



## سطح آبر آب‌گریز استحکام بالا با استفاده از پلی تترافلورواتیلن، ذرات میکرومتری آلومینیوم و نانو ذرات اکسید سیلیسیم

نوروز محمد نوری<sup>1\*</sup>، محمد سعادت بخش<sup>2</sup>، رامین باقری<sup>3</sup>

- 1- استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم صنعت ایران، تهران
  - 2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
  - 3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم صنعت ایران، تهران
- \* تهران، صندوق پستی 1684813114، mnouri@iust.ac.ir

### چکیده

در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی برای تولید سطوح آبر آب‌گریز<sup>1</sup> انجام گرفته است. لغزش روی این سطوح باعث ایجاد خاصیت خود تمیز شونده و کاهش پسای اصطکاکی می‌شود. یکی از روش‌های تولید این سطوح، ایجاد زبری‌های سلسله‌ای با استفاده از ساختارهای میکرومتری و نانومتری بوده که با یک ماده با انرژی سطحی کم پوشش داده می‌شوند. پلی تترافلورواتیلن (تفلون) یک ماده با انرژی سطحی پایین بوده که به علت استحکام مکانیکی و شیمیایی مناسب، در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. برای تولید سطح آبر آب‌گریز ابتدا با استفاده از فرایند افشاندن یک لایه تفلون با ضخامت مناسب بر روی ورق آلومینیوم ایجاد شده و پودر آلومینیوم میکرومتری، به روش شناورسازی، بر روی لایه تفلون لایه‌نشانی شده است. سپس برای کاهش انرژی سطحی مجدداً از افشاندن تفلون بر روی پودرهای میکرومتری استفاده شده است. در نهایت برای ایجاد ساختارهای نانومتری اکسید سیلیسیم آب‌گریز روی سطح لایه‌نشانی شده و اثرات ضخامت لایه تفلون، اندازه ذرات میکرومتری و به‌کارگیری نانو ذرات آب‌گریز بر روی خواص سطح مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده آن است که به‌کارگیری ذرات میکرومتری علاوه بر ایجاد زبری، از صاف شدن سطح طی فرایند پخت تفلون جلوگیری کرده و با تولید ترک‌ها و زبری‌های ثانویه باعث افزایش زاویه استاتیکی و کاهش زاویه دینامیکی شده است. در انتها پس از اصلاح ساختار سطح با پودرهای آلومینیوم و پوشش آن با یک لایه تفلون و سپس لایه‌نشانی اکسید سیلیسیم آب‌گریز زاویه تماسی  $165 \pm 3$  درجه و زاویه دینامیکی کمتر از 7 درجه به دست آمده است.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 13 تیر 1394  
پذیرش: 21 شهریور 1394  
ارائه در سایت: 04 مهر 1394

کلید واژگان:

آبر آب‌گریز  
زبری سلسله‌ای  
انرژی سطحی  
پوشش پلیمری  
نانو مواد آب‌گریز

## Robust superhydrophobic surface with polytetrafluoroethylene (ptfe), micro sized aluminum particles and sio2 nano-particles

Nowrouz Mohammad Nouri\*, Mohammad Saadat-Bakhsh, Ramin Bagheri

Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.  
\* P.O.B. 1684613114 Tehran, Iran, mnouri@iust.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 04 July 2015  
Accepted 12 September 2015  
Available Online 26 September 2015

**Keywords:**  
Superhydrophobic  
Hierarchical Roughness  
Surface Energy  
Polymer Coating  
Hydrophobic Nano Material

### ABSTRACT

In recent years, many studies have been done to fabricate superhydrophobic surfaces. These surfaces have slip condition which causes self-cleaning property and also drag reduction. The hierarchical micro/nanostructures which are coated with a low surface energy material are needed to fabricate high static contact angle superhydrophobic surfaces. In order to have thermal stability, chemical resistance and low surface energy Polytetrafluoroethylene (Teflon) is used in this research. To produce the superhydrophobic surface, an appropriate layer of Teflon is coated on the aluminum substrate and the micron sized aluminum particles are deposited on the Teflon layer by fluidizing method. Then to reduce surface energy, the second Teflon layer is sprayed on the top of the aluminum particles. At the end, using sprayed method the hydrophobic nano-particles of silica are deposited on the surface as a final hydrophobic layer. The effect of Teflon thickness, size of micro-particles and addition of hydrophobic nano-particles are investigated. The scanning electron microscopy (SEM) images of the cured surfaces show that application of micro-particles prevents the surface from being smooth after curing, creates appropriate micro-scale structures and also causes micro-scale cracks compared to smooth Teflon surfaces. The creation of these micro-structures leads to increasing static contact angle and decreasing dynamic angle of surfaces. By modifying the surface structures with aluminum micro-particles, Teflon layer coat and subsequent deposition of hydrophobic silica nano-particles, static contact angle of  $165 \pm 3^\circ$  and dynamic angle of less than 7 degrees are achieved.

1- آبر آب‌گریز به عنوان معادلی فارسی برای واژه لاتین Superhydrophobic استفاده شده و به معنای سطحی است که دارای زاویه تماسی استاتیکی بزرگ تر از 150 درجه و زاویه دینامیکی کم تر از 10 درجه می باشد.

## 1- مقدمه

آب‌گریزی پدیده‌ای است که ابتدا در برگ نیلوفر آبی مشاهده شد و به علت کاربردهای فراوانش مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است [1-7]. سطوح آبر آب‌گریز سطوحی می‌باشند که دارای زاویه تماسی استاتیکی بالای 150 درجه و زاویه دینامیکی زیر 10 درجه می‌باشند. این سطوح در تولید سطوح خود تمیز شونده، کاهش نیروی پسای اصطکاکی زیر سطحی‌ها و کشتی‌ها و همچنین در تجهیزات سرمایشی از جمله اواپراتورها، برای جلوگیری از یخ زدن آن‌ها، به کار گرفته می‌شوند [8،9]. برای ایجاد خاصیت آب‌گریزی به دو مؤلفه یعنی ساختار سطحی با زبری‌های سلسله‌ای و پوشش آن با یک ماده‌ی دارای انرژی سطحی پایین نیاز است [10-12]. روش‌های متعددی برای اصلاح ساختار سطح از جمله روش کپی کردن الگوها<sup>1</sup> [13،14]، لیتوگرافی<sup>2</sup> [15-20]، عملیات پلاسما<sup>3</sup> [21-23] و رسوب‌دهی شیمیایی بخار<sup>4</sup> [24-29] وجود دارد.

استفاده از یک ماده با انرژی سطحی پایین (پوشش دهی یک فلورو پلیمر یا یک ماده سیلان دار) بر روی یک سطح صاف می‌تواند زاویه تماسی استاتیکی بالای 120 درجه ایجاد کند [5]. در حالی که برای تولید یک سطح آبر آب‌گریز با زاویه تماسی بالای 150 درجه کافی نیست. برای دستیابی به زاویه تماسی استاتیکی بالاتر از 150 درجه وجود ساختارهای سلسله‌ای میکرو/نانومتری ضروری است [30،31].

با وجود آنکه روش‌های مختلف و بسیار دقیقی برای ایجاد ساختارهای سلسله‌ای وجود دارد، ولی معمولاً این روش‌ها زمان‌بر و پرهزینه بوده و استفاده از آن‌ها محدود به تولید نمونه‌های آزمایشگاهی است [15-18] و [32-37]. به عنوان مثال می‌توان به تحقیقی اشاره کرد که در آن از یک روش لایه به لایه برای لایه‌نشانی ذرات اکسید سیلیسیم با قطرهای مختلف 0/5 میکرون و 35 نانومتر جهت تولید سطوح سلسله‌ای آبر آب‌گریز استفاده شده که پس از اصلاح سطح به کمک ماده دو دسیل تری کلرو سیلان<sup>5</sup> زاویه دینامیکی کمتر از 5 درجه به دست آمده است [35]. همچنین در نمونه‌ای دیگر با استفاده از نیروی جاذبه الکترواستاتیک یک سطح آبر آب‌گریز سلسله‌ای به کمک ذرات اکسید سیلیسیم و پلی استایرن تولید شده است. در این تحقیق نیز جهت ارائه خاصیت آبر آب‌گریزی از روش پوشش دهی فاز بخار تتراتوکسی سیلان<sup>6</sup> استفاده شده است [34]. برخی روش‌ها نیز با وجود سادگی قابلیت استفاده برای تولید سطح مقطع‌های بزرگ را ندارند [38-39]. برای مثال در یک تحقیق یک روش ساده برای تولید سطوح با قابلیت کنترل خاصیت ترشوندگی ارائه شده است [40]. در این تحقیق از لایه‌نشانی دورانی کامپوزیت اپوکسی/اکسید سیلیسیم و پلی استر/اکسید سیلیسیم استفاده شده است. روش‌های دیگری نیز وجود داشته که با وجود سادگی دارای ساختارهای سطحی سلسله‌ای نیستند [41].

همان‌طور که از توضیحات بالا بر می‌آید روش‌های مختلفی برای تولید سطوح آبر آب‌گریز وجود داشته که غالباً زمان‌بر و پرهزینه بوده و یا استحکام مناسبی برای تولید سطح مقطع‌های بزرگ، برای استفاده در کاهش پسای اصطکاکی، ندارند. یکی دیگر از مشکلات موجود در لایه‌نشانی ذرات آبر گریز اتصال این ذرات روی سطح می‌باشد. برای ایجاد اتصال بین ذرات و

سطح از مواد پلیمری مختلفی مثل اپوکسی<sup>7</sup>، پلی استر<sup>8</sup>، پلی تترافلورواتیلن<sup>9</sup> (با نام تجاری تفلون) و پلی دیمتیل سیلوکسان<sup>10</sup> استفاده می‌شود. برخی از این پلیمرها دارای انرژی سطحی پایین (تفلون - پلی دیمتیل سیلوکسان) و برخی دیگر دارای انرژی سطحی بیشتری (اپوکسی - پلی استر) می‌باشند. آبر گریز بودن و یا به عبارت دیگر انرژی سطحی پایین داشتن یکی از معیارهای مهم در انتخاب پلیمر می‌باشد. استحکام مکانیکی و شیمیایی پلیمر خاصیت دیگری است که باید مورد توجه قرار گیرد. هدف از این تحقیق، ارائه روشی ساده برای تولید سطح آبر آب‌گریز با استحکام مکانیکی و شیمیایی بالا بوده که قابلیت اجرا بر روی سطوح دارای سطح مقطع بالا را دارا باشد. بدین منظور پلیمر تفلون برای اتصال ذرات میکرومتری و نانومتری، پودر آلومینیوم برای ایجاد زبری میکرومتری و نانو ذرات آبر گریز اکسید سیلیسیم برای ایجاد نانو ساختارهای آبر گریز استفاده شده است. همچنین از فرایند افشاندن<sup>11</sup> برای لایه‌نشانی پلیمر و ذرات بر روی سطح استفاده شده است.

## 2- مواد و فرایندها

تفلون به صورت محلول در آمونیاک و با نام تجاری رَه فلون<sup>12</sup> خریداری شده است. زیر پایه مورد استفاده ورق‌های آلومینیوم با ضخامت 2 میلی‌متر بوده که در ابعاد 3 در 8 سانتی بریده شده‌اند. دو نوع پودر آلومینیوم با اندازه ذرات مختلف، یکی دارای ذرات غیر کرووی و اندازه ذرات حدود 60 میکرون، محصول شرکت ایم پی بایو مدیکال و دیگری دارای ساختار کرووی و اندازه ذرات حدود 20 میکرون، خریداری شده از شرکت دِگوسا، مورد استفاده قرار گرفته است. نانو اکسید سیلیسیم آبر گریز شده نیز با قطر 30 نانومتر از شرکت نانو رهپویان ماهان تهیه شده است.

یکی از فرایندهای آماده‌سازی زیرپایه استفاده از سندبلاست بوده که در آن سطح آلومینیوم با ذرات میکرومتری از جنس سیلیس با فشار  $4 \times 10^5$  پاسکال سند بلاست می‌شود. این کار برای افزایش استحکام لایه تفلون انجام می‌شود. سپس نمونه‌ها توسط سدیم هیدروکسید<sup>13</sup> 5 درصد چربی‌گیری شده و برای ایجاد لایه پلیمر، تفلون با فشار  $2 \times 10^5$  پاسکال روی نمونه‌ها افشاندن شده است. برای پخت پلیمر از کوره تشعشعی استفاده شده و زمان و دمای مناسب پخت تفلون با آزمایش به دست آمده است.

برای ایجاد ساختارهای میکرومتری از پودر آلومینیوم با قطرهای حدود 20 و 60 میکرون استفاده شده است. فرایند لایه‌نشانی به این صورت می‌باشد که ابتدا یک لایه تفلون با ضخامت مناسب روی سطح ایجاد شده و سپس پودر آلومینیوم به روش شناورسازی در جریان هوا روی سطح لایه‌نشانی شده است. سپس برای کاهش انرژی سطحی تفلون با فشار  $2 \times 10^5$  پاسکال (10، 6، 4 لایه تفلون) روی سطح شامل ذرات میکرومتری افشاندن شده و در کوره قرار داده شده است. همچنین در تعدادی از نمونه‌ها برای افزایش خاصیت آب‌گریزی یک لایه از نانو مواد آبر گریز اکسید سیلیسیم روی سطح ایجاد شده است. جهت ایجاد لایه اکسید سیلیسیم آبر گریز از فرایند افشاندن به کمک استون استفاده شده است. در این فرایند ابتدا مقدار 100 میلی گرم نانو سیلیکا در 10 سی سی استون قرار داده شده و به کمک التراسونیک به صورت یکنواخت توزیع شده و سوسپانسیون آماده شده بر روی سطح افشاندن

7- Epoxy  
8- Polyester  
9- Polytetrafluoroethylene (PTFE-Teflon)  
10- Polydimethylsiloxane (PDMS)  
11- Spray  
12- RAH FLON  
13- Sodium Hydroxide

1- Template Replication  
2- Lithography  
3- Plasma Treatment  
4- Chemical Vapor Deposition  
5- Dodecyltrichlorosilane  
6- Tetraethoxysilane

مدت زمان پخت به ترتیب معادل با 450 درجه سانتی‌گراد و 30 دقیقه می‌باشد.

شده است. کلیه نمونه‌های آماده‌شده در جدول 1 دسته‌بندی شده است.

### 3- نتایج

#### 3-1- سندبلاست

سندبلاست کردن باعث ایجاد زبری‌های میکرومتری سطحی با عمق کم شده که باعث افزایش استحکام لایه نهایی تفلون خواهد شد. بررسی‌ها نشان دهنده آن است که زبری‌های ایجاد شده به کمک سندبلاست دارای عمق کمی بوده که پس از لایه‌نشانی تفلون تقریباً با لایه پلیمر پوشیده شده و زبری‌های میکرومتری محدودی به وجود خواهد آمد. به عبارت دیگر استفاده از سندبلاست اثر کمی بر ایجاد ساختارهای میکرومتری داشته و بیشتر برای افزایش استحکام لایه مناسب است.

#### 3-2- دمای کوره و مدت زمان پخت

دما و مدت زمان پخت از عوامل مؤثر در پخت پلیمرها می‌باشند. با افزایش دمای پخت مدت زمان لازم برای پخت تفلون کاهش یافته و با کاهش دمای پخت زمان لازم برای آن افزایش می‌یابد. از طرف دیگر ساختار سطح و همچنین خاصیت آب‌گریزی نمونه‌های دارای لایه تفلون وابسته به شرایط پخت تغییر می‌کند. بنابراین شرایط مربوط به پخت تفلون یکی از پارامترهای مهم بوده که باید از طریق آزمایش و بر اساس معیار آب‌گریزی به دست آید. با توجه به آزمایش‌های انجام شده، فرایند پخت تفلون در دمای زیر 350 درجه سانتی‌گراد به طور کامل انجام نشده و همچنین در دمای بالای 550 درجه سانتی‌گراد کلیه پلیمر موجود در سطح از بین می‌رود. با توجه به آزمایش‌های انجام شده شرایط مناسب پخت تفلون برای ایجاد خاصیت آب‌گریزی معادل با دمای 450 درجه سانتی‌گراد و مدت زمان 30 دقیقه به دست آمده است. بنابراین در تمام نمونه‌های گزارش شده در جدول 1 دما و

#### 3-3- زاویه تماسی استاتیکی و زاویه دینامیکی

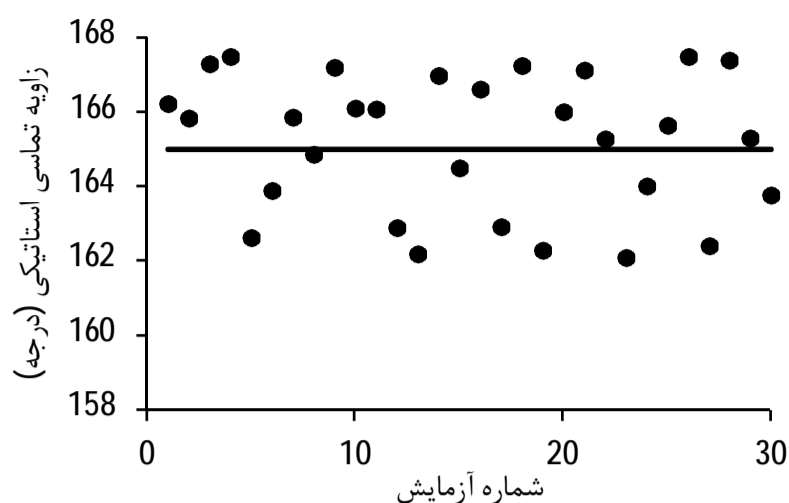
برای اندازه‌گیری زاویه تماسی استاتیکی از دوربین نیکون دی 300<sup>1</sup> استفاده شده است. همچنین حجم قطره قرار داده شده روی سطح برابر با 4 میکرولیتر می‌باشد. برای اندازه‌گیری زاویه تماسی استاتیکی ابتدا قطره آب دیونیزه شده بر روی سطح قرار گرفته و سپس نحوه قرارگیری قطره بر روی سطح توسط دوربین نیکون دی 300 عکس‌برداری شده است (شکل 7). سپس عکس‌های گرفته شده در نرم‌افزار سالیدورک پردازش شده و پس از مشخص کردن خط مماس روی قطره آب و خط افق زاویه تماسی استاتیکی تعیین شده است. برای اندازه‌گیری زاویه تماسی استاتیکی 10 نقطه مختلف از هر نمونه انتخاب شده و هر آزمایش نیز 3 بار تکرار شده است (جدول 2). به عبارت دیگر زاویه تماسی استاتیکی گزارش شده در جدول 2 متوسط زاویه تماسی اندازه‌گیری شده حاصل از 30 آزمایش (3 نمونه و 10 نقطه از هر نمونه) می‌باشد. برای اثبات تکرارپذیری، نتایج مربوط به 30 اندازه‌گیری مختلف زاویه تماسی نمونه شماره 9 در شکل 1 نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 1 مشخص است زاویه تماسی کلیه اندازه‌گیری‌های انجام شده دارای انحراف معیار حدود 1/9 درجه و متوسط 165 درجه می‌باشد. انحراف معیار تمام اندازه‌گیری‌ها نیز در جدول 2 آمده است. لازم به ذکر است که انحراف معیار موجود در اندازه‌گیری‌ها می‌تواند ناشی از غیر همگن بودن فرایند افشاندن و همچنین خطای انسانی ایجاد شده در استخراج نتایج می‌باشد.

زاویه دینامیکی یا زاویه لغزش نمونه‌ها نیز در جدول 2 قابل مشاهده است. برای اندازه‌گیری زاویه دینامیکی از دستگاه ساخته شده در آزمایشگاه هیدرودینامیک کاربردی دانشگاه علم و صنعت ایران استفاده شده است. در این دستگاه یک صفحه افقی از جنس پلکسی گلاس (محل قرارگیری نمونه) وجود داشته که به یک موتور پله‌ای متصل است. حرکت موتور پله‌ای توسط یک درایور و میکروکنترلر کنترل شده و زاویه صفحه پلکسی به طور لحظه‌ای بر روی نمایشگر تعبیه شده بر روی دستگاه نشان داده می‌شود. ابتدا قطره آب دیونیزه بر روی نمونه قرار داده می‌شود. سپس با فرمان دادن میکروکنترلر به موتور پله‌ای صفحه پلکسی به همراه نمونه به صورت دورانی و با سرعت بسیار کم دوران کرده و زمانی که قطره از سطح جدا می‌شود، دستگاه متوقف شده و زاویه نشان داده شده بر روی صفحه نمایش ذخیره می‌شود. حرکت موتور پله‌ای به نحوی است که اندازه‌گیری زاویه با دقت 0/05 درجه را ممکن می‌کند. زاویه دینامیکی گزارش شده برای هر نمونه نیز حاصل 30 بار اندازه‌گیری بوده، به نحوی که در هر نمونه 10 نقطه مورد آزمایش قرار گرفته و هر نمونه نیز 3 بار تولید شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج موجود در جدول 2 به صورت منحنی در شکل 2 و شکل 3 نمایش داده شده است. انحراف معیار مربوط به اندازه‌گیری‌ها نیز در شکل 2 و شکل 3 مشخص شده است.

مشاهدات نشان دهنده آن است که با افزایش تعداد لایه‌های افشاندن شده شده از 4 لایه به 10 لایه آب‌گریزی سطح کاهش یافته و با کاهش تعداد لایه‌ها نیز سطح آب‌گریز مناسبی به دست نمی‌آید. نمونه 18 یک سطح آلومینیومی بوده که پس از آماده سازی سطح، روی آن تفلون لایه‌نشانی شده

جدول 1 مشخصات نمونه‌های مورد بررسی

شماره نمونه	سند بلاست	زبری با پودر آلومینیوم با قطر حدود 20 میکرون	زبری با پودر آلومینیوم با قطر حدود 60 میکرون	تعداد لایه‌های تفلون	اکسید سیلیسیم
1	دارد	دارد	—	4	—
2	دارد	—	دارد	4	—
3	دارد	دارد	—	6	—
4	دارد	—	دارد	6	—
5	دارد	دارد	—	8	—
6	دارد	—	دارد	8	—
7	دارد	دارد	—	10	—
8	دارد	—	دارد	10	—
9	دارد	دارد	—	4	دارد
10	دارد	—	دارد	4	دارد
11	دارد	دارد	—	6	دارد
12	دارد	—	دارد	6	دارد
13	دارد	دارد	—	8	دارد
14	دارد	—	دارد	8	دارد
15	دارد	دارد	—	10	دارد
16	دارد	—	دارد	10	دارد
17	دارد	—	—	4	—
18	—	—	—	4	—

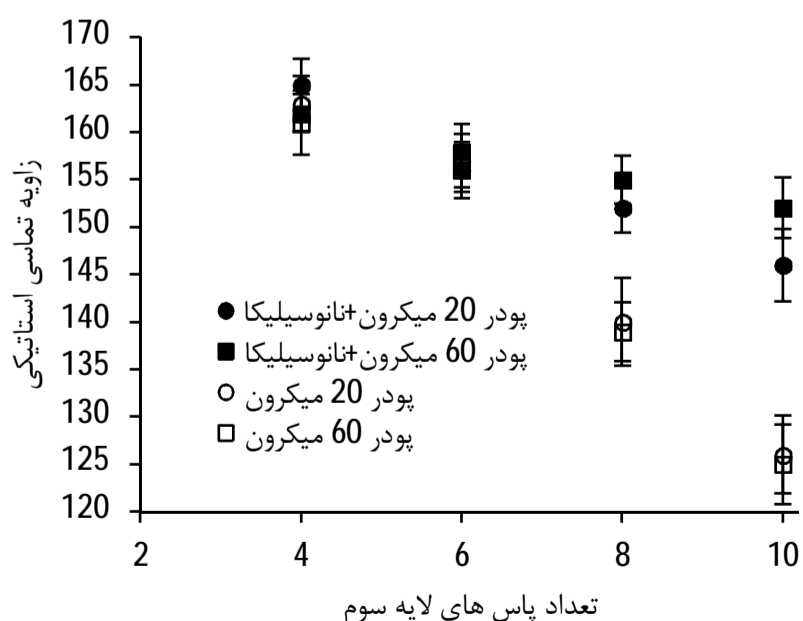


شکل 1 بررسی تکرارپذیری برای نمونه شماره 9

با کاهش تعداد لایه‌ها از 10 لایه به 6 لایه آب‌گریزی سطح تغییر کرده به طوری که زاویه تماسی استاتیکی از 125 درجه به 156 درجه افزایش یافته و زاویه دینامیکی سطح نیز به حدود 15 درجه رسیده است (شکل‌های 2 و 3). علت کاهش زاویه دینامیکی ایجاد ساختارهای میکرونی روی سطح بوده که باعث لغزش بهتر قطره آب روی سطح شده است (شکل‌های 4 و 5).

همان‌طور که در شکل 2 قابل مشاهده است افزایش تعداد لایه تفلون از 4 لایه به 10 لایه باعث کاهش زاویه تماسی استاتیکی از حدود 160 درجه به حدود 125 درجه شده است. همچنین با افزودن نانو اکسید سیلیسیم آب‌گریز در تعداد لایه‌های کم (برای مثال 4 لایه) تغییر زیادی در زاویه استاتیکی مشاهده نشده و افزودن اکسید سیلیسیم آب‌گریز بیشترین اثر را در تعداد لایه‌های زیاد تفلون دارد. این بدان علت است که در تعداد لایه‌های زیاد (برای مثال 10 لایه) به علت صاف شدن سطح خاصیت آب‌گریزی به شدت کاهش یافته و افزودن اکسید سیلیسیم آب‌گریز باعث بهبود آن خواهد شد. در حالی که در تعداد لایه‌های کم با توجه به خواص آب‌گریزی مناسب سطح، لایه‌نشانی اکسید سیلیسیم آب‌گریز تغییر چندانی ایجاد نخواهد کرد.

مشاهدات نشان می‌دهد که اندازه ذرات آلومینیوم 20 یا 60 میکرونی تفاوت چشمگیری در آب‌گریزی سطح ایجاد نخواهد کرد. برای مثال در نمونه‌های شماره 1 و 2 زاویه تماسی استاتیکی پودرهای آلومینیوم 60 میکرونی به‌طور میانگین 161 و پودرهای آلومینیوم 20 میکرونی به‌طور میانگین 163 درجه می‌باشد.



شکل 2 تغییرات زاویه تماسی استاتیکی بر حسب تعداد پاس‌های لایه سوم برای سطوح با ساختار سطح مختلف

است. بنابراین با توجه به صاف بودن سطح و عدم وجود زبری در مقیاس میکرو، زاویه تماسی سطح صاف تفلون در دمای پخت 450 درجه سانتی‌گراد و مدت زمان 30 دقیقه، حدوداً 120 درجه می‌باشد (جدول 2). بنابراین فقط با استفاده از تفلون و بدون وجود ساختارهای میکرومتری یک سطح آبر آب‌گریز به دست نخواهد آمد. البته با توجه به زاویه تماسی بالای آن می‌توان گفت برای ایجاد یک سطح آبر آب‌گریز ماده مناسبی می‌باشد.

همان‌طور که پیشتر بدان اشاره شد، سندبلاست کردن سطح می‌تواند تا حدی زبری‌هایی ایجاد کرده که باعث بهبود آب‌گریزی سطح شود. نتایج نشان دهنده آن است که به کمک سندبلاست زاویه تماسی استاتیکی از 120 درجه (نمونه 18) به 147 درجه (نمونه 17) افزایش یافته و همچنین زاویه تماسی دینامیکی از حالت چسبیده به حدود 20 درجه کاهش یافته است. زبری‌های ایجاد شده توسط سندبلاست کم عمق بوده و برای رسیدن به سطح آبر آب‌گریز، یعنی زاویه تماسی استاتیکی بالای 150 درجه و زاویه تماسی دینامیکی پایین‌تر از 10 درجه مناسب نمی‌باشد.

به علت ناکارآمد بودن سندبلاست در تولید زبری‌های میکرومتری مناسب از پودرهای آلومینیوم با اندازه حدود 20 و 60 میکرون استفاده شده است. در این حالت ضخامت لایه دوم تفلون که جهت کاهش انرژی سطحی روی پودر آلومینیوم قرار می‌گیرد، پارامتر مهمی در کنترل زبری سطح می‌باشد.

مشاهدات حاصل از آزمایش نشان می‌دهد که افزایش ضخامت لایه دوم تفلون هر چند استحکام سطح را در مقابل جدا شدن افزایش می‌دهد، ولی زبری‌های ایجاد شده با پودرهای آلومینیوم را پر کرده و این باعث کاهش زاویه استاتیکی و افزایش دینامیکی خواهد شد. برای مثال وقتی تعداد 10 لایه تفلون روی سطح شامل ذرات میکرومتری افشانده می‌شود، زاویه تماسی استاتیکی و دینامیکی سطح در حدود سطح صافی است که روی آن تفلون لایه‌نشانی شده است. مقایسه زاویه تماسی استاتیکی و زاویه دینامیکی نمونه 7 و 8 و نمونه 18 نشان دهنده این موضوع می‌باشد.

جدول 2 زاویه تماسی استاتیکی و زاویه دینامیکی

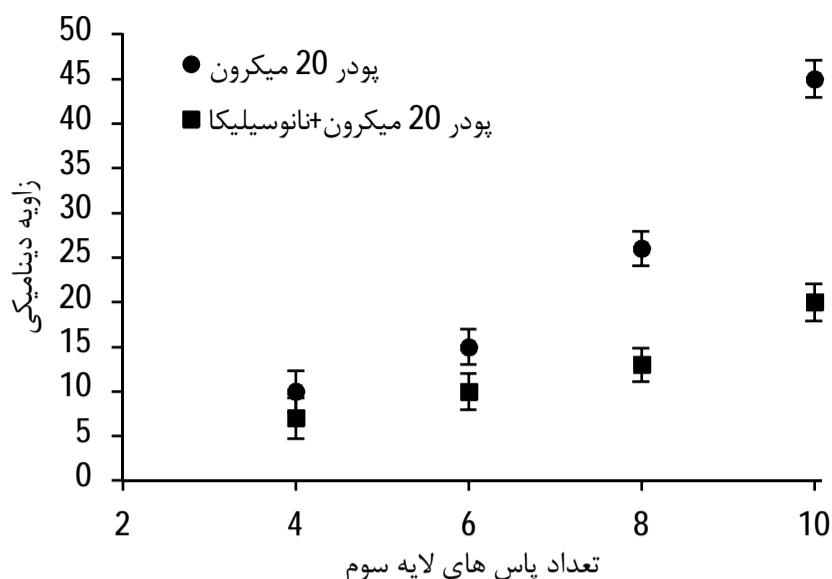
شماره نمونه	زاویه تماسی استاتیکی (درجه)	زاویه دینامیکی (درجه)
1	163 ± 2,9	10 ± 2,1
2	161 ± 3,4	11 ± 2,2
3	157 ± 2,8	15 ± 1,9
4	156 ± 3	16 ± 2
5	140 ± 4,6	26 ± 2,3
6	139 ± 3,1	29 ± 1,8
7	126 ± 4,1	45 ± 1,9
8	125 ± 4,2	47 ± 2,2
9	165 ± 1,9	7 ± 2,3
10	162 ± 2	8 ± 1,8
11	156 ± 2,3	10 ± 2
12	158 ± 2,9	11 ± 2,3
13	152 ± 2,6	13 ± 1,9
14	155 ± 2,5	15 ± 1,8
15	146 ± 3,8	20 ± 2,1
16	152 ± 3,2	23 ± 2
17	147 ± 2,8	20 ± 2
18	120 ± 4,6	50 ± 2

اندازه‌های مورد نظر می‌باشد.

تصویری از قرارگیری قطره بر سطح آبر آب‌گریز (نمونه 2) و سطح آبر گریز (نمونه 18) در شکل 7 آمده است. همان‌طور که در شکل 7 مشخص است قطره بر روی نمونه 2 تقریباً به شکل کروی تعادل یافته است (شکل 7- الف)، در حالی که بر روی نمونه 18 (شکل 7- ب) چسبیده است.

#### 4- نتیجه‌گیری

یکی از روش‌های تولید سطوح آبر آب‌گریز، ایجاد سطحی دارای زبری‌های سلسله‌ای با استفاده از ساختارهای میکرومتری و نانومتری بوده که با یک ماده دارای انرژی سطحی پایین پوشش داده شده است. در این تحقیق روشی ساده، کم هزینه و قابل استفاده برای تولید سطوح آبر آب‌گریز در مقیاس‌های بزرگ، با استفاده از لایه‌نشانی ذرات روی سطح، ارائه شده است. در این



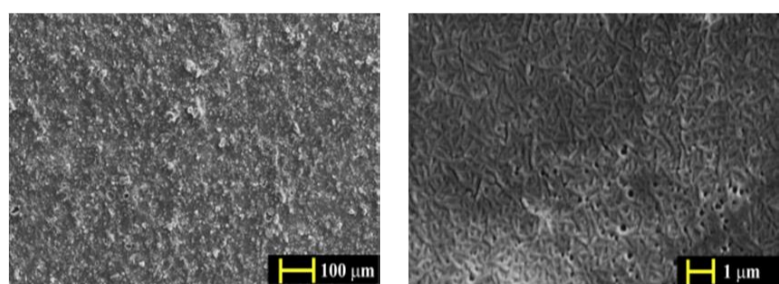
شکل 3 زاویه تماسی دینامیکی

#### 3-4 ساختار سطح

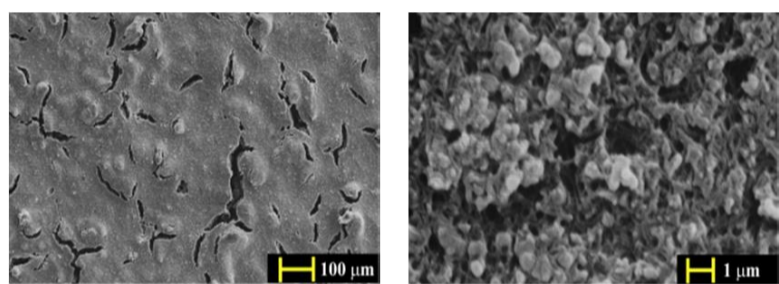
مطالعات انجام شده بر روی برگ گیاهان آبر آب‌گریز نشان داده است که سطح دارای ساختارهای میکرومتری تقریباً در حدود 3 تا 13 میکرون و ساختارهای نانومتری حدود 70 تا 780 نانومتری می‌باشد [42]. بر این اساس محققان به دنبال تولید سطوحی بوده که دارای ساختارهای میکرومتری در مقیاس‌های برگ‌های آب‌گریز باشند. بنابراین برای بررسی دقیق سطح از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>1</sup> استفاده شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به 4 سطح مختلف در شکل 4 نشان داده شده است. مقایسه تصاویر سطوح با بزرگنمایی 9000 برابر نشان دهنده عدم وجود ساختارهای میکرومتری مناسب برای سطح صاف (شکل 4- الف) بوده که زاویه استاتیکی کم و زاویه دینامیکی زیادی که در جدول 2 مشاهده شد را توجیه می‌کند.

مقایسه شکل‌های 4- الف و ب نشان می‌دهد، استفاده از پودر میکرونی آلومینیوم چگونه باعث ایجاد تخلخل در سطح می‌شود. همچنین وجود پودرهای میکرونی باعث ناهمواری سطح زیر تفلون شده و با ایجاد تنش حرارتی غیر یکنواخت در طی فرایند پخت، شکاف‌های میکرونی در سطح ایجاد می‌کند. همان‌طور که در شکل 4 مشخص است در نمونه دارای پودر آلومینیوم (نمونه 2) پس از پخت، ساختارهای میکرونی در دو مقیاس حدود 70 میکرون و 1 میکرون شکل گرفته است (شکل 4- ب). این در حالی است که سطح بدون پودر آلومینیوم (نمونه 18) پس از پخت تقریباً صاف بوده و دارای زبری‌هایی در مقیاس‌های ذکر شده نمی‌باشد (شکل 4- الف).

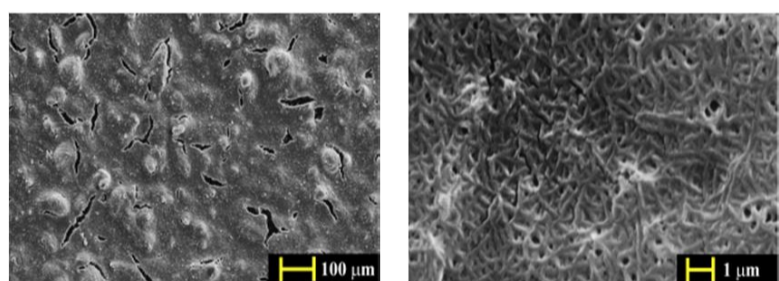
برای بهتر مشخص شدن تپه‌های میکرونی شکل گرفته بر روی سطح، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح 2 با زاویه 45 درجه نیز در شکل 4 نشان داده شده است. در این تصویر نمونه‌ای از ترک‌ها و تپه‌هایی که در طی فرایند پخت تولید شده‌اند، مشخص می‌باشد. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که مرتبه این زبری‌ها حدود 70 میکرومتر است. همچنین برای بررسی علت بالا بودن زاویه دینامیکی نمونه 18، سطح آن با بزرگ‌نمایی 10000 برابر و زاویه دید 45 درجه در شکل 6 نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 6 مشخص است، در این مقیاس ساختارهای میکرومتری مناسبی، در ابعاد و اندازه‌های مربوط به ساختارهای میکرومتری برگ گیاهان آبر آب‌گریز مشاهده نمی‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بالا بودن زاویه دینامیکی نمونه 18 به علت عدم وجود ساختارهای میکرونی با



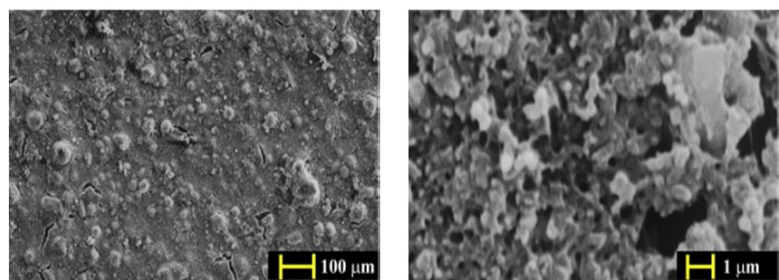
الف) نمونه 18 (سطح صاف - 4 لایه تفلون)



ب) نمونه 2 (پودر 60 میکرون - 4 لایه تفلون - بدون اکسید سیلیسیم)

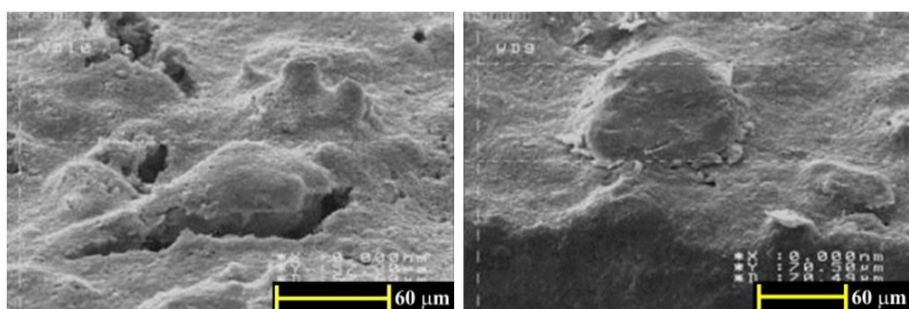


ج) نمونه 8 (پودر 60 میکرون - 10 لایه تفلون - بدون اکسید سیلیسیم)



د) نمونه 10 (پودر 60 میکرون - 4 لایه تفلون - با اکسید سیلیسیم)

شکل 4 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی 100 برابر (ستون سمت چپ) و 9000 برابر (ستون سمت راست)

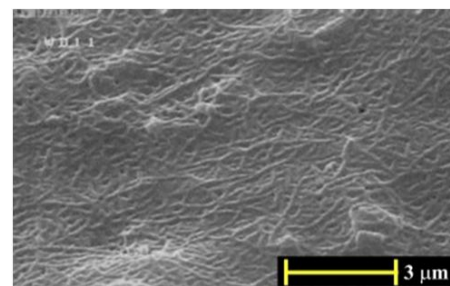


شکل 5 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح نمونه 2 با زاویه 45 درجه و با بزرگ‌نمایی 10000 برابر - نمونه‌ای از ترک‌ها و تپه‌ها بر روی سطح

1- Scanning Electronic Microscope (SEM)

## 5- مراجع

- [1] X. Gao, L. Jiang, Water-repellent legs of water striders, *Nature*, Vol. 432, No. 7013, pp. 36-36, 2004.
- [2] H. Y. Erbil, A. L. Demirel, Y. Avci, O. Mert, Transformation of a simple plastic into a superhydrophobic surface, *Science*, Vol. 299, No. 5611, pp. 1377-1380, 2003.
- [3] C. Neinhuis, W. Barthlott, Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces, *Annals of Botany*, Vol. 79, No. 6, pp. 667-677, 1997.
- [4] L. Feng, S. Li, Y. Li, H. Li, L. Zhang, J. Zhai, Y. Song, B. Liu, L. Jiang, D. Zhu, Super-hydrophobic surfaces: from natural to artificial, *Advanced materials*, Vol. 14, No. 24, pp. 1857-1860, 2002.
- [5] A. Lafuma, D. Quéré, Superhydrophobic states, *Nature materials*, Vol. 2, No. 7, pp. 457-460, 2003.
- [6] R. Blossey, Self-cleaning surfaces—virtual realities, *Nature materials*, Vol. 2, No. 5, pp. 301-306, 2003.
- [7] J. Genzer, K. Efimenko, Recent developments in superhydrophobic surfaces and their relevance to marine fouling: a review, *Biofouling*, Vol. 22, No. 5, pp. 339-360, 2006.
- [8] B. Balu, A. D. Berry, D. W. Hess, V. Breedveld, Patterning of superhydrophobic paper to control the mobility of micro-liter drops for two-dimensional lab-on-paper applications, *Lab on a Chip*, Vol. 9, No. 21, pp. 3066-3075, 2009.
- [9] T. Yao, C. Wang, Q. Lin, X. Li, X. Chen, J. Wu, J. Zhang, K. Yu, B. Yang, Fabrication of flexible superhydrophobic films by lift-up soft-lithography and decoration with Ag nanoparticles, *Nanotechnology*, Vol. 20, No. 6, pp. 1-6, 2009.
- [10] B. Bhushan, Y. C. Jung, Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction, *Progress in Materials Science*, Vol. 56, No. 1, pp. 1-108, 2001.
- [11] M. Nosonovsky, B. Bhushan, Biomimetic superhydrophobic surfaces: multiscale approach, *Nano Letters*, Vol. 7, No. 9, pp. 2633-2637, 2007.
- [12] X. Li, D. Reinhoudt, M. Crego-Calama, What do we need for a superhydrophobic surface? review on the recent progress in the preparation of superhydrophobic surface, *Chemical Society Reviews*, Vol. 36, No. 8, pp. 1350-1368, 2007.
- [13] W. Lee, M. Jin, W. Yoo, J. Lee, Nanostructuring of a polymeric substrate with well-defined nanometer-scale topography and tailored surface wettability, *Langmuir*, Vol. 20, No. 18, pp. 7665-7669, 2004.
- [14] Y. Zhao, M. Li, Q. Lu, Z. Shi, Superhydrophobic polyimide films with a hierarchical topography: combined replica molding and layer-by-layer assembly, *Langmuir*, Vol. 24, No. 21, pp. 12651-12657, 2008.
- [15] B. Bhushan, Y. C. Jung, Wetting study of patterned surfaces for superhydrophobicity, *Ultramicroscopy*, Vol. 107, No. 10, pp. 1033-1041, 2007.
- [16] E. Martines, K. Seunarine, H. Morgan, N. Gadegaard, C. D. Wilkinson, M. O. Riehle, Superhydrophobicity and superhydrophilicity of regular nanopatterns, *Nano Letters*, Vol. 5, No. 10, pp. 2097-2103, 2005.
- [17] R. Fürstner, W. Barthlott, C. Neinhuis, P. Walzel, Wetting and self-cleaning properties of artificial superhydrophobic surfaces, *Langmuir*, Vol. 21, No. 3, pp. 956-961, 2005.
- [18] C. Martín, G. Rius, X. Borrís, F. Pérez-Murano, Nanolithography on thin layers of PMMA using atomic force microscopy, *Nanotechnology*, Vol. 16, No. 8, pp. 1016, 2005.
- [19] M. Chen, T. Hsu, Y. Chuang, F. Tseng, Dual hierarchical biomimetic superhydrophobic surface with three energy states, *Applied Physics Letters*, Vol. 95, No. 2, 2009.
- [20] X. Huang, J. H. Lee, J. W. Yoon, Y. Choi, A one-step route to a perfectly ordered wafer-scale microbowl array for size-dependent superhydrophobicity, *Small*, Vol. 4, No. 2, pp. 211-216, 2008.
- [21] B. Cortese, S. D'Amone, M. Manca, I. Viola, R. Cingolani, G. Gigli, Superhydrophobicity due to the hierarchical scale roughness of PDMS surfaces, *Langmuir*, Vol. 24, No. 6, pp. 2712-2718, 2008.
- [22] L. Li, V. Breedveld, D. W. Hess, Creation of superhydrophobic stainless steel surfaces by acid treatments and hydrophobic film deposition, *Applied materials & interfaces*, Vol. 4, No. 9, pp. 4549-4556, 2012.
- [23] H. Jansen, M. de Boer, R. Legtenberg, M. Elwenspoek, The black silicon method: a universal method for determining the parameter setting of a fluorine-based reactive ion etcher in deep silicon trench etching with profile control, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 115, 1995.
- [24] L. Zhai, F. C. Cebeci, R. E. Cohen, M. F. Rubner, Stable superhydrophobic coatings from polyelectrolyte multilayers, *Nano Letters*, Vol. 4, No. 7, pp. 1349-1353, 2004.
- [25] M. Ma, Y. Mao, M. Gupta, K. K. Gleason, G. C. Rutledge, Superhydrophobic fabrics produced by electrospinning and chemical vapor deposition, *Macromolecules*, Vol. 38, No. 23, pp. 9742-9748, 2005.
- [26] Y. Xiu, L. Zhu, D. W. Hess, C. P. Wong CP, Hierarchical silicon etched structures for controlled hydrophobicity/superhydrophobicity, *Nano Letters*, Vol. 7, No. 11, pp. 3388-3393, 2007.
- [27] L. Huang, S. P. Lau, H. Y. Yang, E. S. P. Leong, S. F. Yu, S. Praver, Stable superhydrophobic surface via carbon nanotubes coated with a ZnO thin film, *The Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 109, No. 16, pp. 7746-7748,



شکل 6 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح نمونه 18 با زاویه 45 درجه و با بزرگ نمایی 10000 برابر - عدم وجود ترک و تپه‌های میکرونی



الف) نمونه 2 با زاویه تماسی حدود 161 درجه



ب) نمونه 18 با زاویه تماسی استاتیکی حدود 120 درجه

شکل 7 زاویه تماسی استاتیکی

تحقیق پلیمر تفلون به علت انرژی سطحی کم و استحکام مکانیکی و شیمیایی مناسب، به کمک فرایند افشاندن روی سطح لایه‌نشانی شده است. همچنین از لایه‌نشانی ذرات میکرومتری آلومینیوم به کمک شناورسازی در جریان هوا، بر روی لایه تفلون، برای تولید ساختارهای میکرونی استفاده شده است. سپس برای کاهش انرژی سطحی مجدداً تفلون بر روی پودرهای میکرومتری افشانده شده است. در نهایت برای ایجاد ساختارهای نانومتری، اکسید سیلیسیم آبرگریز روی سطح لایه‌نشانی شده و اثرات ضخامت لایه تفلون، اندازه ذرات میکرومتری و به‌کارگیری نانو ذرات آبرگریز بر روی خواص سطح مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

- بر اساس آزمایش‌های انجام شده بهترین شرایط پخت تفلون، 450 درجه سانتی‌گراد و مدت زمان 30 دقیقه به دست آمده است.
- تفلون به تنهایی نمی‌تواند یک سطح آبر آب‌گریز تولید کند، بلکه باید سطح شامل ساختارهای میکرومتری باشد.
- سند بلاست کردن زیر پایه باعث بهتر چسبیدن تفلون روی زیر پایه شده و بعلاوه استحکام آن را در مقابل جدا شدن در جریان آب، افزایش می‌دهد.
- استفاده از پودرهای آلومینیوم میکرومتری علاوه بر ایجاد تپه‌های میکرومتری باعث شکل‌گیری ترک‌های میکرومتری روی سطح می‌شود.
- ترک‌های میکرومتری، به علت ایجاد تخلخل روی سطح، آبرگریزی سطح را افزایش می‌دهند.
- با افزایش ضخامت پوشش تفلون بر روی پودرهای آلومینیوم، علاوه بر اینکه ارتفاع زبری‌ها کمتر می‌شود، ترک‌های میکرومتری از بین رفته و باعث کاهش زاویه استاتیکی و افزایش زاویه دینامیکی می‌شود.
- در شرایط مناسب نبودن خواص آبرگریزی سطح، لایه‌نشانی اکسید سیلیسیم آبرگریز باعث بهبود خواص آبرگریزی شده در حالی که برای سطوح آبر آب‌گریز استفاده از آن تاثیر چندانی نداشته است.

- 12687-12692, 2007.
- [36] Y. Li, X. J. Huang, S. H. Heo, C. C. Li, Y. K. Choi, W. P. Cai, S. O. Cho, Superhydrophobic bionic surfaces with hierarchical microsphere/SWCNT composite arrays, *Langmuir*, Vol. 23, No. 4, pp. 2169-2174, 2007.
- [37] Y. Zhao, Y. Tang, X. Wang, T. Lin, Superhydrophobic cotton fabric fabricated by electrostatic assembly of silica nanoparticles and its remarkable buoyancy, *Applied Surface Science*, Vol. 256, No. 22, pp. 6736-6742, 2010.
- [38] E. Bormashenko, T. Stein, G. Whyman, Y. Bormashenko, R. Pogreb, Wetting properties of the multiscaled nanostructured polymer and metallic superhydrophobic surfaces, *Langmuir*, Vol. 22, No. 24, pp. 9982-9985, 2006.
- [39] H. Wang, J. Fang, T. Cheng, J. Ding, L. Qu, L. Dai, X. Wang, T. Lin, One-step coating of fluoro-containing silica nanoparticles for universal generation of surface superhydrophobicity, *Chemical communications*, Vol. 7, pp. 877-879, 2008.
- [40] I. Yilgor, S. Bilgin, M. Isik, E. Yilgor, Tunable wetting of polymer surfaces, *Langmuir*, Vol. 28, No. 41, pp. 14808-14814, 2012.
- [41] H. Ogihara, J. Xie, J. Okagaki, T. Saji, Simple method for preparing superhydrophobic paper: spray-deposited hydrophobic silica nanoparticle coatings exhibit high water-repellency and transparency, *Langmuir*, Vol. 28, No. 10, pp. 4605-4608, 2012.
- [42] B. Bhushan, Y. C. Jung, Micro-and nanoscale characterization of hydrophobic and hydrophilic leaf surfaces, *Nanotechnology*, Vol. 17, No. 11, pp. 2758, 2006.
- [28] J. Pan, X. Song, J. Zhang, H. Shen, Q. Xiong, Switchable wettability in SnO<sub>2</sub> nanowires and SnO<sub>2</sub>@ SnO<sub>2</sub> heterostructures, *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 115, No. 45, pp. 22225-22231, 2011.
- [29] C. R. Crick, I. P. Parkin, CVD of copper and copper oxide thin films via the in situ reduction of copper (ii) nitrate—a route to conformal superhydrophobic coatings, *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 21, No. 38, pp. 14712-14716, 2011.
- [30] L. Feng, S. Li, Y. Li, H. Li, L. Zhang, J. Zhai, Y. Song, Y. B. Liu, L. Jiang, D. Zhu, Super-hydrophobic surfaces: from natural to artificial, *Advanced materials*, Vol. 14, No. 24, pp. 1857-1860, 2002.
- [31] X. Zhang, F. Shi, J. Niu, Y. Jiang, Z. Wang, Superhydrophobic surfaces: from structural control to functional application, *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 18, No 6, pp. 621-633, 2008.
- [32] C. Sun, L. Q. Ge, Z. Z. Gu, Fabrication of super-hydrophobic film with dual-size roughness by silica sphere assembly, *Thin Solid Films*, Vol. 515, No. 11, pp.4686-4690, 2007.
- [33] R. G. Karunakaran, C. H. Lu, Z. Zhang, S. Yang, Highly transparent superhydrophobic surfaces from the coassembly of nanoparticles ( $\leq 100$  nm), *Langmuir*, Vol. 27, No 8, pp. 4594-4602, 2011.
- [34] X. Deng, L. Mammen L, Y. Zhao, P. Lellig P, K. Müllen, C. Li, H. J. Butt, D. Vollmer, Transparent, thermally stable and mechanically robust superhydrophobic surfaces made from porous silica capsules, *Advanced Materials*, Vol. 23, No. 26, pp. 2962-2965, 2011.
- [35] H. J. Tsai, Y. L. Lee, Facile method to fabricate raspberry-like particulate films for superhydrophobic surfaces, *Langmuir*, Vol. 23, No. 25, pp. 2005.