



Effect of temperature difference on condensation heat transfer and droplet distribution on hydrophilic and hydrophobic surfaces

Parisa Dehghani, Seyed Mostafa Hoseinalipour* , Habibollah Akbari

Faculty of Mechanics, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT: The research examined the influence of temperature difference between surfaces and humid air on heat transfer and droplet distribution. A testing apparatus controlled environmental conditions and facilitated condensation on hydrophilic and hydrophobic surfaces. The relative humidity and speed of humid airflow were kept constant at 88% and 5 m/s, respectively, and the temperature difference considered was 4, 7, and 10 degrees Celsius. The varying heat transfer overtime during the 60 minutes has shown that it takes time to start the condensation process; the more the temperature difference and the amount of surface energy, the shorter this time is and the higher the average heat transfer is. The photography of the experiments has also shown that with the increase in temperature difference and surface energy, the time required for the first drop to fall is shorter, and the hydraulic diameter of the dropped drop is bigger. The distribution of the droplets in the 20th minute after the start of each experiment, in which no droplets have left the test surfaces yet, shows that with the increase in the temperature difference, the number of larger droplets is more due to the increase in the condensation rate. The number of the smallest droplets is higher on hydrophobic surfaces than on hydrophilic ones.

Review History:

Received: Feb. 06, 2024

Revised: Aug. 31, 2024

Accepted: Sep. 28, 2024

Available Online: Oct. 20, 2024

Keywords:

Condensation

Surface Energy

Temperature Difference

Heat Transfer

Droplet Distribution

1- Introduction

Condensation is a critical process in many industries. Consequently, any research or method aimed at enhancing this phenomenon directly impacts the efficiency of these industries. Environmental parameters significantly influence the performance of this process. Foda et al. [1] experimentally and theoretically investigated copper tubes and observed that contrary to the increase in the temperature difference between the surface and humid air, relative humidity enhances heat transfer and condensation rate. They presented a correlation for the dimensionless numbers of their experiments. Shi et al. [2] found that increasing the concentration of non-condensable gas, decreasing the temperature difference between the surface and fluid, and increasing the surface hydrophobicity reduces the droplet jump height resulting from mixing. Youzhang et al. [3] observed that the heat transfer rate decreases on surfaces with different wettabilities as the concentration of non-condensable gas and the temperature difference between the surface and humid air increase. Lieh Wu et al. [4] stated that at any velocity and temperature difference, the heat transfer performance of hydrophobic surfaces is better than hydrophilic ones. Moreover, decreasing these two parameters reduces heat transfer on both types of surfaces. Additionally, as the relative humidity decreases, the improvement in heat transfer due to surface hydrophobicity

decreases. This research specifically focuses on the temperature difference between the condensation surface and humid air and compares hydrophilic and hydrophobic surfaces at different temperature differences. Previous studies have typically reported a surface's average heat transfer performance, with very few investigating the time-dependent behavior of a surface. Therefore, this research examines the transient behavior over time. Thus, a novelty of this research is investigating and comparing the transient behavior of two types of hydrophilic and hydrophobic surfaces under different temperature conditions. Furthermore, the effect of surface type and temperature difference on droplet distribution and departure is investigated, another achievement of this research.

2- Methodology

The experimental device was built to investigate the condensation process. The primary components of this device include a ventilation and temperature control system: This system draws ambient air into the apparatus, heats or cools it, and adjusts its humidity. Humidification chamber: Water is added to the air using ultrasonic devices to achieve the desired relative humidity. Condensation surface: This is the surface upon which the condensation process occurs. It can be made of various materials, such as copper or Teflon-

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



coated copper. Sensors: The apparatus has various sensors to measure temperature, humidity, airflow rate, and other critical parameters. Imaging system: A camera is used to capture images of the condensation surface, allowing for visual recording of changes in the condensation process. Control system: This system automatically controls the various parameters of the apparatus, ensuring that the experimental conditions are precisely maintained. The condensation process can be investigated under different conditions by varying parameters, such as the temperature difference between the condensation surface and humid air. Valuable insights into the mechanisms governing the condensation process can be obtained using data collected from sensors and recorded images. This experiment used two types of surfaces: a hydrophilic surface made of copper, cleaned by sanding and washing, and a hydrophobic surface created by coating the hydrophilic surface with Teflon. Water droplets were placed on the surface to measure their contact angle. Then, the angle between the surface and the tangent line to the droplet was measured using Vision Assistant Labview software. The average contact angle of water droplets on the hydrophilic surface is about 48 degrees, and it is about 108 degrees on the hydrophobic surface. A precise and repeatable method has been employed to calculate the heat transfer coefficient. This method is based on Fourier's law. To ensure the accuracy of the results, multiple temperature sensors were used at different points, and the average temperatures were calculated. Additionally, to examine the repeatability of the experiment, each experiment was repeated multiple times, and the results from the repetitions were compared. The accuracy of the obtained results was ensured by calculating the error propagation in the calculations. Finally, the results indicate that the presented calculation method is accurate and reliable, and the results obtained from the experiments are also repeatable.

3- Results and Discussions

3- 1- Heat transfer

To conduct this experiment, the surfaces of interest were exposed to a controlled humidity environment, and temperature variations were continuously recorded. Subsequently, the heat transfer coefficient was calculated at each moment using the temperature data and relevant equations. Data from multiple experiments were averaged to enhance the accuracy of the results. This research demonstrates that the condensation phenomenon plays a crucial role in increasing heat transfer. According to Figure 1, as the temperature difference between the surface and the environment increases, the rate of condensation initiation and, consequently, the heat transfer rate also increases. Additionally, hydrophilic surfaces exhibit a higher heat transfer coefficient than hydrophobic surfaces due to the lower activation energy required for the onset of condensation. However, the results indicated that the heat transfer coefficient fluctuates over time. These fluctuations can be attributed to various factors, such as environmental fluctuations, the random nature of the condensation phenomenon, and changes in the formation and movement of

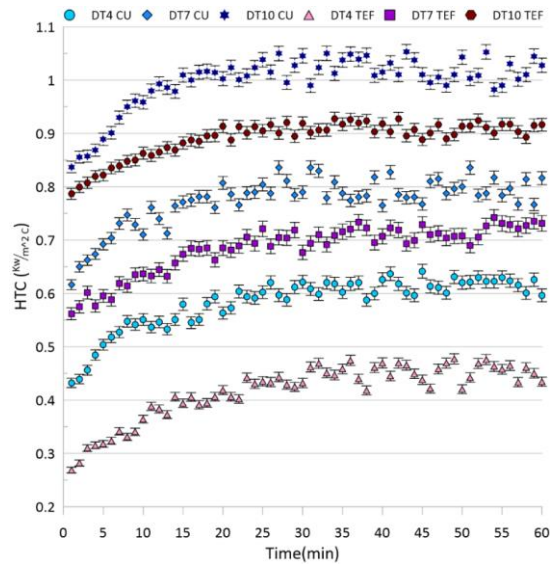


Fig. 1. Transient heat transfer coefficient of condensation on hydrophilic and hydrophobic surfaces in a temperature difference of 4, 7, and 10 degrees Celsius

droplets on the surface.

3- 2- Time and size of the first departure droplet

Hydrophilic surfaces exhibit a greater tendency to absorb water and form larger droplets. Consequently, water droplets form more rapidly on these surfaces and detach in a shorter time. Additionally, increasing the temperature difference accelerates the droplet formation process and increases the detachment rate. Conversely, due to their repulsive force towards water, hydrophobic surfaces delay droplet formation and cause smaller droplets to form with greater spacing. As a result, the detachment time of droplets from these surfaces is longer. Droplets detached from hydrophilic surfaces at higher temperature differences are larger. This is due to the increased condensation rate at higher temperature differences, forming larger droplets.

3- 3- Droplet distribution

On hydrophilic Surfaces, the largest average droplet size was observed at 10 degrees Celsius; as temperature increases, the distribution of droplet sizes becomes wider, indicating a higher nucleation rate and droplet growth; the presence of huge droplets at 10 degrees Celsius suggests a significant increase in condensation rate and heat transfer, droplets on hydrophilic surfaces tend to spread and merge, resulting in larger droplets. On hydrophobic Surfaces, the number of smaller droplets is significantly higher compared to hydrophilic ones; droplets exhibit a stronger tendency to maintain their spherical shape, the distribution of droplet sizes is narrower, at 4 degrees Celsius, the lowest number of large droplets was observed, which can be attributed to the decreased condensation rate and the hydrophobic nature of the surface.

4- Conclusions

This research investigated the effects of surface type (hydrophilic and hydrophobic) and temperature difference on condensation and heat transfer processes. The results showed that the condensation process starts faster as the temperature difference increases, and the latent heat is added to the system sooner. Hydrophilic surfaces and increased temperature differences enhance heat transfer. The highest heat transfer rate was observed on hydrophilic surfaces at a temperature difference of 10 degrees Celsius. Temperature difference significantly impacts heat transfer rate more than surface type. At higher temperatures, the hydrophobic surface exhibits higher heat transfer compared to the hydrophilic surface at lower temperatures. With increasing temperature differences, droplets form faster and become larger. The largest droplets were observed at 10 degrees Celsius on a hydrophilic surface. The number of larger droplets is higher on hydrophilic surfaces and at higher temperature differences.

References

- [1] A. Fouda, M. Wasel, A. Hamed, E.-S.B. Zeidan, H. Elattar, Investigation of the condensation process of moist air around horizontal pipe, *International Journal of Thermal Sciences*, 90 (2015) 38-52.
- [2] Y. Shi, G. Tang, L. Shen, Study of coalescence-induced droplet jumping during phase-change process in the presence of noncondensable gas, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 152 (2020) 119506.
- [3] T.-Y. Zhang, L.-W. Mou, J.-Y. Zhang, L.-W. Fan, J.-Q. Li, A visualized study of enhanced steam condensation heat transfer on a honeycomb-like microporous superhydrophobic surface in the presence of a non-condensable gas, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 150 (2020) 119352.
- [4] Y.-L. Wu, J.-W. Zheng, M. Muneeshwaran, K.-S. Yang, C.-C. Wang, Moist air condensation heat transfer enhancement via superhydrophobicity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 182 (2022) 121973.



تأثیر اختلاف دما در انتقال حرارت و توزیع قطرات چگالش روی سطوح آبدوست و آبگریز

پریسا دهقانی، سید مصطفی حسین علی پور^{*}، حبیب‌الله اکبری

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

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۷
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۰۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۷/۲۹

کلمات کلیدی:

چگالش
انرژی سطح
اختلاف دما
انتقال حرارت
توزیع قطرات

خلاصه: در این پژوهش تأثیر اختلاف دمای بین سطح و هوای مرطوب بر انتقال حرارت و توزیع قطرات بررسی شده است. بنابراین دستگاه تستی ساخته شده تا شرایط محیطی را کنترل کرده و با قرار گرفتن دو نوع سطح آبدوست و آبگریز در معرض هوای مرطوب پدیده چگالش رخ داده است. درصد رطوبت نسبی و سرعت جریان هوای مرطوب در تمامی آزمایش‌ها به ترتیب در مقادیر ۸۸ درصد و ۵ متر بر ثانیه ثابت نگاه داشته شده و اختلاف دمای لحاظ شده ۴، ۷ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. میزان انتقال حرارت متغیر با زمان در طول ۶۰ دقیقه انجام آزمایش نشان داده که برای شروع فرآیند چگالش زمانی لازم است که هرچه اختلاف دما و میزان انرژی سطح بیشتر باشد، این زمان کوتاه‌تر و میانگین انتقال حرارت نیز بیشتر می‌شود. عکس‌برداری از آزمایش‌ها نیز نشان داده که با افزایش اختلاف دما و انرژی سطح، زمان لازم برای افتادن اولین قطره کوتاه‌تر و قطر هیدرولیکی قطره خارج شده نیز بزرگ‌تر است. نحوه توزیع قطرات در دقیقه ۲۰ ام پس از شروع هر آزمایش نشان می‌دهد، با افزایش اختلاف دما تعداد قطرات بزرگ‌تر به دلیل افزایش نرخ چگالش بیشتر بوده و نیز تعداد کوچکترین قطرات روی سطح آبگریز بیشتر از آبدوست است.

۱- مقدمه

پدیده چگالش یکی از فرآیندهای مهم در بسیاری از صنایع همچون شیرین‌سازی آب، سیستم‌های تهویه مطبوع و غیره می‌باشد. بنابراین، هر روش و یا پژوهشی که به چگونگی بهبود عملکرد این پدیده بپردازد تأثیر مستقیمی در بهره‌وری در این صنایع خواهد داشت. پارامترهای محیطی یکی از عوامل مهم و تأثیرگذاری هستند که در عملکرد این فرآیند نقش گسترده‌ای دارند. پارامترهای محیطی مانند سرعت جریان، میزان اختلاف دمای سطح و جریان، فشار، دمای جریان ورودی و درصد رطوبت نسبی، از جمله موضوعات بررسی بسیاری از مقالات ارائه شده هستند. شمار زیادی از تحقیقات حاضر، به بررسی شرایط محیطی در عملکرد سطوح آبدوست پرداخته است. به‌عنوان نمونه تانر و همکارانش در سال ۱۹۶۵ [۱] کاهش سرعت و افزایش شار گرما را سبب کاهش بیشتر انتقال حرارت چگالش قطره‌ای در حضور گاز غیرقابل چگالش بیان کردند. تاناساوا و همکارش در سال ۱۹۷۲ [۲] با عکس‌برداری و شبیه‌سازی دیجیتالی مشاهده کردند، مقدار بهینه سرعت

دمیدن گاز غیرقابل چگالش در محدوده ۳ تا ۷ متر بر ثانیه، که موجب عدم انباشته شدن این گازها می‌شود، ۴ متر بر ثانیه است. آن‌ها همچنین رابطه‌ای برای تعداد قطرات و اندازه آن‌ها ارائه دادند که با نتایج محققین قبلی قدری تفاوت داشت. سو و همکارانش در سال ۲۰۱۳ [۳] گزارش کردند که افزایش کسر جرمی گاز غیرقابل چگالش و خنک‌سازی سطح موجب کاهش انتقال حرارت چگالش روی لوله عمودی می‌شود. فودا و همکارانش در سال ۲۰۱۵ [۴] به شکل تجربی و تئوری روی لوله مسی آزمایش کرده و مشاهده کردند برخلاف افزایش اختلاف دمای سطح و هوای مرطوب، افزایش درصد رطوبت نسبی انتقال حرارت و نرخ چگالش را زیاد می‌کند و افزایش دبی جریان ابتدا موجب افزایش و سپس کاهش آن‌ها می‌شود. آن‌ها برای اعداد بی‌بعد آزمایش‌های انجام‌شده رابطه همبستگی ارائه دادند. بی و همکارانش در سال ۲۰۱۶ [۵] مشاهده کردند که میزان سردسازی سطح و گازهای غیرقابل چگالش روی یک سطح آلومینیومی موجب کاهش انتقال حرارت آن شده و همچنین تأثیر تغییرات هر عامل را در چگونگی و تغییر رژیم چگالش بررسی کردند. لو و همکارانش در سال ۲۰۱۹ [۶] انتقال حرارت چگالش

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: alipour@iust.ac.ir



جابجایی طبیعی روی لوله مسی افقی را بررسی کرده و مشاهده کردند افزایش گاز غیرقابل چگالش (به‌ویژه در دماهای کمتر سطح) و افزایش دمای سطح (به‌ویژه در غلظت‌های کم گاز غیرقابل چگالش) موجب کاهش انتقال حرارت شده که تأثیر گازهای غیرقابل چگالش بیشتر است و همچنین رابطه همبستگی بین انتقال حرارت و برخی پارامترهای محیطی ارائه دادند. گو و همکارانش در سال ۲۰۲۰ [۷] چگالش هوای مرطوب را روی لوله‌های صاف و پره‌دار بررسی کردند و سرعت هوای مرطوب را به شکل جزئی مؤثر دانستند. ما و همکارانش در سال ۲۰۲۱ [۸] مشاهده کردند که با افزایش فشار و کاهش نسبت مولی یا جرمی دو گاز غیرقابل چگالش نیتروژن و آرگون، ضریب انتقال حرارت چگالش جابجایی طبیعی روی یک سطح از فولاد ضدزنگ بیشتر شده است. ما و همکارانش در سال ۲۰۲۱ [۹] افزایش فشار را بهبود دهنده انتقال حرارت چگالش بخار خالص روی لوله بیان کردند ولی در حضور گاز غیرقابل چگالش وابسته به اینکه چه نوع گازی اضافه شده است عملکرد متفاوتی وجود خواهد داشت. شاکری و همکارانش در سال ۲۰۲۱ [۱۰] بیان کردند، رطوبت نسبی تأثیر زیادی بر میزان انتقال حرارت و سرخوردن قطرات دارد و همچنین با افزایش سرعت جریان، ضریب انتقال حرارت بیشتر شده ولی در سرعت‌هایی که قطرات سر نمی‌خورند نرخ افزایش انتقال حرارت کم می‌شود. سطوح آب‌گریز و به‌ویژه فوق آب‌گریز با توجه به اینکه نسبت به سطوح آب‌دوست دیرتر مورد توجه محققین قرار گرفته است، موضوع مورد بررسی پژوهش‌های اخیر شده‌اند. در این زمینه گراهام و همکارانش در سال ۱۹۷۳ [۱۱] بیان کردند که میزان جوانه‌زنی قطرات روی یک سطح آب‌گریز در فشار اتمسفر بیشتر از فشارهای کمتر از اتمسفر است. جولیان کاستیلو و همکارانش در سال ۲۰۱۵ [۱۲] دینامیک قطرات روی سطح آب‌گریز را بررسی کرده و بیان داشتند در مراحل ابتدایی، رشد قطرات وابسته به درصد رطوبت نسبی است و در کل کاهش رطوبت نسبی نرخ چگالش را کم می‌کند. هو و همکارانش در سال ۲۰۱۶ [۱۳] بیان کردند که در مبدل‌های حرارتی با لوله‌های آب‌گریز، بین درصد بخار موجود در هوا و میزان انتقال حرارت ارتباط وجود دارد. چن و همکارانش در سال ۲۰۱۶ [۱۴] مشاهده کردند که در شیارهای کوچک آب‌گریز، با افزایش جریان جرمی و کیفیت بخار سیکل جوانه‌زنی تا جابجایی قطرات از سطح کاهش و انتقال حرارت افزایش می‌یابد. براتی و همکارانش در سال ۲۰۱۸ [۱۵] مشاهده کردند دمای سطح در درصد اشغال سطح توسط قطرات تأثیر ندارد ولی هرچه کمتر باشد اندازه قطره جوانه‌زده کوچک‌تر است. شی و همکارانش در سال ۲۰۲۰ [۱۶] مشاهده کردند که افزایش درصد گاز غیرقابل چگالش، کاهش

اختلاف دمای سطح و سیال و آب‌گریزتر شدن سطح موجب کاهش ارتفاع پرش قطرات ناشی از آمیختگی می‌شوند. دانه و همکارانش در سال ۲۰۲۰ [۱۷] بررسی کردند که کاهش زیاد گازهای غیرقابل چگالش موجب تبدیل چگالش قطره‌ای به لایه‌ای به هم پیوسته می‌شود که میزان انتقال حرارت کمتری نسبت به لایه‌ای دارد و همچنین تزریق جت را نسبت به آب‌گریز کردن سطح در بهبود انتقال حرارت مؤثرتر یافتند. مونس واران و همکارانش در سال ۲۰۲۱ [۱۸] متوجه شدند که با افزایش دما و رطوبت نسبی هوای ورودی انتقال حرارت چگالش در مبدل حرارتی فوق آب‌گریز پره‌دار بیشتر شده و هر چه رطوبت نسبی بیشتر باشد افت فشار در سطح فوق آب‌گریز نسبت به آب‌دوست کمتر خواهد بود که سبب ذخیره انرژی می‌شود. وانگ و همکارانش در سال ۲۰۲۱ [۱۹] متوجه شدند افزایش خنک‌سازی سطح روی صفحات آب‌گریز موجب کاهش فرکانس پرش قطرات و بزرگ‌تر شدن اندازه قطرات خروجی می‌شود و همچنین با عمودی کردن سطح، انتقال حرارت بیشتر می‌شود. با توجه به روند تحقیقات بررسی سطوح دوگانه دوست نیز به لحاظ تاریخی به زمان حال نزدیک‌ترند و همچنان محققان بسیاری در ارتباط با آرایش هندسی و نحوه ساخت این سطوح نتایج تحقیقات خود را در حال ارائه هستند. در این زمینه ما و همکارانش در سال ۲۰۰۸ [۲۰] بیان کردند که غلظت و نوع گاز غیرقابل چگالش و همچنین برهم‌کنش‌های دینامیکی مرزی که در اثر عواملی مثل آمیختگی قطرات و جدا شدن آن‌ها از سطح به وجود می‌آید، از عوامل مهم در انتقال حرارت سطوح متفاوت هستند و لذا مرز متغیر و مکش جریان سبب بهبود آن می‌شود. هو و همکارانش در سال ۲۰۱۵ [۲۱] عنوان کردند که افزایش غلظت بخار موجب بهبود انتقال حرارت روی لوله‌های با ترشوندگی متفاوت می‌شود و در غلظت‌های پایین انتقال حرارت سطوح دوگانه دوست بهتر از سطوح با ترشوندگی یکنواخت است. چن و همکارانش در سال ۲۰۱۷ [۲۲] چنین بیان داشتند که وجود گاز غیرقابل چگالش موجب کاهش انتقال حرارت چگالش سطوح آب‌دوست می‌شود، ولی سطوح آب‌گریز با همان میزان حضور گاز غیرقابل چگالش، انتقال حرارت بیشتری نسبت به سطوح آب‌دوست در معرض بخار خالص دارد. گوپتا و همکارانش در سال ۲۰۱۹ [۲۳] از کاربردهای نوری برای بررسی گرادیان تراکم هوای مرطوب اطراف سطوح با ترشوندگی متفاوت و میزان انتقال حرارت چگالش استفاده کردند. ون و همکارانش در سال ۲۰۱۹ [۲۴] سطح آب‌دوستی با برآمدگی‌های آب‌گریز ارائه دادند و زمانی که لایه چگالش یافته به این برآمدگی‌ها می‌رسید به شکل قطره درآمد و موجب تخریب لایه مرزی دیفیوژن گازهای غیرقابل چگالش می‌شد و انتقال حرارت را بیشتر

می‌کرد، لذا استفاده از هوای مرطوب به‌جای بخار ضمن اینکه از انباشتگی سطح جلوگیری می‌کرد گزینه بهتری عنوان شد. یوژانگ و همکارانش در سال ۲۰۲۰ [۲۵] متوجه شدند در سطوح با ترشوندگی متفاوت هرچه غلظت گاز غیرقابل چگالش و اختلاف دمایی سطح و هوای مرطوب بیشتر شود میزان انتقال حرارت کاهش پیدا می‌کند. ژانگ و همکارانش در سال ۲۰۲۰ [۲۶] گزارش کردند زمانی که سهم مولی گازهای غیرقابل چگالش کم باشد، انتقال حرارت چگالش قطره‌ای نسبت به لایه‌ای بهتر است ولی اگر زیاد باشد برعکس خواهد بود. لیبه وو و همکارانش در سال ۲۰۲۲ [۲۷] بیان داشتند که در هر سرعت و اختلاف دمایی عملکرد انتقال حرارت سطح آب‌گریز بهتر از آب‌دوست است و با کاهش این دو پارامتر در هر دو نوع سطح انتقال حرارت کاهش می‌یابد و همچنین با کاهش درصد رطوبت نسبی درصد بهبود انتقال حرارت توسط آب‌گریزی سطح کاهش می‌یابد.

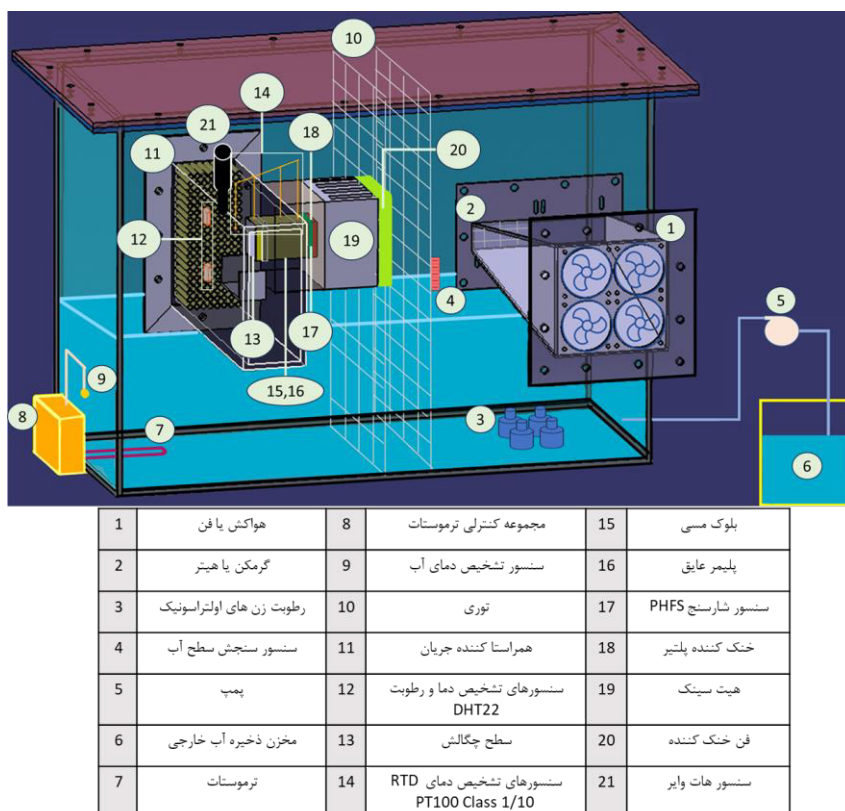
در این پژوهش به طور خاص روی یک عامل محیطی یعنی میزان اختلاف دمایی سطح چگالش با هوای مرطوب تمرکز شده و به مقایسه سطوح آبدوست و آب‌گریز در اختلاف دماهای متفاوت پرداخته شده‌است. به این منظور ابتدا دستگاه تستی طراحی و ساخته شده تا شرایط محیطی کنترل شده‌ای را فراهم کند و سپس با اعمال و کنترل شرایط محیطی در هر آزمایش، عملکرد انتقال حرارت سطوح بررسی و مورد بحث قرار داده شده‌است. معمولاً پژوهش‌های انجام شده عملکرد انتقال حرارت یک آزمایش را به شکل میانگین عملکرد یک سطح به لحاظ انتقال حرارت گزارش کرده‌اند و تعداد بسیار اندکی از پژوهش‌ها به بررسی رفتار یک سطح در گذر زمان پرداخته است و لذا در این پژوهش رفتار گذرای دو نوع سطح آبدوست و آب‌گریز در طول زمان مورد بررسی قرار داده شده است. علاوه بر اینکه رفتار گذرای سطوح متفاوت به لحاظ ترشوندگی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته، عامل محیطی اختلاف دمایی سطح و هوای مرطوب نیز در هر سطح تغییر داده شده‌است و لذا از نوآوری‌های این پژوهش این است که رفتار گذرای دو نوع سطح آبدوست و آب‌گریز را در شرایط دمایی متفاوت بررسی و مقایسه کرده‌است. علاوه بر این با استفاده از عکس‌برداری‌های پی در پی از سطوح آزمایش و تحلیل گرافیکی آن‌ها، تاثیر نوع سطح و اختلاف دما در نحوه توزیع قطرات و خروج آن‌ها مورد بررسی قرار داده شده که از دستاوردهای دیگر این پژوهش می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ساخت دستگاه تست

به منظور ایجاد شرایط محیطی کنترل شده دستگاه تستی ساخته

شده‌است که شماتیک آن در شکل ۱ نشان داده شده‌است. جهت جلوگیری از ایجاد هرگونه خطا شرایط محیطی کنترل شده‌است. هوای اتاق با استفاده از سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی در دمایی مشخصی ثابت نگاه داشته شده و توسط هواکش یا فن‌ها (۱) به داخل مجموعه مکش می‌شود. هوا پس از مکیده شدن توسط گرمکن یا هیترها (۲) گرم شده و وارد محفظه رطوبت زنی می‌شود. محفظه رطوبت زنی محلی است که رطوبت‌زن‌های اولتراسونیک (۳) آب موجود در مخزن را اتمیزه کرده و هوای مکیده شده را مرطوب می‌کند. نحوه عملکرد این رطوبت‌زن‌ها وابسته به ارتفاع آبی است که بالای آن قرار گرفته و لذا برای ثابت نگاه داشتن آن از سنسور سنجش سطح آب (۴) استفاده شده که به محض پایین آمدن ارتفاع آب از محدوده مشخصی با پیامی که به مجموعه کنترلی شامل میکروکنترلر و کد دستوری نوشته شده برای آن می‌فرستد، موجب روشن شدن پمپ (۵) و انتقال آب از مخزن آب بیرونی (۶) به محفظه رطوبت زنی می‌شود. از عوامل محیطی دیگری که در طول تمامی آزمایش‌ها ثابت نگاه داشته شده، دمایی آب داخل محفظه رطوبت زنی است، بنابراین، به این منظور از ترموستات (۷) و مجموعه کنترلی (۸) آن استفاده شده است که توسط سنسوری (۹) که داخل آب قرار گرفته دمایی آن را اندازه گرفته و در صورت کمتر بودن دما نسبت به مقدار مشخصی که برای آن تنظیم شده، ترموستات را روشن کرده و آب محفظه را در دمایی مشخصی ثابت نگاه می‌دارد. آب پس از اتمیزه شدن و ورود به هوا از دو سری توری (۱۰) عبور می‌کند تا قطرات درشت آب از آن گرفته شده و مانع از ورود آن به محفظه رطوبت زنی و خیس شدن نامطلوب سنسورهای آن قسمت شود. قبل از ورود هوای مرطوب به محفظه رطوبت زنی به منظور یکرستا کردن جریان هوا و حذف گردش‌ها و چرخش‌های آن از مجموعه همراستا کننده‌هایی (۱۱) استفاده شده که هوای مرطوب پس از عبور از آن همراستا شده و وارد محفظه رطوبت‌گیری می‌شود. در بخش رطوبت زنی از دو سری سنسور تشخیص دما و رطوبت^۱ (۱۲) در روبروی سطح چگالش در دو قسمت بالا و پایین آن استفاده شده‌است تا دما و میزان رطوبت نسبی هوای مرطوب رسیده به سطح چگالش را اندازه‌گیری کند. میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده توسط این دو سنسور به مجموعه کنترلی گزارش شده و با توجه به مقداری که برای رطوبت نسبی معین شده مقایسه و قدرت کارکرد رطوبت‌زن‌ها توسط مجموعه کنترلی و کد پی‌آی دی نوشته شده برای آن تعیین شده‌است. برای دمایی هوای مرطوب از سنسورهای دقیق‌تری استفاده شده‌است. روبروی سطح چگالش (۱۳) از مجموعه^۳ اتایی



شکل ۱. شماتیک دستگاه تست

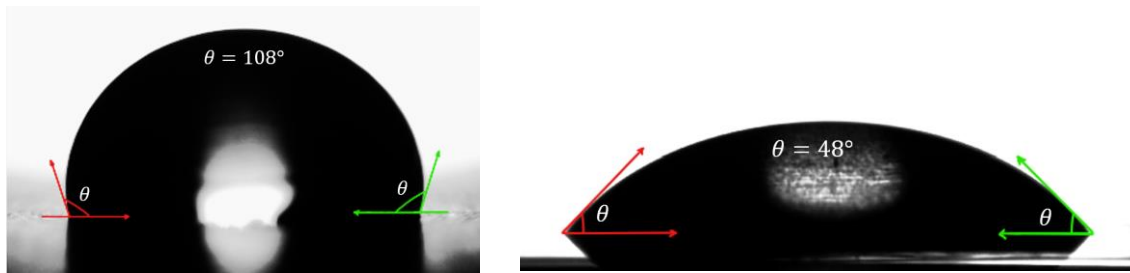
Fig. 1. Schematic of the test device

از سنسورهای مقاومتی متغیر با دما^۱ (۱۴) استفاده شده و میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده توسط این سنسورها با مقدار معین شده برای دمای هوای مرطوب مقایسه شده و توسط مجموعه کنترلی و کد پی آی دی این قسمت قدرت کارکرد هیترهای ورودی تعیین می‌گردد. سطح چگالش توسط یک پد سیلیکونی که رسانای حرارت است به یک بلوک (۱۵) از جنس مس می‌چسبد و برای اطمینان از انتقال حرارت یک بعدی، اطراف آن توسط پلیمر اکریلونیتریل بوتادین استایرن^۲ (۱۶) عایق شده است. داخل بلوک مسی در ۳ ردیف چسبیده به سطح، مرکز بلوک و در انتهای آن و در هر قسمت ۳ سنسور مقاومتی متغیر با دما قرار گرفته تا گرادیان دمایی ایجاد شده در آن محاسبه شود. بلوک مسی از طرف دیگر به یک سنسور شارسنج^۳ (۱۷) چسبیده تا از درستی شار حرارتی محاسبه شده توسط گرادیان‌های دمایی اندازه‌گیری شده

با سنسورها را اطمینان بخشد. از یک پلتیر (۱۸) برای خنک سازی سطح استفاده شده است. برای عملکرد درست پلتیر لازم است که به درستی خنک شود، لذا از یک هیت سینک (۱۹) استفاده شده و نیز به آن فنی (۲۰) متصل است که آن را خنک کند. یکی دیگر از عوامل محیطی که پایداری آن مورد اهمیت است، سرعت جریان هوای مرطوبی است که به سطح چگالش رسیده، بنابراین، از یک سنسور هات وایر (۲۱) در مقابل سطح استفاده شده که با توجه به قدرت مشخص شده برای فن همواره سرعت مشخصی را برای جریان هوای مرطوب اندازه‌گیری کرده است. برای بررسی گرافیکی سطح چگالش لازم است تا از آن عکس‌برداری شود و به این منظور از دوربین^۴ مجهز به لنز ماکرو استفاده شده است. در این پژوهش سرعت هوا ۵ متر بر ثانیه، دمای هوای مرطوب ۲۴ درجه سانتی‌گراد و درصد رطوبت نسبی ۸۸ درصد در نظر گرفته شده و اختلاف دماهای ۴، ۷ و ۱۰ درجه بین هوای مرطوب و سطح چگالش لحاظ شده است. تا زمان پایداری شرایط محیطی

- 1 RTD PT100 Class 1/10
- 2 ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)
- 3 PHFS

4 Nikon D300



(ب) سطح آبگریز-تفلون

(الف) سطح آبدوست-مس

شکل ۲. زاویه تماس قطره روی سطح چگالش

Fig. 2. Droplet contact angle on condensation surface

۲-۳- محاسبه انتقال حرارت

برای محاسبه شار انتقال حرارت^۱ از معادله انتقال حرارت هدایت فوریه (معادله (۱)) استفاده شده است. در این رابطه k ضریب هدایت حرارتی در مس بوده که $388 \frac{W}{m^{\circ}K}$ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که سری سنسورهایی که در انتهای بلوک مسی واقع شده‌اند به منظور اطمینان از سنجش اعتبار شار حرارتی محاسبه شده با سنسورهایی است که در مرکز هسته مسی و در ابتدای آن یعنی نزدیک به سطح قرار داده شده‌اند. بنابراین، گرادیان دمایی در معادله (۱) حاصل اختلاف دمایی است که سری سنسورهای نزدیک به سطح و واقع در مرکز هسته مسی اندازه‌گیری کرده‌اند به نسبت فاصله‌ای که از هم دارند. با توجه به اینکه در هر بخش ۳ سنسور اندازه‌گیری دما قرار داده شده، دمای هر نقطه نیز حاصل میانگین ۳ دمایی است که در هر مقطع اندازه‌گیری شده است.

$$HeatFlux = k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

برای محاسبه ضریب انتقال حرارت^۲ کافی است که شار حرارتی محاسبه شده از معادله (۱) را مطابق با معادله (۲) بر اختلاف دمای بین سطح و هوای مرطوب تقسیم کرد. اما ابتدا لازم است با توجه به فاصله‌ای که سری

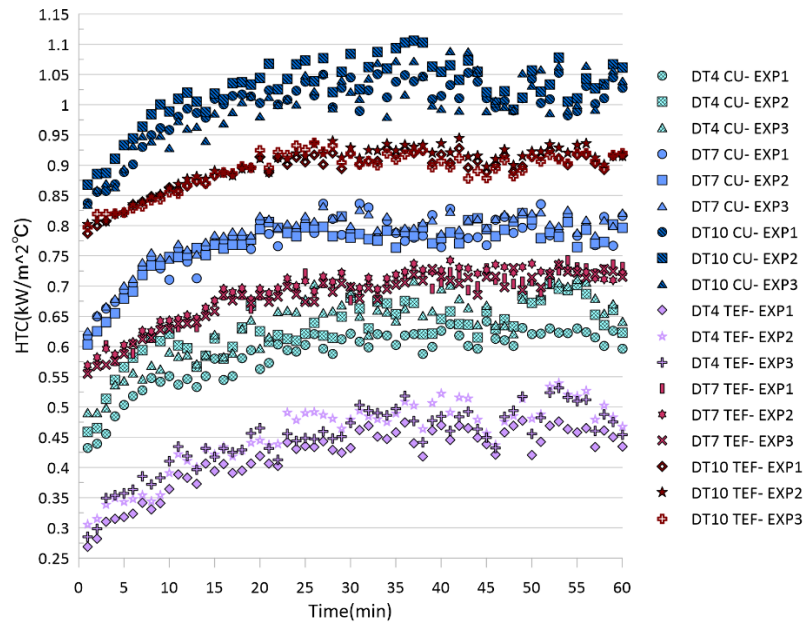
مانعی روی سطح قرار داده می‌شود و به محض پایداری تمامی پارامترها، مانع برداشته شده و ثبت داده‌ها شروع می‌شود.

۲-۲- سطح آزمایش

برای انجام فرآیند چگالش نیاز به سطح سردی است تا هوای مرطوب در مجاورت آن گرمای خود را از دست داده و تبدیل به قطرات آب شود، لذا در این پژوهش از دو نوع سطح آبدوست و آبگریز استفاده شده است. سطح آبدوست از جنس مس و در ابعاد 4 Cm در 4 Cm بوده که با سمباده زنی‌های مکرر و مرحله‌ای و شست و شو با آب مقطر و خشک کردن با باد ملایم به عنوان سطح چگالش مورد استفاده قرار گرفته است. برای سطح آبگریز نیز از پوشش تفلون روی سطح آبدوست مس استفاده شده که پس از قرار گرفتن در کوره و سرد شدن آرام آن بدست آمده است. برای اندازه‌گیری زاویه تماس، در نقاط مختلف هر یک از سطوح قطراتی چکانده شده و پس از عکس‌برداری و با استفاده از نرم‌افزار ویژن اسیستنت لب ویو، زوایایی که هر یک از قطرات با سطح داشته‌اند اندازه‌گیری شده است و در نهایت میانگین زوایای قطرات روی هر سطح به عنوان زاویه تماس قطره روی آن در نظر گرفته شده است. میانگین این زوایا روی سطح آبدوست 48 درجه و روی سطح آبگریز 108 درجه بوده است که نمونه‌ای از زوایای قطرات روی هر سطح در شکل ۲ نمایش داده شده است.

1 Heat Flux

2 Heat Transfer Coefficient (HTC)



شکل ۳. تکرار پذیری آزمایش‌ها

Fig. 3. Repeatability of experiments

انتشار خطا استفاده شده که در آن f متغیر وابسته یا به عبارتی همان ضریب انتقال حرارت است و w_i متغیرهای مستقل یا همان سنسورهای اندازه‌گیری دما اند که دقت هر یک با σ_i نشان داده شده‌است. با توجه به معادلات موجود و دقت هر سنسور انتشار خطا حدود ۵/۵ درصد بدست آمده که به اندازه کافی کوچک است تا تاثیر چشم‌گیری در نتایج نداشته باشد.

$$\text{Error Propagation} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial w_i} \right)^2 \sigma_i^2} \quad (3)$$

۲-۴-۲- بررسی تکرار پذیری انجام آزمایش

با توجه به هدف این پژوهش که بررسی تاثیر اختلاف دما بین هوای مرطوب و سطح چگالش بر عملکرد چگالش است، تمامی شرایط محیطی در تمامی آزمایش‌ها ثابت نگاه داشته شده و در هر آزمایش نسبت به آزمایش دیگر پارامتر محیطی‌ای که تغییر می‌کند اختلاف دما است. برای اطمینان از نتایج آزمایش لازم است زمانی که تمامی شرایط محیطی ثابت است نتایج یکسانی دریافت کرد و یا به عبارتی انجام آزمایش‌ها مستقل از زمان و شخص انجام دهنده آزمایش باشد. بنابراین، هر آزمایش ۳ بار تکرار شده و نتایج آن در شکل ۳ برای هر اختلاف دما و هر یک از سطوح آبدوست و آبگریز آورده شده‌است. با توجه به این نمودارها می‌توان مشاهده کرد که در

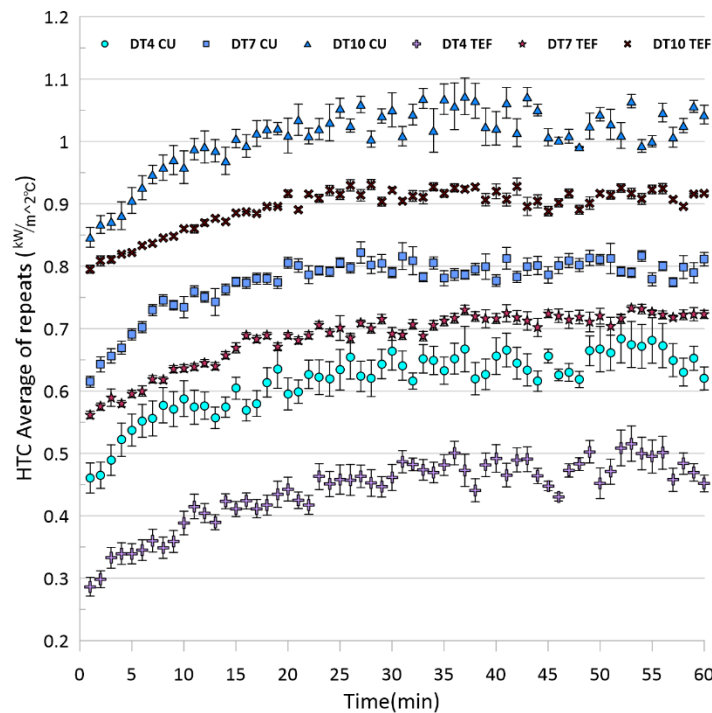
سنسورهای نزدیک به سطح از آن دارند و با توجه به شار حرارتی عبوری از آن، دمای سطح محاسبه شود که با توجه به فاصله بسیار کمی که بین آن‌ها است، این مقدار بسیار نزدیک به میانگین دماهایی است که سنسورهای نزدیک به سطح اندازه‌گیری کرده‌اند. همچنین برای دمای هوای مرطوب میانگین دماهای اندازه‌گیری شده توسط سری سنسورهای روبروی سطح محاسبه شده‌است.

$$HTC = \frac{\text{Heat Flux}}{\Delta T} \quad (2)$$

۲-۴-۲- دقت انجام آزمایش

۲-۴-۱- محاسبه انتشار خطا

با توجه به اینکه هر یک از سنسورهای مورد استفاده در این پژوهش با وسایل اندازه‌گیری دارای تاییدیه مانده هات و ایر کالیبره شده‌اند، اما همچنان اندازه‌گیری‌ها با مقداری خطا همراه است که با توجه به اینکه در محاسباتی مانده ضریب انتقال حرارت از سنسورهای دمایی متعددی استفاده شده، این خطا ممکن است انتشار یابد، لذا لازم است میزان انتشار خطا در محاسبات موجود بررسی شده و از کم بودن آن و اینکه تاثیر بسزایی در نتایج و مقایسات انجام شده ندارد اطمینان حاصل کرد. معادله (۳) برای محاسبه



شکل ۴. میانگین و انحراف از معیار ضریب انتقال حرارت تکرارهای هر آزمایش در هر دقیقه

Fig. 4. Mean and standard deviation of heat transfer coefficient of repetitions of each experiment per minute

۳-۱- بررسی انتقال حرارت

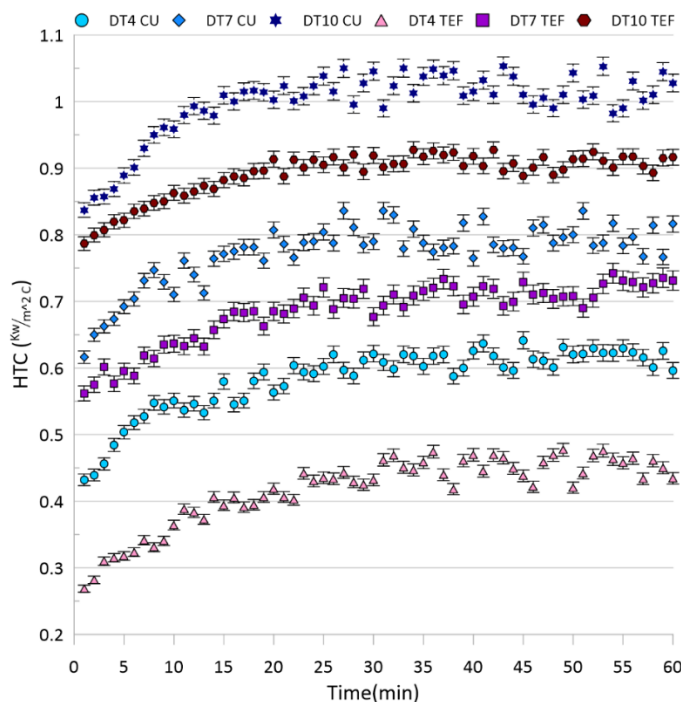
برای بررسی انتقال حرارت با توجه به معادلات ارائه شده در بخش قبل و با توجه به اختلاف دمای ثبت شده توسط سنسورها در هر دقیقه ۱۰ داده برداری صورت گرفته است که میانگین ۱۰ مقدار محاسبه شده برای ضریب انتقال حرارت به عنوان ضریب انتقال حرارت در آن دقیقه محاسبه شده است. همچنین با توجه به اینکه هر آزمایش ۳ بار انجام شده میانگین هر ضریب در ۳ آزمایش محاسبه شده و به عنوان ضریب انتقال حرارت در آن لحظه گزارش شده است و در شکل ۵ در هر دقیقه و به مدت ۶۰ دقیقه نمایش داده شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود، در ابتدای انجام آزمایش تا دقایقی پس از آن ضریب انتقال حرارت رو به افزایش است تا در مقدار مشخصی قرار گرفته و حول آن نوسان کند. این زمان در واقع زمانی است که لازم است طی شود تا پدیده چگالش به وقوع بپیوندد و انتقال حرارت نهان حاصل از آن به انتقال حرارت کل افزوده شود، لذا همانطور که مشاهده می‌شود این مسئله که منطبق بر فیزیک مسئله حاضر است در نمودارها پدیدار شده است. با افزایش اختلاف دما شیب قسمت اولیه نمودارها

تکرار هر آزمایش تغییرات بسیار ناچیز بوده ضمن اینکه روندهای مشابهی برای هر تکرار مشاهده می‌شود که اطمینان از تکرارپذیر بودن آزمایش‌ها را برای ما فراهم می‌کند.

شکل ۴ میانگین ضریب انتقال حرارت تکرارهای هر آزمایش را در هر دقیقه نشان می‌دهد که انحراف از معیار محاسبه شده در آن دقیقه برای ۳ تکرار به شکل نوار خطا نمایش داده شده است که کوچک بودن محدوده آن‌ها نشان دهنده دقت مناسب آزمایش‌ها به لحاظ تکرارپذیری است.

۳- بررسی نتایج آزمایش

در این بخش نتایج حاصل از آزمایش‌ها مورد بحث و بررسی قرار خواهند گرفت. در ابتدا عملکرد انتقال حرارت سطوح آبدوست و آبگریز و تاثیر تغییر اختلاف دمای سطح و هوای مرطوب بر آن مورد بررسی قرار گرفته و در ادامه زمان افتادن و اندازه اولین قطره‌ای که از سطح سر خورده و آن را جاروب می‌کند محاسبه شده است و در نهایت توزیع قطرات در دقیقه ۲۰ ام از شروع آزمایش که هنوز هیچ قطره‌ای از سطحی جدا نشده مورد مطالعه قرار گرفته است.



شکل ۵. ضریب انتقال حرارت گذرا چگالش روی سطوح آبدوست و آبگریز در اختلاف دماهای ۴، ۷ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد

Fig. 5. Transient heat transfer coefficient of condensation on hydrophilic and hydrophobic surfaces in a temperature difference of 4, 7, and 10 degrees Celsius

موجب تغییر در ضریب انتقال حرارت و نوسان در مقدار آن می‌شود. جدول ۱ میانگین داده‌های نشان داده شده در شکل ۵ را برای هر آزمایش نشان می‌دهد. از مقایسه نمودارها می‌توان مشاهده کرد که بیشترین مقدار انتقال حرارت روی سطح آبدوستی است که اختلاف دما در آن ۱۰ درجه سانتی‌گراد بوده‌است. با توجه به اینکه انرژی فعالسازی مورد نیاز برای شروع پدیده چگالش روی سطح آبدوست کمتر است و همچنین محرک لازم برای این پدیده که اختلاف دما است نیز زیاد است، انتقال حرارت در آن بیشتر از سایر آزمایش‌ها بوده‌است. بیشترین میانگین ضریب انتقال حرارت بعدی مربوط به سطح آبگریز در اختلاف دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد بوده و همانطور که نتایج نشان می‌دهد نسبت به سطح آبدوست در اختلاف دمای ۷ درجه سانتی‌گراد ضریب انتقال حرارت در آن بیشتر است، یعنی اختلاف دمای بیشتر مقاومت در برابر چگالش که ناشی از آبگریزی سطح بوده را به شکلی جبران کرده که تاثیر آن از آبدوستی سطح در اختلاف دمای کمتر نیز بیشتر بوده است. به همین ترتیب در هر اختلاف دمایی میانگین انتقال حرارت در

تندتر شده است و یا به عبارتی پدیده چگالش در آن‌ها سریع‌تر رخ داده است که این مسئله نیز قابل توجیه است چرا که با افزایش اختلاف دما بین سطح و هوای مرطوب انرژی مورد نیاز اولیه برای شروع فرآیند چگالش به مقدار بیشتری در دسترس قرار گرفته و زودتر منجر به وقوع آن می‌شود پس طبیعی است که در زمان کوتاه‌تری اتفاق افتاده‌است.

نوسانات مشاهده شده در نمودار دلایل شناخته شده و ناشناخته بسیاری دارد و با توجه به اینکه این پدیده به شکل تجربی بررسی شده عوامل بسیاری در آن تغییر ایجاد می‌کنند. در بخش «ساخت دستگاه تست» توضیح داده شده‌است که سعی شده تا جای ممکن عواملی که موجب ایجاد خطا می‌شوند را حذف کرد، اما بنابر ماهیت این پدیده که بسیار تصادفی است عواملی مثل لرزش کوچک که ممکن است به دلیل کارکرد فن‌ها باشد و یا هوایی که در اطراف جریان دارد موجب نوسانات کوچکی شوند اما دلیل اصلی این نوسانات در ذات این پدیده است چرا که قطرات روی سطح دائم سیکل‌های جوانی زنی، رشد، آمیختگی با یکدیگر و سر خوردن را دارند که

جدول ۱. ضریب انتقال حرارت میانگین چگالش روی سطوح آبدوست و آبگریز در اختلاف دماهای ۴، ۷ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد

Table 1. Average heat transfer coefficient of condensation on hydrophilic and hydrophobic surfaces in a temperature difference of 4, 7, and 10 degrees Celsius

سطح آبدوست			سطح آبگریز			نوع سطح
۴	۷	۱۰	۴	۷	۱۰	اختلاف دما
میانگین ضریب انتقال حرارت						
۰/۵۸	۰/۷۷	۰/۹۹	۰/۴۲	۰/۶۸	۰/۸۹	$\left(\frac{kW}{m^2 \cdot ^\circ C} \right)$

سطح آبدوست از آبگریز بیشتر بوده‌است.

آبگریز در هر اختلاف دمای معین افتادن قطرات روی سطح آبدوست سریع‌تر بوده‌است.

۳-۲- زمان افتادن و اندازه اولین قطره

علاوه بر زمان افتادن اولین قطره، اندازه قطره‌ای که سطح را ترک کرده نیز دارای اهمیت است. روی سطح آبدوست در اختلاف دمای ۴ درجه سانتی‌گراد آمیختگی پیاپی قطرات در مدت خیلی کوتاهی رخ داده که در نهایت ثبت تصویر قطره نهایی حاصل که جاذبه بر کشش سطحی آن غلبه کرده و منجر به سر خوردن آن شده‌است را با مشکل مواجه کرده‌است. بنابراین، درباره اندازه این قطره نمی‌توان محاسبه دقیقی داشت ولی برای سایر آزمایش‌ها تصویر قطره‌ای که پس از رشد و آمیختگی‌ها از سطح سر خورده ثبت شده و محاسبات آن توسط نرم افزار ویژن اسیستنت لب و یو انجام شده‌است. روی سطح آبدوست در اختلاف دماهای ۷ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب قطر هیدرولیکی قطره‌ای که سطح را ترک کرده ۰/۸۳۶ و ۰/۹۵۷ میلی‌متر محاسبه شده‌است. برای سطح آبگریز به ترتیب در اختلاف دماهای ۴، ۷ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد، قطر هیدرولیکی قطره سر خورده ۰/۵۵۱، ۰/۸۰۴ و ۰/۹۲ میلی‌متر محاسبه شده‌است. با توجه به مقادیر محاسبه شده استنباط می‌شود با افزایش اختلاف دما قطره‌ای که سطح را ترک کرده بزرگتر بوده ولی در زمان کوتاه‌تری افتادن آن رخ داده است.

با توجه به اینکه پدیده چگالش یک فرآیند خود به خودی نبوده و نیازمند عواملی است که محرک این پدیده باشند، اختلاف دما به مثابه یک محرک عمل کرده که هرچه بیشتر باشد موجب افزایش نرخ چگالش شده و لذا رشد و آمیختگی پیاپی قطرات سریع‌تر شده تا در نهایت منجر به تولید

شکل ۶ چند لحظه قبل و بعد از افتادن اولین قطره در هر آزمایش را نشان می‌دهد و با توجه به اینکه در هر آزمایش در زمان متفاوتی نسبت به آزمایش دیگر این اتفاق افتاده، پس تصاویر موجود در زمان ثابت و معینی ثبت نشده‌است. قسمت الف افتادن اولین قطره روی سطح آبدوست را در اختلاف دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد و حدود ۴۳ دقیقه پس از شروع آزمایش رخ داده است. قسمت ب مربوط به لحظه‌ای قبل و بعد از افتادن اولین قطره روی سطح آبدوست در اختلاف دمای ۷ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد که حدود ۳۰ دقیقه پس از شروع آزمایش رخ داده و در نهایت برای سطح آبدوست در اختلاف دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد زمان افتادن اولین قطره در قسمت پ نشان داده شده که حدود ۲۲ دقیقه پس از شروع آزمایش بوده است. برای سطح آبگریز در اختلاف دمای ۴، ۷ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد لحظاتی قبل و پس از افتادن اولین قطره به ترتیب در قسمت‌های ت، ث و ج نشان داده شده‌است که در اختلاف دمای ۴ درجه سانتی‌گراد ۵۳ دقیقه پس از شروع آزمایش، در اختلاف دمای ۷ درجه سانتی‌گراد در حدود ۴۲ دقیقه پس از شروع آزمایش و در نهایت در اختلاف دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد در حدود ۲۷ دقیقه پس از شروع آزمایش اولین قطره سطح را جاروب کرده‌است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد با افزایش اختلاف دما افتادن اولین قطره از سطح در زمان کوتاه‌تری رخ داده و در مقایسه بین سطح آبدوست و



شکل ۶. افتادن اولین قطره در پدیده چگالش روی سطوح آبدوست و آبگریز در اختلاف دماهای ۴، ۷ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد (ادامه دارد)

Fig. 6. The first droplet falling in the condensation phenomenon on hydrophilic and hydrophobic surfaces at the temperature difference of 4, 7, and 10 degrees Celsius(Continued)



بعد از افتادن اولین قطره

After the first droplet falling



قبل از افتادن اولین قطره

Before the first droplet falling

(ت) اختلاف دما ۴ درجه سانتی‌گراد-سطح آبگریز

D) temperature difference of 4 degrees Celsius - hydrophobic surface



بعد از افتادن اولین قطره

After the first droplet falling

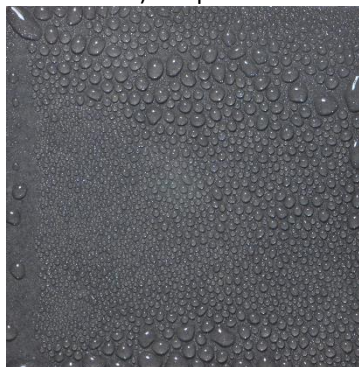


قبل از افتادن اولین قطره

Before the first droplet falling

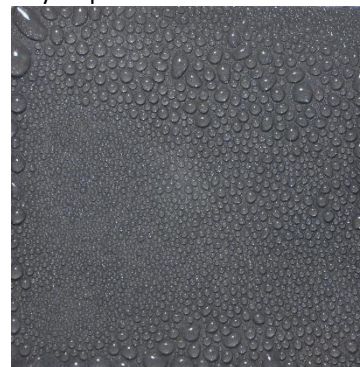
(ث) اختلاف دما ۷ درجه سانتی‌گراد-سطح آبگریز

E) temperature difference of 7 degrees Celsius - hydrophobic surface



بعد از افتادن اولین قطره

After the first droplet falling



قبل از افتادن اولین قطره

Before the first droplet falling

(ج) اختلاف دما ۱۰ درجه سانتی‌گراد-سطح آبگریز

F) temperature difference of 10 degrees Celsius - hydrophobic surface

شکل ۶. افتادن اولین قطره در پدیده چگالش روی سطوح آبدوست و آبگریز در اختلاف دماهای ۴، ۷ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد

Fig. 6. The first droplet falling in the condensation phenomenon on hydrophilic and hydrophobic surfaces at the temperature difference of 4, 7, and 10 degrees Celsius

اینکه سطح آبگریز است و نه فوق آبگریز قطرات از نوع کسی-باکستر نبوده و زاویه کمتری با سطح داشته و می‌توان گفت قطرات از نوع ونزل روی آن مشاهده می‌شود.

علاوه بر مشاهداتی که به لحاظ تفاوت در شکل ظاهری قطرات در هر سطح ملاحظه می‌شود، برای بررسی دقیق‌تر، اندازه قطر هیدرولیکی هر قطره محاسبه شده‌است. جدول ۲ میانگین و انحراف از معیار توزیع قطرات در هر آزمایش را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش اختلاف دما، میانگین قطر قطرات چگالش روی سطح آبدوست افزایش یافته و پراکندگی اندازه قطرات نیز بیشتر می‌شود. این امر نشان‌دهنده افزایش نرخ جوانه زنی و رشد قطرات در اختلاف دماهای بالاتر است. بر روی سطح آبگریز، میانگین قطر قطرات در دماهای ۴ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد تفاوت قابل توجهی نشان نمی‌دهد. با این حال، پراکندگی اندازه قطرات در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر است که می‌تواند به دلیل وجود بیشتر قطرات بزرگتر و کوچکتر از اندازه میانگین روی آن باشد.

با توجه به کمترین میزان پراکندگی داده‌ها در جدول قبلی که برابر ۰/۰۲۱ است، قطر هیدرولیکی قطرات به بازه‌هایی با همین اندازه تقسیم‌بندی شد تا تغییرات اندازه قطرات در سطوح مختلف و دماهای متفاوت به دقت بررسی شود. نتایج این تقسیم‌بندی در جدول ۳ ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد که بزرگترین قطر متوسط قطرات بر روی سطح آبدوست در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شده است. پس از آن، سطوح آبدوست در دمای ۷ درجه سانتی‌گراد و سطح آبگریز در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد دارای بزرگترین قطر متوسط قطرات هستند. نکته قابل توجه، مشاهده قطراتی با قطر بیش از ۰/۴ میلی‌متر تنها بر روی سطح آبدوست در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد است. در سایر شرایط آزمایش، حداکثر قطر مشاهده شده کمتر از ۰/۲۷۳ میلی‌متر بوده است. وجود قطرات با ابعاد بسیار بزرگتر بر روی سطح آبدوست در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد، نشان‌دهنده افزایش قابل توجه نرخ چگالش و انتقال حرارت در این شرایط است.

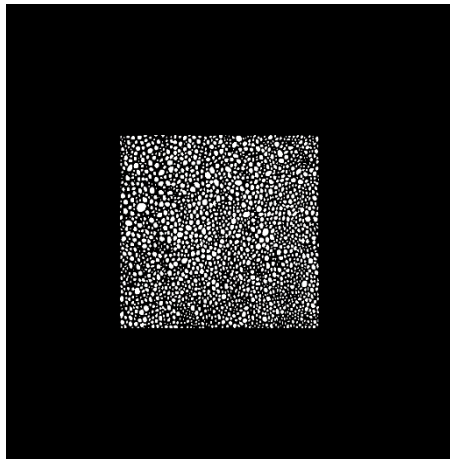
بر اساس مشاهدات، تعداد قطرات ریز بر روی سطوح آبگریز به مراتب بیشتر از سطوح آبدوست است. همچنین، پراکندگی اندازه قطرات بر روی سطوح آبگریز کمتر بوده و قطرات تمایل بیشتری به حفظ شکل کروی خود دارند. در مقابل، بر روی سطوح آبدوست، قطرات پس از تشکیل تمایل به گسترش و ادغام با یکدیگر دارند و در نتیجه، قطرات بزرگتری تشکیل می‌شود. این تفاوت در رفتار قطرات را می‌توان به ماهیت متفاوت سطوح آبگریز و آبدوست نسبت داد. سطوح آبگریز به دلیل نیروی دافعه بین

قطره‌ای سنگین‌تر در زمان کوتاهی‌تری شده که سطح را ترک کرده‌است. یکی دیگر از محرک‌های چگالش انرژی آزاد سطح است که هرچه بیشتر باشد یعنی سطح آبدوست تر باشد نرخ چگالش افزایش می‌یابد. بنابراین، در بالاترین اختلاف دما روی سطح آبدوست بیشترین محرک‌ها حاکم هستند که همین امر موجب افزایش نرخ چگالش شده تا در مدت زمان کوتاهی‌تری قطره بزرگتری روی آن تشکیل شود که در اثر جاذبه سطح را جاروب کرده و از آن خارج شود.

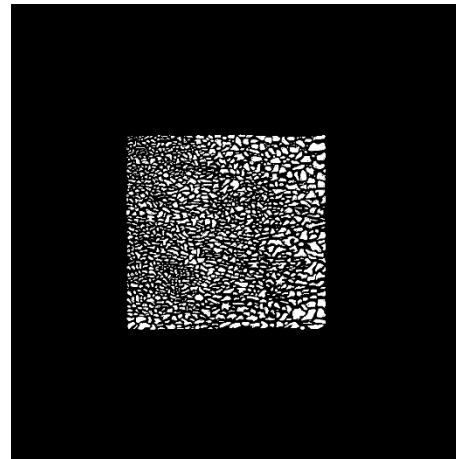
با وجود اینکه این مسئله نشان‌دهنده افزایش نرخ چگالش بوده و امری مطلوب تلقی می‌شود ولی اینکه همین مسئله منجر به ترشدگی بیشتر سطح و در نهایت تبدیل رژیم چگالش از قطره‌ای به لایه‌ای شود نیز محتمل‌تر می‌شود. نکته دیگری که از نتایج حاصل بدست می‌آید کوچکتر بودن قطرات ترک شده روی سطح آبگریز است که دوباره با وجود اینکه نشان‌دهنده کمتر بودن نرخ چگالش است ولی موجب خروج زودتر قطرات از آن و کمتر شدن احتمال لایه‌ای شدن رژیم چگالش را در پی دارد که در درازمدت می‌تواند اثرات چشم‌گیری داشته باشد.

۳-۳- نحوه توزیع قطرات

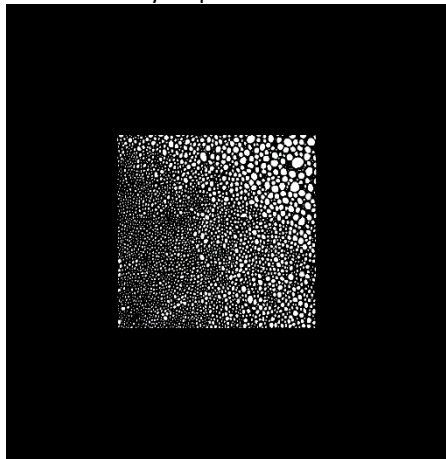
برای بررسی توزیع اندازه قطرات باید زمان مشخصی برای ثبت هر تصویر را در نظر گرفت تا مقایسه معنادار باشد. مسئله مهم دیگر این است که با هر بار جاروب سطح که توسط قطره‌ای که سرخورده رخ می‌دهد، توزیع و چینش قطرات تغییرات زیادی می‌کند و لذا برای انجام مقایسه درست بین آزمایش‌های متفاوت زمان مناسب زمانی است که هنوز اولین قطره در هیچ سطحی نیفتاده است. لذا با توجه به نتایج قسمت قبل در دقیقه ۲۰ ام هر آزمایش هنوز قطره‌ای هیچ یک از سطوح مورد آزمایش را ترک نکرده است و لذا شکل ۷ توزیع قطرات را در این زمان در هر آزمایش نشان می‌دهد. برای بررسی توزیع قطرات ابعاد مشخصی از مرکز هر سطح در نرم افزار ویژن اسیستنت لب ویو ماسک شده تا هزینه زمانی بررسی این سطوح را با توجه به تعداد زیاد قطراتی که هر سطح را اشغال کرده کاهش دهد. از مشاهده تصاویر می‌توان دریافت که شکل ظاهری تشکیل قطرات روی سطوح آبدوست و آبگریز مطابق با ماهیت آن‌ها متفاوت است. روی سطح آبدوست با توجه به ماهیت آن قطرات تا جای ممکن روی سطح پخش شده و از شکل کروی خود خارج شده‌اند ولی روی سطح آبگریز با توجه به تمایل کمتری که این سطح به جذب مولکول‌های آب دارد قطرات خیلی پخش نشده و تا حدودی شکل کروی خود را حفظ کرده‌اند که البته با توجه به



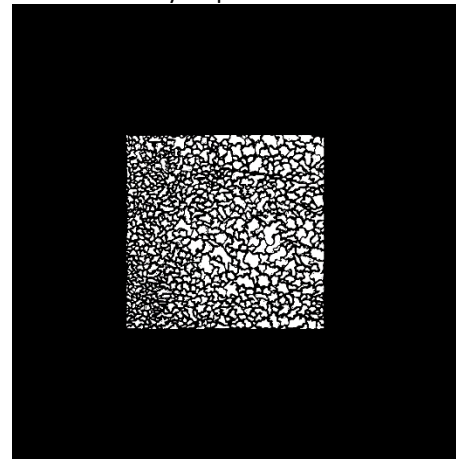
ب) اختلاف دما ۴ درجه سانتی‌گراد- سطح آبگریز
B) Temperature difference 4 degrees Celsius - hydrophobic surface



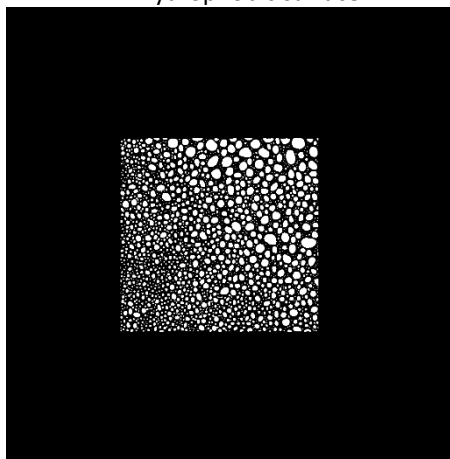
الف) اختلاف دما ۴ درجه سانتی‌گراد- سطح آبدوست
A) Temperature difference 4 degrees Celsius - hydrophilic surface



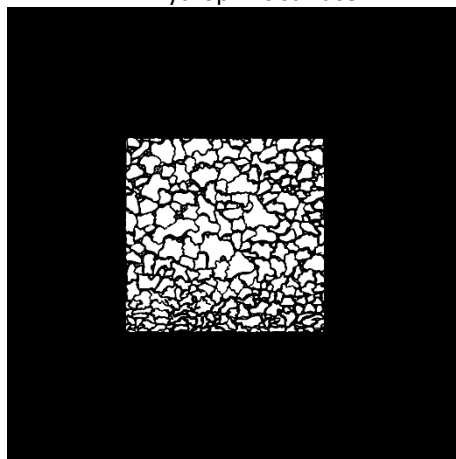
ت) اختلاف دما ۷ درجه سانتی‌گراد- سطح آبگریز
D) Temperature difference 7 degrees Celsius - hydrophobic surface



پ) اختلاف دما ۷ درجه سانتی‌گراد- سطح آبدوست
C) Temperature difference 7 degrees Celsius - hydrophilic surface



ج) اختلاف دما ۱۰ درجه سانتی‌گراد- سطح آبگریز
F) Temperature difference 10 degrees Celsius - hydrophobic surface



ث) اختلاف دما ۱۰ درجه سانتی‌گراد- سطح آبدوست
E) Temperature difference 10 degrees Celsius - hydrophilic surface

شکل ۷. بخش ماسک شده از مرکز هر سطح در هر آزمایش

Fig. 7. Masked section of the center of each surface in each experiment

جدول ۲. میانگین و انحراف از معیار قطر هیدرولیکی قطرات در هر آزمایش

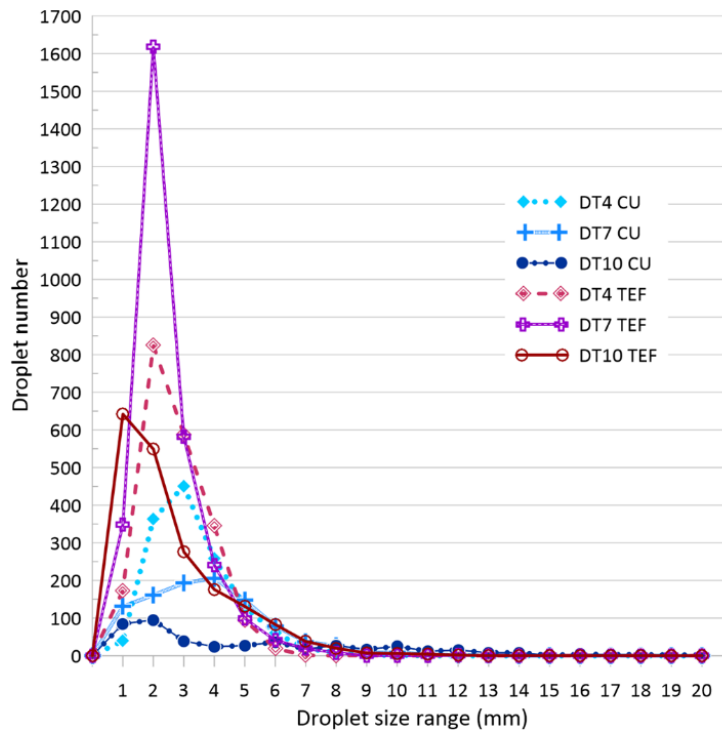
Table 2. Average and standard deviation of the hydraulic diameter of droplets in each test

مشخصات آماری		آزمایش	
انحراف از معیار (mm)	میانگین (mm)	اختلاف دما (°C)	سطح
۰/۰۲۷	۰/۰۵۹	۴	آبدوست
۰/۰۴۱	۰/۰۶۹	۷	آبدوست
۰/۰۸۹	۰/۱۰۰	۱۰	آبدوست
۰/۰۲۱	۰/۰۴۶	۴	آبگریز
۰/۰۲۳	۰/۰۴۱	۷	آبگریز
۰/۰۳۶	۰/۰۴۶	۱۰	آبگریز

جدول ۳. تعداد قطرات موجود در محدوده مشخص اندازه قطر هیدرولیکی در هر آزمایش

Table 3. The number of droplets in the specified range of hydraulic diameter size in each test

تعداد قطرات در هر آزمایش						محدوده قطر قطره (mm)	شماره محدوده
آبگریز			آبدوست				
اختلاف دما ۱۰°C	اختلاف دما ۷°C	اختلاف دما ۴°C	اختلاف دما ۱۰°C	اختلاف دما ۷°C	اختلاف دما ۴°C		
۶۴۲	۳۴۹	۱۷۳	۸۵	۱۳۱	۴۰	<۰/۰۲۱	۱
۵۴۹	۱۶۱۸	۸۲۵	۹۵	۱۶۱	۳۶۳	۰/۰۴۲ تا ۰/۰۲۱	۲
۲۷۶	۵۸۲	۵۸۸	۳۹	۱۹۳	۴۵۱	۰/۰۶۳ تا ۰/۰۴۲	۳
۱۷۶	۲۴۱	۳۴۵	۲۴	۲۰۶	۲۵۸	۰/۰۸۴ تا ۰/۰۶۳	۴
۱۳۱	۹۹	۹۵	۲۷	۱۴۸	۱۳۰	۰/۱۰۵ تا ۰/۰۸۴	۵
۸۳	۴۱	۱۹	۳۶	۷۹	۶۱	۰/۱۲۶ تا ۰/۱۰۵	۶
۳۸	۱۹	۱	۱۸	۳۷	۱۹	۰/۱۴۷ تا ۰/۱۲۶	۷
۲۰	۸	۰	۲۷	۲۶	۹	۰/۱۶۸ تا ۰/۱۴۷	۸
۷	۰	۱	۱۷	۸	۱	۰/۱۸۹ تا ۰/۱۶۸	۹
۶	۰	۰	۲۵	۹	۲	۰/۲۱ تا ۰/۱۸۹	۱۰
۴	۰	۰	۱۲	۳	۰	۰/۲۳۱ تا ۰/۲۱	۱۱
۲	۱	۰	۱۵	۲	۰	۰/۲۵۲ تا ۰/۲۳۱	۱۲
۰	۰	۰	۸	۱	۰	۰/۲۷۳ تا ۰/۲۵۲	۱۳
۰	۰	۰	۸	۰	۰	۰/۲۹۴ تا ۰/۲۷۳	۱۴
۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰/۳۱۵ تا ۰/۲۹۴	۱۵
۰	۰	۰	۴	۰	۰	۰/۳۳۶ تا ۰/۳۱۵	۱۶
۰	۰	۰	۳	۰	۰	۰/۳۵۷ تا ۰/۳۳۶	۱۷
۰	۰	۰	۳	۰	۰	۰/۳۷۸ تا ۰/۳۵۷	۱۸
۰	۰	۰	۲	۰	۰	۰/۳۹۹ تا ۰/۳۷۸	۱۹
۰	۰	۰	۲	۰	۰	۰/۴۲ تا ۰/۳۹۹	۲۰



شکل ۸. تعداد قطرات موجود در محدوده اندازه‌های متفاوت قطر هیدرولیکی برای هر آزمایش

Fig. 8. The number of droplets in the range of different sizes of the hydraulic diameter for each test

شیب ملایم‌تری نسبت به سطوح آبگریز دارند، به این معنی که توزیع اندازه قطرات بر روی سطوح آبدوست پراکنده‌تر است. با افزایش اختلاف دما، تعداد کل قطرات و همچنین تعداد قطرات بزرگتر افزایش می‌یابد. این نشان می‌دهد که افزایش اختلاف دما باعث افزایش نرخ تشکیل و رشد قطرات می‌شود. برای هر دو نوع سطح، با افزایش اختلاف دما، قله منحنی به سمت اندازه‌های بزرگتر منتقل می‌شود.

در آزمایش‌هایی که اختلاف دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد داشتند، چه بر روی سطح آبدوست و چه بر روی سطح آبگریز، به دلیل اختلاف دمای بالا، نرخ جوانه‌زنی به شدت افزایش یافته است. این امر باعث شده است که تمامی نواحی سطح برای جوانه زنی و رشد فعال باشند. بنابراین، قطرات با ابعاد میانگین در همسایگی یکدیگر واقع شده و در اثر آمیختگی تبدیل به قطرات بزرگتری شده‌اند لذا به همین دلیل است که قله منحنی‌های مربوط به این آزمایش‌ها در محدوده‌ی کمتر از محدوده‌ای است که میانگین اندازه

مولکول‌های مایع و سطح، مانع از گسترش قطرات بر روی سطح شده و باعث حفظ شکل کروی آن‌ها می‌شوند. در نتیجه، امکان ادغام قطرات و تشکیل قطرات بزرگ‌تر بر روی این سطوح کمتر است. در آزمایش انجام شده با اختلاف دمای ۴ درجه سانتی‌گراد بر روی سطح آبگریز، کمترین تعداد قطرات بزرگ مشاهده گردید. این پدیده را می‌توان به دو عامل اصلی نسبت داد: اولاً، کاهش اختلاف دما به عنوان محرک اصلی فرآیند چگالش، باعث کاهش نرخ تشکیل قطرات شده است. ثانیاً، ماهیت آبگریز سطح، که تمایل به دفع مولکول‌های مایع دارد، مانع از گسترش و ادغام قطرات با یکدیگر شده و در نتیجه، رشد قطرات با سرعت بسیار کمتری صورت می‌گیرد.

شکل ۸ اطلاعات جدول ۳ را در یک نمودار نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که به طور کلی، اکثر قطرات در محدوده‌های اندازه کوچکتر قرار دارند و با افزایش اندازه قطره، تعداد قطرات به شدت کاهش می‌یابد که این یک الگوی معمول در پدیده چگالش است. خطوط مربوط به سطوح آبدوست

قطره سطح را ترک کرده در اختلاف دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد ۲۲ دقیقه پس از آزمایش روی سطح آبدوست به ابعاد ۰/۹۵۷ و سپس روی سطح آبگریز ۲۷ دقیقه پس از شروع آزمایش و به ابعاد ۰/۹۲ میلیمتر بوده‌است. ۵- در یک زمان مشخص تعداد قطرات بزرگ روی سطح آبدوست بیشتر از آبگریز بوده و با افزایش اختلاف دما نیز حضور قطرات بزرگتر بیشتر می‌شود و ۲۰ دقیقه پس از شروع هر آزمایش تنها روی سطح آبدوست در اختلاف دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد قطراتی به بزرگی حدود ۰/۴ میلیمتر مشاهده شده‌است.

با تشکر از جناب آقای مهندس حسام آمی احمدی

منابع

- [1] D. Tanner, C. Potter, D. Pope, D. West, Heat transfer in dropwise condensation—Part I The effects of heat flux, steam velocity and non-condensable gas concentration, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 8(3) (1965) 419-426.
- [2] I. Tanasawa, J.-i. Ochiai, Experimental study on dropwise condensation, *Bulletin of JSME*, 16(98) (1973) 1184-1197.
- [3] J. Su, Z. Sun, G. Fan, M. Ding, Experimental study of the effect of non-condensable gases on steam condensation over a vertical tube external surface, *Nuclear Engineering and Design*, 262 (2013) 201-208.
- [4] A. Fouda, M. Wasel, A. Hamed, E.-S.B. Zeidan, H. Elattar, Investigation of the condensation process of moist air around horizontal pipe, *International Journal of Thermal Sciences*, 90 (2015) 38-52.
- [5] Q. Yi, M. Tian, W. Yan, X. Qu, X. Chen, Visualization study of the influence of non-condensable gas on steam condensation heat transfer, *Applied Thermal Engineering*, 106 (2016) 13-21.
- [6] J. Lu, H. Cao, J. Li, Condensation heat and mass transfer of steam with non-condensable gases outside a horizontal tube under free convection, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 139 (2019) 564-576.
- [7] Y.-h. Gu, Q. Liao, M. Cheng, Y.-d. Ding, X. Zhu, Condensation heat transfer characteristics of moist air

قطرات در آن قرار دارد چرا که قطرات در ابعاد میانگین در اثر آمیختگی به قطرات بزرگتری تبدیل شده و از تعداد آن‌ها کاسته است. در آزمایش با اختلاف دمای ۴ درجه سانتی‌گراد روی سطح آبگریز، نیز شاهد همین پدیده هستیم؛ اما دلایل آن متفاوت است. در این حالت، به دلیل پایین بودن نرخ چگالش، تعداد جوانه‌های اولیه کمتر بوده و قطرات فرصت کمتری برای رشد و ادغام پیدا کردند. در نتیجه، تعداد زیادی قطرات ریز بر روی سطح پراکنده بوده و قله منحنی به سمت اندازه‌های بسیار کوچک متمایل شده‌است.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش آزمایش‌هایی طراحی و اجرا شده که در آن شرایط محیطی کنترل شده‌ای برای هر آزمایش اعمال شده‌است. در هر یک از آزمایش‌ها رطوبت نسبی هوای مرطوب ۸۸ درصد و سرعت جریان هوای رسیده به سطح چگالش ۵ متر بر ثانیه بوده و در هر آزمایش اختلاف دمای بین هوای مرطوب و سطح تغییر داده شده و هر بار در یکی از مقادیر ۴، ۷ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد ثابت شده‌است. علاوه بر اختلاف دما نوع سطح نیز تغییر کرده‌است که تمامی آزمایش‌ها یک بار روی سطح آبدوست و یک بار هم روی سطح آبگریز انجام داده شده‌است. پس از بررسی تکرارپذیری و صحت نتایج آزمایش، انتقال حرارت و توزیع قطرات روی سطح مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که:

۱- زمانی لازم است که فرآیند چگالش به وقوع بپیوندد و انتقال حرارت نهان حاصل از آن به انتقال حرارت کل افزوده گردد که متناسب با این زمان شیب نمودارهای ضریب انتقال حرارت نسبت به زمان تغییر کرده و شیب بیشتر در ابتدای هر نمودار نشان دهنده سپری شدن زمان کوتاهتری برای شروع چگالش و افزودن انتقال حرارت نهان است.

۲- آبدوست بودن سطح و افزایش اختلاف دما، میانگین ضریب انتقال حرارت را افزایش می‌دهد و بیشترین ضریب انتقال حرارت در اختلاف دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب روی سطوح آبدوست و آبگریز رخ داده که برابر هستند با ۰/۹۹ و ۰/۸۹ کیلووات بر مترمربع درجه سانتی‌گراد.

۳- تاثیر اختلاف دما روی مقدار ضریب انتقال حرارت نسبت به نوع سطح (آبدوست یا آبگریز) بیشتر بوده، چرا که مشاهده شده است ضریب انتقال حرارت سطح آبگریز در اختلاف دماهای بالاتر از سطوح آبدوست در اختلاف دماهای پایین‌تر بیشتر است.

۴- هرچه اختلاف دما روی یک سطح بیشتر شود زمان خروج اولین قطره از آن کوتاهتر و اندازه آن بزرگتر است. بنابراین، سریع‌ترین حالتی که

- [17] D.-Y. Ji, J.-W. Lee, D. Kim, W. Hwang, K.-Y. Lee, Effective reduction of non-condensable gas effects on condensation heat transfer: Surface modification and steam jet injection, *Applied Thermal Engineering*, 174 (2020) 115264.
- [18] M. Muneeshwaran, C.-C. Wang, Energy-saving of air-cooling heat exchangers operating under wet conditions with the help of superhydrophobic coating, *Energy Conversion and Management*, 229 (2021) 113740.
- [19] X. Wang, W. Xu, Z. Chen, B. Xu, Dropwise condensation heat transfer on nanostructured superhydrophobic surfaces with different inclinations and surface subcoolings, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 181 (2021) 121898.
- [20] X.-H. Ma, X.-D. Zhou, Z. Lan, L. Yi-Ming, Y. Zhang, Condensation heat transfer enhancement in the presence of non-condensable gas using the interfacial effect of dropwise condensation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(7-8) (2008) 1728-1737.
- [21] H. Hu, G. Tang, D. Niu, Experimental investigation of condensation heat transfer on hybrid wettability finned tube with large amount of noncondensable gas, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 85 (2015) 513-523.
- [22] X. Chen, J.A. Morrow, M.M. Derby, Mini-channel flow condensation enhancement through hydrophobicity in the presence of noncondensable gas, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115 (2017) 11-18.
- [23] R. Gupta, C. Das, A. Datta, R. Ganguly, Background Oriented Schlieren (BOS) imaging of condensation from humid air on wettability-engineered surfaces, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 109 (2019) 109859.
- [24] R. Wen, X. Zhou, B. Peng, Z. Lan, R. Yang, X. Ma, Falling-droplet-enhanced filmwise condensation in the presence of non-condensable gas, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 140 (2019) 173-186.
- [25] T.-Y. Zhang, L.-W. Mou, J.-Y. Zhang, L.-W. Fan, J.-Q. Li, A visualized study of enhanced steam condensation heat transfer on a honeycomb-like microporous outside a three-dimensional finned tube, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 158 (2020) 119983.
- [8] X. Ma, J. Ma, H. Tong, H. Jia, The Investigation on Heat Transfer Characteristics of Steam Condensation in Presence of Noncondensable Gas under Natural Convection, *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2021 (2021) 1-13.
- [9] X. Ma, X. Xiao, H. Jia, J. Li, Y. Ji, Z. Lian, Y. Guo, Experimental research on steam condensation in presence of non-condensable gas under high pressure, *Annals of Nuclear Energy*, 158 (2021) 108282.
- [10] M.S. Bonab, R. Kempers, A. Amirfazli, Determining transient heat transfer coefficient for dropwise condensation in the presence of an air flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 173 (2021) 121278.
- [11] C. Graham, P. Griffith, Drop size distributions and heat transfer in dropwise condensation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 16(2) (1973) 337-346.
- [12] J.E. Castillo, J.A. Weibel, S.V. Garimella, The effect of relative humidity on dropwise condensation dynamics, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 80 (2015) 759-766.
- [13] H. Hu, G. Tang, D. Niu, Experimental investigation of convective condensation heat transfer on tube bundles with different surface wettability at large amount of noncondensable gas, *Applied Thermal Engineering*, 100 (2016) 699-707.
- [14] X. Chen, M.M. Derby, Combined visualization and heat transfer measurements for steam flow condensation in hydrophilic and hydrophobic mini-gaps, *Journal of Heat Transfer*, 138(9) (2016) 091503.
- [15] 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.
- [16] Y. Shi, G. Tang, L. Shen, Study of coalescence-induced droplet jumping during phase-change process in the presence of noncondensable gas, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 152 (2020) 119506.

- Progress in Nuclear Energy, (2020) 103591.
- [27] Y.-L. Wu, J.-W. Zheng, M. Muneeshwaran, K.-S. Yang, C.-C. Wang, Moist air condensation heat transfer enhancement via superhydrophobicity, International Journal of Heat and Mass Transfer, 182 (2022) 121973.
- superhydrophobic surface in the presence of a non-condensable gas, International Journal of Heat and Mass Transfer, 150 (2020) 119352.
- [26] K. Zhang, J. Hu, Z. Nan, Z. Chen, N. Wang, Experimental study of heat transfer characteristics on condensation in the presence of NCG through thermal resistance analysis,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

P. Dehghani, S. M. Hoseinalipour, H. Akbari, Effect of temperature difference on condensation heat transfer and droplet distribution on hydrophilic and hydrophobic surfaces, Amirkabir J. Mech Eng., 56(6) (2024) 811-832.

DOI: [10.22060/mej.2024.22979.7703](https://doi.org/10.22060/mej.2024.22979.7703)



