مروری بر مواد و پوشش‌های ابرآبگریز

جواد فهیم[1*]، حمید غیور[1]، سیدمحمدمهدی هادوی[2]، سیدعلی حسن‌زاده تبریزی[1]

[1] مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی نجف آباد

[2] پژوهشگاه مواد و انرژی

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

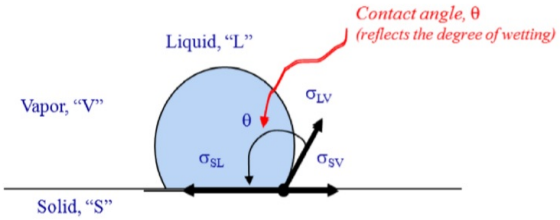
jf@smt.iaun.ac.ir

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. فیلم های ویدئویی آنلاین، تخیلات عمومی را با استفاده از به تصویرکشیدن راه رفتن مردم از میان گودال‌های گل‌ولای بدون مرطوب یا گلی شدن کفش های تنیس آن‌ها و به پرواز درآمدن واقعی آب از روی سطوح پوشش‌دهی شده، نشان داده‌است. در این تحقیق، به مبانی پایه‌ای رفتار ابرآبگریز همچنین بحث در خصوص آخرین پیشرفت‌ها و تحولات مربوط به فناوری‌های ابرآبگریزی 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 محدودیت ها 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 تحقیقات‌پایه‌ای هدایت‌شده مربوط به ساختارهای ابرآب‌گریز در دانشگاه‌ها، آزمایشگاه‌های‌ملی و مراکزتحقیقاتی‌مختلف 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 زاویه‌تماس دینامیک و استاتیک یانگ[1]، متداول‌ترین و مناسب‌ترین پارامترهای توصیف‌کننده خاصیت ترشوندگی یک‌سطح نسبت به آب مایع می باشد. 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 [۱و۲]

برای یک‌قطره آب مایع "L" که به همراه فاز بخار "V"برروی یک‌سطح "S" قرار دارد، معادل کلیدی برای توصیف آن، معادله یانگ است که تعادل‌نیروی میان کشش‌های‌سطحی ایجادشده در خط تماس جامد-مایع-بخار را توصیف می‌نماید.

$$\cos\theta_Y = (\sigma_{sv}-\sigma_{sl}) / \sigma_{lv}$$

θ_Y: زاویه تماس یانگ

σ_{sv}: کشش سطحی (انرژی در واحد سطح) از فصل مشترک جامد-بخار

σ_{sl}: کشش سطحی فصل مشترک مایع-جامد

σ_{lv}: کشش سطحی فصل مشترک مایع-بخار.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-08]

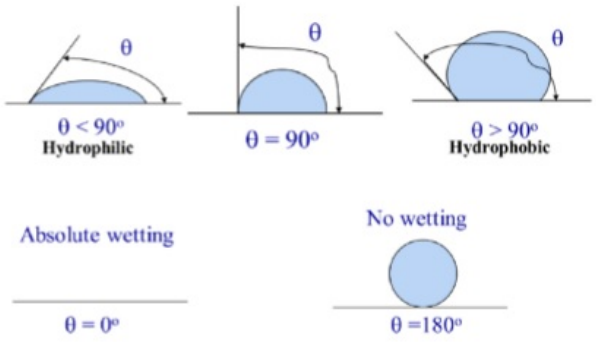
[DOR: 20.1001.1.17353351.1396.1.49.5.8]

۱-۲- زاویه تماس استاتیکی [۳]

زاویه تماس θ که در اندازه‌گیری آن، فرض می‌شود که یک قطره آب بر روی یک سطح صاف، مسطح[1]، صلب و یکنواخت قرار می‌گیرد.

۱-۳- پدیده ترشوندگی

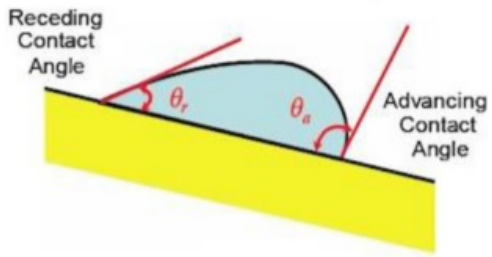
آب، مایعی با کشش سطحی نسبتاً بزرگ به دلیل دوقطبی الکتریکی آن می‌باشد. ساده‌ترین راه بیان رفتار دوقطبی آب این است که تمایل به چسبیدن بر روی اجسام از جمله خودش را دارد. یک سطح بر اساس این‌که چگونه با قطرات آب واکنش داده یا به آن می‌چسبد، به آب‌دوست یا آب‌گریز دسته بندی می‌شود. یک قطره آب، تمایل به ترکردن‌سطحی را دارد که از لحاظ علم شیمی، دارای انرژی‌سطحی بالایی است(مثل شیشه) و بر روی سطحی که انرژی سطحی پایینی دارد(مثل تفلون)، متمایل به جمع کردن خود[2] می‌باشد (شبیه 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 ۹۰ درجه جمع می شود. برعکس، اگر قطره آب تمایل به چسبیدن به یک سطح داشته باشد تا اینکه بخواهد به خودش بچسبد، سطح موردنظر آب‌دوست می‌باشد و قطره آب دارای زاویه تماس کم‌تر از ۹۰ درجه خواهد بود. باید توجه داشت که قطره آبی که یک سطح را کاملا 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 صرف‌نظر از جاذبه) و یک زاویه تماس حدود ۱۸۰ درجه خواهد داشت (شکل شماره۲).



شکل ۲- شرایط ترشوندگی آبدوستی و آبگریزی: زاویه ترشوندگی صفر معادل ترشوندگی کامل، زاویه ترشوندگی کمتر از ۹۰ درجه معادل آبدوست، زاویه ترشوندگی بیشتر از ۹۰ درجه معادل آبگریز و زاویه ترشوندگی ۱۸۰ درجه معادل عدم ترشوندگی.

۱-۴- زوایای تماس دینامیکی (پیش‌رونده[3] و پس‌رونده[4]) [۲، ۳، ۴]

شکل شماره ۳، نشان‌دهنده قطره‌آب بر روی یک سطح‌مورب است که‌داری زاویه‌تماس پیش‌رو (θ_a) و پس رو (θ_r) می‌باشد. اختلاف زاویه تماس پیش‌رو و پس‌رو، تحت عنوان زاویه تماس هیسترزیس شناخته می‌شود (θ_Δ).



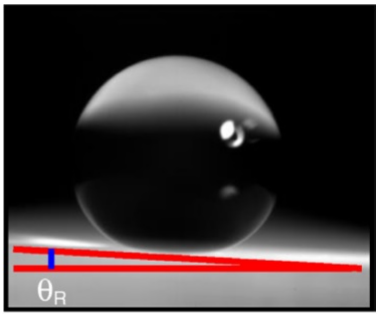
شکل ۳- زوایای تماس دینامیکی پیش رو (سمت راست) و پس رو (سمت چپ)

[1] planar
[2] Bead up
[3] Advancing
[4] Receding

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1396.1.49.5.8]

۱-۵- زاویه Roll-off [۴، ۵]

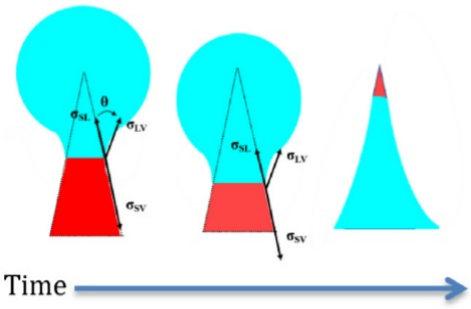
زاویه‌ای‌که در آن، یک قطره آب از روی سطح صاف مورب، به‌غلتش در می‌آید، زاویه roll-off می‌باشد(θ_R). به‌طورکلی سطوح ابرآب‌گریز دارای θ_R کوچک‌تر از ۵ درجه بوده اما سطوح ابر آب‌گریز با کیفیت بسیار بالا، دارای زاویه کم‌تر از ۱ درجه می‌باشند. شکل شماره ۴، نشان دهنده قطره‌ای با زاویه roll-off تقریباً ۵ درجه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



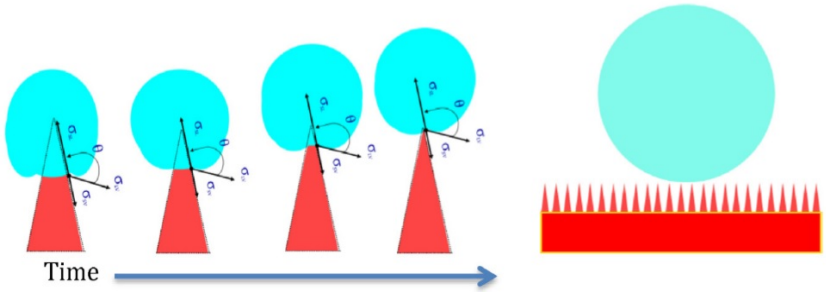
شکل ۴- زاویه غلتش یک قطره آب

۱-۶- 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، موکدا تابعی از کشش سطحی مایع و شیمی سطح (انرژی سطح) می‌باشد. اما با افزایش زبری سطحی، زاویه‌تماس مؤثر بسته به شیمی‌سطح زیرلایه (انرژی سطحی)، کاهش یا افزایش خواهد یافت. اگر شیمی سطح، آب‌دوست باشد با افزایش زبری‌سطح، زاویه تماس کاهش می‌یابد. درحالی‌که اگر شیمی یک سطح، آب‌گریز باشد با زبرنمودن آن سطح، زاویه تماس افزایش می‌یابد. ترتیب اولیه شکل۵، 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 می تواند از روی یک خوشه مخروطی درصورتیکه شیمی سطح خوشه مخروطی آبگریز باشد، دفع شود[۷].



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



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

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1396.1.49.5.8]

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

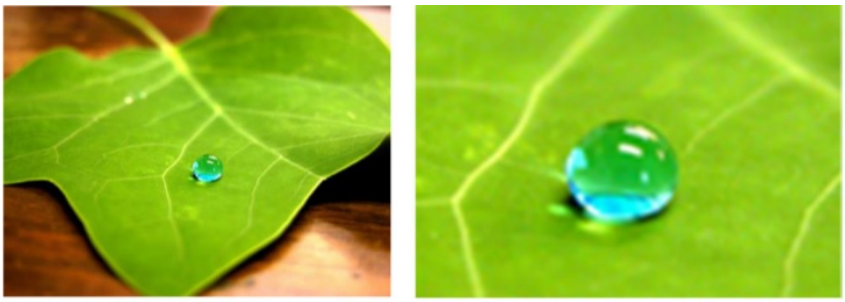
افزایش زاویه تماس مؤثر ناشی از زبری سطحی و توپوگرافی ساختاری به دو رژیم ونزل[1] و کاسی- باکستر[2] تقسیم‌بندی می‌شود. درحالی‌که هردو رژیم، مبین افزایش زاویه تماس همراه با افزایش زبری سطحی می‌باشند، رژیم کاسی-باکستر تحت تأثیر لایه هوای محبوس در زبری یا بافت سطحی است که موجب افزایش اساسی در زاویه تماس و کاهش قابل توجه در زاویه غلتش(Roll-off) و هیسترزیس زاویه تماس می‌گردد.

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

هنگامیکه زاویه تماس موثر قطره آب، معادل ۱۵۰درجه و یا بیشتر است، سطح موردنظر ابرآب‌گریز نامیده می‌شود. از اصطلاح فوق‌آب‌گریز برای توصیف سطحی که زاویه‌پیشروی و پس‌روی آن بزرگ‌تر از ۱۵۰ درجه است، استفاده شده است. تفاوت‌میان زاویه‌تماسی پیشروی و پس‌روی، هیسترزیس‌زاویه تماس نامیده می‌شود [۲].

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

مثال‌های متعددی از سطوح ابرآب‌گریز وجود دارد که به صورت طبیعی رخ می‌دهند و سطح‌گیاهان[3] و حشرات[4] را شامل می‌شود. جالب‌توجه‌ترین سطح ابر آب‌گریز طبیعی، برگ نیلوفر آبی است. دفع بیش از حد آب که توسط برگ‌نیلوفرآبی بروز می‌نماید، الهام‌بخش دانشمندان برای ترغیب به انجام تحقیقات اولیه بر روی پدیده ابرآب‌گریزی می‌باشد. در حقیقت اصطلاح "اثر لوتوس یا نیلوفرآبی" هنوز هم مترادف با رفتار ابر آب‌گریزی می‌باشد. شکل شماره ۷ نشان دهنده برگ ابرآب‌گریز درخت صنوبر از ایالت تنسی[5] آمریکا می‌باشد.



شکل ۷- رفتار ابرآبگریز برگ صنوبر

۱-۱۰- اثرات لایه هوای محبوس[6] در سطح ابرآب‌گریز

برای این‌که 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 ۱۸۰درجه)، زاویه roll-off (غلتش) بسیار پایین (نزدیک به صفر) و هیسترزیس زاویه‌تماس‌کم (نزدیک به صفر) را ایجادنماید و هنگامی‌که این سطح در آب، غوطه‌ور شود به دلیل انعکاس‌های‌داخلی‌کلی از نور انعکاس‌دهنده لایه هوای محبوس، اثر انعکاسی نوری[7] به وجود می‌آید. اشکال شماره ۸- الف و ۸-ب نشان دهنده اثرآینه‌ای بر روی یک تکه‌چوبی و یک محصول ایجادشده توسط پوشش‌های‌ابرآب‌گریز بر روی آن می‌باشد. باید توجه داشت که هوای‌محبوس در یک سطح ابرآب‌گریز با کیفیت بالا بعنوان یک مانع فیزیکی در برابر آب یا محلول‌های آبی عمل می‌نماید درحالی‌که بطور کلی، برای هوا یا گازها مانعی محسوب نمی‌شود.

[1] Wenzel
[2] Cassie-Bazter
[3] plant
[4] insect
[5] Tennessee state
[6] Pinned air
[7] Optical mirror effect

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1396.1.49.5.8]

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

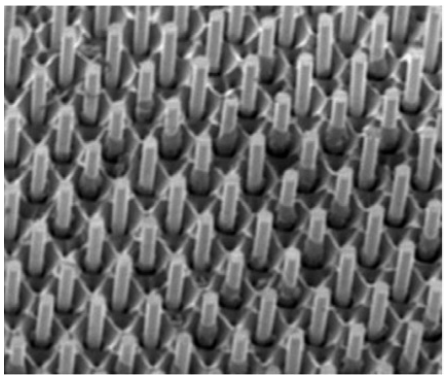
شکل ۸- (الف) سمت چپ: نور منعکس شده از لایه هوای محبوس بر روی یک چسب چوبی همراه با پوشش ابرآبگریز و (ب) سمت راست: نور منعکس شده از لایه هوای محبوس بر روی یک محصول ابرآبگریز

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

۱-۱۱-نمونه‌هایی از سطوح ابرآبگریز مصنوعی سنتز شده

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

دانشگاه‌ها و موسسات‌پژوهشی متعددی سطوح‌آب‌گریزمصنوعی 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[1] می‌باشد. آرایه میله‌های سیلیکونی با قطر یک میکرون که داخل محلول آب‌گریز قرار داده شده‌اند، دارای شیمی سطح اصلاح شده[2] و میکروساختاری هستند که ابرآبگریز خواهد بود. نتیجه این تحقیق، یک سطح ابرآب‌گریز با زاویه تماس استاتیک حدود ۱۶۰ درجه می‌باشد.

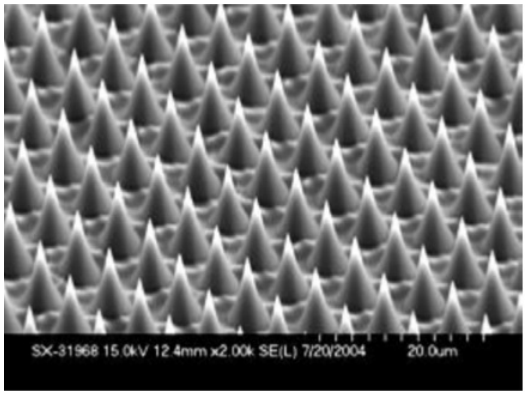


شکل ۱۰-پست آرایه سیلیکونی ابرآبگریز

[1] Bell
[2] Right surface chemistry

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1396.1.49.5.8]

در تحقیقات‌انجام‌شده درسال۲۰۰۴ درموسسهORNL، از تکنیک‌های کشش الیاف‌شیشه‌ای برای ساخت مخروط‌های شیشه‌ای نوک‌تیز (شکل ۱۱) استفاده شد.

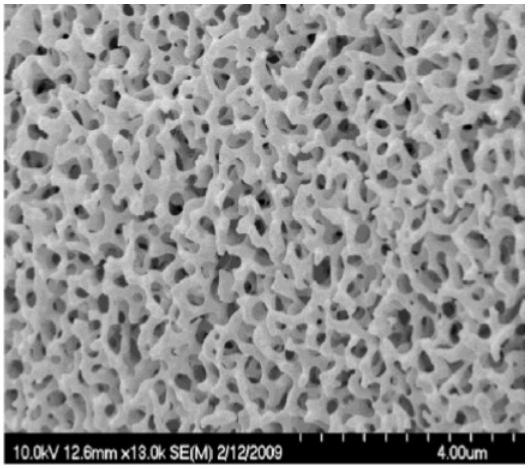


شکل ۱۱-آرایه‌های نوک تیز از مخروط‌های شیشه‌ای

این مخروط‌ها دارای دوره‌تناوب ۷ و ارتفاع ۱۲ میکرونی هستند[۷]. شیمی سطح آرایه‌های مخروطی شیشه‌ای با استفاده از یک محلول‌سیلان فلوردار[1] از آب‌دوست به آب‌گریز تغییر نموده است. این محلول سیلان، یک تک‌لایه خودمنظم[2] را که به صورت کووالانسی متصل شده‌است بر روی سطوح مخروطی ایجاد می‌کند. شعاع نوک مخروط‌ها پس از قرارگرفتن درمحلول‌سیلان به کمتراز۱۰نانومتر می‌رسد. این آرایه ابرآبگریز از مخروط‌های شیشه‌ای‌نوک‌تیز با ابعاد نانو یکی از سطوح با بیشترین‌دفع‌کنندگی‌آب است که تابه‌حال در دنیا با زاویه‌تماس بزرگتر از ۱۷۹ درجه گزارش‌شده‌است.

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

میکروگراف‌هایی که در ادامه ارائه می‌شود مثال‌هایی از سطوح نانوساختار نامنظم مهندسی هستند که در ابتدا ابرآب‌دوست بوده ولی با تغییر شیمی‌سطح به‌وسیله آماده‌سازی سطح با تک‌لایه خودمنظم آب‌گریز، از حالت آب‌دوست به حالت آب‌گریز تبدیل می‌شوند. شکل۱۲، سیلیکای نانوساختار و متخلخل (در ابعاد نانو) را نشان می‌دهد که به‌وسیله اچ فازمجزای شیشه بورو سیلیکاتی[3] تهیه شده است [۱۹و۲۰].

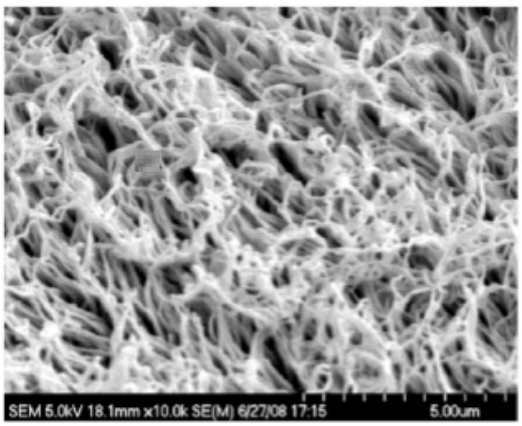


شکل ۱۲- سیلیکای نانوبافت شکل یافته توسط اچ فاز مجزای شیشه بوروسیلیکات.

این ساختار ابرآب‌گریز نانو بافتار، دارای زوایای تماسی به بزرگی ۱۷۸ درجه می‌باشد. شکل۱۳ نشان دهنده نانو رشته‌های پلیمری فلوئوردارشده با زاویه‌تماس تقریبی ۱۴۵ درجه می‌باشد.

[1] Fluorinated silane solution
[2] Self-assembled monolayer
[3] differential etching phase separated borosilicate glass

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1396.1.49.5.8]

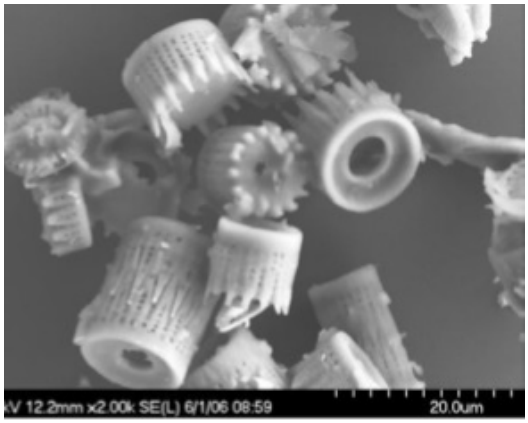


شکل ۱۳- رشته‌های پلیمری فلوئوردار شده نانو بافت

بایستی توجه نمود که این رشته‌های پلیمری به‌راحتی 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)[1] 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[2] است.



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

دیاتم‌ها دارای ویژگی منحصربه‌فردی 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 این‌که شیمی‌سطح آن به طور طبیعی آب‌دوست است، لذا به‌طور طبیعی ابرآب‌دوست می‌باشد. ولی اگر خاک دیاتومه با یک سیلان آب‌گریز آماده‌سازی شود، به دلیل شیمی‌سطح 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

[1] Diatomaceous earth
[2] Diatom

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1396.1.49.5.8]

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

الف-جنبه‌های هزینه: به‌استثنای خاک دیاتومه ابرآبگریز، هزینه مواد ابرآب‌گریز به دلیل میزان فرآوری‌های لازم برای ایجاد ساختارهای میکرو و نانوی موردنیاز برای رفتار ابرآب‌گریزی، نسبتاً بالا می‌باشد. برای مثال اکثر سطوح نانو و میکروساختار ابرآب‌گریز، اخیرا توسط فرایند فوتولیتوگرافی [۲۱و۲۲و۲۳] 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 متصل‌شده 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 ابرآب‌گریز با کیفیت و زاویه تماس بالا، نیازمند به شیمی سطحی آبگریز 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[1]" در مقیاس‌نانو دارند(شکل۱۳). این رشته‌های پلیمری به راحتی در یکدیگر پیچیده شده و به سرعت رفتار ابرآب‌گریز خود را از دست می‌دهند[۲۴].

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

چ-جنبه‌های متراکم سازی- درحالی‌که پوشش‌ها و سطوح ابرآب‌گریز، 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 قابل‌توجهی می‌گردد [۲۶و۲۷].

ح-جنبه‌های ضربه و برخورد[2] [۲۸و۲۹]: لایه هوایی محبوس مربوط به سطوح ابرآب‌گریز به‌وسیله فشار موضعی بالای آب، ازبین 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 ابرآب‌گریزی به لحاظ تاریخی یک اثر سطحی ساده می‌باشد، لذا هرگونه برخورد سطحی قابل توجهی که به سرعت اتفاق بیافتد، رفتار ابرآب‌گریز معیوبی را در موضع و محل برخورد ایجاد می نماید.

ی-جنبه‌های ترشوندگی مواد فعال‌سازسطحی/ روغن: رفتار ابرآب‌گریزی یک نتیجه از تقویت (با استفاده از توپوگرافی (پستی بلندی) سطحی) اثر کشش‌سطحی آب می‌باشد. اگر کشش‌سطحی‌آب شدیدا توسط مواد فعال‌ساز سطحی یا روغن کاهش یابد، رفتار ابرآب‌گریز به میزان زیادی تنزل یافته و یا از بین می‌رود و بدنبال آن، سطح موردنظر به آسانی‌تر می‌شود [۳۰و۳۱].

۳- وجوه مختلف فناوری ابرآب‌گریز

مثال‌های‌قبلی مواد ابرآب‌گریز، مربوط به دو وجه فناوری از سطوح ابرآب‌گریز می‌باشد. وجه اول درمورد تحقیقات پایه‌ای ساختارهای ابرآب‌گریز هدایت‌شده در دانشگاه‌ها، آزمایشگاه‌های‌ملی و مراکزتحقیقاتی‌مختلف است. درحالی‌که این وجه اول، شور و شعف 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 نداشته اند.

وجه دوم این فناوری از تعدادی مواد مربوط به وجه اول (مثل نانوذرات عامل‌دارشده [۳۲])، برای ایجاد پوشش‌های ابرآب‌گریز دریک پوشش‌فوقانی با اتصال‌ضعیف، استفاده می‌کند. توجه شود که این نوع پوشش‌فوقانی 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 ابرآب‌گریز از بین می‌رود. اگرچه اثبات شده که دست‌یابی تجاری به‌این فناوری امکان‌پذیر است اما ازلحاظ ماندگاری و

[1] Wet noodles
[2] Impingement

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1396.1.49.5.8]

کاربردپذیری دارای کمبودهایی است. آخرین پیشرفت‌های فناوری ابرآبگریز، احتمالا 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 می توان 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 سال۲۰۱۵ هیچ گونه رنگ، اپوکسی، سیلیکون و یا سایر محصولات ابرآب‌گریزپایدار که به‌صورت‌تجاری در دسترس باشد وجود نداشت. ولی انتظار می‌رفت که با معرفی و ورود زودهنگام رنگ‌ها و اپوکسی‌های ابرآب‌گریز حجمی به‌وسیله برخی از کمپانی‌های پیشتاز آمریکایی حوزه رنگ، این وضع تغیر نماید (پیش بینی می شد 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 درصورتی‌که 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 کاملا نوینی توسعه می‌دهد(مثل حذف یا کاهش جنبه های 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 روغن گریز (دافع روغن) با استفاده از سطوح متخلخل مایع نفوذی لغزنده [۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹]

سطوح متخلخل مایع نفوذی لغزنده[1]، 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 دربرابر فشار و شفافیت نوری بالایی برخوردار هستند. علت دفع‌کنندگی بالای یخ و مایع برای این سطوح به خاطر ایجاد سطوح فوق صاف می‌باشد. یک‌روش برای درک رفتار موردنظر - سطوح مذکور این است که با نفوذ یک سیال با انرژی‌سطحی 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 زمانی‌که سیال با انرژی‌سطحی‌پایین درداخل نانوبافت ابرآب‌گریز باقی بماند، هیچ سیال دیگری(با انرژی‌سطحی 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 نازک‌نوری 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 معمولا 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 نسبتا مناسبی از یک اتصال‌دهنده (نظیر پلی‌اورتان) نیاز است. اما معمولا اتصال‌دهنده‌ها بسیاری‌از 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 اتصال دهنده (نظیر پلی اورتان) یا با استفاده از یک فرآیند سل-ژل آب‌گریز، نسبتا 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.

[1] Slippery liquid-infused porous surface (s)

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-08]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1396.1.49.5.8]

۵- نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با بیان ماهیت پایه و خصوصیات رفتار ابرآب‌گریز آغاز و در ادامه چهار وجه مختلف فناوری ابـرآب‌گریـز شـرح داده شد. فناوری وجه اول مربوط به دانشگاه‌ها، آزمایشگاه‌های ملی و گروه‌هـای تحقیقـاتی اسـت کـه بررسـی‌هـای آن‌هـا در مـورد خصوصیات پایه سطوح ابرآب‌گریز و ساخت آن‌ها با استفاده از فوتولیتوگرافی بود. وجه دوم فناوری ابرآب‌گریز از زمانی شروع شـد که پوشش‌های حاصل از پاشش ابرآب‌گریز روی سطح به صورت تجاری در دسترس بودند. پوشش‌ها و مواد با سطوح ابرآب‌گریـز توجه دانشمندان و عموم را به خود معطوف ساخت ولی گران قیمت بودن این مواد و پایداری ناکافی آن، ناامیـدی زیـادی ایجـاد کرد. وجوه سوم و چهارم این فناوری از سال ۲۰۱۵ با معرفی رنگ‌های ابرآب‌گریز حجمی پایدار و به دنبال آن لایه نـازک نـوری ابرآب‌گریز شفاف، آغاز شد. پیش‌بینی می‌شود که ورود تجاری سطوح، رنگ‌ها و پوشش‌های ابـرآب‌گریـز، اثـرات چـشمگیری 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 Rühe 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.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1396.1.49.5.8]

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 TiO2 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 TiO2-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)

[Downloaded from jicers.ir on 2026-10-08]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1396.1.49.5.8]