

# بررسی اثر شعاع بیشینه قطره در انتقال گرمای چگالشی بر روی سطح ترکیبی آبگریز-آبدوست با اعمال اثر جابجایی مارانگونی

**احسان وطن جو** دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران،  
 vatanjoo\_ehsan@mecheng.iust.ac.ir  
**احسان امینیان** دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران،  
 e\_aminian@mecheng.iust.ac.ir  
**حمید صفاری\*** دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، saffari@iust.ac.ir

## چکیده

چگالش به دو صورت لایه‌ای و قطره‌ای اتفاق می‌افتد. در سطح ترکیبی، شعاع بیشینه قطره‌ی چگالیده بر روی سطح در ناحیه قطره‌ای به طور قابل توجهی بر میزان انتقال گرما اثر می‌گذارد. این مقاله به بررسی اثر بیشینه شعاع قطره در انتقال گرما بر روی سطوح ترکیبی پرداخته است. همچنین اثر جریان جابجایی مارانگونی که به دلیل ایجاد گرادیان دما به وجود می‌آید، به عنوان مقاومتی در مسیر انتقال گرما در روابط مربوط به این مدلسازی لحاظ شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که مقدار بهینه‌ای برای بیشینه شعاع قطره بمنظور افزایش انتقال گرما در سطح ترکیبی وجود دارد که این مقدار وابسته به اختلاف دمای سطح، عرض ناحیه لایه‌ای و زاویه تماس می‌باشد. با افزایش اختلاف دمای سطح از ۱ تا ۱۰ کلون، مقدار بیشینه شعاع بهینه از ۰.۲۵ تا ۰.۳ میلی‌متر تغییر می‌کند. همچنین این مقدار بهینه برای عرض ناحیه لایه‌ای ۰.۵ تا ۱ میلی‌متر، از ۰.۲۵ میلی‌متر به ۰.۳۵ میلی‌متر افزایش پیدا می‌کند. در نهایت بررسی نتایج اعمال اثر جابجایی مارانگونی نشان دهنده افزایش ۳۰٪ ضریب انتقال گرما در صورت اعمال جابجایی مارانگونی است.

**واژه‌های کلیدی:** چگالش قطره‌ای، چگالش لایه‌ای، سطح ترکیبی آبگریز-آبدوست، شعاع بیشینه قطره، جابجایی مارانگونی.

## Investigation of the effect of maximum droplet radius on condensation heat transfer on hydrophobic-hydrophilic hybrid surfaces with the effect of Marangoni convection

**E. Vatanjoo** School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran  
**E. Aminian** School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran  
**H. Saffari** School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

### Abstract

Condensation occurs in two modes, including filmwise and dropwise condensation. On a hybrid surface, the maximum radius of the condensed droplet on the surface in the dropwise region significantly affects the rate of heat transfer. In this paper, the effect of maximum droplet radius on heat transfer on hybrid surfaces is investigated. In this paper, the effect of Marangoni convection-current due to the temperature gradient- is considered as a resistance in the heat transfer process. The results indicate that an optimum value of the maximum droplet radius exists to enhance the condensation heat transfer of steam in the hybrid surface that is dependent on the surface subcooling degree, filmwise region width and the contact angle. As the surface subcooling degree increases from 1.0 K to 10 K, the optimum maximum radius of the droplet in the dropwise region increases from about 0.25 mm to 0.3 mm. Also, the optimum maximum radius of the droplet increases from about 0.25 mm to 0.35 mm when the filmwise region width is increased from 0.5 mm to 1.0 mm. Finally, the results of applying the effect of Marangoni convection indicate a 30% increase in the heat transfer coefficient in the case of applying Marangoni convection.

**Keywords:** Dropwise condensation, Filmwise condensation, Hydrophobic-hydrophilic hybrid surface, Maximum droplet radius, Marangoni convection.

قطره‌ای<sup>۱</sup> و لایه‌ای<sup>۲</sup> تقسیم بندی کرد. در چگالش لایه‌ای مایع چگالش یافته به صورت لایه‌ای از سیال، سطح چگالش را می‌پوشاند. در حالی که در چگالش قطره‌ای، بخار بصورت قطرات مایع مجزا با ابعاد مختلف بر سطح چگالش می‌یابد. نوع چگالش به عواملی مانند: میزان ترشوندگی<sup>۳</sup> سطح، انرژی و کشش سطحی بین سطح و مایع چگالیده

### ۱- مقدمه

چگالش به معنی تبدیل فاز بخار به فاز مایع در فشار اشباع ثابت است که به دلیل اهمیت آن در بسیاری از کاربردهای صنعتی متداول و در حال ظهور، مورد توجه و مطالعه مهندسی است. از جمله این صنایع می‌توان به سیستم‌های تولید توان، تبرید، انرژی هسته‌ای، تهویه مطبوع و چگالنده های باریافت گرما اشاره کرد [۱]. بازده این سیستم‌ها به مقدار قابل توجهی به چگونگی چگالش بر سطح بستگی دارد. فرآیند چگالش بر سطح را می‌توان به دو صورت

<sup>1</sup> Dropwise condensation

<sup>2</sup> Filmwise condensation

<sup>3</sup> Wettability

بستگی دارد. در چگالش قطره‌ای، قطرات چگالیده از بخار به صورت مجزا و با ابعاد مختلف بر روی سطح جوانه می‌زنند و پس از رشد و رسیدن به اندازه مشخص از روی سطح سر خورده و می‌توانند سایر قطرات موجود در مسیر خود را جاروب کرده و در نهایت سطحی خشک و خالی از قطره ایجاد می‌شود که بخار در تماس دوباره با سطح، چگالیده شده و قطرات جدید تشکیل می‌شود [۲].

یکی از اولین مدل‌سازی‌های مربوط به چگالش قطره‌ای توسط لی فور و رز [۳] در سال ۱۹۶۶ انجام شد. در این مدل‌سازی مقاومت‌های رسانش از قطره، انتقال جرم در سطح تماس بخار مایع، مقاومت لایه آبگریز کننده و مقاومت انحای قطره لحاظ شده و به بررسی انتقال گرما از تک قطره و توزیع اندازه قطرات پرداخته شده است. وموری و کیم [۴] چگالش قطره‌ای را با استفاده از توازن تعداد برای قطرات نیم کروی که با چگالش مستقیم رشد می‌کنند، مدل کردند. در این مدل‌سازی زاویه تماس قطره مقدار ثابت ۹۰ درجه در نظر گرفته شد. اکثر مدل‌سازی‌های ابتدایی انجام شده در چگالش قطره‌ای برای زاویه تماس ثابت ۹۰ درجه ویا کمتر از آن صورت گرفته بود تا اینکه در سال ۲۰۱۱ کیم و کیم [۵] چگالش قطره‌ای را بر روی یک سطح ابرآبگریز و زوایای تماس بزرگتر از ۹۰ درجه مدل‌سازی کردند. نتایج این مدل‌سازی نشان می‌دهد که افزایش زاویه تماس قطره از ۹۰ تا ۱۵۰ درجه منجر به افزایش انتقال گرما در تک قطره با شعاع‌های مختلف و همچنین افزایش انتقال گرما در اختلاف دماهای مختلف سطح و بخار اشباع می‌شود.

از جمله روش‌های ایجاد سطوح آبگریز می‌توان به ایجاد زبری‌هایی در ابعاد میکرو و نانو اشاره کرد که استفاده از سطوح میکرو-نانو ساختار منجر به قرارگیری قطره به دو صورت کیسی و ونزل بر روی سطح می‌شود. به این صورت که اگر قطره بر روی زبری‌ها قرار گرفته و به داخل آن نفوذ نکند حالت کیسی [۶] و در صورتی که به داخل زبری‌ها نفوذ کند حالت ونزل [۷] بوجود می‌آید. میلکوویچ و همکاران [۸] به بررسی عددی چگالش قطره‌ای بر روی سطوح ابرآبگریز میکرو-نانو ساختار پرداختند. در این مدل‌سازی آن‌ها دو نوع از مورفولوژی قطره را مشاهده کردند. نوع اول قطرات معلق<sup>۲</sup> که در آن بین زبری‌ها با بخار پر شده و نوع دوم قطرات ترکنده جزئی<sup>۳</sup> که در آن قطرات به شکل بالن بر روی سطح قرار گرفته‌اند. بررسی نتایج حاصل نشان می‌دهد که انتقال گرما در حالت ترکنده جزئی نسبت به سطح صاف و حالت معلق بیشتر می‌باشد.

زارعی و همکاران [۹] به بررسی عددی هندسه‌های مختلفی از میکرو-نانو ساختارها پرداختند. در این مدل ارائه شده میکرو-نانو ساختارهایی به شکل هرمی و مخروطی مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی نتایج نشان می‌دهد که می‌توان با اصلاح هندسه زبری انتقال گرمای چگالش قطره‌ای را افزایش داد. یک کار تجربی برای چگالش قطره‌ای توسط مائد و همکاران [۱۰] ارائه شده است. در این مدل توزیع قطرات و انتقال گرما بر روی سطوح متخلخل با تزریق روغن به عنوان لغزنده<sup>۴</sup> مورد مطالعه قرار گرفته است. مقایسه نتایج حاصل از این نوع سطوح

لغزنده با زبری‌های میکرو-نانو و نانو ساختار نشان دهنده افزایش ۱۰۰ درصدی انتقال گرما بر روی سطوح نانو ساختار متخلخل با تزریق روغن در مقایسه با میکرو-نانو ساختار است.

سطوح فلزی ضریب انتقال گرمای بالایی دارند و در نتیجه می‌توان به عنوان سطح چگالش مورد استفاده قرار گیرند. اما این سطوح خاصیت آبگریزی دارند و برای استفاده از آن‌ها در چگالش قطره‌ای استفاده از پوشش‌های آبگریزی برای ایجاد خاصیت آبگریزی بر روی سطح ضروری می‌باشد. در نتیجه از جمله چالش‌های موجود در انتقال گرمای چگالش قطره‌ای ایجاد پوشش‌های آبگریز با پایداری بالا می‌باشد تا پیوستگی ایجاد چگالش قطره‌ای بر روی سطوح حفظ شود. اخیراً طالش بهرامی و همکاران [۱۱] مطالعه تجربی را برای ساخت سطوح ابرآبگریز با ایجاد میکرو-نانو ساختار بر روی سطح مسی انجام دادند. آن‌ها با یک فرآیند الکتروشیمیایی درون الکترولیت دو جزئی آبی پتاسیم پروسولفات و سدیم هیدروکسید، ساختارهای میکرو-نانو بر روی فلز مس ایجاد کردند. بررسی نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که نمونه ساخته شده در هوای آزاد تا ۶ هفته خاصیت آبگریزی پایداری را ایجاد می‌کند.

پس از اینکه سطح ترکیبی آبگریز-آبدوست تبدیل به کشف تازه‌ای برای افزایش عملکرد انتقال گرمای چگالشی شد، اعمال مدل‌های قطره‌ای و لایه‌ای بر روی این سطوح به‌عنوان یک گزینه جدید برای مطالعه محققان مطرح شد. از جمله ویژگی‌های موثر بر چگالش قطره‌ای شعاع قطره و بخصوص بیشینه شعاع قطره و یا به عبارتی شعاع خروج قطره می‌باشد. چراکه با کاهش اندازه شعاع خروج قطره از سطح، قطرات زودتر از سطح جدا شده و در نتیجه سطح خالی از چگالش برای بخار و چگالش قطرات جدید فراهم می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ویژگی انتقال گرما با افزایش حداکثر شعاع قطره کاهش می‌یابد. در نتیجه، کاهش حداکثر اندازه قطرات جدا شده از سطح می‌تواند باعث سرعت بخشیدن به انتقال گرما شود.

در چند دهه اخیر، بسیاری از محققان در سراسر جهان ویژگی‌های انتقال گرما بر روی سطح ترکیبی آبگریز-آبدوست را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که سطح ترکیبی می‌تواند انتقال گرما را افزایش دهد که نسبت این ضریب افزایش به حالت و ویژگی‌های سطح ترکیبی بستگی دارد. یاماوچی و همکاران [۱۲] به طور تجربی نشان دادند که شار گرمایی در سطح ترکیبی از متوسط شار گرمایی چگالش قطره‌ای کامل و چگالش لایه‌ای بر روی سطوح با لایه پوششی و بدون پوشش بزرگتر است. ما و همکاران [۱۳] بصورت تجربی مشاهده کردند که شار گرمایی در سطح ترکیبی با نسبت کسر مساحت ۱:۱ بین ناحیه قطره‌ای و لایه‌ای بیشتر از چگالش قطره‌ای کامل روی سطح عمودی است. گروتن و ون در ژیلد [۱۴] دریافتند که شار گرمایی در سطح ترکیبی برابر و حتی در برخی شرایط بیشتر از چگالش قطره‌ای است زیرا قطره در ناحیه قطره‌ای با شعاع خروج کوچکتری نسبت به حالت چگالش قطره‌ای کامل به سمت ناحیه لایه‌ای حرکت می‌کند. کوماگی و همکاران [۱۵] یک کار تجربی به منظور بهبود چگالش لایه‌ای با در نظر گرفتن سطوح آبگریز در مجاورت سطوح آبدوست انجام دادند سطح چگالش به صورت عمودی به دو قسمت لایه‌ای و قطره‌ای تقسیم شد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با کاهش عرض ناحیه لایه‌ای در صورتی که عرض ناحیه قطره‌ای ثابت در نظر گرفته شود عملکرد انتقال گرمای

<sup>2</sup> Suspended

<sup>3</sup> Partial wetting

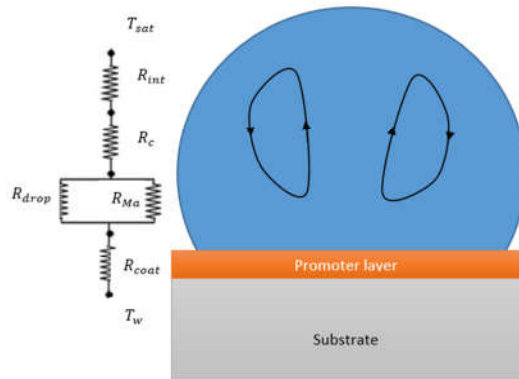
<sup>4</sup>slippery lubricant infused porous surfaces

سطح ترکیبی آبریز-آبدوست پرداخته شده و همچنین اثر شعاع ماکزیم قطره در انتقال گرما بر روی این سطوح مورد بررسی قرار گرفته است. مسئله بصورت عددی و به کمک نرم افزار MATLAB با استخراج روابط حاکم و اعمال مقاومت مارانگونی در آهنگ انتقال گرمای تک قطره و در نهایت محاسبه شار گرمایی کل حل شده است.

## ۲- شرایط و معادلات حاکم بر مسئله

### ۲-۱- مدلسازی چگالش کاملاً قطره‌ای

همان طور که ذکر شد چگالش کاملاً قطره‌ای بر روی سطوح آبریز اتفاق می‌افتد و مدلسازی انتقال گرما در چگالش قطره‌ای با در نظر گرفتن مقاومت‌های موجود در مسیر انتقال گرما صورت می‌گیرد [۲۰]. شکل ۱ طرحواره‌ای از نحوه قرارگیری قطره بر روی سطح و مقاومت‌های موجود در مسیر انتقال گرما را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود مقاومت‌های لحاظ شده در این مدلسازی شامل: مقاومت حرارتی لایه آبریز کننده ( $R_{coat}$ )، مقاومت



شکل ۱- شکل طرحواره مقاومت‌های در نظر گرفته شده

رسانش در داخل قطره ( $R_{drop}$ )، مقاومت ناشی از جابجایی مارانگونی ( $R_{Ma}$ )، مقاومت انحناى قطره ( $R_c$ ) و مقاومت تماس بخار و مایع ( $R_{int}$ ) می‌باشد. هرکدام از مقاومت‌های لحاظ شده افت دمایی ایجاد می‌کنند که به شرح هر یک از آن‌ها می‌پردازیم. -افت دمایی ناشی از لایه آبریز کننده [۲۱]:

$$\Delta T_{coat} = \frac{q_d \delta_{coat}}{k_{coat} \pi r^2 \sin^2 \theta} \quad (1)$$

که در آن  $q_d$  نرخ انتقال گرما از تک قطره،  $\delta$  ضخامت لایه پوششی،  $k_{coat}$  ضریب رسانایی گرمایی لایه آبریز کننده و  $\theta$  زاویه تماس قطره با سطح می‌باشد.

-افت دمایی ناشی از رسانش گرما در داخل قطره مطابق رابطه (۲) برابر [۲۱]:

$$\Delta T_{drop} = \frac{q_d \theta}{4 \pi r k_c \sin \theta} \quad (2)$$

که  $k_c$  ضریب رسانایی گرمایی در داخل قطره لحاظ شده است. عدد بی بعد مارانگونی به صورت نسبت نیروی کشش سطحی به

سطح ترکیبی بهبود می‌یابد. پنگ و همکاران [۱۶] به بررسی تجربی افزایش انتقال گرما در سطوح ترکیبی پرداختند. در این مدل سطح چگالش به صورت عمودی در نظر گرفته شده و سطوح آبریز و آبدوست به صورت موازی باهم تقسیم بندی شده‌اند. بررسی نتایج حاصل نشان می‌دهد که با افزایش عرض ناحیه آبدوست شعاع بیشینه قطره در ناحیه آبدوست افزایش پیدا کرده و تراکم جمعیت قطرات کاهش می‌یابد. در نتیجه یک مقدار بهینه برای عرض ناحیه آبدوست وجود دارد که در آن انتقال گرما بر روی این سطوح بیشترین مقدار را داشته باشد.

جابجایی مارانگونی<sup>۱</sup> نوع خاصی از جابجایی جریان درون قطره می‌باشد و در شرایطی رخ می‌دهد که گرادیان دما در سطح تماس بخار-مایع وجود داشته باشد و از آنجایی که کشش سطحی تابعی از دما می‌باشد این گرادیان دما منجر به ایجاد گرادیان کشش سطحی شده و در نتیجه تنش‌های برشی ایجاد شده در دو انتهای قطره منجر به ایجاد جریانی گردشی در داخل قطره از ناحیه‌ای با کشش سطحی بالا (دمای پایین) به ناحیه‌ای با کشش سطحی پایین (دمای بالا) می‌شود. جریان مارانگونی می‌تواند به صورت مقاومتی در مسیر انتقال گرما عمل کند و از طرفی گردش ایجاد شده در درون قطره منجر به افزایش ضریب انتقال گرمای جابجایی و در نهایت افزایش آهنگ انتقال گرما گردد.

فاندیس و همکاران [۱۷] شبیه سازی بر روی اثر پدیده مارانگونی در انتقال گرمای چگالش قطره‌ای سیال آب، اتانول تولوئن و پنتان انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که در نظر گرفتن اثر پدیده مارانگونی منجر به افزایش انتقال گرما نسبت به حالت بدون مارانگونی می‌شود. باغل و همکاران [۱۸] با در نظر گرفتن تمامی مقاومت‌های موجود در مسیر انتقال گرمای تک قطره از جمله مقاومت مارانگونی به بررسی انتقال گرمای قطره جوانه زده در زیر سطح صاف در زوایای تماس مختلف پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که جریان مارانگونی در داخل قطره برای اعداد مارانگونی بزرگتر از ۲۲۰۴ قابل اهمیت می‌باشد و می‌توان مقاومت مارانگونی را در اعدادی بزرگتر از این مقدار لحاظ کرد. محمدپور و همکاران [۱۹] به بررسی اثر پدیده مارانگونی در انتقال گرمای تک قطره بر روی ساختارهای کیسی و ونزل پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که میزان انتقال گرمای عبوری از تک قطره در حالت بدون مارانگونی روی سطح صاف با زبری کیسی از سطح صاف ۳۵٪ و سطح صاف از سطح با زبری ونزل ۲۸٪ بیشتر است. همچنین آهنگ انتقال گرما از سطوح در حالت با مارانگونی تحت تاثیر زاویه تماس قطره با سطح گزارش شده است.

بررسی مطالعات صورت گرفته در مورد چگالش قطره‌ای نشان می‌دهد که محققان کمی به بررسی اثر پدیده مارانگونی در انتقال گرمای چگالش قطره‌ای پرداخته‌اند و اکثر مطالعات صورت گرفته به صورت تجربی و یا شبیه سازی تک قطره بوده است و هیچ مطالعه‌ای در مورد اثر پدیده مارانگونی بر روی سطوح ترکیبی آبریز-آبدوست در مطالعات محققان قبلی یافت نشد. در این مقاله با اعمال اثر پدیده جابجایی مارانگونی، به بررسی انتقال گرمای چگالش قطره‌ای بر روی

<sup>۱</sup>Marangoni convection

نیروی لزجی تعریف شده و برابر [۱۷]:

$$Ma = \left| \frac{d\sigma}{dT} \right| \times \frac{\Delta T L}{\mu \alpha} \quad (۳)$$

که در آن  $\left| \frac{d\sigma}{dT} \right|$  گرادیان کشش سطحی بر حسب دما،  $\mu$  لزجت دینامیکی و  $\alpha$  ضریب نفوذ پخشندگی گرمایی سیال می‌باشد. در نتیجه می‌توان افت دمای ناشی از جابجایی مارانگونی را بصورت زیر نوشت.

$$\Delta T_{Ma} = \left| \frac{d\sigma}{dT} \right| \times \frac{\mu \alpha Ma}{L} \quad (۴)$$

همچنین مطالعات انجام شده بر روی پدیده مارانگونی نشان می‌دهد که این جریان برای اعداد مارانگونی بزرگ تر از  $2204$  در قطره جریانی با اهمیت بود و می‌توان اثر آن را در انتقال گرما مورد بررسی قرار داد [۱۸]. بنابراین طبق این مقدار شعاعی که در آن می‌توان اثر این پدیده را در انتقال گرما قطره بررسی کرد بصورت زیر بدست می‌آید

$$L = r \sin \theta \tan \frac{\theta}{2} \quad (۵)$$

$$r_{Ma} = \frac{\mu \alpha Ma}{\left| \frac{d\sigma}{dT} \right| \Delta T \sin \theta \tan \frac{\theta}{2}}$$

افت دمای مقاومت انحنای قطره برابر:

$$\Delta T_C = \frac{r_{min}}{r} \Delta T \quad (۶)$$

که در آن  $r_{min}$  برابر شعاع کوچکترین قطره جوانه زده بر روی سطح بود و مطابق رابطه (۷) بدست می‌آید.

$$r_{min} = \frac{2 T_{sat} \sigma}{h_{fg} \rho \Delta T} \quad (۷)$$

در این رابطه  $T_{sat}$  برابر دمای بخار اشباع،  $\rho$  چگالی سیال و  $h_{fg}$  آنتالپی تبخیر می‌باشد.

و در نهایت افت دما بین سطح تماس بخار مایع مطابق رابطه (۸) برابر:

$$\Delta T_{int} = \frac{q_d}{2 h_i \pi r^2 (1 - \cos \theta)} \quad (۸)$$

در این رابطه  $h_i$  ضریب انتقال گرما بین سطحی بوده و بصورت زیر بدست می‌آید [۲۲]:

$$h_i = \frac{2 \alpha_c}{2 - \alpha_c} \frac{1}{\sqrt{2 \pi R_v T_{sat}}} \frac{h_{fg}^2}{v T_{sat}} \quad (۹)$$

در رابطه بالا،  $R_v$  ثابت ویژه گاز،  $v$  حجم مخصوص سیال و  $\alpha_c$  ضریب چگالش بوده که در این مدلسازی برابر  $0.9$  در نظر گرفته شده است.

افت دمای کل از مجموع افت دماهای موجود در مسیر انتقال گرما محاسبه شده و در نهایت رابطه انتقال گرما در تک قطره در دو حالت با و بدون مارانگونی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$T = \Delta T_{coat} + \Delta T_{drop} + \Delta T_{Ma} + \Delta T_C + \Delta T_{int} \quad (۱۰)$$

انتقال گرما از تک قطره در حالت بدون مارانگونی برابر [۲۳]:

$$q_d = \frac{\Delta T \pi r^2 (1 - r_{min}/r)}{r \theta + \frac{1}{4 k_c \sin \theta} + \frac{\delta_{coat}}{k_{coat} \sin^2 \theta}} \quad (۱۱)$$

و در حالت با مارانگونی برابر:

$$q_{Ma,d} = \frac{\pi r^2 \left[ \Delta T (1 - r_{min}/r) - \frac{\mu \alpha Ma}{L} \frac{d\sigma}{dT} \right]}{r \theta + \frac{1}{4 k_c \sin \theta} + \frac{\delta_{coat}}{k_{coat} \sin^2 \theta}} \quad (۱۲)$$

پس از محاسبه آهنگ انتقال گرما از تک قطره به محاسبه توزیع جمعیت قطرات موجود بر روی سطح می‌پردازیم. توزیع جمعیت قطرات بر روی سطح به دوصورت انجام می‌گیرد. برای قطرات کوچک که به صورت چگالش مستقیم رشد می‌کنند مطابق رابطه (۱۳) داریم

$$n(r) = \frac{1}{3 \pi r_e^3 r_{max}} \left( \frac{r_e}{r_{max}} \right)^{-2/3} \frac{r(r_e - r_{min}) A_2 r + A_3}{r - r_{min} A_2 r_e + A_3} \exp(B_1 + B_2) \quad (۱۳)$$

ضرایب این رابطه بصورت زیر محاسبه می‌شود [۲۴]

$$A_1 = \frac{\Delta T}{2 \rho h_{fg}} \quad (۱۴)$$

$$A_2 = \frac{\theta (1 - \cos \theta)}{4 k_c \sin \theta}$$

$$A_3 = \frac{1}{2 h_i} + \frac{\delta_{coat} (1 - \cos \theta)}{k_{coat} \sin^2 \theta}$$

$$B_1 = \frac{A_2}{\tau A_1} \left[ \frac{r_e^2 - r^2}{2} + r_{min} (r_e - r) - r_{min}^2 \ln \left( \frac{r - r_{min}}{r_e - r_{min}} \right) \right]$$

$$B_2 = \frac{A_3}{\tau A_1} \left[ r_e - r - r_{min} \ln \left( \frac{r - r_{min}}{r_e - r_{min}} \right) \right]$$

دوره زمانی زوده شدن قطرات از سطح  $\tau$  می‌تواند به صورت رابطه (۱۵) نوشته شود.

$$\tau = \frac{3 r_e^2 (A_2 r_e + A_3)^2}{A_1 (11 A_2 r_e^2 - 14 A_2 r_e r_{min} + 8 A_3 r_e - 11 A_3 r_{min})} \quad (۱۵)$$

برای قطرات بزرگ که به صورت ادغام با قطرات مجاور رشد می‌کنند توزیع جمعیت قطرات به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$N(r) = \frac{1}{3 \pi r^2 r_{max}} \left( \frac{r}{r_{max}} \right)^{-2/3} \quad (۱۶)$$

$r_{max}$  بزرگترین شعاعی که قطره موجود روی سطح آگریز

می‌تواند قبل از سر خوردن از روی سطح تا آن مقدار رشد کند، برابر:

$$r_{max} = \left[ \frac{6 \sigma (\cos \theta_r - \theta_a) \sin \theta}{\pi \rho g (2 - 3 \sin \theta + \cos^3 \theta)} \right]^{1/2} \quad (۱۷)$$

در این رابطه  $\theta_a$  و  $\theta_r$  به ترتیب زاویه تماس پیش رو و پس رو می‌باشد، در صورتی که قطره بر روی سطح شیب دار قرارگیرد بزرگترین زاویه‌ای که در قسمت جلوی قطره شکل می‌گیرد زاویه پیش رو و زاویه شکل گرفته در پشت قطره زاویه پس رو نامیده می‌شود که اختلاف مقدار این دو زاویه هیستریزس زاویه تماس نامیده می‌شود.

شعاع موثر به عنوان معیاری برای تقسیم قطرات در دو حالت رشد با چگالش مستقیم (قطرات کوچک) و رشد بصورت ادغام با قطرات مجاور (قطرات بزرگ) تعریف شده و بصورت زیر محاسبه می‌شود.

قطره است که باید با توجه به عرض ناحیه قطره‌ای محاسبه شود. در نتیجه برای شعاع بیشینه قطره در ناحیه چگالش قطره‌ای داریم [۲۵].

$$r_{max} = \frac{W_{DWC}}{2\sin\theta} \quad (23)$$

در نتیجه شار گرمایی در ناحیه چگالش قطره‌ای مطابق رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

$$q_{DWC} = \int_{r_{min}}^{r_{Ma}} q_d(r)n(r)dr + \int_{r_{Ma}}^{r_e} q_{Ma,d}(r)n(r)dr + \int_{r_e}^{r_{max}} q_{Ma,d}(r)N(r)dr \quad (24)$$

و در صورتی که  $r_{Ma} > r_e$  باشد، داریم:

$$q_{DWC} = \int_{r_{min}}^{r_e} q_d(r)n(r)dr + \int_{r_e}^{r_{Ma}} q_d(r)N(r)dr + \int_{r_{Ma}}^{r_{max}} q_{Ma,d}(r)N(r)dr \quad (25)$$

محاسبه انتقال گرما در ناحیه لایه‌ی سیال نیز با در نظر گرفتن مقاومت‌های موجود در مسیر انتقال گرما محاسبه می‌شود [۲۶].

$$q_{FWC} = \frac{\Delta T}{\frac{1}{h_i} + \frac{\delta_l}{k_l}} \quad (26)$$

در این رابطه  $\delta_l$  ضخامت لایه سیال بوده و برابر [۲۶]:

$$\delta_l = \left[ \frac{3\pi R\mu_l(q_{DWC}W_{DWC} + q_{FWC}W_{FWC})}{2\rho g h_{fg}} \right]^{1/3} \quad (27)$$

در رابطه (۲۷)  $R$  شعاع سطح چگالش بوده و در این مطالعه مقدار ۱۳/۲۵ میلی متر در نظر گرفته شده است. با توجه به روابط (۲۶) و (۲۷) می‌توان گرمایی و ضخامت لایه سیال را به کمک روش‌های سعی و خطا محاسبه کرد.

در نهایت نسبت شار گرمایی از سطح ترکیبی آبگریز-آبدوست به شار گرمایی از سطح با چگالش کاملاً قطره‌ای بصورت زیر بدست می‌آید.

$$E = \frac{q_h}{q'} \quad (28)$$

### ۳- اعتبار سنجی

بررسی نتایج مربوط به مدل‌سازی و اعمال اثر جابجایی مارانگونی و همپنین نتایج حاصل از در نظر گرفتن سطح ترکیبی به عنوان سطح مورد نظر برای چگالش، به ترتیب با نتایج کار باغل و همکاران [۱۸] و پنگ و همکاران [۲۵] صورت گرفته است. در شکل ۲-الف نمودار شار گرمایی برحسب زاویه تماس مختلف رسم شده است. در این کار [۱۸] انتقال گرما از تک قطره با در نظر گرفتن اثر جابجایی مارانگونی و سایر مقاومت‌های موجود در مسیر انتقال گرما (مقاومت سطح تماس بخار-

$$r_e = \sqrt{\frac{1}{4N_s}} \quad (\theta \geq 90^\circ) \quad (18)$$

$$r_e = \sqrt{\frac{1}{4N_s}} / \sin(\theta) \quad (\theta < 90^\circ)$$

در نهایت شار گرمایی کل ( $q''$ ) در انتقال گرمای کاملاً قطره‌ای از حاصل ضرب انتقال گرمای تک قطره در یک شعاع مشخص در جمعیت قطرات در آن شعاع و جمع تمامی این مقادیر از کمترین شعاع جوانه زده بر روی سطح تا بیشینه شعاع موجود بدست می‌آید. باید توجه داشت با توجه با اینکه رابطه‌ی شعاع مارانگونی برای آن دسته از جمعیت قطراتی که اثر مارانگونی در آن‌ها قابل لحاظ شدن می‌باشد، تعریف شد انتقال گرمای قطراتی که شعاعی کمتر از شعاع مارانگونی دارند و در نتیجه می‌توان از اثر جابجایی مارانگونی در این قطرات صرف نظر کرد به کمک رابطه (۱۱) بدست می‌آید. در نهایت رابطه انتقال گرمای کل بصورت زیر محاسبه می‌شود.

$$q'' = \int_{r_{min}}^{r_{Ma}} q_d(r)n(r)dr + \int_{r_{Ma}}^{r_e} q_{Ma,d}(r)n(r)dr + \int_{r_e}^{r_{max}} q_{Ma,d}(r)N(r)dr \quad (19)$$

و در صورتی که  $r_{Ma} > r_e$  باشد، داریم:

$$q'' = \int_{r_{min}}^{r_e} q_d(r)n(r)dr + \int_{r_e}^{r_{Ma}} q_d(r)N(r)dr + \int_{r_{Ma}}^{r_{max}} q_{Ma,d}(r)N(r)dr \quad (20)$$

### ۲-۲- انتقال گرما بر روی سطح ترکیبی

محاسبه شار گرمایی بر روی سطح ترکیبی آبگریز-آبدوست از محاسبه سهم انتقال گرمای ناحیه قطره‌ای و لایه‌ای و جمع مقادیر بدست آمده از این دو ناحیه بدست می‌آید [۲۵].

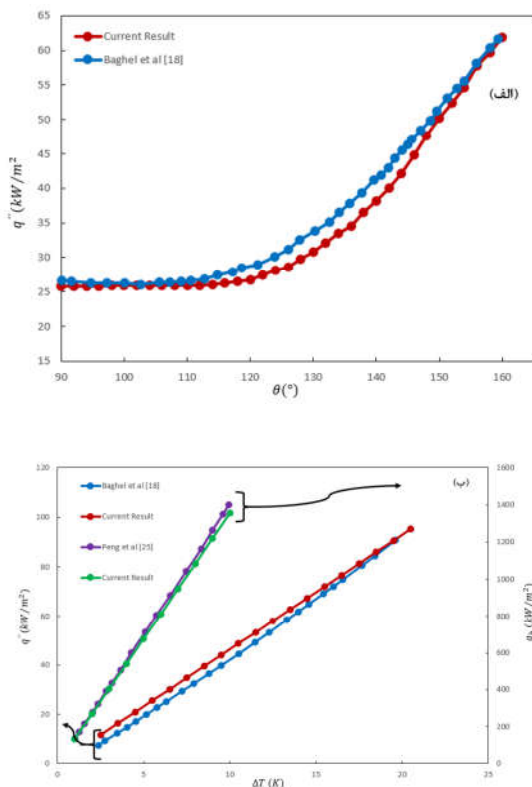
$$q_h = q_{DWC} \times f_{DWC} + q_{FWC} \times f_{FWC} \quad (21)$$

بنابراین نیاز به محاسبه کسر مساحت ناحیه قطره‌ای ( $f_{DWC}$ ) و لایه‌ای ( $f_{FWC}$ ) در سطح ترکیبی می‌باشد.

$$f_{DWC} = \frac{W_{DWC}}{W_{DWC} + W_{FWC}} \quad (22)$$

$$f_{FWC} = \frac{W_{FWC}}{W_{DWC} + W_{FWC}}$$

شار گرمایی ناحیه قطره‌ای مطابق رابطه بدست آمده برای حالت چگالش کاملاً قطره‌ای می‌باشد و تنها تفاوت در رابطه‌ی شعاع بیشینه



شکل ۲- اعتبار سنجی مدلسازی حاضر

(الف) شار گرمایی چگالش قطره‌ای بر حسب زاویه تماس

(ب) شار گرمایی سطح ترکیبی و قطره‌ای بر حسب اختلاف دما

$$T_{sat} = 313K, \Delta T = 10K, k_w = 0.613 W/m.K, \sigma = 0.07 N/m,$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = 0.13 mN/m.K, k_{coat} = 0.2 W/m.K, \delta_{coat} = 10\mu m, \alpha_c = 0.04$$

#### ۴-۲- تاثیر شعاع بیشینه بر سهم انتقال گرمای ناحیه

##### قطره‌ای و لایه‌ای

همان طور که در رابطه (۲۱) مشخص شد انتقال گرمای کل در سطح ترکیبی از مجموع سهم انتقال گرمای ناحیه قطره‌ای و لایه‌ای بدست می‌آید. می‌توان دریافت که کسر مساحت نیز برای محاسبه سهم انتقال گرمای دو منطقه جدا شده قابل توجه است و در نتیجه بر انتقال گرمای کل سطح ترکیبی تأثیر می‌گذارد. شکل ۴ تاثیر شعاع بیشینه در سهم انتقال گرما از ناحیه قطره‌ای و لایه‌ای را نشان می‌دهد. نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد که سهم انتقال گرمای ناحیه قطره‌ای در انتقال گرمای کل از سطح ترکیبی با افزایش شعاع بیشینه افزایش یافته و پس از رسیدن به یک شعاع بهینه، مقداری کاهش یافته و سپس روندی تقریباً ثابت پیدا می‌کند. مقدار بهینه شعاع بیشینه در زاویه تماس ۹۰ درجه در محدوده ۰/۲۵ تا ۰/۳ میلی‌متر برای عرض نواحی لایه‌ای مختلف می‌باشد.

مایع، مقاومت رسانشی داخل قطره و ... بر روی سطح آبگریز مورد بررسی قرار گرفته است. همان طور که در شکل ۲ الف مشاهده می‌شود نتایج از دقت خطای قابل قبولی برخوردار بوده و نشان دهنده خطای میانگین ۳/۶۳ درصدی می‌باشد. همچنین می‌توان در یافت که با افزایش زاویه تماس بخصوص در زوایای بزرگتر از ۱۱۰ درجه شار گرمایی از تک قطره در چگالش بر روی سطح آبگریز افزایش خواهد یافت.

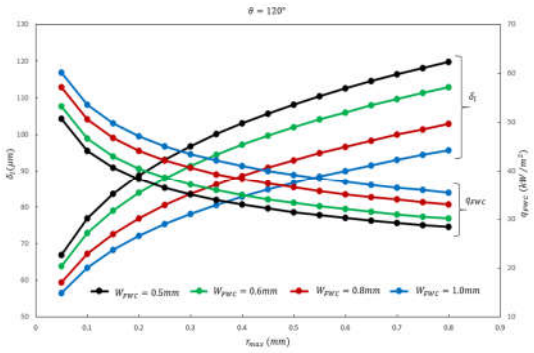
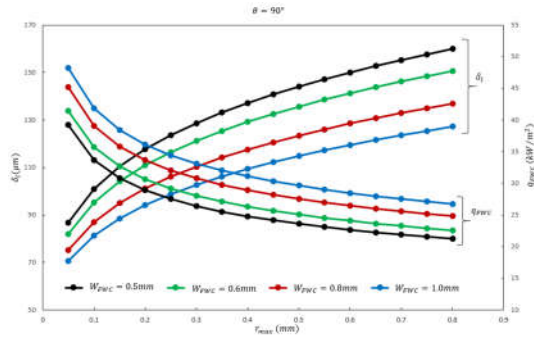
شکل ۲-ب نیز نشان دهنده نمودار شارحرارتی بر حسب اختلاف دما برای هر دو صحت سنجی صورت گرفته می‌باشد. همان طور که در شکل مشخص می‌باشد هر دو اعتبار سنجی صورت گرفته برای چگالش کاملاً قطره‌ای و سطح ترکیبی از دقت بالایی برخوردار می‌باشد. همچنین شکل ۲ ب نشان می‌دهد که افزایش اختلاف دما منجر به افزایش شار گرمایی در سطح کاملاً آبگریز و سطح ترکیبی خواهد شد.

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- تاثیر شعاع بیشینه بر شار گرمایی و ضخامت سیال

##### در ناحیه لایه‌ای

در منطقه لایه‌ای از سطح ترکیبی، انتقال گرمای چگالش لایه‌ای به طور قابل توجهی تحت تأثیر ضخامت لایه مایع است. قطره موجود در منطقه قطره‌ای در اثر تماس با ناحیه آبدوست به دلیل اختلاف انرژی آزاد سطح، به سمت ناحیه لایه‌ای در سطح ترکیبی مهاجرت می‌کند. شعاع بیشینه قطره و عرض ناحیه لایه‌ای دو پارامتر تأثیر گذار در ضخامت لایه سیال و در نتیجه شار گرمایی ناحیه لایه‌ای می‌باشد. تأثیر حداکثر شعاع قطرات ناحیه قطره‌ای و تأثیر عرض منطقه لایه‌ای بر ضخامت لایه مایع و شار گرمایی منطقه لایه‌ای در زوایای تماس مختلف در شکل ۳ رسم شده است. نمودارها برای شعاع بیشینه از ۰/۵ تا ۰/۸ و در زوایای تماس ۹۰ و ۱۲۰ درجه و  $\Delta T = 5 K$  رسم شده‌اند. مطابق شکل با افزایش شعاع بیشینه در تمامی زوایای تماس قطره، شار گرمایی ناحیه لایه‌ای کاهش یافته و ضخامت سیال افزایش می‌یابد. برای یک سطح چگالشی مشخص، ناحیه کلی انتقال گرما مقدار ثابتی است در نتیجه با افزایش عرض ناحیه آبگریز و افزایش محدوده انتقال گرمای چگالش قطره‌ای، ناحیه موجود برای چگالش لایه‌ای کاهش یافته و انتقال گرمای ناحیه لایه‌ای کاهش می‌یابد و در نهایت مقدار ناحیه موجود برای تخلیه سیال چگالیده از سطح کاهش یافته و با توجه با رابطه‌ی موجود ضخامت سیال افزایش و شارحرارتی ناحیه لایه‌ای کاهش می‌یابد.



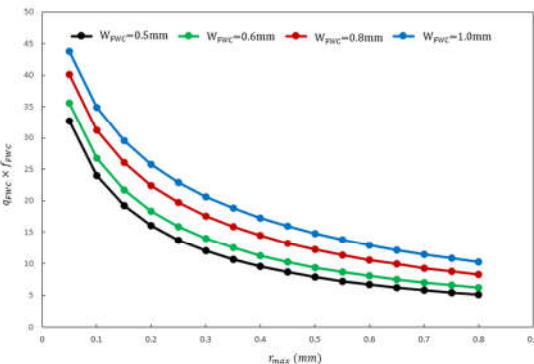
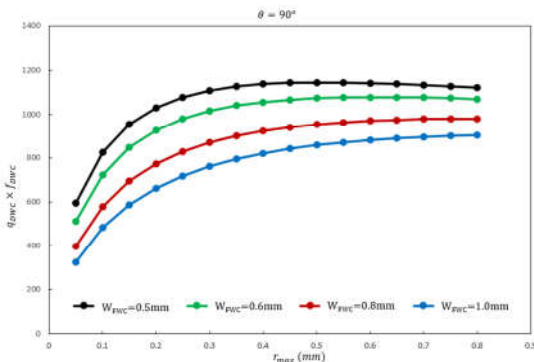
شکل ۳- تاثیر شعاع بیشینه بر شار گرمایی و ضخامت لایه سیال در ناحیه لایه‌ای در زوایای تماس مختلف

$$T_{sat} = 373 \text{ K}, \Delta T = 5 \text{ K}, k_w = 0.68 \text{ W/m.K}, \sigma = 0.058 \text{ N/m}, \delta_{coat} = 1 \mu\text{m}$$

$$k_{coat} = 0.2 \text{ W/m.K}, \alpha_c = 0.9, N_s = 5 \times 10^9, Ma = 2204, v = 1.67 \text{ m}^3/\text{kg}$$

برای چگالش بخار بر روی سطح با زاویه تماس کوچکتر به راحتی افزایش یابد. از شکل ۶، می‌توان دریافت که با کاهش عرض منطقه لایه‌ای، نسبت انتقال گرما (E) افزایش می‌یابد. در نتیجه، تا زمانی که

همچنین مقایسه نمودار سهم انتقال گرمای لایه‌ای و قطره‌ای نشان می‌دهد که با افزایش عرض ناحیه لایه‌ای، سهم انتقال گرمای ناحیه لایه‌ای افزایش یافته و برای منطقه قطره‌ای کاهش سهم انتقال گرما را خواهیم داشت. چرا که با افزایش عرض ناحیه لایه‌ای کسر مساحت این ناحیه افزایش یافته و با توجه به ثابت بودن ابعاد سطح چگالش کسر مساحت ناحیه قطره‌ای کاهش می‌یابد. بنابراین مطابق مقادیر  $q_{DWC} \times F_{DWC}$  و  $q_{FWC} \times F_{FWC}$  سهم انتقال گرمای ناحیه لایه‌ای افزایش و سهم ناحیه قطره‌ای کاهش می‌یابد.



شکل ۴- تاثیر شعاع بیشینه در شار گرمایی کل از سطح ترکیبی

### ترکیبی

شکل ۵ نشان می‌دهد که با افزایش شعاع بیشینه قطره تا یک مقدار بهینه شار گرمایی سطح ترکیبی افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر شعاع بیشینه مقدار شار گرمایی بهینه در محدوده ۰/۲۵ تا ۰/۳۵ میلی متر برای عرض نواحی لایه‌ای مختلف بدست می‌آید. علاوه بر این با افزایش عرض ناحیه لایه‌ای، شار گرمایی سطح ترکیبی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر به دلیل کاهش ضخامت فیلم مایع ناشی از افزایش عرض ناحیه شار گرمایی ناحیه لایه‌ای افزایش یافته و در نتیجه سهم انتقال گرمای ناحیه لایه‌ای از انتقال گرمای سطح ترکیبی افزایش می‌یابد.

شکل ۴-۴- تاثیر شعاع بیشینه در نسبت انتقال گرمای سطح ترکیبی به سطح کاملاً آبگریز

### شکل ۶

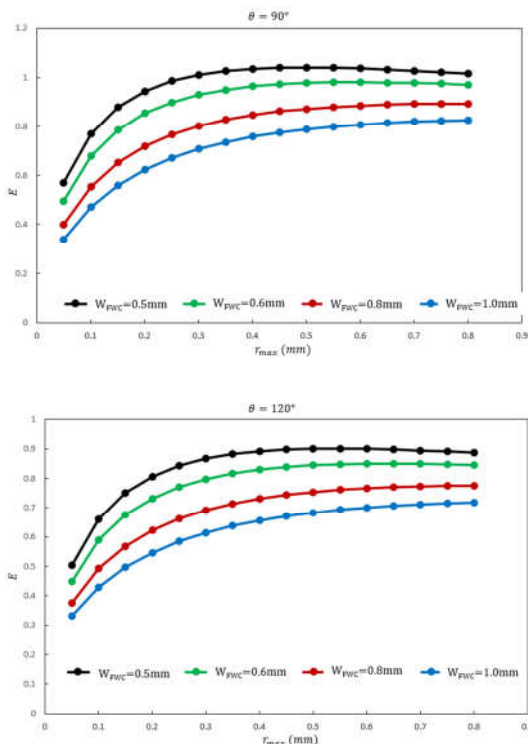
شکل ۶ رابطه شعاع بیشینه و نسبت انتقال گرمای سطح ترکیبی به چگالش در سطح کاملاً قطره‌ای را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مشخص می‌باشد، برای همه زاویه‌های تماس، می‌توان حداکثر شعاع بهینه قطره را در ناحیه قطره‌ای بدست آورد، که با افزایش زاویه تماس این مقدار کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد انتقال گرما می‌تواند

شکل ۴- سهم انتقال گرمای ناحیه قطره‌ای و لایه‌ای  
 $T_{sat} = 373 \text{ K}, \Delta T = 5 \text{ K}, k_w = 0.68 \text{ W/m.K},$

$$\sigma = 0.058 \text{ N/m}, \delta_{coat} = 1 \mu\text{m}, k_{coat} = 0.2 \text{ W/m.K}$$

$$\alpha_c = 0.9, N_s = 5 \times 10^9, Ma = 2204, v = 1.67 \text{ m}^3/\text{kg}$$

نسبت ( $E$ ) مقدار بزرگتری دارد که نشان دهنده بالا بودن انتقال گرمای سطح ترکیبی نسبت به چگالش کاملاً قطره‌ای می‌باشد.



شکل ۶- نسبت انتقال گرما بر حسب شعاع بیشینه قطره در زاویه تماس مختلف

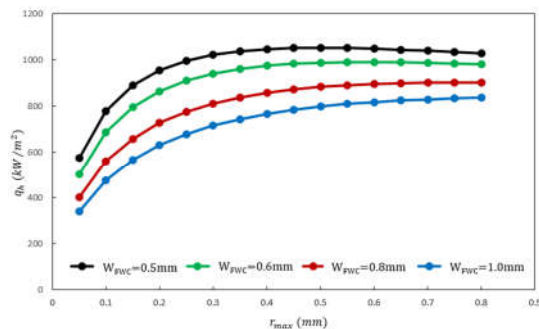
$$T_{sat} = 373 \text{ K}, \Delta T = 5 \text{ K}, k_w = 0.631 \text{ W/m.K}, h_{fg} = 2257 \text{ kJ/kg}, \mu_l = 0.0002184 \text{ kg/m.s}, \sigma = 0.058 \text{ N/m}, \delta_{coat} = 1 \mu\text{m}, k_{coat} = 0.2 \text{ W/m.K}, \alpha_c = 0.9, N_s = 5 \times 10^9, Ma = 2204, v = 1.67 \text{ m}^3/\text{kg}$$

#### ۴-۷- تاثیر عدد مارانگونی بر شار گرمایی سطح کاملاً

##### آبگریز و ترکیبی

شکل ۹ نمودار تاثیر افزایش عدد مارانگونی بر شار گرمایی سطح کاملاً آبگریز و ترکیبی را نشان می‌دهد. بررسی نتایج شکل نشان می‌دهد که با افزایش عدد مارانگونی شار گرمایی از هر دو سطح کاملاً آبگریز و ترکیبی افزایش می‌یابد. به خصوص که انتقال گرما در اعداد مارانگونی بزرگ تر که منجر به اعمال اثر این پدیده در محاسبات می‌شود، مقادیر بیشتری نسبت به اعداد مارانگونی کوچکتر دارد چرا که اعمال اثر جابجایی مارانگونی منجر به ایجاد جریان گردشی در داخل قطره و افزایش ضریب انتقال گرما و در نتیجه افزایش انتقال گرما خواهد شد.

سیال چگالیده می‌تواند به آرامی از سطح تخلیه شود، باید عرض ناحیه لایه ای در سطح ترکیبی تا حد ممکن باریک طراحی شود. شکل ۶ همچنین نشان می‌دهد که برای همه زاویه‌های تماس، می‌توان حداکثر شعاع بهینه قطره را در ناحیه قطره‌ای بدست آورد، که با افزایش زاویه تماس این مقدار کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد که انتقال گرما برای چگالش بخار بر روی سطح با زاویه تماس کوچک تر به راحتی افزایش می‌یابد.



شکل ۵- شار گرمایی کل از سطح ترکیبی بر حسب شعاع بیشینه قطره

$$T_{sat} = 373 \text{ K}, \Delta T = 5 \text{ K}, k_w = 0.68 \text{ W/m.K}, h_{fg} = 2257 \text{ kJ/kg}, \theta = 90^\circ, \sigma = 0.058 \text{ N/m}, \delta_{coat} = 1 \mu\text{m}, v = 1.67 \text{ m}^3/\text{kg}, k_{coat} = 0.2 \text{ W/m.K}, \alpha_c = 0.9, N_s = 5 \times 10^9, Ma = 2204$$

#### ۴-۵- تاثیر اختلاف دمای سطح در سهم انتقال گرما

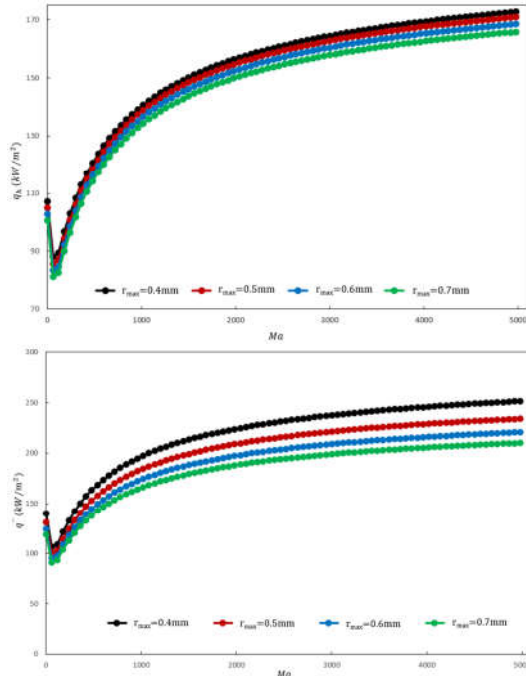
##### ناحیه لایه‌ای و قطره‌ای

شکل ۷ نمودار سهم انتقال گرمای نواحی لایه‌ای و قطره‌ای بر حسب اختلاف دماهای مختلف سطح را در زاویه تماس ۹۰ درجه و عرض ناحیه لایه‌ای ۰/۵ میلی متر را نشان می‌دهد. مطابق شکل سهم انتقال گرمای ناحیه قطره‌ای با افزایش اختلاف دمای سطح افزایش می‌یابد. با این حال میزان افزایش انتقال گرمای ناحیه لایه‌ای کمتر از ناحیه قطره‌ای می‌باشد. همچنین در نظر گرفتن اثر جابجایی مارانگونی در ناحیه قطره‌ای منجر به افزایش انتقال گرمای این ناحیه به خصوص در نواحی با عرض ناحیه قطره‌ای بیشتر نسبت به ناحیه لایه‌ای خواهد شد.

#### ۴-۶- تاثیر ترشوندگی سطح در نسبت انتقال گرما (E)

خاصیت ترشوندگی سطح جامد مانند زاویه تماس و زاویه تماس هیستریزس مستقیماً بر شعاع بیشینه قطره در هنگام چگالش کاملاً قطره‌ای اثر گذاشته و در نتیجه بر انتقال گرمای چگالش قطره‌ای تأثیر می‌گذارد. با افزایش زاویه تماس هیستریزس، حداکثر شعاع قطره، که از تعادل نیروی گرانش و کشش سطح بدست می‌آید، افزایش خواهد یافت در نتیجه انتقال گرمای چگالش کاملاً قطره‌ای کاهش می‌یابد. نسبت انتقال گرمای سطح ترکیبی به انتقال گرمای چگالش کاملاً قطره‌ای بر حسب زوایای تماس مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشخص می‌باشد در زوایای تماس کوچکتر





شکل ۹- نمودار شار گرمایی سطح ترکیبی و کاملاً آبگریز بر حسب عدد مارانگونی

$$T_{sat} = 373 \text{ K}, \theta = 90^\circ, \Delta T = 5 \text{ K}, k_w = 0.68 \text{ W/m.K}, \delta_{coat} = 1 \mu\text{m}, h_{fg} = 2257 \text{ kJ/kg}, W_{FWC} = 0.5 \text{ mm}, \sigma = 0.058 \text{ N/m}, \alpha_c = 0.9, k_{coat} = 0.2 \text{ W/m.K}, N_s = 5 \times 10^9, v = 1.67 \text{ m}^3/\text{kg}$$

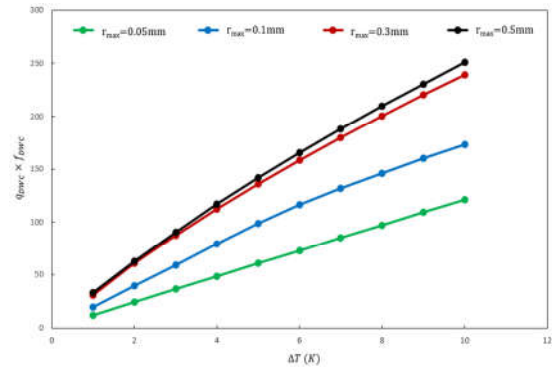
## ۵- خلاصه و نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی تاثیر شعاع بیشینه قطره در انتقال گرمای سطح ترکیبی آبگریز-آبدوست به همراه اعمال اثر جابجایی مارانگونی پرداخته شد. اثر جابجایی مارانگونی به عنوان مقاومتی در مسیر انتقال گرما لحاظ شده و در نتیجه افت دمای ناشی از این جریان بدست آمده و با افت دماهای ناشی از سایر مقاومت‌های لحاظ شده جمع، و در نهایت رابطه انتقال گرما از تک قطره اصلاح شده است. همچنین با توجه به اینکه تاثیر جابجایی مارانگونی در همی قطرات قابل اعمال نیست و در نتیجه می‌توان از اعمال این اثر در برخی قطرات کوچک صرف نظر کرد، رابطه شعاع مارانگونی (رابطه ۵)) به کمک عدد مارانگونی بدست آمد. در این مدل‌سازی عدد مارانگونی برابر ۲۲۰۴ در نظر گرفته شده چرا که طبق تحقیقات انجام شده توسط محققان قبلی اثر جابجایی مارانگونی برای اعداد بزرگتر از این مقدار قابل توجه می‌باشد [۱۹]. در نهایت شار گرمایی کل در ناحیه آبگریز سطح ترکیبی و همچنین سطح کاملاً قطره‌ای به کمک این روابط بدست آمد.

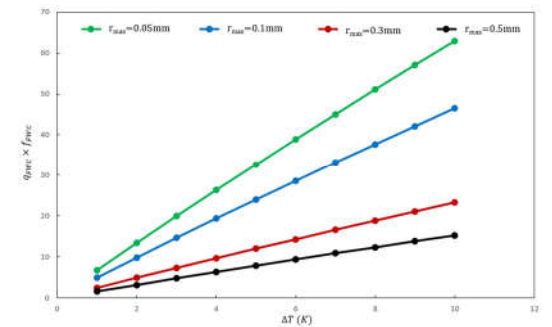
خلاصه‌ای از نتایج بدست آمده عبارت است از:

۱- از طریق تغییر در تراکم جمعیت قطرات ناحیه قطره‌ای و ضخامت لایه سیال در ناحیه لایه‌ای، می‌توان شار گرمایی ناحیه لایه‌ای و قطره‌ای در سطح ترکیبی را کنترل کرد. با طراحی بهینه سطح ترکیبی می‌توان به انتقال گرمایی بیشتر از چگالش کاملاً قطره‌ای دست یافت.

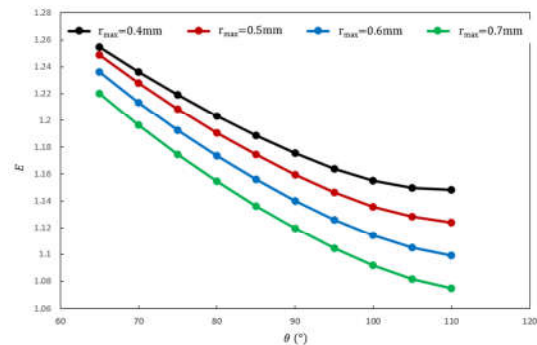
۲- حداکثر شعاع بهینه در ناحیه قطره‌ای با افزایش عرض ناحیه لایه‌ای و اختلاف دمای سطح افزایش و با افزایش زاویه تماس کاهش



شکل ۷- سهم انتقال گرما از ناحیه قطره‌ای و لایه‌ای بر حسب اختلاف دمای سطح



$$T_{sat} = 373 \text{ K}, \theta = 90^\circ, k_w = 0.68 \text{ W/m.K}, \delta_{coat} = 1 \mu\text{m}, h_{fg} = 2257 \text{ kJ/kg}, W_{FWC} = 0.5 \text{ mm}, \sigma = 0.058 \text{ N/m}, k_{coat} = 0.2 \text{ W/m.K}, \alpha_c = 0.9, N_s = 5 \times 10^9, Ma = 2204, v = 1.67 \text{ m}^3/\text{kg}$$



شکل ۸- اثر زاویه تماس در نسبت انتقال گرما

$$T_{sat} = 373 \text{ K}, \Delta T = 5 \text{ K}, k_w = 0.68 \text{ W/m.K}, \delta_{coat} = 1 \mu\text{m}, h_{fg} = 2257 \text{ kJ/kg}, W_{FWC} = 0.5 \text{ mm}, \sigma = 0.058 \text{ N/m}, k_{coat} = 0.2 \text{ W/m.K}, \alpha_c = 0.9, N_s = 5 \times 10^9, Ma = 2204, v = 1.67 \text{ m}^3/\text{kg}$$

transfer in dropwise condensation: A theoretical study. Appl Therm Eng, 2018.

[10] Maeda Y. Lv. F., Zhang P., Takata Y. and Orejon D., Condensate Droplet Size Distribution and Heat Transfer on Hierarchical Slippery Lubricant Infused Porous Surfaces. Appl. Therm. Eng 2020.

[11] Talesh Bahrami H.R., Saffari H., Rostamnejad A., and Shahriari G., Production of copper superhydrophobic surfaces with micro-nano structuring using an electrochemical process and coating with hydrophobic promoter. Journal of Mechanical Engineering, Vol. 49, No.4, pp. 165-174, 2019. (In Persian).

[12] Yamauchi A., Kumagai S., Takeyama T. Condensation heat transfer on various dropwise-filmwise coexisting surface, Heat Transfer-Jpn.1986.

[13] Ma X.H., Wang B.X., Xu D.Q., Filmwise condensation heat transfer enhancement with dropwise and filmwise coexisting condensation surfaces, Chin. J. Chem. Eng. 1998.

[14] Grooten M.H.M., van der Geld C.W.M, Surface property effects on dropwise condensation heat transfer from flowing air-steam mixtures to promote drainage, Int. J. Therm.2012.

[15] Kumagai S.,Tanaka S.,Katsuda H. and Shimada R., "On the Enhancement of Filmwise Condensation Heat Transfer by Means of the Coexistence with Dropwise Condensation Sections.pdf," *Exp. Heat Transf.*, vol. 4, pp. 71-82, 1991.

[16] Peng B.,Ma X.,Lan Z., Xu W. and Wen R., Experimental investigation on steam condensation heat transfer enhancement with vertically patterned hydrophobic-hydrophilic hybrid surfaces, Int. J. Heat Mass Transfer, 2015.

[17] Phadnis A. and Rykaczewski K, The effect of Marangoni convection on heat transfer during dropwise condensation on hydrophobic and omniphobic surfaces. Int J Heat Mass Transf 2017.

[18] Baghel V., Sikarwar B.S. and Muralidhar K, Modeling of heat transfer through a liquid droplet. Heat Mass Transfer.2019.

[19] Mohammadpour L., Aminian E. and Saffari H., Investigating the effect of Marangoni phenomenon on single drop density on Wenzel and Cassie structures. Journal of Solid and Fluid Mechanics, 2020.

[20] Hu X., Yi Q., Kong X. and Wang J., A Review of Research on Dropwise Condensation Heat Transfer. Appl. Sci. 2021.

[21] Bonner R., Direct simulations of Biphilic surface condensation: optimized size effects. Front Heat Mass Transf, 2020.

[22] Talesh Bahrami H.R., Zarei S. and Saffari H., The effect of droplet morphology on the heat transfer performance of micro-/nanostructured surfaces in dropwise condensation. J Thermal Calorim, 2019.

[23] Kannan R. and Sivakumar D., Drop impact process on a hydrophobic grooved surface. Colloid Surface A., 2008.

[24] Parin R. Tancon M., Mirafiori M. Bortolin S., Moro L. and Zago L.F., A. Martucci, D. Del Col, HEAT TRANSFER AND DROPLET POPULATION DURING DROPSWISE CONDENSATION ON DURABLE COATINGS, Applied Thermal Engineering., 2020.

[25] Peng B., Ma H.X., Lan Z., Xu W. and Wen R., Analysis of condensation heat transfer enhancement with dropwise-filmwise hybrid surface: droplet sizes effect, Int. J. Heat Mass Transfer., 2014.

[26] Xie J., She Q., Xu J., Liang C. and Li W., Mixed dropwise-filmwise condensation heat transfer on biphilic surface Int.J.HeatMassTransf.2020.

می‌یابد. با افزایش اختلاف دمای سطح از ۱ به ۱۰ کلون، بیشینه شعاع بهینه در منطقه قطره‌ای از حدود ۰/۲۵ میلی متر به ۰/۳ میلی متر افزایش می‌یابد و با افزایش عرض ناحیه لایه‌ای از ۰/۵ میلی متر به ۱ میلی متر، شعاع بهینه از حدود ۰/۲۵ میلی متر به ۰/۳۵ میلی متر افزایش می‌یابد. در حالی که بیشینه شعاع بهینه قطره مستقل از زاویه تماس هیستریزس می‌باشد.

۳- سطح ترکیبی آبگریز-آبدوست می‌تواند به طور موثر برای افزایش انتقال گرمای چگالش بخار در اختلاف دمای سطح پایین و برای زوایای تماس کوچکتر قطره و سطح استفاده شود.

۴- اعمال اثر جابجایی مارانگونی منجر به گردش جریان در داخل قطره و افزایش ضریب انتقال گرما تا ۳۰٪ نسبت به حالت بدون مارانگونی به خصوص در زوایای تماس بزرگ‌تر شد.

### ۶- نمادها

$q_d$	انتقال گرمای تک قطره (W)
$q_{Ma,d}$	انتقال گرمای تک قطره با اعمال اثر مارانگونی (W)
$q_h$	شار گرمایی از سطح ترکیبی ( $W/m^2$ )
$q''$	شار گرمایی چگالش کاملاً قطره‌ای ( $W/m^2$ )
$f_{DWC}$	کسر مساحت ناحیه قطره‌ای
$f_{FWC}$	کسر مساحت ناحیه لایه‌ای
$N_s$	چگالی سایت هسته زایی ( $m^{-3}$ )
$Ma$	عدد مارانگونی
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $kg/m.s$ )
$\alpha$	ضریب پخشندگی گرمایی ( $m^2/s$ )
$\delta_l$	ضخامت سیال در ناحیه لایه‌ای (m)
$h_i$	ضریب انتقال گرمای جابجایی ( $\frac{W}{m^2.K}$ )
$h_{fg}$	گرمای نهان تبخیر ( $J/kg$ )

### ۷- مراجع

[1] Khandekar S. and Muralidhar K., Dropwise condensation on inclined Textured Surfaces. New York NY: Springer New York, 2014.

[2] Miljkovic N., Development and characterization of micro/nano structured surfaces for enhanced condensation, Massachusetts Institute of Technology, 2013.

[3] LeFevre E.J. and Rose J.W., A theory of heat transfer by dropwise condensation, Proceedings of 3rd International Heat Transfer Conference, New York: American Institute of Chemical Engineers, Vol. 2, pp. 362-375, 1966.

[4] Vemuri S. and Kim K.J., An experimental and theoretical study on the concept of dropwise condensation, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 49, No. 3, pp. 649-657, 2006.

[5] Kim S. and Kim K.J., Dropwise condensation modeling suitable for superhydrophobic surfaces, Journal of Heat Transfer, Vol. 133, No. 8, pp. 081501-081507, 2011.

[6] Cassie A. and Baxter S., Wettability of porous surfaces. Trans Faraday 1994.

[7] Wenzel R.N., Resistance of solid surfaces to wetting by water. Ind.Eng.Chem.1930.

[8] Miljkovic N., Enright R. and Wang E.N., Modeling and optimization of superhydrophobic condensation. J Heat Transfer, 2013.

[9] Zarei S., Talesh Bahrami H.R., and Saffari H., Effects of geometry and dimension of micro/nanostructures on the heat