



## An Empirical Study on Dropwise Condensation Occurred on Surfaces Hydrophobized Using a Single-Step Electrodeposition

H. R. Talesh Bahrami, A. Azizi, H. Saffari\*

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

### Review History:

Received: 2 Aug. 2018

Revised: 20 Dec. 2018

Accepted: 27 Dec 2018

Available Online: 28 Jan. 2019

### Keywords:

Dropwise condensation  
Superhydrophobic surfaces  
Self-assembly  
Electrodeposition  
Phase change.

**ABSTRACT:** Dropwise condensation occurs on hydrophobic and superhydrophobic surfaces. The rate of heat transfer depends mostly on the preparing process of hydrophobic surface. Two main features of hydrophobic surfaces are existing micro-nanostructures and their low surface energy. In this paper, a one-step electrodeposition process is used to produce the necessary micro-nanostructures on copper surfaces and a self-assembled mono-layer of 1-Octaethanethiol as surface energy reducing agent. Effects of different electrochemical cell parameters such as electrical current and time of process on the dropwise condensation heat transfer are investigated. The heat transfer experiments are performed in a device fabricated for this purpose. The surface of the specimens is analyzed using scanning electron microscopy images and X-ray diffraction analysis. The results show that some microstructures made from copper grow on the surface. The results show that current and process time have positive effects on the dropwise condensation heat transfer. It has been seen that surfaces fabricated at low electrodeposition time (15 and 45 sec) have a worse dropwise heat transfer rate than filmwise condensation heat transfer. On the other hand, higher electrodeposition times (135 sec) give 2-4 times higher heat transfer than filmwise heat transfer in the sub-cooling range lower than 10 Kelvin.

### 1. Introduction

Improvement of heat transfer process including phase change phenomena such as boiling and condensation, due to their high heat exchange capacity and wide applications in different areas, has been in the center of attentions in the recent years [1]. Condensation occurs in two modes including Dropwise Condensation (DWC) and Filmwise Condensation (FWC). In FWC a condensate layer covers the surface while in DWC, discrete droplets with different diameters spread on the surface. Because of the low thermal conductivity of the condensate layer, the FWC has a lower heat transfer capacity than DWC. Therefore different theoretical and experimental studies have been done in recent years on DWC heat transfer. For example, Barati et al. [2] investigated DWC using a high speed camera. They studied the effects of the wall temperature and nucleation site density on the droplet distribution. Talesh Bahrami et al. [3] performed a numerical study on an inclined micro-nanostructured tube. They have shown that heat transfer rate of a vertical tube is greater than a horizontal one under DWC. DWC occurs on hydrophobic and superhydrophobic surfaces. These surfaces usually have micro-nanostructures which have a low surface energy. Different methods have been used in the literature to produce micro-nanostructures and an artificial hydrophobicity on the metal surfaces. However, electrochemical based techniques such as electrodeposition have a special advantage where

micro-nanostructures could be produced with very good accuracy and flexibility [4]. As well as, electrochemical-based methods are environmentally friendly [5] and could be performed with low cost and on complicated geometries. As well as, different methods have been used to reduce the surface energy in between self-assemble monolayers because of their low thermal resistance are suitable for heat transfer applications [6].

In this paper an electrodeposition technique as an electrochemical-based method is used to produce micro-nanostructures on the copper surfaces in order to be used in

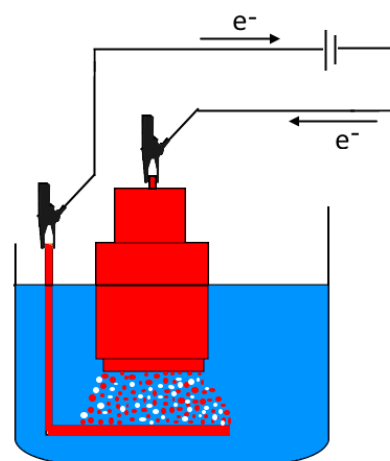


Fig. 1. Electrodeposition system

\*Corresponding author's email: saffari@iust.ac.ir



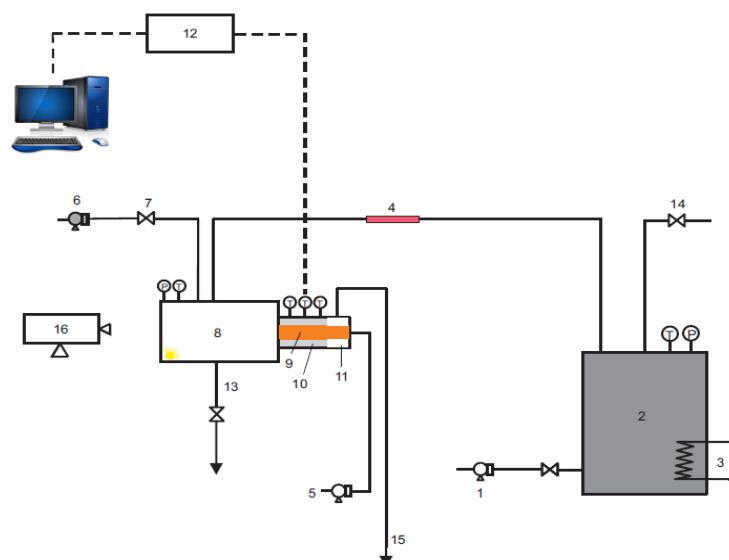


Fig. 2. The schematic view of the experimental setup; 1- water inlet to the boiler, 2-boiler, 3- heater, 4- vapor heater, 5- cooling flow 6- vacuum pump, 7- one-way valve, 8- test chamber, 9- test sample, 10- PTFE cover, 11- cooling section, 12-data acquisition system, 13- condensate exit, 14- emergency drain valve, 15- cooling flow exit, 16- camera

DWC experiments. In the experiments cathode and anode are copper where the cathode is workpiece. Ethanolic solution of 1-Octanethiol is used as a self-assembled monolayer to reduce the surface energy of the samples. Scanning electron microscopy and X-ray diffractometry are used to study the roughened surfaces.

## 2. Experimental Setup

The samples, after cleaning, are electrodeposited in a setup shown in Fig. 1. Then the samples are placed in the designed and fabricated setup given in Fig. 2.

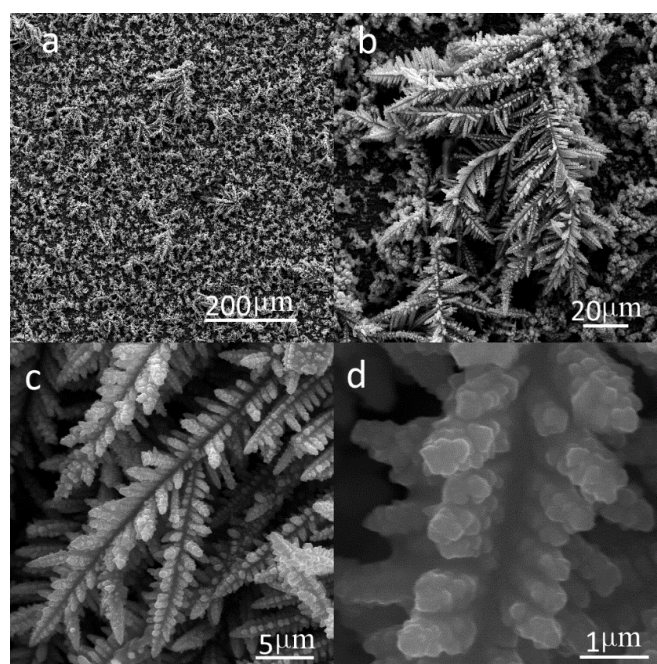


Fig. 3. The scanning microscopy image of the specimen surface after electrodeposition process

## 3. Results and Discussion

### 3.1. The surface structure

The scanning electron microscopy images of the specimen surface after electrodeposition process are given in Fig. 3. It can be seen that micro-nanostructures have grown on the surfaces. The X-ray analysis of the specimen after electrodeposition process is given Fig. 4. It can be seen that copper micro-nanostructures have grown on the surface under the electrodeposition process. The effects of electrodeposition time on the heat transfer coefficient are given in Fig. 5. The result of FWC is extracted from a correlation given in reference [7]. It can be seen that process time 75 and 135 sec have higher heat transfer rate than FWC respectively in subcooling temperatures lower than 12 and 20 K. In other cases flooding phenomenon occurs, droplets penetrate through micro-nanostructures and heat transfer coefficient becomes even lower than FWC in some conditions. This condition has also been reported by other researchers [8].

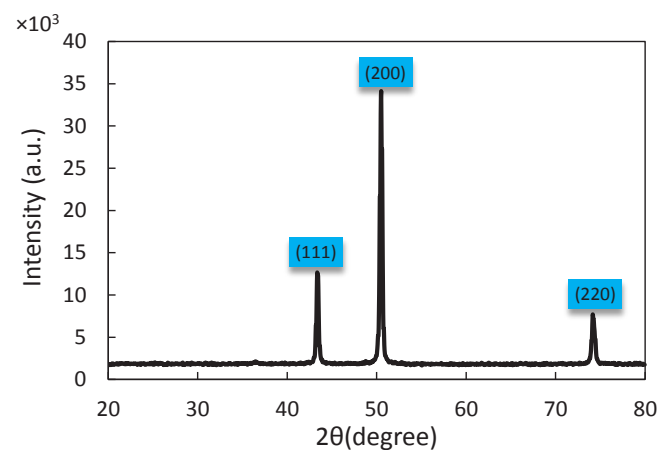
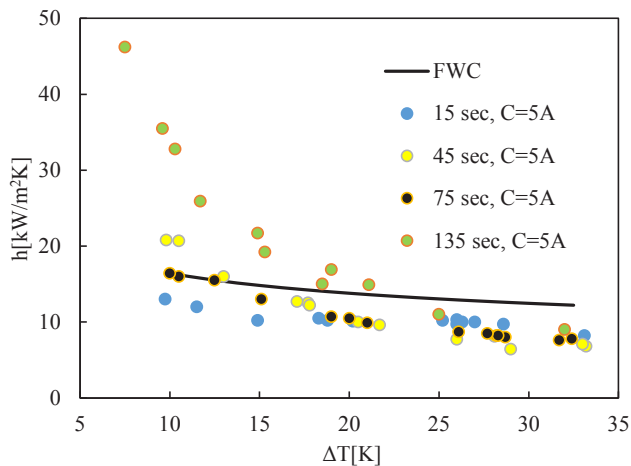


Fig. 4. X-ray analysis of the specimen after the electrodeposition process



**Fig. 5. The effect of electrodeposition time on heat transfer coefficient**

#### 4. Conclusions

An experimental study has been done to explore the function of surfaces micro-nanostructured by electrodeposition process. To do this, a condensation test setup is designed and fabricated. The specimens after electrodeposition process are immersed in the ethanolic solution of 1-Octadecanethiol to reduce their surface energy. The scanning electron microscopy images and X-ray diffractometry analysis of the processed specimens shows that copper micro-nanostructures have grown on the surface. Different experiments with constant current and different electrodeposition times have been done. The experiments show that in some conditions (time=135 and 75 sec) the heat transfer coefficient of DWC is greater than in FWC and in other cases flooding occurs.

#### References

- [1] A. Nourbakhsh, S. Jahantighi, A. Mohammadi, Simulation of heat transfer in shutdown time of engine by conjugate heat transfer, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 0 (2018) (in Persian).
- [2] S.B. Barati, N. Pionnier, J.-C. Pinoli, S. Valette, Y. Gavet, Investigation spatial distribution of droplets and the percentage of surface coverage during dropwise condensation, *International Journal of Thermal Sciences*, 124 (2018) 356-365.
- [3] H.R. Talesh Bahrami, H. Saffari, Theoretical study of stable dropwise condensation on an inclined micro/nano-structured tube, *International Journal of Refrigeration*, 75 (2017) 141-154.
- [4] E. Matei, C. Busuioc, A. Evangelidis, I. Zgura, M. Enculescu, M. Beregoi, I. Enculescu, Hierarchical functionalization of electrospun fibers by electrodeposition of zinc oxide nanostructures, *Applied Surface Science* (2018).
- [5] G.V.G. Mercado, C.J. González, M.I. Oliva, V. Brunetti, G.A. Eimer, Morphology of copper deposits obtained by metallic electrodeposition, *Procedia Materials Science*, 8 (2015) 635-640.
- [6] A. Das, H. Kilty, P. Marto, G. Andeen, A. Kumar, The use of an organic self-assembled monolayer coating to promote dropwise condensation of steam on horizontal tubes, *Journal of heat transfer*, 122(2) (2000) 278-286.
- [7] G.A. O'Neill, J.W. Westwater, Dropwise condensation of steam on electroplated silver surfaces, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 27(9) (1984) 1539-1549.
- [8] N. Miljkovic, R. Enright, Y. Nam, K. Lopez, N. Dou, J. Sack, E.N. Wang, Jumping-droplet-enhanced condensation on scalable superhydrophobic nanostructured surfaces, *Nano letters*, 13(1) (2012) 179-187.





## مطالعه تجربی چگالش قطره‌ای بر روی سطوح آب‌گریز شده با استفاده از فرآیند الکترونشست تک‌مرحله‌ای

حمیدرضا طالبی بهرامی، علیرضا عزیزی، حمید صفاری\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۱۱  
بازنگری: ۱۳۹۷/۰۹/۲۹  
پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۰۶  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۱۱/۰۸

### کلمات کلیدی:

چگالش قطره‌ای  
سطوح آب‌گریز  
خودچینش‌یافتگی  
الکترونشست  
تغییر فاز.

**خلاصه:** چگالش قطره‌ای بر روی سطوح آب‌گریز و ابرآب‌گریز اتفاق می‌افتد. میزان انتقال حرارت چگالش قطره‌ای وابستگی بسیار زیادی به نحوه آماده‌سازی سطح آب‌گریز دارد. دو مشخصه اصلی سطوح آب‌گریز وجود میکرو-نانوساختارها و انرژی سطحی پائین آن‌ها است. در این مقاله از روش الکترونشست تک‌مرحله‌ای برای ایجاد میکرو-نانو ساختارها بر روی نمونه‌ی مسی و پوشش تک‌لایه‌ی خودچینش‌یافته‌ی ۱-اکتادکان تیول به‌عنوان کاهنده‌ی انرژی سطحی به‌منظور استفاده در فرآیند چگالش قطره‌ای استفاده شده است. بدین‌منظور اثر پارامترهای مختلف نظیر شدت جریان سلول الکتروشیمیایی و زمان فرآیند الکترونشست بر میزان انتقال حرارت چگالش قطره‌ای در یک دستگاه چگالش که برای این کار توسعه داده شده، مورد بررسی قرار گرفتند. سطح نمونه‌ها با عکس میکروسکوپ الکترونی و آنالیز پراش اشعه ایکس تحلیل شدند. نتایج نشان می‌دهد که میکرو-نانوساختارهایی از جنس مس ضمن فرآیند الکترونشست بر روی سطح به‌وجود آمده است. از نتایج مشخص شد که زمان و شدت جریان تأثیر مثبتی بر روی انتقال حرارت چگالش قطره‌ای دارند. به‌طوری‌که سطوح تهیه شده با زمان‌های پائین الکترونشست (۱۵ و ۴۵ ثانیه) انتقال حرارت چگالش قطره‌ای بدتر از چگالش لایه‌ای و برای زمان‌های زیاد (۱۳۵ ثانیه) الکترونشست انتقال حرارت چگالش قطره‌ای در محدوده اختلاف دماهای کمتر ۱۰ کلوین در حدود ۲ تا ۴ برابر بیشتر از چگالش لایه‌ای است.

### ۱- مقدمه

مجزا بر روی سطح ظاهرشده، سطح را تا حدودی تر می‌کنند و به خاطر جمعیت بسیار زیاد قطرات، آن‌ها به هم می‌پیوندند و تشکیل یک لایه‌ی مایع پیوسته بر روی سطح می‌دهند. این لایه‌ی مایع در اثر گرانش و یا تنش برشی ناشی از حرکت بخار از روی سطح آن، نازک شده و یا زدوده می‌شود. درحالی‌که در چگالش قطره‌ای، بخار به‌صورت قطراتی مجزا با ابعاد مختلف (از مقیاس نانومتر تا میلی‌متر) به‌صورت کاملاً تصادفی روی سطح تشکیل می‌شوند. مکانیسم تشکیل، فاصله و تعداد قطره‌ها در فرآیند چگالش قطره‌ای به‌گونه‌ای است که تمامی قطرات قادر نیستند هم‌زمان به هم پیوسته و یک لایه‌ی مایع تشکیل دهند. در چگالش قطره‌ای بر روی سطح غیر افقی با گذشت زمان، قطرات مجزا در اثر استمرار چگالش مستقیم و یا ترکیب با سایر قطرات به اندازه‌ی بزرگ می‌شوند که می‌توانند با غلبه‌ی نیروی گرانش بر کشش سطحی، سطح را ترک کنند. این قطرات لغزان در مسیر خود سایر قطرات ریز و درشت را نیز جاروب می‌کنند. بدین ترتیب فضاهای خالی و عاری از قطره بر روی سطح ایجاد شده و بخار با سطح، تماس مستقیم برقرار می‌کند. در این حالت قطرات

بهبود فرآیندهای انتقال حرارت همراه با تغییر فاز نظیر چگالش و جوشش به دلیل ظرفیت بسیار بالای انتقال حرارتی و کاربردهای مختلفی که در صنایع مختلف دارند [۱-۳]، همواره مورد توجه محققان بوده است. فرآیند چگالش، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع تولید توان، تبرید، صنایع انرژی هسته‌ای، تهویه مطبوع، کندانسورهای بازیافت حرارت و غیره دارند [۴ و ۵]. بازده این فرآیندها به مقدار خیلی زیادی به نحوه‌ی انجام چگالش بر روی سطح بستگی دارد. چگالش بر روی سطح به دو صورت لایه‌ای و قطره‌ای انجام می‌شود. در چگالش لایه‌ای، لایه‌ای از مایع چگالش یافته کل سطح را می‌پوشاند درحالی‌که در چگالش قطره‌ای، قطرات به‌صورت مجزا با ابعاد بسیار متنوع بر روی سطح پراکنده می‌شوند. به‌دلیل قابلیت هدایت حرارتی پایین مایع چگالش یافته در چگالش لایه‌ای، ظرفیت انتقال حرارت این رژیم بسیار پایین‌تر از چگالش قطره‌ای است [۶]. در فرآیند چگالش لایه‌ای نیز به‌محض تماس بخار با سطح سرد، ابتدا قطراتی

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: saffari@iust.ac.ir



آب‌گریزی است. زارعی و همکاران [۱۱] در یک کار تحلیلی اثر شکل میکرو-نانوساختارهای مختلف بر روی انتقال حرارت چگالش قطره‌ای را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که با تنظیم شکل میکرو-نانو ساختارها می‌توان انتقال حرارت چگالش قطره‌ای را بین ۲/۵ تا ۴/۵ برابر بهبود داد.

روش‌های گوناگونی همانند اکسیداسیون [۱۲] و یا اچینگ [۱۳] تاکنون برای ایجاد میکرو-نانو ساختارها و خاصیت آب‌گریزی مصنوعی بر روی فلزات صنعتی مورد استفاده قرار داده شده است. با این حال روش‌های مبتنی بر تکنیک‌های الکتروشیمیایی مانند روش الکترونشست از برتری ویژه‌ای برخوردار هستند. به کمک این روش‌ها می‌توان با دقت و انعطاف‌پذیری ویژه‌ای میکرو-نانوساختارهای مورد نیاز برای ایجاد آب‌گریزی را تولید کرد [۱۴]. افزون بر این، روش‌های الکتروشیمیایی عمدتاً دوستدار محیط زیست هستند [۱۵] و با هزینه بسیار کم و حتی بر روی سطح بسیار پیچیده نیز به‌سادگی قابل انجام هستند.

ژی و همکاران [۱۶] از روش الکترونشست برای ایجاد آب‌گریزی بر روی مس استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند در صورتی که فرآیند الکترونشست در چگالی جریان بسیار بالا صورت گیرد، بدون نیاز به فرآیند کاهش انرژی سطحی می‌توان سطوح آب‌گریز تولید کرد. البته آن‌ها تأکید کردند که آب‌گریزی به‌وجود آمده ضمن این فرآیند یک حالت شبه پایدار کیسی<sup>۲</sup> برای قطره به‌وجود می‌آورد. چن و همکاران [۱۷] نیز از روش الکترونشست با الکترولیتی شامل ترکیبات اسیدهای چرب و کلرید نیکل، موفق به تولید سطوح ابرآب‌گریز نیکلی در یک مرحله شدند. آن‌ها حداکثر زاویه تماس را ۱۶۴ درجه و حداقل زاویه لغزش را ۲ درجه گزارش نمودند که نشان می‌دهد سطوح ساخته شده با این روش به شدت آب‌گریز هستند.

یکی از روش‌های کاهش انرژی سطحی استفاده از روش خودآرایی یا خودچیدمانی<sup>۳</sup> در ایجاد پوشش است. روش خودچیدمانی یکی از روش‌های ساخت مواد است که در آن اجزای مختلف (چه به‌صورت تک‌به‌تک و چه به‌صورت متصل‌به‌هم) به‌صورت خودبه‌خود، ساختار به‌هم‌پیوسته‌ی منظمی را تشکیل می‌دهند. در دنیای نانو، روش خود چیدمانی از جمله روش‌های ساخت پایین به بالا است که در آن اتم‌ها یا مولکول‌ها با ارتباطات فیزیکی یا شیمیایی، خود را به شکل یک

ریز مجدداً در محل‌های جاروب شده جوانه زده و بدین ترتیب بخار با از دست دادن گرمای نهان چگالیده می‌شود. در چگالش لایه‌ای، لایه‌ی مایع کل سطح را می‌پوشاند و با حرکت در اثر نیروی گرانش بر ضخامت آن افزوده می‌شود؛ درحالی‌که ابعاد قطره در چگالش قطره‌ای معمولاً محدود بوده و با توجه به کشش سطحی، نیروی گرانش و یا تنش برشی ناشی از حرکت بخار تعیین می‌شود [۷]. ابعاد قطره فقط تابعی از عوامل ذکر شده بوده و مستقل از موقعیت قطره بر روی یک صفحه‌ی تخت است. با توجه به محدود بودن ابعاد قطره و نرخ بالای جاروب مایع چگالش یافته در چگالش قطره‌ای، نرخ انتقال حرارت در این رژیم بسیار بالاتر از چگالش لایه‌ای است. بدین ترتیب چگالش قطره‌ای با توجه به نرخ بیشتر چگالش و ضریب انتقال حرارت بالاتر بر چگالش لایه‌ای ترجیح داده می‌شود. طی سال‌های گذشته بسیاری از مقالات به‌صورت عددی و تجربی انتقال حرارت چگالش قطره‌ای و مکانیسم‌های مرتبط با آن را بررسی کرده‌اند. به‌عنوان مثال برومندی براتی و همکاران [۸] اخیراً چگالش قطره‌ای را به کمک عکس‌برداری با دوربین‌های پرسرعت بررسی کرده و اثر دمای سطح و چگالی سایت‌های هسته‌زایی<sup>۱</sup> بر روی توزیع قطرات را مطالعه نمودند. پنگ و همکاران [۹] چگالش قطره‌ای نانوسیال R۱۴۱b-CuO درون یک لوله عمودی صاف را بررسی کردند. آن‌ها اثر پارامترهای مختلف نظیر اختلاف دماهای مختلف سطح و سیال و دبی جریان بر روی چگالش قطره‌ای را مطالعه نمودند. آن‌ها نشان دادند که با افزودن یک درصد نانوذره به سیال پایه، انتقال حرارت در حدود ۴۰ درصد بهبود پیدا می‌کند. طالب بهرامی و همکاران [۱۰] چگالش قطره‌ای نانوسیال بر روی یک سطح شیب‌دار را مطالعه نمودند. آن‌ها نشان دادند که ضریب انتقال حرارت در حالت صفحه عمودی بیشترین مقدار است و با کاهش شیب صفحه از حالت قائم، به دلیل کاهش سرعت زدوده شدن قطره‌ها ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد. چگالش قطره‌ای بر روی سطوح آب‌گریز و ابرآب‌گریز پدیدار می‌شود. به همین دلیل اولین گام در دستیابی و مطالعه چگالش قطره‌ای طراحی و ساخت سطوح آب‌گریز است. روش‌های مختلفی برای ایجاد سطوح آب‌گریز و ابرآب‌گریز در منابع و مقالات مطرح شده‌اند. تحقیقات آزمایشگاهی اخیر بیشتر مبتنی بر روش‌های دو مرحله‌ای شامل تولید زبری در ابعاد میکرو و نانو سپس کاهش انرژی سطحی به‌منظور ایجاد

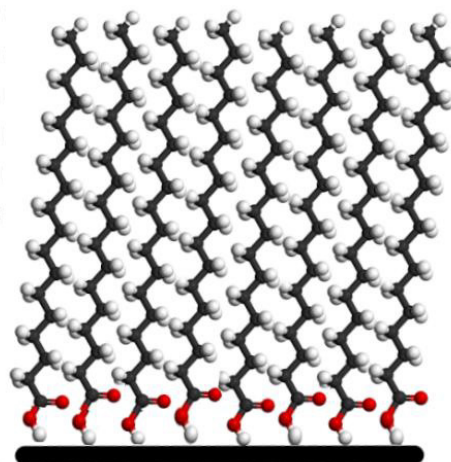
2 Meta-stable state Cassie

3 Self-assembly

1 Nucleation site density

حاصل از پوشش اکتادسیل مرکاپتان<sup>۶</sup> انرژی سطحی بسیار پایین، ضخامت بسیار کم (در حدود ۱۵-۱۰ آنگستروم) و پایداری خوبی در شرایط چگالشی دارد [۲۱]. ضخامت تک‌لایه‌ی خودچینش یافته استئاریک اسید در حدود ۳۰-۱۰ آنگستروم است [۲۲]. ضخامت بسیار کم این پوشش‌ها، آن‌ها را به‌عنوان یک انتخاب خوب برای استفاده در ایجاد چگالش قطره‌ای مطرح می‌کند.

تحقیقات متعددی با استفاده از تک‌لایه‌ی خودچینش یافته برای ایجاد آب‌گریزی و مطالعه چگالش قطره‌ای انجام شده است. به‌عنوان مثال بین و همکاران [۲۳] ابتدا عملیات اچینگ بر روی سطوح آلومینیومی را با یک روش مناسب انجام داده و سپس اثر پوشش‌های مختلف نظیر پرفلئورو آلکیل تری اتوکسی سیلان<sup>۷</sup>، پالمیتیک اسید و لاستیک سیلیکونی<sup>۸</sup> بر روی چگالش قطره‌ای را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که دو پوشش اول در دماهای بالا عملکرد بهتری نسبت به پوشش سوم دارند. دس و همکاران [۱۹] از پوشش خود چینش‌یافته هگزا دکان تیول<sup>۹</sup> بر روی فلزاتی نظیر طلا، مس و آلیاژ نیکل-مس برای ایجاد سطوح آب‌گریز به‌منظور مطالعه در چگالش قطره‌ای استفاده کردند. این مطالعه از یک روش تک‌مرحله‌ای برای ایجاد پوشش‌دهی استفاده کرده و نتایج آن نشان می‌دهد که سطوح پوشش داده شده‌ی طلا انتقال حرارت را در حدود چهار برابر و سطوح پوشش داده شده‌ی مس و آلیاژ مس-نیکل انتقال حرارت را در حدود ۵ برابر نسبت به چگالش لایه‌ای بهبود می‌دهند. ینگ و ژو<sup>۱۰</sup> [۲۲] از دو روش پوشش‌دهی شامل پوشش‌دهی با تفلون و پوشش‌دهی با تک لایه خودچینش یافته بهینیک اسید<sup>۱۱</sup> برای آب‌گریزی سطوح نیکلی در مطالعه چگالش قطره‌ای استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که تک‌لایه‌ی خود چینش‌یافته به دلیل مقاومت حرارتی پایین‌تر عملکرد بهتری در چگالش قطره‌ای دارد. تورسین<sup>۱۲</sup> و همکاران [۲۴] ابتدا با استفاده از روش اکسیداسیون بر روی سطوح مس، زبری به‌وجود آورده و سپس انرژی سطحی آن‌ها را با استفاده پرفلئورو دکان تیول کاهش دادند. چن<sup>۱۳</sup> و همکاران [۲۵] برای مطالعه چگالش



شکل ۱- شماتیک آرایش مولکول‌های تک‌لایه‌ی خودچینش یافته بر روی سطح  
Fig. 1. The schematic of the self-assembled molecule arrangement on the surface

ساختار منظم نانومتری در می‌آورند. با این روش می‌توان ساختارهای منظم مولکولی و همچنین سازه‌های نانومتری را با دقت بالا و در زمان کوتاه ساخت [۱۸]. در مبحث آب‌گریزی‌سازی و چگالش قطره‌ای نیز از روش تک لایه خودچینش یافته (سم)<sup>۱</sup> برای کاهش انرژی سطحی استفاده می‌شود. سم از یک دنباله آب‌گریز به سمت خارج صفحه و یک لیگاند<sup>۲</sup> چسبیده به سطح تشکیل شده است (شکل ۱). یکی از مزایای روش گفته شده این است که لایه تشکیل شده بر روی سطح به‌دلیل ضخامت ناچیز، مقاومت حرارتی قابل توجهی ندارد [۱۹]. بدین ترتیب در مقایسه با روش‌های پوشش‌دهی دیگر، روش تک لایه‌ی خود چینش یافته یک گزینه‌ی ایده‌آل به منظور اهداف انتقال حرارتی است. تاکنون سم‌های مختلفی در تحقیقات مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از آن جمله می‌توان تیول<sup>۳</sup> (لیگاندهای سولفور مینا) و سیلان<sup>۴</sup> (لیگاندهای سیلیکون مینا) را نام برد که دنباله‌هایی شامل هیدروژن و فلوئور داشته و تمایل به جذب به فلزات یا اکسید فلزات دارند و به‌راحتی بر روی آن‌ها می‌نشینند [۲۰]. از دیگر سم‌های مورد استفاده برای بهبود آب‌گریزی سطح می‌توان به کربوکسیلیک<sup>۵</sup> اسیدها اشاره کرد. کربوکسیلیک اسیدها با سطح پیوند هیدروژنی برقرار می‌کنند، درحالی‌که تیول‌ها با سطح پیوند کووالانسی تشکیل می‌دهند و بدین ترتیب معمولاً پوشش‌های تیول‌دار پایداری بیشتری نسبت به کربوکسیلیک اسیدها دارند. تک لایه خودچینش یافته

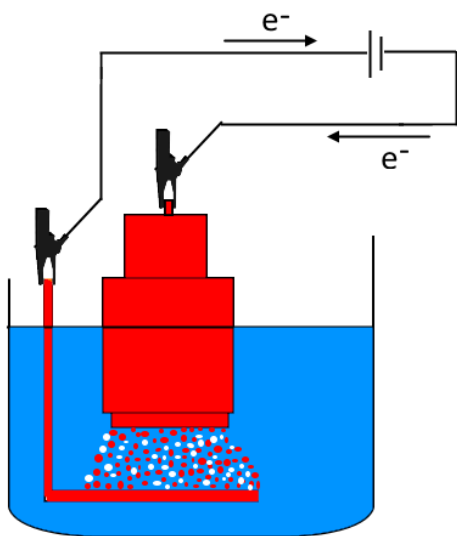
6 1-Octadecyl Mercaptan  
7 Perfluoroalkyltriethoxysilanes  
8 Vulcanizing silicone rubber  
9 Hexadecylthiol  
10 Yang and Gu  
11 Behenic acid  
12 Torresin  
13 Chen

1 Self-Assembled Monolayers (SAM)  
2 Ligand  
3 Thiol  
4 Silane  
5 Carboxylic acid

نظیر زمان فرآیند و نیز شدت جریان در فرآیند الکترونشست بر روی انتقال حرارت چگالش قطره‌ای مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## ۲- فرآیند الکترونشست

طرح‌واره فرآیند الکترونشست در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل یک سلول الکتروشیمیایی دیده می‌شود که کاتد (نمونه) و آند هر دو از جنس مس هستند. الکترولیت از محلول آبی مس سولفات با غلظت ۰/۴ مول بر لیتر در نظر گرفته شده است. هرچند افزودن مقداری سولفوریک اسید می‌تواند قابلیت هدایت الکتریکی الکترولیت را زیاد کند [۲۶]، اما برای پیشگیری از صدمات احتمالی به آزمایش‌گر و همچنین مشکلات زیست محیطی ناشی از تبخیر اسید، از این موضوع صرف‌نظر شده است. همان‌طوری که در شکل دیده می‌شود مساحت آند بسیار بزرگ‌تر از کاتد در نظر گرفته شده تا فرآیند الکترونشست بر روی کاتد به‌صورت یکنواخت‌تری صورت بگیرد. نمک مس سولفات در اثر حل شدن در آب به یون‌های مس دو بار مثبت و سولفات تجزیه می‌شود. یون مس و هیدروژن محلول در آب می‌توانند با گرفتن الکترون در کاتد به مس جامد و مولکول هیدروژن کاهش یابند. کاتد و آند به یک منبع ولتاژ مستقیم خارجی وصل می‌شوند تا مدار الکتریکی با مشارکت الکترولیت بسته شود. کلیه آزمایش‌ها در دمای محیط انجام می‌شود. زمان و شدت جریان با توجه به شرایط آزمایش ممکن است متفاوت باشد و از موضوعات مورد بحث این مطالعه است.



شکل ۲. طرح‌واره فرآیند الکترونشست

Fig. 2. The schematic view of the electrodeposition process

قطره‌ای ابتدا به کمک روش اکسیداسیون بر روی سطح زبری ایجاد کرده و سپس انرژی سطحی را به کمک اکتادکان‌تیول<sup>۱</sup> (اکتادسیل مرکاپتان) کاهش دادند. ملاحظه می‌شود که از روش‌ها و پوشش‌های مختلفی برای پوشش‌دهی سطح به‌منظور مطالعه‌ی چگالش قطره‌ای استفاده شده است. از میان این روش‌ها عمدتاً پوشش‌های مبتنی بر کربوکسیلیک اسیدها و تیول‌ها مورد اقبال بیشتری قرار گرفته شده است.

از مرور منابع فوق به‌طور خلاصه می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که مطالعه انتقال حرارت چگالش قطره‌ای به خاطر ظرفیت بالای انتقال حرارت از اهمیت بسزایی برخوردار است. برای ایجاد چگالش قطره‌ای در گام اول باید سطوح آب‌گریز یا ابرآب‌گریز داشت. با توجه به اینکه فلزات صنعتی ذاتاً آب‌دوست هستند، بنابراین برای ایجاد خاصیت آب‌گریزی مصنوعی باید ابتدا آن‌ها را در ابعاد میکرو-نانو زبر کرده و سپس انرژی سطحی آن‌ها را کاهش داد. مطالعات زیادی بر روی پوشش‌های مختلف و سطوح با جنس‌های مختلف انجام شده است. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که پوشش‌های تک‌لایه‌ی خودچینش یافته به خاطر ضخامت و مقاومت هدایت حرارتی پایین گزینه بسیار خوبی برای ایجاد چگالش قطره‌ای هستند. همچنین از روش‌های متنوعی برای ایجاد زبری موردنیاز در شکل‌گیری آب‌گریزی استفاده شده است. با این حال، اگرچه که روش‌های الکتروشیمیایی از انعطاف‌پذیری و کنترل‌پذیری بالایی در ساخت میکرو-نانوساختارهای موردنیاز برای ایجاد آب‌گریزی دارند، اما مطالعات در زمینه به‌کارگیری این روش‌ها در ایجاد چگالش قطره‌ای بسیار محدود بوده است.

هدف از این تحقیق مطالعه‌ی تجربی استفاده از فرآیند الکترونشست برای تولید زبری‌های لازم برای تولید سطوح آب‌گریز به منظور استفاده در فرآیند چگالش قطره‌ای است. در فرآیند الکترونشست هر دو الکتروآند و کاتد از جنس مس هستند و کاتد به عنوان قطعه کار مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای کاهش انرژی سطحی نیز از یک تک‌لایه‌ی خودچینش یافته (با استفاده از محلول اتانول و ۱- اکتادکان تیول) استفاده می‌شود. برای تحلیل خواص سطوح زبر شده از عکس میکروسکوپ الکترونی<sup>۲</sup> و تحلیل پراش اشعه ایکس<sup>۳</sup> استفاده خواهد شد. همچنین اثر پارامترهای موثر در فرآیند الکترونشست

- 1 n-octadecanethiol
- 2 Scanning Electron microscopy
- 3 X ray diffraction analysis



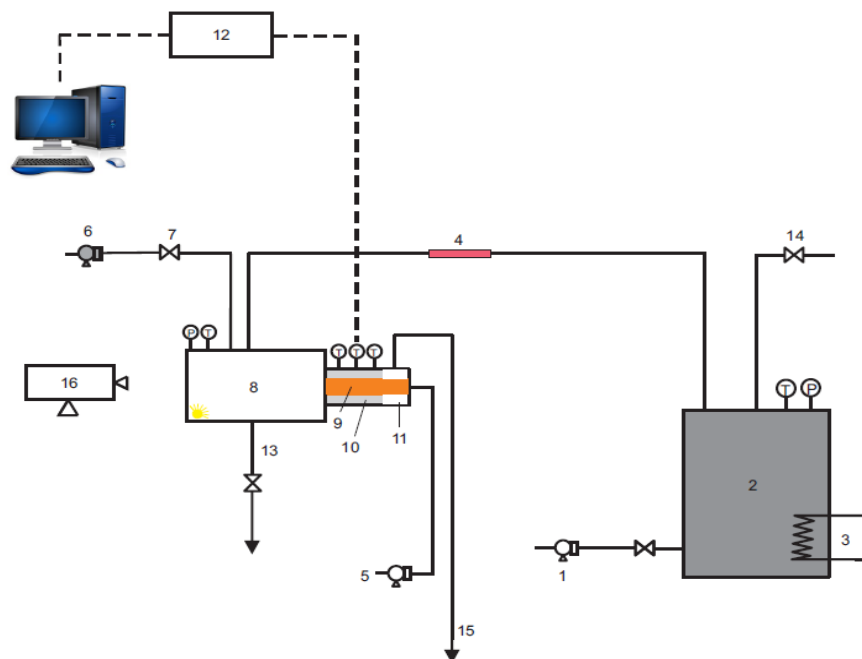
## ۱-۲- روش آزمایش و مشخصات دستگاه آزمون چگالش

جزئیات دستگاه چگالش در شکل ۳ نشان داده شده است. دستگاه از سه بخش اصلی شامل محفظه آزمایش، دیگ بخار و بخش خنک‌سازی تشکیل شده است. بخار اشباع در دیگ توسط یک گرمکن ۲۵۰۰ وات از نوع مغروق در روغن<sup>۱</sup> تولید می‌شود. محفظه آزمایش از جنس فولاد زنگ‌نزن ساخته شده است. سرعت بخار در محفظه آزمایش در حدود ۰/۱ متر بر ثانیه است که با داشتن توان گرمکن و سطح مقطع محفظه آزمایش به‌طور تقریبی محاسبه شده است. یک دریچه بر روی محفظه آزمایش جهت مشاهده فرآیند چگالش و نیز عکس‌برداری تعبیه شده است. برای جلوگیری از تشکیل مایع چگالش یافته بر روی دریچه، از سیم‌های مقاومتی با ولتاژ مستقیم استفاده می‌شود. همچنین برای جلوگیری از وقوع چگالش، مسیر انتقال بخار از دیگ تا محفظه‌ی آزمایش عایق کاری شده است. مایع چگالش یافته نیز به همراه بخار از زیر محفظه خارج می‌شود.

روش کار دستگاه به این صورت است که مطابق شکل ۳ سیال آزمون که در این پژوهش آب است، از مقطع شماره‌ی ۱ وارد دیگ بخار (شماره‌ی ۲) شده و به‌وسیله‌ی گرم‌کن مغروق (شماره ۳)، تبخیر

می‌شود. بخار آب پس از تولید در دیگ بخار و پس از گذر از یک شیر سوزنی از یک گرم‌کن (شماره‌ی ۴) عبور داده می‌شود تا افت دمای بخار در مسیر جبران شود. سپس بخار وارد محفظه‌ی آزمایش مقطع شماره‌ی ۸ می‌شود. بخار بر روی پیشانی نمونه‌ی مسی (شماره‌ی ۹) چگالش یافته و مایع چگالش یافته‌ی اضافی از مسیر زیرین محفظه‌ی آزمایش (شماره‌ی ۱۳) خارج می‌شود. برای اطمینان از ایمن بودن دستگاه یک شیر تخلیه اضطراری ۲/۵ بار (شماره‌ی ۱۴) بر روی دیگ بخار در نظر گرفته شده که در صورت باز شدن، بخار را از مسیر مخصوص (ادامه‌ی مسیر شماره‌ی ۱۴) از دیگ بخار خارج می‌کند. آب خنک‌کن از مسیر طراحی شده (شماره‌ی ۵) به مقطع خنک‌کن وارد شده و بعد از برخورد به نمونه از بخش بالای خنک‌کن (شماره‌ی ۱۵) خارج می‌شود. لازم به ذکر است که تمامی اجزای دستگاه قبل از آزمایش توسط پمپ خلأ (شماره‌ی ۶) از گازهای غیرقابل چگالش پاک می‌شود. یک شیر یک‌طرفه (شماره‌ی ۷) برای جلوگیری از برگشت گازهای غیرقابل چگالشی که توسط پمپ خلأ مکیده شده‌اند تعبیه شده است.

بخار آب در قسمت آزمایش (شماره ۸) بر روی پیشانی نمونه‌ی



۱-۳

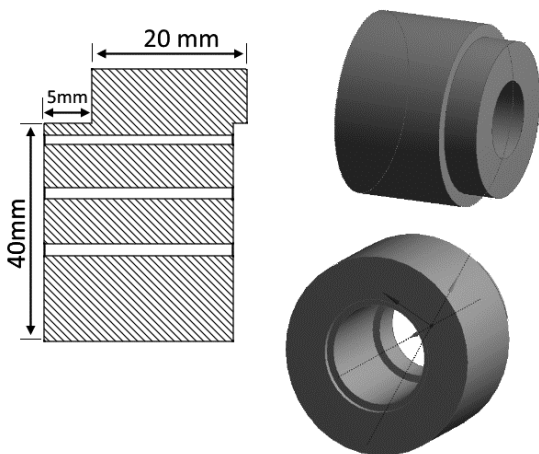
شکل ۳. طرح‌واره دستگاه آزمون چگالش؛ ۱- پمپ آب ورودی به دیگ بخار، ۲- دیگ بخار، ۳- گرم‌کن مغروق در آب، ۴- گرم‌کن بخار، ۵- جریان سیال خنک‌کن، ۶- پمپ خلأ، ۷- شیر یک‌طرفه، ۸- محفظه‌ی آزمایش، ۹- نمونه‌ی آزمایشی، ۱۰- عایق پلی‌تترافلورواتیلنی، ۱۱- بخش خنک‌کاری، ۱۲- سیستم داده‌برداری متصل به رایانه، ۱۳- خط خروجی مایع چگالش‌یافته اضافی، ۱۴- مسیر شیر تخلیه اضطراری، ۱۵- خط خروجی سیال خنک‌کن، ۱۶- دوربین عکس‌برداری

Fig. 3. The schematic of the condensation experiment apparatus; 1- boiler water supply 2-boiler, 3- immersing heater, 4-vapor heater, 5- cooling flow, 6-vacuum pump, 7-check valve 8- test section, 9-sample, 10-PTFE insulator, 11- cooling section, 12- data acquisition system 13- exhausting valve of condensate, 14-relief valve, 15- exhaust line of the cooling water, 16- photography camera.

1 Oil Immersion Heater

شکل ۴ نشان داده شده است، آب خنک از مقطع ۷ و از پمپ وارد مقطع ۸ (بخش خنک‌سازی) شده و در راستای طولی به پشت قطعه مسی برخورد کرده و از سوراخ‌ها خارج می‌شود. برای خنک‌سازی نمونه از آب شهر با دمای تقریبی  $16^{\circ}\text{C}$  و نیز در مواردی که به اختلاف دماهای بالاتر نیاز باشد از آب یخ با دبی‌های مختلف استفاده می‌شود. تمامی آزمایش‌ها در همان شرایط در یک روز دیگر نیز تکرار می‌شوند. نماهای مختلف قطعه تفلونی در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین چگونگی در برگیری نمونه توسط غلاف تفلونی در شکل ۶ نشان داده شده است.

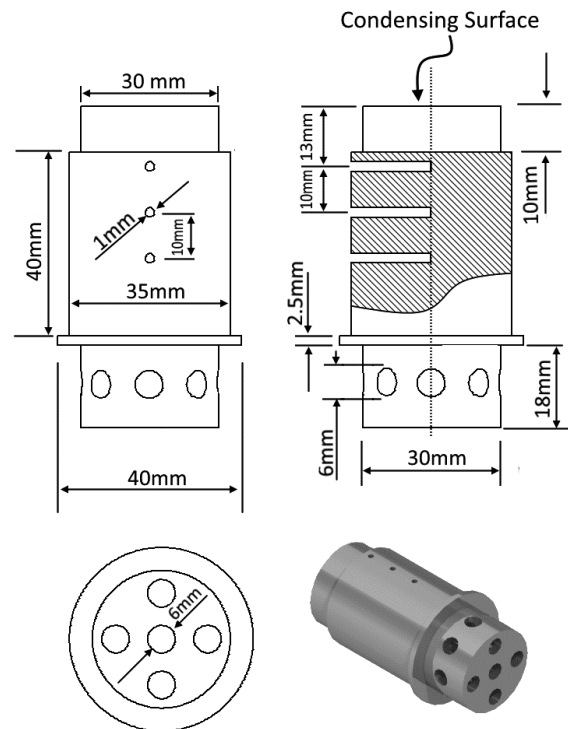
برای صحت‌سنجی انتقال حرارت یک‌بعدی در قطعه، یک شبیه‌سازی سه‌بعدی با نرم‌افزار فلوئنت در یک شرایط فرضی نشان داده شده در شکل ۶ انجام شده است. بدین منظور ضریب انتقال حرارت در سمت بخار  $15000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  و دمای بخار  $400$  کلوین فرض شده است. این مقدار ضریب انتقال حرارت در محدوده میانی ضرایب انتقال حرارتی است که در آزمایش‌های انتقال حرارت چگالش به دست می‌آید، است. فرض شده که پیرامون پوشش تفلونی در معرض محیط با دمای  $300$  کلوین با جریان جابجایی آزاد در نظر گرفته شده است. در این صورت ضریب انتقال بسیار پایین خواهد بود که در اینجا  $20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  در نظر گرفته شده است. در سمت خنک‌سازی با توجه به اینکه جریان جابجایی اجباری وجود دارد، ضریب انتقال حرارت  $500 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  و با دما  $288$  کلوین فرض شده است. با توجه به اینکه بررسی در محیط جامد انجام می‌شود، حل به سرعت همگرا شده و باقیمانده‌ها به حد کافی پائین می‌آیند. از شکل ۶ ملاحظه می‌شود که گرادیان دما درون نمونه مسی به خاطر



شکل ۵. نماهای مختلف قطعه تفلونی  
Fig. 5. Different views of the PTFE cover

مسی (شماره ۹) که در یک غلاف عایق تفلونی (شماره ۱۰) قرار داده شده است، چگالش می‌یابد. سه سوراخ به قطر دو میلی‌متر موازی با هم و عمود بر روی محور نمونه برای اندازه‌گیری دما توسط ترموکوپل نوع K در نظر گرفته شده است. همه‌ی ترموکوپل‌ها توسط شرکت سنجش‌گسترکاوه کالیبره شده‌اند و دقت آن‌ها  $\pm 0.1 \text{ K}$  است. دستگاه داده‌برداری دمایی متصل به رایانه (شماره ۱۲) وظیفه‌ی داده‌برداری هم‌زمان را بر عهده دارد. قسمت پشتی نمونه در بخش خنک‌سازی (شماره ۱۱) توسط آب شهری که از مقطع شماره‌ی ۵ وارد و از مقطع شماره‌ی ۱۵ خارج می‌شود، خنک می‌شود. به‌منظور مشاهده بهتر فرآیند چگالش، درون قسمت آزمایش یک لامپ ال‌ای‌دی جایگذاری شده است. برای ضبط تصاویر فرآیند چگالش از یک دوربین دیجیتال (شماره ۱۶) استفاده شده است.

برای اطمینان از وقوع انتقال حرارت یک‌بعدی در طول نمونه و جلوگیری از نشت حرارت، همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده، از غلاف پی‌تی‌اف‌ای<sup>۲</sup> استفاده شده است. برای بهبود انتقال حرارت در بخش سرد نمونه، ۸ سوراخ بر روی قسمت محیطی و پنج سوراخ بر روی پیشانی نمونه در قسمت خنک و با قطر ۶ میلی‌متر ایجاد شده است. این ۸ سوراخ مانند فن عمل کرده و همان‌طور که در

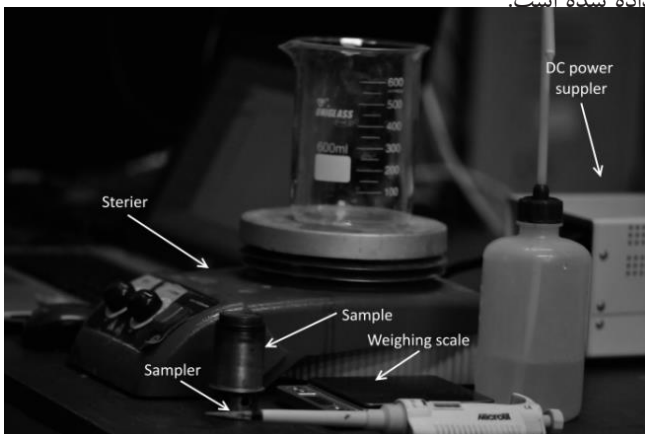


شکل ۴. نماهای مختلف از نمونه آزمایشی  
Fig. 4. Different views of the sample

- 1 Accuracy
- 2 PTFE

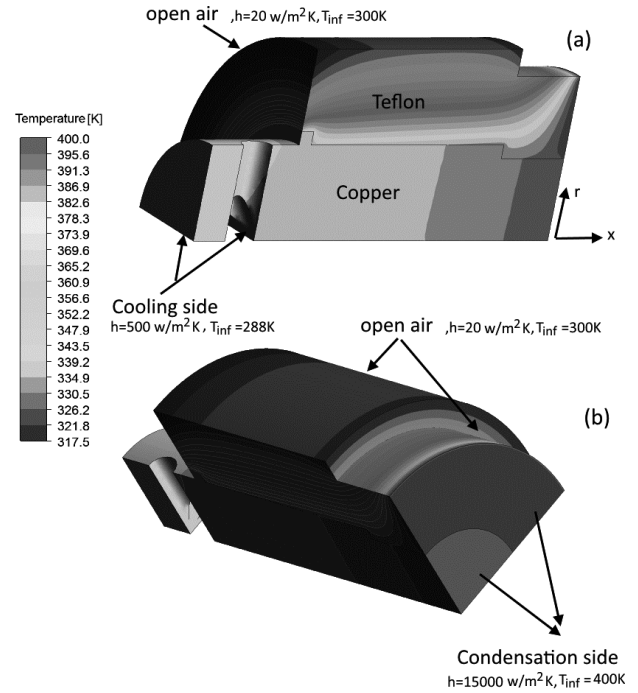
اسید و ۱- اکتادسیل مرکاپتان محصول شرکت مرک، بدون تغییر خلوص و همچنین آب دی‌یونیزه استفاده شده است.

نمونه‌ها با سمباده‌های درجه ۴۰۰ تا ۲۰۰۰ صیقل داده شده و سپس به روش فراصوتی<sup>۲</sup> در استون به مدت ۱۰ دقیقه شسته شده‌اند. پس از شستشو با آب دی‌یونیزه، جهت حذف اکسیدهای احتمالی روی سطح، نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه به روش فراصوتی در محلول ۱۵ درصد نیتریک اسید مجدداً شسته شده و سپس با آب دی‌یونیزه آبکشی شده‌اند. برای کاهش انرژی سطحی و بهبود میزان آب‌گریزی، نمونه‌ها در محلول ۰/۰۱ مول بر لیتر ۱- اکتادسیل مرکاپتان و اتانول در دمای ۴۰ درجه سلسیوس و به مدت سه ساعت غوطه‌ور شده‌اند. در طول فرآیند آب‌گریزی محلول توسط یک همزن مغناطیسی<sup>۳</sup> (شکل ۷)، به‌صورت مداوم هم زده شده تا از ته‌نشین شدن محلول جلوگیری شود. لازم به ذکر است کلیه مراحل آزمایش‌ها در این تحقیق برای نمونه‌های مختلف در زمان‌های مختلف غوطه‌وری و با غلظت‌های مختلف محلول، در شرایط یکسان محیطی انجام گرفته است. اندازه‌گیری زاویه تماس استاتیکی نمونه‌ها با قرار دادن یک قطره آب دی‌یونیزه به حجم ۵ میکرولیتر توسط قطره‌چکان<sup>۴</sup> (شکل ۷) در نقاط مختلف سطح در دمای محیط و عکس‌برداری از آن با استفاده از یک دوربین نیکون دی ۳۰۰<sup>۵</sup>، صورت گرفته است. زاویه تماس استاتیکی نیز با نرم‌افزار ایمیج جی<sup>۶</sup> [۲۸] محاسبه شده است. تصویر تجهیزات مورد استفاده در فرآیند پوشش‌دهی در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷. تصویر تجهیزات مورد استفاده برای پوشش‌دهی  
Fig. 7. The image of apparatus used in the coating process

- 2 Ultrasonic
- 3 Magnetic Stirrer
- 4 Sampler
- 5 Nikon D300
- 6 Image J



شکل ۶. کانتور دما در طول مجموعه قطعه و غلاف تفلونی  
Fig. 6. Temperature contour in the PTFE cover and sample  
قابلیت حرارتی بالای مس ( $k=400 \text{ W/m.K}$ ) نسبت به تفلون ( $0.25 \text{ W/m.K}$ ) کاملاً در راستای طولی است. درحالی‌که در غلاف تفلونی گرادبان دما در راستای شعاعی نیز وجود دارد.

قبل از شروع آزمایش، گرم‌کن درون دیگ‌بخار روشن شده و پمپ خلأ به مدت یک ساعت کل مجموعه (اعم از دیگ‌بخار، محفظه آزمایش و لوله‌ها) را در فشار تقریبی ۲۰ کیلوپاسکال حفظ کرده تا گازهای غیرقابل چگالش از سیستم حذف شود. همچنین برای اطمینان از حذف باقیمانده‌ی گازهای غیر قابل چگالش از سیستم، بخار به همراه مایع چگالش یافته از قسمت زیرین محفظه‌ی چگالش خارج می‌شود، چراکه چگالی گازهای غیرقابل چگالش ( $1/3 \text{ kg.m}^{-3}$ ) از چگالی بخار آب ( $5/8 \text{ kg.m}^{-3}$ ) بیشتر بوده و احتمال دارد، در شروع آزمایش در قسمت تحتانی محفظه تجمع کنند [۲۷]. بعد از این مرحله پمپ خلأ از مدار خارج شده و آزمایش شروع می‌شود. لازم به ذکر است که حتی بعد از شروع آزمایش مجدداً برای اطمینان از حذف گازهای غیرقابل چگالش فرصت کافی برای پایا شدن دماها داده می‌شود. در حقیقت فرآیند آخر به‌نوعی، تمیز کردن به‌وسیله بخار<sup>۱</sup> است. کلیه آزمایش‌ها در فشار محیط انجام می‌شوند.

در این تحقیق از فلز مس با خلوص ۹۹/۹۹ درصد، استون (۹۹/۹ درصد)، اتانول (۹۹/۹ درصد)، نیتریک اسید (۶۵ درصد)، استتاریک

### ۳- کاهش داده‌ها

شار حرارتی در نمونه به روش کمترین مربعات<sup>۱</sup> و با استفاده از داده‌های خوانده شده از ترموکوپل‌ها قابل محاسبه است. دمای سطح مورد آزمایش، با برون‌یابی و استفاده از شیب دما در طول قطعه قابل محاسبه است. در هر آزمایش بعد از اینکه دمای هر سه ترموکوپل تعبیه شده در طول نمونه به حالات پایا در آمد، محاسبات زیر جهت استخراج شار و دمای سطح انجام می‌شود:

$$q = -k \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(T_i - \bar{T})}{\sum_{i=1}^3 (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

$$T_w = \bar{T} + \frac{q}{k} \bar{x} \quad (2)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad \bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (3)$$

ضریب انتقال حرارت چگالش قطره‌ای نیز از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$h = \frac{q}{(T_v - T_w)} \quad (4)$$

### ۳-۱- تحلیل عدم قطعیت داده‌های اندازه‌گیری شده

فرآیند خطی‌سازی انجام شده در بخش قبلی تنها در صورتی صحیح است که دماها دقیقاً در مرکز سوراخ‌ها اندازه‌گیری شود. از آنجائی که اندازه‌گیری دما دقیقاً ممکن است در مرکز سوراخ انجام نشود، لذا این مسئله می‌تواند باعث ایجاد خطا در نتایج شود. با فرض اینکه خطاها به‌صورت تصادفی هستند، اندازه‌گیری‌ها توزیع نرمال داشته و حول یک مقدار متوسط پراکنده شده‌اند، اندازه‌گیری‌های دما در نقطه انجام می‌شوند و نه در سطح، قابلیت هدایتی نمونه در طول قطعه یکنواخت است و انتقال حرارت به‌صورت یک‌بعدی انجام می‌شود، انتشار خطا با روش زیر قابل محاسبه است [۲۹]:

انحراف معیار اندازه‌گیری دما در هر نقطه

$$S_\epsilon = \sqrt{S_{T_i}^2 + \left(\frac{q \times d}{6k}\right)^2} \quad (5)$$

انحراف معیار اندازه‌گیری دمای سطح

$$S_{T_w} = \sqrt{S_{T_i}^2 + \left(\frac{q \times d}{6k}\right)^2} \times \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{\bar{x}^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}} \quad (6)$$

انحراف معیار اندازه‌گیری شار

$$S_q = \sqrt{\left(k S_{T_i}\right)^2 + \left(\frac{q \times d}{6}\right)^2} \times \sqrt{\frac{1}{N} + \frac{1}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}} \quad (7)$$

انحراف معیار اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت نیز با روش زیر قابل محاسبه است [۳۰]:

$$S_h = h \sqrt{\left(\frac{S_{T_i}}{T_v}\right)^2 + \left(\frac{S_q}{q}\right)^2 + \left(\frac{S_{T_w}}{T_w}\right)^2} \quad (8)$$

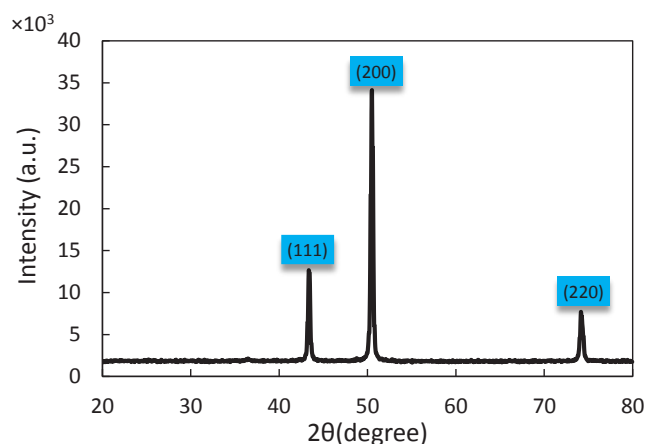
در روابط فوق  $S_{T_i}$  دقت اندازه‌گیری ترموکوپل‌ها و برابر  $0.1 \text{ K}$  است. با استفاده از روش فوق حداکثر انحراف معیار در اندازه‌گیری دمای سطح آزمون  $0.25 \text{ K}$ ، شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت نیز  $8/5\%$  است.

### ۴- نتایج

#### ۴-۱- بررسی ساختار سطح

همان‌طور که در بخش‌های قبل گفته شد، آرایش زبری‌های در ابعاد میکرو و نانو و ترکیب شیمیایی آن‌ها عوامل تأثیرگذار در میزان ترشوندگی سطح هستند [۳۱ و ۳۲]. به‌منظور بررسی ساختار سطح نمونه، از آنالیز میکروسکوپ الکترونی استفاده شده است. در شکل ۸-ا ملاحظه می‌شود که ساختارهایی که به‌صورت نامنظم بر روی سطح تشکیل شده‌اند عمدتاً کوچک‌تر از  $200$  میکرومتر هستند. با بزرگنمایی بیشتر در شکل ۸-ب معلوم می‌شود که این ساختارها بسیار شبیه به برگ گیاه سرخس هستند که به‌صورت نامنظم در نقاط مختلف بر روی سطح رشد کرده‌اند. هرکدام از این برگ‌ها از برگچه‌های کوچک‌تری تشکیل شده که با برگ‌های اصلی متجانس هستند. ابعاد کلی برگ‌های اصلی بزرگ‌تر از  $20$  میکرومتر است ولی ابعاد برگچه‌ها در حدود  $20$  میکرومتر و تا حدی کمتر از آن است. شکل برگچه‌ها در بزرگنمایی بیشتر و در شکل ۸-ج نشان داده شده

1 Least square



شکل ۹: تحلیل پراش پرتو ایکس بر روی نمونه بعد از فرآیند الکترونشست  
Fig. 9. X-ray diffractometry analysis of the sample surface after the electrodeposition process

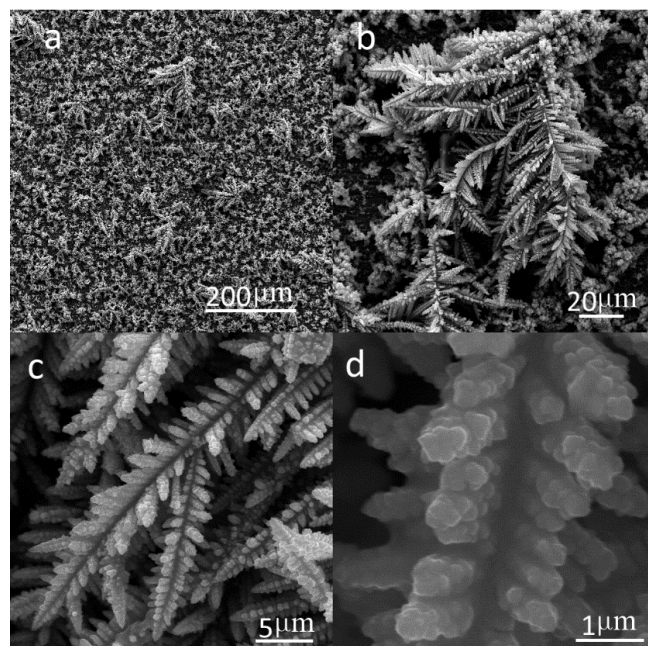
که در شکل ۹ نشان داده شده است، ملاحظه می‌شود اولاً ساختار سطح بلورین بوده و پرش‌هایی در زوایای نزدیک به  $50/5$  و  $43/3$  و  $70/1$  وجود دارد. با توجه به اینکه هر (فاز مربوط به یک ماده یک الگوی پراش بخصوص به خود دارد، از جستجو در الگوهای مختلف مشخص می‌شود که پرش‌های دیده شده به ترتیب مربوط به صفحات  $(1,1,1)$ ،  $(2,0,0)$  و  $(2,2,0)$  فلز مس هستند. همچنین پرش قابل توجه دیگری نیز در این الگوی دیده نمی‌شود؛ بنابراین می‌توان گفت که در فرآیند الکترونشست تنها پوششی از جنس مس بر روی نمونه ایجاد شده و فرآیند زیر در کاتد اتفاق می‌افتد:



یون‌های دو بار مثبت مس هم در الکترولیت وجود دارد و هم از سطح آند می‌تواند جدا شده باشد. البته در فرآیند الکترولیز حباب‌هایی اطراف کاتد دیده شده که احتمالاً هیدروژن محلول در آب با گرفتن الکترون به صورت زیر به مولکول‌های هیدروژن تبدیل می‌شوند:



عکس قطره بر روی سطوح مختلف تهیه شده در زمان یکسان و شدت جریان‌های مختلف در شکل ۱۰ و زوایای تماس متناظر در شکل ۱۱ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که زاویه تماس نمونه‌ها همگی بیش از  $150$  درجه و تغییرات نسبت به شدت جریان قابل توجه نیست.

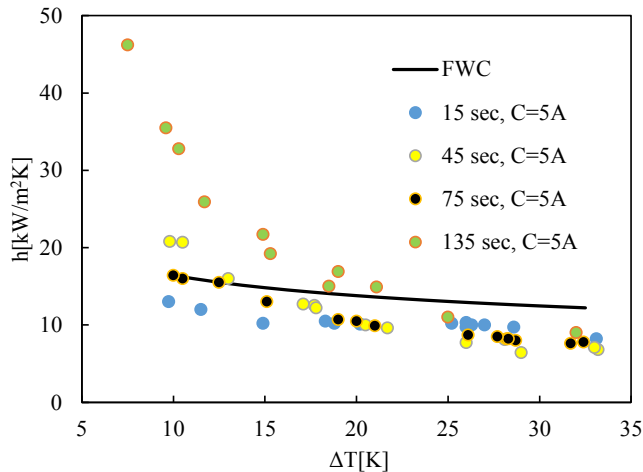


شکل ۸: آنالیز میکروسکوپ الکترونی روی نمونه بعد از فرآیند الکترونشست  
Fig. 8. Scanning Electron microscopy analysis of the sample surfaces after electrodeposition process

است. ملاحظه می‌شود که هر کدام از برگچه‌ها به تنهایی از  $5$  میکرومتر بزرگ‌تر هستند ولی شاخه‌های آن‌ها مطابق شکل ۸-د در حدود یک میکرومتر است؛ بنابراین به طور کلی می‌توان گفت که تحت این فرآیند عمدتاً میکرو ساختار بر روی سطح ایجاد می‌شود. این اجزای با ابعاد میکرو به همراه نانو پوششی که بعد از فرآیند آب‌گریزسازی (با نشان دادن یک تک‌لایه‌ی خودچینش یافته‌ی ۱-اکتا دکان تیول) بر روی سطح ایجاد می‌شود، تشکیل یک زبری سلسه‌مراتبی<sup>۱</sup> را می‌دهد. همان‌طور که از عکس‌های میکروسکوپ الکترونی دیده می‌شود فضاهای خالی با ابعاد مختلف در بین این زبری‌ها به وجود آمده است. بر اساس مدل کیسی-بکستر<sup>۲</sup> [۳۳] این فضاهای خالی مملو از هوا از نفوذ آب به درون زبری‌ها جلوگیری کرده و حالت شبه تعادلی کیسی به وجود می‌آید. در این حالت قطرات به صورت معلق بر روی زبری‌ها قرار گرفته و به راحتی از روی سطح سر می‌خورند. این حالت برای ایجاد چگالش قطره‌ای ایده‌آل است. ساختار دیده شده در عکس‌های تهیه شده در این بخش در شرایط خاصی در فرآیند الکترونشست توسط نیکولیچ و همکاران [۳۴] نیز گزارش شده است.

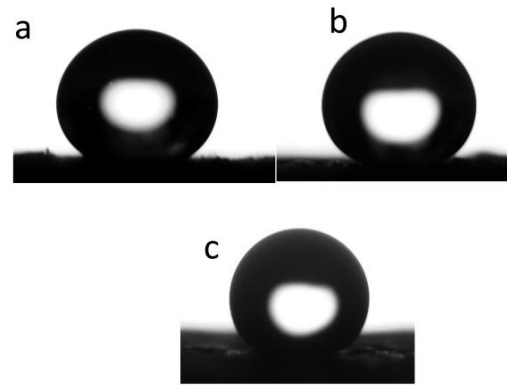
برای مطالعه ساختار بلورین سطح نمونه پس از فرآیند الکترونشست از تحلیل پراش پرتو ایکس استفاده شده است. همان‌طور

1 Hierachal  
2 Cassie-Baxter



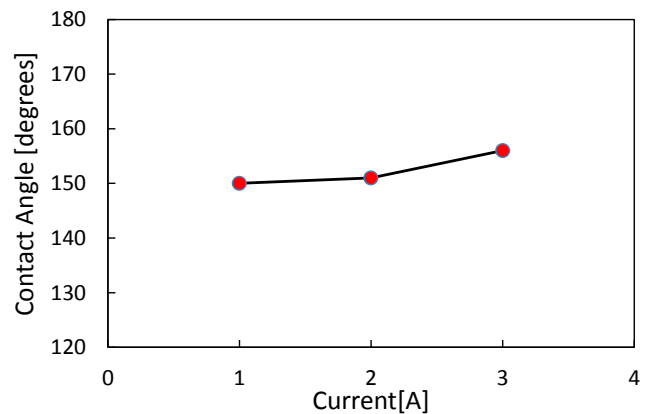
شکل ۱۲. تأثیر زمان فرآیند الکترونشست بر انتقال حرارت چگالش قطره‌ای  
Fig. 12. Effects of electrodeposition time on the dropwise condensation heat transfer

برای زمان فرآیند ۱۳۵ ثانیه و ۷۵ ثانیه به ترتیب در دماهای کمتر از حدود ۲۰ و ۱۲ درجه بالاتر از انتقال حرارت چگالش لایه‌ای است. در مابقی حالات، اگرچه سطوح در حالت عادی (بیرون از محیط چگالش) آب‌گریز هستند اما در محیط چگالش عملکرد بهتری نسبت به سطح صاف و چگالش لایه‌ای به دست نمی‌دهند. یکی از علت‌های این موضوع می‌تواند این باشد که در صورتی که زمان فرآیند الکترونشست کم باشد مطابق قانون الکترولیز فارادی [۳۶] (رابطه (۱۲)) ضخامت لایه‌ی زبری نیز کم است. در این صورت قطره می‌تواند به راحتی به درون میکرو-نانو ساختارها نفوذ کند و حالت سیلابی<sup>۱</sup> اتفاق بیفتد. این حالت قبلاً توسط محققان دیگری برای اختلاف دماهای بالا در چگالش قطره‌ای گزارش شده است [۳۷-۳۹]. حالت‌های مختلف نشست قطره در فرآیند چگالش قطره‌ای در شکل ۱۳ نشان داده شده است. حالت ایده‌آل برای چگالش قطره‌ای حالت کیسی است که در شکل ۱۳-a نشان داده شده است (حالت الف). این حالت برای ارتفاع مشخصی از زبری‌ها و در محدوده‌ی اختلاف دمای مشخص اتفاق می‌افتد. اگر اختلاف دما زیاد شود (شکل ۱۳-b) چگالی مراکز هسته‌زایی زیاد شده و قطرات ریزی که درون میکرو-نانوساختارها جوانه می‌زنند به هم می‌پیوندند و با قطره‌ی بزرگ‌تری که بالای آن‌ها قرار گرفته‌اند یکی می‌شوند [۴۰] (شکل ۱۳-b). در حالت دیگر (شکل ۱۳-c) ارتفاع زبری‌ها ممکن است آن قدر کم باشد که قطره به راحتی کل زبری‌ها را در بر بگیرد. در شکل‌های ۱۳-b و ۱۳-c قطرات چسبیده به سطح تشکیل می‌شوند که تمایل زیادی برای



شکل ۱۰. عکس قطره بر روی نمونه آماده شده با شدت جریان های ۱، ۲ و ۳ آمپر و در زمان یکسان

Fig. 10. Droplet images on the samples produced by different currents 1, 2, 3 A and at the same processing time



شکل ۱۱. تغییرات زاویه تماس نسبت به شدت جریان در زمان ثابت  
Fig. 11. Contact angle variation with respect to the electrical current at constant time

#### ۲-۴- تأثیر زمان فرآیند الکترونشست بر چگالش قطره‌ای

برای بررسی اثر زمان فرآیند الکترونشست بر انتقال حرارت چگالش قطره‌ای، سطوح در چهار زمان ۱۵، ۴۵، ۷۵ و ۱۳۵ ثانیه، غلظت ثابت ۰/۴ مول بر لیتر محلول آبی مس سولفات و در شدت جریان ثابت ۵ آمپر تهیه شده است. تأثیر مدت زمان فرآیند الکترونشست بر روی ضریب انتقال حرارت در شکل ۱۲ نشان داده شده است. برای مقایسه ضریب انتقال حرارت چگالش لایه‌ای که از رابطه‌ی زیر به دست آمده نیز در شکل نشان داده شده است [۳۵].

$$h_{FWC} = 0.83404 \left( \frac{k_l^3 \rho_l g H_{fg}}{\mu_l R \Delta T} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (11)$$

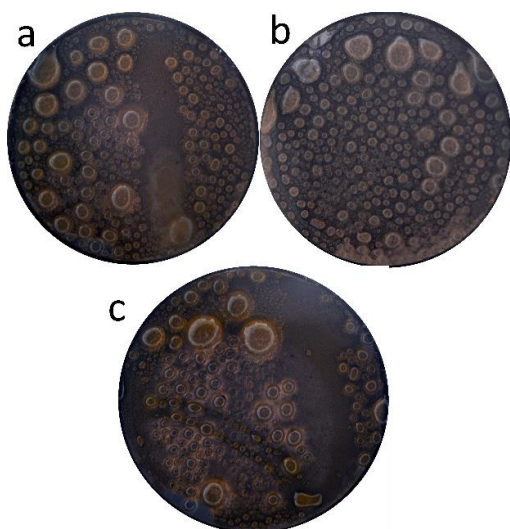
همان‌طور که از شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود ضریب انتقال حرارت

1 Flooding

در لایه‌ی چگالش یافته بر روی دو سطح یکسان باشد [۴۳]. در حالت سیلابی شدن در چگالش قطره‌ای نیز یک حالت مشابه با چگالش لایه‌ای در زیر قطرات اتفاق می‌افتد و انتقال حرارت حتی از حالت چگالش لایه‌ای نیز کمتر می‌شود؛ بنابراین با سیلابی شدن، دیگر چگالش قطره‌ای ماهیت خود را از دست داده و شاید دیگر نتوان آن را چگالش قطره‌ای نامید هرچند که ظاهراً قطرات بر روی سطح تشکیل می‌شوند.

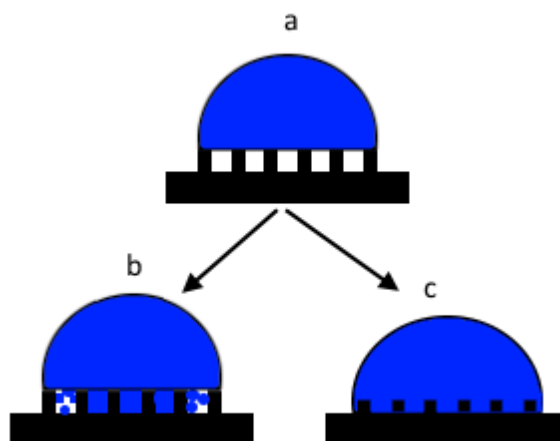
یکی از موارد قابل توجه دیگر که در شکل ۱۲ دیده می‌شود این است، در صورتی که زمان مناسبی برای فرآیند الکترونشست در نظر گرفته شود (به‌عنوان مثال ۱۳۵ ثانیه) در اختلاف دماهای کمتر از ۱۰ درجه، چگالش قطره‌ای می‌تواند ۲-۴ برابر انتقال حرارت بهتری نسبت به چگالش لایه‌ای داشته باشد.

عکس فرآیند چگالش قطره‌ای برای زمان‌های الکترونشست ۱۵، ۴۵ و ۱۳۵ ثانیه در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۱۴-a دیده می‌شود سطح با حجم زیادی از قطرات پوشانده شده است. یک قطره در حال سقوط نیز در این شکل دیده می‌شود. در شکل ۱۴-b که مربوط به زمان ۴۵ ثانیه است حجم قطراتی که سطح را پوشانده‌اند بسیار زیاد است و قطره‌ی لغزانی نیز دیده نمی‌شود؛ اما در زمان ۱۳۵ ثانیه ملاحظه می‌شود که اولاً بخش زیادی از سطح با قطرات نسبتاً ریزتری نسبت به دو حالت پیش پوشانده شده است، ضمن اینکه بخش بزرگی از سطح (در مقایسه با دو حالت دیگر) در



شکل ۱۴. چگالش قطره‌ای بر روی سطح آبگریز شده با (a) زمان الکترونشست ۱۵ ثانیه، (b) ۴۵ ثانیه و (c) ۱۳۵ ثانیه

Fig. 14. Dropwise condensation on the surface hydrophobized by electrodeposition times a) 15 sec, b) 45 sec and c) 135 sec



شکل ۱۳. حالت‌های مختلف نشست قطره بر روی سطح (a) حالت کیسی (b) سیلابی شدن در اثر حجم زیاد هسته‌زایی (c) حالت سیلابی شدن در اثر ارتفاع کم زبری‌ها

Fig. 13. Different droplet sitting conditions a) Cassie state, b) flooding due to large nucleation and c) flooding due to small roughness height

ترک سطح ندارند. در حالتی که در شکل ۱۳-a قطره به راحتی از روی سطح سر می‌خورد. به‌طور کلی مشخصه اصلی چگالش قطره‌ای که آن را از چگالش لایه‌ای به لحاظ انتقال حرارت بیشتر، متمایز می‌کند این است که قطرات در آن باید به سرعت و در کمترین زمان ممکن سطح را ترک کنند. قطرات لغزان در مسیر خود سایر قطرات را جاروب می‌کنند. بدین ترتیب سطوح عاری از مایع چگالیده پدید آمده که مستقیماً در معرض بخار قرار می‌گیرند و بدین ترتیب انتقال حرارت بهبود می‌یابد؛ بنابراین در صورتی که به هر دلیلی قطرات نتوانند بلغزند (شکل‌های ۱۳-b و ۱۳-c) مزیت چگالش قطره‌ای نسبت به چگالش لایه‌ای از بین می‌رود. در شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود که برای کلیه موارد مورد آزمایش چگالش قطره‌ای حالت سیلابی برای اختلاف دماهای بالای ۲۵ درجه اتفاق افتاده است. همچنین حالت در زمان‌های ۱۵ و ۴۵ ثانیه به دلیل ارتفاع کم زبری‌ها چگالش حالت سیلابی (شکل ۱۳-c) اتفاق افتاده است.

نکته قابل ذکر این است که وجود زبری بر روی سطح، چگالش لایه‌ای را نیز می‌تواند تحت تأثیر قرار دهد [۴۱ و ۴۲]. به‌عنوان مثال یون و همکاران [۴۳] نشان دادند در صورتی که ضخامت لایه‌ی مایع کوچک‌تر از ضخامت زبری‌ها باشد ضریب انتقال حرارت به‌طور قابل توجهی از مقدار تخمین زده شده از تئوری ناسلت کمتر است. در حقیقت ضخامت واقعی لایه‌ی سیال بر روی یک سطح زیر در چگالش لایه‌ای بیشتر از یک سطح صاف است هرچند که دبی جریان

توجه به محدودیت منبع تغذیه مورد استفاده در این تحقیق (تامین حداکثر ۵ آمپر)، شدت جریان‌های کمتری در این بخش مورد بررسی قرار گرفته شده و هدف بررسی میزان تاثیر شدت جریان بر انتقال حرارت است.

$$m = \frac{ItM}{zF} \quad (12)$$

تأثیر شدت جریان فرآیند الکتروشیمیایی بر ضریب انتقال حرارت در شکل ۱۵ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با کاهش شدت جریان الکتریکی، به دلیل کاهش ضخامت لایه‌ی نشسته بر روی کاتد، ضریب انتقال حرارت نیز به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. بنابراین از این قسمت این‌گونه می‌توان نتیجه گرفت که برای بهبود ضریب انتقال حرارت، با این زمان و غلظت الکترولیت شدت جریان حتماً باید بیشتر از ۵ آمپر باشد.

#### ۴-۴- پایداری سطوح

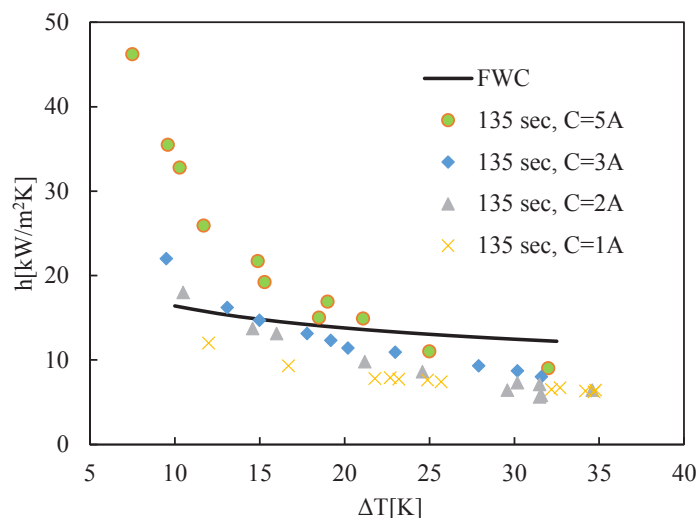
به‌طور کلی سطوح فلزی آب‌گریز کاملاً پایدار تاکنون در منابع و مقالات گزارش نشده است. به همین دلیل تابه‌حال مبادله‌گرهای حرارتی صنعتی بر مبنای چگالش قطره‌ای هم ساخته نشده است. به عنوان مثال در حالتی که یک قطعه آب‌گریز کاملاً در آب فرو رفته باشد میزان پایداری در حدود ۷ روز و در مجاورت هوا نیز تا ۱۲ هفته نیز در مقالاتی [۴۵] که اخیراً در سال ۲۰۱۸ گزارش شده است، نیز دیده می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که مبحث آب‌گریزی هنوز یک مرز دانش محسوب می‌شود. در مورد تحقیق

اثر جاروب شدن قطرات توسط یک قطره‌ی لغزان، عاری قطره است. هرچقدر میانگین شعاع قطرات روی سطح کوچک‌تر باشد، مقاومت حرارتی از میان قطره کوچک‌تر بوده و بالطبع انتقال حرارت بهتری نیز خواهند داشت [۴۴]. از طرفی هرچقدر در شرایط یکسان تعداد کمتری قطره بر روی سطح وجود داشته باشد، نیز انتقال حرارت بهتر است. همین‌طور هرچقدر سطح عاری از قطره، بزرگ‌تر باشد سطح مستقیماً در تماس با بخار قرار می‌گیرد و ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد [۴۴]؛ بنابراین ملاحظه می‌شود که سه عامل فوق سبب شده که انتقال حرارت زمان الکترونشست ۱۳۵ ثانیه از دو حالت دیگر بهتر باشد.

#### ۴-۳- تأثیر شدت جریان فرآیند الکترونشست بر چگالش قطره‌ای

یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار سطح زبر شده در چگالش قطره‌ای به‌وسیله فرآیند الکترونشست، شدت جریان عبوری از سلول الکتروشیمیایی است. شدت جریان و زمان فرآیند دو پارامتری هستند که می‌توانند بر ضخامت و چگالی زبری‌ها تأثیرگذار باشند. همانطوری که در بخش قبل نشان داده شد، در برخی از حالات ممکن است حالت سیلابی اتفاق بیفتد. همین انتظار در مورد شدت جریان‌های مختلف نیز وجود دارد.

با توجه به قانون الکترولیز فارادی [۳۶] (رابطه (۱۲)) جرم و در نتیجه ضخامت ماده‌ی نشانداده شده بر روی کاتد به‌طور مستقیم به زمان فرآیند الکترونشست و شدت جریان سلول بستگی دارد. با



شکل ۱۵. تأثیر شدت جریان فرآیند الکترونشست بر انتقال حرارت چگالش قطره‌ای

Fig. 15. Effects of electrical current of electrodeposition process on the dropwise condensation



چگالش قطره‌ای عملکرد بهتر نسبت به چگالش لایه‌ای دارد. به‌عنوان مثال چگالش قطره‌ای بر روی سطح تهیه شده در زمان ۱۳۵ ثانیه در اختلاف دمای ۱۰ درجه ۴۰۰ درصد انتقال حرارت بهتری نسبت به چگالش لایه‌ای دارد. همچنین اثر شدت جریان در زمان ثابت ۱۳۵ ثانیه بر روی انتقال حرارت چگالش قطره‌ای نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تنها شدت جریان ۵ آمپر عملکرد مطلوبی داشته و شدت جریان‌های کمتر عملکرد مناسبی از نظر انتقال حرارت در مقایسه با چگالش لایه‌ای ندارند. روش به‌کار رفته در این تحقیق بسیار آسان و کم‌هزینه است. ضمن اینکه روش فوق به‌راحتی قابل به‌کارگیری بر روی هندسه‌های پیچیده است.

### فهرست علائم

#### علائم انگلیسی

$d$	قطر سوراخ محل تعبیه ترموکوپل‌ها (m)
$F$	ثابت فارادی ( $C \text{ mol}^{-1}$ )
$g$	شتاب گرانش ( $m/s^2$ )
$h$	ضریب انتقال حرارت ( $96500 \text{ W/m}^2 \cdot K$ )
$H_{fg}$	گرمای نهان (J/kg)
$i$	شمارنده تعداد ترموکوپل‌ها
$I$	شدت جریان الکتریکی (A)
$k$	قابلیت هدایت حرارتی ( $W/m \cdot K$ )
$m$	جرم فلز الکترونشست شده بر روی کاتد (gr)
$M$	جرم مولی فلز (gr/mole)
$N$	تعداد سوراخ‌های محل تعبیه ترموکوپل
$q$	شار حرارتی ( $W/m^2$ )
$R$	شعاع سطح چگالش (m)
$T$	دما (K)
$t$	زمان (sec)
$x$	فاصله محل سوراخ هر ترموکوپل از سطح چگالش (m)
$S$	انحراف معیار
$T$	دما (K)
$Z$	تعداد الکترون‌های شرکت کننده در واکنش کاهش (e)

#### علائم یونانی

$\mu$	لزجت دینامیکی ( $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ )
$\rho$	چگالی ( $kg \cdot m^{-3}$ )
زیرنویس	
$\varepsilon$	مربوط به انحراف معیار اندازه گیری دما در هر نقطه
$q$	مربوط به انحراف معیار اندازه گیری شار حرارتی
$w$	مربوط به انحراف معیار اندازه گیری دمای دیواره
$i$	مربوط به انحراف معیار اندازه گیری دمای هر نقطه
$h$	مربوط به انحراف معیار اندازه گیری ضریب انتقال حرارت

فعلی آزمایش‌ها در یک روز دیگر تکرار شده و نتایج متوسط در نمودارها ارائه شده است. در آزمایش‌های تکرار شده تغییرات پایداری محسوسی در مورد میزان آب‌گریزی ملاحظه نشده است.

### ۵- نتیجه‌گیری

چگالش یکی از رژیم‌های انتقال حرارت که به خاطر تغییر فاز سیال در آن، ظرفیت انتقال حرارت بسیار بالایی دارد. بسیاری از فرآیندهای صنعتی نظیر صنایع توان و تبرید از رژیم تغییر فاز چگالش برای انتقال حرارت سود می‌برند؛ بنابراین بهبود فرآیند انتقال حرارت چگالشی حتی به مقدار کم، می‌تواند صرفه‌جویی قابل‌توجهی در هزینه داشته باشد. فرآیند چگالش به دو صورت لایه‌ای و قطره‌ای بر روی سطح ظاهر می‌شود. تحقیقات قبلی نشان داده است در صورتی که سطوح آب‌گریز موردنیاز برای انتقال حرارت چگالش، شرایط خاصی را داشته باشند، رژیم انتقال حرارت چگالش قطره‌ای انتقال حرارت بسیار بهتری نسبت به چگالش لایه‌ای دارد. در این تحقیق از روش الکترونشست برای ایجاد زبری‌های موردنیاز در تولید سطوح آب‌گریز که لازمه تشکیل چگالش قطره‌ای است، مورد استفاده قرار گرفت. روش الکترونشست یک روش ساده و ارزان و با کنترل‌پذیری بسیار خوب است. بررسی سطح قطعات بعد از فرآیند الکترونشست با کمک عکس‌های اس‌ای‌ام و آنالیز ایکس‌آردی نشان می‌دهد که سطوح از میکرو ساختارهایی از جنس مس پوشانده شده است. این موضوع سبب می‌شود که سطح بعد از پوشش‌دهی با یک تک لایه‌ی خودچینش یافته ۱-اکتا دکان تیول خاصیت آب‌گریزی پیدا کنند. بررسی عکس قطره‌های قرار داده شده بر روی سطح نیز نشان می‌دهد که تقریباً در بیشتر موارد زاویه‌ی تماس بیش از ۱۵۰ درجه بوده و بنابراین سطوح ابرآب‌گریز هستند. در ادامه اثر پارامترهای آماده‌سازی سطح به روش الکترونشست بر روی انتقال حرارت چگالشی مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار در ابتدا چهار زمان مختلف ۱۵، ۴۵، ۷۵ و ۱۳۵ ثانیه فرآیند الکترونشست در شدت جریان برابر ۵ آمپر و غلظت محلول یکسان ۰/۴ مول بر لیتر الکترولیت آبی مس- سولفات مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در اختلاف دماهای بالا و نیز زمان کم الکترونشست (زمان‌های ۱۵ و ۴۵)، چگالش قطره‌ای عملکرد بدتری نسبت به چگالش لایه‌ای دارد. درحالی‌که در زمان‌های بالاتر (۷۵ و ۱۳۵ ثانیه) الکترونشست و نیز اختلاف دمای کمتر از ۱۵ درجه،

- Engineering, 129 (2018) 812-821.
- [10] H.R. Talesh Bahrami, S. Zareie, H. Saffari, A numerical analysis of dropwise condensation of nanofluid on an inclined plate, *Modares Mechanical Engineering*, 17(3) (2017) 105-114.
- [11] S. Zarei, H.R. Talesh Bahrami, H. Saffari, Effects of geometry and dimension of micro/nano-structures on the heat transfer in dropwise condensation: A theoretical study, *Applied Thermal Engineering* 137 (2018) 440-450.
- [12] H.R. Talesh Bahrami, B. Ahmadi, H. Saffari, Optimal condition for fabricating superhydrophobic copper surfaces with controlled oxidation and modification processes, *Materials Letters*, 189 (2017) 62-65.
- [13] H.R. Talesh Bahrami, B. Ahmadi, H. Saffari, Preparing superhydrophobic copper surfaces with rose petal or lotus leaf property using a simple etching approach, *Materials Research Express*, 4(5) (2017).
- [14] E. Matei, C. Busuioc, A. Evangelidis, I. Zgura, M. Enculescu, M. Beregoi, I. Enculescu, Hierarchical functionalization of electrospun fibers by electrodeposition of zinc oxide nanostructures, *Applied Surface Science* (2018).
- [15] G.V.G. Mercado, C.J. González, M.I. Oliva, V. Brunetti, G.A. Eimer, Morphology of copper deposits obtained by metallic electrodeposition, *Procedia Materials Science*, 8 (2015) 635-640.
- [16] W. Xi, Z. Qiao, C. Zhu, A. Jia, M. Li, The preparation of lotus-like super-hydrophobic copper surfaces by electroplating, *Applied Surface Science*, 255(9) (2009) 4836-4839.
- [17] Z. Chen, L. Hao, A. Chen, Q. Song, C. Chen, A rapid one-step process for fabrication of superhydrophobic surface by electrodeposition method, *Electrochimica Acta*, 59 (2012) 168-171.
- [18] K. Rurack, R. Martínez-Mañez, *The supramolecular chemistry of organic-inorganic hybrid materials*, John Wiley & Sons, 2010.
- [1] A. Asadi, M. Rahnema, M.A. Talebizadeh, H.B. Harandi, Performance optimization of multi-effect distillation-thermal vapor compression desalination using genetic algorithm, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 50(2) (2018) 161-170(in Persian).
- [2] S.M.A. Hosseini, F. Sarhaddi, Performance Assessment of a Humidification-Dehumidification Desalination Unit Connected to Photovoltaic Thermal Collectors, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 49(3) (2017) 653-662(in Persian).
- [3] A. Nourbakhsh, S. Jahantighi, A. Mohammadi, Simulation of heat transfer in shutdown time of engine by conjugate heat transfer, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 0 (2018) (in Persian).
- [4] N. Miljkovic, R. Enright, E.N. Wang, Modeling and Optimization of Superhydrophobic Condensation, *J. Heat Transfer*, 135(11) (2013) 111004.
- [5] J.B. Boreyko, Y. Zhao, C.-H. Chen, Planar jumping-drop thermal diodes, *Appl. Phys. Lett.*, 99(23) (2011) 234105--234103.
- [6] E. Schmidt, W. Schurig, W. Sellschopp, Versuche über die Kondensation von Wasserdampf in Film- und Tropfenform, *Technische Mechanik und Thermodynamik*, 1(2) (1930) 53-63.
- [7] N. Miljkovic, Development and characterization of micro/nano structured surfaces for enhanced condensation, *Massachusetts Institute of Technology*, 2013.
- [8] S.B. Barati, N. Pionnier, J.-C. Pinoli, S. Valette, Y. Gavet, Investigation spatial distribution of droplets and the percentage of surface coverage during dropwise condensation, *International Journal of Thermal Sciences*, 124 (2018) 356-365.
- [9] Q. Peng, L. Jia, C. Dang, X. Zhang, Q. Huang, Experimental investigation on flow condensation of R141b with CuO nanoparticles in a vertical circular tube, *Applied Thermal*

- [28] ImageJ, in, 2017.
- [29] M. Kedzierski, J. Worthington III, Design and machining of copper specimens with micro holes for accurate heat transfer measurements, *EXPERIMENTAL HEAT TRANSFER An International Journal*, 6(4) (1993) 329-344.
- [30] P. Bevington, D.K. Robinson, *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*, McGraw-Hill Education, 2002.
- [31] H.Y. Erbil, A.L. Demirel, Y. Avci, O. Mert, Transformation of a simple plastic into a superhydrophobic surface, *Science*, 299(5611) (2003) 1377-1380.
- [32] A. Lafuma, D. Quéré, Superhydrophobic states, *Nature Materials*, 2(7) (2003) 457.
- [33] A. Cassie, S. Baxter, Wettability of porous surfaces, *Transactions of the Faraday society*, 40 (1944) 546-551.
- [34] N.D. Nikolić, L.J. Pavlović, M.G. Pavlović, K.I. Popov, Effect of temperature on the electrodeposition of disperse copper deposits, *Journal of the Serbian Chemical Society*, 72(12) (2007) 1369-1381.
- [35] G.A. O'neill, J.W. Westwater, Dropwise condensation of steam on electroplated silver surfaces, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 27(9) (1984) 1539-1549.
- [36] D. Barker, F.C. Walsh, Applications of Faraday's Laws of Electrolysis in Metal Finishing, *Transactions of the IMF*, 69(4) (1991) 158-162.
- [37] N. Miljkovic, R. Enright, Y. Nam, K. Lopez, N. Dou, J. Sack, E.N. Wang, Jumping-droplet-enhanced condensation on scalable superhydrophobic nanostructured surfaces, *Nano letters*, 13(1) (2012) 179-187.
- [38] M. Sbragaglia, A.M. Peters, C. Pirat, B.M. Borkent, R.G. Lammertink, M. Wessling, D. Lohse, Spontaneous breakdown of superhydrophobicity, *Physical review letters*, 99(15) (2007) 156001.
- [39] J. Cheng, A. Vandadi, C.-L. Chen, Condensation heat transfer on two-tier superhydrophobic
- [19] A. Das, H. Kilty, P. Marto, G. Andeen, A. Kumar, The use of an organic self-assembled monolayer coating to promote dropwise condensation of steam on horizontal tubes, *Journal of heat transfer*, 122(2) (2000) 278-286.
- [20] C.-H. Chen, Q. Cai, C. Tsai, C.-L. Chen, G. Xiong, Y. Yu, Z. Ren, Dropwise condensation on superhydrophobic surfaces with two-tier roughness, *Applied Physics Letters*, 90(17) (2007) 173108.
- [21] A.K. Das, H.P. Kilty, P.J. Marto, G.B. Andeen, A. Kumar, The Use of an Organic Self-Assembled Monolayer Coating to Promote Dropwise Condensation of Steam on Horizontal Tubes, *Journal of Heat Transfer* 122(2) (2000) 278-286.
- [22] Q. Yang, A. Gu, Dropwise Condensation on SAM and Electroless Composite Coating Surfaces, *Journal of chemical engineering of Japan*, 39(8) (2006) 826-830.
- [23] L. Yin, Y. Wang, J. Ding, Q. Wang, Q. Chen, Water condensation on superhydrophobic aluminum surfaces with different low-surface-energy coatings, *Applied Surface Science*, 258(8) (2012) 4063-4068.
- [24] D. Torresin, M.K. Tiwari, D. Del Col, D. Poulikakos, Flow condensation on copper-based nanotextured superhydrophobic surfaces, *Langmuir*, 29(2) (2013) 840-848.
- [25] L. Chen, S. Liang, R. Yan, Y. Cheng, X. Huai, S. Chen, n-Octadecanethiol self-assembled monolayer coating with microscopic roughness for dropwise condensation of steam, *Journal of Thermal Science*, 18(2) (2009) 160-165.
- [26] J. Reid, Copper electrodeposition: principles and recent progress, *Japanese Journal of Applied Physics*, 40(4S) (2001) 2650.
- [27] K.W. Hwang, D. Kim, H. Jo, H.S. Park, K. Moriyama, M.H. Kim, Effects of heat flux on dropwise condensation on a superhydrophobic surface, *J. Mech. Sci. Technol.*, 30(5) (2016) 2141--2149.

- [43] R. Yun, J. Heo, Y. Kim, Effects of surface roughness and tube materials on the filmwise condensation heat transfer coefficient at low heat transfer rates, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 33(4) (2006) 445-450.
- [44] H.R. Talesh Bahrami, H. Saffari, Theoretical study of stable dropwise condensation on an inclined micro/nano-structured tube, *Int. J. Refrig*, 75 (2017) 141-154.
- [45] H. Saffari, B. Sohrabi, M.R. Noori, H.R.T. Bahrami, Optimal condition for fabricating superhydrophobic Aluminum surfaces with controlled anodizing processes, *Applied Surface Science*, 435 (2018) 1322-1328.
- surfaces, *Applied Physics Letters*, 101(13) (2012) 131909.
- [40] N. Miljkovic, D.J. Preston, R. Enright, E.N. Wang, Electric-Field-Enhanced Condensation on Superhydrophobic Nanostructured Surfaces, *ACS Nano*, 7(12) (2013) 11043-11054.
- [41] W.L.B. A. Pridgeon, *Studies in Evaporator Design. V-Effect of Surface Conditions*, *Industrial and Engineering Chemistry* 16(5) (1924) 474-478.
- [42] N.Y. M. Izumi, T. Shinmura, Y. Isobe, S. Ohtani, J.W. Westwater, Drop and filmwise condensation on horizontally scratched rough surfaces, *Heat Transfer-Japanese Research*, 18 (1989).