

## Experimental investigation of the synergistic effects of porous structure and stabilized boiling surface on pool boiling under reduced nanofluid concentration

Mohammad Ghorbani<sup>1</sup>, Masoud Zareh<sup>1\*</sup> , Cyrus Aghanajafi<sup>2</sup>, Mohammad Behshad Shafii<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Article History

Received: April 29, 2026

Revised: May 26, 2026

Accepted: June 02, 2026

ePublished: June 20, 2026

### ABSTRACT

In this study, the synergistic effects of a honeycomb porous structure (HPS) and stabilized boiling surfaces on the pool boiling heat transfer characteristics of SiO<sub>2</sub> nanofluid under reduced concentration conditions is experimentally investigated. Dissipation of high heat fluxes is a major challenge in thermal systems, as approaching the critical heat flux (CHF) can lead to thermal instability and equipment damage. Surface stability is also essential for long-term operation, since instability during successive boiling cycles increases surface superheat and reduces system reliability. In addition, low-concentration nanofluids are preferred in practical applications to minimize nanoparticle deposition. First, the boiling surface was stabilized using a 2 wt% nanofluid under successive and prolonged boiling cycles. Then, the concentration was reduced to 0.5 wt%, leading to the formation of new stabilized layers on the initial surface. This approach preserves thermal performance while reducing deposition. After that, a HPS was attached to the stabilized surface. This structure increases the effective heat transfer area, enhances capillary liquid supply, and facilitates vapor removal. The results show that surface stability is maintained despite the reduced concentration. The combination with the porous structure improves thermal performance. Specifically, CHF increases by 35.6% and 39.8%, and the boiling heat transfer coefficient (BHTC) increases by 27.9% and 25.3%, compared to the stabilized surface without porous structure, for nanofluids with nanoparticle sizes of 20-30 and 60-70 nm, respectively. In addition, the porous structure increases the surface superheat at the onset of nucleate boiling (ONB).

**Keywords:** Pool boiling, Stabilized boiling surface, Honeycomb porous structure, Reduced nanofluid concentration, Onset of nucleate boiling

### How to cite this article

Ghorbani M, Zareh M, Aghanajafi C, Shafii M.B, Experimental investigation of the synergistic effects of porous structure and stabilized boiling surface on pool boiling under reduced nanofluid concentration. Modares Mechanical Engineering; 2026;26(08):665-687.

\*Corresponding author's email: [masoud\\_zareh@iau.ac.ir](mailto:masoud_zareh@iau.ac.ir)


\*Corresponding ORCID ID: 0000-0001-5613-7047



Copyright© 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



## بررسی تجربی هم‌افزایی ساختار متخلخل و سطوح جوشش پایدار شده بر انتقال حرارت جوشش استخری تحت کاهش غلظت نانوسیال کاری

محمد قربانی<sup>۱</sup>، مسعود زارع<sup>۱\*</sup> , سیروس آقاجفی<sup>۲</sup>، محمد بهشاد شفیعی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

<sup>۲</sup> گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

<sup>۳</sup> گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

### چکیده

در این پژوهش، اثر هم‌افزایی ساختار متخلخل لانه‌زنبوری و سطوح جوشش پایدار بر مشخصه‌های انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیال  $SiO_2$  تحت کاهش غلظت سیال کاری بررسی شده است. در کاربردهای صنعتی، دفع شار حرارتی بالا با محدودیت‌های جدی مواجه است، زیرا رسیدن به شار حرارتی بحرانی (CHF) می‌تواند منجر به ناپایداری حرارتی و آسیب به تجهیزات شود. از سوی دیگر، پایداری سطح جوشش نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد بلندمدت دارد، به طوری که ناپایداری سطح در چرخه‌های مکرر و طولانی‌مدت جوشش می‌تواند منجر به افزایش دمای مافوق گرم و کاهش ایمنی سیستم گردد. همچنین، به‌منظور کاهش احتمال رسوب‌گذاری، استفاده از نانوسیالات با غلظت پایین ترجیح داده می‌شود. در این راستا، ابتدا سطح با نانوسیال ۲٪ وزنی تحت جوشش‌های مکرر و طولانی‌مدت پایدارسازی شد. سپس با کاهش غلظت به ۰/۵٪، سطوح پایدار جدیدی بر بستر اولیه ایجاد گردید تا ضمن حفظ مشخصه‌های حرارتی، احتمال رسوب کاهش یابد. در ادامه، یک ساختار متخلخل لانه‌زنبوری بر روی سطح پایدار نصب شد. این ساختار با افزایش سطح مؤثر انتقال حرارت، تقویت نیروهای مویینگی، بهبود تغذیه سیال و تسهیل خروج بخار، نقش مؤثری در دفع حرارت ایفا می‌کند. نتایج نشان داد که علی‌رغم کاهش غلظت، پایداری سطح حفظ شده و ترکیب آن با ساختار متخلخل منجر به افزایش ۳۵/۶٪ و ۳۹/۸٪ در شار حرارتی بحرانی و ۲۷/۹٪ و ۲۵/۳٪ در ضریب انتقال حرارت جوشش نسبت به سطح پایدار بدون ساختار متخلخل، به ترتیب برای نانوسیال‌هایی با اندازه نانوذرات ۲۰-۳۰ و ۷۰-۶۰ نانومتر می‌شوند. همچنین استفاده از ساختار متخلخل، باعث افزایش دمای مافوق گرم در شروع جوشش هسته‌ای (ONB) می‌شود.

**کلیدواژه‌ها:** جوشش استخری، سطح جوشش پایدار، ساختار متخلخل لانه‌زنبوری، رقیق‌سازی نانوسیال کاری، شروع جوشش هسته‌ای

### اطلاعات مقاله

#### نوع مقاله

مقاله پژوهشی

#### تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۹

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۰۵

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰

### نحوه ارجاع به این مقاله

قربانی محمد، زارع مسعود، آقاجفی سیروس، شفیعی محمد بهشاد، بررسی تجربی هم‌افزایی ساختار متخلخل و سطوح جوشش پایدار شده بر انتقال حرارت جوشش استخری تحت کاهش غلظت نانوسیال کاری، مهندسی مکانیک مدرس. ۷۱۷-۷۷۵: ۲۶(۰۸): ۱۴۰۵

\*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: [masoud\\_zareh@iauo.ac.ir](mailto:masoud_zareh@iauo.ac.ir)

\*شناسه ارکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ۷۰۴۷-۵۶۱۳-۰۰۰۱-۰۰۰۰



## ۱- مقدمه

تشکیل می‌شوند، به‌عنوان نسل جدیدی از سیالات انتقال حرارت معرفی شده‌اند. این مفهوم نخستین بار در سال ۱۹۹۵ توسط چوی و همکاران [۴] مطرح شد. از آن زمان تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در زمینه کاربرد این سیالات در فرایندهای انتقال حرارت انجام شده است. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که افزودن نانوذرات به سیال پایه می‌تواند خواص حرارتی سیال را تغییر داده و در بسیاری از موارد موجب بهبود عملکرد انتقال حرارت شود.

مطالعات تجربی مختلف نشان داده‌اند که افزودن نانوذراتی نظیر  $\text{SiO}_2$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ،  $\text{TiO}_2$  به سیال پایه می‌تواند موجب افزایش قابل توجه شار حرارتی بحرانی نسبت به آب خالص شود [۵،۶]. با این حال، میزان این بهبود به عوامل متعددی از جمله نوع نانوذره، اندازه ذرات و به‌ویژه غلظت آن‌ها در سیال وابسته است. به‌عنوان مثال، گولوبویچ و همکاران [۷] گزارش کردند که افزایش غلظت نانوذرات می‌تواند موجب افزایش شار حرارتی بحرانی شود، درحالی‌که اندازه نانوذرات تأثیر قابل توجهی بر این عامل ندارد. در مقابل، برخی مطالعات نشان داده‌اند که در غلظت‌های بالاتر نانوذرات، به دلیل مسدود شدن مکان‌های فعال هسته‌زایی روی سطح، ضریب انتقال حرارت جوشش ممکن است کاهش یابد [۸،۹]. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر نانوسیالات بر رفتار جوشش پدیده‌ای پیچیده بوده و به طور قابل توجهی به شرایط عملیاتی و ویژگی‌های نانوذرات وابسته است. با این حال، رفتار جوشش نانوسیالات تنها به خواص حجمی سیال محدود نمی‌شود. تغییرات ایجاد شده در سطح جوشش نقش مهمی در این فرایند ایفا می‌کند. یکی از مهم‌ترین مکانیزم‌های مؤثر در این پدیده، رسوب تدریجی نانوذرات بر روی سطح جوشش در طول فرایند تبخیر میکرو لایه مایع است. تشکیل این لایه رسوبی می‌تواند ویژگی‌هایی نظیر زبری سطح، ترشوندگی و تعداد مکان‌های فعال هسته‌زایی را تغییر دهد و در نتیجه عملکرد انتقال حرارت را تحت تأثیر قرار دهد. میرزاقیاقی و همکاران [۱۰] تأثیر ایجاد تخلخل را در بهبود انتقال حرارت جوششی بر روی سطح مسی به کمک روش الکترونشست مورد مطالعه قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیده‌اند که ایجاد تخلخل بر روی سطح مسی باعث افزایش نیروی مویبندی و بهبود فرایند جوشش هسته‌ای می‌گردد.

کوارک و همکاران [۱۱] نشان دادند که تبخیر میکرو لایه در نزدیکی سطح داغ می‌تواند عامل اصلی رسوب نانوذرات باشد و در غلظت‌های مناسب موجب افزایش شار حرارتی بحرانی شود. درحالی‌که افزایش بیش از حد ضخامت لایه رسوبی می‌تواند به دلیل افزایش مقاومت حرارتی سطح، عملکرد انتقال حرارت را کاهش دهد. همچنین گزارش شده است که سرعت تشکیل و یکنواختی این لایه رسوبی به عامل‌هایی نظیر غلظت نانوسیال و مدت زمان فرایند جوشش وابسته بوده و نقش مهمی در تغییر رفتار حرارتی سطح ایفا می‌کند [۱۲،۱۳]. در همین راستا، حیدری و همکاران [۱۴] اثر پایداری سطح جوشش را در نانوسیال  $\text{SiO}_2$  تحت

افزایش توان حرارتی در بسیاری از سامانه‌های مهندسی مدرن، از جمله تجهیزات الکترونیکی پرتوان، رآکتورهای هسته‌ای، سیستم‌های تبرید پیشرفته و مبدل‌های حرارتی فشرده، ضرورت توسعه روش‌های کارآمد برای دفع شارهای حرارتی بالا را بیش‌ازپیش آشکار ساخته است. در چنین شرایطی، فرایندهای انتقال حرارت همراه با تغییر فاز به دلیل ظرفیت بالای انتقال انرژی، به‌عنوان یکی از مؤثرترین راهکارها مورد توجه قرار گرفته‌اند. در میان این فرایندها، جوشش به دلیل توانایی انتقال مقادیر قابل توجهی از حرارت در اختلاف دمای نسبتاً کم، جایگاه ویژه‌ای در طراحی و توسعه سامانه‌های حرارتی پیشرفته دارد.

کاربردهای جوشش تنها به سامانه‌های صنعتی محدود نمی‌شود و این فرایند در طیف وسیعی از کاربردها، از تجهیزات انرژی و نیروگاهی گرفته تا سامانه‌های خنک‌کاری الکترونیک و فناوری‌های ریزمقیاس، مورد استفاده قرار می‌گیرد. بهبود عملکرد انتقال حرارت در این فرایند می‌تواند منجر به افزایش بازده انرژی، کاهش اندازه تجهیزات، کاهش مصرف انرژی و افزایش قابلیت اطمینان سیستم‌های حرارتی شود. با این حال، کارایی سامانه‌های مبتنی بر جوشش در بسیاری از موارد توسط محدودیت‌هایی نظیر بروز ناپایداری‌های حرارتی در نزدیکی شار حرارتی بحرانی (Critical heat flux) محدود می‌شود. عبور از این حد می‌تواند منجر به تشکیل لایه بخار پایدار بر روی سطح و در نتیجه افزایش شدید دمای سطح گردد که در نهایت ممکن است به آسیب‌های حرارتی منجر شود. در میان رژیم‌های مختلف جوشش، جوشش استخری یکی از پرکاربردترین حالت‌ها محسوب می‌شود. در این نوع جوشش، سطح داغ در داخل حجم نسبتاً بزرگی از سیال ساکن غوطه‌ور می‌شود و با افزایش دمای سطح، حباب‌های بخار در مکان‌های فعال هسته‌زایی شکل می‌گیرند. رشد، جداسدن و حرکت این حباب‌ها در کنار گردان‌های دمایی ایجاد شده در سیال، موجب شکل‌گیری جریان‌های جابه‌جایی طبیعی در اطراف سطح گرم می‌شود که نقش مهمی در انتقال حرارت ایفا می‌کنند [۱،۲].

به‌منظور افزایش عملکرد انتقال حرارت در جوشش استخری، راهکارهای مختلفی در مطالعات پیشین پیشنهاد شده است. این روش‌ها به‌طور کلی در سه دسته اصلی شامل روش‌های فعال، روش‌های غیرفعال و روش‌های ترکیبی طبقه‌بندی می‌شوند [۳]. در روش‌های فعال معمولاً از میدان‌های خارجی مانند میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی یا ارتعاشات مکانیکی برای کنترل رفتار جوشش استفاده می‌شود. در مقابل، روش‌های غیرفعال بر اصلاح ویژگی‌های سیال یا سطح جوشش تمرکز دارند و به دلیل عدم نیاز به انرژی خارجی، توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده‌اند. یکی از مهم‌ترین رویکردهای غیرفعال برای بهبود انتقال حرارت، استفاده از سیال‌های کاری با خواص حرارتی بهبودیافته است. در این زمینه، نانوسیالات که از پراکندگی نانوذرات در یک سیال پایه

چرخه‌های مکرر و طولانی‌مدت جوشش - سردشدن مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که در غلظت جرمی ۲٪، سطح جوشش پس از طی چرخه‌های مکرر و طولانی‌مدت به یک حالت پایدار فیزیکی و حرارتی می‌رسد. پس از پایدار شدن سطح، مقادیر شار حرارتی بحرانی و دمای مافوق گرم سطح جوشش حتی با استفاده از نانوسیالات با غلظت کمتر نیز تغییر محسوس نشان نمی‌دهند. این موضوع نشان می‌دهد که ویژگی‌های اصلاح شده سطح می‌توانند نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار انتقال حرارت جوشش داشته باشند. علاوه بر اصلاح سطح توسط رسوب نانوذرات، استفاده از سطوح مهندسی شده نیز یکی دیگر از روش‌های مؤثر برای بهبود انتقال حرارت جوشش محسوب می‌شود.

محبی و خیاط [۱۵] اثر نشست نانوذرات هیبریدی اکسید تیتانیوم و نانولوله کربنی چند جداره را بر میکروکانال‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای ایجاد شده روی سطح جوشش بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش غلظت از ۰/۱ تا ۰/۵ درصد حجمی، شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. این افزایش در حضور سطح میکروکانال دوزنقه‌ای رسوب یافته با نانوسیال ۰/۱ و ۰/۵ درصد حجمی، به ترتیب به میزان ۱۲۰/۱۶ و ۱۴۹/۴٪ نسبت به آب دیونیزه بر روی سطح صیقلی می‌باشد. در میان انواع مختلف این سطوح، ساختارهای متخلخل به دلیل قابلیت ایجاد مسیره‌های موبینگی برای تأمین مایع و تسهیل خروج بخار، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. ساختارهای متخلخل لانه‌زنبوری به دلیل وجود شبکه‌ای از کانال‌های منظم برای جریان مایع و بخار، می‌توانند تأمین سیال تازه به سطح داغ را بهبود داده و از تشکیل نواحی خشک جلوگیری کنند. افزایش نیروی موبینگی و بهبود باز ترشوندگی سطح از جمله مکانیزم‌های اصلی بهبود عملکرد حرارتی در این نوع سطوح محسوب می‌شود.

موری و همکاران [۱۶] برای نخستین بار از ساختارهای متخلخل سرامیکی (مونولیت) مورداستفاده در کاتالیست خروجی دود خودروها به‌عنوان ساختار متخلخل لانه‌زنبوری استفاده کردند. آنها نشان دادند که شار حرارتی بحرانی در جوشش استخری آب اشباع خالص روی این سطح تقریباً دو برابر سطح جوشش صاف است. در پژوهشی دیگر، همین محققان [۱۷] اثر استفاده از ساختار متخلخل لانه‌زنبوری را در جوشش استخری نانوسیال  $TiO_2$  بررسی کردند. آنها گزارش دادند که با افزایش غلظت نانوسیال، شار حرارتی بحرانی به طور چشمگیری افزایش می‌یابد، هرچند در غلظت‌های بیشتر ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد. آزنام و همکاران [۱۸] نیز با مقایسه سطوح مختلف شامل سطح ساده، سطح متخلخل لانه‌زنبوری، سطح دارای رسوب نانوذرات و سطح ترکیبی نشان دادند که استفاده هم‌زمان از صفحه متخلخل لانه‌زنبوری و لایه رسوبی نانوذرات بیشترین بهبود در دفع حرارت را ایجاد می‌کند. در این حالت، ساختار متخلخل با تأمین سیال از طریق پدیده

موبینگی و لایه رسوبی نانوذرات با افزایش ترشوندگی سطح، به طور هم‌زمان در افزایش شار حرارتی بحرانی نقش دارند. در مطالعه‌ای دیگر نیز گزارش شد که ترکیب صفحه متخلخل لانه‌زنبوری، ساختار فلزی شبکه‌ای و لایه رسوبی نانوذرات می‌تواند شار حرارتی بحرانی را تا حدود ۳/۱ برابر نسبت به سطح ساده افزایش دهد [۱۹]. علاوه بر این، یوکوماتسو و همکاران [۲۰] در مطالعه‌ای بر روی خنک‌سازی یک میله فولاد ضدزنگ نشان دادند که استفاده از صفحه متخلخل لانه‌زنبوری می‌تواند زمان خنک‌سازی را تا شش برابر نسبت به حالت بدون صفحه کاهش دهد. درحالی‌که ترکیب این صفحه با لایه رسوبی نانوذرات می‌تواند این کاهش زمان را، تا ۲۸ برابر افزایش دهد. در سال‌های اخیر نیز رویکردهای نوینی مانند استفاده از پوشش‌های مبتنی بر اکسیدگرافن [۲۱]، لایه‌های نانوکامپوزیتی [۲۲]، اعمال میدان‌های مغناطیسی [۲۳]، اکسیداسیون کنترل شده سطح [۲۴] و استفاده از افزودنی‌های مایع یونی [۲۵] به‌عنوان روش‌هایی برای بهبود انتقال حرارت جوشش مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

جدول ۱ خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده در این حوزه را به جهت مقایسه نتایج تحقیقات انجام شده و مشخص نمودن خلأ پژوهشی ارائه می‌کند.

باوجود پیشرفت‌های چشمگیر در زمینه ارتقای انتقال حرارت در جوشش استخری، بررسی ادبیات نشان می‌دهد که اغلب تحقیقات پیشین، تأثیر نانوسیالات و ساختارهای متخلخل را به‌صورت مستقل مورد ارزیابی قرار داده‌اند. هرچند در برخی مطالعات [۱۸، ۲۶] تلاش‌هایی برای بررسی اثرات ترکیبی این دو رویکرد انجام شده است، اما در این پژوهش‌ها تشکیل لایه‌های رسوبی نانوذرات بر روی سطح جوشش در شرایط پایدار و تحت چرخه‌های مکرر و طولانی‌مدت جوشش - سردشدن به طور دقیق کنترل و تحلیل نشده است. این در حالی است که در بسیاری از کاربردهای صنعتی، سطوح انتقال حرارت به طور مداوم در معرض چنین چرخه‌هایی قرار دارند و رسوب تدریجی نانوذرات می‌تواند به تغییرات در ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی سطح منجر شود. در نتیجه، پایداری فیزیکی و حرارتی سطح در طول بهره‌برداری، نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد نهایی سیستم ایفا می‌کند. این تغییرات می‌توانند موجب افزایش دمای مافوق گرم سطح جوشش، کاهش کارایی انتقال حرارت و در نهایت بروز آسیب‌های حرارتی شوند.

در همین راستا، پژوهش حاضر با تمرکز بر این خلأ علمی، به بررسی تجربی عملکرد حرارتی سطح جوششی می‌پردازد که پیش‌تر با استفاده از نانوسیال  $SiO_2$  و تحت چرخه‌های مکرر و طولانی‌مدت جوشش - سردشدن، با دو اندازه مختلف نانوذره به حالت پایدار رسیده است. سپس این سطح پایدار در شرایط کاهش غلظت سیال کاری مورد ارزیابی قرار گرفته تا شرایط عملیاتی نزدیک‌تر به کاربردهای صنعتی شبیه‌سازی شود. در ادامه، یک ساختار متخلخل لانه‌زنبوری بر روی این سطح نصب شده و اثر هم‌افزایی آن با رسوب

متخلخل بر بهبود عملکرد حرارتی و کنترل پدیده‌های حدی نظیر شار حرارتی بحرانی به طور دقیق تبیین گردد. هدف نهایی این تحقیق، ارائه یک رویکرد یکپارچه برای بهره‌گیری هم‌زمان از مزایای سطوح جوشش پایدار و ساختارهای متخلخل، در راستای ارتقای کارایی و ایمنی سیستم‌های انتقال حرارت است.

نانوذرات، از منظر تغییرات منحنی جوشش هسته‌ای و مشخصه‌های انتقال حرارت تحلیل می‌شود. به طور مشخص، پس از پایدارسازی اولیه در غلظت‌های بالاتر، رفتار حرارتی سیستم در غلظت‌های پایین‌تر بررسی شده است تا ضمن حفظ مشخصه‌های سطح، اثرات ترکیبی کاهش غلظت، پایداری سطح و حضور ساختار

**جدول ۱** خلاصه مطالعات پیشین در زمینه جوشش استخری نانوسیالات با تأکید بر روی تکامل سطح، پایداری سطح جوشش و ساختار متخلخل

**Table 1** Summary of previous studies of nanofluid pool boiling with emphasis on surface evolution, boiling surface stability and porous surfaces

Authors	Nano particles	Nano Particle Sizes	Concentration	results	Surface evolution aspect/ Time/ successive cycle/ HPS
Kim et al. (2006),[6]	TiO <sub>2</sub>	85 nm	0.00001-0.1 vol.%	CHF ~ +200%	No test
Kathiravan et al. (2010),[8]	Cu	10 nm	0.25-1 wt.%	CHF +(25-48%) without surfactant, +(62-75%) with surfactant	No test
Kole et al. (2012),[9]	ZnO-EG	30-40 nm	2.6-3.75 vol.%	CHF +117%, BHTC +22%	No test
Kwark et al. (2010),[11]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> CuO	86-143 nm	0.001-1 g/L	CHF ~ +80%	Nanoparticle deposition reported
Ahmed et al. (2012),[12]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40-50 nm	0.01-0.5 vol.%	Heat transfer +35% at low conc., -45% at high conc.	Nanoparticle deposition reported
Mori et al. (2015),[26]	TiO <sub>2</sub>	21 nm	0.004 wt.%	CHF +(2.2 -3.1 MW/m <sup>2</sup> )	Nanoparticle deposition reported/ HPS use/ not use stabilized boiling surface
Okawa et al. (2012),[27]	TiO <sub>2</sub>	21 nm	0.000094-0.047 vol.%	CHF +91%	Boiling time (1 min- 1 h)
Rajabzadeh Dareh et al. (2016),[28]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20 nm	0.0025-0.01 vol.%	CHF +50% BHTC -13%	Nanoparticle deposition reported/ Successive cycles, but nanofluid renewed each cycle/ boiling time (≤15 min)
Abdollahi et al. [29]	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	25 nm	0.1 vol.%	BHTC +43%	Nanoparticle deposition
Rostamian et al. (2018),[30]	SiO <sub>2</sub>	7-14 nm	0.005-0.01 vol.%	CHF ~ +52%	Nanoparticle deposition reported
Paré et al. (2021),[31]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20-30 nm	0.01-1 wt.%	Heat transfer -90%	Nanoparticle deposition reported/ prolonged boiling (12 h)
Mukherjee et al. (2021),[32]	SiO <sub>2</sub>	10.55-25.25 nm	0.0001-0.1 vol.%	BHTC and CHF +133%	Nanoparticle deposition reported
Du et al. (2024),[33]	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	-----	0.001 vol.%	CHF +52.4%, BHTC +56.2%	Nanoparticle deposition reported
Salisu et al. (2025),[34]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (sprayed)	15-45 μm	Molten particle spraying	CHF +54.6%, BHTC -25.7%	Nanoparticle deposition reported/ prolonged boiling (60 h) at constant heat flux
G.Heidari et al. (2026),[14]	SiO <sub>2</sub>	20-30, 60-70 nm	0.01-2 wt.%	CHF +18% (20-30 nm) CHF +13% (60-70 nm) BHTC increases with concentration and nanoparticle sizes	Nanoparticle deposition reported/ Using stabilized boiling surface/ successive boiling cycles/ prolonged boiling (50-60 h)/ not used porous surface

## ۲- مواد و روش‌ها

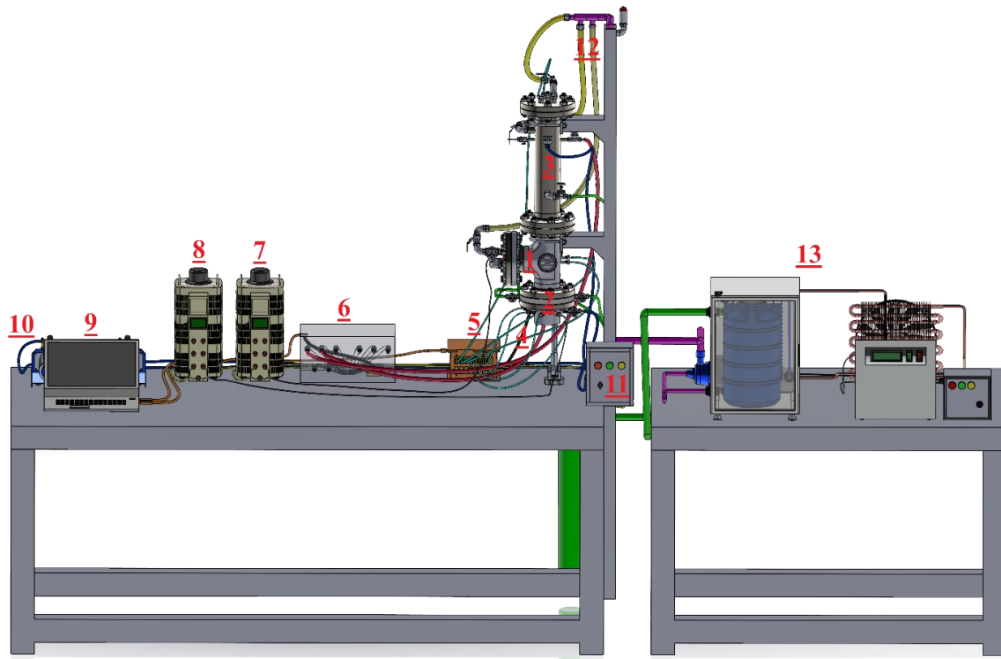
### ۲-۱- دستگاه آزمایش

چیدمان کلی دستگاه آزمایشگاهی مورد استفاده برای بررسی جوشش استخری در شکل ۱ نمایش داده شده است. این دستگاه شامل اجزای مختلفی نظیر محفظه جوشش، کندانسور مسی ماریچ دو مسیره، بخش آزمون متشکل از بلوک مسی استوانه‌ای، پمپ خلأ، دو واریاک AC، دو گرمکن فشنگی با توان ۱۰۰۰ وات، دیتالاگرهای ثبت دما و فشار، چیلر و منبع تغذیه مجهز به نور آبی می‌باشد. محفظه جوشش از جنس استیل نوع ۳۰۴ ساخته شده و دارای ارتفاع ۲۰۰ و قطر داخلی ۱۰۱/۶ میلی‌متر است. همچنین برای پایش بصری فرایند جوشش، دو پنجره رویت بر روی آن تعبیه شده است. دمای سیال عامل به وسیله دو ترموکوپل میله‌ای نصب شده در داخل محفظه جوشش اندازه‌گیری می‌شود. تمامی حسگرهای دما از نوع K بوده و قابلیت اندازه‌گیری دما در بازه ۲۰۰- تا ۱۳۵۰+ درجه سانتی‌گراد را دارند. سیال عامل ابتدا با استفاده از یک پیش گرمکن ۱۰۰۰ وات متصل به واریاک AC تا دمای اشباع گرم شده و سپس اعمال شار حرارتی از طریق گرمکن اصلی تعبیه شده در بلوک مسی و متصل به یک واریاک AC دیگر انجام می‌گیرد. بخار تولیدی توسط کندانسور ماریچ دو مسیره‌ای که درون یک محفظه استوانه‌ای از جنس استیل با قطر داخلی ۱۰۱/۶ و ارتفاع ۵۵۰ میلی‌متر قرار دارد تقطیر شده و مجدداً به محفظه جوشش بازگردانده می‌شود. فشار داخلی محفظه جوشش توسط حسگر هانیول (Honeywell) اندازه‌گیری شده و از طریق تنظیم دبی آب خنک‌کننده

عبوری از کندانسور و یک شیر تخلیه کنترل می‌گردد. داده‌های دما و فشار به صورت پیوسته توسط دیتالاگرها ثبت شده و در یک رایانه ذخیره‌سازی و پردازش می‌شوند.

### ۲-۲- بخش آزمون

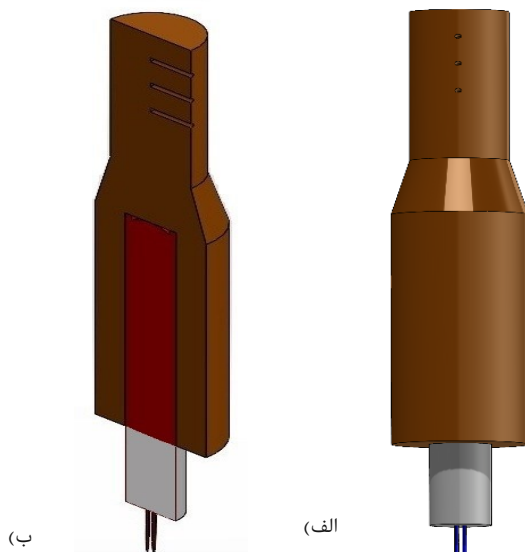
شکل ۲، بلوک مسی مورد استفاده در بخش آزمون را نشان می‌دهد. این بلوک از مس با خلوص بیش از ۹۹٪ ساخته شده و دارای طول ۱۶۰ میلی‌متر و قطر سطح جوشش ۲۵/۴ میلی‌متر است. برای اندازه‌گیری توزیع دما در بلوک مسی، سه ترموکوپل نوع K در سوراخ‌هایی با قطر ۱/۶ و عمق ۱۲/۷ میلی‌متر نصب شده‌اند. این سوراخ‌ها در راستای عمود بر محور بلوک مسی ایجاد شده‌اند. اولین حسگر در فاصله ۱۰ میلی‌متر از سطح جوشش قرار داشته و فاصله بین حسگرهای متوالی نیز برابر با ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. به منظور اطمینان از انتقال حرارت مناسب و کاهش مقاومت حرارتی تماسی میان بلوک مسی و حسگرها، سوراخ‌های ترموکوپل‌ها با گریس حرارتی دارای رسانایی حرارتی بیشتر از ۱/۲ وات بر (متر در کلونین) پر شده‌اند. همچنین یک سوراخ عمودی در بخش زیرین بلوک مسی برای استقرار گرمکن فشنگی با قطر ۱۶ و طول ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. دمای سطح جوشش و شار حرارتی بر اساس داده‌های حالت پایدار اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل‌های  $T_1$  تا  $T_3$  با فرض توزیع خطی دما و استفاده از فرم یک‌بعدی قانون فوریه مطابق معادله (۱) محاسبه می‌شود.



شکل ۱ تصویر شماتیک دستگاه آزمایش، (۱) محفظه جوشش، (۲) بلوک تفلن، (۳) کندانسورها، (۴) ترموکوپل‌ها، (۵) دیتالاگر دما، (۶) دیتالاگر فشار، (۷) و (۸) واریاک، (۹) رایانه، (۱۰) پمپ خلأ، (۱۱) تابلو برق، (۱۲) ورودی‌های آب جهت شستشوی محفظه، (۱۳) مجموعه چیلر

Fig. 1 Schematic image of the test device: 1) Boiling chamber, 2) Teflon block, 3) Condensers, 4) Thermocouples, 5) Temperature data logger, 6) Pressure data logger, 7 and 8) Variac, 9) Laptop, 10) Vacuum pump, 11) Electrical panel, 12) Water inlets for chamber washing, 13) Chiller set.

همچنین، ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای با استفاده از قانون سرمایش نیوتن و مطابق با روابط (۴) و (۵) به دست می‌آید که در آن  $\Delta T$  بیانگر دمای مافوق گرم سطح جوشش است.



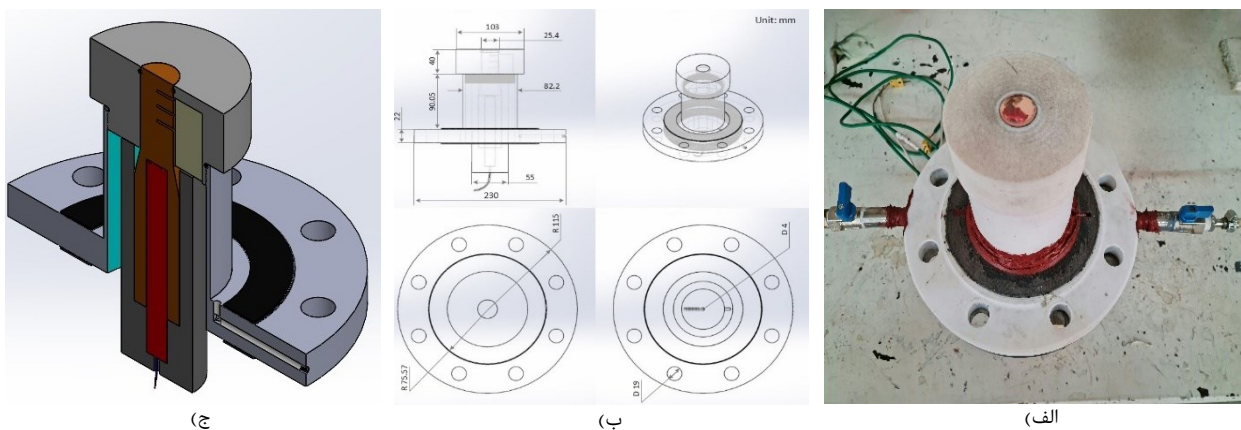
شکل ۲ نمای شماتیک بلوک مسی مجهز به گرمکن داخلی: الف) نمای سه‌بعدی خارجی، ب) نمای مقطعی جهت نمایش ساختار داخلی

Fig. 2 Schematic of the copper block with the embedded heater: a) 3D external view, b) sectioned view showing internal configuration.

بخش سوم شامل یک لوله تفلونی استوانه‌ای است که پیرامون کارتریج مسی قرار گرفته و آن را احاطه می‌کند. به‌منظور کاهش تلفات حرارتی از بلوک مسی، فضای خارجی این بخش تا رسیدن به دیواره داخلی لوله تفلونی ۴ اینچی با پشم‌شیشه پر شده است. پشم‌شیشه مورد استفاده دارای ضریب هدایت حرارتی  $0.04$  (وات بر (متر در درجه سانتی‌گراد)) بوده و تا دمای  $750$  درجه سانتی‌گراد مقاومت حرارتی دارد. این آرایش عایق‌کاری باهدف کاهش تلفات حرارتی جانبی و هدایت عمده شار حرارتی در راستای محوری بلوک مسی به سمت سطح جوشش طراحی شده است.

### ۳-۲- بلوک تفلن

شکل ۳، بلوک تفلن (Poly tetra fluoro ethylene (PTFE)) و اجزای اصلی آن را نشان می‌دهد. این مجموعه به‌طورکلی از سه بخش اصلی تشکیل شده است. بخش پایینی شامل یک فلنج تفلونی است که به یک لوله تفلونی با قطر ۴ اینچ متصل شده و نقش تکیه‌گاه سازه‌ای برای سایر اجزا را بر عهده دارد. بخش بالایی محل استقرار ترموکوپل‌ها بوده و به‌گونه‌ای طراحی شده که به‌راحتی قابل‌جدا سازی باشد تا فرایند نصب، تنظیم و نگهداری تجهیزات اندازه‌گیری تسهیل گردد.



شکل ۳ نمایش ساختار بلوک تفلن در نماهای مختلف: الف) بلوک تفلن، ب) نقشه‌های فنی، ج) نمای برش خورده

Fig. 3 Illustration of the Teflon block structure in different views: a) Teflon block, b) technical drawing, c) cross-sectional view.

$$q''_{Exp} = -(K_{cu}) * \left(\frac{dT}{dz}\right) \quad (1)$$

$$\frac{dT}{dz} = \frac{3(T_1) - 4(T_2) + (T_3)}{2(X_2)} \quad (2)$$

$$T_{wall} = T_1 - \left(\frac{q''_{Exp}}{K_{cu}}\right) * (X_1) \quad (3)$$

$$h_{nb} = \frac{q''_{Exp}}{\Delta T} \quad (4)$$

$$\Delta T = T_{Wall} - T_{Sat} \quad (5)$$

در این روابط،  $q''_{Exp}$  شار حرارتی،  $K_{cu}$  ضریب انتقال حرارت هدایتی مس و  $dT/dz$  گرادیان دما در طول بلوک مسی هستند. گرادیان دما با استفاده از روش بسط تیلور پسر، به کمک رابطه (۲)، با دماهای اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل‌های واقع در بلوک مسی تقریب زده می‌شود. در این محاسبات، متغیر  $X_2$  فاصله بین نقاط دمایی  $T_2$  و  $T_1$  را نشان می‌دهد. دمای سطح جوشش  $T_{wall}$  از رابطه (۳) محاسبه می‌شود که در آن  $X_1$  فاصله بین نقطه  $T_1$  و سطح جوشش است.

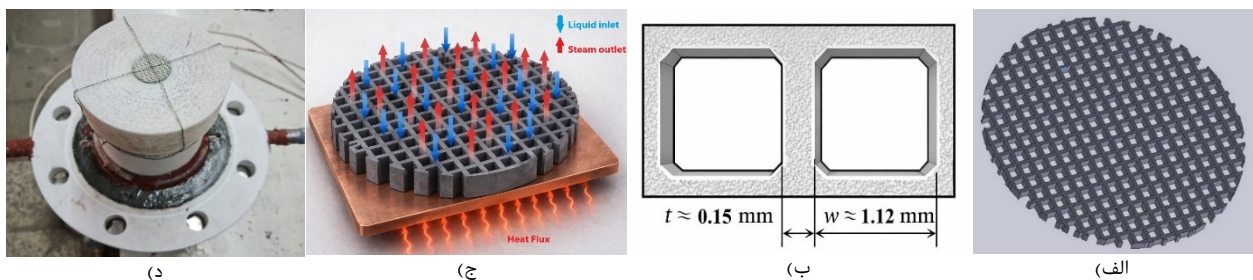
## ۲-۴- ساختار متخلخل لانه زنبوری

در این پژوهش، از ساختار متخلخل لانه زنبوری (Honeycomb porous structure (HPS)) سرامیکی به عنوان سطح بهبودیافته انتقال حرارت استفاده شده است. این ساختارها که به صورت مونولیت‌های سرامیکی ساخته می‌شوند، به طور گسترده در تجهیزات صنعتی، به ویژه در خروجی لوله آگروز و وسائل نقلیه و تجهیزات احتراقی، مورد استفاده قرار می‌گیرند. هندسه منظم این مونولیت‌ها، متشکل از شبکه‌ای از کانال‌های موازی با مقطع مربعی یا چندضلعی می‌باشد. این مونولیت‌ها ساختاری مشابه لانه زنبور ایجاد می‌کنند که از دیدگاه انتقال حرارت و جریان سیال، مزایای قابل توجهی نسبت به بسترهای متخلخل نامنظم دارد.

ویژگی کلیدی این ساختارها، ایجاد تخلخل باز بالا همراه با سطح ویژه زیاد و افت فشار نسبتاً کم است. این ترکیب منحصربه‌فرد، تماس مؤثر بین سیال و سطح را افزایش می‌دهد. همچنین، از ایجاد مقاومت زیاد در مسیر حرکت سیال و بخار جلوگیری می‌کند. در واقع، برخلاف محیط‌های متخلخل تصادفی که ممکن است منجر به ایجاد نواحی مرده و جریان‌های بازگشتی شوند، کانال‌های منظم در ساختار لانه زنبوری، توزیع یکنواخت‌تری از سیال را تضمین می‌کنند. در مطالعه تجربی حاضر از ساختار متخلخل لانه زنبوری سرامیکی مشابه شکل ۴-الف با مشخصات هندسی مطابق با شکل ۴-ب استفاده شده است. ترکیبات سازنده این ساختار متخلخل شامل  $\text{SiO}_2 \cong 45\%$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cong 40\%$ ،  $\text{Mgo} \cong 15\%$  و  $\text{TiO}_2 \cong 1\%$  هستند. از منظر انتقال حرارت جوشش، این ساختار چندین مکانیزم بهبوددهنده را به صورت هم‌زمان فعال می‌کند:

- افزایش تعداد سایت‌های فعال جوانه‌زنی به دلیل زبری ذاتی دیواره‌های سرامیکی و وجود میکرو تخلخل‌ها
- تقویت اثرات موبینگی و تغذیه مجدد مایع به نواحی داغ سطح
- فراهم کردن مسیرهای کم‌مقاومت برای خروج بخار و جلوگیری از تجمع بخار بر روی سطح

در مجموع، این مکانیزم‌ها باعث بهبود باز ترشوندگی سطح، تسهیل جدایش بخار و مایع و در نهایت افزایش شار حرارتی بحرانی می‌شوند. علاوه بر این، ترکیب سرامیکی ساختار متخلخل، پایداری حرارتی و شیمیایی بالایی ایجاد کرده و از تخریب ساختاری یا تغییر خواص سطحی طی چرخه‌های مکرر جوشش - سرد شدن جلوگیری می‌کند. شکل ۴-ج تصویری شماتیک از مکانیزم جریان‌های مایع و بخار را در این ساختار متخلخل نشان می‌دهد. نکته مهم دیگر در طراحی این سیستم، نحوه اتصال ساختار متخلخل به سطح جوشش است. در این پژوهش، به منظور حذف مقاومت حرارتی تماسی، از اتصال مکانیکی فشاری بدون استفاده از هرگونه واسط حرارتی (نظیر چسب یا گریس) توسط سیم‌های استیل مطابق شکل ۴-د استفاده شده است. در مجموع، ترکیب این مکانیزم‌ها باعث افزایش سایت‌های جوانه‌زنی، بهبود موبینگی، تسهیل خروج بخار و پایداری ساختاری، موجب ارتقای هم‌زمان ضریب انتقال حرارت و شار حرارتی بحرانی می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که ساختارهای لانه زنبوری سرامیکی می‌توانند به عنوان یک راهکار مؤثر برای بهینه‌سازی سطوح جوشش در کاربردهای پیشرفته انتقال حرارت مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۴ سطح متخلخل لانه زنبوری: الف) شماتیک ساختار متخلخل، ب) ابعاد ساختار متخلخل، ج) تصویری شماتیک از مکانیزم ورود و خروج مایع و بخار در ساختار متخلخل، د) روش نصب ساختار متخلخل لانه زنبوری بر روی سطح جوشش

Fig. 4 Honeycomb porous structure: a) Schematic of HPS, b) Dimensions of HPS, c) Schematic illustration of the mechanism of fluid and vapor inflow and outflow, d) Installation method of a HPS on a copper boiling surface.

## ۲-۵- آماده‌سازی نانوسیال

در این تحقیق، نانوسیالات با استفاده از روش سنتز دومرحله‌ای مطابق شکل ۵ تهیه می‌شوند. مشخصات فیزیکی اصلی نانوذرات مورد استفاده به همراه تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (Transmission electron microscopy (TEM)) آن‌ها در

جدول ۲ ارائه شده است. در این فرایند، ابتدا مقدار مشخصی از نانوذرات با بهره‌گیری از ترازوی دیجیتال با دقت  $0.0001$  گرم وزن‌کشی می‌شود. سپس این ذرات در آب دیونیزه مخلوط شده و به مدت چهار ساعت تحت هم‌زن مغناطیسی قرار می‌گیرند تا اختلاط اولیه صورت گیرد. سپس، به منظور دستیابی به توزیع

درحالی‌که روش دوم بر اندازه‌گیری پتانسیل زتا ( Zeta potential (Stabino Particle Charge Mapping (Particle Metrix, Germany)) استوار است. در روش ارزیابی مشاهده‌ای، نمونه‌های نانوسیال به مدت دو هفته در دمای اتاق نگهداری شدند و به‌صورت دوره‌ای و منظم از نظر ایجاد رسوب نانوذرات، مورد بررسی مشاهده‌ای قرار گرفتند. مطابق شکل ۶، در هیچ یک از نمونه‌ها رسوب قابل‌توجهی مشاهده نشد. در روش دوم، از اندازه‌گیری پتانسیل زتا ( $\zeta$ ) برای تحلیل پایداری نانوسیال استفاده شد. پتانسیل زتا بیانگر میزان دافعه الکترواستاتیکی بین ذرات بوده و با افزایش قدرمطلق آن پایداری سوسپانسیون بیشتر خواهد بود. بر اساس منابع موجود، نانوسیالاتی با مقدار پتانسیل زتای بیش از  $\pm 45$  میلی‌ولت به‌عنوان نانوسیالات با پایداری بالا در نظر گرفته شده است. درحالی‌که مقادیر در بازه  $\pm 30$  تا  $\pm 40$  میلی‌ولت نشان‌دهنده پایداری متوسط هستند [۳۵]، [۳۶].

مقادیر پتانسیل زتای اندازه‌گیری شده برای نانوسیال ۲٪ جرمی در فواصل زمانی ۷، ۱۴ و ۲۱ روز پس از تهیه نانوسیال به ترتیب برابر با  $-43/8$ ،  $-39/8$  و  $-37/6$  میلی‌ولت به‌دست‌آمده است. این نتایج نشان می‌دهند که نانوسیال تهیه شده در روزهای ابتدایی دارای پایداری بسیار بالا بوده‌اند. با گذشت زمان، اگرچه اندکی کاهش در مقدار پتانسیل زتا مشاهده می‌شود، اما همچنان در محدوده پایداری قابل‌قبول باقی می‌مانند. در مجموع، نتایج حاصل از هر دو روش کیفی و کمی حاکی از آن است که نانوسیالات سیلیس تهیه شده از پایداری مناسبی در طول دوره انجام آزمایش‌ها برخوردار بوده‌اند. همچنین به‌منظور جلوگیری از تغییر خواص نانوسیال، آزمایش‌های جوشش بلافاصله پس از آماده‌سازی نانوسیالات انجام شدند.

یکنواخت‌تر و جلوگیری از تجمع، بهبود پراکندگی ذرات و افزایش پایداری، سوسپانسیون حاصل در مرحله بعد به مدت چهار ساعت در حمام اولتراسونیک (FUNGILAB S.A., Ultrasonic bath tank (Spain) با فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و توان ۶۵۰ وات، در ۹۰٪ توان نامی فراصوت دهی می‌شود. نانوسیالات نهایی در غلظت‌های جرمی ۰/۵، ۱ و ۲٪ جرمی تهیه گردیدند. پس از اعمال ترکیبی نیروهای مکانیکی و امواج اولتراسونیک، به دلیل خاصیت آب‌دوستی نانوذرات  $\text{SiO}_2$ ، این ذرات، پراکندگی یکنواخت و مناسبی در سیال پایه از خود نشان می‌دهند. در نتیجه، نانوسیالات تهیه شده بدون نیاز به افزودن سورفکتانت از پایداری مناسبی برخوردارند. روابط (۶) و (۷) جرم نانوذرات موردنیاز برای تهیه این نانوسیال‌ها را مشخص می‌کنند.

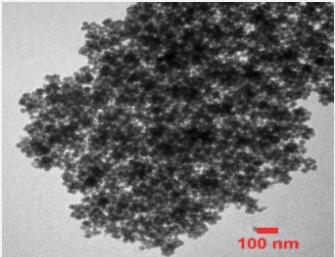
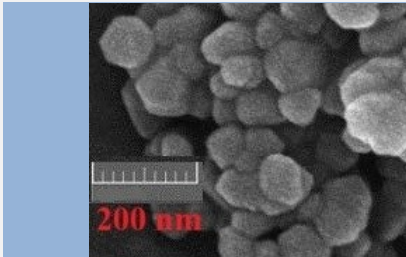
$$\phi_{np} = \frac{M_{\text{SiO}_2}}{M_{\text{SiO}_2} + M_{\text{water}}} * 100 \quad (6)$$

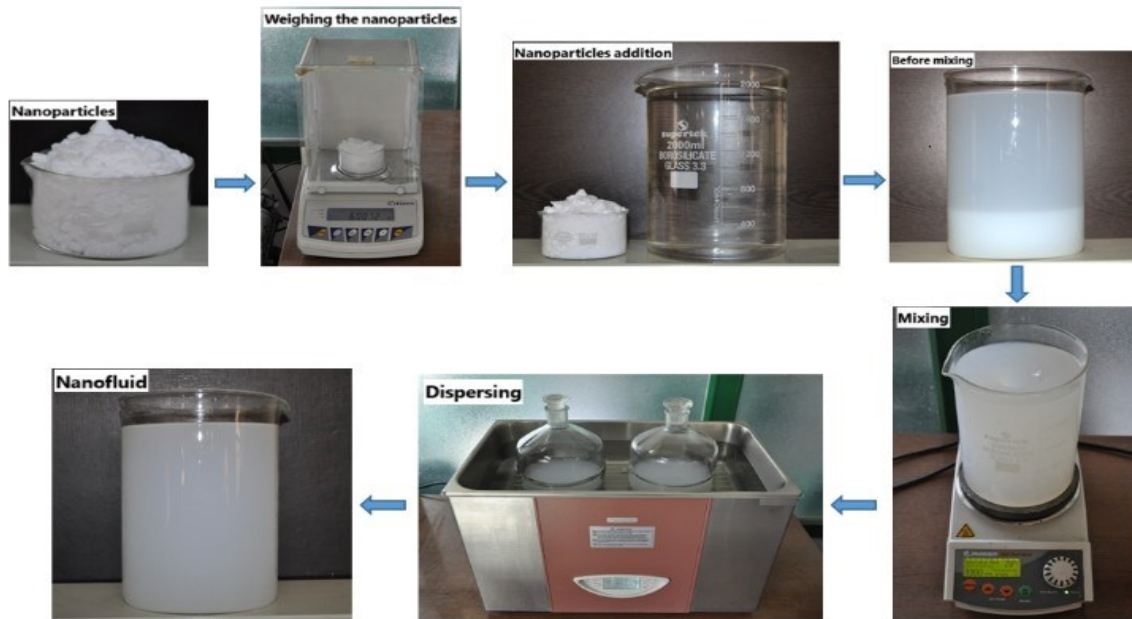
$$M_{np} = \rho_{np} * V_{np} \quad (7)$$

در اینجا،  $\phi_{np}$  نشان‌دهنده درصد غلظت جرمی  $\text{SiO}_2$ ،  $M_{np}$  جرم نانوذرات،  $\rho_{np}$  چگالی نانوذرات و  $V_{np}$  حجم نانوذرات است. یکی از عوامل تعیین‌کننده در عملکرد نانوسیالات، میزان پایداری آن‌ها در طول زمان است. نانوسیال پایدار به سیالی گفته می‌شود که در آن توزیع نانوذرات در سیال پایه به‌صورت یکنواخت حفظ شده و ته‌نشینی یا تجمع قابل‌توجهی رخ ندهد. به همین منظور، ارزیابی پایداری نانوسیالات سنتز شده پیش از انجام آزمایش‌ها ضروری در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش، پایداری نانوسیالات با استفاده از دو روش مستقل مورد بررسی قرار گرفت. روش اول، مبتنی بر مشاهده رفتار ظاهری نانوسیال‌ها در بازه زمانی مشخص و بررسی احتمال ته‌نشینی نانوذرات بود.

جدول ۲ مشخصات فیزیکی و تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نانوذرات مورد استفاده

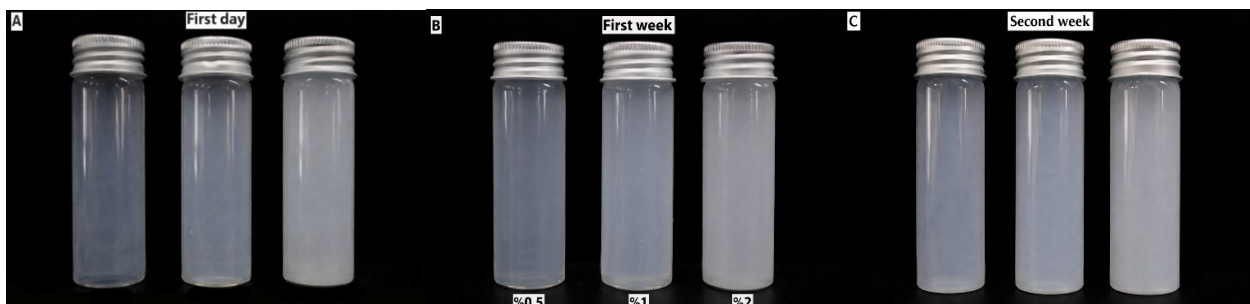
Table 2 Physical characteristics and TEM images of the nanoparticles used

		SiO <sub>2</sub> (amorphous)	
Nanoparticle sizes (nm)		20-30	60-70
Purity		> 99 %	> 98 %
Density (kg/m <sup>3</sup> )		2400	2400
color		white	white
Manufacturer		US Research Nanomaterials	US Research Nanomaterials
TEM pictures of nanoparticles			



شکل ۵ مراحل آماده‌سازی نانوسیال‌ها با استفاده از روش سنتز دومرحله‌ای

Fig. 5 The process of preparing nanofluids using a two-step synthesis method



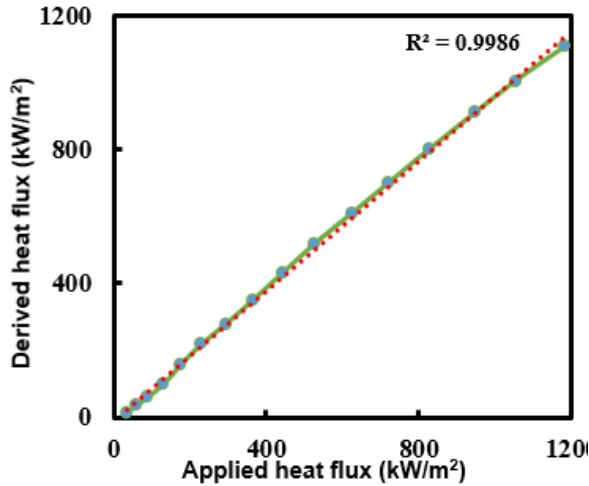
شکل ۶ مشاهده پایداری نانوسیال‌ها با غلظت ۰.۵، ۱ و ۲٪ جرمی، الف) روز اول، ب) هفته اول، ج) هفته دوم

Fig. 6 Observation of the stability of nanofluids at concentrations of 0.5, 1, and 2 wt%, a) First day, b) First week, c) Second week

## ۲-۶- نحوه انجام آزمایش

در طراحی و اجرای آزمایش‌های حاضر، تلاش شده است تا شرایط کاری تا حد امکان بازتاب‌دهنده وضعیت‌های واقعی باشد. در بسیاری از سیستم‌های انتقال حرارت مبتنی بر جوشش، فرایند به‌صورت پیوسته انجام نمی‌شود، بلکه شامل چرخه‌های متوالی راه‌اندازی، توقف و سرد شدن است. در این شرایط، دمای سطح جوشش پس از هر دوره کاری به‌طور طبیعی تا دمای محیط کاهش یافته و این سیکل‌های تکرار شونده می‌توانند به‌مرور موجب تغییر در ریزساختار سطح، از جمله اکسیداسیون، بازآرایی زبری و همچنین ایجاد الگوهای متفاوت رسوب‌گذاری شوند. چنین تحولاتی تأثیر مستقیمی بر رفتار جوشش، به‌ویژه مکانیزم جوانه‌زنی و توزیع سایت‌های فعال، خواهند داشت. باهدف بازسازی این شرایط در مقیاس آزمایشگاهی، در این مطالعه هر آزمایش پس از حدود ۱۰ ساعت و ۳۰ دقیقه کارکرد متوقف شده است. سپس سطح جوشش بدون هیچ‌گونه مداخله خارجی، به‌صورت طبیعی تا دمای محیط سرد شده است. این رویکرد امکان

بررسی اثرات تجمعی چرخه‌های جوشش - سرد شدن بر ویژگی‌های سطحی و عملکرد حرارتی را فراهم می‌سازد. همچنین، به‌منظور کاهش خطاهای ناشی از تغییرات محیطی و افزایش قابلیت اطمینان داده‌ها، در هر روز تنها یک آزمایش انجام شده است. در مرحله آماده‌سازی، پیش از شروع هر آزمایش، محفظه جوشش به‌طور کامل و طی سه نوبت با آب مقطر شست‌وشو داده شده است تا هرگونه آلودگی یا ذرات باقی‌مانده حذف گردد. سپس سطح انتقال حرارت با استفاده از سنباده با درجه زبری ۳۰۰۰ پرداخت شده است. در ادامه با حلال استون و دستمال پارچه‌ای تمیزکاری نهایی انجام گرفته است. این فرایند به‌منظور ایجاد یک سطح اولیه یکنواخت و قابل تکرار برای شروع آزمایش‌ها صورت پذیرفته است. پس از آماده‌سازی، مقدار ۲ لیتر از سیال کاری به محفظه افزوده شده و با استفاده از پیش‌گرم‌کن داخلی، تا رسیدن به دمای اشباع گرم شده است. به‌منظور کنترل دقیق فشار سیستم و نیز چگالش بخار تولیدی، از دو کندانسور مجزا (یکی در داخل محفظه و دیگری در مسیر خروجی) استفاده شده است. تأمین آب خنک‌کننده این



شکل ۸ مقایسه شار حرارتی اعمال شده با شار حرارتی حاصل از گرادیان دمای خطی

Fig. 8 Comparison of applied heat flux with derived heat flux from linear temperature gradient

علاوه بر این، بلوک مسی مورد استفاده دارای رسانندگی حرارتی بالایی می‌باشد. در ضمن، هندسه گرم‌کن نسبت طول به قطر بزرگی دارد و سطوح جانبی نیز به خوبی عایق‌کاری شده‌اند که همگی احتمال انتقال حرارت جانبی را به حداقل می‌رسانند. همچنین، مطابق شکل ۸، شار حرارتی محاسبه شده از گرادیان دمای اندازه‌گیری شده با شار حرارتی الکتریکی ورودی مقایسه شدند. نتایج، تطابق و خطی بودن بسیار خوبی ( $R^2 > 0.99$ ) را بین این دو روش نشان می‌دهند. همچنین اختلاف این دو در کل محدوده آزمایش کمتر از ۱۰٪ بوده است. این اختلاف اندک را می‌توان ناشی از تلفات حرارتی اجتناب‌ناپذیر و عدم قطعیت‌های تجربی دانست. بنابراین، خطی بودن توزیع دما، ویژگی‌های حرارتی ماده، ملاحظات هندسی، شرایط عایق‌کاری و همچنین صحت‌سنجی مستقل موازنه انرژی، همگی شواهد تجربی محکمی برای معتبر بودن فرض هدایت حرارتی یک‌بعدی در دستگاه حاضر فراهم می‌کنند.

۲-۷-۲- اعتبارسنجی داده‌های آزمایشگاهی

به منظور اعتبارسنجی نتایج، داده‌های به دست آمده با نتایج تجربی گزارش شده توسط روزنو [۳۷] و همچنین مطالعات عبد‌الهی [۲۳] و فوگاکا [۳۸] مقایسه شدند. معادله (۸) رابطه تجربی روزنو را ارائه می‌دهد که به طور خاص برای برآورد شار حرارتی در فرایند انتقال حرارت جوشش هسته‌ای، به عنوان تابعی از دمای مافوق گرم سطح جوشش، پیشنهاد شده است.

$$q'' = \left( \frac{C_{pf} \Delta T_{sat}}{C_{pf} \mu_f^n} \right)^{3/0303} \left( \frac{\mu_f h_{fg}}{\sigma \sqrt{g(\rho_f - \rho_g)}} \right) \quad (8)$$

علاوه بر این، مقدار شار حرارتی بحرانی اندازه‌گیری شده، با پیش‌بینی‌های مدل‌های زوبر [۳۹] و حرامورا [۴۰] که با استفاده از روابط (۹) تا (۱۱) به دست می‌آیند، نیز مورد مقایسه قرار گرفت.

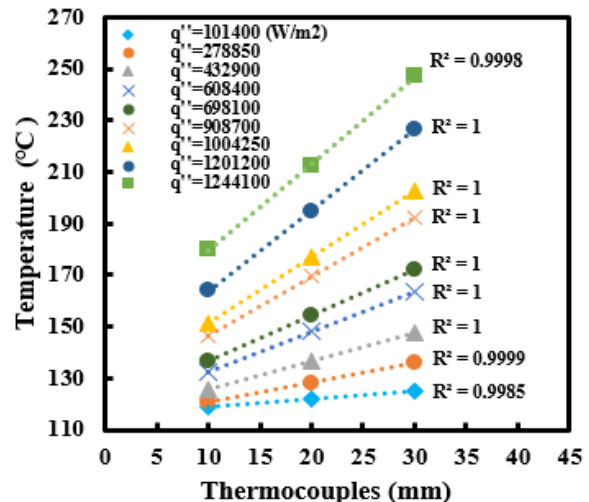
کندانسورها توسط یک چیپر (LAUDA) انجام می‌گیرد که امکان تثبیت شرایط ترمودینامیکی را فراهم می‌کند. پس از رسیدن سیال به شرایط اشباع، توان ورودی به گرم‌کن اصلی به صورت تدریجی و در گام‌های مشخص (افزایش‌های ۱۰ ولتی) اعمال شده است. در طول آزمایش، سیستم علی‌رغم حفظ شرایط پایدار، به ناحیه‌های مختلف جوشش وارد شده و در نهایت شار حرارتی بحرانی حاصل گردید. در طول این فرایند، پارامترهای کلیدی شامل دما و فشار اندازه‌گیری شده و داده‌ها به صورت پیوسته توسط دیتالاگرها ثبت و در رایانه ذخیره شده‌اند.

نکته مهم در ثبت داده‌ها، اطمینان از رسیدن سیستم به حالت پایدار حرارتی پیش از برداشت اطلاعات است. بدین منظور، تنها زمانی ثبت داده‌ها آغاز شده که نرخ تغییرات دمای اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل‌ها کمتر از  $(dT/dt = 0.1)$  کلوین بر دقیقه بوده و این وضعیت حداقل به مدت ۱۰ دقیقه تداوم داشته باشد. این معیار تضمین می‌کند که داده‌های ثبت شده نمایانگر شرایط پایدار بوده و از نوسانات گذرا تأثیر نپذیرفته‌اند. در نتیجه تحلیل‌های بعدی از دقت و اعتبار بالاتری برخوردار خواهند بود.

۲-۷-۲- پردازش داده‌ها و تحلیل خطا

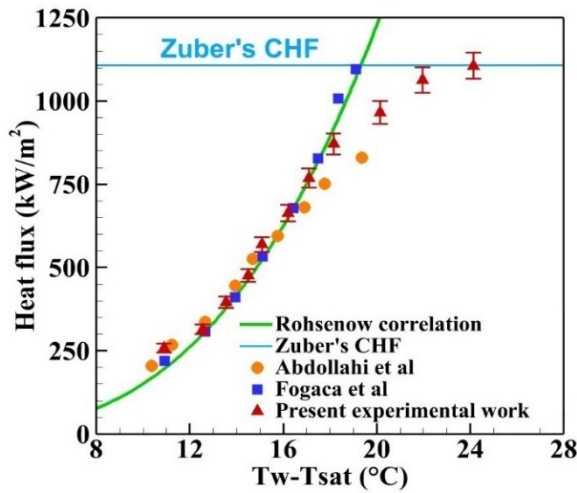
۲-۷-۲-۱- توزیع دما در بلوک مسی

توزیع دما برای مقادیر مختلف شار حرارتی اعمال شده به بلوک مسی، به صورت مستقل مورد برازش قرار گرفته است. شکل ۷ تغییرات دمای اندازه‌گیری شده توسط سه ترموکوپل نصب شده در داخل بلوک مسی را در بازه وسیعی از شارهای حرارتی، نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی حاصل از روش حداقل مربعات بیش از ۰/۹۹ در تمامی حالات، می‌باشد. این رقم، نشان‌دهنده آن است که گرادیان دمایی در راستای طولی بلوک مسی به خوبی از یک رفتار خطی تبعیت می‌کند.



شکل ۷ توزیع دمای خطی در بلوک مسی

Fig. 7 Linear temperature distributions of the copper block



شکل ۹ اعتبارسنجی دستگاه آزمایش

Fig. 9 Experimental apparatus validation

### ۲-۸- تکرارپذیری داده‌های آزمایشگاهی

قابلیت تکرارپذیری یکی از معیارهای بنیادین در ارزیابی اعتبار داده‌های تجربی به شمار می‌رود و تضمین‌کننده اعتمادپذیری نتایج در شرایط یکسان آزمایشگاهی است. در مطالعات جوشش استخری، آماده‌سازی سطح جوشش به‌ویژه از طریق سنباده‌کاری یا پولیش به طور گسترده به‌عنوان روشی برای ایجاد شرایط اولیه یکنواخت به کار گرفته می‌شود. با این وجود، از آنجاکه انتقال حرارت در جوشش به شدت به ویژگی‌های ریزساختاری سطح وابسته است، تکرار عملیات سنباده‌کاری پیش از هر آزمایش لزوماً به بازتولید دقیق یک سطح با مشخصات یکسان منجر نمی‌شود. در واقع، حتی با کنترل دقیق عامل‌هایی نظیر جهت حرکت سنباده، تعداد رفت‌وبرگشت‌ها و میزان فشار اعمالی، دستیابی به یک زبری کاملاً مشابه در هر بار آماده‌سازی سطح عملاً دشوار است.

این مسئله می‌تواند موجب ایجاد تفاوت‌های قابل‌توجه در توزیع حفره‌ها، زبری مؤثر و در نهایت چگالی سایت‌های فعال جوانه‌زنی شود. این عوامل نقش کلیدی در تعیین رفتار جوشش و عامل‌هایی نظیر شار حرارتی بحرانی و دمای فوق گرم دیواره دارند. به‌منظور ارزیابی این موضوع، همان‌گونه که در شکل ۱۱-الف مشاهده می‌شود، سطح جوشش در پنج مرحله متوالی سنباده‌کاری شد و پس از هر مرحله، یک آزمایش کامل جوشش استخری با استفاده از آب دیونیزه و تحت شرایط کاملاً کنترل‌شده انجام گرفت.

نتایج نشان داد که با وجود یکسان نگه‌داشتن تمامی شرایط عملیاتی، مقادیر اندازه‌گیری‌شده دارای پراکندگی قابل‌توجهی هستند. به‌طوری‌که بیشینه اختلاف در شار حرارتی بحرانی و دمای مافوق گرم سطح جوشش به ترتیب حدود ۱۶٪ و ۱۳٪ به‌دست‌آمده است. این میزان انحراف بیانگر آن است که تغییرات ناخواسته در ریزساختار سطح، حتی در شرایط کنترل‌شده، می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر نتایج آزمایش داشته باشد. زبری سطح نمونه مسی پیش از انجام آزمایش‌های جوشش، با استفاده از زبری‌سنج

اختلاف میان شار حرارتی بحرانی اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌های زوبر و حرامورا به ترتیب ۱۳٪ و ۲۶٪ به دست آمد.

$$q''_{\text{Critical}} = K \rho_g h_{fg} \left[ \frac{g \sigma (\rho_f - \rho_g)}{\rho_g^2} \right]^{1/4} \left[ \frac{\rho_f + \rho_g}{\rho_f} \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$q''_{\text{Critical}} = \rho_g h_{fg} \left[ \frac{g \sigma (\rho_f - \rho_g)}{\rho_g^2} \right]^{(1/4)} * \quad (10)$$

$$\left[ \frac{\rho_f + \rho_g}{\rho_g} \right]^{(5/16)} * \left[ \frac{A_g}{A_w} \right]^{(5/8)} * \left[ 1 - \frac{A_g}{A_w} \right]^{(5/16)} * \left[ \frac{\pi^4}{2^{11} * 9} \right]^{(1/16)} \quad (11)$$

$$\frac{A_g}{A_w} = 0,0584 \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{(1/5)}$$

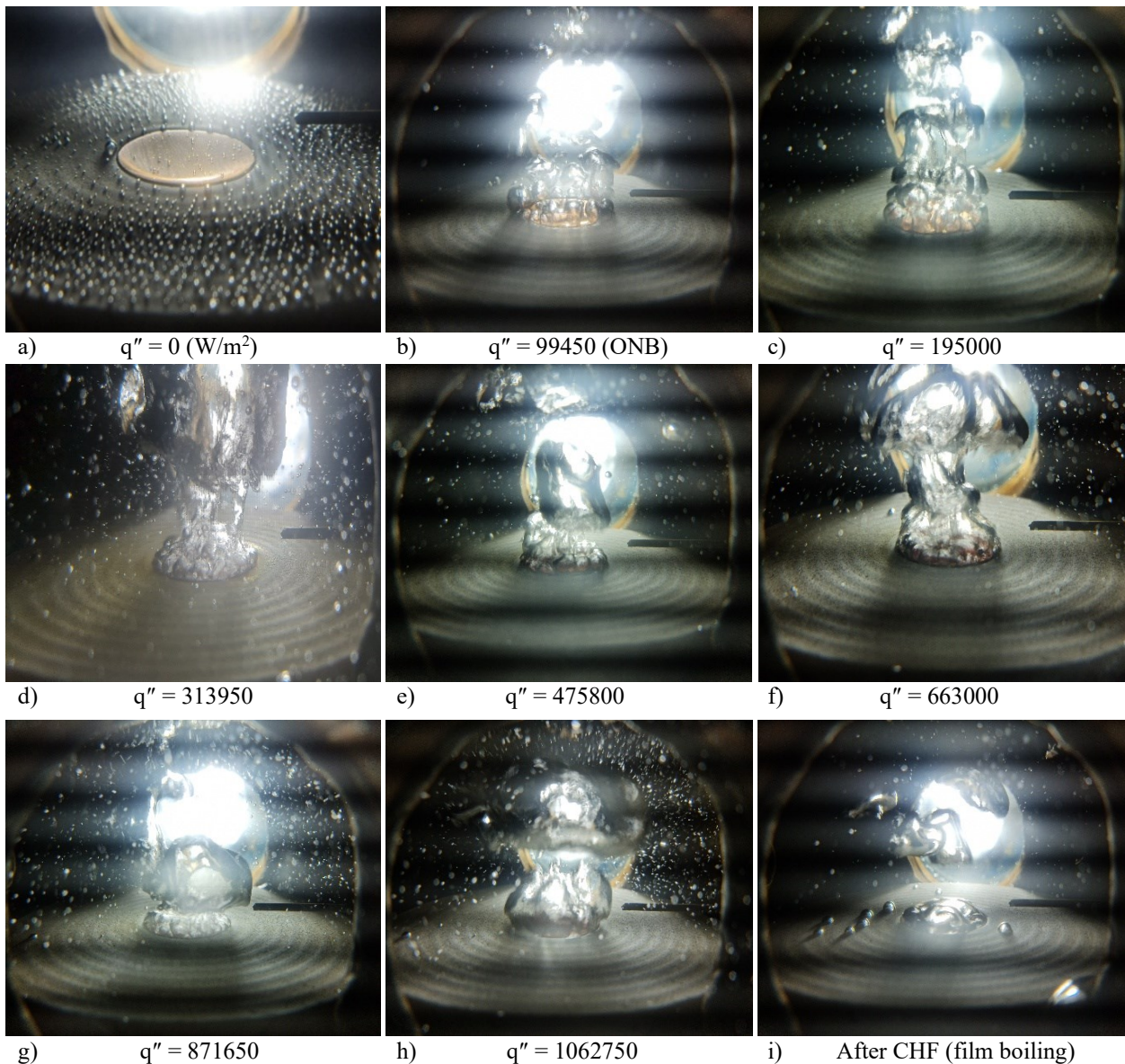
در این روابط،  $q''$  شار حرارتی،  $C_{pf}$  ظرفیت گرمایی ویژه مایع،  $h_{fg}$  گرمای نهان تبخیر،  $\Delta T_{\text{sat}}$  اختلاف دمای بین سطح جوشش و دمای اشباع و  $C_{sf}$  ثابت وابسته به ترکیب سطح و سیال (برابر با ۰/۱۲۸) هستند. همچنین  $\mu_f$  ویسکوزیته مایع،  $\sigma$  کشش سطحی،  $g$  شتاب گرانش،  $\rho_f$  چگالی مایع،  $\rho_g$  چگالی بخار،  $K_f$  رسانندگی حرارتی مایع،  $K$  ثابت برابر با  $\pi/24$  و  $n$  برای آب برابر با ۱ و برای سایر سیالات برابر با ۱/۷ در نظر گرفته می‌شود.

شکل ۹ نتایج اعتبارسنجی دستگاه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از هر رو روش اعتبارسنجی نشان‌دهنده دقت بسیار بالای دستگاه آزمایشگاهی و صحت روش‌های اندازه‌گیری در این پژوهش است. این مقایسه‌ها نشان داد که روند تغییرات شار حرارتی با دمای مافوق گرم، همخوانی بسیار خوبی با رابطه تجربی روزنو و نتایج محققان مذکور دارد. همچنین تصویر مراحل جوشش و شکل‌گیری حباب‌ها در طول فرایند جوشش هسته‌ای (که داده‌های آن در شکل ۹ آورده شده است) از شار حرارتی صفر تا نقطه‌گذار از شار حرارتی بحرانی، در شکل ۱۰ نشان‌داده شده است.

در نواحی با شار حرارتی پایین، فرایند جوشش با تشکیل حباب‌های کوچک و مجزا آغاز می‌شود که به‌صورت پراکنده بر روی سطح ظاهر می‌گردند. این وضعیت نشان‌دهنده فعال‌بودن تعداد محدودی از سایت‌های جوانه‌زنی است. با افزایش تدریجی شار حرارتی، نه تنها اندازه حباب‌ها افزایش می‌یابد، بلکه تعداد آن‌ها نیز بیشتر شده و سطح مؤثرتری از ناحیه جوشش را در بر می‌گیرند. در ادامه و با افزایش بیشتر شار حرارتی، حباب‌ها به یکدیگر نزدیک شده و به‌مرور به هم متصل می‌شوند. در نتیجه، بخش عمده‌ای از سطح انتقال حرارت توسط آن‌ها پوشیده می‌شود. در نهایت، پس از عبور از مقدار شار حرارتی بحرانی، سیستم وارد ناحیه جوشش فیلمی می‌شود که در آن یک‌لایه پیوسته از بخار کل سطح را می‌پوشاند. تشکیل این لایه بخار به دلیل ضریب هدایت حرارتی پایین آن، منجر به کاهش قابل‌توجه نرخ انتقال حرارت از سطح به سیال شده و کارایی حرارتی سیستم را به شدت کاهش می‌دهد.

سنباده‌کاری شد و تمامی آزمایش‌های بعدی بدون انجام هرگونه عملیات آماده‌سازی مجدد، بر روی همان سطح اکسید شده مسی حاصل از چرخه قبلی آزمایش، انجام گرفت. این رویکرد موجب شد که تغییرات سطحی صرفاً ناشی از فرایندهای طبیعی حین جوشش، از جمله اکسیداسیون باشد و از مداخلات خارجی جلوگیری شود.

(MarSurf PS1, Germany) و به صورت چندباره بر روی سطح سنباده‌زده اندازه‌گیری شد. نتایج اندازه‌گیری‌ها مقادیری در محدوده  $0.04-0.03$  میکرومتر را نشان داد. در مقابل، برای دستیابی به ارزیابی دقیق‌تر از تکرارپذیری سیستم، رویکرد متفاوتی اتخاذ شد. در این روش، سطح جوشش تنها یک‌بار پیش از آغاز آزمایش‌ها

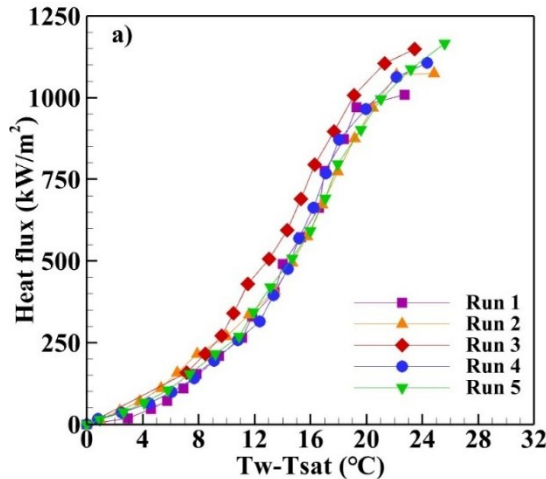


شکل ۱۰ شکل‌گیری حباب‌ها در جوشش هسته‌ای آب دیونیزه بر روی سطح جوشش سنباده خورده از شار حرارتی صفر تا نقطه‌گذار از شار حرارتی بحرانی  
Fig. 10 Bubble formation of DI water on sanded boiling surface at zero heat flux up to film boiling

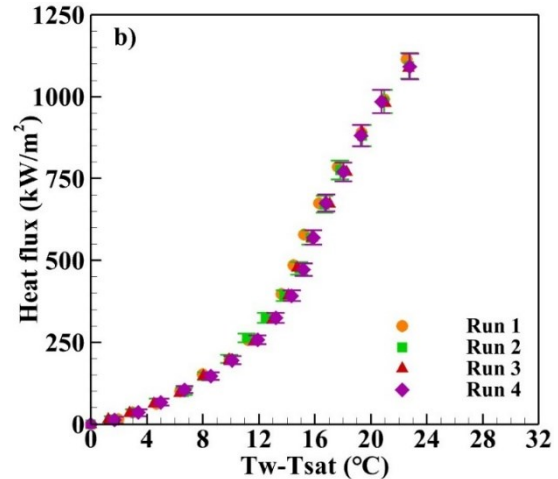
نیز، این رویکرد با شرایط واقعی بهره‌برداری صنعتی سازگاری بیشتری دارد، چراکه در اغلب سیستم‌های عملی، امکان انجام عملیات پولیش یا سنباده‌کاری پیش از هر بار راه‌اندازی وجود ندارد. در چنین شرایطی، سطح جوشش پس از یک مرحله آماده‌سازی اولیه، تحت تأثیر سیکل‌های متوالی جوشش -

نتایج این مجموعه آزمایش‌ها که در شکل ۱۱-ب ارائه شده‌اند، نشان می‌دهد که میزان انحراف داده‌ها به شدت کاهش یافته و بیشینه اختلاف در چهار آزمایش متوالی تنها حدود  $0.57\%$  بوده است. این مقدار ناچیز، بیانگر یکنواختی قابل قبول شرایط سطح و تکرارپذیری بالای داده‌های به دست آمده است. از دیدگاه کاربردی

دقت و قابلیت اعتماد داده‌های تجربی شده است، بلکه از نظر فیزیکی نیز بازتاب‌دهنده رفتار واقعی سطوح جوشش می‌باشد.



سردشدن به طور طبیعی تکامل یافته و ویژگی‌های آن به‌مرورزمان تغییر می‌کند. بنابراین، اتخاذ این روش نه تنها موجب افزایش



شکل ۱۱ منحنی‌های جوشش هسته‌ای حاصل از آزمایش‌های متوالی، الف) سنباده‌زنی سطح جوشش پیش از هر آزمایش، ب) سنباده‌زنی سطح جوشش تنها پیش از اولین آزمایش

Fig. 11 Nucleate boiling curves obtained from successive experiments. a) boiling surface sanded prior to each test, b) boiling surface sanded only before the initial test

در این چارچوب، عدم قطعیت عامل‌های کلیدی شامل شار حرارتی، دمای مافوق گرم سطح جوشش و ضریب انتقال حرارت جوشش، با بهره‌گیری از روابط حاکم و معادلات (۱۲) تا (۱۴) محاسبه شده‌اند. نتایج حاصل از این تحلیل نشان می‌دهد که میزان عدم قطعیت در عامل‌های مذکور در محدوده قابل‌قبولی قرار دارد. به طور مشخص، بیشینه عدم قطعیت برای شار حرارتی حدود ۴/۴٪، برای دمای مافوق گرم سطح جوشش نزدیک به ۴٪ و برای ضریب انتقال حرارت جوشش در حدود ۵/۵٪ برآورد شده است. این مقادیر بیانگر آن است که علی‌رغم وجود منابع مختلف خطا، دقت اندازه‌گیری‌ها و روش‌های محاسباتی به‌کاررفته در این مطالعه در سطح مناسبی قرار داشته و نتایج ارائه‌شده از قابلیت اطمینان قابل‌قبولی برخوردارند.

$$\delta q''_{Exp} = \sqrt{\left(\frac{\partial q''}{\partial k_{cu}} \cdot \delta k_{cu}\right)^2 + \left(\frac{\partial q''}{\partial T_1} \cdot \delta T_1\right)^2 + \left(\frac{\partial q''}{\partial T_2} \cdot \delta T_2\right)^2 + \left(\frac{\partial q''}{\partial T_3} \cdot \delta T_3\right)^2 + \left(\frac{\partial q''}{\partial \Delta x} \cdot \delta \Delta x\right)^2} \quad (12)$$

$$\delta \Delta T_{sat} = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta T_{sat}}{\partial q''} \cdot \delta q''\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T_{sat}}{\partial k_{cu}} \cdot \delta k_{cu}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T_{sat}}{\partial \Delta x} \cdot \delta \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T_{sat}}{\partial T_{sat}} \cdot \delta T_{sat}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T_{sat}}{\partial T_1} \cdot \delta T_1\right)^2} \quad (13)$$

$$\delta h_{nb} = \sqrt{\left(\frac{\partial h}{\partial q''_{Exp}} \cdot \delta q''_{Exp}\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial T_{wall}} \cdot \delta T_{wall}\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial T_{sat}} \cdot \delta T_{sat}\right)^2} \quad (14)$$

### ۹-۲- تحلیل عدم قطعیت

به‌منظور ارزیابی دقت نتایج تجربی، تحلیل جامع از عوامل مختلف عدم قطعیت انجام شده است که خلاصه آن در جدول ۳ ارائه گردیده است. از آنجاکه خواص ترموفیزیکی مواد، به‌ویژه رسانایی حرارتی، نقش مهمی در محاسبه شار حرارتی و سایر پارامترهای انتقال حرارت دارند، بررسی تغییرات این خواص از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بر اساس داده‌های مرجع [۴۱]، رسانایی حرارتی مس در بازه دمای کاری تغییر محدودی داشته و مقادیر آن در دماهای ۱۰۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر با ۳۹۵/۸۹ و ۳۸۲/۸۹ وات بر (متر در کلوین) گزارش شده است.

باتوجه به این تغییرات نسبتاً اندک، در تحلیل‌های مربوطه فرض شده است که رسانایی حرارتی مس در طول آزمایش‌ها ثابت باقی می‌ماند. با این حال، برای در نظر گرفتن خطای ناشی از این تقریب، یک بازه عدم قطعیت معادل ۳/۲٪ برای این پارامتر لحاظ شده است. به‌منظور برآورد عدم قطعیت کمیت‌های محاسبه‌شده، از روش انتشار خطا بر پایه رویکرد کلاسیک کلاین و مک‌کلینتاک [۴۲] استفاده شده است. این روش با در نظر گرفتن حساسیت پارامترهای خروجی نسبت به متغیرهای ورودی، امکان تعیین سهم هر یک از منابع خطا را در مقدار نهایی فراهم می‌کند.

جدول ۳ عدم قطعیت پارامترهای اندازه‌گیری

Table 3 Uncertainty of measurement parameters

Parameter	Uncertainty
Thermocouples temperature	±0.1 K
location of the thermocouples	±0.1 mm
Voltage	±1 V
Amperage	±0.1 A

## ۳- بحث و نتیجه‌گیری

## ۳-۱- پایداری سطح جوشش

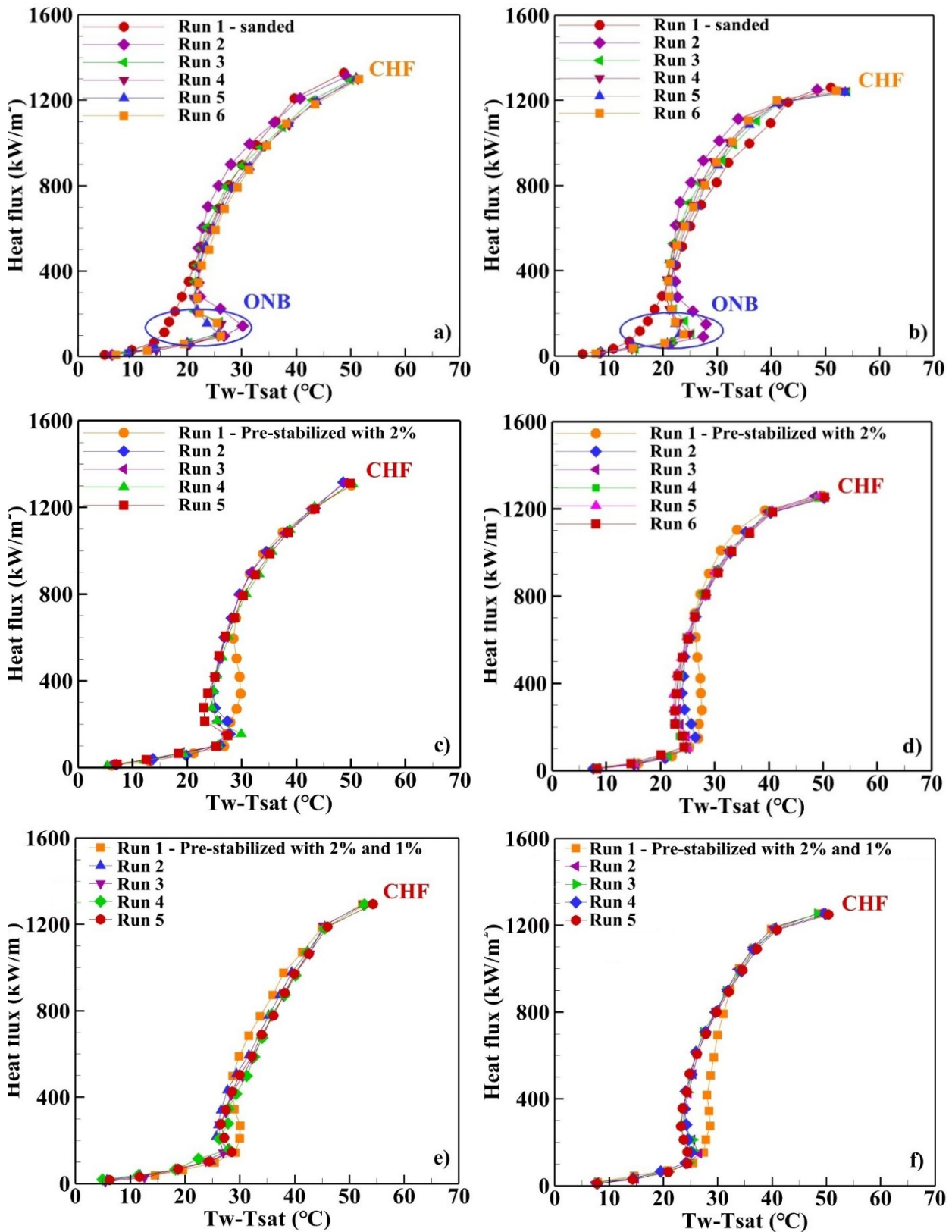
همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، یک از اهداف اصلی این پژوهش ایجاد یک سطح جوشش پایدار از طریق اعمال چرخه‌های متوالی و طولانی‌مدت جوشش - سردشدن است. به نحوی که خواص فیزیکی و حرارتی سطح جوشش در طول زمان ثابت باقی‌مانده و مشخصه‌های انتقال حرارت آن دستخوش تغییر نشوند. سطح جوشش زمانی پایدار در نظر گرفته می‌شود که رفتار جوشش در نزدیکی شار حرارتی بحرانی تغییرات ناچیزی نشان دهد. هیچ‌گونه جابه‌جایی سیستماتیک بین چرخه‌های متوالی مشاهده نشود. همچنین انحراف معیار مقادیر شار حرارتی بحرانی و دمای مافوق گرم سطح جوشش که بر اساس سه چرخه پایانی جوشش - سردشدن محاسبه می‌شوند، کمتر از  $\pm 2\%$  باشند. بر اساس آزمون‌های تکرارپذیری انجام‌شده در این پژوهش، بیشینه انحراف داده‌های اندازه‌گیری‌شده برای یک سطح پایدار کمتر از  $1\%$  بوده است. بنابراین، معیار  $\pm 2\%$  به‌عنوان یک حد محافظه‌کارانه انتخاب شد تا اطمینان حاصل شود که هرگونه نشانه از «ناپایداری سطح جوشش» ناشی از تغییرات واقعی فیزیکی سطح در طی چرخه‌های متوالی جوشش بوده و صرفاً حاصل خطاهای اندازه‌گیری یا عدم تکرارپذیری آزمایش‌ها نیست. به بیان دیگر، اگر دمای مافوق گرم در آزمایش‌های متوالی افزایشی فراتر از این محدوده نشان دهد، این تغییر نه به‌عنوان پراکندگی معمول داده‌های تجربی بلکه به‌عنوان ناپایداری واقعی سطح جوشش تفسیر می‌شود.

برای هر غلظت نانوسیال، چرخه‌های متوالی جوشش - سردشدن به‌صورت مستقل انجام و بررسی شدند. تعداد چرخه‌ها از پیش ثابت در نظر گرفته نشده است. در صورتی که یک غلظت مشخص قادر به ایجاد پایداری سطح نباشد، آزمایش‌ها تا حداکثر قابلیت تحمل مجاز برای دستگاه ادامه پیدا می‌کند که این محدودیت عمدتاً توسط دمای ذوب بخش تفلونی (تقریباً  $327^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد) تعیین می‌شود. در این حالت نیز، برای حفظ یکنواختی تحلیل داده‌ها، انحراف معیار از سه چرخه آخر محاسبه می‌شود. این روش برای تمامی غلظت‌های مورد بررسی به‌صورت مستقل اعمال شده است. بر اساس نتایج گزارش شده توسط حیدری و همکاران [۱۴] اعمال چرخه‌های متوالی و طولانی‌مدت جوشش - سردشدن در نانوسیال  $\text{SiO}_2$  با غلظت جرمی  $2\%$  می‌تواند منجر به تشکیل یک سطح جوشش پایدار از لحاظ فیزیکی و حرارتی شود. به‌طوری که بعد از پایداری سطح جوشش، مشخصه‌های انتقال حرارت و منحنی‌های جوشش هسته‌ای در این غلظت علاوه بر چرخه‌های مکرر و طولانی‌مدت جوشش - سردشدن، با رقیق کردن نانوسیال کاری نیز تغییر نکنند. به همین دلیل، در پژوهش حاضر نیز از همین رویکرد برای ایجاد سطح جوشش پایدار استفاده شده است. بعد از پایداری سطح جوشش با نانوسیال  $2\%$  جرمی، سطح جوشش به ترتیب با نانوسیال  $1\%$  و  $0.5\%$  جرمی نیز به پایداری

مجدد رسانده می‌شود. بدین منظور در ابتدای کار، سطح مسی جوشش تنها پیش از نخستین آزمایش به‌صورت خطی و با استفاده از سنبله شماره ۳۰۰۰ پرداخت می‌شود. سپس آزمایش‌های متوالی جوشش استخری بدون اعمال هرگونه عملیات پرداخت مجدد، تکرار می‌شوند. نتایج حاصل از این چرخه‌ها برای نانوسیال  $2\%$  جرمی با اندازه نانوذرات  $30-20$  و  $60-70$  نانومتر به ترتیب در شکل ۱۲-الف و ب ارائه شده است. رسوب تدریجی نانوذرات بر روی سطح مسی منجر به تشکیل یک‌لایه متخلخل نسبتاً یکنواخت می‌شود که با کاهش زاویه تماس و بهبود ترشوندگی سطح، توزیع یکنواخت‌تری از سایت‌های فعال جوانه‌زنی را فراهم می‌سازد. در نتیجه، این ویژگی‌های سطحی در گذر زمان و در طول چرخه‌های متوالی جوشش - سردشدن تغییر محسوسی نشان نداده و رفتار جوشش در غلظت  $2\%$  جرمی به یک حالت پایدار می‌رسد.

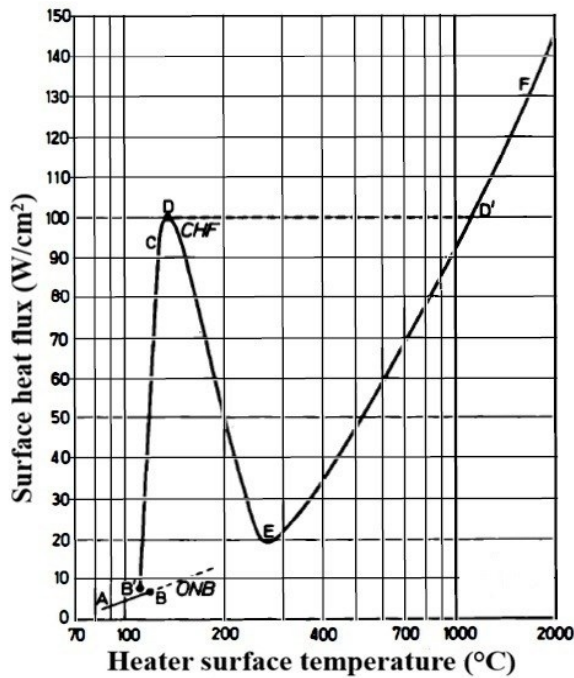
مقدار شار حرارتی بحرانی برای نانوسیال‌های  $2\%$  با اندازه نانوذرات  $20-30$  نانومتر حدود  $1300$  کیلووات بر مترمربع و برای نانوسیال‌های با اندازه نانوذرات  $70-60$  نانومتر حدود  $1250$  کیلووات بر مترمربع اندازه‌گیری شده است. این مقادیر به ترتیب با انحراف معیار  $0.27\%$  و  $0.25\%$  و در دمای مافوق گرم حدود  $52$  درجه سانتی‌گراد با انحراف معیار  $1.09\%$  و  $1.44\%$  رخ داده‌اند. علاوه بر پایداری مناسب، سطوح پایدار ایجاد شده با نانوسیال  $2\%$  موجب افزایش قابل‌توجه مقدار شار حرارتی بحرانی نسبت به آب دیونیزه شدند. به‌طوری که این افزایش برای نانوذرات با اندازه  $30-20$  و  $60-70$  نانومتر به ترتیب حدود  $18\%$  و  $13\%$  به دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که در غلظت‌های بالای نانوسیال، لایه رسوبی نانوذرات به‌سرعت به یک ساختار متخلخل پایدار تبدیل می‌شود. با این حال، کاهش نسبی شار حرارتی بحرانی در نانوذرات بزرگ‌تر را می‌توان به تفاوت در مورفولوژی لایه رسوبی، کاهش چگالی سایت‌های فعال جوانه‌زنی یا افزایش مقاومت حرارتی مؤثر سطح نسبت داد.

بعد از پایداری سطح جوشش با نانوسیال  $2\%$  جرمی، این سطح از پیش پایدار شده به ترتیب با نانوسیالات  $1\%$  (شکل ۱۲-ج، د) و  $0.5\%$  جرمی (شکل ۱۲-ه، و) به پایداری مجدد می‌رسد. مقدار شار حرارتی بحرانی و دمای مافوق گرم سطح برای نانوذرات  $30-20$  و  $60-70$  نانومتر برابر با مقادیر سطح پایدار شده با نانوسیال  $2\%$  جرمی می‌باشد. در نتیجه وقتی یک سطح با نانوسیال  $2\%$  جرمی به پایداری می‌رسد، کاهش غلظت سیال کاری به  $1$  و  $0.5\%$  جرمی و ایجاد سطوح پایدار جدید، شار حرارتی بحرانی و دمای مافوق گرم سطح را تغییر نمی‌دهد. بنابراین، می‌توان علی‌رغم دسترسی به شار حرارتی بالا توسط پایداری سطح جوشش با نانوسیالات غلیظ، این شار حرارتی را با کاهش غلظت نانوسیال کاری حفظ کرد. این پدیده می‌تواند در بسیاری از کاربردها به جهت کاهش احتمال رسوب نانوذرات استفاده گردد. در تحقیق تجربی حاضر، این نتایج به‌عنوان زیربنای عملیاتی برای سطح جوشش، به جهت نصب ساختار متخلخل عمل می‌کنند.



شکل ۱۲ منحنی‌های جوشش هسته‌ای پایدار نانوسیال‌های  $\text{SiO}_2$  تحت سیکل‌های متوالی و طولانی‌مدت جوشش - سرد شدن برای غلظت‌ها و اندازه‌های مختلف نانوذرات [۱۴]. الف، ب) سطح جوشش پایدار شده با نانوسیال ۲٪ جرمی. ج، د) سطح جوشش پایدار شده با نانوسیال‌های ۲ و ۱٪ جرمی. ه، و) سطح جوشش پایدار شده با نانوسیال‌های ۲، ۱ و ۰٫۵٪ جرمی. در نمودارهای الف، ج، ه) اندازه نانوذرات ۲۰-۳۰ نانومتر و در نمودارهای ب، د، و) اندازه نانوذرات ۶۰-۷۰ نانومتر است.

Fig. 12 Stabilized nucleate boiling curves of  $\text{SiO}_2$  nanofluids under successive and prolonged boiling cycles for different nanofluid concentrations and nanoparticle sizes [[14]]. a, b) boiling surfaces stabilized with 2 wt.% nanofluid. c, d) boiling surfaces stabilized with 2 and 1 wt.% nanofluids. e, f) boiling surfaces stabilized with 2, 1, and 0.5 wt.% nanofluids. In addition, nanoparticle sizes are 20-30 nm for curves (a, c, e) and 60-70 nm for cases (b, d, f).



شکل ۱۳ منحنی جوشش استخری آب در فشار اتمسفریک [۴۳]

Fig. 13 Pool boiling curve of water at atmospheric pressure [43]

جوشش هسته‌ای، با جداسدن حباب‌های بخار از سطح، نواحی موضعی خشک ایجاد می‌شود. در صورت عدم باز ترشوندگی سریع، می‌توانند به‌عنوان نقاط آغاز ناپایداری حرارتی عمل کرده و در نهایت منجر به کاهش عملکرد انتقال حرارت شوند.

از این‌رو، توانایی سطح در بازگرداندن سریع مایع به این نواحی خشک، یکی از عوامل اساسی در حفظ کارایی و تأخیر در وقوع شار حرارتی بحرانی محسوب می‌شود. سطوح با خاصیت آب‌دوستی بالا (hydrophilic) به دلیل زاویه تماس کمتر، امکان گسترش سریع‌تر مایع را فراهم و در مقایسه با سطوح آب‌گریز، عملکرد بهتری در باز ترشوندگی نشان می‌دهند. این ویژگی سبب محدود شدن رشد نواحی خشک و افزایش پایداری لایه مایع مجاور سطح می‌شود. در نتیجه، کاهش زاویه تماس به طور مستقیم با افزایش مقدار شار حرارتی بحرانی و بهبود ایمنی عملکرد سیستم‌های جوشش مرتبط است [۳۳].

یکی از مکانیزم‌های مؤثر در اصلاح ترشوندگی سطح، رسوب‌گذاری نانوذرات در طی استفاده از نانوسیالات است. این پدیده به عامل‌های متعددی از جمله نوع نانوذره، غلظت نانوسیال، اندازه ذرات و شرایط هیدرودینامیکی جریان وابسته است. لایه تشکیل شده از نانوذرات می‌تواند با تغییر مورفولوژی سطح، از جمله افزایش زبری در مقیاس میکرو و نانو و نیز اصلاح ساختار حفره‌ها، رفتار جوانه‌زنی و توزیع سایت‌های فعال را دستخوش تغییر کند. بسته به شرایط، این تغییرات ممکن است منجر به افزایش یا کاهش چگالی سایت‌های جوانه‌زنی گردد و از این طریق دینامیک تشکیل و رشد حباب‌ها را کنترل کنند.

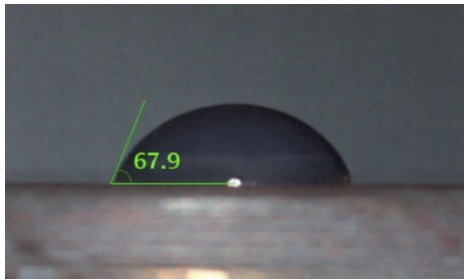
### ۲-۳- شروع انتقال حرارت جوشش هسته‌ای

آغاز جوشش هسته‌ای (Onset of nucleate boiling (ONB)) مطابق با شکل ۱۳ به‌عنوان نقطه‌گذار از رژیم همرفت طبیعی (A-B) به رژیم جوشش هسته‌ای (B'-C) شناخته می‌شود. گذاری که با تغییر محسوس در مکانیزم‌های انتقال حرارت همراه است. در این مرحله، دمای مافوق گرم دیواره به سطحی می‌رسد که حفره‌های فعال موجود بر روی سطح قادر به آغاز فرایند جوانه‌زنی بخار می‌شوند و تشکیل حباب‌ها به‌صورت پایدار شروع می‌گردد. در نتیجه این تغییر رژیم، رفتار منحنی شار حرارتی نسبت به دمای مافوق گرم سطح جوشش از حالت تقریباً خطی در ناحیه همرفت طبیعی فاصله گرفته و شیب آن به طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. با این‌حال، بررسی نتایج از شکل ۱۲-الف و ب نشان می‌دهد که در اولین آزمایش انجام‌شده با نانوسیال بر روی سطوح تازه سنباده خورده، نقطه مشخصی به‌عنوان شروع جوشش هسته‌ای علی‌رغم وجود به‌وضوح قابل‌تشخیص نیست.

این موضوع را می‌توان به وجود تعداد زیاد حفره‌های فعال و زبری مؤثر سطح نسبت داد که شرایط مناسبی را برای آغاز هم‌زمان جوانه‌زنی در گستره وسیعی از سطح فراهم می‌کند. در چنین شرایطی، تشکیل حباب‌ها از همان مراحل ابتدایی افزایش شار حرارتی آغاز شده و گذار از همرفت طبیعی به جوشش هسته‌ای به‌صورت تدریجی و پیوسته رخ می‌دهد، بدون آنکه شکست یا تغییر ناگهانی در منحنی مشاهده شود. در ادامه و با اعمال سیکل‌های متوالی جوشش - سرد شدن، به تدریج لایه‌ای از رسوب نانوذرات بر روی سطح تشکیل می‌شود. این لایه منجر به تغییر ویژگی‌های سطحی از جمله زبری مؤثر و ساختار حفره‌ها می‌گردد. این تغییرات معمولاً با کاهش تعداد سایت‌های فعال اولیه برای جوانه‌زنی همراه می‌باشد. در نتیجه، برای آغاز جوشش هسته‌ای به دمای مافوق گرم بالاتری نیاز خواهد بود. به همین دلیل، در آزمایش‌های بعدی، منحنی‌های جوشش به سمت مقادیر بالاتر دمای مافوق گرم دیواره جابه‌جا می‌شوند. پس از وقوع جوشش هسته‌ای، افزایش ناگهانی در نرخ تولید و جداسدن حباب‌ها موجب تقویت انتقال حرارت و بهبود تبخیر سطحی می‌شود. این پدیده به‌صورت کاهش موقتی دمای مافوق گرم سطح نمود پیدا می‌کند. با تداوم افزایش شار حرارتی و تثبیت شرایط جوشش، سیستم وارد ناحیه جوشش هسته‌ای پایدار شده و دمای دیواره مجدداً روند افزایشی ملایمی را دنبال می‌کند.

### ۳-۳- ترشوندگی سطح جوشش

ترشوندگی سطح به‌عنوان یکی از عامل‌های کلیدی در کنترل عملکرد حرارتی فرایندهای جوشش، نقش تعیین‌کننده‌ای در مقدار شار حرارتی بحرانی ایفا می‌کند. در واقع، نحوه برهم‌کنش فاز مایع با سطح جامد، مستقیماً بر پایداری لایه مایع و قابلیت باز ترشوندگی سطح پس از جداسدن حباب‌ها اثرگذار است. در رژیم



(الف)



(ب)

**شکل ۱۴** زاویه تماس قبل و بعد از آزمایش جوشش، الف) آب دیونیزه روی سطح سنباده خورده، ب) آب دیونیزه روی سطح از قبل پایدار شده توسط نانوسیالهای ۱، ۲ و ۵٪ وزنی

**Fig. 14** Contact angles measured before and after the pool boiling experiments, a) DI water on a sanded surface, b) DI water on a pre-stabilized surface treated with 2, 1 and 0.5 wt% SiO<sub>2</sub> nanofluid

آنکه پایداری قبلی از بین برود. در ادامه به منظور بررسی اثر هم‌افزایی بین سطح پایدار شده و ساختار متخلخل لانه‌زنبوری، این ساختار بر روی سطح از پیش پایدار شده ۲٪ و مجدد پایدار شده با نانوسیالات ۱ و ۵٪ جرمی، متصل گردید. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در شکل ۱۵ ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۵-الف و ب مشاهده می‌شود مقدار شار حرارتی بحرانی برای نانوسیال‌های دارای نانوذرات ۳۰-۲۰ و ۶۰-۷۰ نانومتر به ترتیب برابر با ۱۲۹۲/۸۵ و ۱۲۴۹/۹۵ (کیلووات بر مترمربع) اندازه‌گیری شد. درحالی‌که دمای مافوق گرم متناظر با این مقادیر برابر ۵۲/۵ و ۵۰/۴۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشند. تحلیل نتایج نشان می‌دهد اتصال سطح متخلخل لانه‌زنبوری به سطح جوشش از پیش پایدار شده با نانوسیال ۲٪ و مجدد پایدار شده با نانوسیالات کاهش غلظت پیدا کرده تا ۵٪ جرمی، باعث افزایش قابل توجه شار حرارتی بحرانی می‌شود. این افزایش نسبت به سطح پایدار شده توسط نانوسیالات ۱، ۲ و ۵٪ جرمی بدون ساختار متخلخل و آب دیونیزه به ترتیب ۳۵/۶٪ و ۵۸/۷٪ برای نانوسیال دارای نانوذرات ۳۰-۲۰ نانومتر و ۳۹/۸٪ و ۵۸/۱٪ برای نانوسیال دارای نانوذرات ۷۰-۶۰ نانومتر می‌باشد.

مطابق شکل ۱۴-الف، پیش از آغاز فرایند جوشش، سطح مسی پرداخت شده با آب دیونیزه، دارای زاویه تماس نسبتاً متوسطی در حدود ۶۷/۹ درجه است که نشان‌دهنده ترشوندگی معمولی سطح می‌باشد. با این حال، با جایگزینی سیال پایه با نانوسیال SiO<sub>2</sub>، پس از اعمال سیکل‌های متوالی جوشش - سرد شدن، به تدریج یک لایه رسوبی پایدار بر روی سطح شکل می‌گیرد که ویژگی‌های ترشوندگی را به طور اساسی دگرگون می‌سازد. وقتی سطح جوشش با نانوسیال ۲٪ جرمی پایدار شد، نانوسیال کاری ابتدا تا غلظت ۱٪ و سپس تا غلظت ۵/۰٪ جرمی رقیق می‌شود. سپس جوشش‌های متوالی در هر غلظت بر روی سطح پایدار شده با نانوسیال قبلی ادامه می‌یابد تا سطح جوشش در غلظت ۵/۰٪ جرمی به پایداری مجدد برسد. اندازه‌گیری زاویه تماس پس از پایداری مجدد سطح جوشش مطابق با شکل ۱۴-ب نشان می‌دهد که سطح به شدت آب‌دوست شده و زاویه تماس به مقادیر بسیار کوچک، نزدیک به صفر درجه، کاهش می‌یابد. در چنین حالتی، قطره مایع به محض تماس با سطح، به سرعت پخش شده و سطح وسیعی را می‌پوشاند. این امر بیانگر بهبود قابل توجه خاصیت موئینگی و افزایش توان باز ترشوندگی سطح است.

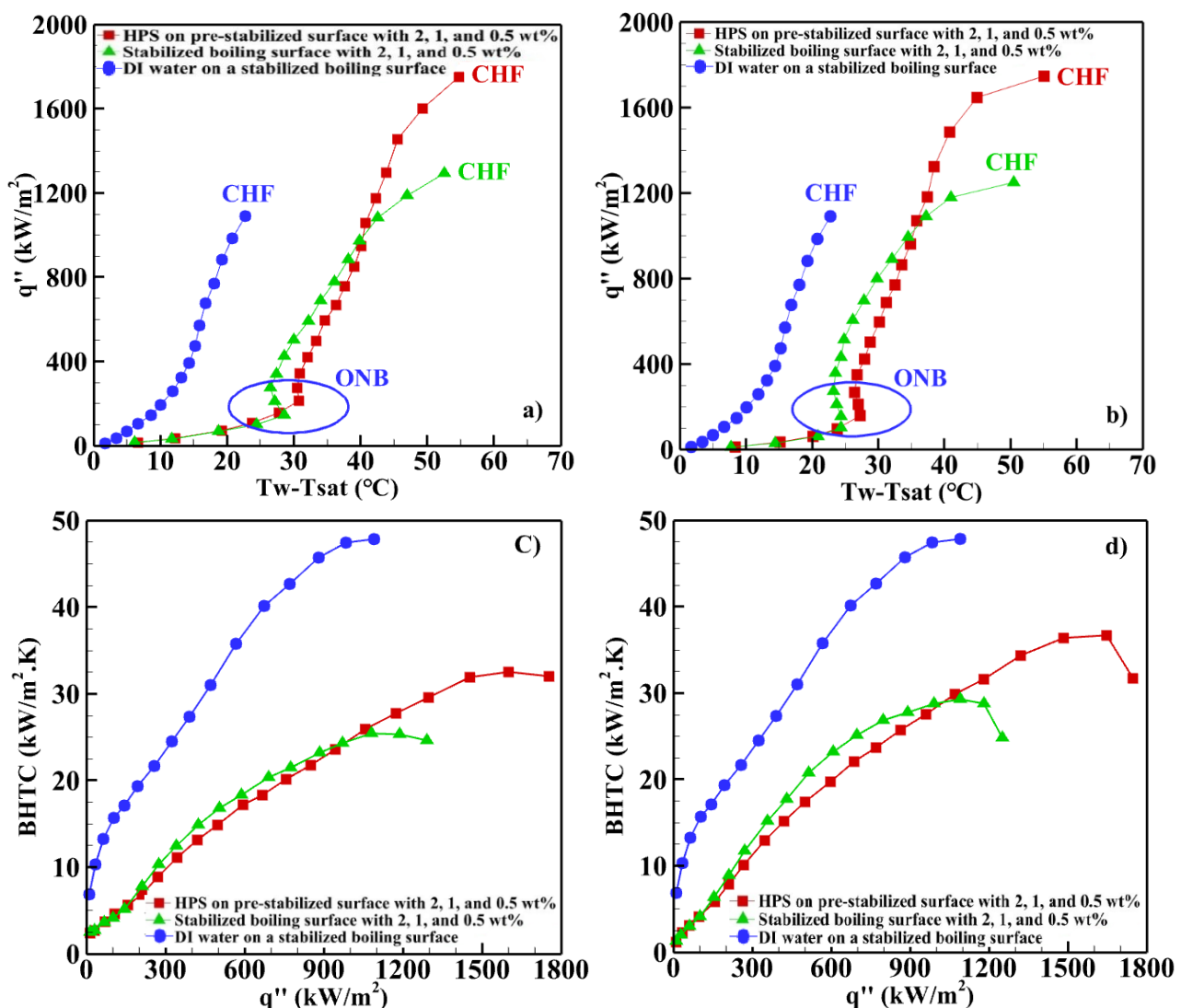
بهبود چشمگیر در ترشوندگی سطح، تأثیر مستقیمی بر افزایش شار حرارتی بحرانی دارد. این امر به این دلیل است که گسترش سریع مایع بر روی سطح، از تشکیل و توسعه نواحی خشک جلوگیری کرده و امکان تداوم تماس مؤثر بین فاز مایع و سطح داغ را فراهم می‌آورد. در نتیجه، سیستم قادر خواهد بود شارهای حرارتی بالاتری را پیش از رسیدن به شرایط بحرانی تحمل کند. در مجموع، این نتایج به روشنی نشان می‌دهند که مهندسی سطح از طریق رسوب‌گذاری کنترل شده نانوذرات، موجب بهبود ویژگی‌های ترشوندگی می‌شود. همچنین با تأثیرگذاری بر مکانیزم‌های حاکم بر جوانه‌زنی، رشد و جداسدن حباب‌ها، به طور قابل توجهی عملکرد حرارتی سیستم‌های جوشش را ارتقا می‌دهد.

### ۳-۴- اثرات استفاده از ساختار متخلخل بر روی سطح جوشش پایدار

با توجه به نتایج گزارش شده توسط موری و همکاران [۱۶] ضخامت بهینه برای ساختار متخلخل لانه‌زنبوری به منظور افزایش شار حرارتی بحرانی برابر یک میلی‌متر گزارش شده است. از این رو در مطالعه تجربی حاضر نیز همین ضخامت برای ساختار متخلخل مورد استفاده قرار گرفته است. در بخش قبل نشان داده شد که سطح جوشش با نانوسیال SiO<sub>2</sub> با غلظت ۲٪ جرمی پس از اعمال چرخه‌های متوالی و طولانی مدت جوشش - سرد شدن به پایداری فیزیکی و حرارتی می‌رسد. پس از دستیابی به این پایداری، با کاهش غلظت نانوسیال به ۱ و سپس ۵/۰٪ جرمی، امکان ایجاد لایه‌های پایدار جدید بر روی سطح پایدار ۲٪ فراهم می‌گردد، بدون

همچنین مطابق با شکل ۱۵-ج و د، اتصال ساختار متخلخل لانه‌زنبوری به سطح پایدار شده با نانوسیالات ۱، ۲ و ۰/۵ جرمی منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود. مقدار این افزایش برای نانوسیال‌های با اندازه نانوذرات ۲۰-۳۰ و ۶۰-۷۰ نانومتر به ترتیب ۲۷/۹٪ و ۲۵/۳٪ نسبت به سطح پایدار فاقد ساختار متخلخل است. این بهبود عملکرد حرارتی را می‌توان به افزایش تعداد سایت‌های فعال جوانه‌زنی، بهبود ترشوندگی سطح و تسهیل انتقال مایع درون ساختار متخلخل نسبت داد. این عوامل در کنار یکدیگر موجب تقویت مکانیزم‌های انتقال حرارت در ناحیه جوشش هسته‌ای شده و در نهایت به افزایش شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت منجر می‌شوند.

علاوه بر این، استفاده از ساختار متخلخل موجب تأخیر در شروع جوشش هسته‌ای نیز شده است. به عبارت دیگر، دمای لازم برای شروع جوشش هسته‌ای در حضور این ساختار متخلخل افزایش می‌یابد. برای نانوسیال با اندازه نانوذرات ۲۰-۳۰ نانومتر دمای شروع جوشش هسته‌ای از ۲۸/۵۵ به مقدار ۳۰/۸ درجه سانتی‌گراد رسیده که معادل ۷/۹٪ افزایش را نشان می‌دهد. به طور مشابه برای نانوسیال با اندازه نانوذرات ۶۰-۷۰ نانومتر دمای شروع جوشش هسته‌ای از ۲۴/۴ به مقدار ۲۷/۳ درجه سانتی‌گراد رسیده که معادل ۱۱/۹٪ افزایش را نشان می‌دهد. این رفتار نشان‌دهنده نقش مؤثر ساختار متخلخل در فعال‌سازی سایت‌های جوانه‌زنی و بهبود شرایط شروع جوشش هسته‌ای است.



شکل ۱۵ منحنی‌های شار حرارتی (الف، ب) و ضریب انتقال حرارت جوشش (ج، د) برای سطح جوشش پایدار شده با نانوسیال‌های ۱، ۲ و ۰/۵ وزنی و متصل به ساختار متخلخل لانه‌زنبوری. (الف، ج) اندازه نانوذرات ۲۰-۳۰ نانومتر. (ب، د) اندازه نانوذرات ۶۰-۷۰ نانومتر.

Fig. 15 Heat flux curves (a, b) and boiling heat transfer coefficient curves (c, d) for boiling surfaces stabilized with nanofluids at 2, 1, and 0.5 wt.% and attached with a HPS. Nanoparticle sizes are 20-30 nm for curves (a, c) and 60-70 nm for curves (b, d).

## فهرست علائم

علائم انگلیسی

Cp	ظرفیت گرمایی ویژه (J/(kg.K))
Csf	ضریب سطح جامد - مایع
d	ضخامت ساختار متخلخل (mm)
DI	آب مقطر دیونیزه
g	شتاب گرانشی (m/s <sup>2</sup> )
h	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (kW/(m <sup>2</sup> .K))
hfg	گرمای نهان تبخیر (kJ/kg)
HPS	ساختار متخلخل لانه‌زنبوری
k	رسانایی حرارتی (W/(m.K))
M	جرم نانوذرات (kg)
ONB	شروع جوشش هسته‌ای
q''	شار حرارتی (kW/m <sup>2</sup> )
T	دما (°C)
t	ضخامت دیواره ساختار متخلخل (mm)
V	حجم (m <sup>3</sup> )
w	عرض کانال فرار بخار در ساختار متخلخل (mm)
X	موقعیت ترموکوپل (mm)

علائم یونانی

δ	عدم قطعیت
ζ	پتانسیل زتا
μ	ویسکوزیته (kg/(m.s))
Ø	درصد غلظت جرمی
ρ	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )
σ	کشش سطحی (N/m)

زیرنویس‌ها

1-3	موقعیت ترموکوپل‌ها
b	جوشش
cu	مس
EXP	آزمایشگاهی
f	مایع
g	بخار
nb	جوشش هسته‌ای
np	نانوذرات
sat	اشباع

## ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر هم‌افزایی ساختار متخلخل لانه‌زنبوری و سطوح جوشش پایدار شده بر عملکرد انتقال حرارت در جوشش استخری نانوسیال SiO<sub>2</sub> تحت شرایط کاهش غلظت سیال کاری به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، سطح جوشش ابتدا با استفاده از نانوسیال با غلظت بالاتر و تحت چرخه‌های مکرر و طولانی‌مدت جوشش - سرد شدن پایدارسازی شد تا یک بستر حرارتی با ویژگی‌های فیزیکی و ترشوندگی کنترل‌شده ایجاد گردد. سپس، با کاهش تدریجی غلظت نانوسیال، رفتار انتقال حرارت سطح پایدار شده در شرایط عملیاتی واقع‌بینانه‌تر ارزیابی شد تا ضمن حفظ ویژگی‌های حرارتی سطح، اثر کاهش احتمال رسوب‌گذاری نیز موردتوجه قرار گیرد. در ادامه، یک ساختار متخلخل

لانه‌زنبوری بر روی سطح پایدار نصب شد تا با افزایش سطح مؤثر تبادل حرارت، تقویت نیروهای موئینگی، بهبود تغذیه مجدد سیال به نواحی خشک‌شده و تسهیل خروج حباب‌های بخار، مکانیزم‌های انتقال حرارت تقویت گردد. نتایج نشان داد که پایداری سطح حتی در غلظت‌های کاهش‌یافته حفظ شده و افزودن ساختار متخلخل منجر به بهبود قابل‌توجه در عملکرد حرارتی می‌شود. به طور مشخص، تغییرات در عامل‌های کلیدی نظیر شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت بیانگر افزایش کارایی سطح ترکیبی در مقایسه با سطح پایدار بدون ساختار متخلخل بوده و نقش مؤثر این رویکرد در کنترل رفتار جوشش و تأخیر در وقوع شرایط بحرانی را تأیید می‌کند.

- تشکیل یک سطح جوشش پایدار با استفاده از نانوسیال ۲٪ جرمی و مجدد پایدار شده با کاهش غلظت نانوسیال به ۱ و ۰/۵٪ جرمی، موجب افزایش شار حرارتی بحرانی نسبت به آب دیونیزه در حدود ۱۸٪ و ۱۳٪ به ترتیب برای نانوذرات ۳۰-۲۰ و ۶۰-۷۰ نانومتر می‌شود.

- اتصال ساختار متخلخل لانه‌زنبوری به سطح جوشش پایدار توسط نانوسیال ۲٪ جرمی و مجدد پایدار شده با کاهش غلظت نانوسیال به ۱ و ۰/۵٪ جرمی، باعث افزایش شار حرارتی بحرانی نسبت به سطح پایدار ۲٪ جرمی بدون ساختار متخلخل و آب دیونیزه شده است. این افزایش به ترتیب ۳۵/۶٪ و ۵۸/۷٪ برای نانوذرات ۳۰-۲۰ نانومتر و ۳۹/۸٪ و ۵۸/۱٪ برای نانوذرات ۶۰-۷۰ نانومتر می‌شود.

- اتصال ساختار متخلخل لانه‌زنبوری به سطح جوشش پایدار شده توسط نانوسیال ۲٪ جرمی و مجدد پایدار شده با کاهش غلظت نانوسیال به ۱ و ۰/۵٪ جرمی، ضریب انتقال حرارت را برای نانوذرات ۲۰-۳۰ و ۶۰-۷۰ نانومتر به ترتیب به میزان ۲۷/۹٪ و ۲۵/۳٪ نسبت به سطح پایدار فاقد ساختار متخلخل افزایش می‌دهد.

- اعمال ترکیب استفاده از سطح جوشش پایدار شده با نانوسیالات ۱، ۲ و ۰/۵٪ جرمی و ساختار متخلخل لانه‌زنبوری باعث جابه‌جایی نقطه شروع جوشش هسته‌ای به سمت دماهای مافوق گرم بیشتر شده و مقدار دمای مافوق گرم سطح جوشش پایدار با ساختار متخلخل را نسبت به سطح جوشش پایدار بدون ساختار متخلخل برای نانوذرات ۳۰-۲۰ و ۶۰-۷۰ نانومتر به ترتیب به مقدار ۷/۹٪ و ۱۱/۹٪ افزایش می‌دهد.

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب سطوح پایدار شده با ساختارهای متخلخل می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای ارتقای عملکرد حرارتی و افزایش ایمنی در سیستم‌های انتقال حرارت با شار بالا مورد استفاده قرار گیرد. این رویکرد به‌ویژه در کاربردهایی که استفاده از نانوسیالات با غلظت پایین به‌منظور کاهش رسوب‌گذاری و افزایش طول عمر تجهیزات ضروری است،

همچنین اثر عامل‌هایی نظیر هندسه و میزان تخلخل ساختار متخلخل، اندازه و نوع نانوذرات و شرایط عملیاتی مختلف نیز می‌توانند به‌عنوان اهداف بعدی در تحقیق‌های آینده به شمار آیند.

**تأییدیه اخلاقی:** محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

**تعارض منافع:** هیچ‌گونه تعارض منافع مالی، سازمانی یا شخصی در ارتباط با انجام این پژوهش وجود ندارد.

#### منابع

- [1] J. H. Lienhard, *A heat transfer textbook*, Third. Cambridge MA 02139-4307 U.S.A, 1981.
- [2] H. Saffari and A. Mirza Gheitaighy, *Pool Boiling*. Tehran: Shahed Rajae Teacher Training University, 2016.
- [3] R. L. Webb and N.-H. Kim, *Principles of Enhanced Heat Transfer*, Second. New York: Taylor & Francis Group, 2005.
- [4] S. U. S. Choi and J. A. Eastman, "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles," *ASME Int. Mech. Eng. Congr. Expo. San Franc.*, 1995.
- [5] H. Kim and M. Kim, "Experimental study of the characteristics and mechanism of pool boiling CHF enhancement using nanofluids," *Heat Mass Transf.*, vol. 45, pp. 991-998, 2009, doi: [10.1007/s00231-007-0318-8](https://doi.org/10.1007/s00231-007-0318-8).
- [6] H. Kim, J. Kim, and M. H. Kim, "Effect of nanoparticles on CHF enhancement in pool boiling of nano-fluids," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 49, pp. 5070-5074, 2006, doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.07.019](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.07.019).
- [7] M. N. Golubovic, H. D. Madhawa Hettiarachchi, W. M. Worek, and W. J. Minkowycz, "Nanofluids and critical heat flux, experimental and analytical study," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 29, pp. 1281-1288, 2009, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2008.05.005](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.05.005).
- [8] R. Kathiravan, R. Kumar, A. Gupta, and R. Chandra, "Preparation and pool boiling characteristics of copper nanofluids over a flat plate heater," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 53, pp. 1673-1681, 2010, doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.01.022](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.01.022).
- [9] M. Kole and T. K. Dey, "Investigations on the pool boiling heat transfer and critical heat flux of ZnO-ethylene glycol nanofluids," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 37, pp. 112-119, 2012, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2011.10.066](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.10.066).
- [10] A. Mirza Gheitaighy, H. Saffari, and J. Salehi Shendi, "Poolboiling enhancement by electrodeposited porous micro/nanostructured on copper surface," *Modares Mech. Eng.*, vol. 15, no. 12, pp. 159-167, 2015, doi: [20.1001.1.10275940.1394.15.12.3.1](https://doi.org/20.1001.1.10275940.1394.15.12.3.1).
- [11] S. M. Kwark, R. Kumar, G. Moreno, J. Yoo, and S. M. You, "Pool boiling characteristics of low concentration nanofluids," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol.

از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. علاوه بر این، بهبود هم‌زمان در عامل‌هایی نظیر شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت جوشش، نشان‌دهنده پتانسیل بالای این روش در توسعه سطوح پیشرفته برای مدیریت حرارتی در صنایع مختلف از جمله الکترونیک، نیروگاهی و مبدل‌های حرارتی است. همچنین، مطالعه رفتار بلندمدت این سطوح تحت شرایط کاری واقعی و ارزیابی پایداری آن‌ها در بازه‌های زمانی طولانی می‌تواند به درک عمیق‌تر از قابلیت کاربردی این رویکرد در مقیاس صنعتی منجر گردد.

#### ۴-۱- محدودیت‌ها و پیشنهادهای

با وجود بهبودهای قابل‌توجه مشاهده‌شده در این پژوهش، تعمیم نتایج به شرایط واقعی صنعتی نیازمند دقت و توجه به محدودیت‌های ذاتی آزمایش‌های آزمایشگاهی است. در این پژوهش، آزمایش‌ها با استفاده از نانوسیال  $\text{SiO}_2$ ، مقیاس محدود آزمایشگاهی و تحت چرخه‌های متوالی جوشش - سردشدن در بازه زمانی حدود ۵۰ تا ۶۰ ساعت انجام شده‌اند. هرچند این شرایط امکان کنترل دقیق عوامل مؤثر بر انتقال حرارت را فراهم می‌سازد، اما نمی‌تواند به طور کامل بیانگر پیچیدگی‌های ترمو هیدرولیکی، تغییرات خواص سیال و شرایط عملیاتی متغیر در سامانه‌های صنعتی واقعی باشد.

علاوه بر این، یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در کاربرد بلندمدت ساختارهای متخلخل، پدیده رسوب تدریجی نانوذرات درون شبکه منافذ آن‌ها است که با روش کاهش غلظت نانوسیالات با حفظ مشخصات حرارتی، این احتمال کاهش پیدا می‌کند. اما در حالت کلی، در طول بهره‌برداری و به‌ویژه در چرخه‌های مکرر و طولانی‌مدت جوشش، نانوذرات معلق می‌توانند به‌صورت تدریجی در کانال‌های ریزساختار متخلخل تجمع یابند. این پدیده موجب کاهش تخلخل مؤثر و تغییر در مورفولوژی سطح می‌شود. ضمناً با محدودکردن مسیرهای جریان مایع و تضعیف نیروهای موبینگی، فرایند باز ترشوندگی سطح و تغذیه مجدد نواحی خشک‌شده را نیز مختل می‌کند. در نتیجه، کارایی ساختار متخلخل در دفع حرارت، به‌ویژه در شارهای حرارتی بالا، ممکن است در طول زمان کاهش یابد. این تغییرات می‌توانند مستقیماً بر پارامترهای کلیدی انتقال حرارت، از جمله شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت جوشش، اثر منفی بگذارند و در شرایط بهره‌برداری طولانی‌مدت منجر به افت عملکرد حرارتی شوند.

نتایج این پژوهش نشان‌دهنده پتانسیل بالای استفاده از ساختار متخلخل لانه‌زنبوری بر روی سطوح جوشش پایدار با نانوسیالات کاهش غلظت یافته، در بهبود انتقال حرارت است. بررسی رفتار بلندمدت این ساختارها، به‌ویژه از منظر رسوب‌گذاری، انسداد منافذ و پایداری عملکرد حرارتی، نیازمند مطالعات تجربی گسترده‌تر در شرایط عملیاتی واقعی و در بازه‌های زمانی طولانی‌تر خواهد بود.

- [23] A. Abdollahi, M. R. Salimpour, and N. Etesami, "Experimental analysis of magnetic field effect on the pool boiling heat transfer of a ferrofluid," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 111, pp. 1101–1110, 2017, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2016.10.019](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.019).
- [24] X. Li, X. He, C. Chen, D. Wang, B. Yan, and L. Wang, "Experimental study on CHF enhancement of different oxidized surfaces of low carbon steel in nanofluid," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 211, no. 110923, 2025, doi: [10.1016/j.anucene.2024.110923](https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110923).
- [25] A. Upadhyay, B. Kumar, N. Kumar, and R. Raj, "Simultaneous enhancement of critical heat flux and heat transfer coefficient via in-situ deposition of ionic liquids during pool boiling," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 208, no. 124066, 2023, doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124066](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124066).
- [26] S. Mori, S. M. Aznam, and K. Okuyama, "Enhancement of the critical heat flux in saturated pool boiling of water by nanoparticle-coating and a honeycomb porous plate," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 80, pp. 1–6, 2015, doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.08.046](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.08.046).
- [27] T. Okawa, M. Takamura, and T. Kamiya, "Boiling time effect on CHF enhancement in pool boiling of nanofluids," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 55, pp. 2719–2725, 2012, doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.01.013](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.01.013).
- [28] H. S. J. F. Rajabzadeh Dareh, M. Haghshenasfard, M. Nasr Esfahany, "Experimental investigation of time and repeated cycles in nucleate pool boiling of alumina/water nanofluid on polished and machined surfaces," *Heat Mass Transf.*, 2016, doi: [10.1007/s00231-017-2266-2](https://doi.org/10.1007/s00231-017-2266-2).
- [29] A. Abdollahi, M. R. Salimpour, and N. Etesami, "Experimental analysis of pool boiling heat transfer of ferrofluid on surfaces deposited with nanofluid," *Modares Mech. Eng.*, vol. 16, no. 2, pp. 19–30, 2016, doi: [20.1001.1.10275940.1395.16.2.24.9](https://doi.org/10.1001.1.10275940.1395.16.2.24.9).
- [30] F. Rostamian and N. Etesami, "Pool boiling characteristics of silica/water nanofluid and variation of heater surface roughness in domain of time," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 95, pp. 98–105, 2018, doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.04.003](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.04.003).
- [31] A. Pare and Subrata Kumar Ghosh, "The empirical characteristics on transient nature of Al2O3-water nanofluid pool boiling," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 199, no. 117617, 2021, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2021.117617](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117617).
- [32] S. Sen Sayantan Mukherjee, Naser Ali, Nawaf F. Aljuwayhel, Purna C. Mishra and P. Chaudhuri, "Pool Boiling Amelioration by Aqueous Dispersion of Silica Nanoparticles," *nanomaterials*, vol. 11, no. 2138, 2021, doi: [10.3390/nano11082138](https://doi.org/10.3390/nano11082138).
- [33] J. Du, W. Yang, H. Zhu, J. Wang, Z. Cao, and B. Sund'en, "Experimental study of pool boiling performance of Fe3O4 ferromagnetic nanofluid on a copper surface," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 248, no. 123213, 2024, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2024.123213](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123213).
- [34] J. Z. Mubarak Salisu, Shixue Wang, Yurong Yang, Yu Zhu, Xiaodong Wang, "Effect of thermal spray aluminum oxide coating on the long-term stability of pool boiling heat transfer enhancement," *Appl. Therm. Eng.*, pp. 972–981, 2010, doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.11.018](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.11.018).
- [12] O. Ahmed and M. S. Hamed, "Experimental investigation of the effect of particle deposition on pool boiling," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 55, pp. 3423–3436, 2012, doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.02.021](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.02.021).
- [13] F. Rostamian and N. Etesami, "Pool boiling characteristics of silica/water nanofluid and variation of heater surface roughness in domain of time," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 95, pp. 98–105, 2018, doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.04.003](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.04.003).
- [14] M. G. Heidari, M. Zareh, C. Aghanajafi, and M. B. Shafii, "Effects of successive pool boiling cycles of SiO2 nanofluids on boiling surface stability: Role of concentration-dependent stability and post-stabilization dilution," *Results Eng.*, vol. 30, 2026, doi: [10.1016/j.rineng.2026.109809](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.109809).
- [15] M. Mohebbi and M. Khayat, "Experimental Study of the Effect of Hybrid Nanofluids Deposition on Microchannels with Different Sections in Pool Boiling," *Modares Mech. Eng.*, vol. 19, no. 11, pp. 2653–2666, 2019, doi: [20.1001.1.10275940.1398.19.11.24.8](https://doi.org/10.1001.1.10275940.1398.19.11.24.8).
- [16] S. Mori and K. Okuyama, "Enhancement of the critical heat flux in saturated pool boiling using honeycomb porous media," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 35, pp. 946–951, 2009, doi: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.05.003](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.05.003).
- [17] S. Mori, S. M. Aznam, R. Yanagisawa, and K. Okuyama, "CHF enhancement by honeycomb porous plate in saturated pool boiling of nanofluid," *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 53, no. 7, pp. 1028–1035, 2015, doi: [10.1080/00223131.2015.1087353](https://doi.org/10.1080/00223131.2015.1087353).
- [18] S. M. Aznam, S. Mori, F. Sakakibara, and K. Okuyama, "Effects of heater orientation on critical heat flux for nanoparticle deposited surface with honeycomb porous plate attachment in saturated pool boiling of water," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 102, pp. 1345–1355, 2016, doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.004](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.004).
- [19] S. M. Aznam, S. Mori, A. Ogoshi, and K. Okuyama, "CHF enhancement of a large heated surface by a honeycomb porous plate and a gridded metal structure in a saturated pool boiling of nanofluid," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 115, pp. 969–980, 2017, doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.07.089](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.07.089).
- [20] F. Yokomatsu, W. Fogaça, S. Mori, and M. Tanaka, "On the quenching of stainless steel rods with a honeycomb porous plate on a nanoparticle deposited surface in saturated water," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 127, pp. 507–514, 2018, doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.009](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.009).
- [21] H. Alimoradi, M. Shams, and N. Ashgriz, "Enhancement in the pool boiling heat transfer of copper surface by applying electrophoretic deposited graphene oxide coatings," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 159, no. 104350, 2023, doi: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2022.104350](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2022.104350).
- [22] B. Shil, D. Sen, A. K. Das, P. Sen, S. Kalita, and S. Das, "Enhancement in pool boiling performance of GNP/Cu-Al2O3 nano-composite coated copper microporous surface," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 43, no. 101965, 2023, doi: [10.1016/j.tsep.2023.101965](https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101965).

- Eng.*, vol. 274, no. 126759, 2025, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2025.126759](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126759).
- [35] A. Ghadimi, R. Saidur, and H. S. C. Metselaar, "A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 17–18, no. 54, pp. 4051–4068, 2011, doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.014](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.014).
- [36] J. Shah, M. Ranjan, V. Davariya, and S. K. Gupta, "Temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of synthesized  $\alpha$ -alumina nanofluids," *Appl. Nanosci.*, vol. 7, pp. 803–813, 2017, doi: [10.1007/s13204-017-0594-7](https://doi.org/10.1007/s13204-017-0594-7).
- [37] W. M. Rohsenow, "A method of correlating heat transfer data for surface boiling of liquids," Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 1951.
- [38] W. Fogaça, S. Mori, K. Imanishi, K. Okuyama, and J. R. C. Piqueira, "Effect of honeycomb porous plate on critical heat flux in saturated pool boiling of artificial seawater," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 125, pp. 994–1002, 2018, doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.101](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.101).
- [39] N. Zuber, "On the stability of boiling heat transfer," *Heat Transf.*, vol. 80C, p. 711, 1958.
- [40] Y. Haramura and Y. Katto, "A new hydrodynamic model of critical heat flux, applicable widely to both pool and forced convection boiling on submerged bodies saturated liquids," *Int J Heat Mass Transf.*, vol. 26, no. 3, pp. 389–399, 1983.
- [41] A. B. L. J.G. Hust, "Thermal Conductivity of Aluminum, Copper, Iron, and Tungsten for Temperatures from 1 K to the Melting Point," *Mater. Sci. Phys.*, 1984, doi: [10.6028/NBS.IR.84-3007](https://doi.org/10.6028/NBS.IR.84-3007).
- [42] S. J. Kline and F. A. McClintock and F. A. McClintock, "Describing uncertainties in single-sample experiments," *ASME*, vol. 75, pp. 3–8, 1953.
- [43] J. G. Collier and J. R. Thome, *Convective Boiling and condensation*, Third Edition. Clarendon Press, Oxford, 1994.