



بررسی تجربی اثر ترکیب استفاده از سطوح جوشش پایدار و ساختار متخلخل بر مشخصه‌های انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیالات

محمد قربانی^۱، مسعود زارع^{۱*}، سیروس آقاجفی^۲، محمد بهشاد شفیعی^۳

۱- گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۳- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

دریافت: ۱۴۰۴/۹/۲۴، بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۱۲، پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۹

چکیده

افزایش عملکرد انتقال حرارت در جوشش استخری نقش مهمی در بهبود کارایی و ایمنی سیستم‌ها با شار حرارتی بالا دارد. در سال‌های اخیر، نانوسیالات و سطوح مهندسی شده به‌عنوان دو روش مؤثر برای ارتقای انتقال حرارت جوشش موردتوجه قرار گرفته‌اند. با این حال، اثر استفاده از ساختار متخلخل بر روی سطوحی که در اثر رسوب نانوذرات طی چرخه‌های متوالی جوشش - سرد شدن به حالت پایدار رسیده‌اند، تاکنون گزارش نشده است. در این پژوهش، اعتبار سنجی دستگاه آزمایش با استفاده از رابطه روزنو و همچنین مقایسه شار حرارتی بحرانی با روابط زوبر و حرامورا انجام شد که برای شار حرارتی بحرانی به ترتیب اختلافی در حدود ۱۳٪ و ۲۷٪ محاسبه شد. سپس سطح جوشش توسط نانوسیال SiO_2 با دو اندازه نانوذره ۳۰-۲۰ و ۷۰-۶۰ نانومتر طی چرخه‌های طولانی مدت جوشش - سرد شدن پایدار سازی شد و اثر نصب ساختار متخلخل لانه زنبوری بر روی این سطح بررسی گردید. نتایج نشان داد که اتصال ساختار متخلخل به سطح پایدار شده، شار حرارتی بحرانی را به ترتیب حدود ۳۴٪ و ۳۸٪ نسبت به سطح پایدار بدون ساختار متخلخل افزایش می‌دهد. همچنین ضریب انتقال حرارت جوشش حدود ۲۰٪ بهبود یافت. این بهبود به افزایش تعداد سایت‌های هسته‌زایی فعال، تقویت تغذیه موئینگی مایع و تسهیل خروج بخار در ساختار متخلخل نسبت داده می‌شود.

کلمات کلیدی: جوشش استخری، سطح جوشش پایدار، ساختار متخلخل لانه زنبوری، شار حرارتی بحرانی، نانوسیال

*عهده‌دار مکاتبات: masoud_zareh@iau.ac.ir

نحوه استناد به این مقاله محمد قربانی، مسعود زارع، سیروس آقاجفی، محمد بهشاد شفیعی. بررسی تجربی اثر ترکیب استفاده از سطوح جوشش پایدار و ساختار متخلخل بر مشخصه‌های انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیالات. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۴؛ ۱۲ (۴): ۶۷-۸۶.

۱- مقدمه

جوشش به عنوان یکی از کارآمدترین مکانیزم‌های انتقال حرارت، نقش مهمی در بسیاری از سیستم‌های حرارتی و انرژی ایفا می‌کند. این فرایند به دلیل توانایی بالا در انتقال مقادیر قابل توجهی از انرژی حرارتی، در طیف گسترده‌ای از فعالیت‌های ساده روزمره مانند پخت‌وپز گرفته تا سامانه‌های مهندسی پیچیده نظیر سیستم‌های تهویه مطبوع و تبرید، نیروگاه‌های حرارتی، مبدل‌های حرارتی، فرایندهای شیمیایی و همچنین سامانه‌های خنک‌کاری تجهیزات الکترونیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بهبود عملکرد انتقال حرارت در چنین سیستم‌هایی می‌تواند منجر به افزایش بازده انرژی، کاهش ابعاد و وزن تجهیزات، افزایش قابلیت اطمینان سیستم و ارتقای ایمنی عملکردی آن‌ها شود. با وجود این مزایا، عملکرد سیستم‌های مبتنی بر جوشش همواره با محدودیت‌هایی مواجه هستند که یکی از مهم‌ترین آن‌ها بروز ناپایداری‌های حرارتی و افزایش شدید دما در نزدیکی شار حرارتی بحرانی است که می‌تواند عملکرد حرارتی سیستم را به طور قابل توجهی محدود کند. جوشش استخری یکی از حالت‌های متداول جوشش است که در آن یک سطح گرم درون حجم نسبتاً بزرگی از سیال ساکن غوطه‌ور می‌شود. اگرچه سیال در ابتدای فرایند در حالت سکون قرار دارد، اما با افزایش دمای سطح و تشکیل حباب‌های بخار، حرکت حباب‌ها و ایجاد گرادیان‌های دمایی در سیال موجب شکل‌گیری جریان‌های جابه‌جایی طبیعی در اطراف سطح گرم می‌شود [۱،۲]. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های گسترده‌ای به منظور بهبود عملکرد انتقال حرارت در جوشش استخری انجام شده است. به طور کلی روش‌های بهبود انتقال حرارت در جوشش را می‌توان در سه گروه اصلی شامل روش‌های فعال، روش‌های غیرفعال و روش‌های ترکیبی دسته‌بندی کرد [۳]. از میان عوامل مختلفی که بر عملکرد جوشش استخری تأثیر می‌گذارند، نوع سیال عامل یکی از پارامترهای کلیدی محسوب می‌شود. در ابتدا آب مقطر به عنوان متداول‌ترین سیال مورد استفاده قرار می‌گرفت، اما با هدف دستیابی به عملکرد حرارتی بهتر، استفاده از سیالات جایگزین نظیر مبردها، اتانول، اتیلن گلیکول و به ویژه نانوسیالات مورد توجه قرار گرفته است. معرفی نانوسیالات به عنوان نسل جدیدی از سیالات انتقال حرارت نخستین بار توسط چوی و همکاران [۴] در سال ۱۹۹۵ مطرح شد. از آن زمان تاکنون، این سیالات به دلیل پتانسیل قابل توجه در بهبود فرایندهای انتقال حرارت توجه گسترده‌ای را در تحقیقات علمی به خود جلب کرده‌اند.

رجب‌زاده و همکاران [۵] تأثیر رسوب نانوذرات را در سیکل‌های ۱۵ دقیقه‌ای جوشش در نانوسیال Al_2O_3 بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که بعد از سیکل‌های مکرر ۱۵ دقیقه‌ای شار حرارتی بحرانی ۵۰٪ افزایش و ضریب انتقال حرارت ۱۳٪ کاهش می‌یابد. موری و همکاران [۶] برای نخستین بار از مونولیت‌های سرامیکی مورد استفاده در کاتالیست خروجی دود وسایل نقلیه به عنوان ساختار متخلخل لانه زنبوری استفاده کردند و نشان دادند که شار حرارتی بحرانی در جوشش استخری آب اشباع خالص روی این سطح تقریباً دو برابر سطح جوشش صاف با قطر ۳۰ mm است. آزنام و همکاران [۷] با مقایسه سطوح جوشش مختلف شامل سطح ساده، سطح متخلخل لانه زنبوری، سطح دارای رسوب نانوذرات و سطح ترکیبی نشان دادند که استفاده هم‌زمان از صفحه متخلخل لانه زنبوری و لایه رسوبی نانوذرات بیش‌ترین بهبود در دفع حرارت را ایجاد می‌کند، به طوری که صفحه متخلخل با تأمین جریان سیال به سطح گرم از طریق پدیده موینگی و رسوب نانوذرات با افزایش ترشوندگی سطح، موجب افزایش قابل توجه شار حرارتی بحرانی می‌شود. خان و همکاران [۸] در یک مقاله مروری گزارش کردند که استفاده از نانوسیالات می‌تواند هدایت حرارتی را تا ۴۰٪ و ضریب انتقال حرارت را تا ۵۰٪ افزایش دهد. همچنین ترکیب نانوسیالات با محیط‌های متخلخل به عنوان رویکردی مؤثر برای بهبود عملکرد سامانه‌های حرارتی معرفی شده است. حیدری و همکاران [۹] تأثیر پایداری سطح جوشش را بر مشخصه‌های انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیال SiO_2 تحت جوشش‌های مکرر و طولانی مدت (۵۰-۶۰ ساعته) مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که سطح جوشش در غلظت ۲٪ جرمی تحت جوشش‌های مکرر و طولانی مدت به پایداری فیزیکی و حرارتی می‌رسد و بعد از پایدار شدن سطح جوشش، تغییری در شار حرارتی بحرانی و مشخصه‌های انتقال حرارت آن ایجاد نمی‌شود. از سوی دیگر، ترکیب سطوح مهندسی شده با نانوسیالات می‌تواند اثرات هم‌افزایی قابل توجهی در بهبود انتقال حرارت جوششی ایجاد کند. سطوح متخلخل لانه زنبوری و ساختارهای متخلخل پوشش داده شده با نانوذرات، به دلیل ایجاد مسیرهای مؤثر موینگی، افزایش تأمین مایع و توزیع یکنواخت‌تر سیال روی سطح داغ، از روش‌های مؤثر برای بهبود انتقال حرارت جوشش محسوب می‌شوند. در این سطوح، افزایش نیروی موینگی و بهبود باز ترشوندگی نواحی خشک شده از مهم‌ترین مکانیزم‌های مؤثر در افزایش عملکرد حرارتی به شمار می‌روند. در سال‌های اخیر،

روش‌های نوینی نظیر استفاده از پوشش‌های مبتنی بر اکسیدگرافن [۱۰] و لایه‌های نانوکامپوزیتی [۱۱] به‌عنوان راه‌کارهای مؤثر برای افزایش انتقال حرارت جوشش گزارش شده است. علاوه بر اصلاح خواص سطحی، عامل‌های خارجی نظیر اعمال میدان‌های مغناطیسی [۱۲]، اکسیداسیون کنترل شده سطح [۱۳] و استفاده از افزودنی‌های مایع یونی [۱۴] نیز به‌عنوان عوامل مؤثر بر رفتار جوشش موردتوجه قرار گرفته‌اند. خلاصه‌ای از مهم‌ترین مطالعات انجام شده در این زمینه به‌منظور مقایسه نتایج و شناسایی خلأهای پژوهشی در جدول (۱) ارائه شده است.

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که استفاده از نانوسیالات و رسوب نانوذرات بر روی سطح جوشش یکی از مکانیزم‌های مهم در تغییر رفتار جوشش استخری و بهبود شار حرارتی بحرانی است. باین‌حال، عملکرد حرارتی این سطوح تنها به لایه رسوبی محدود نشده و ویژگی‌های هندسی و ساختاری سطح نیز می‌توانند نقش مهمی در تقویت یا تضعیف انتقال حرارت داشته باشند. در این میان، سطوح مهندسی شده به‌ویژه ساختارهای متخلخل به‌دلیل افزایش مکان‌های هسته‌زایی، بهبود ترشوندگی و تسهیل بازگشت مایع به نواحی تبخیر، به‌عنوان یکی از رویکردهای مؤثر برای ارتقای عملکرد جوشش موردتوجه قرار گرفته است. اگرچه برخی مطالعات [۷، ۲۵] اثر ترکیب ساختارهای متخلخل و نانوسیالات را بر عملکرد جوشش بررسی کرده‌اند، در این پژوهش‌ها تشکیل لایه رسوبی نانوذرات بر روی سطح جوشش در شرایط پایدار و تحت چرخه‌های طولانی‌مدت و مکرر جوشش موردتوجه قرار نگرفته است. این در حالی است که در بسیاری از کاربردهای صنعتی، سطوح انتقال حرارت به‌طور مداوم در معرض چرخه‌های متوالی جوشش - سرد شدن قرار دارند و رسوب تدریجی نانوذرات می‌تواند منجر به تغییرات تدریجی در ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی سطح شود. در چنین شرایطی، پایداری فیزیکی و حرارتی سطح در طول زمان نقش مهمی در عملکرد انتقال حرارت ایفا می‌کند، زیرا تغییرات تدریجی در ویژگی‌های سطح می‌تواند موجب افزایش دمای مافوق گرم و در نهایت بروز آسیب‌های حرارتی در سیستم‌های انتقال حرارت شود. از این‌رو، در پژوهش حاضر ابتدا فرایند پایداری‌سازی سطح جوشش در اثر رسوب نانوذرات SiO_2 با دو اندازه مختلف نانوذرات و تحت چرخه‌های متوالی و طولانی‌مدت جوشش - سرد شدن مورد بررسی قرار گرفت و پس از دستیابی به سطح پایدار، اثر نصب یک ساختار متخلخل لانه‌زنبوری بر روی این سطح از نظر تغییرات منحنی جوشش هسته‌ای و مشخصه‌های انتقال حرارت به‌صورت تجربی ارزیابی شد. هدف اصلی این تحقیق بررسی اثر ترکیبی سطح جوشش پایدار ناشی از رسوب نانوذرات و استفاده از ساختار متخلخل لانه‌زنبوری بر عملکرد انتقال حرارت در جوشش استخری نانوسیال SiO_2 در گستره وسیعی از شارهای حرارتی به‌عنوان رویکردی نوین برای ارتقای عملکرد انتقال حرارت است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- دستگاه آزمایش

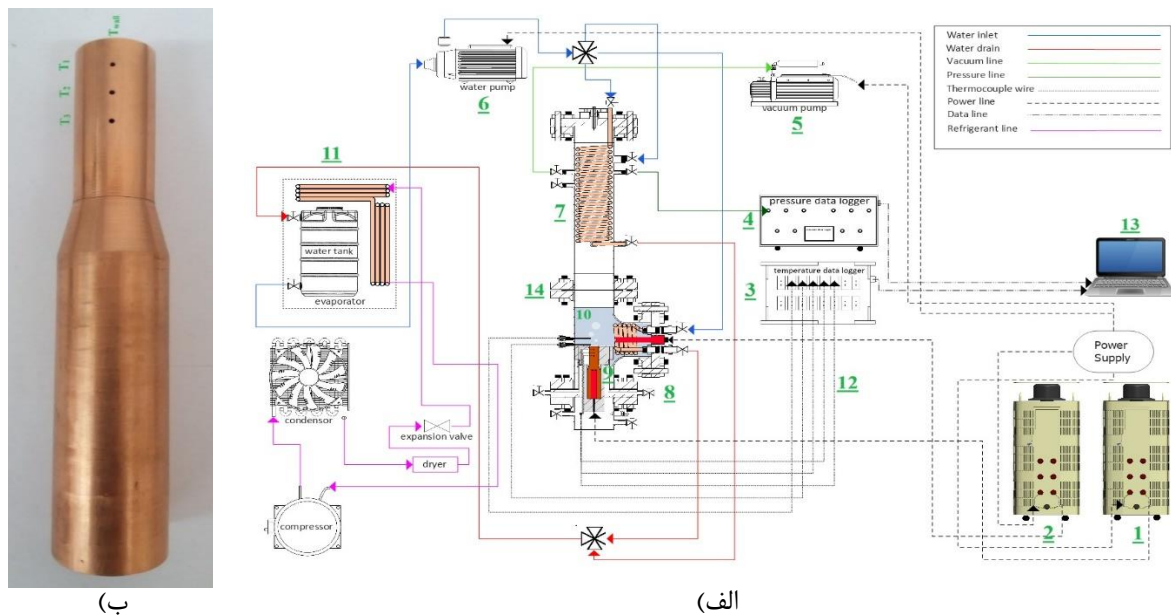
شمای کلی دستگاه آزمایشگاهی مورد استفاده برای انجام آزمایش‌های جوشش استخری در شکل ۱- الف) ارائه شده است. این دستگاه از اجزای متعددی شامل محفظه جوشش، کندانسور مسی مارپیچ دوسمیره، بخش آزمون شامل بلوک مسی استوانه‌ای، پمپ خلأ، دو عدد واریاک AC، دو عدد گرمکن فشنگی با توان ۱۰۰۰ وات، دیتالاگرهای دما و فشار، چیلر و منبع تغذیه مجهز به نور آبی تشکیل شده است. محفظه جوشش از جنس استیل نوع ۳۰۴ با ارتفاع ۲۰۰ mm و قطر داخلی ۱۰۱/۶ mm ساخته شده و به دو پنجره رویت برای مشاهده فرایند جوشش مجهز است. دمای سیال عامل توسط دو ترموکوپل میله‌ای نصب شده در داخل محفظه جوشش اندازه‌گیری می‌شود. تمامی ترموکوپل‌های مورد استفاده از نوع K بوده و قابلیت اندازه‌گیری دما در بازه ۲۰۰- تا ۱۳۵۰ °C را دارند. سیال عامل ابتدا توسط یک پیش گرمکن ۱۰۰۰ W متصل به واریاک AC تا دمای اشباع گرم شده و سپس آزمایش‌ها با اعمال شار حرارتی از طریق گرمکن اصلی تعبیه شده در بلوک مسی و متصل به یک واریاک AC دیگر انجام می‌گیرد. کندانسور مسی مارپیچی دوسمیره درون یک محفظه عمودی از جنس استیل با قطر داخلی ۱۰۱/۶ mm و ارتفاع ۵۵۰ mm قرار دارد که به‌وسیله فلنج به محفظه جوشش متصل شده تا بخار تولید شده را تقطیر کرده و به محفظه باز گرداند. فشار داخلی محفظه جوشش توسط حسگر فشار ساخت شرکت هانیول^۱ اندازه‌گیری شده و از طریق تنظیم

¹ Honeywell

جدول ۱: خلاصه مطالعات پیشین در زمینه جوشش استخری با تأکید بر نوع و تکامل سطح، پایداری سطح جوشش و استفاده از سطوح متخلخل

نویسنده	سیال کاری	اندازه نانوذرات	غلظت	نتایج	نوع سطح / پایداری سطح جوشش / سیکل‌های مکرر جوشش (تکامل سطح جوشش) / زمان جوشش / استفاده از سطح متخلخل / لانه‌زنبوری
پاره و همکاران [۱۵] (۲۰۲۱)،	Al_2O_3	۲۰-۳۰ nm	۰/۱-۰/۱ درصد وزنی	کاهش انتقال حرارت تا ۹۰٪	رسوب نانوذرات روی سطح / جوشش طولانی ۱۲ ساعته
موخرجی و همکاران [۱۶] (۲۰۲۱)،	SiO_2	۱۰،۵۵-۲۵،۲۵ nm	۰/۱-۰/۰۰۱ درصد حجمی	۱۳۳٪ افزایش شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت جوشش	رسوب نانوذرات روی سطح
ملاکار و همکاران [۱۷] (۲۰۲۳)،	HFE-7100	----	----	افزایش زیری سطح از ۰،۴۸ تا ۷،۵۶ میکرومتر موجب افزایش ضریب انتقال حرارت تا ۱۵۰٪ و کاهش شار حرارتی بحرانی تا ۱۴٪	سطح مسی با زیری کنترل‌شده و حفره‌های مصنوعی
دو و همکاران [۱۸] (۲۰۲۴)،	Fe_3O_4	----	۰/۰۰۱ درصد حجمی	۵۲،۴٪ افزایش شار حرارتی بحرانی، ۵۶،۲٪ افزایش ضریب انتقال حرارت جوشش	رسوب نانوذرات روی سطح
فالستی و همکاران [۱۹] (۲۰۲۴)،	Novec 649	----	----	افزایش ضریب انتقال حرارت تا ۱۰ برابر و شار حرارتی بحرانی تا ۲/۸ برابر نسبت به سطح صاف	سطح مسی دارای پین‌های مربعی
کانو و همکاران [۲۰] (۲۰۲۴)،	آب مقطر	----	----	۵۰٪ افزایش در شار حرارتی بحرانی	صفحه متخلخل شبکه‌ای
سالیسو و همکاران [۲۱] (۲۰۲۵)،	Al_2O_3 (sprayed)	۱۵-۴۵ μm	اسپری کردن نانوذرات ذوب شده	۵۴٪/۱۶ افزایش شار حرارتی بحرانی، ۲۵٪/۷ کاهش ضریب انتقال حرارت جوشش	رسوب نانوذرات روی سطح / جوشش طولانی مدت (۶۰ ساعت) در شار حرارتی ثابت
وو و همکاران [۲۲] (۲۰۲۵)،	AE-3000	----	----	۴/۷ برابر افزایش در ضریب انتقال حرارت جوشش، کاهش در دمای شروع جوشش هسته‌ای	استفاده از سطح متخلخل لانه‌زنبوری
هایاشیدا و همکاران [۲۳] (۲۰۲۶)،	آب دی‌نیزه	----	----	۴/۴ برابر افزایش در شار حرارتی بحرانی، افزایش ضریب انتقال حرارت	استفاده از سطح متخلخل مسی
الفایلاکای و همکاران [۲۴] (۲۰۲۶)،	Diamond، MWCNT، GNP	----	۰/۰۱، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۵ جرمی	نانو دایموند بهترین عملکرد را نشان داد و زمان خنک‌سازی تا ۴۲٪ کاهش پیدا کرد.	سطح فولاد ضدزنگ
حیدری و همکاران [۹] (۲۰۲۶)،	SiO_2	۳۰-۲۰، ۷۰-۶۰ nm	۰/۲-۰/۱ درصد جرمی	افزایش شار حرارتی بحرانی با ایجاد سطح جوشش پایدار به میزان ۱۸٪ (۳۰-۲۰) و ۱۳٪ (۷۰-۶۰) / افزایش ضریب انتقال حرارت با غلظت و سایز نانوذرات	رسوب نانوسیال روی سطح / استفاده از سطح جوشش پایدار / سیکل‌های مکرر جوشش / جوشش طولانی مدت (۶۰-۵۰ ساعت) / اما از سطح متخلخل استفاده نشده

دبی آب خنک کننده عبوری از کندانسور و یک شیر تخلیه متصل به فشار اتمسفری کنترل می شود. کلیه داده های آزمایشگاهی شامل دما و فشار به صورت پیوسته توسط دیتالاگرها ثبت شده و در یک رایانه ذخیره و پردازش می شوند.



شکل ۱: الف) شماتیک دستگاه آزمایش. (۲) واریاک، (۳) دیتالاگر دما، (۴) دیتالاگر فشار، (۵) پمپ خلأ، (۶) پمپ آب خنک ساز، (۷) کندانسور، (۸) بلوک تفلون، (۹) بلوک مسی، (۱۰) سیال کاری، (۱۱) مجموعه چیلر، (۱۲) ترموکوپل ها، (۱۳) رایانه، (۱۴) محفظه جوشش، ب) تصویر بلوک مسی

۲-۲- بخش آزمون

شکل ۱- ب) بلوک مسی مورد استفاده در بخش آزمون را نشان می دهد. این بلوک از مس با خلوص بیش از ۹۹٪ ساخته شده و دارای طول ۱۶۰ mm و قطر سطح جوشش ۲۵/۴ mm است. برای اندازه گیری توزیع دما در بلوک مسی، سه ترموکوپل نوع K در سوراخ هایی با قطر ۱/۶ mm و عمق ۱۲/۷ mm که به صورت عمودی نسبت به محور مرکزی بلوک مسی ایجاد شده اند، نصب شده اند. نخستین ترموکوپل در فاصله ۱۰ mm از سطح جوشش قرار داشته و فاصله بین ترموکوپل های متوالی نیز برابر با ۱۰ mm در نظر گرفته شده است. به منظور اطمینان از انتقال حرارت مناسب و کاهش مقاومت حرارتی تماسی میان بلوک مسی و ترموکوپل ها، سوراخ های ترموکوپل ها با گریس حرارتی (دارای رسانایی حرارتی بیشتر از $1/2 \text{ (W/(m.k))}$) پر شده اند. همچنین یک سوراخ عمودی در بخش زیرین بلوک مسی برای قرارگیری هیتر فشنگی با قطر ۱۶ mm و طول ۱۰۰ mm در آن تعبیه شده است که شار حرارتی مورد نیاز سطح جوشش را تأمین می کند. دمای سطح جوشش و شار حرارتی بر اساس دماهای حالت پایدار اندازه گیری شده توسط ترموکوپل های T_1 تا T_3 محاسبه شده اند. در این محاسبات، توزیع دما در بلوک مسی خطی فرض شده و شار حرارتی سطح با استفاده از فرم یک بعدی قانون فوریه مطابق معادله (۱) محاسبه می شود.

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

در این رابطه، q''_{Exp} شار حرارتی، K_{cu} ضریب هدایت حرارتی مس و dT/dz گرادیان دما هستند.

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

گرادیان دما با استفاده از روش بسط تیلور پسرو، مطابق با رابطه (۲)، تقریب زده شده است. در این محاسبات، متغیر X_2 فاصله بین نقاط T_1 و T_2 را نشان می دهد. سپس دمای سطح جوشش T_{wall} از رابطه (۳) محاسبه می شود که در آن X_1 فاصله بین

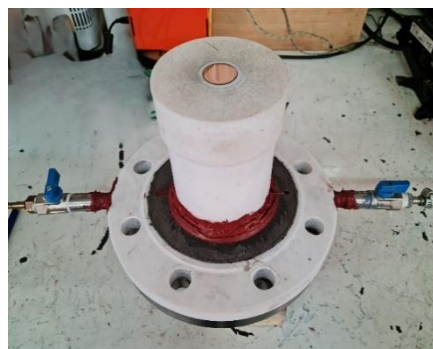
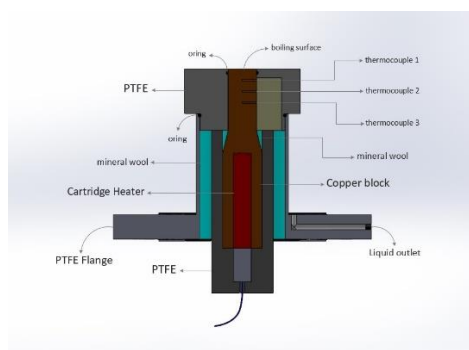
نقطه T_1 و سطح جوشش است. ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای با استفاده از قانون سرمایش نیوتن و مطابق با روابط (۴) و (۵) محاسبه شده است که در آن ΔT بیانگر دمای مافوق گرم سطح جوشش است.

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

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

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

شکل ۲، بلوک تفلن^۲ و اجزای اصلی آن را نشان می‌دهد. این مجموعه به‌طور کلی 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 به راحتی قابل جداسازی باشد تا فرایند نصب، تنظیم و نگهداری تجهیزات اندازه‌گیری تسهیل گردد. بخش سوم شامل یک لوله تفلونی استوانه‌ای است که پیرامون کارتریج مسی قرار گرفته و آن را احاطه می‌کند. به منظور 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 $0.04 \text{ W/(m} \cdot \text{C)}$ بوده و تا دمای 750°C مقاومت حرارتی دارد. این آرایش عایق کاری باهدف کاهش تلفات حرارتی جانبی و هدایت عمده شار حرارتی در راستای محوری بلوک مسی به سمت سطح جوشش طراحی شده است.



شکل ۲: تصویر بلوک تفلنی و جزئیات آن

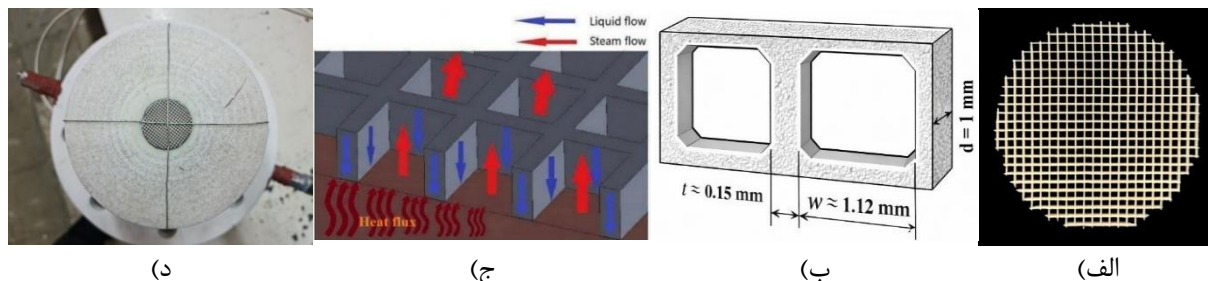
۳-۲- ساختار متخلخل لانه‌زنبوری

سطوح متخلخل لانه‌زنبوری که به صورت مونولیت‌های سرامیکی ساخته می‌شوند، به طور گسترده در تجهیزات صنعتی، به‌ویژه در خروجی لوله‌آگروز خودروها و تجهیزات احتراقی، مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مونولیت‌ها دارای آرایشی منظم از کانال‌های موازی با مقطع مربعی یا چندضلعی هستند که ساختاری شبیه به لانه زنبور ایجاد می‌کنند. چنین ساختاری با ایجاد تخلخل باز بالا، سطح ویژه بسیار زیاد و افت فشار کم در مقایسه با بسترهای متخلخل نامنظم، امکان برهم‌کنش مؤثر سیال با سطح جامد را فراهم می‌کند. در مطالعه تجربی حاضر از سطح متخلخل لانه‌زنبوری سرامیکی (شکل ۳-الف) با مشخصات هندسی مطابق با شکل ۳-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 دیدگاه انتقال حرارت، این ساختار متخلخل دارای چند مزیت کلیدی است. اولاً، شبکه منظم کانال‌ها موجب توزیع یکنواخت سیال و کاهش نواحی مرده می‌شود. ثانیاً، زبری ذاتی سطح داخلی کانال‌ها و وجود میکرو تخلخل‌ها بر روی دیواره‌های سرامیکی، تعداد زیادی مکان فعال برای جوانه‌زنی بخار^۳ ایجاد می‌کند. کانال‌های منظم و تخلخل باز این ساختار، امکان تغذیه مداوم مایع به سطح داغ از طریق مکانیزم‌های موئینگی را فراهم کرده و با بهبود باز ترشوندگی سطح، تأخیر در

² Poly tetra fluoro ethylene (PTFE)

³ Nucleation site

گسترش نواحی خشک موجب افزایش شار حرارتی بحرانی می‌شوند. علاوه بر این، سرامیک‌های مورد استفاده در مونولیت‌های لانه‌زنبوری دارای پایداری حرارتی و شیمیایی بالا هستند و قادرند چرخه‌های مکرر جوشش را بدون تخریب ساختاری تحمل کنند. (شکل ۳-ج) تصویری شماتیک از مکانیزم جریان سیال و بخار را در این ساختار نشان می‌دهد. در این پژوهش به منظور اطمینان از عدم وجود مقاومت حرارتی، سطح متخلخل لانه‌زنبوری بدون هیچ‌گونه چسب یا گریسی و مطابق شکل ۳-د) با اتصال فشاری توسط سیم‌های استیل به سطح جوشش متصل می‌گردد.



شکل ۳: الف) سطح متخلخل لانه‌زنبوری ب) ابعاد سطح متخلخل لانه‌زنبوری، ج) تصویر شماتیک از سطح متخلخل لانه‌زنبوری و مسیرهای ورود و خروج سیال و بخار، د) روش نصب سطح متخلخل لانه‌زنبوری بر روی سطح جوشش

۳-۲- آماده‌سازی نانوسیال

نانوسیالات مورد استفاده در این پژوهش با بهره‌گیری از روش سنتز دومرحله‌ای تهیه شده است. مشخصات فیزیکی اصلی نانوذرات مورد استفاده به همراه تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری^۴ آن در جدول ۲ ارائه شده است. در فرایند تهیه نانوسیال، ابتدا مقدار مورد نیاز از نانوذرات با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت 0.0001 gr اندازه‌گیری می‌شود. سپس نانوذرات با آب دیونیزه مخلوط شده و به مدت چهار ساعت تحت هم‌زن مغناطیسی قرار می‌گیرند. در ادامه، به منظور بهبود پراکندگی ذرات و افزایش پایداری سوسپانسیون، نانوسیال تهیه شده به مدت چهار ساعت در حمام اولتراسونیک^۵ با فرکانس 40 kHz و توان W 650 ، در 90% توان نامی قرار می‌گیرد. نانوسیالات حاصل در غلظت جرمی 2% تهیه شدند. باتوجه به ماهیت ذاتاً آب‌دوست نانوذرات سیلیس، پس از اعمال ترکیبی نیروهای مکانیکی و امواج اولتراسونیک، این ذرات پراکندگی یکنواخت و مطلوبی در آب دیونیزه از خود نشان می‌دهند. در نتیجه، نانوسیالات تهیه شده بدون نیاز به افزودن هرگونه سورفکتانت از پایداری قابل‌قبولی برخوردار هستند. معادلات (۶) و (۷) جرم نانوذرات مورد نیاز برای تهیه نانوسیال را تعیین می‌کنند.

$$\phi_{np} = \frac{M_{SiO_2}}{M_{SiO_2} + M_{water}} * 100 \quad (6)$$

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

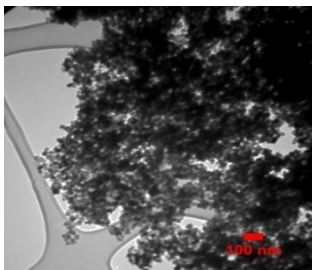
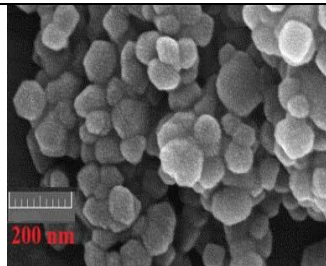
در اینجا، ϕ_{np} نشان‌دهنده درصد غلظت جرمی SiO_2 ، M_{np} جرم نانوذرات، ρ_{np} چگالی نانوذرات و V_{np} حجم نانوذرات است. یکی از پارامترهای کلیدی در کاربرد نانوسیالات، دستیابی به پایداری مناسب در گذر زمان است. نانوسیال پایدار به سیالی اطلاق می‌شود که در آن توزیع نانوذرات در سیال پایه به صورت یکنواخت حفظ شده و ته‌نشینی یا تجمع قابل توجهی رخ ندهد. از این رو، بررسی پایداری نانوسیالات سنتز شده پیش از انجام آزمایش‌های تجربی امری ضروری محسوب می‌شود. در پژوهش حاضر، پایداری نانوسیالات با استفاده از دو روش مستقل مورد بررسی قرار گرفت. روش نخست، مبتنی بر مشاهده رفتاری نانوسیال در طول زمان و بررسی احتمال ته‌نشینی ذرات بود. درحالی‌که روش دوم بر اندازه‌گیری پتانسیل زتا^۶ استوار است.

⁴ Transmission electron microscopy (TEM)

⁵ Ultrasonic bath tank (FUNGILAB S.A., Spain)

⁶ Zeta potential (Stabino Particle Charge Mapping (Particle Metrix, Germany))

جدول ۲: مشخصات فیزیکی و تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نانوذره مورد استفاده در آزمایش

SiO ₂ (amorphous)		
سایز نانوذرات (nm)	۳۰-۲۰	۶۰-۷۰
خلوص	> ۹۹٪	> ۹۸٪
چگالی (kg/m ³)	۲۴۰۰	۲۴۰۰
رنگ	سفید	سفید
سازنده	US Research Nanomaterials	US Research Nanomaterials
تصویر TEM نانوذرات		

در روش ارزیابی مشاهده‌ای، نمونه‌های نانوسیال با غلظت ۲٪ جرمی تهیه شده و به مدت دو هفته در دمای اتاق نگهداری شدند. در طول این مدت، نمونه‌ها به صورت دوره‌ای و منظم از نظر احتمال تشکیل رسوب نانوذرات، مورد بررسی بصری قرار گرفتند. مطابق شکل ۴)، در هیچ‌یک از نمونه‌ها رسوب قابل توجهی مشاهده نشد. در روش دوم، پایداری نانوسیال از طریق اندازه‌گیری پتانسیل زتا ارزیابی شد. براساس گزارش‌های موجود در منابع، نانوسیالاتی با مقدار پتانسیل زتای بیش از $45 \pm \text{mV}$ به عنوان نانوسیالات با پایداری بالا در نظر گرفته می‌شوند، درحالی‌که مقادیر در بازه $30 \pm \text{mV}$ تا $40 \pm \text{mV}$ نشان‌دهنده پایداری متوسط هستند [۲۶]، [۲۷]. مقادیر پتانسیل زتای اندازه‌گیری شده در فواصل زمانی ۷، ۱۴ و ۲۱ روز پس از تهیه نانوسیال به ترتیب برابر با $43/8$ ، $-39/8$ و $-37/6 \text{ mV}$ به دست آمده است. نتایج حاصل از هر دو روش نشان می‌دهند که نانوسیالات سیلیس تهیه شده از پایداری بسیار مناسبی در طول دوره انجام آزمایش‌ها برخوردار بوده‌اند. افزون بر این، آزمایش‌های جوشش استخری بلافاصله پس از تهیه نانوسیالات انجام شدند تا از هر گونه تغییر احتمالی در خواص سوپانسیون جلوگیری شود.

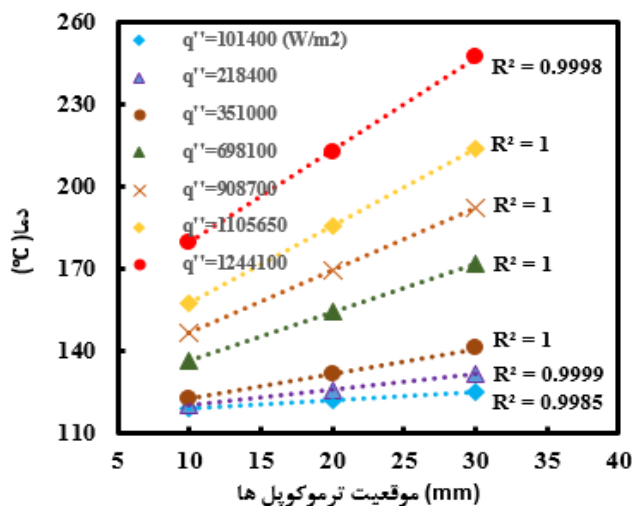
۲-۴- نحوه انجام آزمایش:

در بسیاری از کاربردهای صنعتی، سامانه‌های جوشش به طور دوره‌ای از مدار خارج شده و پس از توقف، سطح جوشش به طور طبیعی تا دمای محیط سرد می‌شود. تکرار این چرخه‌های جوشش - سرد شدن می‌تواند منجر به تغییر ویژگی‌های سطح و ایجاد الگوهای متفاوت رسوب گذاری گردد. به منظور شبیه‌سازی این شرایط، در این پژوهش هر آزمایش پس از ۱۰ ساعت و ۳۰ دقیقه جوشش متوقف شده و سطح جوشش بدون هیچ گونه مداخله خارجی تا دمای محیط سرد می‌شود. هم‌چنین به منظور حفظ دقت اندازه‌گیری‌ها، در هر روز تنها یک آزمایش انجام گردید. پیش از هر آزمایش، محفظه جوشش سه مرتبه با آب مقطر شست‌وشو داده شد. سپس سطح جوشش با سنباده با زبری ۳۰۰۰ پرداخت و با استون تمیز شد. در ادامه، ۲ لیتر سیال کاری به محفظه افزوده شده و با پیش گرمکن داخلی تا دمای اشباع گرم گردید. برای کنترل فشار و تقطیر بخار تولیدی، از دو کندانسور (یکی در داخل و دیگری در خارج از محفظه) استفاده می‌شود که آب خنک‌کننده آن‌ها توسط سردکن LAUDA تأمین می‌گردد. پس از رسیدن سیال به دمای اشباع، گرمکن اصلی قرار گرفته در بلوک مسی فعال شده و توان آن با استفاده از یک واریاک مستقل به منظور ایجاد شرایط پایدار به صورت تدریجی و در گام‌های ۱۰ ولتی افزایش می‌یابد تا شرایط شار حرارتی بحرانی حاصل شود. دما و فشار محفظه به ترتیب توسط ترموکوپل‌ها و حسگر فشار اندازه‌گیری شده و داده‌ها به طور پیوسته توسط دیتالاگرا ثبت و در رایانه ذخیره شدند. ثبت داده‌ها تنها پس از رسیدن سیستم به حالت پایدار آغاز گردید. معیار پایداری، کم‌تر بودن نرخ تغییر دمای ترموکوپل‌ها از مقدار $(dT/dt = 0/01 \text{ K/min})$ به مدت حداقل ۱۰ min می‌باشد.

۵-۲- پردازش داده‌ها و تحلیل خطا

۵-۲-۱- توزیع دما در کارتریج مسی

توزیع دما برای مقادیر مختلف شار حرارتی اعمالی به بلوک مسی، به صورت مستقل مورد برازش قرار گرفته است. شکل (۵) تغییرات دمای اندازه‌گیری شده توسط سه ترموکوپل نصب شده در امتداد کارتریج مسی را در بازه وسیعی از شارهای حرارتی، با فرض انتقال حرارت یک‌بعدی، نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ضریب انطباق حاصل از روش حداقل مربعات در تمامی شرایط بیش از ۰/۹۹ بوده که بیان‌گر دقت بسیار بالای برازش داده‌های تجربی است. علاوه بر این نتایج بیانگر آن است که بخش عمده انرژی الکتریکی ورودی به سیستم صرف افزایش دمای موضعی و انتقال حرارت در راستای طولی بلوک مسی شده و تلفات حرارتی جانبی به طور مؤثری به حداقل رسیده است.



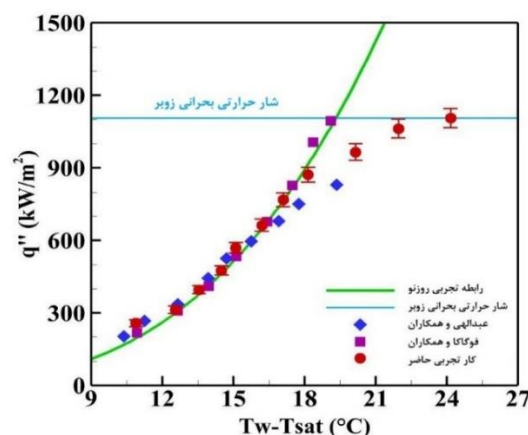
شکل ۵: الف) توزیع دمای خطی



شکل ۴: تست پایداری نانوسیالات در غلظت ۲٪ جرمی

۶-۲- اعتبارسنجی داده‌های آزمایشگاهی

به منظور اعتبارسنجی نتایج تجربی، داده‌های آزمایشگاهی با نتایج تجربی روزنو [۲۸] و همچنین نتایج تجربی در مطالعات عبدالمی [۱۲] و فوگاکا [۲۹] مقایسه شدند. افزون بر این، مقدار شار حرارتی بحرانی اندازه‌گیری شده، با دو رابطه پرکاربرد شامل مدل‌های زوبر [۳۰] و حرامورا [۳۱] که با استفاده از روابط (۹) تا (۱۱) به دست می‌آیند، مورد مقایسه قرار گرفت.



شکل ۶: اعتبارسنجی داده‌های آزمایشگاهی

نتایج این مقایسه‌ها نشان‌دهنده تطابق بسیار خوب داده‌های پژوهش حاضر با رابطه روزنو و داده‌های تجربی پژوهشگران مذکور است. همچنین اختلاف میان شار حرارتی بحرانی اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌های زوبر و حرامورا به ترتیب ۱۳٪ و ۲۶٪ بوده است که بیان‌گر دقت بسیار بالای سیستم آزمایشگاهی و صحت روش اندازه‌گیری به‌کاررفته در این پژوهش است. **Error! Reference source not found.** نتایج حاصل از اعتبارسنجی دستگاه آزمایشگاهی حاضر را نمایش می‌دهد. این تطابق قابل‌توجه، بیان‌گر همخوانی بسیار مناسب میان داده‌های تجربی حاضر و نتایج گزارش شده در مطالعات پیشین است. معادله (۸) رابطه تجربی روزنو را ارائه می‌دهد که به‌طور خاص برای برآورد شار حرارتی در فرایند انتقال حرارت جوشش هسته‌ای، به‌عنوان تابعی از دمای مافوق گرم، پیشنهاد شده است.

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

در این رابطه، q'' شار حرارتی، C_{pf} ظرفیت گرمایی ویژه مایع، h_{fg} گرمای نهان تبخیر، ΔT_{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 μ_f ویسکوزیته مایع، σ کشش سطحی، g شتاب گرانش، ρ_f چگالی مایع، ρ_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.

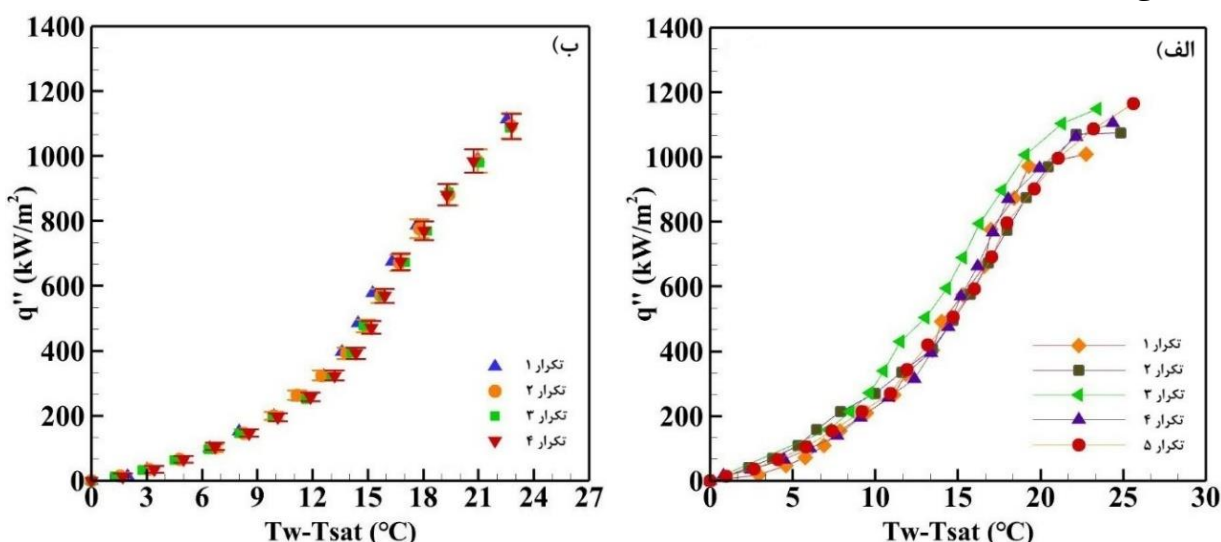
$$q''_{critical} = K \rho_g h_{fg} \left[\frac{g \sigma (\rho_f - \rho_g)}{\rho_g^2} \right]^{1/4} \left[\frac{\rho_f + \rho_g}{\rho_f} \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$q''_{critical} = \rho_g h_{fg} \left[\frac{g \sigma (\rho_f - \rho_g)}{\rho_g^2} \right]^{(1/4)} * \left[\frac{\rho_f + \rho_g}{\rho_g} \right]^{(5/16)} * \left[\frac{A_g}{A_w} \right]^{(5/8)} * \left[1 - \frac{A_g}{A_w} \right]^{(5/16)} * \left[\frac{\pi^4}{2^{11} * 9} \right]^{(1/16)} \quad (10)$$

$$\frac{A_g}{A_w} = 0,0584 \left(\frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{(1/5)} \quad (11)$$

۷-۲- تکرارپذیری داده‌های آزمایشگاهی

یکی از معیارهای اساسی برای پذیرش داده‌های تجربی، تکرارپذیری نتایج آزمایشگاهی تحت شرایط یکسان است. سنباده‌کاری یا پولیش سطح جوشش پیش از هر آزمایش، یکی از روش‌های متداول در آماده‌سازی سطوح برای مطالعات جوشش استخری به شمار می‌رود.



شکل ۶: الف) سنباده‌زنی سطح جوشش قبل از هر آزمایش، ب) سنباده‌زنی سطح جوشش فقط قبل از اولین آزمایش

باین حال، از آن جاکه فرایند انتقال حرارت در جوشش استخری به شدت به ویژگی های ریزساختاری سطح وابسته است، سنباده کاری مجدد سطح پیش از هر آزمایش لزوماً منجر به ایجاد شرایط سطحی پایدار و یکنواخت برای تحلیل های مقایسه ای نمی شود. از این رو، استفاده از سطوحی با زبری مشخص، کنترل شده و ثابت در طول انجام آزمایش ها، برای تضمین قابلیت مقایسه داده ها امری ضروری تلقی می شود. به منظور بررسی اثر تغییرات سطح ناشی از فرایند سنباده کاری، جهت حرکت سنباده، تعداد رفت و برگشت ها و میزان فشار اعمالی در تمامی آزمایش ها ثابت نگه داشته شد. همان گونه که در شکل ۶-الف مشاهده می شود، سطح جوشش در پنج نوبت متوالی سنباده کاری شد و پس از هر مرحله، یک آزمایش کامل جوشش استخری با استفاده از آب دیونیزه و تحت شرایط کاملاً کنترل شده انجام گرفت. نتایج نشان داد که بیش ترین اختلاف در مقدار شار حرارتی بحرانی و دمای مافوق گرم سطح جوشش در میان این پنج آزمایش به ترتیب ۱۶٪ و ۱۳٪ بوده است. این اختلاف قابل توجه بیان گر آن است که حتی با کنترل دقیق تمامی پارامترهای سنباده کاری، باز تولید یک زبری سطح کاملاً مشابه امکان پذیر نبوده و این مسئله می تواند منجر به نوسانات محسوس در داده های تجربی شود. به منظور رفع این محدودیت و ارزیابی دقیق تکرارپذیری دستگاه آزمایشگاهی حاضر، سطح جوشش تنها پیش از نخستین آزمایش سنباده کاری شد و آزمایش های بعدی با استفاده از آب دیونیزه، بدون انجام سنباده کاری مجدد، بر روی همان سطح اکسید شده مسی انجام پذیرفت. نتایج این مجموعه آزمایش ها که در شکل ۶-ب ارائه شده اند، نشان می دهد که بیش ترین انحراف مشاهده شده در چهار آزمایش متوالی تنها ۵۷٪ بوده است. این مقدار ناچیز انحراف، بیان گر یکنواختی مناسب سطح جوشش و تکرارپذیری بسیار بالای داده های تجربی به دست آمده از دستگاه آزمایشگاهی حاضر است. در شرایط واقعی بهره برداری صنعتی، انجام سنباده کاری یا پرداخت سطح جوشش پیش از هر بار راه اندازی سامانه عملاً امکان پذیر نیست. در اغلب کاربردها، سطح جوشش تنها در مرحله اولیه آماده سازی پرداخت شده و سپس چرخه های متوالی جوشش - سرد شدن بر روی همان سطح، بدون اعمال هرگونه عملیات پرداخت مجدد، ادامه می یابد. با تبعیت از این رویکرد عملی، در پژوهش حاضر نیز سطح جوشش تنها پیش از انجام آزمایش اولیه سنباده کاری شد و تمامی آزمایش های بعدی بر روی همان سطح و بدون سنباده کاری مجدد انجام گرفت. در نتیجه این فرایند، سطح جوشش در طول تکرار آزمایش ها به طور طبیعی دچار اکسیداسیون و رسوب گذاری شد و ویژگی های سطحی آن صرفاً تحت تأثیر چرخه های متوالی جوشش - سرد شدن و بدون هیچ گونه مداخله خارجی تغییر یافت. اتخاذ این رویکرد موجب می شود داده های تجربی حاصل، رفتار واقعی سطوح در شرایط کاری صنعتی را با دقت بیش تری بازتاب داده و از نظر فیزیکی و کاربردی، تطابق بالاتری با شرایط بهره برداری واقعی داشته باشند.

۸-۲- تحلیل عدم قطعیت

جدول ۳ خلاصه ای از عدم قطعیت های اندازه گیری شناسایی شده در این پژوهش را ارائه می دهد. رسانایی حرارتی مس در دماهای ۱۰۰ و ۳۰۰ °C به ترتیب برابر با ۳۹۵/۸۹ و ۳۸۲/۸۹ W/(m.K) گزارش شده است [۳۲]. در آزمایش های جوشش هسته ای، فرض شد که رسانایی حرارتی مس ثابت باقی می ماند. برای این فرض، عدم قطعیتی برابر با $\pm 3.2\%$ در نظر گرفته شد. برای تعیین عدم قطعیت مقادیر محاسبه شده، از روش انتشار خطای کلاین و مک کلینتاک [۳۳] استفاده گردید.

جدول ۳: عدم قطعیت پارامترهای اندازه گیری	
پارامتر	عدم قطعیت
دمای ترموکوپل ها	$\pm 0.1 \text{ K}$
سوراخ کاری (موقعیت ترموکوپل ها)	$\pm 0.1 \text{ mm}$
ولتاژ	$\pm 1 \text{ V}$
جریان	$\pm 0.1 \text{ A}$

عدم قطعیت های مربوط به شار حرارتی، دمای مافوق گرم و ضریب انتقال حرارت جوشش با استفاده از روابط ارائه شده در معادلات (۱۲) تا (۱۴) محاسبه شدند. نتایج نشان می دهد که بیشینه عدم قطعیت شار حرارتی، دمای مافوق گرم و ضریب انتقال حرارت جوشش به ترتیب برابر با ۴٪، ۴٪ و ۵٪ است.

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

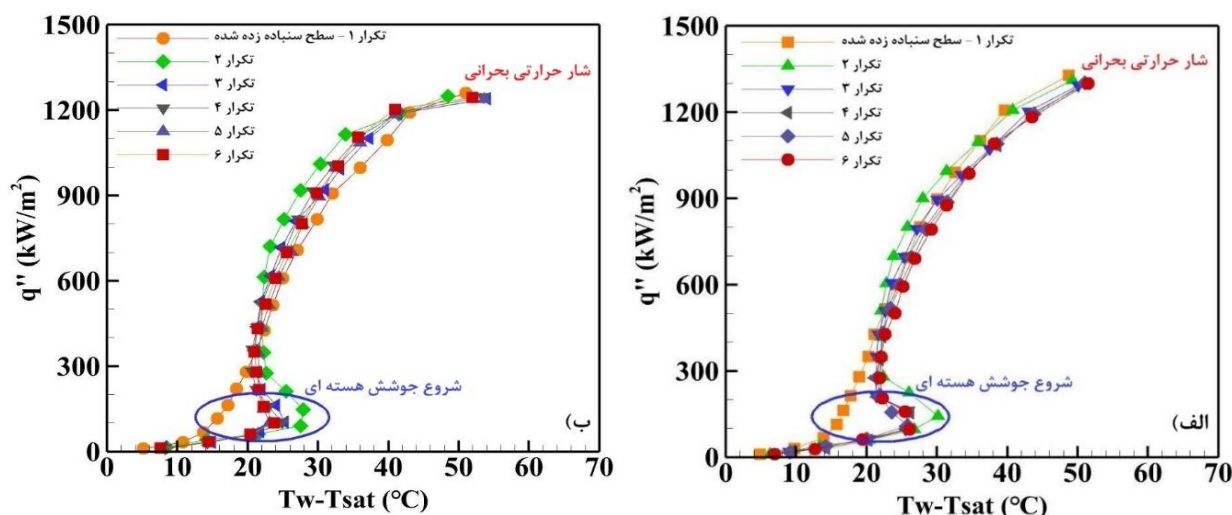
$$\delta \Delta T_{sat} = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta T_{sat}}{\partial q''} \cdot \delta q''\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T_{sat}}{\partial k_{cu}} \cdot \delta k_{cu}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T_{sat}}{\partial \Delta x} \cdot \delta \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial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

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

۳- بحث و نتیجه‌گیری

۳-۱- پایداری سطح جوشش

همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، یک از اهداف اصلی این مطالعه ایجاد یک سطح جوشش پایدار از طریق اعمال چرخه‌های متوالی جوشش - سرد شدن است، به‌نحوی 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 و انحراف معیار مقادیر شار حرارتی بحرانی و دمای مافوق گرم که بر اساس سه چرخه پایانی جوشش - سرد شدن محاسبه می‌شوند، کمتر از $\pm 2\%$ باشند. براساس نتایج گزارش شده توسط حیدری و همکاران [۹] اعمال چرخه‌های طولانی مدت و مکرر جوشش - سرد شدن در نانوسیال 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 طولانی مدت جوشش - سرد شدن، با رقیق کردن نانوسیال کاری نیز تغییر نکنند. به‌همین دلیل، در پژوهش حاضر نیز از همین رویکرد برای ایجاد سطح جوشش پایدار استفاده می‌شود. بدین منظور در ابتدای کار، سطح مسی جوشش تنها پیش از نخستین آزمایش به‌صورت خطی و با استفاده از سنباده شماره ۳۰۰۰ پرداخت می‌شود. سپس آزمایش‌های متوالی جوشش - سرد شدن بدون اعمال هرگونه عملیات پرداخت مجدد، تکرار می‌شوند.



شکل ۷: منحنی‌های جوشش نانوسیال‌های 2% جرمی [۹]، (الف) $20-30\text{ nm}$ ، (ب) $60-70\text{ nm}$

نتایج حاصل از این چرخه‌ها برای نانوسیال با اندازه نانوذرات $20-30\text{ nm}$ و $60-70\text{ nm}$ به ترتیب در شکل ۷-الف و شکل ۷-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 - سرد شدن تغییر محسوسی نشان نداده و رفتار

جوشش در غلظت ۲٪ جرمی به یک حالت پایدار می‌رسد. مقدار شار حرارتی بحرانی برای نانوذرات ۲۰-۳۰ nm برابر با kW/m^2 و ۱۳۰۰ و برای نانوذرات ۶۰-۷۰ nm برابر با kW/m^2 اندازه‌گیری شد. این مقادیر به ترتیب با انحراف معیار ۰/۲۷٪ و ۰/۲۵٪ و در دمای مافوق گرم حدود $52 \square$ با انحراف معیار ۱/۰۹٪ و ۱/۴۴٪ رخ داده‌اند. علاوه بر پایداری مناسب، سطوح پایدار ایجاد شده با نانوسیال ۲٪ موجب افزایش قابل توجه مقدار شار حرارتی بحرانی نسبت به آب دیونیزه شدند، به طوری که این افزایش برای نانوذرات با اندازه ۲۰-۳۰ nm و ۶۰-۷۰ nm به ترتیب حدود ۱/۱۸٪ و ۱/۱۳٪ به دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که در غلظت‌های بالای نانوسیال، لایه رسوبی نانوذرات به سرعت 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.

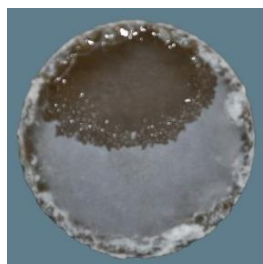
۳-۲- شروع انتقال حرارت جوش هسته‌ای^۷

نقطه شروع جوشش هسته‌ای بیان‌گر گذار از ناحیه انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی به ناحیه جوشش هسته‌ای است. در این نقطه، دمای مافوق گرم سطح جوشش به حدی می‌رسد که حفره‌های فعال موجود بر روی سطح قادر به آغاز فرایند جوانه‌زنی بخار می‌شوند. در نتیجه، پس از شروع جوشش هسته‌ای، شیب منحنی شار حرارتی بر حسب دمای مافوق گرم به طور محسوسی افزایش یافته و از رفتار تقریباً خطی مشخصه ناحیه همرفت طبیعی انحراف پیدا می‌کند. بلافاصله پس از وقوع جوشش هسته‌ای، افزایش ناگهانی نرخ تولید و جداسدن حباب‌ها منجر به بهبود تبخیر سطحی و افزایش موقتی ضریب انتقال حرارت می‌شود که این پدیده به صورت کاهش گذرای دمای مافوق گرم مشاهده می‌گردد. با ادامه افزایش شار حرارتی و ورود سیستم به ناحیه جوشش هسته‌ای پایدار، دمای مافوق گرم دیواره مجدداً روند افزایشی پیدا می‌کند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در اثر اعمال چرخه‌های متوالی جوشش - سرد شدن، وقوع نقطه شروع جوشش هسته‌ای به طور قابل توجهی به تأخیر افتاده است، به گونه‌ای که برای نانوسیال با نانوذرات ۲۰-۳۰ nm دمای مافوق گرم از $14/1 \square$ در اولین چرخه به حدود $25/15 \square$ در آخرین چرخه معادل با ۸۵٪ افزایش می‌یابد. در حالی که برای نانوسیال با نانوذرات ۶۰-۷۰ nm دمای مافوق گرم از $13/6 \square$ در اولین چرخه به حدود $23/8 \square$ در آخرین چرخه معادل با ۷۵٪ افزایش می‌یابد.

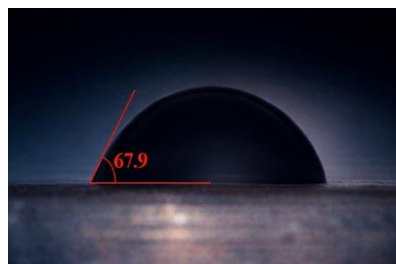
۳-۳- ترشوندگی سطح جوشش

ترشوندگی سطح جوشش یکی از عوامل مهم در تعیین مقدار شار حرارتی بحرانی در فرایند جوشش است. در رژیم جوشش هسته‌ای، پس از جداسدن حباب‌های بخار از سطح، نواحی خشک موضعی ایجاد می‌شود که می‌تواند انتقال حرارت را تضعیف کند. بهبود ترشوندگی سطح با کاهش زاویه تماس، از گسترش نواحی خشک جلوگیری کرده و در نتیجه رسیدن به نقطه جوشش بحرانی را به تأخیر می‌اندازد [۱۸]. رسوب نانوذرات نقش مهمی در تغییر ترشوندگی سطح جوشش دارد و این اثر به نوع و غلظت نانوسیال، اندازه نانوذرات و زبری سطح بستگی دارد. بسته به این پارامترها، نانوذرات می‌توانند چگالی سایت‌های فعال جوانه‌زنی بخار را افزایش یا کاهش دهند. همان گونه که در شکل ۸-الف) نشان داده شده است، زاویه تماس آب دیونیزه بر روی سطح مسی سنباده خورده حدود $67/9^\circ$ است. رسوب گذاری نانوذرات باعث کاهش قابل توجه زاویه تماس شده (شکل ۸-ب) و آن را به حدود صفر درجه کاهش می‌دهد، به طوری که سطح به شدت آب دوست می‌شود. در این حالت، قطره مایع به سرعت بر روی سطح جوشش پخش شده و بخش قابل توجهی از آن را می‌پوشاند. این بهبود ترشوندگی که ناشی از افزایش خاصیت موئینگی سطح به دلیل تجمع نانوذرات است، موجب تأمین بهتر مایع بر روی سطح جوشش و در نتیجه افزایش شار حرارتی بحرانی می‌شود. این نتایج نشان می‌دهند که اصلاح سطح از طریق رسوب نانوذرات می‌تواند نقش مؤثری در بهبود عملکرد حرارتی سیستم‌های جوشش ایفا کند.

⁷ Onset of nucleate boiling (ONB)



(ب)

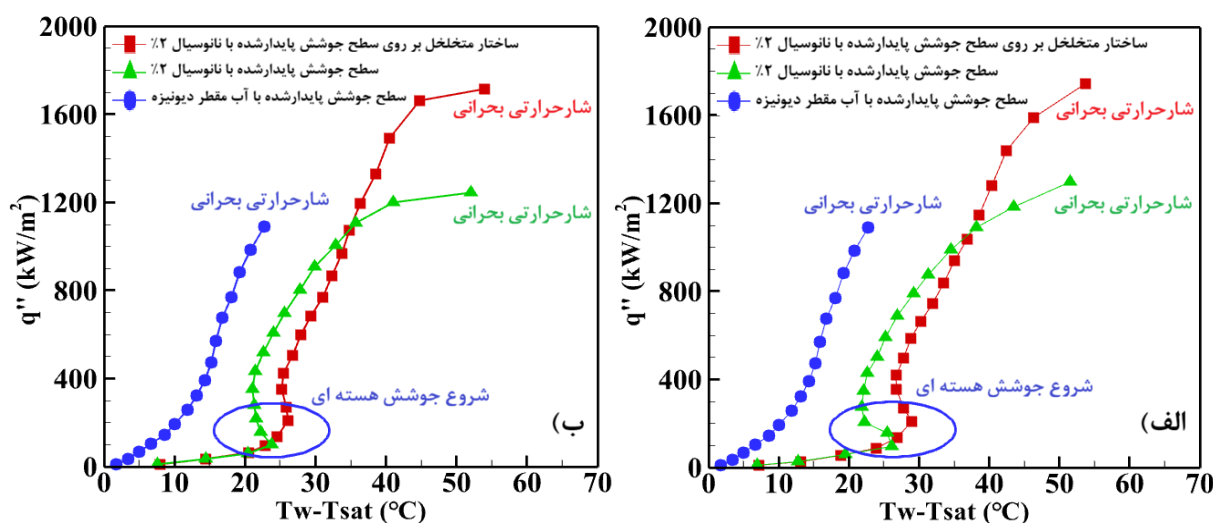


(الف)

شکل ۸: زاویه تماس قبل و بعد از آزمایش جوشش استخری. (الف) آب دیونیزه روی سطح سنباده خورده = 67.9° ، (ب) آب دیونیزه روی سطح پایدار با نانوسیال ۲٪ جرمی

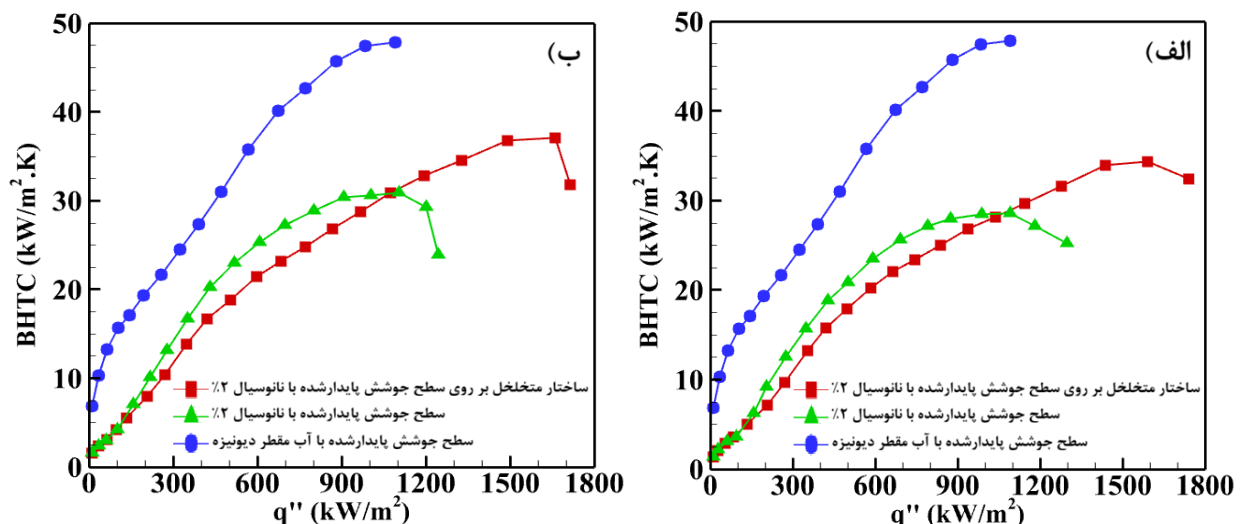
۳-۴- اثرات استفاده از ساختار متخلخل بر روی سطح جوشش پایدار شده

باتوجه به نتایج گزارش شده توسط موری و همکاران [۶] ضخامت بهینه برای ساختار متخلخل لانه‌زنبوری به‌منظور افزایش شار حرارتی بحرانی برابر ۱ mm گزارش شده است. از این‌رو در مطالعه تجربی حاضر نیز همین ضخامت برای ساختار متخلخل مورد استفاده قرار گرفته است. باتوجه به این‌که در بخش قبل نشان داده شد سطح جوشش با نانوسیال SiO_2 با غلظت ۲٪ جرمی پس از اعمال چرخه‌های متوالی جوشش - سرد شدن به پایداری فیزیکی و حرارتی می‌رسد، در این قسمت به‌منظور بررسی اثر استفاده از ساختار متخلخل لانه‌زنبوری بر روی چنین سطح پایداری، این ساختار بر روی سطح جوشش پایدار متصل گردید. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در شکل ۹ و شکل ۱۰ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۹ - الف و ب) مشاهده می‌شود مقدار شار حرارتی بیشینه برای نانوسیال‌های دارای نانوذرات ۳۰-۲۰ nm و ۶۰-۷۰ nm به ترتیب برابر با $1741/9 \text{ kW/m}^2$ و $1716/2$ اندازه‌گیری شد، درحالی‌که دمای مافوق گرم متناظر با این مقادیر حدود 54°C می‌باشد.



شکل ۹: منحنی‌های شار حرارتی سطح جوشش پایدار شده با نانوسیال‌های ۲٪ جرمی و متصل به ساختار متخلخل لانه‌زنبوری، (الف) ۳۰-۲۰ nm، (ب) ۶۰-۷۰ nm

نتایج نشان داد اتصال سطح متخلخل لانه‌زنبوری به سطح جوشش پایدار باعث افزایش قابل توجه شار حرارتی بحرانی می‌شود. این افزایش نسبت به سطح پایدار ۲٪ جرمی بدون ساختار متخلخل و آب دیونیزه به ترتیب $34/1\%$ و $57/5\%$ برای نانوسیال دارای نانوذرات ۲۰-۳۰ nm و $37/9\%$ و $55/2\%$ برای نانوسیال دارای نانوذرات ۶۰-۷۰ nm می‌باشد. 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 افزایش می‌یابد. برای نانوسیال با اندازه نانوذرات ۲۰-۳۰ nm دمای شروع جوشش هسته‌ای از $26/15^\circ\text{C}$ به مقدار $28/9^\circ\text{C}$ رسیده که معادل $10/5\%$ افزایش را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: منحنی‌های ضریب انتقال حرارت سطح جوشش پایدار شده با نانوسیال‌های ۲٪ جرمی و متصل به ساختار متخلخل لانه‌زنبوری، (الف) ۳۰-۲۰، (ب) ۷۰-۶۰ nm

به‌طور مشابه برای نانوسیال با اندازه نانوذرات ۶۰-۷۰ nm دمای شروع جوشش هسته‌ای از $\square$ ۲۳/۸ به مقدار $\square$ ۲۶/۱ رسیده که معادل ۹/۷٪ افزایش را نشان می‌دهد. این افزایش به علت وجود ساختار متخلخل بر روی سطح جوشش و جلوگیری از دفع حرارت در شارهای حرارتی کم و متوسط می‌باشد. مطابق با شکل ۱۰ - الف و ب)، اتصال ساختار متخلخل لانه‌زنبوری به سطح پایدار ۲٪ جرمی منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت جوشش می‌شود. مقدار این افزایش برای نانوسیال‌های با اندازه نانوذرات ۳۰-۲۰ nm و ۶۰-۷۰ nm به ترتیب ۲۰/۲٪ و ۱۹/۸٪ 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.

۴-۱- نتایج

این پژوهش به بررسی تجربی اثر ترکیب سطوح جوشش پایدار شده و ساختار متخلخل لانه‌زنبوری بر مشخصه‌های انتقال حرارت و منحنی‌های جوشش در جوشش استخری نانوسیال SiO_2 در فشار اتمسفری می‌پردازد. در ابتدا، سطح مسی با استفاده از نانوسیال SiO_2 و طی چرخه‌های متوالی و طولانی مدت جوشش - سرد شدن قرار گرفت، تا رسوب نانوذرات و تغییرات ریزساختاری سطح به حالت پایدار برسد. سپس اثر قرارگیری یک ساختار متخلخل لانه‌زنبوری بر روی این سطح پایدار شده بر منحنی‌های جوشش و مشخصه‌های انتقال حرارت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که رسوب نانوذرات موجب تغییر ویژگی‌های ترشوندگی و ریزساختار سطح شده و یک سطح جوشش پایدار با عملکرد قابل تکرار ایجاد می‌کند. در چنین شرایطی، استفاده هم زمان از ساختار متخلخل لانه‌زنبوری بر روی سطح پایدار شده، با ایجاد مسیرهای مؤثر برای تأمین مجدد جریان مایع و خروج بخار، سبب بهبود قابل توجه مشخصه‌های انتقال حرارت جوشش استخری می‌شود. این رویکرد ترکیبی می‌تواند راه‌کاری مؤثر برای افزایش شار حرارتی بحرانی و بهبود ضریب انتقال حرارت در سامانه‌های مبتنی بر جوشش و طراحی سطوح پیشرفته انتقال حرارت در کاربردهای صنعتی باشد.

- سطح جوشش در حضور نانوسیال با غلظت ۲٪ جرمی و تحت سیکل‌های مکرر و طولانی مدت جوشش - سرد شدن به پایداری فیزیکی و حرارتی می‌رسد. مقدار شار حرارتی بحرانی برای نانوسیال با اندازه نانوذرات ۲۰-۳۰ nm و برای نانوسیال با اندازه نانوذرات ۶۰-۷۰ nm به ترتیب در حدود 1300 kW/m^2 با انحراف معیار ۲۷/۰٪ و ۲۵/۰٪ و در دمای مافوق گرم حدود $\square$ ۵۲ با انحراف معیار ۱/۰۹٪ و ۱/۴۴٪ گزارش گردید.
- تشکیل یک سطح جوشش پایدار با استفاده از نانوسیال با غلظت ۲٪ جرمی، برای نانوسیال با اندازه نانوذرات ۲۰-۳۰ nm و برای نانوسیال با اندازه نانوذرات ۶۰-۷۰ nm به ترتیب موجب افزایش حدود ۱۸٪ و ۱۳٪ شار حرارتی بحرانی نسبت به آب دیونیزه می‌شود.

- اتصال سطح متخلخل لانه‌زنبوری به سطح جوشش پایدار شده توسط نانوسیال ۲٪ جرمی، باعث افزایش شار حرارتی بحرانی نسبت به سطح پایدار ۲٪ جرمی بدون ساختار متخلخل و آب دیونیزه به ترتیب ۳۴/۱٪ و ۵۷/۵٪ برای نانوسیال با اندازه نانوذرات ۲۰-۳۰ nm و ۳۷/۹٪ و ۵۵/۲٪ برای نانوسیال با اندازه نانوذرات ۶۰-۷۰ nm می‌شود.
- اتصال ساختار متخلخل لانه‌زنبوری به سطح جوشش پایدار شده توسط نانوسیال ۲٪ جرمی، ضریب انتقال حرارت جوشش را برای نانوسیال با اندازه نانوذرات ۲۰-۳۰ nm و برای نانوسیال با اندازه نانوذرات ۶۰-۷۰ nm به ترتیب به میزان ۲۰/۲٪ و ۱۹/۸٪ نسبت به سطح پایدار فاقد ساختار متخلخل افزایش می‌دهد.
- اعمال ترکیب استفاده از سطح جوشش پایدار و سطح متخلخل لانه‌زنبوری باعث جابه‌جایی نقطه شروع جوشش هسته‌ای به سمت دماهای مافوق گرم‌تر شده و مقدار دمای مافوق گرم سطح جوشش پایدار با ساختار متخلخل را نسبت به سطح جوشش پایدار بدون ساختار متخلخل برای نانوسیال با اندازه نانوذرات ۲۰-۳۰ nm و ۶۰-۷۰ nm به ترتیب به مقدار ۱۰/۵٪ و ۹/۷٪ افزایش می‌دهد.

۲-۴- محدودیت‌ها

مطالعه تجربی حاضر همانند بسیاری از پژوهش‌های آزمایشگاهی، دارای محدودیت‌هایی است که پیش از تعمیم نتایج آن به کاربردهای صنعتی باید مورد توجه قرار گیرد. آزمایش‌ها با نانوسیال SiO_2 ، در مقیاس آزمایشگاهی و طی چرخه‌های مکرر جوشش - سرد شدن با مدت زمان ۶۰-۵۰ ساعت انجام شده است. علاوه بر این، در طول چرخه‌های متوالی و طولانی مدت، احتمال رسوب تدریجی نانوذرات در داخل منافذ ساختار متخلخل وجود دارد. تجمع این رسوبات می‌تواند به مرور زمان موجب انسداد نسبی مسیرهای جریان مایع و کاهش قابلیت موئینگی در ساختار متخلخل شود. در نتیجه، کارایی حرارتی این ساختارها، از جمله شار حرارتی بیشینه و ضریب انتقال حرارت، ممکن است در شرایط بهره‌برداری طولانی مدت یا مقیاس‌های عملیاتی واقعی کاهش یابد. بنابراین، اگرچه نتایج این پژوهش نشان‌دهنده بهبود قابل توجه عملکرد انتقال حرارت با استفاده از ساختار متخلخل لانه‌زنبوری بر روی سطح جوشش پایدار است، بررسی اثرات بلندمدت رسوب نانوذرات در منافذ این ساختارها و ارزیابی پایداری عملکرد حرارتی آن‌ها در چرخه‌های طولانی تر جوشش - سرد شدن، نیازمند مطالعات تجربی بیش‌تری در آینده خواهد بود.

فهرست علائم

علائم انگلیسی		علائم یونانی	
ظرفیت گرمایی ویژه، $(J/(kg.K))$	C_p	عدم قطعیت	δ
ضریب سطح جامد - مایع	C_{sf}	ویسکوزیته، $(kg/(m.s))$	μ
ضخامت ساختار متخلخل، (mm)	d	درصد غلظت جرمی	$\varnothing$
شتاب گرانشی، (m/s^2)	g	چگالی، (kg/m^3)	ρ
ضریب انتقال حرارت جابه جایی، $(kW/(m^2.K))$	h	کشش سطحی، (N/m)	σ
گرمای نهان تبخیر، (kJ/kg)	h_{fg}	زیرنویس ها	
رسانایی حرارتی، $(W/(m.K))$	k	موقعیت ترموکوپل ها	1-3
جرم نانوذرات، (kg)	M	جوشش	b
شروع جوشش هسته ای	ONB	مس	cu
شار حرارتی، (kW/m^2)	q''	آزمایشگاهی	EXP
دما، $(^{\circ}C)$	T	مایع	f
ضخامت دیواره ساختار متخلخل، (mm)	t	بخار	g
حجم، (m^3)	V	جوشش هسته ای	nb
عرض کانال فرار بخار در ساختار متخلخل، (mm)	w	نانوذرات	np
موقعیت ترموکوپل، (mm)	X	اشباع	sat

مراجع

- [1] J. H. Lienhard, "A heat transfer textbook," Prentice Hall PTR, (1981).
- [۲] ح. صفاری. ا. میرزا قیطاقی، جوشش استخری، تهران، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس شهید رجایی، ۲۰۱۶.
- [3] R. L. Webb and N.-H. Kim, Principles of Enhanced Heat Transfer, Second Edition. New York: Taylor and Francis Group, 2005.
- [4] Stephen U.S. and Choi, J.A. Eastman, "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles," in ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, San Francisco, (1995).
- [5] F. Rajabzadeh Dareh, M. Haghshenasfard, M. Nasr Esfahany, and H. Salimi Jazi, "Experimental investigation of time and repeated cycles in nucleate pool boiling of alumina/water nanofluid on polished and machined surfaces," Heat and Mass Transfer, 54(7) (2016). doi: 10.1007/s00231-017-2266-2.
- [6] K. O. Shoji Mori, "Enhancement of the critical heat flux in saturated pool boiling using honeycomb porous media" International Journal of Multiphase Flow, 35 (2009), 946-951. doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.05.003.
- [7] S. M. Aznam, S. Mori, F. Sakakibara, and K. Okuyam, "Effects of heater orientation on critical heat flux for nanoparticle deposited surface with honeycomb porous plate attachment in saturated pool boiling of water," International Journal of Heat and Mass Transfer, 102 (2016), 1345-1355. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.004.
- [8] A. Khan, I. Shah, and D.-W. Jung, "Enhancing heat transfer in porous media with nanosolutions: A comprehensive review of mechanisms, models, and applications," International Communications in Heat and Mass Transfer, 173(110746), (2026). doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2026.110746.

- [9] Mohammad G.Heidari, Masoud. Zareh, Cyrus. Aghanajafi, M. Behshad. Shafii, "Effects of successive pool boiling cycles of SiO₂ nanofluids on boiling surface stability: Role of concentration-dependent stability and post-stabilization dilution," Results in Engineering, (2026). doi:10.1016/j.rineng.2026.109809.
- [10] M. S. and N. A. H. Alimoradi, "Enhancement in the pool boiling heat transfer of copper surface by applying electrophoretic deposited graphene oxide coatings," International Journal of Multiphase Flow, 159(104350), (2023). doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2022.104350.
- [11] S. K. and S. Das B. Shil, D. Sen, A. K. Das, P. Sen, "Enhancement in pool boiling performance of GNP/Cu-Al₂O₃ nano-composite coated copper microporous surface," Thermal Science and Engineering Progress, 43(101965), (2023). doi:10.1016/j.tsep.2023.101965.
- [12] A. Abdollahi, M. R. Salimpour, and N. Etesami, "Experimental analysis of magnetic field effect on the pool boiling heat transfer of a ferrofluid," Applied Thermal Engineering, 111, (2017),1101–1110. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.10.019.
- [13] B. Y. and L. W. X. Li, X. He, C. Chen, D. Wang, "Experimental study on CHF enhancement of different oxidized surfaces of low carbon steel in nanofluid," Annals of Nuclear Energy, 211(110923), (2025). doi:10.1016/j.anucene.2024.110923.
- [14] 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," International Journal of Heat and Mass Transfer, 208(124066), (2023). doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124066.
- [15] A. Pare and Subrata Kumar Ghosh, "The empirical characteristics on transient nature of Al₂O₃-water nanofluid pool boiling," Applied Thermal Engineering, 199(117617), (2021). doi:10.1016/j.applthermaleng.2021.117617.
- [16] 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, 11(2138), (2021). doi:0A10.3390/nano11082138.
- [17] G. Mlakar, C.-N. Huang, and C. Kharangate, "Effects of surface modifications on pool boiling heat transfer with HFE-7100," International Journal of Thermofluids, 17(100286), (2023). doi: 10.1016/j.ijft.2023.100286.
- [18] 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," Applied Thermal Engineering, 248(123213), (2024). doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123213.
- [19] C. Falsetti, J. Chetwynd-Chatwin, and E. J. Walsh, "Performance of pin-fin structures on pool boiling heat transfer," International Journal of Thermofluids, 23(100784), (2024). doi: 10.1016/j.ijft.2024.100784.
- [20] T. Kano, R. Ono, and M. Furuya, "Enhancement of critical heat flux with additive-manufactured heat-transfer surface," Nuclear Engineering and Technology, 56(2474–2479), (2024). doi: 10.1016/j.net.2024.02.005.
- [21] 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," Applied Thermal Engineering, 274(126759), (2025). doi: 10.1016/j.applthermaleng.2025.126759.
- [22] F. Wu, Y. Umehara, A. Etoh, and S. Mori, "Effects of pore size distribution in a honeycomb porous plate on the onset of nucleate boiling in AE-3000," International Journal of Heat and Mass Transfer, 246(127066), (2025). doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127066.
- [23] Y. Hayashida, Y. Umehara, A. Etoh, and S. Mori, "Critical heat flux model based on transient wicking governed by bubble dynamics on electrodeposited porous copper surfaces," International Journal of Heat and Mass Transfer, 268(129007), (2026). doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2026.129007.
- [24] H. H. Alfailakawi, S. A. Ebrahim, and N. F. Aljuwayhel, "Experimental investigation of heat transfer enhancement during quenching using carbon-based nanofluids," Annals of Nuclear Energy, 112174, (2026). doi:10.1016/j.anucene.2026.112174.
- [25] 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," International Journal of Heat and Mass Transfer, 80, (2015), 1–6. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.08.046.

- [26] A. Ghadimi, R. Saidur, and H. S. C. Metselaar, "A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 17–18(54), (2011), 4051–4068. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.014.
- [27] Y. S. J. Shah, M. Ranjan, V. Davariya, S.K. Gupta, "Temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of synthesized α -alumina nanofluids," *Appl. Nanosci*, 7, (2017), 803–813. doi: 10.1007/s13204-017-0594-7.
- [28] W. M. Rohsenow, "A method of correlating heat transfer data for surface boiling of liquids," *Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts*, (1951).
- [29] 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," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 125, (2018), 994–1002. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.101.
- [30] N. Zuber, "On the stability of boiling heat transfer," *Heat Transfer*, 80C, (1958), 711.
- [31] 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 Transfer*, 26(3), (1983), 389–399.
- [32] A. B. L. J.G. Hust, "Thermal Conductivity of Aluminum, Copper, Iron, and Tungsten for Temperatures from 1 K to the Melting Point," *Materials Science, Physics*, 1984. doi: 10.6028/NBS.IR.84-3007.
- [33] S. J. Kline and F. A. McClintock and F. A. McClintock, "Describing uncertainties in single-sample experiments," *ASME*, 75, (1953), 3–8.

Experimental Investigation of the Combined Effects of Stable Boiling Surfaces and Porous Structures on Pool Boiling Heat Transfer of Nanofluids

Mohammad Ghorbani¹, Masoud Zareh^{1*}, Cyrus Aghanajafi², Mohammad Behshad Shafii³

¹ Department of Mechanical Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

³ Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

Received: Autumn 2025

Accepted: Winter 2026

Abstract

Enhancing pool boiling heat transfer is essential for improving the efficiency and safety of high-heat-flux thermal systems. Nanofluids and engineered surfaces have been widely investigated as effective methods for boiling enhancement. However, the effect of porous structures on boiling surfaces stabilized by nanoparticle deposition during successive boiling-cooling cycles has not been previously reported. The experimental setup was validated using the Rohsenow correlation, while the measured critical heat flux (CHF) was compared with the Zuber and Haramura models, showing deviations of only 0.13% and 0.27%, respectively. In this study, a copper boiling surface was stabilized using SiO₂ nanofluids containing nanoparticles with size ranges of 20-30 and 60-70 nm through long-term successive boiling-cooling cycles. A ceramic honeycomb porous structure was then attached to the stabilized surface, and its effect on boiling performance was experimentally evaluated. The results showed that the porous structure increased the CHF by approximately 34% and 38% for the 20-30 and 60-70 nm nanoparticles, respectively, compared with stabilized surfaces without the porous structure. In addition, the boiling heat transfer coefficient (BHTC) increased by about 20%. These improvements are attributed to the higher density of active nucleation sites, enhanced liquid replenishment, and more efficient vapor removal within the porous structure.

Key words: pool boiling, stable boiling surface, porous structure, critical heat flux, nanofluid

*corresponding author: masoud_zareh@iau.ac.ir

Cite this article as: Mohammad. Ghorbani, Masoud. Zareh, Cyrus. Aghanajafi, Mohammad Behshad. Shafii, Experimental Investigation of the Combined Effects of Stable Boiling Surfaces and Porous Structures on Pool Boiling Heat Transfer of Nanofluids. **Journal of Energy Conversion**, 2026, 12(4), 67-86.