

مروری بر مواد و پوشش‌های ابرآبگریز

*جواد فهیم^۱، حمید غیور^۲، سیدمحمد مهدی هادوی^۳، سیدعلی حسن زاده تبریزی^۴

مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف

آباد، ایران (دانشجوی دکتری)

^۴۲. مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد

اسلامی، نجف آباد، ایران (استادیار)

^۳. پژوهشگاه مواد و انرژی (دانشیار)

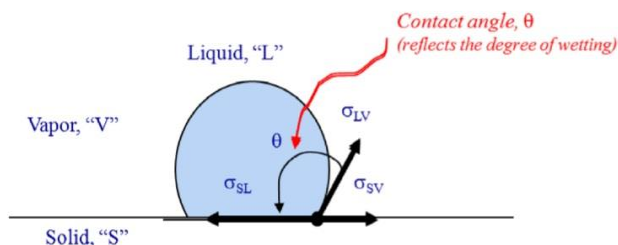
چکیده:

در طی چندسال گذشته، جوامع علمی و صنعت پوشش‌دهی دنیا، با سطوح و پوشش‌های ابرآبگریز مبتنی بر پلیمر/اکسید همراه با خواص استثنایی و منحصر بفرد 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 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 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 هدایت شده 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 رسوب دهی 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 اندازه گیری 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.

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

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.

۱-۲- زاویه تماس استاتیکی [3]

زاویه تماس θ که در اندازه‌گیری آن، فرض می‌شود که یک قطره آب بر روی یک سطح صاف، مسطح^۱، صلب و یکنواخت قرار می‌گیرد.

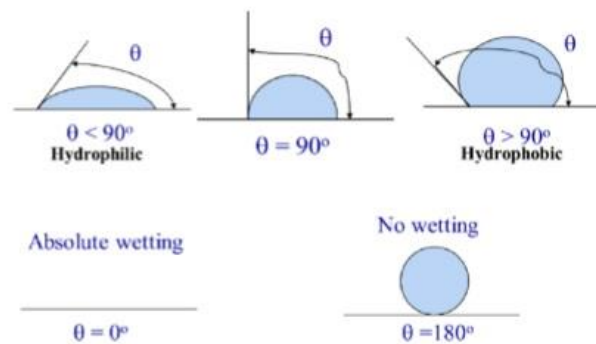
۱-۳- پدیده ترشوندگی

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 علم‌شیمی، دارای انرژی سطحی بالایی است (مثل شیشه) و بر روی سطحی که انرژی سطحی پایینی دارد (مثل تفلون)، متمایل به جمع کردن خود^۲ می‌باشد (شبهه دانه های 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 می‌شود. 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

^۱ planar

^۲ Bead up

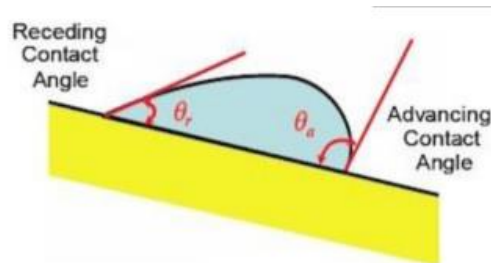
تماس کم‌تر از ۹۰ درجه خواهد بود. باید توجه داشت که قطره آبی که یک سطح را کاملاً تر می‌نماید، دارای زاویه تماسی حدود صفر درجه خواهد بود. در حالی که یک قطره، هیچ واکنشی با یک سطح نداشته باشد (عدم ترشوندگی)، خود را به صورت یک کره کامل جمع کرده (با صرف‌نظر از جاذبه) و یک زاویه تماس حدود ۱۸۰ درجه خواهد داشت (شکل شماره ۲).



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^۱ و پس‌رونده^۲) [2,3,4]

شکل شماره ۳، نشان‌دهنده قطره آب بر روی یک سطح مورب است که دارای زاویه تماس پیش‌رو (θ_a) و پس‌رو (θ_r) می‌باشد. اختلاف زاویه تماس پیش‌رو و پس‌رو، تحت عنوان زاویه تماس هیستریزس شناخته می‌شود (θ_Δ).



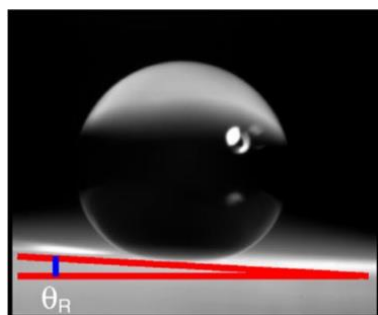
شکل ۳- زوایای تماس دینامیکی پیش‌رو (سمت راست) و پس‌رو (سمت چپ)

۱-۵- زاویه Roll-off [4,5]

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

^۱ advancing

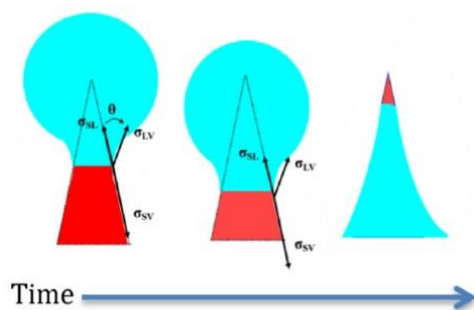
^۲ receding



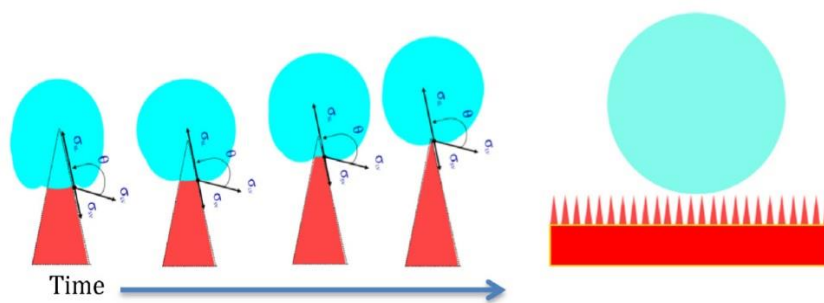
شکل ۴- زاویه غلتش یک قطره آب

۱-۶- اثرات زبری سطح یا توپولوژی بر روی زاویه تماس [6]

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) می باشد. اما با افزایش زبری سطحی، زاویه تماس مؤثر بسته به شیمی سطح زیرلایه (انرژی سطحی)، کاهش یا افزایش خواهد یافت. اگر شیمی سطح، آب دوست باشد با افزایش زبری سطح، زاویه تماس کاهش می یابد. در حالی که اگر شیمی یک سطح، آب گریز باشد با زبرنمودن آن سطح، زاویه تماس افزایش می یابد. ترتیب اولیه شکل ۵، نشان دهنده یک خوشه مخروطی آبدوست در برابر زمان است که اثر جذب مویرگی یک قطره آب در تماس با یک خوشه مخروطی شیشه ای آبدوست را نشان می دهد. ترتیب دوم در شکل ۶ نشان می دهد که چگونه یک قطره آب می تواند از روی یک خوشه مخروطی در صورتیکه شیمی سطح خوشه مخروطی آب گریز باشد، دفع شود [7].



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



شکل ۶- دفع آب ایجاد شده با استفاده از شیمی سطح آب گریز بر روی یک سطح تیز

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

افزایش زاویه تماس مؤثر ناشی از زبری سطحی و توپوگرافی ساختاری به دو رژیم و نزل^۱ و کاسی - باکستر^۲ تقسیم‌بندی می‌شود. در حالی 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 هیستریزیس زاویه تماس می‌گردد.

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

هنگامیکه زاویه تماس مؤثر قطره آب، معادل ۱۵۰ درجه و یا بیشتر است، سطح مورد نظر 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، هیستریزیس زاویه 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 سطح گیاهان^۳ و حشرات^۴ را شامل می‌شود. جالب توجه‌ترین سطح ابرآب‌گریز طبیعی، برگ نیلوفر آبی است. دفع بیش از حد آب که توسط برگ نیلوفر آبی بروز می‌نماید، الهام بخش 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^۵ آمریکا می‌باشد.



شکل ۷- رفتار ابرآب‌گریز برگ صنوبر

۱-۱۰- اثرات لایه هوای محبوس^۶ در سطح ابرآب‌گریز

^۱ Wenzel

^۲ Cassie-Baxter

^۳ plant

^۴ insect

^۵ Tennessee state

^۶ Pinned air

برای این که یک سطحی ابرآب‌گریز باشد، زاویه تماس مربوط به آن بایستی بزرگ باشد ($\theta \geq 150^\circ$). 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 180° درجه)، زاویه roll-off (غلتش) بسیار پایین (نزدیک به صفر) و هیستریزس زاویه تماس کم (نزدیک به صفر) را ایجاد نماید و هنگامیکه این سطح در آب، غوطه‌ور شود به دلیل انعکاس‌های داخلی کلی از نور انعکاس‌دهنده لایه هوای محبوس، اثر انعکاسی نوری^۱ به وجود می‌آید. اشکال شماره ۸- الف و ۸- ب نشان دهنده اثرآینه‌ای بر روی یک تکه چوبی و یک محصول ایجادشده 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. شکل ۹، قطره آبی 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



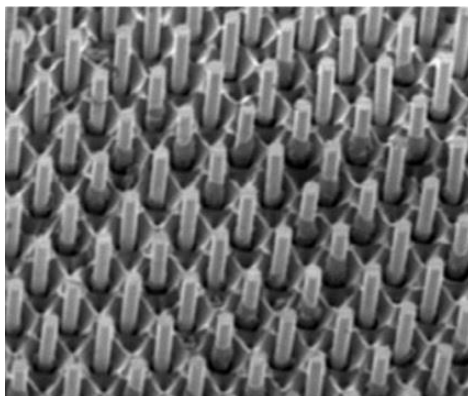
شکل ۹- قطره آب دفع شده توسط یک صفحه توری سیمی همراه با پوشش ابرآب‌گریز

۱۱-۱- نمونه‌هایی از سطوح ابرآب‌گریز مصنوعی سنتز شده

^۱ Optical mirror effect

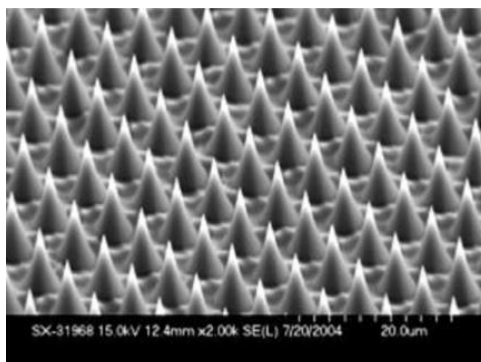
۱-۱۱-۱- آرایه های مهندسی شده و منظم ابرآبگریز آب‌گریز [۷ و ۱۶]

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^۱ می‌باشد. آرایه میله‌های سیلیکونی با قطر یک میکرون که داخل محلول آب‌گریز قرار داده شده‌اند، دارای شیمی سطح اصلاح شده^۲ 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

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



شکل ۱۱- آرایه های 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^۳ از آب‌دوست به آب‌گریز تغییر نموده است. این محلول سیلان، یک تک‌لایه

^۱ Bell

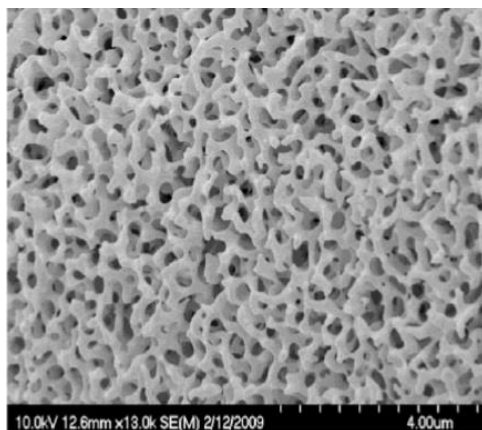
^۲ Right surface chemistry

^۳ Fluorinated silane solution

خودمنظم^۱ 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 ابرآبگریز 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.

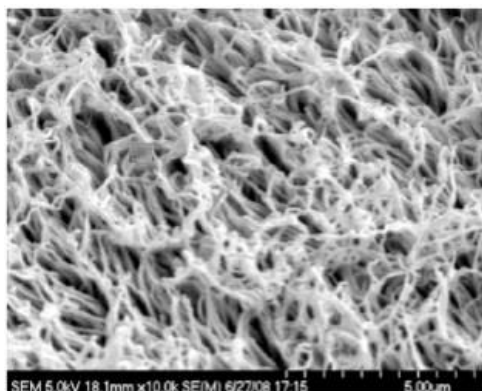
۲-۱۱-۱- سطوح ابرآب‌گریز نامنظم مهندسی شده [۱۷ و ۱۸ و ۱۹]

میکروگراف‌هایی که در ادامه ارائه می‌شود مثال‌هایی 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 بوروسیلیکاتی^۲ تهیه شده است [۱۹ و ۲۰].



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. شکل ۱۳ نشان دهنده نانو رشته‌های پلیمری فلئوئوردار شده با زاویه تماس تقریبی ۱۴۵ درجه می‌باشد.



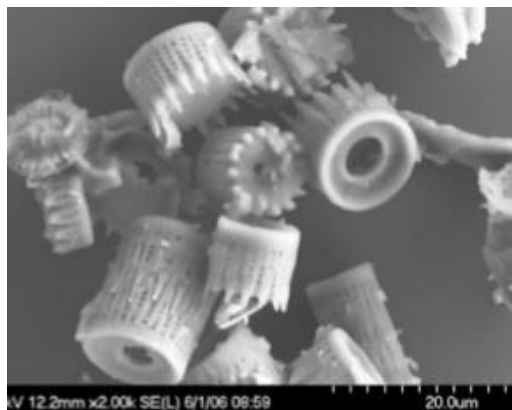
^۱ Self-assembled monolayer

^۲ differential etching phase separated borosilicate glass

شکل ۱۳- رشته های پلیمری فلئوردار شده نانو بافت

بایستی توجه نمود که این رشته های پلیمری به راحتی در یکدیگر پیچیده می شوند که در این حالت، زاویه تماس کاهش یافته و به میزان ۱۳۰ درجه می رسد.
۳-۱۱-۱- خاک دیاتومه (دارای جداره سیلیسی)^۱ ابر آب گریز

شکل ۱۴ میکروگرافی از خاک دیاتومه با جداره سیلیسی را نشان می دهد. این خاک حاوی باقیمانده های اسکلت گونه ای از یک خانواده از فیتو پلنکتون به نام دیاتمها^۲ است.



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

دیاتمها دارای ویژگی منحصر به فردی هستند که اسکلت آنها از سیلیکون دی اکسید هیدراته تشکیل شده است. خاک دیاتوم یک ماده طبیعی و فراوان پایه سیلیس است که به راحتی می توان در سراسر دنیا آن را استخراج نمود. این ماده دارای تخلخل های نانو و میکرو به همراه زبری های نانومقیاس است که بسته به شیمی سطح آن، قابلیت جذب سطحی آب و یا دفع آب آن به میزان زیادی افزایش می یابد. به خاطر این که شیمی سطح آن به طور طبیعی آب دوست است، لذا به طور طبیعی ابر آب دوست می باشد. ولی اگر خاک دیاتومه با یک سیلان آب گریز آماده سازی شود، به دلیل شیمی سطح آب گریز آن و اثر تقویت کننده بافت و نانو تخلخل موجود، به ابر آب گریز تبدیل می شود. این پودر ابر آب گریز نانو متخلخل خاک دیاتومه ابر آب گریز نامیده می شود.

۲- محدودیت های مربوط به سطوح و پوشش های ابر آب گریز

برای ده سال گذشته یا بیشتر، محققان گزارش های متعددی را در رابطه با رفتار شگفت انگیز دفع آب سطوح و مواد ابر آب گریز ارائه نمودند ولی تاکنون هیچ کدام از این اثرات مربوط به سطوح یا مواد ابر آب گریز، آنها را به محصولات تجاری تبدیل نساخته است که در ادامه لیست مهم ترین دلایل مربوطه ارائه شده است:

^۱ Diatomaceous earth

^۲ diatom

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، 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 ابرآب‌گریز با کیفیت و زاویه تماس بالا، نیازمند به شیمی سطحی آبریز 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"^۱ در مقیاس نانو دارند (شکل ۱۳). 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 بین رفتن 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 [۲۶ و ۲۷].

ح- جنبه‌های ضربه و برخورد^۲ [۲۸ و ۲۹]- لایه هوایی محبوس مربوط به سطوح ابرآب‌گریز 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 ابرآب‌گریزی به لحاظ تاریخی یک اثر سطحی ساده می‌باشد، لذا هرگونه برخورد سطحی قابل‌توجهی که به سرعت اتفاق بیافتد، رفتار ابرآب‌گریز معیوبی را در موضع و محل برخورد ایجاد می‌نماید.

ی- جنبه‌های ترشوندگی مواد فعال‌ساز سطحی / روغن- رفتار ابرآب‌گریزی 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 ابرآب‌گریز به میزان زیادی تنزل یافته و یا از بین می‌رود و بدنبال آن، سطح موردنظر به آسانی‌تر می‌شود [۳۰ و ۳۱].

^۱ Wet noodles

^۲ impingement

۳- وجوه مختلف فناوری ابرآب‌گریز

مثال‌های قبلی مواد ابرآب‌گریز، مربوط به دو وجه فناوری از سطوح ابرآب‌گریز می‌باشد. وجه اول در مورد تحقیقات پایه‌ای ساختارهای ابرآب‌گریز هدایت‌شده در دانشگاه‌ها، آزمایشگاه‌های ملی و مراکز تحقیقاتی مختلف است. در حالی که 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 نداشته‌اند.

وجه دوم این فناوری از تعدادی مواد مربوط به وجه اول (مثل نانوذرات عامل‌دار شده [۳۲])، برای ایجاد پوشش‌های ابرآب‌گریز در یک 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 ابرآب‌گریز از بین می‌رود. اگرچه اثبات شده که دستیابی تجاری به این فناوری امکان‌پذیر است اما از لحاظ ماندگاری و کاربردپذیری دارای کمبودهایی است. آخرین پیشرفت‌های فناوری ابرآب‌گریز، احتمالاً به تولید نسل‌های سوم و چهارم از فناوری‌های ابرآب‌گریز منجر خواهد شد که وعده ساخت فناوری‌های ابرآب‌گریز با گستردگی زیاد را اگرچه سهل‌الوصول نباشد، برآورده خواهد ساخت. در ارتباط با چالش‌ها و نیازهای مربوط به کاربرد فناوری پوشش‌های ابرآب‌گریز می‌توان به تحقیقی با همین عنوان مراجعه نمود [۳۳].

۴- پیشرفت‌های اخیر در فناوری ابرآب‌گریز

پوشش ابرآب‌گریز 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 به صورت تجاری در دسترس باشد وجود نداشت. ولی انتظار می‌رفت که با معرفی و ورود زود هنگام رنگ‌ها و اپوکسی‌های ابرآب‌گریز حجمی به وسیله 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 ابرآب‌گریز 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 روغن گریز (دافع روغن) با استفاده از سطوح متخلخل مایع نفوذی لغزنده [۳۶ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹]

سطوح متخلخل مایع نفوذی لغزنده^۱، 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. یک‌روش 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 اتصال دهنده (نظیر پلی‌اورتان) نیاز است. اما معمولاً اتصال دهنده‌ها بسیاری از حفرات را پر و یا می‌پوشانند و برای رفتار ابرآب‌گریز، به سطوح بافت نیاز است. ایجاد یک لایه نازک شفاف نوری ابرآب‌گریز، به وسیله نانو ذرات سیلیکای عامل دار آب‌گریز معلق و پراکنده در یک محلول حاوی مقادیر کمی از اتصال دهنده (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.

۵- کاربردهای سطوح و پوشش‌های ابرآب‌گریز پایدار

با پیشرفت‌های اخیر در پوشش‌ها و سطوح ابرآب‌گریز پایدار، به‌زودی تعداد زیادی از محصولات موجود به محصولات ابرآب‌گریز تبدیل خواهد شد و از آنجایی که فناوری ابرآب‌گریز حجمی، قابلیت‌ها و کارکردهای جدیدی را به پوشش‌ها اضافه کرده است، لذا محصولات جدیدی مبتنی بر این قابلیت‌ها و کارکردها نمایان خواهد شد که کاربردهای موردنظر عبارتند از دفع آب، لنزها و پنجره‌های نوری خودتمیزشونده [۳۵ و ۴۳ و ۴۴]، کاهش دراگ چسبناک [۴۵ و ۴۶]، ضد یخ‌زدگی [۲۷ و ۲۸ و ۴۷ و ۴۸]، ضد رسوب دهی زیستی [۲۹ و ۳۰]، ضد خوردگی [۳۴ و ۳۶ و ۴۹ و ۵۰] و نمک زدایی (آب شیرین کنی) [۵۱ و ۵۲].

^۱ Slippery liquid-infused porous surface(s)

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

۱. Young T 1805 Phil. Trans. 95 84; Works, edit by Peacock, 1, 432
۲. 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
۳. Kwok D Y and Neumann A W 1999 Contact angle measurement and contact angle interpretation Adv. Colloid Interface Sci. 81 167-249
۴. 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
۵. Marmur A 2004 The Lotus effect: superhydrophobicity and metastability Langmuir Lett. 20 3517-9.
۶. 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 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
- 49- فهیم، جواد "مروری بر رفتار خوردگی پوشش‌های ابرآبگریز(۱)"، فصلنامه پوشش‌های سطحی، شماره ۵۰، بهار ۱۳۹۴.
- 50- 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)