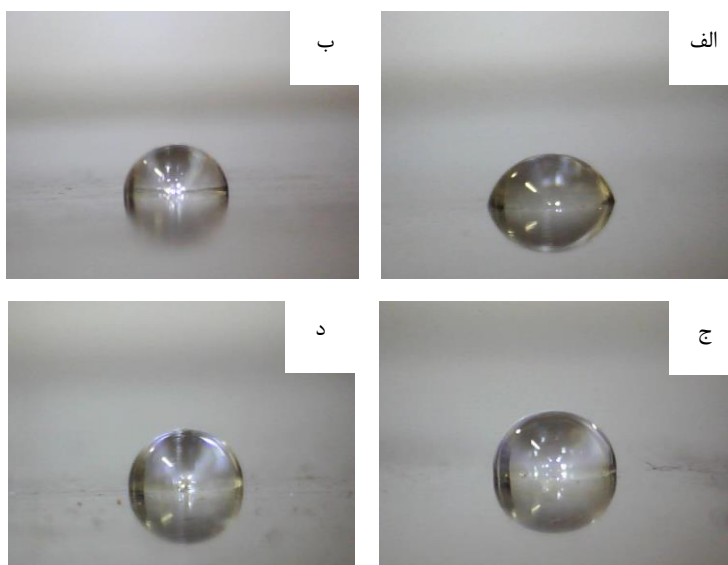
به کمک روابط (۴)، (۵) و (۶) و جدول ۲ که در آن میزان مولفه‌ی پاشندگی و مولفه‌ی قطبی مایعات مختلف ذکر شده است، انرژی سطحی نمونه‌های ساخته شده مورد بررسی قرار گرفت (Christopher Rulison and Manager, n.d.).

جدول ۲. میزان مولفه‌های مختلف انرژی سطحی مایعات (Christopher Rulison and Manager, n.d.).

مایع	مولفه‌ی قطبی انرژی سطحی (mN/m)	مولفه‌ی پاشندگی انرژی سطحی (mN/m)
نرمال هگزان	۰/۰	۱۸/۴
نرمال هپتان	۰/۰	۱۹/۹
نرمال اکتان	۰/۰	۲۱/۳
آب	۴۶/۴	۲۶/۴

## یافته‌ها

در شکل ۲ و جدول ۳ نتایج حاصل از آزمون زاویه تماس و در جدول ۴ نتایج حاصل از انرژی سطحی پوشش‌های نانوکامپوزیتی زمینه سیلیکون حاوی نانوذرات اروزیل R۹۷۲ در سه درصد ۰/۵، ۱ و ۲٪ وزنی در مقایسه با پوشش رزین سیلیکونی خالص نشان داده است. لازم به ذکر است نمونه حاوی ۲/۵٪ وزنی نانوذرات اروزیل R۹۷۲ به دلیل کاهش انرژی سطحی تشکیل فیلم یکنواخت با ضخامت  $120 \mu\text{m}$  بر روی سطح کربن استیل نمی‌دهد. در شکل ۳ تصویر نمونه سیلیکونی حاوی ۲/۵٪ نانوذرات اروزیل R۹۷۲ آورده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده می‌شود، به علت کاهش انرژی سطحی در نمونه سیلیکونی حاوی ۲/۵٪ نانوذرات اروزیل R۹۷۲ و تفاوت زیاد انرژی سطحی در فصل مشترک پوشش و زیرلایه، پوشش به طور یکنواخت بر روی زیرلایه تشکیل نمی‌گردد. لذا به دلیل عدم تشکیل فیلم یکنواخت بر روی سطح زیرلایه، از ساخت پوشش نانو کامپوزیتی زمینه سیلیکونی با درصدهای بیشتر از ۲/۵٪ اجتناب شده است.



شکل ۲. تصاویر حاصل از آزمون زاویه تماس پوشش‌های (الف) رزین سیلیکونی خالص، رزین سیلیکونی تقویت شده با ب) ۰/۵٪، ج) ۱٪ و د) ۲٪ نانو ذرات اروزیل R۹۷۲.

جدول ۳. نتایج حاصل از آزمون زاویه تماس پوشش‌های ساخته شده.

میانگین زاویه تماس	زاویه تماس	نمونه
۹۰°	۸۴°، ۹۰°، ۹۴°	رزین سیلیکونی
۹۷/۶°	۹۴°، ۹۸°، ۱۰۱°	رزین سیلیکونی + ۰/۵٪ وزنی نانو ذرات اروزیل R۹۷۲
۹۹/۷°	۱۰۰°، ۱۰۲°، ۹۷°	رزین سیلیکونی + ۱٪ وزنی نانو ذرات اروزیل R۹۷۲
۱۰۷°	۱۰۹°، ۱۰۷°، ۱۰۵°	رزین سیلیکونی + ۲٪ وزنی نانو ذرات اروزیل R۹۷۲

جدول ۴. نتایج حاصل از انرژی سطحی نمونه‌های ساخته شده.

انرژی سطحی (mN/m)	نمونه
۲۲/۸۴	رزین سیلیکونی
۲۰/۳۶	رزین سیلیکونی + ۰/۵٪ وزنی نانو ذرات اروزیل R۹۷۲
۱۹/۸۵	رزین سیلیکونی + ۱٪ وزنی نانو ذرات اروزیل R۹۷۲
۱۸/۷۰	رزین سیلیکونی + ۲٪ وزنی نانو ذرات اروزیل R۹۷۲



شکل ۳. تصویر پوشش نانو کامپوزیتی زمینه سیلیکونی حاوی ۲/۵٪ وزنی نانو ذرات اروزیل R972 اعمال شده بر روی کربن استیل.

نتایج حاصل از شکل ۲، جدول ۳ و ۴ نشان می‌دهد افزودن نانو ذرات اروزیل R972 به رزین سیلیکونی سبب مهاجرت این نانو ذرات به سطح و در نتیجه آن افزایش زبری سطح، کاهش انرژی سطحی و افزایش آبگریزی رزین سیلیکونی می‌گردد. در حالتی که ۲٪ وزنی نانو ذرات اروزیل R972 به رزین سیلیکونی اضافه می‌گردد زاویه تماس بالاتری نسبت به سایر نمونه‌ها و پوشش سیلیکونی خالص به میزان ۱۰۷° دارد.

### بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش پوشش نانو کامپوزیتی پایه سیلیکونی حاوی نانو ذرات اروزیل R972 در ۴ درصد ۰/۵، ۱، ۲ و ۲/۵٪ وزنی ساخته شده و سپس خواص آبگریزی آن به وسیله‌ی آزمون زاویه تماس مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از آزمون زاویه تماس نشان می‌دهد هنگامی که نانو ذرات اروزیل R972 به رزین سیلیکونی اضافه می‌گردند این نانو ذرات به سطح پوشش مهاجرت کرده و سبب افزایش زبری و کاهش انرژی سطحی پوشش می‌گردند. در بین نمونه‌های مختلف ساخته شده نمونه حاوی ۲٪ وزنی نانو ذرات اروزیل R972 بیشترین زاویه تماس و کمترین میزان انرژی سطحی را به ترتیب به میزان ۱۰۷° و ۱۷/۵۷ mN/m نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. در پژوهشی مشابه نیز قربان نژاد و همکاران (Ghorbannejad, Monazzah, and Rostami 2024) پوشش نانو کامپوزیتی زمینه اپوکسی سیلیکون حاوی نانو ذرات اروزیل R972 را ساختند. نتایج حاصل از آن پژوهش نیز نشان داد، پوشش در ۲٪ وزنی نانو ذرات اروزیل R972 در مقایسه با سایر نمونه‌ها (۰/۵، ۱، ۱/۵٪) زاویه تماس بیشتری دارد.

پیشنهاد می‌گردد در پژوهش‌های مشابه علاوه بر بررسی نمونه‌ها با استفاده از آزمون زاویه تماس، از سطح نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نیروی اتمی تصویربرداری به عمل آید و پارامتر زبری سطح آنها مورد بررسی قرار گیرد.



## منابع

- Asmatulu, Ramazan, Waseem S. Khan, Ramya J. Reddy, and Muhammet Ceylan. 2015. "Synthesis and Analysis of Injection-Molded Nanocomposites of Recycled High-Density Polyethylene Incorporated with Graphene Nanoflakes." *Polymer Composites* 36 (9): 1565–73. <https://doi.org/10.1002/pc.23063>.
- Barati Darband, Gh, M. Aliofkhazraei, S. Khorsand, S. Sokhanvar, and A. Kaboli. 2020. "Science and Engineering of Superhydrophobic Surfaces: Review of Corrosion Resistance, Chemical and Mechanical Stability." *Arabian Journal of Chemistry*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2018.01.013>.
- Cassie, A. B. D., and S. Baxter. 1944. "Wetting of Porous Surfaces." *Transactions of the Faraday Society* 40 (5): 546–51.
- Christopher Rulison, by, and Laboratory Manager. n.d. "Two-Component Surface Energy Characterization As a Predictor of Wettability and Dispersability Application Note #213." <http://www.kruss.de>.
- Ghorbannejad, Mohammad, Asal Hosseini Monazzah, and Mehran Rostami. 2024. "Desalination Setup Coated by Silicone Epoxy Nanocomposite: A Study on Hydrophobic Characteristics and Condensation Mechanisms." *Journal of Environmental Chemical Engineering* 12 (3): 113094. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113094>.
- Guo, Xiao Jing, Duo Zhang, Chao Hua Xue, Bing Ying Liu, Meng Chen Huang, Hui Di Wang, Xing Wang, Fu Quan Deng, Yong Ping Pu, and Qiu Feng An. 2023. "Scalable and Mechanically Durable Superhydrophobic Coating of SiO<sub>2</sub>/Polydimethylsiloxane/Epoxy Nanocomposite." *ACS Applied Materials and Interfaces* 15 (3): 4612–22. [https://doi.org/10.1021/ACSAMI.2C21623/SUPPL\\_FILE/AM2C21623\\_SI\\_004.MP4](https://doi.org/10.1021/ACSAMI.2C21623/SUPPL_FILE/AM2C21623_SI_004.MP4).
- Hou, Chengmin, Ze Fan, and Jiaqi Yang. 2024. "Construction of Super Hydrophobic Paper by Modified Nano-SiO<sub>2</sub> Hybrid Medium Fluoro-Epoxy Polymer and Its Properties." *Progress in Organic Coatings* 187 (February): 108180. <https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2023.108180>.
- Jiang, Weibin, Xiongfei Jin, Huan Li, Shiyu Zhang, Tao Zhou, and Huasheng Xie. 2020. "Modification of Nano-Hybrid Silicon Acrylic Resin with Anticorrosion and Hydrophobic Properties." *Polymer Testing* 82:106287. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106287>.
- Liravi, Mohammad, Hossein Pakzad, Ali Moosavi, and Ali Nouri-borujerdi. 2020. "A Comprehensive Review on Recent Advances in Superhydrophobic Surfaces and Their Applications for Drag Reduction." *Progress in Organic Coatings* 140 (November 2019): 105537. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105537>.
- Manuscript, Accepted. 2016. "Materials Chemistry A." <https://doi.org/10.1039/C6TA07984A>.
- Online, View Article, Hongyu Dong, Mengjiao Cheng, Yajun Zhang, Hao Wei, and Feng Shi. 2013. "Superhydrophobic Coating on a Macroscopic Model Ship," 5886–91. <https://doi.org/10.1039/c3ta10225d>.
- Thiele, Uwe, and David Que. 2002. "Wetting of Textured Surfaces" 206:41–46.
- Tlili, I., and Tawfeeq Abdullah Alkanhal. 2019. "Nanotechnology for Water Purification: Electrospun Nanofibrous Membrane in Water and Wastewater Treatment." *Journal of Water Reuse and Desalination* 9 (3): 232–47. <https://doi.org/10.2166/wrd.2019.057>.
- Wenzel, Robert N. 1936. "Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water." *Industrial and Engineering Chemistry* 28 (8): 988–94. <https://doi.org/10.1021/ie50320a024>.
- Yue, Wen-wen, Hui-juan Li, Tao Xiang, Hui Qin, and Shu-dong Sun. 2013. "Grafting of Zwitterion from Polysulfone Membrane via Surface-Initiated ATRP with Enhanced Antifouling Property and Biocompatibility." *Journal of Membrane Science* 446:79–91. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.06.029>.





# Investigating the effect of Aerosil R972 nanoparticles on the wettability properties of polymer based nanocomposite coating on carbon steel substrates

**Mohammad Ghorbannejad**

M.Sc. Student in Technical Inspection Engineering,  
Faculty of Mechanics and Energy, Shahid Beheshti  
University, Tehran, Iran.

**Ali Kalaki**

Ph.D. in Materials and Metallurgy Engineering;  
Head of the Technical Inspection Department,  
Petroleum Engineering and Development Company,  
Tehran, Iran.

## Abstract

Hydrophobic nanocomposite coatings play a vital role in various marine industries, particularly on the hulls of marine vessels, where they effectively reduce drag forces caused by surface friction and enhance fuel efficiency. This study focused on the fabrication of a silicone nanocomposite coating reinforced with Aerosil R972 nanoparticles at four different weight percentages: 0.5, 1, 2, and 2.5 wt%. Following the application of these coatings, with a thickness of 120  $\mu\text{m}$  on carbon steel substrates, their wettability properties were thoroughly examined to determine the optimal hydrophobic characteristics. This involved conducting contact angle tests and calculating surface energy based on the Owens and Wendt model. The findings indicated that the nanocomposite coating incorporating 2 wt% of Aerosil R972 nanoparticles exhibited the highest hydrophobic properties, featuring a contact angle of  $107^\circ$  and a surface energy of 17.57 mN/m compared to the other samples. Notably, the coating with 2.5 wt% of Aerosil R972 nanoparticles resulted in a decrease in surface energy, hindering the formation of a uniform 120  $\mu\text{m}$  film on the carbon steel plate's surface, which led to the creation of a defective film.

## Keywords

Nanocomposite coating, wettability, surface properties, Silicone resin, Aerosil R972.