

## مروری بر مواد و پوشش‌های ابر آبگریز

جواد فهیم<sup>۱\*</sup>، حمید غیور<sup>۱</sup>، سیدمحمد مهدی هادوی<sup>۲</sup>، سیدعلی حسن‌زاده تبریزی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی نجف آباد  
<sup>۲</sup> پژوهشگاه مواد و انرژی



دکتر جواد فهیم، نویسنده  
مسئول مقاله، دانشگاه آزاد  
اسلامی واحد نجف آباد

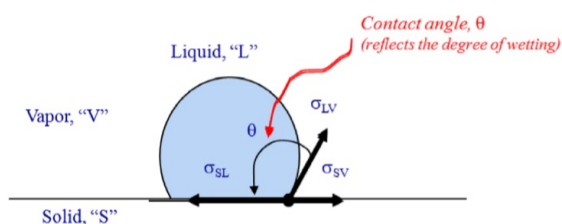
jf@smt.iaun.ac.ir

چکیده: در طی چندسال گذشته، جوامع علمی و صنعت پوشش‌دهی دنیا، با سطوح و پوشش‌های ابرآبگریز مبتنی بر پلیمر/اکسید همراه با خواص استثنایی و منحصربفرد دفع آب، آشنا گشته است. فیلم‌های ویدئویی آنلاین، تخیلات عمومی را با استفاده از به تصویر کشیدن راه رفتن مردم از میان گودال‌های گل‌ولای بدون مرطوب یا گلی شدن کفش‌های تنیس آن‌ها و به پرواز درآمدن واقعی آب از روی سطوح پوشش‌دهی شده، نشان داده است. در این تحقیق، به مبانی پایه‌ای رفتار ابرآبگریز همچنان بحث در خصوص آخرین پیشرفت‌ها و تحولات مربوط به فناوری‌های ابرآبگریز پرداخته شده است. از آنجاییکه سطوح و پوشش‌های مذکور، توانایی ایجاد تغییرات اساسی در چگونگی واکنش آب با این سطوح را دارد و این حقیقت که زمین یک دنیای آبی است، به طور حتم می‌توان گفت که فناوری مذکور این قابلیت را دارد تا به معنای واقعی، دنیا را تغییر دهد. در این تحقیق محدودیت‌ها و سوابق تاریخی مربوط به سطوح و پوشش‌های مذکور، مورد توجه قرار گرفته است. از سوی دیگر، تحولات و پیشرفت‌های موجود در فناوری‌های سطوح و پوشش‌های ابرآبگریز در قالب چهار وجه مختلف از تحقیقات پایه‌ای هدایت‌شده مربوط به ساختارهای ابرآب‌گریز در دانشگاه‌ها، آزمایشگاه‌های ملی و مراکز تحقیقاتی مختلف آغاز و به وجه چهارم آن یعنی توسعه قابلیت تجاری (پایداری) لایه‌های نازک نوری ابرآب‌گریز ختم می‌یابد. در پایان به کاربردهای مختلف سطوح و پوشش‌های ابرآبگریز اشاره خواهد شد.

کلمات کلیدی: پوشش‌های ابرآبگریز، آبدوست، ضد خوردگی، ضد رسوب‌دهی زیستی.

### ۱- کلیات

معادلات زاویه تماس دینامیک و استاتیک یانگ [1]، متداول‌ترین و مناسب‌ترین پارامترهای توصیف‌کننده خاصیت ترشوندگی یک سطح نسبت به آب مایع می‌باشد. شکل شماره ۱ به صورت شماتیک رابطه یانگ مربوط به یک قطره آب بر روی سطح را نشان می‌دهد.



شکل ۱- دیاگرام نیرویی معادله یانگ و اندازه‌گیری زاویه تماس مربوط به آن

### ۱-۱- معادلات یانگ [۲۰]

برای یک قطره آب مایع "L" که به همراه فاز بخار "V" بر روی یک سطح "S" قرار دارد، معادل کلیدی برای توصیف آن، معادله یانگ است که تعادل نیروی میان کشش‌های سطحی ایجادشده در خط تماس جامد-مایع-بخار را توصیف می‌نماید.

$$\cos\theta_Y = (\sigma_{SV} - \sigma_{SL}) / \sigma_{LV}$$

$\theta_Y$ : زاویه تماس یانگ

$\sigma_{SV}$ : کشش سطحی (انرژی در واحد سطح) از فصل مشترک جامد-بخار

$\sigma_{SL}$ : کشش سطحی فصل مشترک مایع-جامد

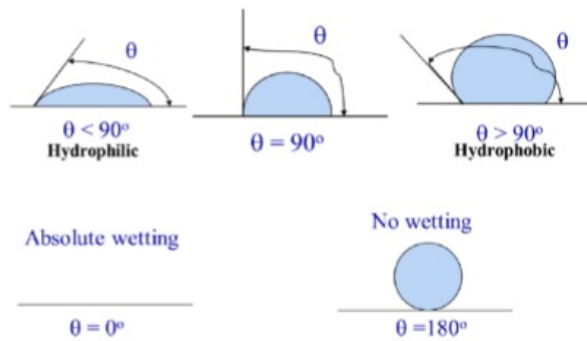
$\sigma_{LV}$ : کشش سطحی فصل مشترک مایع-بخار.

## ۱-۲- زاویه تماس استاتیکی [۳]

زاویه تماس  $\theta$  که در اندازه‌گیری آن، فرض می‌شود که یک قطره آب بر روی یک سطح صاف، مسطح<sup>۱</sup>، صلب و یکنواخت قرار می‌گیرد.

## ۱-۳- پدیده ترشوندگی

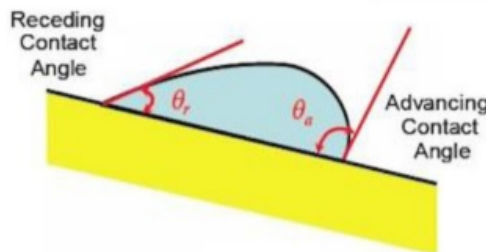
آب، مایعی با کشش سطحی نسبتاً بزرگ به دلیل دوقطبی الکتریکی آن می‌باشد. ساده‌ترین راه بیان رفتار دوقطبی آب این است که تمایل به چسبیدن بر روی اجسام از جمله خودش را دارد. یک سطح بر اساس این که چگونه با قطرات آب واکنش داده یا به آن می‌چسبد، به آب‌دوست یا آب‌گریز دسته بندی می‌شود. یک قطره آب، تمایل به ترکردن سطحی را دارد که از لحاظ علم شیمی، دارای انرژی سطحی بالایی است (مثل شیشه) و بر روی سطحی که انرژی سطحی پایینی دارد (مثل تفلون)، متمایل به جمع کردن خود<sup>۲</sup> می‌باشد (شبهه دانه‌های تسبیح). اگر قطره آب، تمایل به چسبیدن به خودش بیشتر از یک سطح معین باشد، آن سطح به آب‌گریز موسوم است و در این حالت با زاویه تماس بزرگ‌تر از  $90^\circ$  درجه جمع می‌شود. برعکس، اگر قطره آب تمایل به چسبیدن به یک سطح داشته باشد تا اینکه بخواد به خودش بچسبد، سطح موردنظر آب‌دوست می‌باشد و قطره آب دارای زاویه تماس کم‌تر از  $90^\circ$  درجه خواهد بود. باید توجه داشت که قطره آبی که یک سطح را کاملاً تر می‌نماید، دارای زاویه تماسی حدود صفر درجه خواهد بود. در حالی که یک قطره، هیچ واکنشی با یک سطح نداشته باشد (عدم ترشوندگی)، خود را به صورت یک کره کامل جمع کرده (با صرف نظر از جاذبه) و یک زاویه تماس حدود  $180^\circ$  درجه خواهد داشت (شکل شماره ۲).



شکل ۲- شرایط ترشوندگی آبدوستی و آبگریزی: زاویه ترشوندگی صفر معادل ترشوندگی کامل، زاویه ترشوندگی کمتر از  $90^\circ$  درجه معادل آبدوست، زاویه ترشوندگی بیشتر از  $90^\circ$  درجه معادل آبگریز و زاویه ترشوندگی  $180^\circ$  درجه معادل عدم ترشوندگی.

## ۱-۴- زوایای تماس دینامیکی (پیش‌رونده<sup>۳</sup> و پس‌رونده<sup>۴</sup>) [۴، ۳، ۲]

شکل شماره ۳، نشان‌دهنده قطره آب بر روی یک سطح مورب است که دارای زاویه تماس پیش‌رو  $(\theta_a)$  و پس‌رو  $(\theta_r)$  می‌باشد. اختلاف زاویه تماس پیش‌رو و پس‌رو، تحت عنوان زاویه تماس هیستریزس شناخته می‌شود  $(\theta_h)$ .

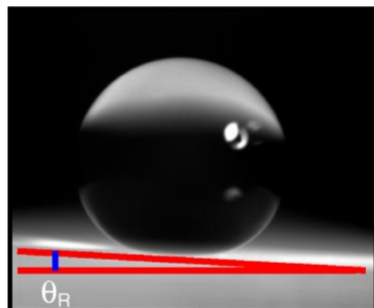


شکل ۳- زوایای تماس دینامیکی پیش‌رو (سمت راست) و پس‌رو (سمت چپ)

<sup>1</sup> planar  
<sup>2</sup> Bead up  
<sup>3</sup> Advancing  
<sup>4</sup> Receding

## ۵-۱- زاویه Roll-off [۴، ۵]

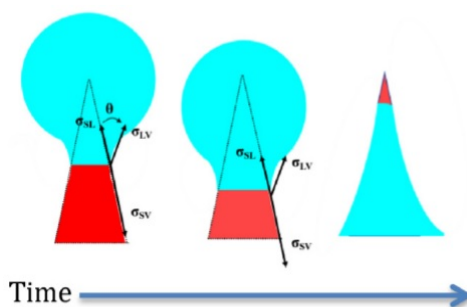
زاویه‌ای که در آن، یک قطره آب از روی سطح صاف مورب، به‌غلتش در می‌آید، زاویه roll-off می‌باشد ( $\theta_R$ ). به‌طور کلی سطوح ابرآب‌گریز دارای  $\theta_R$  کوچک‌تر از ۵ درجه بوده اما سطوح ابر آب‌گریز با کیفیت بسیار بالا، دارای زاویه کم‌تر از ۱ درجه می‌باشند. شکل شماره ۴، نشان دهنده قطره‌ای با زاویه roll-off تقریباً ۵ درجه می‌باشد.



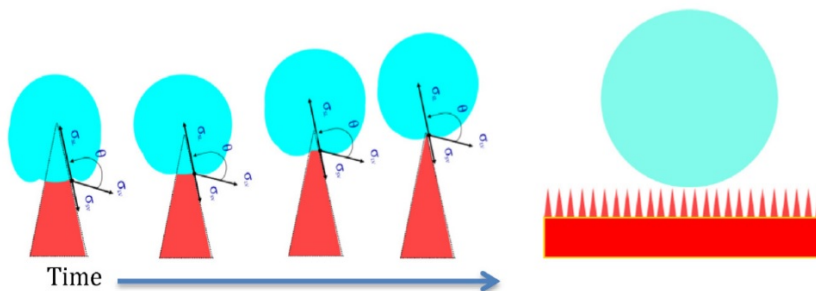
شکل ۴- زاویه غلتش یک قطره آب

## ۶-۱- اثرات زبری سطح یا توپولوژی بر روی زاویه تماس [۶]

اگر یک قطره آب بر روی یک سطح هموار و یکنواخت (زیرلایه) قرار گیرد، زاویه تماس موضعی آن، موکداً تابعی از کشش سطحی مایع و شیمی سطح (انرژی سطح) می‌باشد. اما با افزایش زبری سطحی، زاویه‌تماس مؤثر بسته به شیمی سطح زیرلایه (انرژی سطحی)، کاهش یا افزایش خواهد یافت. اگر شیمی سطح، آبدوست باشد با افزایش زبری سطح، زاویه تماس کاهش می‌یابد. درحالی‌که اگر شیمی یک سطح، آب‌گریز باشد با زبرنمودن آن سطح، زاویه تماس افزایش می‌یابد. ترتیب اولیه شکل ۵، نشان‌دهنده یک خوشه مخروطی آبدوست در برابر زمان است که اثر جذب مویرگی یک قطره آب در تماس با یک خوشه مخروطی شیشه‌ای آبدوست را نشان می‌دهد. ترتیب دوم در شکل ۶ نشان می‌دهد که چگونه یک قطره آب می‌تواند از روی یک خوشه مخروطی در صورتیکه شیمی سطح خوشه مخروطی آب‌گریز باشد، دفع شود [۷].



شکل ۵- جذب مویرگی ایجادشده با استفاده از شیمی سطح آبدوست بر روی یک سطح تیز



شکل ۶- دفع آب ایجادشده با استفاده از شیمی سطح آب‌گریز بر روی یک سطح تیز

## ۷-۱- رژیم‌های ترشوندگی و نزل و کاسی - باکستر [۴ و ۶ و ۸ و ۹]

افزایش زاویه تماس مؤثر ناشی از زبری سطحی و توپوگرافی ساختاری به دو رژیم و نزل<sup>۱</sup> و کاسی - باکستر<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی می‌شود. درحالی که هر دو رژیم، مبین افزایش زاویه تماس همراه با افزایش زبری سطحی می‌باشند، رژیم کاسی - باکستر تحت تأثیر لایه هوای محبوس در زبری یا بافت سطحی است که موجب افزایش اساسی در زاویه تماس و کاهش قابل توجه در زاویه غلتش (Roll-off) و هیستریزس زاویه تماس می‌گردد.

## ۸-۱- تعاریف ابرآب‌گریز، فوق آب‌گریز [۱۰ و ۱۱ و ۱۲] و هیستریزس زاویه تماس [۴]

هنگامیکه زاویه تماس مؤثر قطره آب، معادل ۱۵۰ درجه و یا بیشتر است، سطح موردنظر ابرآب‌گریز نامیده می‌شود. از اصطلاح فوق‌آب‌گریز برای توصیف سطحی که زاویه پیشروی و پس‌روی آن بزرگ‌تر از ۱۵۰ درجه است، استفاده شده است. تفاوت میان زاویه تماسی پیشروی و پس‌روی، هیستریزس زاویه تماس نامیده می‌شود [۲].

## ۹-۱- سطوح ابرآب‌گریز طبیعی [۱۳ و ۱۴ و ۱۵]

مثال‌های متعددی از سطوح ابرآب‌گریز وجود دارد که به صورت طبیعی رخ می‌دهند و سطح گیاهان<sup>۳</sup> و حشرات<sup>۴</sup> را شامل می‌شود. جالب‌توجه‌ترین سطح ابرآب‌گریز طبیعی، برگ نیلوفر آبی است. دفع بیش از حد آب که توسط برگ نیلوفر آبی بروز می‌نماید، الهام‌بخش دانشمندان برای ترغیب به انجام تحقیقات اولیه بر روی پدیده ابرآب‌گریزی می‌باشد. در حقیقت اصطلاح "اثر لوتوس یا نیلوفر آبی" هنوز هم مترادف با رفتار ابرآب‌گریزی می‌باشد. شکل شماره ۷ نشان دهنده برگ ابرآب‌گریز درخت صنوبر از ایالت تنسی<sup>۵</sup> آمریکا می‌باشد.



شکل ۷- رفتار ابرآب‌گریز برگ صنوبر

## ۱۰-۱- اثرات لایه هوای محبوس<sup>۶</sup> در سطح ابرآب‌گریز

برای این که یک سطحی ابرآب‌گریز باشد، زاویه تماس مربوط به آن بایستی بزرگ باشد ( $\theta \geq 150$ ). این عبارت بدین معنی است که حداقل هوا بین قطره آب و سطحی که روی آن قرار دارد، وجود داشته باشد (به مانند رژیم کاسی - باکستر [۸]). یک سطح ابرآب‌گریز با کیفیت بالا، بایستی دارای لایه یکنواختی از هوای محبوس باشد که زاویه تماس بسیار بالا (نزدیک به ۱۸۰ درجه)، زاویه roll-off (غلتش) بسیار پایین (نزدیک به صفر) و هیستریزس زاویه تماس کم (نزدیک به صفر) را ایجاد نماید و هنگامی که این سطح در آب، غوطه‌ور شود به دلیل انعکاس‌های داخلی کلی از نور انعکاس دهنده لایه هوای محبوس، اثر انعکاسی نوری<sup>۷</sup> به وجود می‌آید. اشکال شماره ۸- الف و ۸- ب نشان دهنده اثر آینه‌ای بر روی یک تکه چوبی و یک محصول ایجاد شده توسط پوشش‌های ابرآب‌گریز بر روی آن می‌باشد. باید توجه داشت که هوای محبوس در یک سطح ابرآب‌گریز با کیفیت بالا بعنوان یک مانع فیزیکی در برابر آب یا محلول‌های آبی عمل می‌نماید درحالی که بطور کلی، برای هوا یا گازها مانعی محسوب نمی‌شود.

<sup>1</sup> Wenzel

<sup>2</sup> Cassie-Baxter

<sup>3</sup> plant

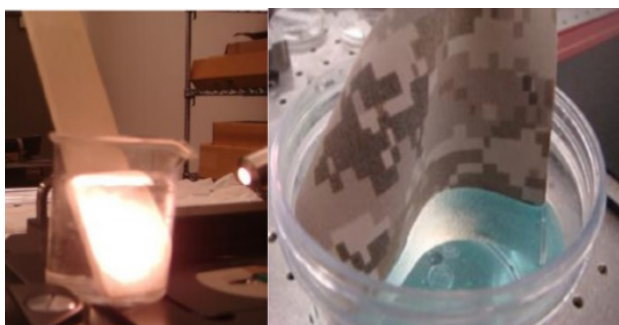
<sup>4</sup> insect

<sup>5</sup> Tennessee state

<sup>6</sup> Pinned air

<sup>7</sup> Optical mirror effect

شکل ۹، قطره‌آبی را نشان می‌دهد که بر روی یک شبکه مسی دارای پوشش آب‌گریز، به صورت یک کره درآمدہ است.



شکل ۸- (الف) سمت چپ: نور منعکس شده از لایه هوای محبوس بر روی یک چسب چوبی همراه با پوشش ابرآگریز و (ب) سمت راست: نور منعکس شده از لایه هوای محبوس بر روی یک محصول ابرآگریز

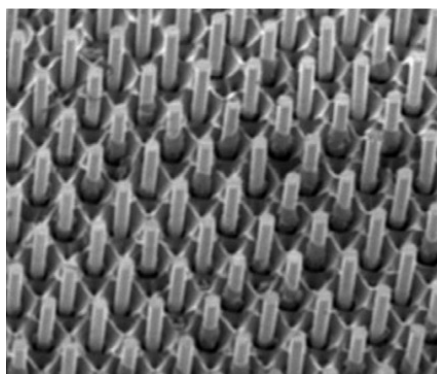


شکل ۹- قطره آب دفع شده توسط یک صفحه توری سیمی همراه با پوشش ابرآگریز

## ۱-۱۱- نمونه‌هایی از سطوح ابرآگریز مصنوعی سنتز شده

### ۱-۱۱-۱- آرایه‌های مهندسی شده و منظم ابرآگریز آب‌گریز [۷ و ۱۶]

دانشگاه‌ها و موسسات پژوهشی متعددی سطوح آب‌گریز مصنوعی را با استفاده از روش فوتولیتوگرافی مبتنی بر میکرو-نانوالکترونیک تولید نموده‌اند [۱۶]. شکل شماره ۱۰ مثالی از یک آرایه میله‌های سیلیکونی ساخته شده مبتنی بر فوتولیتوگرافی توسط آزمایشگاه‌های بل<sup>۱</sup> می‌باشد. آرایه میله‌های سیلیکونی با قطر یک میکرون که داخل محلول آب‌گریز قرار داده شده‌اند، دارای شیمی سطح اصلاح شده<sup>۲</sup> و میکروساختاری هستند که ابرآگریز خواهد بود. نتیجه این تحقیق، یک سطح ابرآگریز با زاویه تماس استاتیک حدود ۱۶۰ درجه می‌باشد.

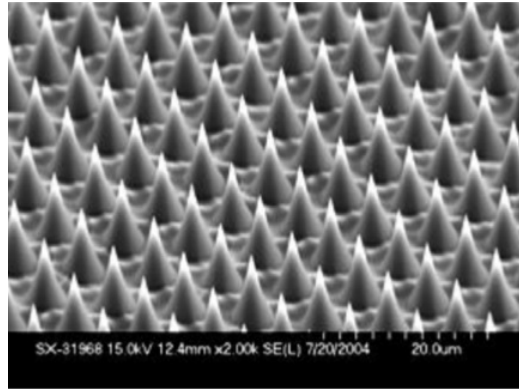


شکل ۱۰- پست آرایه سیلیکونی ابرآگریز

<sup>1</sup> Bell

<sup>2</sup> Right surface chemistry

در تحقیقات انجام شده در سال ۲۰۰۴ در موسسه ORNL، از تکنیک‌های کشتش الیاف شیشه‌ای برای ساخت مخروط‌های شیشه‌ای نوک تیز (شکل ۱۱) استفاده شد.

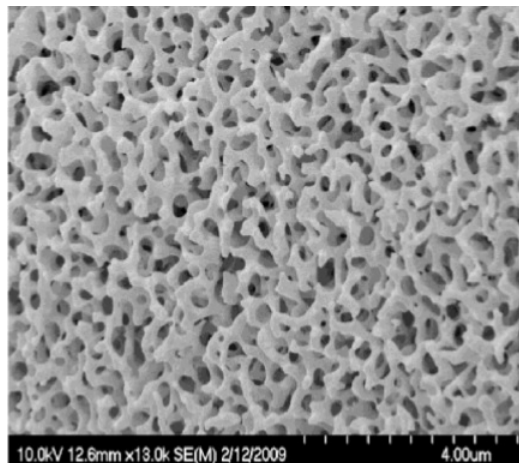


شکل ۱۱- آرایه‌های نوک تیز از مخروط‌های شیشه‌ای

این مخروط‌ها دارای دوره تناوب ۷ و ارتفاع ۱۲ میکرونی هستند [۷]. شیمی سطح آرایه‌های مخروطی شیشه‌ای با استفاده از یک محلول سیلان فلوردار<sup>۱</sup> از آب‌دوست به آب‌گریز تغییر نموده است. این محلول سیلان، یک تک‌لایه خودمنظم<sup>۲</sup> را که به صورت کووالانسی متصل شده است بر روی سطوح مخروطی ایجاد می‌کند. شعاع نوک مخروط‌ها پس از قرار گرفتن در محلول سیلان به کمتر از ۱۰ نانومتر می‌رسد. این آرایه ابرآگریز از مخروط‌های شیشه‌ای نوک تیز با ابعاد نانو یکی از سطوح با بیشترین دفع‌کنندگی آب است که تا به حال در دنیا با زاویه تماس بزرگتر از ۱۷۹ درجه گزارش شده است.

#### ۱-۱۱-۲- سطوح ابرآگریز نامنظم مهندسی شده [۱۷ و ۱۸ و ۱۹]

میکروگراف‌هایی که در ادامه ارائه می‌شود مثالی از سطوح نانو ساختار نامنظم مهندسی هستند که در ابتدا ابرآب‌دوست بوده ولی با تغییر شیمی سطح به وسیله آماده‌سازی سطح با تک‌لایه خودمنظم آب‌گریز، از حالت آب‌دوست به حالت آب‌گریز تبدیل می‌شوند. شکل ۱۲، سیلیکای نانو ساختار و متخلخل (در ابعاد نانو) را نشان می‌دهد که به وسیله اچ فاز مجزای شیشه بورو سیلیکاتی<sup>۳</sup> تهیه شده است [۱۹ و ۲۰].



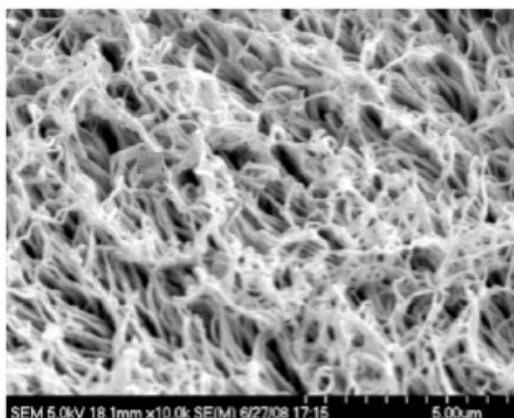
شکل ۱۲- سیلیکای نانوبافت شکل یافته توسط اچ فاز مجزای شیشه بوروسیلیکات.

این ساختار ابرآگریز نانو بافتار، دارای زوایای تماسی به بزرگی ۱۷۸ درجه می‌باشد. شکل ۱۳ نشان دهنده نانو رشته‌های پلیمری فلوئوردار شده با زاویه تماس تقریبی ۱۴۵ درجه می‌باشد.

<sup>1</sup> Fluorinated silane solution

<sup>2</sup> Self-assembled monolayer

<sup>3</sup> differential etching phase separated borosilicate glass

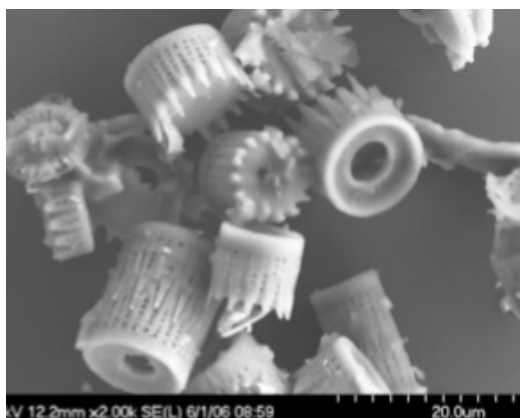


شکل ۱۳- رشته‌های پلیمری فلونئوردار شده نانو بافت

بایستی توجه نمود که این رشته‌های پلیمری به راحتی در یکدیگر پیچیده می‌شوند که در این حالت، زاویه تماس کاهش یافته و به میزان ۱۳۰ درجه می‌رسد.

### ۱-۱۱-۳- خاک دیاتومه (دارای جداره سیلیسی)<sup>۱</sup> ابر آب‌گریز

شکل ۱۴ میکروگرافی از خاک دیاتومه با جداره سیلیسی را نشان می‌دهد. این خاک حاوی باقیمانده‌های اسکلت گونه‌ای از یک خانواده از فیتو پلنکتون به نام دیاتمها<sup>۲</sup> است.



شکل ۱۴- تصویری از خاک دیاتومه (دارای جداره سیلیسی)

دیاتمها دارای ویژگی منحصر به فردی هستند که اسکلت آن‌ها از سیلیکون دی‌اکسید هیدراته تشکیل شده است. خاک دیاتوم یک ماده طبیعی و فراوان پایه سیلیس است که به راحتی می‌توان در سراسر دنیا آن را استخراج نمود. این ماده دارای تخلخل‌های نانو و میکرو به همراه زبری‌های نانومقیاس است که بسته به شیمی سطح آن، قابلیت جذب سطحی آب و یا دفع آب آن به میزان زیادی افزایش می‌یابد. به خاطر این که شیمی سطح آن به طور طبیعی آب‌دوست است، لذا به طور طبیعی ابرآب‌دوست می‌باشد. ولی اگر خاک دیاتومه با یک سیلان آب‌گریز آماده‌سازی شود، به دلیل شیمی سطح آب‌گریز آن و اثر تقویت‌کننده بافت و نانو تخلخل موجود، به ابرآب‌گریز تبدیل می‌شود. این پودر ابرآب‌گریز نانو متخلخل خاک دیاتومه ابرآب‌گریز نامیده می‌شود.

### ۲- محدودیت‌های مربوط به سطوح و پوشش‌های ابرآب‌گریز

برای ده سال گذشته یا بیشتر، محققان گزارش‌های متعددی را در رابطه با رفتار شگفت‌انگیز دفع آب سطوح و مواد ابرآب‌گریز ارائه نمودند ولی تاکنون هیچ کدام از این اثرات مربوط به سطوح یا مواد ابرآب‌گریز، آن‌ها را به محصولات تجاری تبدیل نساخته

<sup>1</sup> Diatomaceous earth

<sup>2</sup> Diatom

است که در ادامه لیست مهم ترین دلایل مربوطه ارائه شده است:

**الف- جنبه‌های هزینه:** به‌استثنای خاک دیاتومه ابرآگریز، هزینه مواد ابرآگریز به دلیل میزان فرآوری‌های لازم برای ایجاد ساختارهای میکرو و نانوی موردنیاز برای رفتار ابرآگریزی، نسبتاً بالا می‌باشد. برای مثال اکثر سطوح نانو و میکروساختار ابرآگریز، اخیراً توسط فرایند فوتولیتوگرافی [۲۱ و ۲۲ و ۲۳] ساخته شده‌اند که خود آن فرآیندی پرهزینه است اما وقتی این حقیقت را نظر بگیرید که فوتولیتوگرافی در مقیاس نانو، استامپ تراشه کوچکی را می‌سازد که باید به یکدیگر متصل شده تا ناحیه بزرگی را بپوشانند، هزینه کل و عملکرد این روش موجب ممانعت و بازدارندگی استفاده از آن می‌گردد.

**ب- جنبه‌های پایداری ساختار نانو:** یک سطح ابرآگریز با کیفیت و زاویه تماس بالا، نیازمند به شیمی سطحی آگریز با توپوگرافی (پستی و بلندی) پایدار در مقیاس نانو و میکرو می‌باشد. دستیابی به این حالت، با بکارگیری مجموعه ساده‌ای از الزامات و نیازمندی‌ها میسر نخواهد بود. برای مثال، پلیمرهای با بافت نانو، تمایل به رفتاری شبیه به "نودل‌ها و رشته‌های مرطوب"<sup>۱</sup> در مقیاس نانو دارند (شکل ۱۳). این رشته‌های پلیمری به راحتی در یکدیگر پیچیده شده و به سرعت رفتار ابرآگریز خود را از دست می‌دهند [۲۴].

**ج- جنبه‌های قابلیت دوام و ماندگاری:** حتی اگر از ذرات ابرآگریز با کیفیت (نظیر خاک دیاتومه ابرآگریز یا نانو ذرات سیلیکای عامل‌دار شده) استفاده شود، به راحتی نمی‌توان این ذرات را به زیر لایه، بدون تنزل یا از بین رفتن میزان قابل توجهی از رفتار ابرآگریز، متصل نمود. این حالت متمایل به یک مصالحه و سازش میان دو ویژگی مطلوب اما ناسازگار یعنی ماندگاری و رفتار ابرآگریزی است [۲۵].

**چ- جنبه‌های متراکم سازی- درحالی‌که پوشش‌ها و سطوح ابرآگریز، آب را دفع می‌نمایند اما دافع بخار آب نمی‌باشند.** اگر پوشش در شرایط متراکم‌سازی و چگالش باشد (یعنی دمای پوشش زیر نقطه شبنم باشد) متراکم‌سازی و چگالش اتفاق می‌افتد. در این حالت، رسوب و تراکم ایجادشده موجب ترشوندگی سطحی به‌میزان قابل توجهی می‌گردد [۲۶ و ۲۷].

**ح- جنبه‌های ضربه و برخورد<sup>۲</sup>** [۲۸ و ۲۹]: لایه هوایی محبوس مربوط به سطوح ابرآگریز به‌وسیله فشار موضعی بالای آب، از بین رفته و یا کاهش می‌یابد. این حالت به‌وسیله جریان موضعی آب و یا توسط سایش مختصر و آسان سطح درحین غوطه‌وری در آب به‌وجود می‌آید. به خاطر این‌که رفتار ابرآگریزی به لحاظ تاریخی یک اثر سطحی ساده می‌باشد، لذا هرگونه برخورد سطحی قابل توجهی که به سرعت اتفاق بیافتد، رفتار ابرآگریز معیوبی را در موضع و محل برخورد ایجاد می‌نماید.

**ی- جنبه‌های ترشوندگی مواد فعال‌ساز سطحی / روغن:** رفتار ابرآگریزی یک نتیجه از تقویت (با استفاده از توپوگرافی (پستی بلندی) سطحی) اثر کشش سطحی آب می‌باشد. اگر کشش سطحی آب شدیداً توسط مواد فعال‌ساز سطحی یا روغن کاهش یابد، رفتار ابرآگریز به میزان زیادی تنزل یافته و یا از بین می‌رود و بدنبال آن، سطح موردنظر به آسانی تر می‌شود [۳۰ و ۳۱].

### ۳- وجوه مختلف فناوری ابرآگریز

مثال‌های قبلی مواد ابرآگریز، مربوط به دو وجه فناوری از سطوح ابرآگریز می‌باشد. وجه اول درمورد تحقیقات پایه‌ای ساختارهای ابرآگریز هدایت‌شده در دانشگاه‌ها، آزمایشگاه‌های ملی و مراکز تحقیقاتی مختلف است. درحالی‌که این وجه اول، شور و شغف زیادی را در جوامع علمی ایجاد کرده ولی هیچ یک از آن مواد به دلیل داشتن مقیاس کوچک، فقدان ماندگاری و یا عملکرد ضعیف، قابلیت تجاری نداشته‌اند.

وجه دوم این فناوری از تعدادی مواد مربوط به وجه اول (مثل نانوذرات عامل‌دار شده [۳۲])، برای ایجاد پوشش‌های ابرآگریز دریک پوشش فوقانی با اتصال ضعیف، استفاده می‌کند. توجه شود که این نوع پوشش فوقانی یک اثر سطحی است و به صورت نمونه توسط محصول " بدون ترشوندگی " موسوم به راستولم نشان داده شده است. اگر سطح پوشش برداشته شود یا آسیب ببیند، رفتار ابرآگریز از بین می‌رود. اگرچه اثبات شده که دستیابی تجاری به این فناوری امکان‌پذیر است اما از لحاظ ماندگاری و

<sup>1</sup> Wet noodles  
<sup>2</sup> Impingement



کاربردپذیری دارای کمبودهایی است. آخرین پیشرفت‌های فناوری ابرآبگریز، احتمالاً به تولید نسل‌های سوم و چهارم از فناوری های ابرآبگریز منجر خواهد شد که وعده ساخت فناوری های ابرآبگریز با گستردگی زیاد را اگرچه سهل الوصول نباشد، برآورده خواهد ساخت. در ارتباط با چالش‌ها و نیازهای مربوط به کاربرد فناوری پوشش های ابرآبگریز می‌توان به تحقیقی با همین عنوان مراجعه نمود [۳۳].

#### ۴- پیشرفت‌های اخیر در فناوری ابرآب‌گریز

##### پوشش ابر آب‌گریز حجمی [۳۴ و ۳۵ و ۳۶] (رنگ‌ها، اپوکسی‌ها و سیلیکون‌ها)

ایجاد و استفاده از پوشش‌های ابرآب‌گریز حجمی، وجه سوم از فناوری ابرآب‌گریز محسوب می‌شود. از آوریل سال ۲۰۱۵ هیچ گونه رنگ، اپوکسی، سیلیکون و یا سایر محصولات ابرآب‌گریز پایدار که به‌صورت تجاری در دسترس باشد وجود نداشت. ولی انتظار می‌رفت که با معرفی و ورود زود هنگام رنگ‌ها و اپوکسی‌های ابرآب‌گریز حجمی به‌وسیله برخی از کمپانی‌های پیشتاز آمریکایی حوزه رنگ، این وضع تغییر نماید (پیش بینی می‌شد تا پاییز سال ۲۰۱۵ این رنگ‌ها در دسترس باشند). منظور از "ابرآب‌گریز حجمی" یک پوشش است که در تمام حجم پوشش (از سطح بیرونی تا زیرلایه زمینه) ابرآب‌گریز است. چنین پوششی حتی در صورتی که دچار سایش شده و خراشیده شود، به طرز چشمگیری آب را از خود دور می‌کند. این توسعه نشان‌دهنده پیشرفت غیرمنتظره بزرگی در فناوری ابرآب‌گریز است که در واقع به مساله ماندگاری پوشش ابرآب‌گریز (یکی از دلایل اصلی عدم موفقیت در تجاری‌سازی این پوشش‌ها است) پاسخ می‌دهد. این توسعه نه تنها ماندگاری پوشش‌های ابرآب‌گریز را افزایش می‌دهد بلکه قابلیت‌های پوشش‌های ابر آب‌گریز را به طرز کاملاً نوینی توسعه می‌دهد (مثل حذف یا کاهش جنبه‌های مربوط به برخورد و ضربه) در قسمت بعد سعی شده تا در مورد چگونگی ایجاد ابرآب‌گریزی حجمی و اصول نهفته در آن توضیح داده شود.

##### سطوح روغن‌گریز (دافع روغن) با استفاده از سطوح متخلخل مایع نفوذی لغزنده [۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹]

سطوح متخلخل مایع نفوذی لغزنده<sup>۱</sup>، سطوحی با تخلخل در ابعاد نانو هستند که مایعاتی با انرژی سطحی پایین بر روی آنها نفوذ می‌نماید. این سطوح، از خواص استثنایی نظیر دفع مایع و یخ، پایداری در برابر فشار و شفافیت نوری بالایی برخوردار هستند. علت دفع‌کنندگی بالای یخ و مایع برای این سطوح به خاطر ایجاد سطوح فوق صاف می‌باشد. یک روش برای درک رفتار موردنظر - سطوح مذکور این است که با نفوذ یک سیال با انرژی سطحی پایین به یک سطح متخلخل و نانوبافت، به طرز موثری می‌توان سطح ابرآبگریز با انرژی سطحی پایین اصلاح شده از طریق یک سیال ایجاد نمود. علت دفع روغن توسط این سطح، انرژی سطحی بالای روغن نسبت به مایع نفوذ یافته روی این سطح است. تا زمانی که سیال با انرژی سطحی پایین در داخل نانوبافت ابرآب‌گریز باقی بماند، هیچ سیال دیگری (با انرژی سطحی بالاتر) تمایلی به لغزش روی این سطوح نخواهد داشت.

##### لایه‌های نازک نوری ابرآب‌گریز پایدار [۴۰ و ۴۱ و ۴۲] (وجه چهارم فناوری ابرآب‌گریز)

فاز چهارم فناوری ابرآب‌گریز، توسعه قابلیت تجاری (پایداری) لایه‌های نازک نوری ابرآب‌گریز است. سه ویژگی مورد نیاز برای ایجاد یک لایه نازک نوری ابرآبگریز پایدار (از جمله قابلیت پایداری، وضوح نوری و رفتار ابرآبگریزی)، به صورت ویژه‌ای ایجاد چنین پوششی را با مشکل مواجه می‌سازد. به عنوان مثال، رفتار ابرآب‌گریزی نیازمند به یک سطح بافت زبر است که معمولاً نور را پراکنده ساخته و بدین ترتیب از وضوح نوری ممانعت بعمل می‌آورد و به منظور ایجاد یک لایه نازک پایدار مشتمل بر ذرات ابرآبگریز میکرو یا نانومقیاس، مقدار نسبتاً مناسبی از یک اتصال‌دهنده (نظیر پلی‌اورتان) نیاز است. اما معمولاً اتصال‌دهنده‌ها بسیاری از حفرات را پر و یا می‌پوشانند و برای رفتار ابرآب‌گریز، به سطوح بافت نیاز است. ایجاد یک لایه نازک شفاف نوری ابرآبگریز، به‌وسیله نانو ذرات سیلیکای عامل‌دار آب‌گریز معلق و پراکنده در یک محلول حاوی مقادیر کمی از اتصال‌دهنده (نظیر پلی‌اورتان) یا با استفاده از یک فرآیند سل-ژل آب‌گریز، نسبتاً آسان خواهد بود [۲۵]. اگر چنین محلولی به صورت یکنواخت پاشش یابد یا بر روی یک سطح شفاف (مثل شیشه) اعمال شود، نتیجه مورد نظر یک لایه نازک ابرآب‌گریز شفاف می‌باشد. متأسفانه، چنین لایه‌ای توسط میزان کمی خراش به راحتی برداشته می‌شود.

<sup>1</sup> Slippery liquid-infused porous surface (s)

## ۵- نتیجه گیری

تحقیق حاضر با بیان ماهیت پایه و خصوصیات رفتار ابرآب‌گریز آغاز و در ادامه چهار وجه مختلف فناوری ابرآب‌گریز شرح داده شد. فناوری وجه اول مربوط به دانشگاه‌ها، آزمایشگاه‌های ملی و گروه‌های تحقیقاتی است که بررسی‌های آن‌ها در مورد خصوصیات پایه سطوح ابرآب‌گریز و ساخت آن‌ها با استفاده از فوتولیتوگرافی بود. وجه دوم فناوری ابرآب‌گریز از زمانی شروع شد که پوشش‌های حاصل از پاشش ابرآب‌گریز روی سطح به صورت تجاری در دسترس بودند. پوشش‌ها و مواد با سطوح ابرآب‌گریز توجه دانشمندان و عموم را به خود معطوف ساخت ولی گران قیمت بودن این مواد و پایداری ناکافی آن، ناامیدی زیادی ایجاد کرد. وجوه سوم و چهارم این فناوری از سال ۲۰۱۵ با معرفی رنگ‌های ابرآب‌گریز حجمی پایدار و به دنبال آن لایه نازک نوری ابرآب‌گریز شفاف، آغاز شد. پیش‌بینی می‌شود که ورود تجاری سطوح، رنگ‌ها و پوشش‌های ابرآب‌گریز، اثرات چشمگیری در گستره جهانی بر روی هر صنعت و احتمالاً هر شخصی بر روی زمین بر جای گذارد.

## مراجع

- [1] Young T 1805 Phil. Trans. 95 84; Works, edit by Peacock, 1, 432
- [2] Good R J 1952 A thermodynamic derivation of Wenzel's modification of Young's equation for contact angles; together with a theory of hysteresis Am. Chem. Soc. 74 5041-2
- [3] Kwok D Y and Neumann A W 1999 Contact angle measurement and contact angle interpretation Adv. Colloid Interface Sci. 81 167-249
- [4] Choi W et al 2009 A modified Cassie-Baxter relationship to explain contact angle hysteresis and anisotropy on non-wetting textured surfaces J. Colloid Interface Sci. 339 208-16
- [5] Marmur A 2004 The Lotus effect: superhydrophobicity and metastability Langmuir Lett. 20 3517-9.
- [6] Wenzel R N 1949 Surface roughness and contact angle J. Phys. Chem. 53 1466-7
- [7] D'Urso B and Simpson J T 2007 Emergence of superhydrophobic behavior on vertically aligned nanocone arrays Appl. Phys. Lett. 90 044102.
- [8] Cassie A B D and Baxter S 1944 Trans. Faraday Soc. 40 546
- [9] Wenzel R N 1936 Ind. Eng. Chem. 28 988
- [10] Öner D and McCarthy T J 2000 Ultrahydrophobic surfaces. effects of topography length scales on wettability Langmuir 16 7777-82
- [11] Dorrer C and Rühle J 2006 Advancing and receding motion of droplets on ultrahydrophobic post surfaces Langmuir 22 7652-7
- [12] Chen W et al 1999 Ultrahydrophobic and ultralyophobic surfaces: some comments and examples Langmuir 15 3395-9
- [13] Wendell D W 2006 Using biological inspiration to engineer functional nanostructured materials Small 2 1324-9 [1613-6810]
- [14] Bhushan B and Jung Y C 2011 Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction Prog. Mater. Sci. 56 1-108
- [15] Byuna D et al 2009 Wetting characteristics of insect wing surfaces J. Bionic Eng. 6 63-70
- [16] Krupenkin T et al 2005 Electrically tunable superhydrophobic nanostructured surfaces Bell Labs Tech. J. 10 161-70.
- [17] Bormashenko E et al 2006 Wetting properties of the multiscaled nanostructured polymer and metallic superhydrophobic surfaces Langmuir 22 9982-5
- [18] Choi C-H and Kim C-J 2006 Fabrication of a dense array of tall nanostructures over a large sample area with sidewall profile and tip sharpness control Nanotechnology 17 5326
- [19] D'Urso B and Simpson J Composite, nanostructured, super-hydrophobic material US Patent 7,258,731 (issued 08/21/07 ORNL.
- [20] Zhang X et al 2008 Superhydrophobic surfaces: from structural control to functional application J. Mater. Chem. 18 621-33
- [21] Shiu J-Y 2004 Fabrication of tunable superhydrophobic surfaces by nanosphere lithography Chem. Mater. 16 561-4
- [22] Pozzato A 2006 Superhydrophobic surfaces fabricated by nanoimprint lithography Microelectron. Eng. 83 884-8
- [23] Feng J 2011 Hierarchical superhydrophobic surfaces fabricated by dual-scale electron-beam-lithography with well-ordered secondary nanostructures Adv. Funct. Mater. 21 3715-22
- [24] ung Y C 2009 Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction PhD Dissertation Graduate Program in Mechanical Engineering The Ohio State University
- [25] Aegerter M A et al 2008 Coatings made by sol-gel and chemical nanotechnology J. Sol-Gel Sci. Technol. 47 203-36
- [26] Miljkovic J 2013 Modeling and optimization of superhydrophobic condensation Heat Transfer 135 111004
- [27] Boreyko J B and Chen C-H 2009 Self-propelled dropwise condensate on superhydrophobic surfaces Phys.

- Rev. Lett. 103 184501 (Published 26 October 2009)
- [28] Byu S 2014 Droplet train impingement on superhydrophobic surfaces Bulletin of the American Physical Society 67th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics vol 59
- [29] Katherine S et al 2010 Dynamic wetting on superhydrophobic surfaces: droplet impact and wetting hysteresis Proc. of the 12th IEEE Intersociety Conf. on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm) (IEEE) pp 1–8
- [30] Mohammadi R et al 2004 Effect of surfactants on wetting of super-hydrophobic surfaces Langmuir 20 9657–62
- [31] Chang F-M et al 2007 From superhydrophobic to superhydrophilic surfaces tuned by surfactant solutions Appl. Phys. Lett. 91 094108
- [32] Kamegawa T et al 2012 Superhydrophobic surfaces with photocatalytic self-cleaning properties by nanocomposite coating of TiO<sub>2</sub> and polytetrafluoroethylene Adv. Mater. 24 3697–700
- [۳۳] فهیم، جواد "نیازها و چالش‌های موجود در کاربرد فناوری پوشش‌های ابرآبگریز"، فصلنامه پوشش‌های سطحی، شماره ۴۸، پاییز ۱۳۹۳.
- [34] Simpson J T et al 2014 Superhydrophobic powder coatings US Patent 20140094540 (filed September 28, 2012, pub Apr 3, 2014 ORNL)
- [35] Simpson J T et al Superhydrophobic films and methods for making superhydrophobic films US Patent 20140065368 (Pub Mar 6 2014 ORNL)
- [36] Simpson J T et al Method of making superhydrophobic/ superoleophilic paints, epoxies, and composites US Patent 20140090578 (Filed February 1, 2013, pub Apr 3, 2014 ORNL)
- [37] Epstein A K et al 2012 Liquid-infused structured surfaces with exceptional anti-biofouling performance Proc. Natl Acad. Sci. USA 109 13182–7
- [38] Wong T-S et al 2011 Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity Nature 477443–7
- [39] Wong T S et al 2011 Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity Nature 477 443
- [40] Simpson J T et al Superhydrophobic transparent glass (Stg) thin film articles US Patent 8,741,158 (issued June 3, 2014 ORNL)
- [41] Aytug T et al 2013 Optically transparent, mechanically durable, nanostructured superhydrophobic surfaces enabled by spinodally phase-separated glass thin films Nanotechnology 24 315602
- [42] Aytug T and Simpson J T Superhydrophobic anodized metals and method of making same US Patent 20140110263 (filed Oct 18, 2013 ORNL)
- [43] Lai Y et al 2012 Transparent superhydrophobic/ superhydrophilic TiO<sub>2</sub>-based coatings for self-cleaning and anti-fogging J. Mater. Chem. 22 7420–6
- [44] Bravo J et al 2007 Transparent superhydrophobic films based on silica nanoparticles Langmuir 23 7293–8
- [45] Daniello R J 2014 Drag reduction in turbulent flows over micro patterned superhydrophobic surfaces Masters Theses 1896 University of Massachusetts
- [46] Barbier C et al Large drag reduction over superhydrophobic riblets arXiv:1406.0787 [physics.flu-dyn]
- [47] Sarshar M A et al 2011 Superhydrophobic surfaces properties for anti-icing ASME 2011 Int. Mech. Eng. Cong. Exp. 10 499–502
- [48] Sarshar M A et al 2013 Effects of contact angle hysteresis on ice adhesion and growth on superhydrophobic surfaces under dynamic flow conditions Colloid Polym. 291 427–35
- [۴۹] فهیم، جواد "مروری بر رفتار خوردگی پوشش‌های ابرآبگریز (۱)"، فصلنامه پوشش‌های سطحی، شماره ۵۰، بهار ۱۳۹۴.
- [۵۰] فهیم، جواد "مروری بر رفتار خوردگی پوشش‌های ابرآبگریز (۲)"، فصلنامه پوشش‌های سطحی، شماره ۵۱، تابستان ۱۳۹۴.
- [51] Zhang B et al 2014 Built-up superhydrophobic composite membrane with carbon nanotubes for water desalination RSC Adv.
- [52] Hu A and Apblett A 2014 Nanotechnology for water treatment and purification Lecture Notes for Nanoscale Science and Technology vol 22 (Berlin: Springer)