

## پوشش‌های ضدیخ: مروری بر فناوری‌های روز و روش‌های ارزیابی

- سپیده اکبری پور تفرشی‌نژاد<sup>۱</sup>، محمود شریعتمدار<sup>۱</sup>، ایمان علی بخشی<sup>۲</sup>، بهرام رمضانزاده<sup>۳</sup>، مجتبی کسانیان<sup>۴</sup>، سمیرا شقاقی<sup>۵</sup>، الهه شهسواری<sup>۵</sup>، محمد مهدویان<sup>۳\*</sup>
- ۱- دانشجو، گروه پژوهشی پوشش‌های سطح و خوردگی، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵۴-۶۵۴.
- ۲- شرکت اطلس پوشش محافظ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۶۸۸۱۵-۸۴۱.
- ۳- دانشیار، گروه پژوهشی پوشش‌های سطح و خوردگی، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵۴-۶۵۴.
- ۴- شرکت صبا شیمی آریا، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۹۱۳۸۷۷-۷۹۹.
- ۵- شرکت مینا ژنراتور (پارس)، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۹۳۹۵-۶۴۴۸.

تاریخ دریافت: ۹۹/۱۱/۰۱ تاریخ بازبینی نهایی: ۰۰/۰۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۰۰/۰۲/۱۲ در دسترس بصورت الکترونیک: ۰۰/۰۳/۱۱

### چکیده

برای پاک‌سازی یخ از سطح، روش‌های سنتی (فعال) و روش‌های جدید (غیرفعال) وجود دارد. روش‌های غیرفعال مانند استفاده از پوشش‌های ضدیخ نیاز به انرژی خارجی ندارند. پوشش‌های ضدیخ کاربردهای متنوع در صنایع مختلف از جمله صنایع حمل و نقل، هوایی، برق و نظامی دارند. این پوشش‌ها با خاصیت دفع آب میزان آب تجمع یافته بر روی سطح را کاهش می‌دهند. از طرفی خاصیت کشسان این پوشش‌ها موجب می‌شود آب منجمد شده بر روی آن در اثر نیروی مکانیکی ضعیف جدا شود. این موضوع سبب پیدایش سطوح آسان تمیز شونده می‌شود. در این مقاله، ابتدا پیش‌نیازهایی که برای دستیابی به پوشش ضدیخ مورد توجه قرار می‌گیرند ارائه می‌شود. سپس به بررسی روش‌های فعال و غیرفعال پرداخته شده و تئورهای موجود به همراه مثال‌هایی از هر روش نمایش داده می‌شود. در انتها نیز آزمون‌های ارزیابی مختلفی که برای پوشش‌های ضدیخ/یخ‌گریز وجود دارد مرور شده است.

### واژه‌های کلیدی

پوشش‌های ضدیخ، پوشش‌های یخ‌گریز، روش‌های ارزیابی.

### چکیده تصویری





## Anti-ice Coatings: A Review of Current Technologies and Evaluation Procedure

Sepideh Akbaripoor Tafreshi Nejad<sup>1</sup>, Mahmoud Shariatmadar<sup>1</sup>, Eiman Alibakhshi<sup>2</sup>, Bahram Ramezanzadeh<sup>1</sup>, Mojtaba Kasaian<sup>3</sup>, Samira Shaghghi<sup>4</sup>, Elaheh Shahsavari<sup>4</sup>, Mohammad Mahdavian<sup>\*1</sup>

1- Surface Coatings and Corrosion Department, Institute for Color Science and Technology, P. O. BOX: 167654-654, Tehran, Iran.

2- Atlas Protecting Coating, P. O. BOX: 1668815-841, Tehran, Iran.

3- Saba Shimi Arya, Tehran, Iran, P. O. BOX: 1913877-799, Tehran, Iran.

4- MAPNA Generator and Wind Turbin Engineering and Manufacturing Co.(PARS), P. O. BOX: 19395-6448, Tehran, Iran.

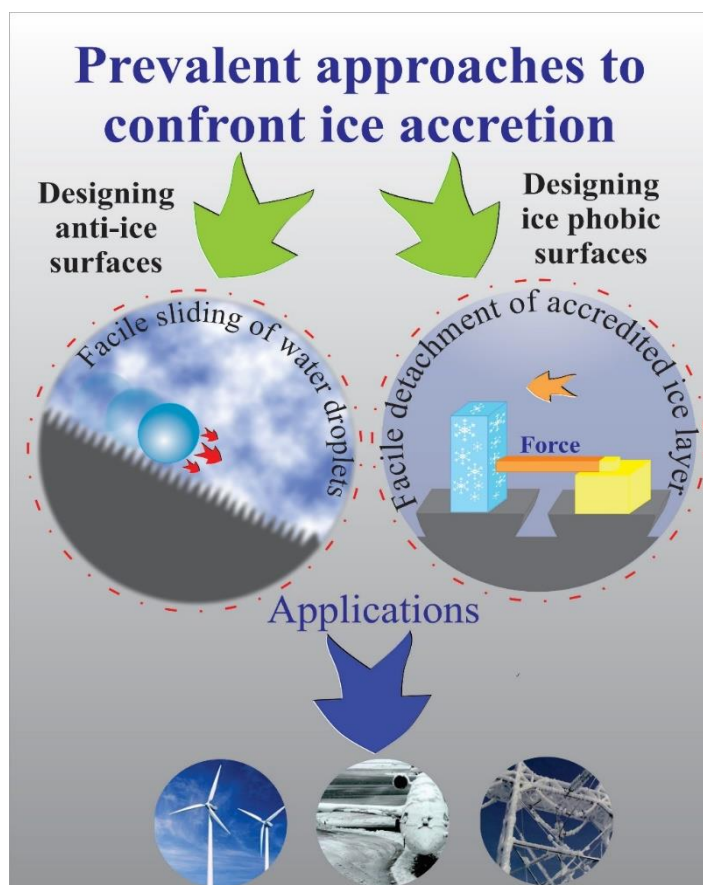
### Abstract

Conventional (active) and modern (passive) methods are available for ice removal from the surface. Passive approaches such as anti-ice coating do not require external energy. Anti ice coatings have diverse applications in disparate industries, including transportation, aviation industry, power transmission lines, and military applications. Due to the water repellency characteristics, anti-ice coatings reduce water accumulation on the surface. On the other hand, the elastic property of these coatings causes ice removal by weak mechanical forces, which leads to the emergence of easy defrost surfaces. In this paper, the prerequisites that are considered for acquiring anti-ice coatings are presented in the first place. Then active and passive methods are investigated, and the theory of each technique followed by an example for each is put forward. Eventually, different evaluations which are available for anti-ice/ice phobic coatings are reviewed.

### Keywords

Anti-ice coatings, Ice-phobic coatings, Evaluation methods.

### Graphical abstract



## ۱- مقدمه

سایر عوامل تاثیرگذار همچون خلوص آب انجام شوند [۷]. در کاربردهای واقعی، همواره مقداری آب موجود خواهد بود. این آب ممکن است به دو طریق تامین گردد: (۱) در صورتی که سطح قادر به حذف تمامی آب موجود نباشد و (۲) در اثر چگالش هنگامی که دمای هوا پایین تر از نقطه‌ی شبنم باشد. در واقع راه‌حل ساده‌تر این است که آب در فاز مایع و پیش از یخ زدن حذف شود و یا این که حداقل تشکیل بلور یخ به تاخیر بیفتد. هرگونه تشکیل یخ با گذشت زمان منجر به تجمع مقدار بیشتری یخ می‌گردد [۸].

## • چسبندگی کم یخ

با وجود این که امکان حذف حجم زیادی از آب وجود دارد، اما همچنان ممکن است مقداری یخ شکل بگیرد. در این صورت حذف سریع و آرام یخ از اهمیت بالایی برخوردار است. چسبندگی یخ پایین تر از مقدار kPa ۲۰ به عنوان پایه برای سطوحی که حذف غیرفعال یخ را با کمک عواملی چون باد و ارتعاشات ممکن می‌سازند، گزارش شده است [۸].

## ۳- روش‌های حفاظت در برابر یخ

۳-۱- روش‌های غیرفعال<sup>۱</sup>

## ۳-۱-۱- معرفی

بسیاری از این روش‌ها شامل استفاده از پوشش‌های ضد یخ برای اصلاح ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی سطح است. یکی از رویکردهای مرتبط کاهش قدرت چسبندگی یخ می‌باشد. برای تضعیف قدرت چسبندگی یخ روی سطح روش‌های متعددی وجود دارد که معمول‌ترین آن‌ها اعمال پوششی یخ‌گریز بر روی سطح است. این پوشش‌ها انرژی سطحی کمی دارند. از جمله این مواد می‌توان به پلی‌تترافلورواتیلن (PTFE) و پلی‌دی‌متیل سیلوکسان (PDMS) اشاره کرد.

## ۳-۱-۲- تئوری‌های مرتبط

در پوشش‌های ضد یخ سازوکار<sup>۲</sup> جلوگیری از ایجاد یخ شامل دو بخش می‌شود:

الف) تئوری ضد یخ‌زدگی<sup>۳</sup>: در این حالت فاز خارجی در تماس با پوشش، فاز مایع می‌باشد و جلوگیری از ماندن قطره آب روی سطح در زمان طولانی و در نتیجه جلوگیری از یخ زدن قطره روی سطح اهمیت دارد. در این بخش به سازوکارهای مختلفی استفاده شده که می‌توان به خودرونده<sup>۴</sup>، پرش<sup>۵</sup> و ترشوندگی<sup>۶</sup> اشاره نمود [۹] که در زیر به آن‌ها پرداخته می‌شود:

الف- (۱) سازوکار خودرونده: در این حالت قطرات با ابعاد میکرو بهم

یخ‌زدگی قطعات یکی از معضلاتی است که عواقب متعددی را به همراه دارد. به‌عنوان مثال، می‌توان به تجمع یخ بر روی سطح پره‌های توربین بادی اشاره نمود که می‌تواند جرم کل پره را افزایش داده و منجر به افزایش بار بر روی آن گردد. از سوی دیگر، نایکنواختی ایجاد شده توسط تجمع یخ می‌تواند باعث ناپایداری پره شده و منجر به آسیب پره‌ها به دلیل ارتعاشات مازاد شود. همچنین، هنگامی که یخ روی پره به علت نیروهای سانتریفیوژ جدا شود می‌تواند مشکلات ایمنی جدی را ایجاد نماید [۱]. در طراحی برخی توربین‌ها خاموش شدن کامل و یا کاهش توان در هنگام تجمع بیش از حد یخ در نظر گرفته می‌شود [۲].

برای طراحی سطوح یخ‌گریز، درک سازوکار تشکیل یخ در سطح مولکولی از اهمیت بالایی برخوردار است. به عبارت دیگر، برای طراحی چنین سطوحی در گام اول می‌بایست شکل‌گیری یخ روی سطح به تاخیر بیفتد و زمانی که یخ تشکیل شد، لایه یخ از روی سطح جدا گردد [۳]. روش‌های فعال و غیرفعال متعددی برای مقابله با این مشکلات در دست توسعه هستند. حرارت‌دهی پره توربین یکی از روش‌های فعال در این زمینه محسوب می‌شود که می‌تواند از تاثیرات یخ‌زدگی جلوگیری نماید [۴]. در واقع روش‌های فعال برای اجرا نیازمند انرژی هستند در حالی که عملکرد روش‌های غیرفعال بدون انرژی محقق می‌شود [۵]. در بخش‌های بعد، توضیحات کاملی از دو روش غیرفعال و فعال و مثال‌هایی از هر کدام ارائه می‌شود.

## ۲- پیش‌نیازهای یک پوشش ضد یخ

یک سطح ضد یخ باید قادر به جلوگیری از شکل‌گیری یخ باشد. به هر حال در کاربردهای واقعی همواره مقداری آب وجود خواهد داشت و سپس یخ شکل می‌گیرد. در این صورت سطح باید قادر به حذف یخ باشد. رفتار ضد یخ یک سطح به‌طور کلی می‌تواند به سه بخش تقسیم شود.

## • آب‌گریزی

اگر هیچ آبی در دسترس نباشد، تشکیل یخ غیرممکن خواهد بود. سطوحی که درجه ترشوندگی کمی دارند، به شدت آب را دفع می‌کنند. از این رو سطوح ابرآب‌گریز تقریباً می‌توانند باعث حذف تمامی آب موجود شوند. به‌علاوه چسبندگی آب به سطح می‌بایست پایین باشد. در صورتی که این نیازمندی‌ها تامین شود، مقدار آب تا حد ممکن کم خواهد بود و سطح خشک باقی می‌ماند. در واقع با استدلالی مشابه بسیاری از پوشش‌های ضد یخ بر اساس ویژگی‌های ابرآب‌گریزی طراحی می‌شوند. به هر حال سطوح ابرآب‌گریز همیشه ویژگی چسبندگی یخ کم از خود نشان نمی‌دهند [۶].

## • تاخیر هسته‌گذاری یخ

هسته‌گذاری از عوامل متعددی تاثیر می‌پذیرد و به یک شیوه پیوسته و قطعی آغاز نمی‌گردد. این امر عملکرد و تفسیر نتایج حاصل از آزمایش‌ها را دشوار می‌سازد. در واقع آزمایش‌ها باید تحت کنترل دقیق متغیرهای ترمودینامیکی (دما و رطوبت)، متغیرهای فرآیند همچون نرخ سرمادهی و

<sup>1</sup> Passive

<sup>2</sup> Mechanism

<sup>3</sup> Anti-icing

<sup>4</sup> Drop self-propelling

<sup>5</sup> Drop bouncing

<sup>6</sup> Wetting

برخورد و پرش (خارج شدن) قطره با پوششی آب‌گریز برای سه قطره با عدد وبر<sup>۵</sup> متفاوت در شکل (۲) نشان داده شده است [۱۲]. عدد وبر مطابق با رابطه ۱ تعریف می‌شود. در این رابطه  $\rho$  چگالی،  $V$  سرعت ضربه،  $R$  شعاع قطره و  $\gamma$  کشش سطحی است.

$$W = \rho V^2 R / \gamma \quad (1)$$

الف-۳) سازوکار ترشوندگی: برای ترشوندگی قطره‌ی آب بر روی سطح، مدل‌های مختلفی در زمینه زاویه تماس و کشش سطحی توسط دانشمندان ارائه شده است که در زیر به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. اولین مدل توسط یانگ<sup>۶</sup> ارائه شد (شکل ۳-الف). در این مدل سطح صاف و بدون زبری در نظر گرفته شده است. زاویه تماس در مدل یانگ از رابطه ۲ به دست می‌آید.

$$\cos \theta = (\gamma_{SA} - \gamma_{SL}) / \gamma_{LA} \quad (2)$$

در رابطه ۲،  $\theta$  زاویه تماس می‌باشد و  $\gamma$  کشش سطحی است. مدل بعدی، ونزل<sup>۷</sup> نام دارد که سطح برخلاف مدل یانگ دارای زبری بوده و زبری سطح با قطرات در تماس کامل است (شکل ۳-ب). زاویه تماس در مدل ونزل از رابطه ۳ به دست می‌آید.

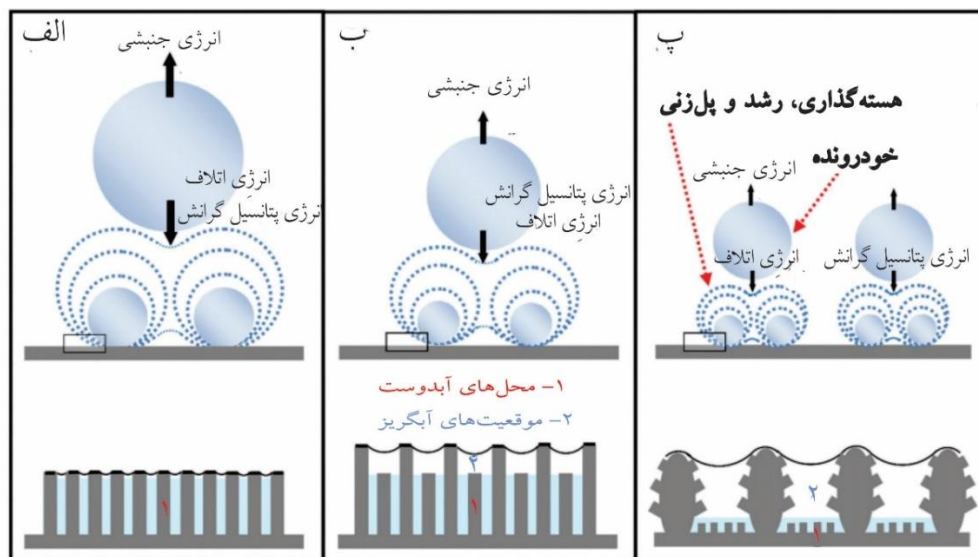
$$\cos \theta^* = r \cos \theta \quad (3)$$

می‌پیوندند<sup>۱</sup> و تبدیل به قطرات بزرگ‌تر می‌شوند. (شکل ۱)،  $E_k$  انرژی جنبشی<sup>۲</sup>،  $E_{int}$  انرژی اتلاف ناشی از چسبندگی بین سطحی<sup>۳</sup> و  $E_h$  انرژی پتانسیل گرانش<sup>۴</sup> است. در این حالت دینامیک به هم پیوستگی بواسطه تغییرات انرژی سطح آزاد شده هنگام به هم پیوستگی قطرات به هم، تغییرات چسبندگی بین سطحی، تغییرات انرژی پتانسیل و همچنین نیروهای ویسکوز، تبدیل به انرژی جنبشی و حرکت قطرات روی سطح می‌شود. عدد ۱ و ۲ به ترتیب محل‌های آبدوست و موقعیت‌های آب‌گریز را نشان می‌دهند. نواحی آبدوست آرایه‌های نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم می‌تواند میکروقطرات متراکم تولید نمایند. آرایه‌های نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم نامنظم دارای آب‌گریز بیشتر و درصد نواحی آبدوست کمتری در مقایسه با آرایه‌های نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم منظم هستند که امکان تولید میکروقطره‌های خودرونده ریزتر را میسر می‌سازند. [۱۰].

الف-۲) سازوکار پرش: برای جلوگیری از ایجاد یخ، قطره باید در کمترین زمان تماس با سطح، از روی سطح برداشته شود. این پدیده طی دو مرحله اتفاق می‌افتد. در مرحله اول قطره روی سطح می‌افتد و با بیشترین قطر روی سطح پخش می‌شود. در مرحله دوم قطره جمع شده و از روی سطح خارج می‌گردد (پرش می‌نماید). این پدیده به زبری سطح، ترشوندگی، دمای سطح، قطر قطره، سختی سطح و شرایط محیطی بستگی دارد [۱۲].

<sup>5</sup> Weber  
<sup>6</sup> Young  
<sup>7</sup> Wenzel

<sup>1</sup> Coalescence  
<sup>2</sup> Kinetic energy  
<sup>3</sup> Interfacial adhesion-induced dissipation energy  
<sup>4</sup> Gravity potential energy



شکل ۱- طرح‌واره‌ای از تأثیر سه نوع نمونه فوق آب‌گریز با قابلیت ترشوندگی پویای متفاوت بر روی اندازه قطرات و تراکم در طی فرآیند ریز قطرات خودرونده (a) آرایه‌های نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم<sup>۸</sup>، (b) آرایه‌های نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم نامنظم<sup>۹</sup> و (c) آرایه‌های نانولوله‌های دی‌اکسید تیتانیوم سلسله مراتبی<sup>۱۰</sup> [۱۱].

<sup>8</sup> TiO<sub>2</sub> nanotube arrays (TNTA)  
<sup>9</sup> Irregular TiO<sub>2</sub> nanotube arrays (ITNTA)  
<sup>10</sup> Hierarchical TiO<sub>2</sub> particle arrays (HTPA)

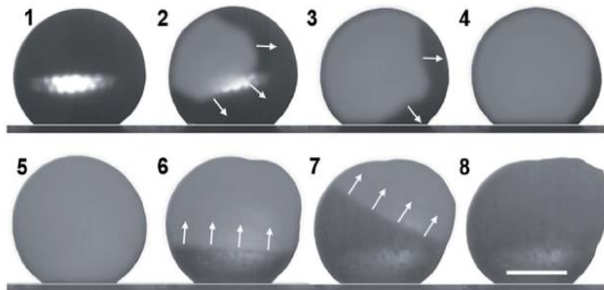
جامد و سطح هوای به دام افتاده در شکافها<sup>۲</sup> می باشد و مجموع این دو کسر حجمی برابر ۱ می شود.  $\theta_2$  زاویه تماس مایع با هوا می باشد که برابر با  $180^\circ$  در نظر گرفته می شود و  $\theta_1$  زاویه تماس مایع با سطح (بدون زبری) می باشد. در این صورت رابطه ۴ به رابطه ۵ تبدیل می گردد.

$$\cos \theta = fSL (\cos \theta + 1) - 1 \quad (5)$$

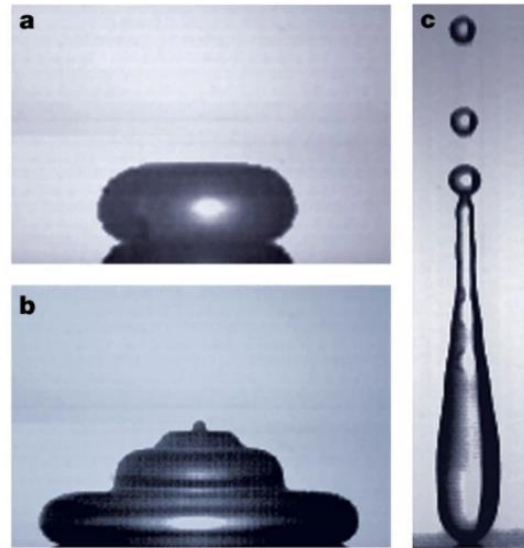
برای ارزیابی ترشوندگی پویای یک سطح دافع مایع<sup>۳</sup> از مدل فورمیج<sup>۴</sup> و با در نظر گرفتن عواملی مانند وزن، کشش سطحی و عرض دایره تماس قطره، شتاب جاذبه، زاویه شیب، زاویه پیشرو<sup>۵</sup> و زاویه پسرو<sup>۶</sup> استفاده می شود [۹].

ب) تئوری یخ‌گریزی<sup>۷</sup>: این تئوری برای پوشش‌هایی است که یخ روی آن‌ها تشکیل می شود و در واقع روی سطح فاز جامد داریم. در این زمینه، با دو سازوکار از ایجاد و ماندن یخ روی سطح جلوگیری می شود که در ذیل به آن‌ها پرداخته شده است.

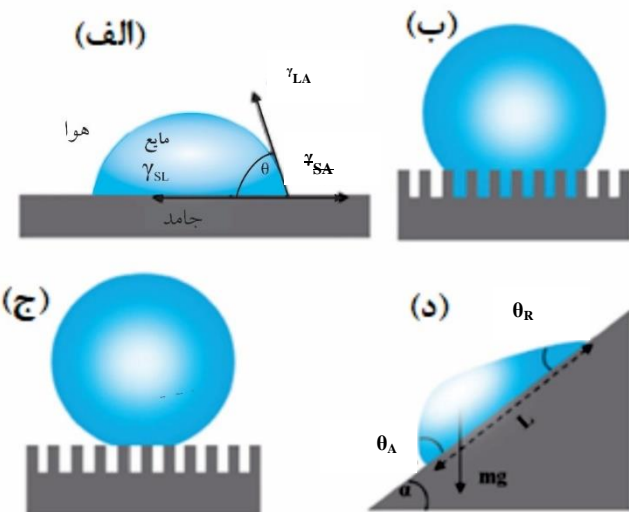
ب-۱) سازوکار هسته گذاری یخ<sup>۸</sup>: پوشش یخ‌گریز<sup>۹</sup> سبب تاخیر زمانی یا یا دمایی در جوانه زنی و رشد یخ می شود. جانگ<sup>۱۰</sup> و همکارانش هسته گذاری را در این پوشش‌ها برخلاف انتظارات هموزن و بین فاز گاز و مایع مشاهده کردند که به واسطه تبخیر در سطح مایع فوق سرد اتفاق می افتد [۱۳]. هسته گذاری یخ در سطح مایع و گاز در شکل ۴ نشان داده شده است. نتیجه حاصل از شکل ۴ نشان می دهد که به جای هسته گذاری هتروژن مورد انتظار در مرز مایع-جامد برای قطرات فوق سرد، در غیاب جریان برشی، فرآیند یخ‌زدگی با هسته گذاری هموزن در مرز گاز-مایع آغاز می گردد.



شکل ۴- هسته گذاری آب فوق سرد تحت جریان برشی نیتروژن: فاز اول (۱-۴) نمایانگر تصاویر با فاصله‌های ۶ میلی ثانیه و فاز دوم (۵-۸) نمایانگر تصاویر در ۵، ۹ و ۱۳ ثانیه از بلورینگی یک قطره ۵ میکرولیتری روی سطح ابر آب‌گریز در میدان جریان نیتروژن غیراشباع [۱۳]



شکل ۲- برخورد و پخش قطره با پوششی آب‌گریز طی دو مرحله (a) هنگامی که عدد وبر در حدود یک است، (b) هنگامیکه عدد وبر تقریباً برابر با ۴ است و (c) هنگامی که عدد وبر تقریباً برابر با ۱۸ است [۱۲].



شکل ۳- سازوکار مدل‌های ترشوندگی: الف) مدل یانگ، ب) مدل ونزل، ج) مدل کیسی-بکستر، د) مدل فورمیج [۹].

در رابطه ۳،  $\theta^*$  زاویه تماس جدید در سطح‌های زبر می باشد و  $\theta$  زبری سطح که نسبت سطح واقعی به مساحت سطح صاف تعریف می شود. در مدل کیسی-بکستر<sup>۱</sup> (شکل ۳-ج) زبری سطح وجود دارد و به دلیل وجود هوا در زبری سطح، قطره به صورت کامل با سطح تماس ندارد. زاویه تماس سطح در این حالت از رابطه ۴ به دست می آید.

$$\cos \theta = fSL \cos \theta_1 + fLA \cos \theta_2 \quad (4)$$

در این رابطه،  $fSL$  و  $fLA$  به ترتیب کسر حجمی قطره در تماس با سطح

2 Valleys  
3 Liquid repellent  
4 Furmidge  
5 Advancing angle  
6 Receding angle  
7 Ice-phobic  
8 Ice-nucleation  
9 Ice-phobic  
10 Jung

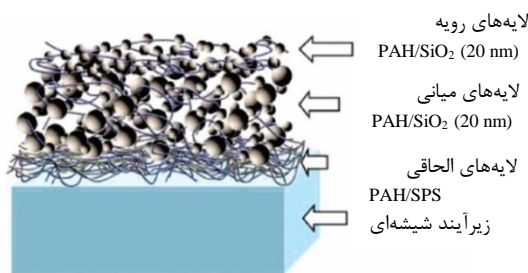
<sup>1</sup> Cassie and Baxter



### ۳-۱-۳- نمونه‌هایی از به‌کارگیری روش‌های غیرفعال

در این بخش نمونه‌هایی از به‌کارگیری روش‌های غیرفعال ارائه می‌شود. در تحقیق صورت گرفته توسط براوو<sup>۲</sup> و همکارانش [۱۷] در سال ۲۰۰۷، با کنترل عواملی چون تعداد لایه‌های نشانده<sup>۳</sup> شده روی سطح، درجه‌ی کلوخه‌ای شدن<sup>۴</sup> نانوذرات توسط فیلم‌های چند لایه توانستند پوششی ابرآب‌گریز و شفاف ایجاد کنند. این پوشش توسط پوشش‌دهی<sup>۵</sup> لایه به لایه‌ی نانو ذرات سیلیکا و پلی آلایل هیدروکلرید و اصلاح نهایی سطح توسط سیلان ایجاد شد. این پوشش شامل سه لایه چسبنده<sup>۶</sup>، بدنه<sup>۷</sup> و رویه<sup>۸</sup> می‌باشد که در شکل ۵ قابل مشاهده است. هر لایه شامل چند زیر لایه از سیلیکا و پلی الکترولیت می‌باشد. پنج زیر لایه برای لایه چسبنده، ده تا چهل زیر لایه برای لایه بدنه و زیر لایه برای لایه رویه استفاده شده که این لایه‌ها در دمای °C ۵۵۰ کلسینه شده و در نهایت فلوئورو سیلان<sup>۹</sup> بر روی لایه رویه اعمال شده است.

در سال ۲۰۱۲، مطالعه دیگری توسط یلگور<sup>۱۰</sup> و همکارانش [۱۸] بر روی پوشش‌های ابرآب‌گریز با ایجاد لایه‌ی سیلیکای آب‌گریز روی پوشش پلیمری به وسیله لایه‌نشانی چرخشی یا دورانی<sup>۱۱</sup> صورت گرفت. در این تحقیق از کوپلیمر پلی دی متیل سیلوکسان- اوره، پلی متیل متاکریلات، پلی استایرن، پلی کربنات و اپوکسی گرماسخت به عنوان پلیمر پایه استفاده شده است. در این روش همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، پوشش طی سه مرحله روی شیشه اعمال شده است. در ابتدا، لایه‌ی اول به صورت محلولی از پلیمر پایه با درصد جامد ۱۵ تا ۲۵ درصد تهیه و روی شیشه اعمال گردید. لایه دوم که پراکنه‌ی<sup>۱۲</sup> سیلیکا در حلال تتراهیدرو فوران (THF) با درصد وزنی ۲/۵ و توزیع اندازه ذرات ۹±۴۰ نانومتر می‌باشد، ۷ ثانیه پس از اعمال لایه اول، اعمال می‌شود. این مرحله برای ایجاد لایه‌ای فشرده‌تر تکرار شده است و در نهایت لایه رویه برای بالا بردن دوام پوشش اعمال شد.



شکل ۵- پوشش سه لایه شفاف ابرآب‌گریز [۱۷].

ب-۲) چسبندگی یخ<sup>۱</sup>: پوشش‌های یخ‌گریز با استفاده از سازوکارهای مختلف که در ادامه به آن اشاره می‌شود، سبب می‌شوند تا چسبندگی یخ به سطح کاهش قابل توجهی یابد و یخ با استفاده از تنش برشی یا نیروی گریز از مرکز در پره توربین‌های بادی از سطح پره جدا شود. به‌جای پوشش‌های یخ‌گریز، پوشش‌های آب‌گریز نیز می‌توانند برای جلوگیری از قرار گرفتن آب بر روی سطح استفاده شوند. اما اثبات شده است که خاصیت آب‌گریزی برای جلوگیری از تجمع یخ کافی نیست. بررسی‌های انجام شده در دمای °C ۱۵- نشان می‌دهد که قطرات آب بر روی سطح آلومینیم در مدت ۵ ثانیه یخ می‌زنند. اما یخ‌زدن آن‌ها بر روی سطح نانوکامپوزیتی ابرآب‌گریز دوپ شده با پودر تیتانیوم تا حدود ۱۲-۱۳ ثانیه به تاخیر می‌افتد.

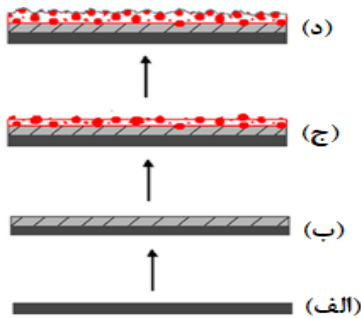
کاهش چسبندگی یخ از طریق سطوح ابرآب‌گریز به صورت گسترده برای کاهش مشکلات ناشی از یخ‌زدگی به‌کار گرفته شده است. سطوح ابرآب‌گریز از طریق ساختار میکرو/نانو از تجمع یخ جلوگیری می‌نمایند و زاویه تماس بزرگتر، سطح تماس را کاهش می‌دهد؛ بنابراین انرژی لازم برای هسته‌گذاری بلور یخ بیشتر است. پدیده‌ی جهش قطرات آب بر روی سطح ابرآب‌گریز نیز برای تاخیر تشکیل بلور یخ مفید است [۱۴]. البته عملکرد ضد یخ این گونه پوشش‌ها، با حضور عوامل محیطی هم‌چون رطوبت بالا و دمای به شدت پایین، محدود می‌گردد و سطح این‌گونه پوشش‌ها بعد از یخ‌زدگی در برابر تخریب آسیب‌پذیر می‌گردد. به‌علاوه، مشخصه ساختاری میکرو/نانو سطح ابرآب‌گریز تحت شرایط دمای پایین باعث یخ‌زدگی می‌شود و در طی چرخه‌های یخ‌زدگی/یخ‌زدایی منجر به افزایش چسبندگی یخ می‌گردد [۱۴]. مشاهده گردیده شبنمی که روی سطوح ابرآب‌گریز تشکیل می‌گردد، منجر به چسبندگی بالای یخ به سطح می‌شود [۱۵]. همچنین، برای مقابله با مشکل یخ‌زدگی سطوح، پوشش‌های یخ‌گریز با طبیعت دوگانه نیز توسعه یافته‌اند [۱۶].

نسل دیگری از پوشش‌ها دارای مراکز آب‌دوست احاطه‌شده با نواحی آب‌گریز هستند. ایده‌ی توسعه این پوشش‌ها بر اساس فراهم کردن امکان چسبیدن آب به نواحی خاص و جدا شدن آسان یخ از روی سطح است [۱۵]. در این پوشش‌ها با سازوکار خود رونده که پیش تر به آن اشاره شده بود، قطرات ریز به هم چسبیده و تشکیل قطرات درشت و در نهایت موجب ترک راحت‌تر سطح پوشش می‌شوند. روش غیرفعال دیگری که در این زمینه استفاده می‌شود استفاده از سامانه حرارتی است. به‌نظر می‌رسد که اعمال رنگ مشکی بر روی سطح پره باعث افزایش بازدهی آن می‌شود. رنگ مشکی باعث حرارت‌دهی در طول روز شده و باعث می‌شود یخ روی پره سریع‌تر از حالتی که رنگ پره سفید است، ذوب شود. این روش برای مناطقی کاربرد دارد که یخ‌زدگی به‌صورت مکرر اتفاق نمی‌افتد و این‌که در ادامه‌ی فرآیند یخ‌زدن دما بالای صفر درجه سانتی‌گراد است. در فصل تابستان رنگ مشکی باعث حرارت‌دهی مازاد به پره‌ها شده و مشخصه‌های مکانیکی آن‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۱۵].

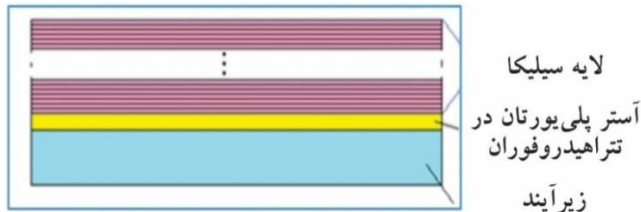
<sup>1</sup> Ice adhesion

<sup>2</sup> Bravo  
<sup>3</sup> Deposit  
<sup>4</sup> Aggregation  
<sup>5</sup> Deposition  
<sup>6</sup> Adhesion  
<sup>7</sup> Body  
<sup>8</sup> Top  
<sup>9</sup> Fluorosilane  
<sup>10</sup> Yilgor  
<sup>11</sup> Spin-coating  
<sup>12</sup> Dispersion

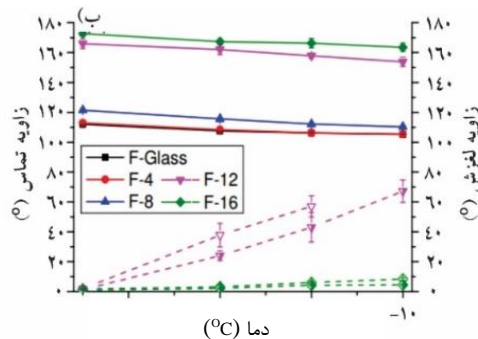
مختلف از این پوشش تهیه شد. محلول پایه این دو پوشش یکسان و حاوی MTEOS، GLYMO، اتانل و آب با نسبت‌های ۱:۳:۱:۳۴:۶ می‌باشد. محلول دوم پوشش با پسوند M شامل پراکنه نانوسیلیکای آب‌گریز در اتانل و برای پوشش با پسوند F شامل آب، اتانول، FAS و نانوسیلیکای آب‌گریز می‌باشد. این پوشش‌ها با درصدهای مختلف از نانو سیلیکا تهیه شدند به‌صورتی که مقادیر متفاوتی از محلول اول در محلول دوم ریخته شده است. در پوشش‌هایی که فقط نانوسیلیکا اضافه شده است انرژی سطح حدود  $31 \text{ mJ/m}^2$  گزارش شده است در صورتی‌که در پوشش حاوی FAS انرژی سطح تا  $10 \text{ mJ/m}^2$  کاهش یافته است. کاهش انرژی سطح همراه با زبری بالای سطح موجب شد تا پوشش‌های سری F در دماهای زیر صفر نیز خاصیت ابرآب‌گریزی خود را حفظ کنند (شکل ۸). در نهایت، بهترین خواص ضدیخ برای پوشش سری F حاوی ۱۶ درصد نانوسیلیکای آب‌گریز می‌باشد [۲۰].



شکل ۶- مراحل پوشش دهی پلیمر با سطحی ابرآب‌گریز (الف) سطح شیشه، (ب) فیلم پلیمر پایه، (ج) دولایه پوشش سیلیکایی، (د) سه لایه پوشش رویه شامل سیلیکا و پلیمر پایه رقیق [۱۸].



شکل ۷- پوشش آب‌گریز چند لایه شامل زیرآیند اپوکسی یا متیل متاکریلات، پرایمر پلی یورتانی و چند لایه سیلیکای آب‌گریز [۱۹].



این لایه، محلولی شامل ۲/۵ درصد وزنی سیلیکا و ۰/۲۵٪ وزنی پلیمر پایه در حلال THF می‌باشد. همچنین، زاویه تماس آب تمامی پوشش‌ها بالای ۱۷۰ درجه گزارش شده است.

پیسیتلی<sup>۱</sup> و همکارانش [۱۹] در سال ۲۰۱۹ بر روی پوشش‌های ضدیخ بر روی هواپیماهای کوچک آموزشی مطالعاتی انجام دادند. پوشش اعمال شده دارای سه لایه بوده است. از اپوکسی و پلی متیل متاکریلات به عنوان لایه‌ی زیرین (زیرآیند) استفاده شده است. لایه پرایمر پلی یورتانی ۵ تا ۲۰ درصد جامد محلول در حلال THF بین لایه پلیمر و لایه‌های سیلیکا به منظور افزایش چسبندگی این دو لایه اعمال شده است (شکل ۷). این لایه‌ها به روش پوشش‌دهی چرخشی<sup>۲</sup> اعمال شده‌اند.

وجود حلال سبب می‌شود تا زیرآیند متورم شده و ذرات سیلیکا به داخل آن نفوذ کند. همچنین، تبخیر حلال سبب ایجاد زبری ذاتی پوشش شده و به دلیل انرژی سطح پایین سیلیکای آب‌گریز، خاصیت آب‌گریزی تشدید می‌گردد. از آزمون زاویه تماس سطح در شیب ۴۵ درجه پوشش‌ها با زیرآیند اپوکسی و متیل متاکریلات فیلم گرفته شد. در زیرآیند اپوکسی قطره آب پس از برخورد به سطح به بالا پرتاب شده که این سامانه رفتار پوشش‌های ضدیخ را از خود نشان داد. در زیرآیند متیل متاکریلات، قطره آب پس از برخورد با سطح، روی سطح غلت خورده که رفتاری همانند پوشش‌های خودتمیزشونده دارد [۱۹].

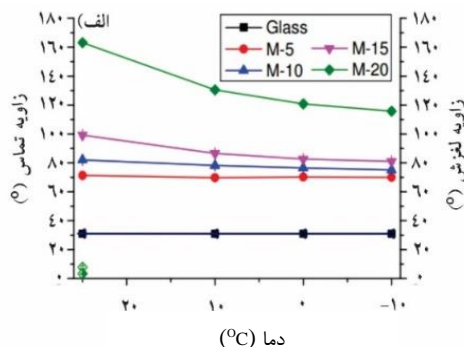
در تحقیق صورت گرفته توسط فو<sup>۳</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۴ بر روی پوشش‌های یخ‌گریز سل-ژل موفق شدند به پوششی با زاویه تماس ۱۷۲ درجه در دمای اتاق و زاویه تماس ۱۶۳ درجه در دمای ۱۰°C برسند. در این تحقیق، تفاوت بین پوشش ضدیخ و یخ‌گریز زاویه تماس آن در ۱۰°C ذکر شده است. در پوشش‌های یخ‌گریز<sup>۴</sup> در دماهای پایین، زاویه تماس بسیار بالا می‌باشد. در این مطالعه از متیل تری اتوکسی سیلان (MTEOS)، H1، H1، گلیسیدیل اکسی پروپیل تری متوکسی سیلان (GLYMO)، H1، H1، H2، H2- پرفلورودسیل تری اتوکسی سیلان (FAS) و همچنین از نانوسیلیکای آب‌گریز برای ایجاد زبری در سطح استفاده شد. دو نوع

<sup>1</sup> Piscitelli

<sup>2</sup> Spin coating

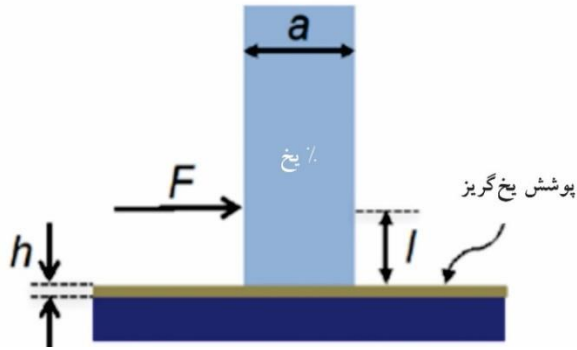
<sup>3</sup> Fu

<sup>4</sup> Ice phobic

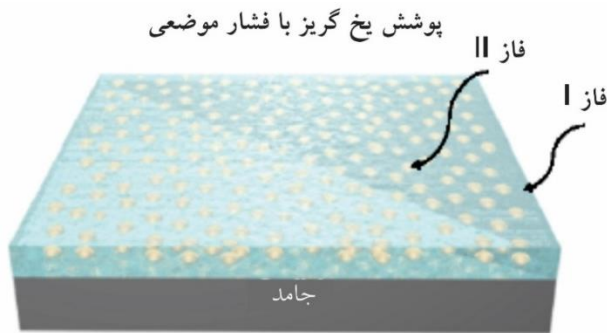


شکل ۸- زاویه تماس آب با پوشش در دماهای مختلف (الف) پوشش حاوی نانوسیلیکای آب‌گریز (ب) پوشش حاوی نانوسیلیکای آب‌گریز و FAS (خط چین مربوط به زاویه لغزش می‌باشد) [۲۰].

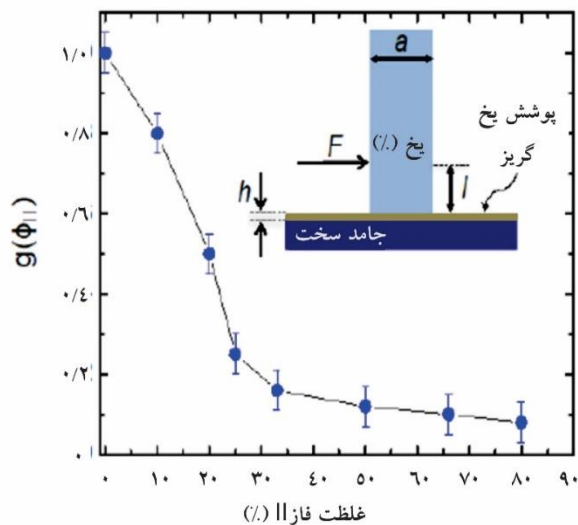
جاذب رطوبت به‌وسیله پلیمریزاسیون رادیکالی واکنش شیمیایی داده و متصل می‌شود (شکل ۹). در این حالت، پلیمر جاذب رطوبت در دمای پایین آب جذب کرده و متورم می‌شود و از داخل سوراخ‌های میکرونی سیلیکون بیرون زده و روی سطح در هم ادغام می‌شوند. وجود پلیمر جاذب رطوبت روی سطح سبب می‌شود تا در دماهای زیر صفر، لایه نازک آب یخ زده روی سطح تشکیل شود.



شکل ۹- نحوه وارد کردن نیرو به یخ برای اندازه‌گیری چسبندگی یخ [۲۲].



شکل ۱۰- طرح‌واره پوشش دوفازی (فاز دوم حاوی ارگانو ژل می‌باشد) [۲۱].



شکل ۱۱- مقادیر g بصورت تابعی از غلظت فاز دوم [۲۱].

مطالعه ایرجی‌زاد<sup>۱</sup> [۲۱] بر روی ارگانو-ژل‌ها سبب استفاده از این مواد در مفهوم جدید فیزیکی و به‌دست آوردن خواص جالبی از جمله چسبندگی یخ بسیار پایین و مقاومت مکانیکی و شیمیایی بالا و بلند مدت شده است. در الاستومرها رابطه‌ای که چادهری<sup>۲</sup> و همکارانش برای چسبندگی یخ ارائه داده‌اند در رابطه ۶ آورده شده است.

$$\gamma_s = (a/l) \sqrt{W_a G/h} \quad (6)$$

که  $\gamma_s$  تنش برشی وارد به یخ است که سبب کنده شدن آن از سطح می‌شود. این عامل می‌تواند معیاری از چسبندگی یخ به سطح باشد. پارامترهای  $a$ ،  $h$  و  $l$  در شکل ۹ نشان داده شده است.  $W_a$  کار چسبندگی و  $G$  مدول پوشش می‌باشد.

طبق رابطه ۶ کاهش کار چسبندگی و مدول پوشش سبب کاهش چسبندگی یخ با پوشش می‌باشد. البته کاهش مدول باعث کاهش مقاومت مکانیکی پوشش می‌شود از این رو در مطالعه ایرجی‌زاد و همکارانش با استفاده از دو فاز که یک فاز دارای مدول بالا و یک فاز حاوی ارگانو ژل با مدول پایین می‌باشد سبب شده تا به‌دلیل اختلاف مدول دو فاز مرکز تنش بین سطح یخ و پوشش ایجاد شود و چسبندگی یخ به شدت کاهش یابد (شکل ۱۰). همچنین، فاز اول به‌دلیل مدول بالا، مقاومت مکانیکی پوشش را بالا ببرد [۲۱].

در سامانه دو فازی رابطه‌ی  $\gamma_s$  با مدول و کار چسبندگی توسط ایرجی‌زاد به‌صورت رابطه ۷ اصلاح شده و تابع  $g$  بر اساس کسر حجمی فاز دوم ( $\phi_2$ ) در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

$$\gamma_s = g(\phi_2) (a/l) \sqrt{W_a G m/h} \quad (7)$$

فاز اول، از رزین سیلیکونی تک جزئی تشکیل شده است. برای ساخت فاز دوم از دو جزء استفاده شده است. این دو جزء متشکل از سیلیکون PDMS تک جزئی و ارگانوژل با اندازه ذرات ۲ تا ۲۰ میکرون می‌باشد. ارگانو ژل خود دارای دو فاز مایع و جامد می‌باشد. در این تحقیق برای سنتز ارگانو ژل رزین سیلیکونی پخت شونده با رطوبت دو جزئی با نام تجاری Sylgard 184 را با مایع PDMS مخلوط و در دمای ۱۰۰ °C به مدت ۴ ساعت در حال هم‌زدن قرار دادند. Sylgard 184 به صورت ذراتی ۲ تا ۲۰ میکرونی حاوی فاز مایع PDMS سنتز شده و از آن در فاز اول استفاده شده است [۲۱].

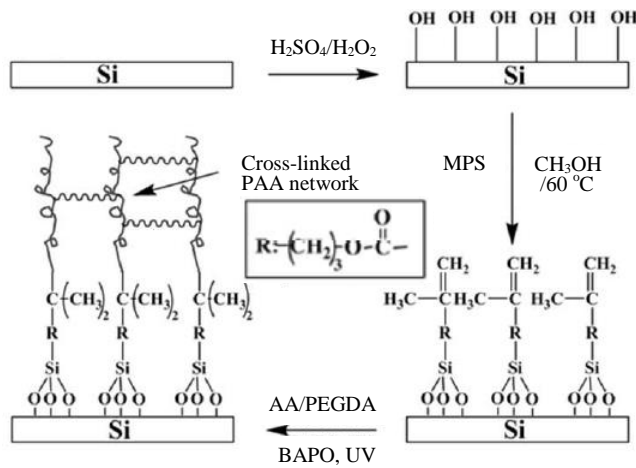
در مطالعه صورت گرفته توسط چن<sup>۳</sup> و همکارانش [۲۲]، وجود لایه‌ای آب بین پوشش و یخ سبب پایین آمدن شدید چسبندگی یخ به سطح می‌شود. به‌همین دلیل، یخ به‌واسطه‌ی وزن خود و یا وزش باد به نیروی چسبندگی یخ به سطح غلبه کرده و از سطح جدا می‌شود.

در این تحقیق، به‌واسطه روش لیتوگرافی سطح سیلیکونی به‌صورت آرایه‌ای از سوراخ‌های میکرونی ایجاد می‌شود. سپس، درون آن پلیمر

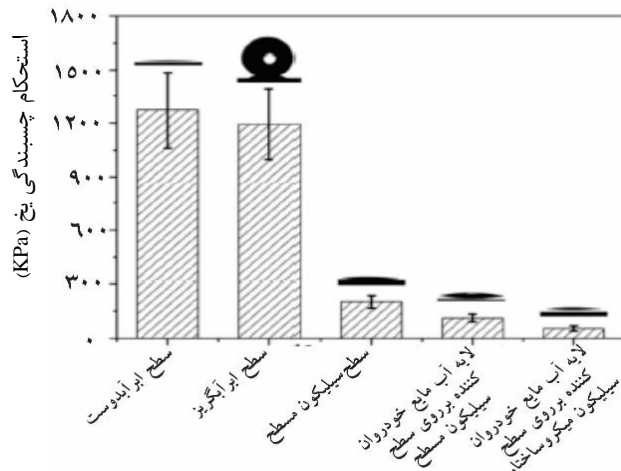
<sup>1</sup> Irajizad  
<sup>2</sup> Chaudhury  
<sup>3</sup> Chen



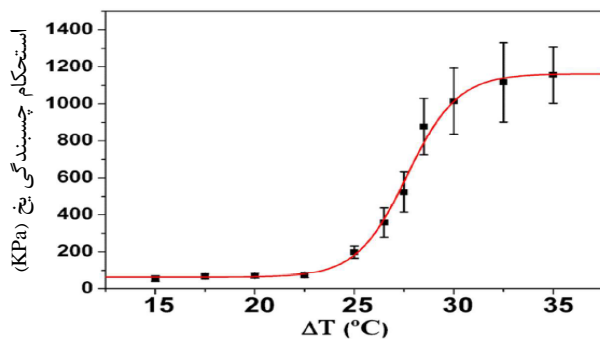
کین<sup>۳</sup> و همکارانش نانوذرات پلی تترافلورواتیلن را به روش پاششی روی رزین اپوکسی اعمال کردند. ذرات پلی تترافلورواتیلن بر روی رزین اپوکسی که تا حدودی روی زیرآیند آلومینیم پخت شده بود، پاشش گردید.



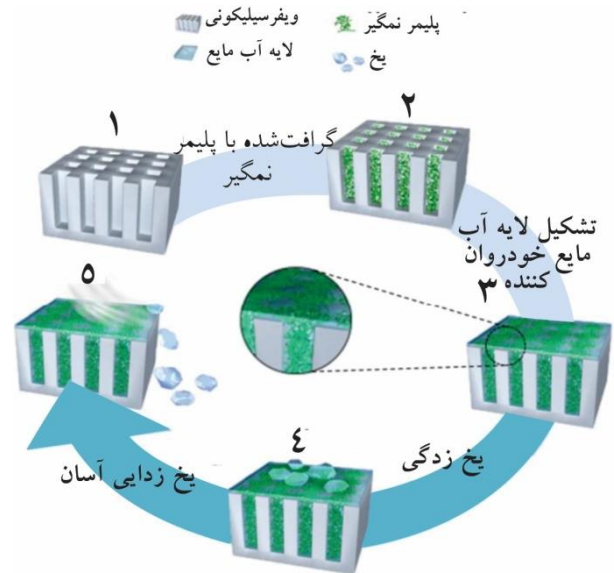
شکل ۱۳- اصلاح زیرآیند سیلیکونی به وسیله پلیمر جاذب رطوبت [۲۲].



شکل ۱۴- مقایسه چسبندگی یخ در زیرآیند سیلیکونی با اصلاح شیمیایی متفاوت [۲۲].



شکل ۱۵- تاثیر دما بر روی چسبندگی یخ سیلیکون اصلاح شده با پوشش جاذب رطوبت [۲۲].



شکل ۱۲- طرحواره سازوکار یخ‌گریزی پوشش جاذب رطوبت [۲۲].

مراحل سنتز این پوشش در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در ابتدا، زیرآیند سیلیکونی دارای میکروسوراخ‌ها به وسیله محلول  $H_2SO_4/H_2O_2$  اصلاح و هیدروکسیل دار شده است. سپس زیرآیند سیلیکونی در محلول ۱٪ وزنی MSP در دمای  $60^\circ C$  به مدت ۱۲ ساعت غوطه‌ور می‌گردد. در این حالت، واکنش تراکمی بین گروه متوکسی سیلان و هیدروکسیل متصل به سیلیکون اتفاق می‌افتد. در مرحله بعد، از پلی آکرلیک اسید شبکه‌ای شده به عنوان پلیمر جاذب رطوبت و پلی اتیلن گلاکول دی آکريلات<sup>۲</sup> به عنوان عامل شبکه‌ای‌کننده برای اصلاح بعدی سیلیکون-متوکسی سیلان استفاده شده است [۲۲].

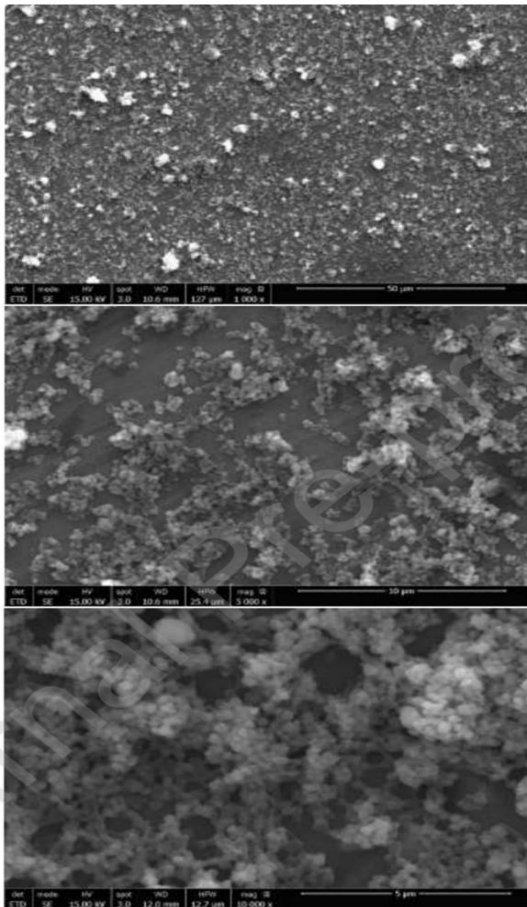
مقایسه چسبندگی یخ بر سطوح مختلف بر پایه زیرآیند سیلیکونی در شکل ۱۴ انجام شده است. پوشش ابرآب دوست با هیدروکسیل دار کردن سیلیکون و پوشش ابرآب گریز با آبریز کردن سطح سیلیکون به وسیله فلورینه سیلان انجام شده است. زاویه تماس سطح ابرآب گریز  $152^\circ$  درجه و برای سطح ابرآب دوست  $2/8$  درجه گزارش شده است. طبق نتایج به دست آمده، چسبندگی یخ برای این دو سطح حدوداً یکسان و به ترتیب برابر  $1192 \pm 195$  و  $1273 \pm 212$  kPa می‌باشد. ولی چسبندگی یخ بر روی سطحی که با جاذب رطوبت اصلاح شده،  $55$  kPa گزارش شده است که ۲۰ برابر کوچک‌تر از چسبندگی یخ در پوشش‌های ابرآب دوست و ابرآب گریز می‌باشد [۲۲].

همچنین، تاثیر دما بر روی چسبندگی یخ گزارش شده است (شکل ۱۵). در شکل، محور افقی تفاوت دمای صفر درجه با دمای نمونه می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که در دمای  $25^\circ C$  چسبندگی یخ بر روی سطح اصلاح شده با پوشش جاذب رطوبت به شدت شروع به افزایش کرده است که نشان از یخ زدن لایه نازک رطوبت جذب شده روی سطح پوشش و تخریب سازوکار لایه خودروان‌کننده می‌باشد [۲۲].

<sup>3</sup> Qin

<sup>1</sup> 3-(methacryloxypropyl)-trimethoxy silane

<sup>2</sup> Polyethylene glycol diacrylate

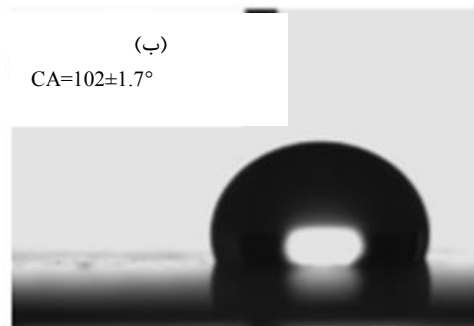
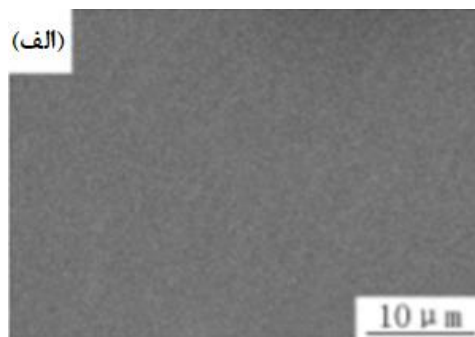


شکل ۱۶- تصاویر SEM نمونه‌ی پوشش داده‌شده با پلی‌تترافلورواتیلن با بزرگنمایی‌های متفاوت [۲۴]

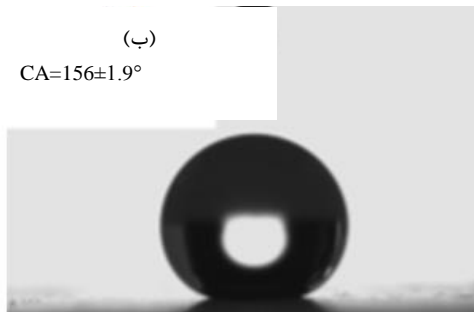
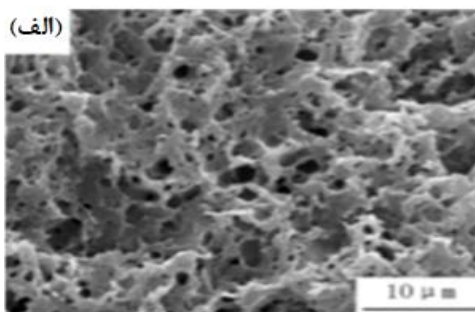
در ادامه، پوشش اپوکسی به‌همراه این ذرات به‌طور کامل پخت شدند. برای افزایش قدرت چسبندگی بین ذرات پلی‌تترافلورواتیلن و رزین اپوکسی، دمای پخت نزدیک به دمای انتقال شیشه‌ای پلی‌تترافلورواتیلن تنظیم شد تا ذرات نرم شوند [۲۳]. در این پژوهش ذرات پلی‌تترافلورواتیلن به‌علت انرژی سطحی پایین و ماهیت آب‌گریز با میانگین اندازه ذرات ۳۰۰ نانومتر استفاده شدند.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه‌های پوشش داده‌شده با ذرات پلی‌تترافلورواتیلن با بزرگنمایی‌های ۱۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ در شکل ۱۶ نشان داده شده است. زبری سطح در ابعاد میکرون در تصاویر با بزرگنمایی ۱۰۰۰ و ۵۰۰۰ قابل مشاهده است. بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ وجود تجمعات در ابعاد میکرون و ذرات محصورشده در تجمعات را آشکار می‌سازد. پنگ<sup>۱</sup> و همکارانش پوشش ضدیخ آب‌گریزی با استفاده از پلی‌وینیلیدین فلوراید و آمونیم بی‌کربنات ( $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ) تهیه کردند. آن‌ها خواص آب‌گریزی سطح پره‌ی توربین بادی بدون پوشش را با پوشش پلی‌وینیلیدین فلوراید و با پوشش پلی‌وینیلیدین فلوراید همراه با آمونیم بی‌کربنات مورد بررسی قرار دادند. زاویه تماس قطره‌ی آب بر روی سطح پره‌ی توربین بدون پوشش برابر با  $80 \pm 2$  درجه بود. شکل ۱۷ تصاویر SEM و زاویه تماس قطره‌ی آب بر روی سطح پوشش داده با پلی‌وینیلیدین فلوراید و شکل ۱۸ تصاویر SEM و زاویه تماس قطره‌ی آب بر روی سطح پوشش داده پلی‌وینیلیدین فلوراید همراه با آمونیم بی‌کربنات نشان می‌دهد.

<sup>۱</sup> Peng



شکل ۱۷- (الف) تصاویر SEM و (ب) زاویه تماس قطره آب بر روی سطح پوشش داده با پلی‌وینیلیدین فلوراید [۲۴].



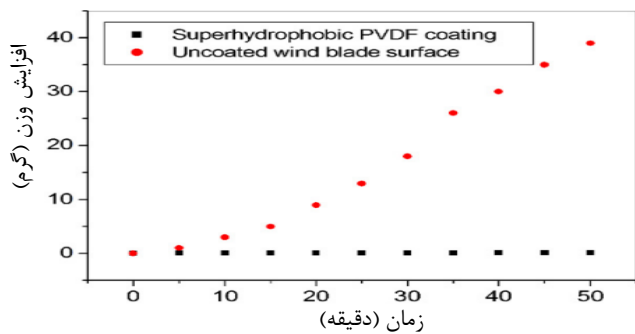
شکل ۱۸- (الف) تصاویر SEM و (ب) زاویه تماس قطره آب بر روی سطح پوشش داده با پلی‌وینیلیدین فلوراید و آمونیم بی‌کربنات [۲۴].

به همراه خواهد داشت. همچنین، در صورتی که سامانه حرارتی<sup>۳</sup> تنها در قسمت لبه حمله<sup>۴</sup> پره تعبیه شود با توجه به ماهیت آب دوست پره، بازهم جریان آب بازگشتی به سمت لبه‌ی انتهایی پره یخ می‌زند. به همین علت، با اعمال پوششی آب‌گریز بر روی سطح پره احتمال یخ زدن جریان آب بازگشتی به سمت لبه‌ی فرار<sup>۵</sup> کاهش می‌یابد.

شکل ۲۰ طرح‌واره‌ای از سامانه طراحی شده را نشان می‌دهد. برای یک مقایسه کمی در خصوص تاثیر قابلیت ترشوندگی سطح بر روی فرآیند یخ زدن، نیروهای موئینگی که با لغزش قطرات آب روی سطح پره بدون پوشش و سطح پوشش داده شده با پوشش آب‌گریز تجاری hydrobead مطابق رابطه ۸ مقایسه شدند.

$$F_{capillary} = \pi R \gamma_{LG} [\sin(\frac{\theta_{adv} - \theta_{rec}}{2}) \sin(\frac{\theta_{adv} + \theta_{rec}}{2})] \quad (8)$$

که R شعاع قطره آب،  $\gamma_{LG}$  کشش سطحی در خط تماس و  $\theta_{adv}$  و  $\theta_{rec}$  به ترتیب زاویه‌های تماس پیشرو و پسرو هستند. با استفاده از این فرمول نسبت نیروی موئینگی سطح ابرآب‌گریز به سطح آب دوست برابر با ۰.۴٪ محاسبه شد.



شکل ۱۹- رابطه بین افزایش وزن ناشی از یخ‌زدگی روی نمونه‌ها و زمان پاشش قطرات آب فوق سرد [۲۴].

آمونیم بی‌کربنات دمای تجزیه<sup>۱</sup> پایین (در حدود ۶۰ °C) دارد. هنگامی که پوشش حاوی آمونیم بی‌کربنات در دمای ۸۰ °C خشک می‌شود، آمونیم بی‌کربنات به آمونیاک، آب و دی‌اکسید کربن تجزیه می‌شوند. فراریت پیوسته آمونیاک، آب و دی‌اکسید کربن منجر به شکل‌گیری منافذ بسیاری در پوشش پلی‌وینیلیدین فلوراید می‌شود. بر اساس نتایج ارائه شده، میکروساختار متخلخل می‌تواند هوا را به دام بیندازد. پوشش تهیه‌شده زاویه‌ی لغزش<sup>۲</sup> کمی دارد و قطرات آب می‌توانند به آسانی روی سطح بلغزند.

در واقع میکروساختار متخلخل و گروه آب‌گریز CF<sub>2</sub>- مشخصه ابرآب‌گریز را فراهم می‌نماید. پوشش پلی‌وینیلین ابرآب‌گریز می‌تواند با مدل کیسی-بکستر توصیف شود. این رابطه پیش‌بینی می‌نماید که افزایش کسر هوا f<sub>2</sub> باعث افزایش زاویه تماس پوشش می‌گردد. مقدار f<sub>2</sub> محاسبه‌شده برای پوشش ابرآب‌گریز پلی‌وینیلیدین ۰/۸۸ است. به این معنا که هوا ۸۸٪ سطح تماس را اشغال می‌نماید.

آزمون ضدیخ برای نمونه‌ی بدون پوشش و نمونه‌ی پوشش داده شده با پوشش ابرآب‌گریز پلی‌وینیلیدین در یک محفظه با دمای کنترل‌شده‌ی ۱۰ °C انجام شد. نمونه‌ها در محفظه قرار گرفتند و قطرات آب با دمای حدود ۰ °C توسط آب‌پاش روی سطح نمونه‌ها پاشش شدند. برای ارزیابی مشخصه‌ی ضدیخ و تجمع یخ روی سطح نمونه، نمونه‌ها در فواصل یک دقیقه‌ای توزین شدند. پیش از پاشش قطرات فوق سرد نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۱۰ °C قرار گرفتند. شکل ۱۹، رابطه بین افزایش وزن ناشی از یخ‌زدگی روی نمونه‌ها و زمان پاشش قطرات آب فوق سرد را نشان می‌دهد [۲۵].

در پژوهشی سامانه‌ی دوگانه با استفاده از روش فعال حرارت‌دهی و استفاده از یک پوشش ضدیخ تجاری طراحی شد. این طراحی با این استدلال انجام شد که به‌کارگیری سامانه فعال حرارتی برای کل سطح پره مصرف بالای انرژی را

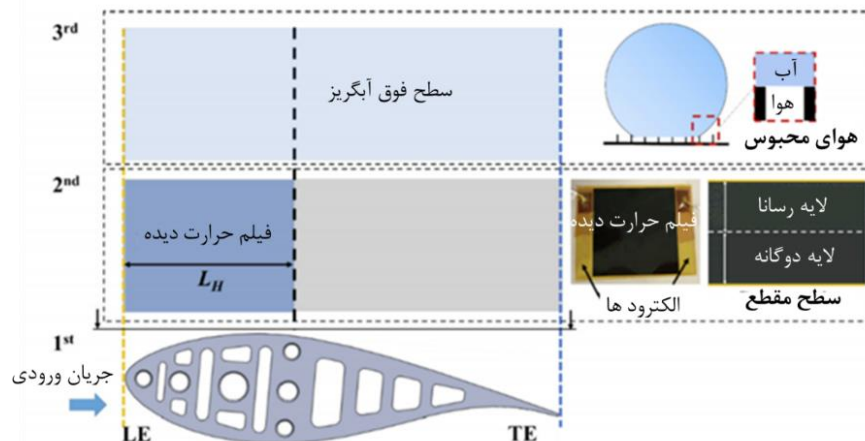
<sup>3</sup> Heating element (HE)

<sup>4</sup> Leading edge

<sup>5</sup> Trailing edge

<sup>1</sup> Decomposing temperature

<sup>2</sup> Sliding angle



شکل ۲۰- طرح‌واره سیستم دوگانه طراحی شده با خاصیت ضدیخ/ یخ‌زدایی [۲۶].

طراحی شده را نشان می‌دهد. در محلول قلیایی، پروتون‌زدایی گروه هیدروکسیل دوپامین روی ساختار اسید هیالورونیک- دوپامین منجر به شکل‌گیری کوئینون می‌شود و سپس اتصال عرضی پلیمر اسید هیالورونیک- دوپامین ایجاد می‌شود. در طراحی یک پوشش با لایه‌ی روان‌کننده آبی دو نکته حائز اهمیت است:

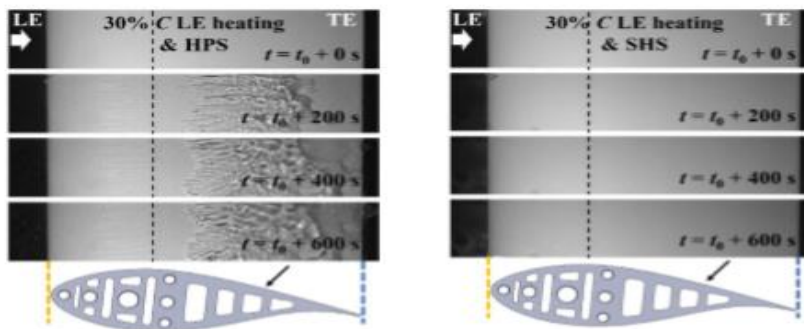
- قابلیت اعمال پوشش بر روی سطوح مختلف
- قابلیت تنظیم ضخامت لایه روان‌کننده

در طراحی این پوشش دو نکته بالا در نظر گرفته شده‌اند. اسید هیالورونیک دارای گروه‌های هیدروکسیل و کربوکسیل بوده و از نظر حفظ رطوبت منحصر به فرد می‌باشد. از طرفی دوپامین قابلیت چسبندگی بر روی طیف وسیعی از سطوح آلی و معدنی را دارا می‌باشد. از این روی دوپامین با هدف اصلاح اسید هیالورونیک توسط واکنش با گروه‌های کربوکسیل در سامانه حاضر به کار می‌رود. در واقع با تنظیم نسبت مولی اسید هیالورونیک به دوپامین ورودی، ضخامت فیلم کنترل می‌گردد [۲۶].

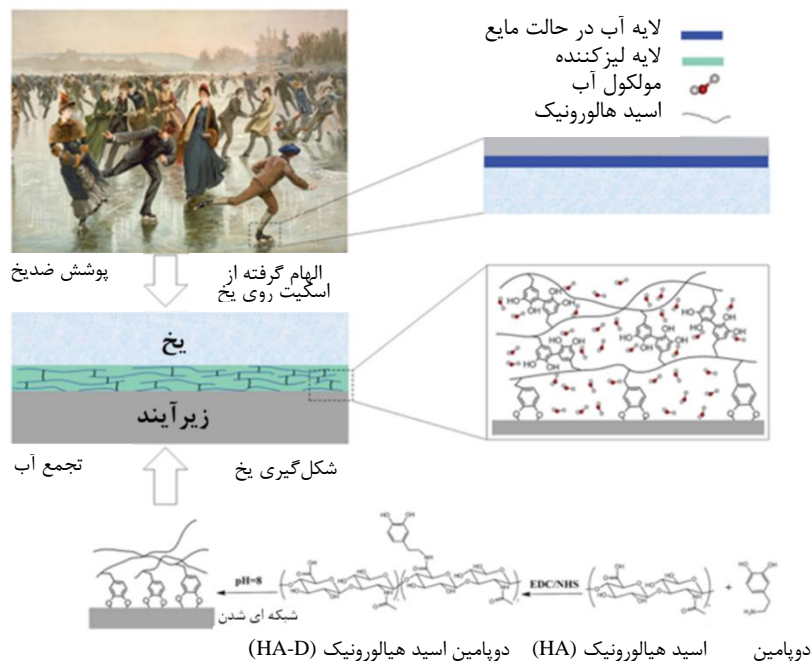
شکل ۲۱ عملکرد روش حرارت‌دهی را بر روی پره‌ی بدون پوشش و دارای ماهیت آب‌دوست<sup>۱</sup> (سمت چپ) و پره‌ی پوشش داده شده با پوشش ابرآب‌گریز<sup>۲</sup> (سمت راست) برای شرایطی که روی ۳۰٪ سطح پره سامانه‌ی حرارتی تعبیه شده باشد را نشان می‌دهد [۲۵].

چن<sup>۳</sup> و همکارانش با الهام از حرکت اسکیت بر روی سطوح یخ، پوششی با خاصیت ضدیخ با استفاده از اسید هیالورونیک<sup>۴</sup> طراحی کردند. در واقع خاصیت جذب آب بالای اسید هیالورونیک منجر به شکل‌گیری لایه‌روان‌کننده آبی<sup>۵</sup> می‌گردد. همچنین از دوپامین<sup>۶</sup> برای محکم شدن اسید هیالورونیک بر روی سطح استفاده گردید. در عین حال دوپامین به‌عنوان عامل پیونددهنده عمل می‌نماید. شکل ۲۲ جزئیات پوشش

- 1 Hydrophilic surface (HPS)
- 2 Superhydrophobic surface (SHS)
- 3 Chen
- 4 Hyaluronic acid
- 5 Aqueous lubricant layer
- 6 Dopamine

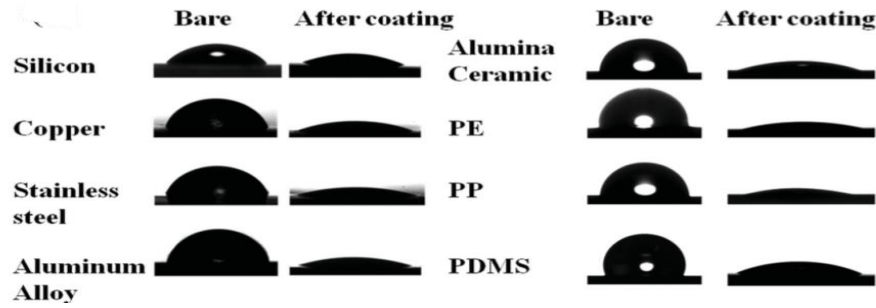


شکل ۲۱- عملکرد روش حرارت‌دهی بر روی پره‌ی بدون پوشش و دارای ماهیت آب‌دوست (سمت چپ) و پره‌ی پوشش داده شده با پوشش ابرآب‌گریز (سمت راست) [۲۵].



شکل ۲۲- جزئیات پوشش طراحی شده با اسید هیالورونیک و دوپامین [۲۶].

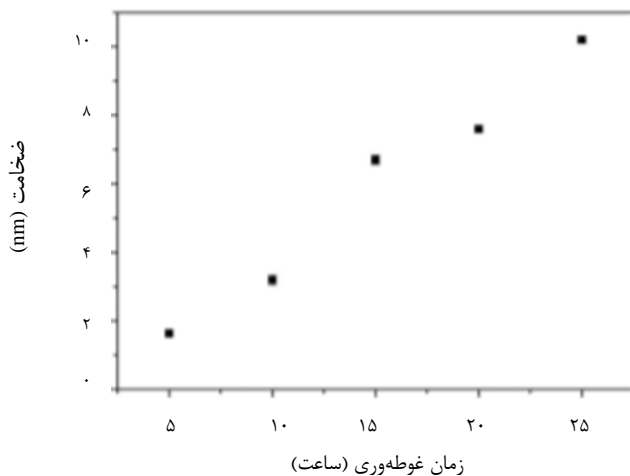




شکل ۲۳- زاویه تماس قطرات آب قبل و بعد از اعمال پوشش اسید هیالورونیک- دوپامین [۲۶].

پلی تترافلورواتیلن استفاده کردند. پراکنه پلی تترافلورواتیلن شامل کلوئیدهای با بار منفی با قطر ۰/۱ تا ۰/۳ میکرون پراکنده شده در آب و حاوی ۶۰٪ رزین است. نمونه‌های پره به مدت ۲ دقیقه در محلول پراکنه رقیق شده با نسبت ۱:۱ آب دی‌یونیزه و پلی تترافلورواتیلن غوطه‌ور شدند. در ادامه نمونه‌ها با هوای تحت فشار خشک و به مدت ۱ دقیقه در دمای ۲۹۰ °C در محیط آرگون پخت شدند. این عملیات برای بار دوم هم تکرار شد با این تفاوت که مرحله پخت به ۲ دقیقه تغییر یافت. در طی عملیات پخت، عامل ترک‌کننده تبخیر شده و ذرات رزین یک فیلم همگن را تشکیل می‌دهند. ضخامت فیلم خشک‌شده در حدود ۳۰ میکرون است.

تصویر SEM سطح پره بدون پوشش و پس از اعمال پلی تترافلورواتیلن در شکل ۲۷ نشان داده شده است. این شکل‌ها تغییر میکروساختار پره را بعد از اعمال پلی تترافلورواتیلن را نشان می‌دهد. براساس این تصاویر، سطح پره بدون پوشش دارای تخلخل زیاد است. این تخلخل بارگذاری پلی تترافلورواتیلن را تسهیل می‌نماید. گرانبوی پایین، ذرات با اندازه کوچک و تاثیر مواد فعال سطحی ترشوندگی سطح پایینی را میسر می‌سازد. سطح پره‌ی بدون پوشش دارای تخلخل نایک‌نواخت با زبری بزرگ‌تر از ۲/۷۵ میکرون است و سطح پوشش داده شده از ذرات ریز چند ده نانومتری تشکیل شده است [۲۸].



شکل ۲۴- رابطه بین زمان غوطه‌وری و ضخامت فیلم [۲۶].

پوشش تهیه شده به شیوه غوطه‌وری بر روی سطوح متعددی اعمال گردید. سپس سطوح با آب خالص شستشو داده شده و تحت اتمسفر نیتروژن خشک شدند. با توجه به ظرفیت بالای حفظ آب اسید هیالورونیک، هنگامی که دما کاهش می‌یابد، آب روی سطح جذب می‌گردد و پلیمر اسید هیالورونیک - دوپامین روی سطح متورم می‌گردد که هم‌زمان با یخ‌زدگی، منجر به شکل‌گیری یک لایه روان‌کننده می‌شود. چسبندگی یخ بر روی چنین سطوحی بسیار کمتر است که حذف آسان یخ شکل‌گرفته را میسر می‌سازد. شکل ۲۳ زاویه تماس قطرات آب قبل و بعد از اعمال پوشش اسید هیالورونیک- دوپامین را نشان می‌دهد. ضخامت فیلم پوشش ضد یخ با تغییر زمان غوطه‌وری قابل تنظیم است. شکل ۲۴ رابطه بین زمان غوطه‌وری و ضخامت فیلم را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار ضخامت فیلم به طور خطی با زمان غوطه‌وری افزایش می‌یابد [۲۷].

کارموج<sup>۱</sup> و راس<sup>۲</sup> [۲۷] با بهره‌گیری از رزین سیلیکون، پلیمر اکریلیک و نانوذرات سیلیکای تجاری، پوشش آب‌گریز برای حفاظت از پره‌های توربین در برابر یخ‌زدگی تهیه نمودند. زاویه تماس قطره آب بر روی سطح پوشش اعمال شده برابر با ۱۵۲ درجه بود. تصاویر SEM سطح پره‌ی توربین بادی قبل از اعمال پوشش در شکل ۲۵ نشان داده شده است. براساس تصاویر ارائه شده سطح پره نایک‌نواخت و با مقادیر زبری بیشتر از ۲/۷۵ میکرون می‌باشد. در واقع نانوذرات سیلیکا می‌توانند فضاهای مابین تخلخل‌ها را پر نموده و موئینگی را تقویت نمایند.

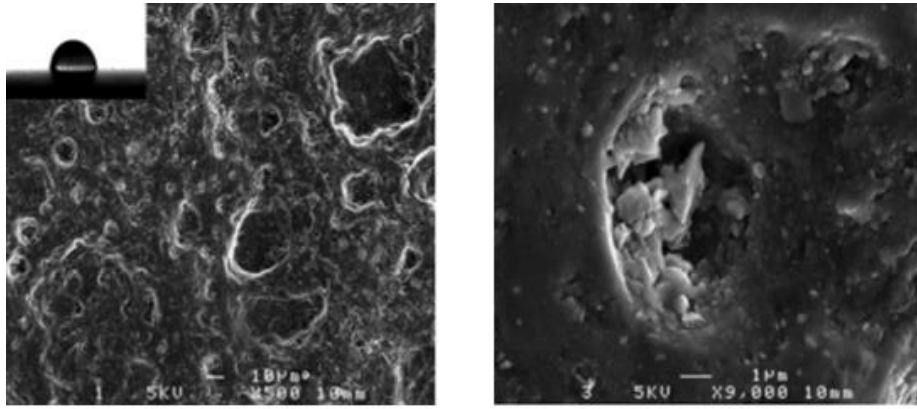
شکل ۲۶ تصاویر SEM سطح پره را بعد از اعمال پوشش تهیه شده با نانوذرات سیلیکا نشان می‌دهد. براساس این تصاویر، گوی‌های در ابعاد میکرون به صورت بی‌نظم بر روی سطح توزیع شده‌اند. این گوی‌ها خود از ذرات بسیار کوچک‌تر سیلیکا تشکیل شده‌اند. سطح حاصل شده با ساختار میکرو/نانو امکان به دام‌انداختن هوا بین سطح و آب را فراهم می‌کند که برای یک سطح آب‌گریز مناسب است [۲۸]. با کاهش دما زاویه تماس آب بر روی سطح به ۱۴۰ درجه کاهش یافت. به این معنا که یک سطح آب‌گریز لزوماً رفتار یخ‌گریز ایده‌آلی در نزدیکی نقطه انجماد از خود نشان نمی‌دهد [۲۷].

کارموج و همکارانش [۲۷] از روش ساده غوطه‌وری نمونه پره در پراکنه

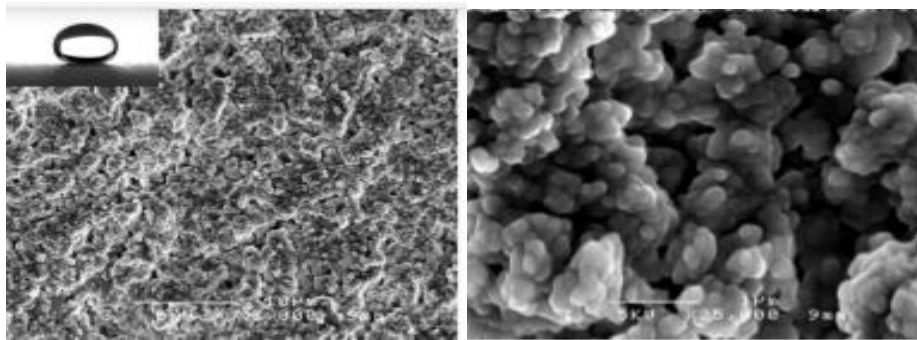
<sup>1</sup> Karmouch

<sup>2</sup> Ross

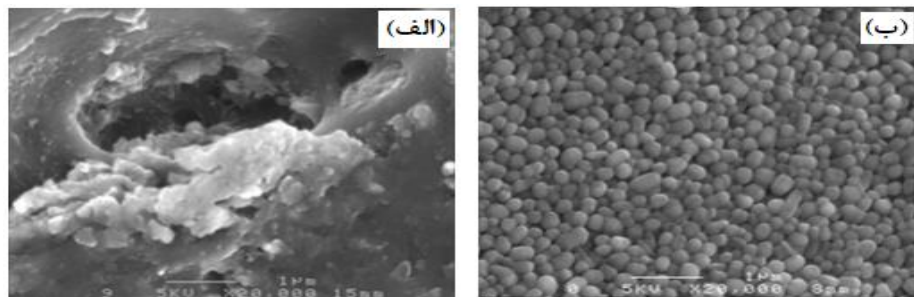




شکل ۲۵- تصاویر SEM پره‌ی توربین پیش از اعمال پوشش با دو بزرگنمایی متفاوت [۲۷].



شکل ۲۶- تصاویر SEM سطح پره بعد از اعمال پوشش حاوی نانوذرات سیلیکا [۲۷].



شکل ۲۷- (الف) تصاویر SEM سطح پره بدون پوشش و (ب) سطح پوشش داده‌شده با ذرات پلی‌تترافلئورواتیلن [۲۸].

ارزیابی شد. در آزمایش ضدیخ ایستا، تاخیر زمان انجماد قطرات آب مجزا رنگ شده با متیلن آبی روی سطح آلومینیم بدون پوشش و پوشش داده شده انجام شد. بر روی سطح آلومینیم بدون پوشش، قطرات آب به سرعت در مدت ۷ ثانیه منجمد شدند و انجماد کامل ۲۸ ثانیه طول کشید. قطرات آب بر روی سطح پوشش داده‌شده در مدت ۱۲۳۱ ثانیه کدر شدند و در ۱۴۷۲ ثانیه به‌طور کامل منجمد شدند که در مقایسه با سطح بدون پوشش ۵۰ برابر آهسته‌تر بود. تاخیر زمان انجماد به دو علت زیر حاصل شده است:

۱. بالشتک‌های هوای موجود بین پوشش و قطرات مایع مانع انتقال حرارت می‌شوند.
۲. سطح تماس بین سطح و قطرات مایع کوچک است که سطح کمتری

هونگ<sup>۱</sup> و همکارانش [۲۹] پوششی بر پایه پلی‌دی‌متیل سیلوکسان (PDMS) تهیه کردند. این پوشش به روش پاششی اعمال گردید. عملکرد این پوشش از جنبه‌های مختلف بررسی شد. برای بررسی عملکرد یخ‌گریز پوشش، قدرت چسبندگی در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  - اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج آزمون انجام‌شده، چسبندگی روی سطح پوشش داده شده در حدود ۵ برابر کمتر از نمونه فاقد پوشش بود. در واقع مایع روی سطح ابرآب‌گریز سطح تماس کمی با زیرآیند دارد و بنابراین قدرت چسبندگی کمتر است. همچنین، مشخصه‌ی ضدیخ پوشش‌های ابرآب‌گریز در محیط بیرون توسط آزمایش‌های ایستا و پویا در دمای  $15^{\circ}\text{C}$  - و رطوبت ۷۰٪

<sup>1</sup> Hong

را به طور قابل توجهی کاهش می دهند و از عملکرد ضد یخ مناسبی برخوردار هستند. در این پژوهش ابتدا سیلیکای ریزمتخلخل سنتز شدند و سپس روغن لغزنده یا پلیمر آب دوست توسط قرارگیری مخلوط کره ها و پلیمر در یک محیط خلا داخل منافذ بارگذاری شد و یا روی سطح کره های متخلخل جذب گردید. سپس توسط اختلاط فیزیکی با رابر سیلیکونی، محصول تهیه شده بر روی صفحه آلومینیم به شیوه لایه نشانی چرخشی اعمال گردید. تحت شرایط یخ زدگی در دمای پایین، در مرحله اول ماده عاملی لایه سطحی مصرف می شود. بنابر عمل موئینگی ساختار ریزمتخلخل، و نفوذ حاصل از گرادیان غلظت، ماده ی ذخیره شده در ساختار ریزمتخلخل سیلیکا می تواند به آرامی از داخل ساختار سیلیکا جایی که غلظت بالا است به سطح سیلیکا جایی که غلظت ماده ی عاملی کم شده نفوذ کند. شکل ۲۹ تصویر SEM و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) ذرات سیلیکای سنتز شده را نشان می دهد. بر اساس این تصاویر نانوکره های سیلیکا با ساختار توخالی سنتز شده است [۱۴]. نتایج آزمون یخ زدگی نمونه ها در دمای  $10^{\circ}\text{C}$  - نشان داد که پوشش تهیه شده با ساختار سیلیکای ریزمتخلخل با سطح ویژه بالا و خاصیت جذب قوی، عملکرد قابل قبولی دارند [۱۴].

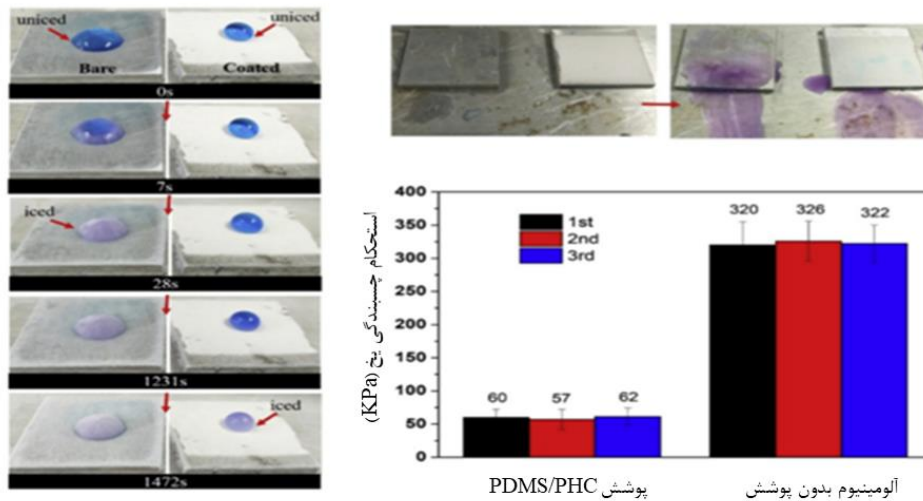
را برای هسته گذاری یخ فراهم می کند و توسعه صفحه یخی را محدود می نماید.

آزمایش ضد یخ پویا با استفاده از رهائش جریان آب با ارتفاع ۱ سانتی متر بر روی سطح نمونه ها تحت زاویه ۵ درجه انجام شد. بر روی سطح بدون پوشش به تدریج یخ رشد نمود و بعد از چندین دقیقه یک بلوک بزرگ یخی شکل گرفت. در مقابل، یخ روی سطح پوشش داده شده تشکیل نشد که نشان دهنده خواص ضد یخ پویای عالی برای نمونه پوشش داده شده است. نتایج آزمون های بررسی عملکرد سطح آلومینیم پوشش داده شده و فاقد پوشش در شکل ۲۸ نشان داده شده است [۲۹].

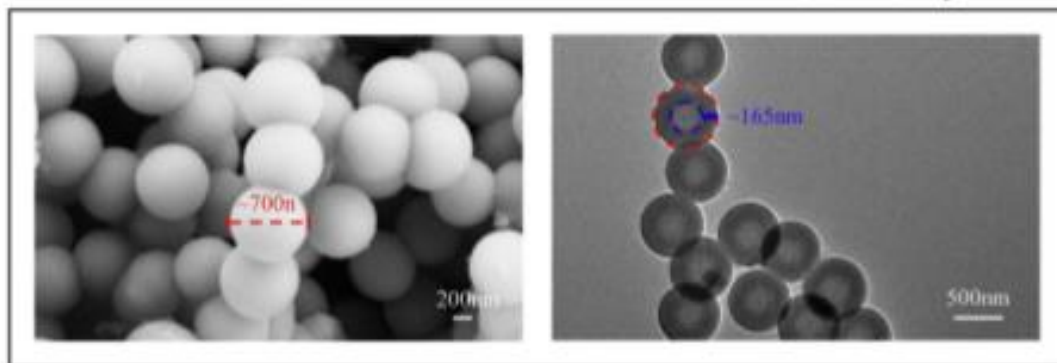
ون<sup>۱</sup> و همکارانش [۱۴] از ذرات سیلیکای ریز متخلخل با سطح ویژه بالا به عنوان حامل مقدار زیادی از مواد عامل دار با مشخصه های روان کنندگی و نگهدارندگی رطوبت استفاده کردند. هدف از این امر تهیه یک SLIPS<sup>۲</sup> بود. این مواد به کمک سطح پوشیده شده با لایه ی لغزنده، هوای سرد و یا قطرات را از سطح سرد ایزوله می کنند. تا در واقع بیشتر سطح یخ در تماس با روغن لغزنده قرار گیرد که چسبندگی یخ به سطح

<sup>1</sup> Wen

<sup>2</sup> Slippery Liquid -infused Porous Surface



شکل ۲۸ - نتایج بررسی خاصیت ضد یخ ایستا (سمت چپ)، بررسی خاصیت ضد یخ پویا (سمت راست، بالا) و قدرت چسبندگی یخ (سمت راست، پایین) [۲۹].



شکل ۲۹ - تصویر SEM (سمت چپ) و TEM (سمت راست) کره های سیلیکای سنتز شده [۱۴].

#### ۴- روش‌های اعمال و تولید انبوه پوشش

چندین روش برای اعمال پوشش‌ها در دسترس است. در آزمایشگاه‌ها غوطه‌وری، لایه‌نشانی چرخشی، پاشش و روش‌های مختلف رسوب‌دهی بخار استفاده می‌شود. از مزایای این روش‌ها امکان کنترل عوامل مختلف است و پوشش دارای مشخصه‌های لازم از جمله ساختار سطحی، ضخامت و غیره است. به هر حال این روش‌ها برای تولید انبوه مناسب نیستند. برای کاربردهای واقعی اکثر سامانه‌های پوششی مانند پوشش‌رنگ رفتار خواهند کرد و پاشش و استفاده از برس روش‌هایی هستند که بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای مقیاس صنعتی، سطوح صاف به علت سهولت در مقایسه بر سطوح زبر ارجحیت بیشتری دارند [۸].

#### ۵- روش‌های متداول برای ارزیابی دوام پوشش سطح‌های

##### ابرآب‌گریز / یخ‌گریز

برای درک بهتر دوام سطوح ابرآب‌گریز/ضد یخ به‌عنوان حیطة‌ای که به تازگی گسترش یافته است، دستورالعمل‌های استاندارد وجود ندارد [۳۲]. چند روش برای ارزیابی عملکرد این پوشش‌ها به شرح زیر می‌باشد.

##### ۵-۱- آزمون‌های ارزیابی مقاومت در برابر یخ زدن/چسبندگی یخ

##### ۵-۱-۱- آزمون چسبندگی یخ

در مراجع مختلف از شیوه‌های متفاوتی برای ارزیابی قدرت چسبندگی یخ بر روی سطوح استفاده شده است. شکل ۳۰ یکی از دستگاه‌های طراحی شده به این منظور را نشان می‌دهد.

در پژوهشی دیگر، پوششی با بهره‌گیری از اندازه کوچک ذرات سیلیکا با خواص آب‌گریزی مطلوب تهیه شد. در این پژوهش ابتدا سیلیکا ژل تحت شرایط تقطیر برگشتی تهیه شد و سپس با استفاده از پلی‌دی‌متیل سیلوکسان با گرانش‌های متفاوت، اروزیل و ایزوپروپانل پوشش آب‌گریز تهیه گردید. همچنین تاثیر عوامل مختلف بر روی زاویه تماس پوشش تهیه‌شده بررسی گردید و مشاهده شد که با تغییر گرانش پلی‌دی‌متیل سیلوکسان به ۲۰۰۰ cSt، زاویه تماس آب بر روی سطح پوشش تهیه‌شده برابر با ۱۷۴ درجه می‌شود [۳۰].

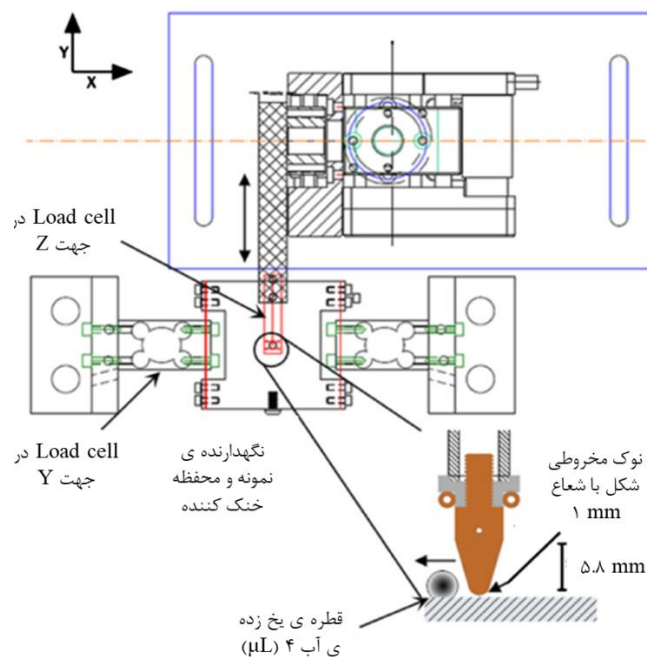
#### ۳-۲- روش‌های فعال<sup>۱</sup>

یکی از این روش‌ها، استفاده از مواد شیمیایی می‌باشد. پوشش‌ها می‌توانند با هدف کاهش نقطه‌ی انجماد همراه با مواد شیمیایی از جمله پروتئین‌های ضدانجماد استفاده شوند. با بهره‌گیری از سیالات تضعیف‌کننده نقطه انجماد می‌توان از یخ زدن قطرات آب با دمای بسیار کم جلوگیری نمود.

یکی دیگر از روش‌های فعال روش مکانیکی می‌باشد. در این روش یخ به‌طور فیزیکی توسط آزادسازی انرژی، ارتعاشات و حرکت سازه شکسته می‌شود تا جدا شدن آن از سطح تسهیل گردد.

روش دیگر روش حرارتی می‌باشد. یک روش اثبات‌شده برای جلوگیری از تجمع یخ، نگهداری سطح موردنظر در دمای بالاتر از نقطه‌ی انجماد است. این روش نیازمند یک منبع انرژی خارجی می‌باشد. المنت گرمایش الکتریکی، فلز و الیاف کربن به‌کار رفته در این روش در معرض رعد و برق هستند و می‌بایست حفاظت شوند [۵].

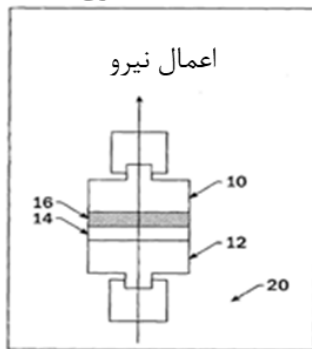
<sup>۱</sup> Active



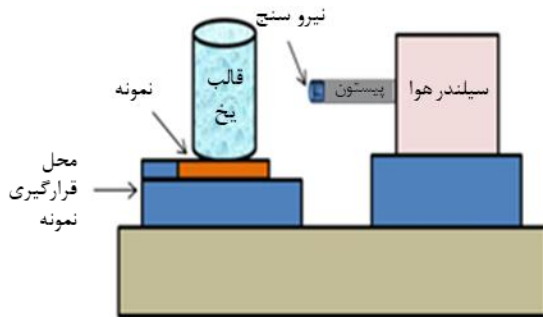
شکل ۳۰- طرح‌واره‌ای از دستگاه طراحی شده برای ارزیابی قدرت چسبندگی یخ [۳۲].

محفظه خنک کننده، قطره آب (۵ میکرولیتر) روی سطح نمونه در دمای °C ۱۰- قرار گرفته و مدت زمانی که قطره کاملاً کدر شود (نشانه ی یخ زدگی) مدت زمان تاخیر یخ زدگی می باشد. به دلیل تفاوت در ضریب شکست آب هنگام یخ زدن، قطره به صورت کدر مشاهده می شود. شکل ۳۳ مربوط به آزمون زمان تاخیر یخ زدگی برای نمونه های فولادی (تصویر بالایی) و پوشش اپوکسی ابرآب گریز (تصویر پایینی) می باشد [۳۵].

محفظه تحت کنترل دما



شکل ۳۱- طرح‌واره‌ای از دستگاه طراحی شده برای ارزیابی قدرت چسبندگی یخ [۳۳].



شکل ۳۲- طرح‌واره دستگاه آزمون چسبندگی یخ [۳۴].

در این روش ابتدا نمونه موردنظر در جایگاه قرار می گیرد و پس از انجام تنظیمات لازم نمونه تا دمای برابر و یا کمتر از °C ۱۰ سرد می گردد. تنش برشی با نسبت نیروی برشی به سطح تماس محاسبه می گردد و قدرت چسبندگی یخ با تنش برشی که یخ از سطح نمونه جدا می شود، گزارش می گردد [۳۲]. شکل ۳۱ روش دیگری برای ارزیابی قدرت چسبندگی یخ را نشان می دهد. در این روش دستگاه داخل محفظه‌ای با دمای کنترل شده قرار می گیرد. مطابق شکل ارائه شده، صفحات ۱۰ و ۱۲ از جنس آلومینیم بوده و در مقابل یکدیگر قرار دارند. پوشش مورد ارزیابی ۱۴ بر روی سطح آلومینیم پایینی قرار می گیرد. سپس آب بین سطح آلومینیم بالایی و سطح پوشش قرار می گیرد و در محفظه ۲۰ تا دمای °F ۲۰ سرد می گردد تا یک لایه جامد تشکیل گردد. صفحات آلومینیمی با سرعت ۰/۰۰۲ in/min کشیده می شوند و تنش در نقطه‌ی جدایش به همراه نوع شکست (پیوستگی/چسبندگی) گزارش می گردد [۳۴].

در تحقیق صورت گرفته توسط ژنگ<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۶ [۳۴]، دستگاهی تحت این عنوان طراحی و ساخته شد. این دستگاه شامل یک محفظه یخ، نگهدارنده‌ی نمونه و سیندر هوا مجهز به گیج فشار می باشد (شکل ۳۲). یک استوانه تو خالی با قطر ۱۸ میلی متر روی نمونه قرار میگیرد و درون آن از آب دی یونیزه پر می شود. سپس، این استوانه درون محفظه قرار گرفته و به مدت حداقل ۲۴ ساعت تحت دمای °C ۱۰- قرار می گیرد. در ادامه، پیستون توسط پمپ هوا با سرعت ثابت به سمت ستون یخ جلو می رود. پس از لمس پیستون و ستون یخی، نیروی فشاری با سرعت ۱۲/۵ N/s افزایش می یابد تا یخ شکسته و از نمونه جدا شود. نیروی فشاری هنگام شکست یخ (F) و همچنین سطح تماس یخ (A) اندازه گیری و به وسیله رابطه ۹، چسبندگی یخ ( $\tau$ ) محاسبه می شود.

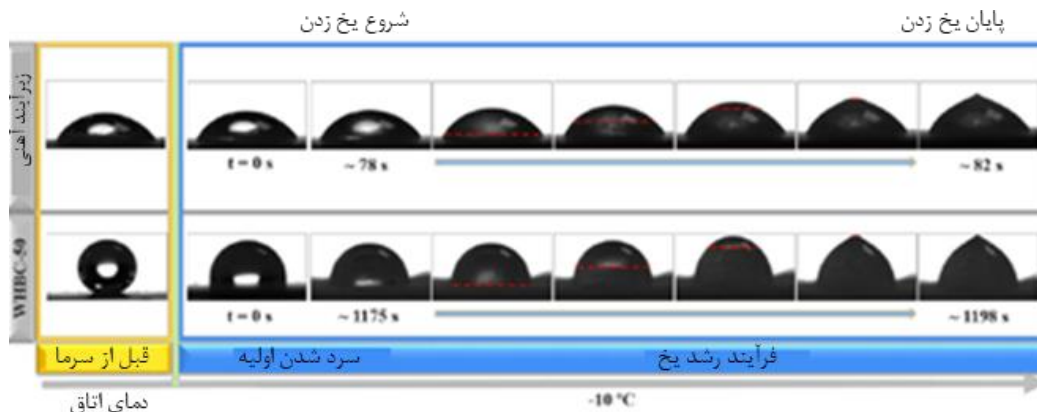
$$\tau = \frac{F}{A} \quad (9)$$

### ۵-۱-۲- آزمون زمان تاخیر یخ زدگی<sup>۲</sup>

به کمک دستگاه اندازه گیری زاویه تماس مجهز به دوربین CCD درون

<sup>1</sup> Zheng

<sup>2</sup> Icing delay time



شکل ۳۳- آزمون زمان یخ زدگی برای زیرآیند فلزی و پوشش ابرآب گریز [۳۵].

### ۵-۱-۳- دمای یخ زدگی

دستگاه اندازه‌گیری زاویه تماس مجهز به دوربین CCD درون محفظه خنک‌کننده در این آزمون مورد استفاده قرار می‌گیرد. قطره آب (۵ میکرولیتر) در دمای اتاق بر روی سطح ریخته و دستگاه خنک‌کن با سرعت  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  تا دمای صفر درجه سانتی‌گراد خنک می‌شود. سپس دمای سطح با نرخ  $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$  تا پدیده یخ زدگی (که با کدر شدن قطره‌ی آب در تصویر همراه است) کاهش می‌یابد. در مطالعه صورت گرفته توسط ژنگ در سال ۲۰۱۹ دمای یخ‌زدگی برای پوشش ابر آب‌گریز  $21^{\circ}\text{C}$  - می‌باشد در صورتی که برای زیرآیند فولادی  $13^{\circ}\text{C}$  - می‌باشد [۳۵].

### ۵-۱-۴- آزمون چسبندگی یخ به وسیله سانتریفیوژ<sup>۱</sup>

در مطالعات انجام شده توسط آزمایشگاه بین‌المللی مواد ضد یخ در سال ۲۰۰۵ [۳۶]، از سانتریفیوژ برای اندازه‌گیری چسبندگی یخ بر روی پوشش‌ها استفاده شد. در سانتریفیوژ از یک تیغه آلومینیمی با ابعاد  $34 \times 16 \times 3/2$  میلی‌متر که یک سمت آن برای قرارگیری پوشش (به صورت توخالی) و سمت دیگر برای قرارگیری وزنه‌ی معادل یخ برای ایجاد تعادل هنگام چرخش مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۳۴). همچنین، از یک تیغه دیگر نیز به عنوان مرجع استفاده می‌شود (شکل ۳۵). تیغه‌ها در ابتدا وزن شده و به وسیله ترموکوپل سرد شده و در اتاق سرد قرار می‌گیرند (شکل ۳۶). در این اتاق در دمای  $8^{\circ}\text{C}$  - نمونه‌ها تحت مه

یخ‌زده<sup>۲</sup> قرار می‌گیرند. ضخامت یخ ۱ سانتی‌متری روی نمونه‌ها اعمال می‌شود (نمونه‌ها حین آزمون وزن می‌شوند). نمونه‌ها تحت سانتریفیوژ در اتاق سرد در دمای  $10^{\circ}\text{C}$  - قرار می‌گیرند. تیغه‌ها با شتاب ثابت  $300$  دور/ثانیه از سرعت صفر تا هنگام جدا شدن یخ می‌چرخند. نیروی گرانشی موجب جدا شدن یخ از پوشش می‌شود. دو سنسور پیزوالکتریک حساس به لرزش در دیواره‌های سانتریفیوژ تعبیه شده که بلافاصله پس از جدا شدن یخ به کامپیوتر سیگنال ارسال می‌کند و سرعت چرخش هنگام جدا شدن گزارش می‌شود. نیروی گرانشی از رابطه  $10$  محاسبه می‌شود [۳۶].

$$F = m r \omega^2 \quad (10)$$

که  $F$  نیروی گرانشی (N)،  $m$  جرم یخ (kg)،  $r$  شعاع تیغه آلومینیمی (m) و  $\omega$  سرعت زاویه‌ای (rad/s) می‌باشد.

از روی نیروی گرانشی، تنش برشی محاسبه می‌شود (رابطه ۱۱).

$$\tau = F/A \quad (11)$$

که  $A$  مساحت یخ زده ( $\text{m}^2$ ) و  $\tau$  تنش برشی (Pa) می‌باشد. ضریب کاهش چسبندگی<sup>۳</sup> از تقسیم تنش برشی پوشش ضد یخ و تنش برشی یخ روی آلومینیم به دست می‌آیند که خروجی نهایی این آزمون می‌باشد.

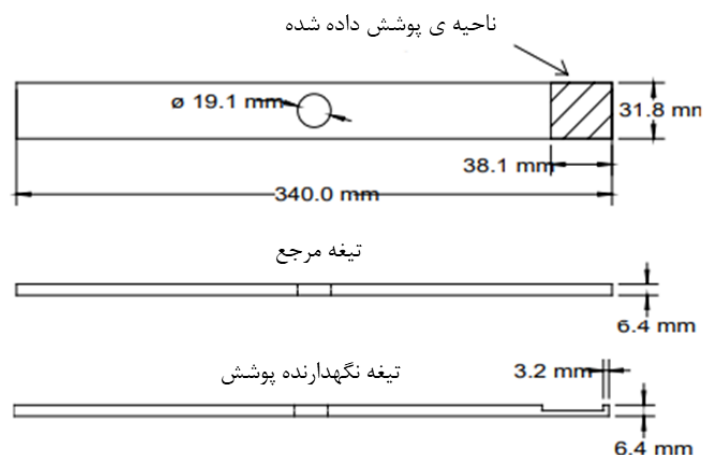
<sup>2</sup> Freng drizzle

<sup>3</sup> Adhesion Reduction Factor

<sup>1</sup> Centrifuge adhesion test

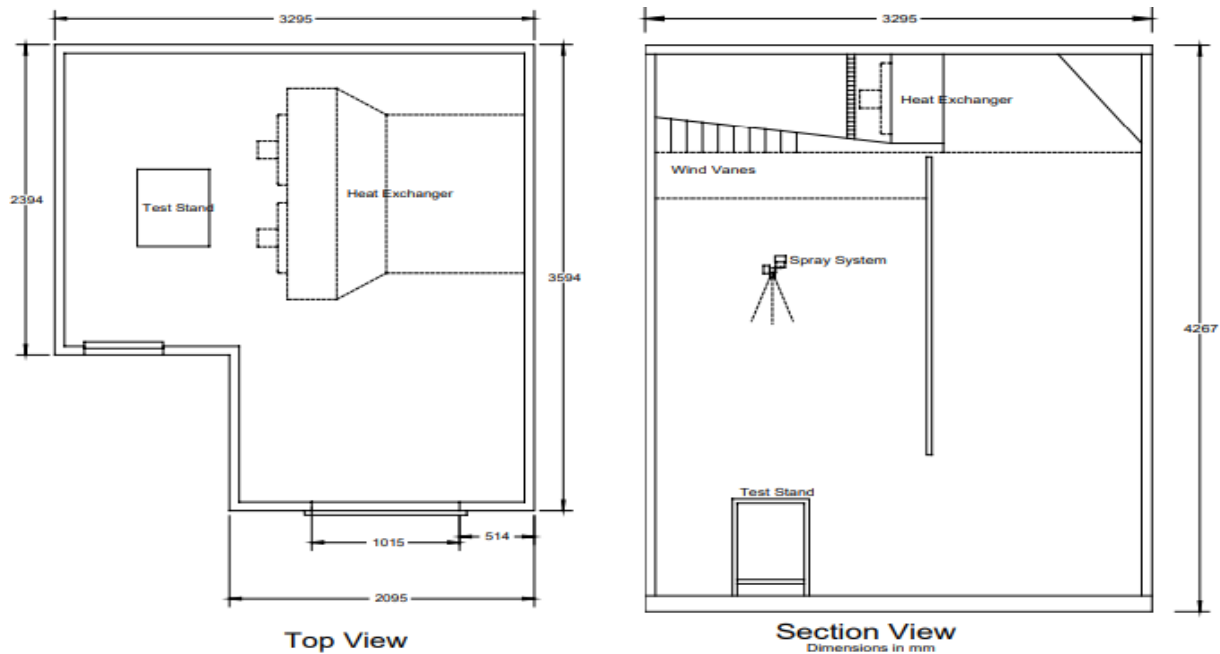


شکل ۳۴- تیغه آلومینیمی مورد استفاده در دستگاه سانتریفیوژ برای اندازه‌گیری چسبندگی یخ [۳۶].



شکل ۳۵- ابعاد تیغه مرجع و تیغه‌ای که نمونه روی آن سوار می‌شود [۳۶].





شکل ۳۶- نمای بالایی و جانبی اتاق سرد [۳۶].

جنبه‌ها به دست می‌آید. با در نظر گرفتن ویژگی‌های مربوط به روش‌های متعدد و بررسی عوامل لازم، رویکردهای قابل قبول برای مواجهه با این مشکل مدنظر قرار می‌گیرند.

#### تقدیر و تشکر

از حمایت مادی و معنوی شرکت مپنا تحت گرنت شماره RD-RPE-99-02 تقدیر و تشکر می‌شود.

#### ۶- نتیجه گیری

یخ‌زدگی برخی از سطوح در صنایع مختلف از جمله پره‌های توربین بادی در صنعت برق، به عنوان یکی از معضلات موجود که منجر به تحمیل هزینه‌های قابل توجهی می‌گردد، از اهمیت زیادی برخوردار است. به این منظور روش‌های متعددی جهت جلوگیری از تشکیل یخ و یا حذف آن توسعه یافته است. روش‌های موجود به دو دسته کلی غیرفعال و فعال تقسیم می‌گردند. روش غیرفعال خود شامل استفاده از پوشش‌های ضد یخ و یخ‌گریز می‌باشد. هر کدام از روش‌ها دارای جنبه‌های منفی و مثبت مختص خود می‌باشند که با استفاده از آزمون‌های ارزیابی متفاوتی این

#### ۷- منابع

1. K. Wei, Y. Yang, H. Zuo, D. Zhong, "A review on ice detection technology and ice elimination technology for wind turbine", *Wind Energy*. 23, 433-457, **2020**.
2. D. Chen, R. E. Cohen, G. H. McKinley, "Anti-icing coatings", USA, PCT/US2017/023477, 2017.
3. H. Makki, H. Yahyaei, M. Mohseni "Superhydrophobic antiicing and ice-release polymer coatings", Elsevier, 2019.
4. O. Parent, A. Ilinca, "Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: Critical review", *Cold Reg. Sci. Technol.* 65, 88-96, **2011**.
5. O. Fakorede, Z. Feger, H. Ibrahim, A. Ilinca, J. Perron, C. Masson, "Ice protection systems for wind turbines in cold climate: characteristics, comparisons and analysis", *Renewable Sustainable Energy Rev.* 65, 662-675, **2016**.
6. W. Liang, Acworth, GA, Viktoria Ren Wang, "Anti-icing composites", US, 13/784,517, 2016.
7. A. Amirfazli, C. Antonini "Fundamentals of Anti-Icing Surfaces", Royal Society of Chemistry, 2016.
8. H. L. Lein "Coatings and surfaces with hydrophobic and anti-icing properties". Elsevier, 14, 2019.
9. S. Zhang, J. Huang, Y. Cheng, H. Yang, Z. Chen, Y. Lai, "Bioinspired surfaces with superwettability for anti-icing and ice-phobic application: concept, mechanism, and design", *Small*. 13, 1701867, **2017**.
10. R. Raj, R. Enright, Y. Zhu, S. Adera, E. N. Wang, "Unified model for contact angle hysteresis on heterogeneous and superhydrophobic surfaces", *Langmuir*. 28, 15777-15788, **2012**.
11. S. Zhang, J. Huang, Y. Tang, et al., "Understanding the Role of Dynamic Wettability for Condensate Microdrop Self-Propelling Based on Designed Superhydrophobic TiO2 Nanostructures", *Small* 13, 1600687, **2017**.
12. D. Richard, C. Clanet, D. Quéré, "Contact time of a bouncing drop", *Nature*. 417, 811-811, **2002**.

13. S. Jung, M. K. Tiwari, N. V. Doan, D. Poulidakos, "Mechanism of supercooled droplet freezing on surfaces" *Nat. Commun.* 3, 1-8, **2012**.
14. S. Wen, Y. Wang, Z. Zhang, Y. Liu, "Application of anti-icing coating based on adsorption of functional substances by microporous sphere", *Prog. Org. Coat.* 137, 105320, **2019**.
15. B. R. Solomon, S. B. Subramanyam, T. A. Farnham, K. S. Khalil, S. Anand, K. K. Varanasi, "*Lubricant-impregnated surfaces*", 2016.
16. V. Upadhyay, T. Galhenage, D. Battocchi, D. Webster, "Amphiphilic icephobic coatings", *Prog. Org. Coat.* 112, 191-199, **2017**.
17. J. Bravo, L. Zhai, Z. Wu, R. E. Cohen, M. F. Rubner, "Transparent superhydrophobic films based on silica nanoparticles", *Langmuir.* 23, 7293-7298, **2007**.
18. I. Yilgor, S. Bilgin, M. Isik, E. Yilgor, "Facile preparation of superhydrophobic polymer surfaces", *Polym.* 53, 1180-1188, **2012**.
19. F. Piscitelli, F. Tescione, L. Mazzola, G. Bruno, M. Lavorgna, "On a simplified method to produce hydrophobic coatings for aeronautical applications", *Appl. Surf. Sci.* 472, 71-81, **2019**.
20. Q. Fu, X. Wu, D. Kumar, "Development of sol-gel icephobic coatings: effect of surface roughness and surface energy", *ACS appl. mater. interfaces*, 6, 20685-20692, **2014**.
21. P. Irajizad, A. Al-Bayati, B. Eslami, et al., "Stress-localized durable icephobic surfaces" *Mater. Horiz.* 6, 758-766, **2019**.
22. J. Chen, R. Dou, D. Cui, et al., "Robust prototypical anti-icing coatings with a self-lubricating liquid water layer between ice and substrate", *ACS appl. mater. interfaces.* 5, 4026-4030, **2013**.
23. C. C. Qin, A. T. Mulrone, M. C. Gupta, "Anti-icing epoxy resin surface modified by spray coating of PTFE Teflon particles for wind turbine blades", *Mater. Today Commun.* 22, 100770, **2020**.
24. C. Peng, S. Xing, Z. Yuan, J. Xiao, C. Wang, J. Zeng, "Preparation and anti-icing of superhydrophobic PVDF coating on a wind turbine blade", *Appl. Surf. Sci.* 259, 764-768, **2012**.
25. L. Gao, Y. Liu, L. Ma, H. Hu, "A hybrid strategy combining minimized leading-edge electric-heating and superhydro-/ice-phobic surface coating for wind turbine icing mitigation", *Renewable Energy.* 140, 943-956, **2019**.
26. J. Chen, Z. Luo, Q. Fan, J. Lv, J. Wang, "Anti-ice coating inspired by ice skating", *Small.* 10, 4693-4699, **2014**.
27. R. Karmouch, G. G. Ross, "Superhydrophobic wind turbine blade surfaces obtained by a simple deposition of silica nanoparticles embedded in epoxy", *Appl. Surf. Sci.* 257, 665-669, **2010**.
28. R. Karmouch, S. Coudé, G. Abel, G. G. Ross, "Icephobic PTFE coatings for wind turbines operating in cold climate conditions", *IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC)*, **2009**.
29. S. Hong, R. Wang, X. Huang, H. Liu, "Facile one-step fabrication of PHC/PDMS anti-icing coatings with mechanical properties and good durability", *Prog. Org. Coat.* 135, 263-269, **2019**.
30. A. W. JONES, LAMB, Robert Norman, "Hydrophobic material", 2006.
31. H. Sojoudi, M. Wang, N. Boscher, G. H. McKinley, K. K. Gleason, "Durable and scalable icephobic surfaces: similarities and distinctions from superhydrophobic surfaces", *Soft matter.* 12, 1938-1963, **2016**.
32. M. Zou, S. Beckford, R. Wei, C. Ellis, G. Hatton, M. Miller, "Effects of surface roughness and energy on ice adhesion strength", *Appl. Surf. Sci.* 257, 3786-3792, **2011**.
33. N. R. Byrd, "polysiloxane(amide-ureid) anti-ice coating", US, 10/436, 015, **2004**.
34. S. Zheng, C. Li, Q. Fu, et al., "Fabrication of a micro-structured superhydrophobic aluminum surface with excellent corrosion resistance and anti-icing performance", *RSC Adv.* 6, 79389-79400, **2016**.
35. S. Zheng, D. A. Bellido-Aguilar, X. Wu, et al., "Durable waterborne hydrophobic bio-epoxy coating with improved anti-icing and self-cleaning performance", *ACS Sustainable Chem. Eng.* 7, 641-649, **2018**.
36. C. Laforte, A. Beisswenger, "Icephobic material centrifuge adhesion test", *Proceedings of the 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, IWAIS, Montreal, QC, Canada, 12-16, 2005*.