نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)
J. Energy Conversion
Volume: 12, Issue:4, 2026: 67-86
دوره ۱۲، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴، ص: ۶۷-۸۶

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

محمد قربانی[۱]، مسعود زارع [۱و*]، سیروس آقانجفی [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 مهندسی‌شده به‌عنوان دو روش مؤثر برای ارتقای انتقال حرارت جوشش موردتوجه قرار گرفته‌اند. بااین‌حال، اثر استفاده از ساختار متخلخل بر روی سطوحی که در اثر رسوب نانوذرات طی چرخه‌های متوالی جوشش - سردشدن به حالت پایدار رسیده‌اند، تاکنون گزارش نشده است. در این پژوهش، اعتبارسنجی 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 به‌ترتیب اختلافی در حدود ۰/۱۳٪ و ۰/۲۷٪ محاسبه شد. سپس سطح جوشش توسط نانوسیال SiO_2 با دو اندازه نانوذره ۳۰-۲۰ و ۷۰-۶۰ نانومتر طی چرخه‌های طولانی‌مدت جوشش - سرد شدن پایدارسازی شد و اثر نصب ساختار متخلخل لانه‌زنبوری بر روی این سطح بررسی گردید. نتایج نشان داد که اتصال ساختار متخلخل به سطح پایدار شده، شار حرارتی بحرانی را به‌ترتیب 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 لانه‌زنبوری، شار حرارتی بحرانی، نانوسیال

* **عهده‌دار مکاتبات:** masoud_zareh@iau.ac.ir

نحوه استناد به این مقاله محمد قربانی، مسعود زارع، سیروس آقانجفی، 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) : ۸۶-۶۷.**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.573]

۱- مقدمه

جوشش به‌عنوان یکی از کارآمدترین مکانیزم‌های انتقال حرارت، نقش مهمی در بسیاری از سیستم‌های حرارتی و انرژی ایفا می‌کند. این فرایند به‌دلیل توانایی بالا در انتقال مقادیر قابل‌توجهی از انرژی حرارتی، در طیف گسترده‌ای از فعالیت‌های ساده روزمره مانند پخت‌وپز گرفته تا سامانه‌های مهندسی پیچیده نظیر سیستم‌های تهویه‌مطبوع و تبرید، نیروگاه‌های حرارتی، مبدل‌های حرارتی، فرایندهای شیمیایی و هم‌چنین سامانه‌های خنک‌کاری تجهیزات الکترونیکی مورداستفاده 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. باوجود 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 قابل‌توجهی 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 به‌منظور بهبود عملکرد انتقال حرارت در جوشش استخری انجام شده است. به‌طورکلی 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 به‌عنوان متداول‌ترین سیال مورداستفاده قرار می‌گرفت، اما باهدف دست‌یابی به عملکرد حرارتی بهتر، استفاده از سیالات جایگزین نظیر مبردها، اتانول، اتیلن گلیکول و به‌ویژه نانوسیالات موردتوجه قرار گرفته است. معرفی نانوسیالات به‌عنوان نسل جدیدی از سیالات انتقال حرارت نخستین‌بار توسط چوی و همکاران [۴] در سال ۱۹۹۵ مطرح شد. از آن زمان تاکنون، این سیالات به‌دلیل پتانسیل قابل‌توجه 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 نخستین‌بار از مونولیت‌های سرامیکی مورداستفاده در کاتالیست خروجی دود وسایل نقلیه به‌عنوان ساختار متخلخل لانه‌زنبوری استفاده کردند و نشان دادند که شار حرارتی بحرانی در جوشش استخری آب اشباع خالص روی این سطح تقریباً دوبرابر سطح جوشش صاف با قطر ۳۰mm است. آزنام و همکاران [۷] با مقایسه سطوح جوشش 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، به‌طوری‌که صفحه متخلخل با تأمین جریان سیال به سطح گرم از طریق پدیده مویینگی و رسوب نانوذرات با افزایش ترشوندگی سطح، موجب افزایش قابل‌توجه 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 به‌عنوان 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 طولانی‌مدت (۵۰-۶۰ ساعته) مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که سطح جوشش در غلظت ۲٪ جرمی تحت جوشش‌های مکرر و طولانی‌مدت 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. ازسوی‌دیگر، ترکیب سطوح مهندسی شده با نانوسیالات می‌تواند اثرات هم‌افزایی قابل‌توجهی در بهبود انتقال حرارت جوششی ایجاد کند. سطوح متخلخل لانه‌زنبوری و ساختارهای متخلخل پوشش داده شده با نانوذرات، به‌دلیل ایجاد مسیرهای مؤثر مویینگی، 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 مویینگی و بهبود باز ترشوندگی نواحی خشک شده از مهم‌ترین مکانیزم‌های مؤثر در افزایش عملکرد حرارتی به شمار می‌روند. در سال‌های اخیر،

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.573]

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. بااین‌حال، 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 - سردشدن 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. ازاین‌رو، در پژوهش حاضر ابتدا فرایند پایدارسازی سطح جوشش در اثر رسوب نانوذرات SiO_2 با دو اندازه مختلف نانوذرات و تحت چرخه‌های متوالی و طولانی‌مدت جوشش - سردشدن 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 مورداستفاده برای انجام آزمایش‌های جوشش استخری در شکل ۱- الف) ارائه شده است. این دستگاه از اجزای متعددی شامل محفظه جوشش، کندانسور مسی مارپیچ دومسیره، بخش آزمون شامل بلوک مسی استوآن‌های، 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 ۲۰۰mm و قطر داخلی mm ۱۰۱/۶ 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 مورداستفاده از نوع K بوده و قابلیت اندازه‌گیری دما در بازه ۲۰۰- تا □۱۳۵۰+ را دارند. سیال عامل ابتدا توسط یک پیش گرمکن W ۱۰۰۰ 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 دومسیره درون یک محفظه عمودی از جنس استیل با قطر داخلی mm ۱۰۱/۶ و ارتفاع ۵۵۰mm 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[1] اندازه‌گیری شده و از طریق تنظیم

[1] Honeywell

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.573]

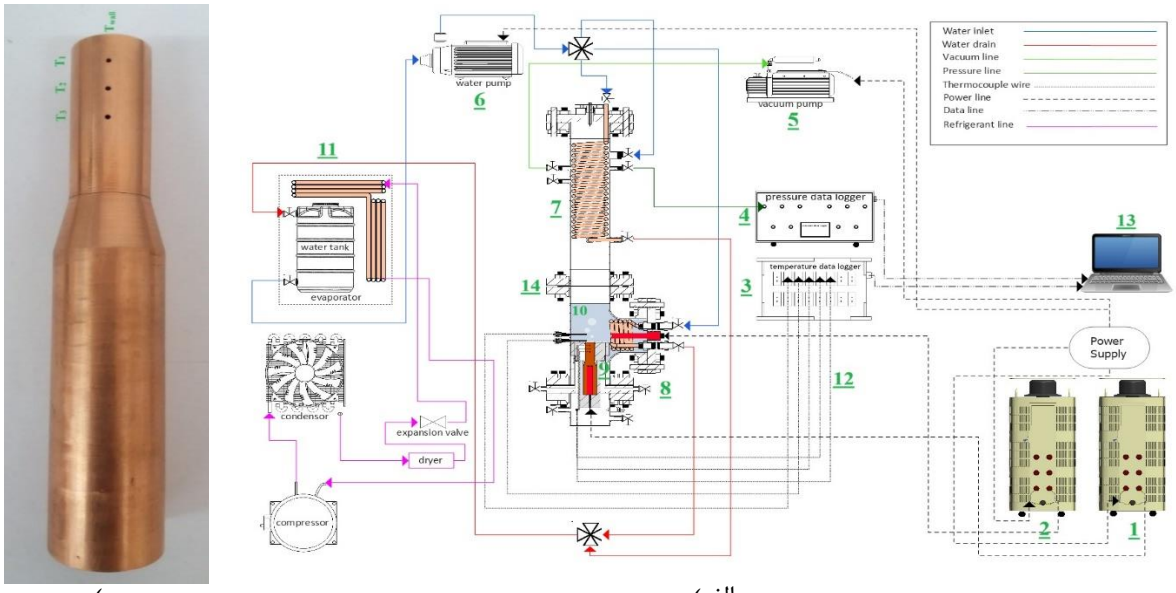
جدول ۱: خلاصه مطالعات پیشین در زمینه جوشش استخری با تأکید بر نوع و تکامل سطح، پایداری سطح جوشش و استفاده از سطوح متخلخل

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	۰/۱-۰۱ 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– ۰/۰۰۰۱ درصد حجمی	۱۳۳٪ افزایش شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت جوشش	رسوب نانوذرات روی سطح
ملاکار و همکاران [۱۷] (۲۰۲۳)،	HFE-7100	----	-----	افزایش زبری 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 زبری 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 پین فین‌های 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	اسپری‌کردن نانوذرات ذوب شده	۵۴٪/۶ افزایش شار حرارتی بحرانی، ۲۵٪/۷ کاهش ضریب انتقال حرارت جوشش	رسوب نانوذرات روی سطح/ جوشش طولانی‌مدت (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 دیونیزه	----	-----	۴/۴ برابر افزایش در شار حرارتی بحرانی، افزایش ضریب انتقال حرارت	استفاده از سطح متخلخل مسی
الفایلاکاوی و همکاران [۲۴] (۲۰۲۶)،	Diamond، MWCNT، GNP	-----	۰/۰۲۵، ۰/۰۱و 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	۲۰-۳۰، ۶۰-۷۰ nm	۰/۲-۰۱ درصد جرمی	افزایش شار حرارتی بحرانی با ایجاد سطح جوشش پایدار به میزان ۱۸٪ (۲۰-۳۰) و ۱۳٪ (۶۰-۷۰) / افزایش ضریب انتقال حرارت با غلظت و سایز نانوذرات	رسوب نانوسیال روی سطح / استفاده از سطح جوشش پایدار/ سیکل‌های مکرر جوشش/ جوشش طولانی‌مدت (۶۰-۵۰ ساعت)/ اما از سطح متخلخل استفاده نشده

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.573]

دبی آب خنک‌کننده عبوری از کندانسور و یک شیر تخلیه متصل به فشار اتمسفری کنترل می‌شود. کلیه داده‌های آزمایشگاهی شامل دما و فشار به‌صورت پیوسته توسط دیتالاگرها ثبت شده و در یک رایانه ذخیره و پردازش می‌شوند.



ب) الف)

شکل ۱: الف) شماتیک دستگاه آزمایش. ۱و۲) واریاک، ۳) دیتالاگر دما، ۴) دیتالاگر فشار، ۵) پمپ خلأ، ۶) پمپ آب‌خنک ساز، ۷) کندانسور، ۸) بلوک تفلون، ۹) بلوک مسی، ۱۰) سیال کاری، ۱۱) مجموعه چیلر، ۱۲) ترموکوپل‌ها، ۱۳) رایانه، ۱۴) محفظه جوشش، ب) تصویر بلوک مسی

۲-۲- بخش آزمون

شکل ۱- ب) بلوک مسی مورداستفاده در بخش آزمون را نشان می‌دهد. 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 اندازه‌گیری توزیع دما در بلوک مسی، سه ترموکوپل نوع K در سوراخ‌هایی با قطر ۱/۶ mm و عمق ۱۲/۷ mm که به‌صورت عمودی نسبت به محور مرکزی بلوک مسی ایجاد شده‌اند، نصب شده‌اند. نخستین ترموکوپل در فاصله ۱۰ mm از سطح جوشش قرار داشته و فاصله بین ترموکوپل‌های متوالی نیز برابر با ۱۰ mm در نظر گرفته شده است. به‌منظور اطمینان از انتقال حرارت مناسب و کاهش مقاومت حرارتی تماسی میان بلوک مسی و ترموکوپل‌ها، سوراخ‌های ترموکوپل‌ها با گریس حرارتی (دارای رسانایی حرارتی بیشتر از ((W/(m.k)) ۱/۲) پر شده‌اند. 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 موردنیاز سطح جوشش را تأمین می‌کند. دمای سطح جوشش و شار حرارتی بر اساس دماهای حالت پایدار اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل‌های T_1 تا T_3 محاسبه شده‌اند. در این محاسبات، توزیع دما در بلوک مسی خطی فرض شده و شار حرارتی سطح با استفاده از فرم یک‌بعدی قانون فوریه مطابق معادله (۱) محاسبه می‌شود.

$$q''_{Exp} = -(K_{cu}) * (\frac{dT}{dZ}) \quad (۱)$$

دراین‌رابطه، q''_{Exp} شار حرارتی، k_{cu} ضریب هدایت حرارتی مس و dT/dZ گرادیان دما هستند.

$$\frac{dT}{dz} = \frac{3\,(T_1) - 4\,(T_2) + (T_3)}{2\,(X_2)} \quad (۲)$$

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 می‌دهد. سپس دمای سطح جوشش T_{wall} از رابطه (۳) محاسبه می‌شود که در آن X_1 فاصله بین

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.573]

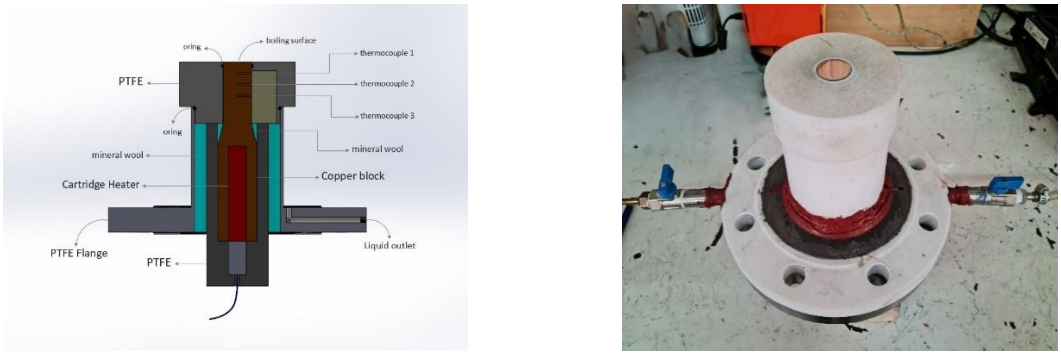
نقطه T_1 و سطح جوشش است. ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای با استفاده از قانون سرمایش نیوتن و مطابق با روابط (۴) و (۵) محاسبه شده است که در آن ΔT بیانگر دمای مافوق گرم سطح جوشش است.

$$T_{wall} = T_1 - (\frac{(q''_{Exp}) * (X_1)}{K_{cu}}) \quad (۳)$$

$$h_{nb} = \frac{q''_{Exp}}{\Delta T} \quad (۴)$$

$$\Delta T = T_{Wall} - T_{Sat} \quad (۵)$$

شکل ۲)، بلوک تفلن[2] 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 قابل‌جداسازی باشد تا فرایند نصب، تنظیم و نگه‌داری تجهیزات اندازه‌گیری تسهیل گردد. بخش سوم شامل یک لوله تفلونی استوانه‌های 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 مورداستفاده دارای ضریب هدایت حرارتی ۰/۰۴ W/(m·°C) بوده و تا دمای ۷۵۰°C 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.



شکل ۲: تصویر بلوک تفلنی و جزئیات آن

۳-۲- ساختار متخلخل لانه‌زنبوری

سطوح متخلخل لانه‌زنبوری که به‌صورت مونولیت‌های سرامیکی ساخته می‌شوند، به طور گسترده در تجهیزات صنعتی، به‌ویژه در خروجی لوله‌اگزوز خودروها و تجهیزات احتراقی، مورداستفاده 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 $SiO_2 \cong$ ۴۵٪، $Al_2O_3 \cong$ ۴۰٪، Mgo $\cong$ ۱۵٪ و $TiO_2 \cong$ ۱٪ 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[3] 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

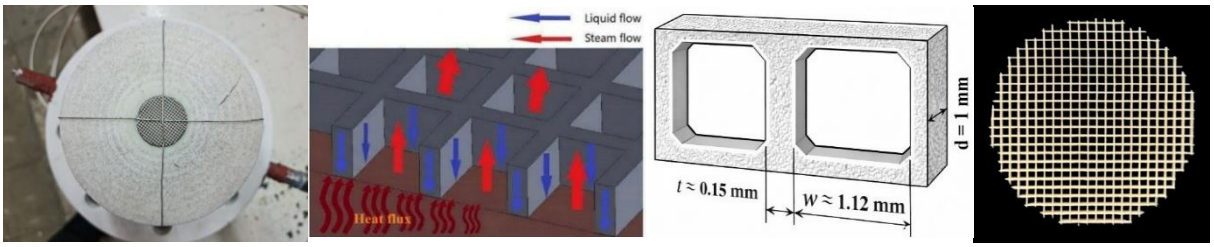
[2] Poly tetra fluoro ethylene (PTFE)

[3] Nucleation site

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.573]

گسترش نواحی خشک موجب افزایش شار حرارتی بحرانی می‌شوند. علاوه براین، سرامیک‌های مورداستفاده 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 به‌منظور 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.



الف) ب) ج) د)

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 مورداستفاده در این پژوهش با بهره‌گیری از روش سنتز دومرحله‌ای تهیه شده است. مشخصات فیزیکی اصلی نانوذرات مورداستفاده به‌همراه تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری[4] آن در جدول ۲) ارائه شده است. در فرایند تهیه نانوسیال، ابتدا مقدار موردنیاز از نانوذرات با استفاده از ترازوی دیجیتال بادقت ۰/۰۰۰۱ gr اندازه‌گیری می‌شود. سپس نانوذرات با آب دیونیزه مخلوط شده و به‌مدت چهار ساعت تحت هم‌زن مغناطیسی قرار می‌گیرند. در ادامه، به‌منظور بهبود پراکندگی ذرات و افزایش پایداری سوسپانسیون، نانوسیال تهیه شده به مدت چهار ساعت در حمام اولتراسونیک[5] با فرکانس ۴۰kHz و توان W ۶۵۰، در ۹۰٪ توان نامی قرار می‌گیرد. نانوسیالات حاصل در غلظت جرمی ۲٪ تهیه شدند. باتوجه‌به 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 موردنیاز برای تهیه نانوسیال را تعیین می‌کنند.

$$\emptyset_{np} = \frac{M_{Sio2}}{M_{Sio2}+M_{water}} * 100 \quad (۶)$$

$$M_{np} = \rho_{np} * V_{np} \quad (۷)$$

در اینجا، $\emptyset_{np}$ 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 به‌صورت یکنواخت حفظ شده و ته‌نشینی یا تجمع قابل‌توجهی رخ ندهد. ازاین‌رو، 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[6] استوار است.

[4] Transmission electron microscopy (TEM)

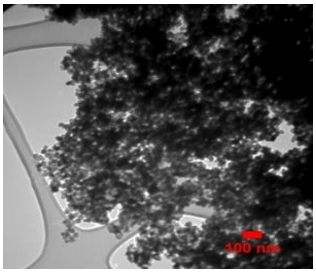
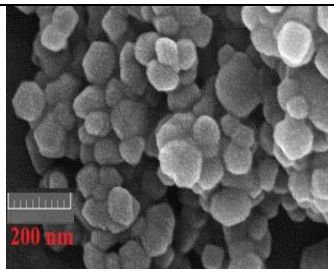
[5] Ultrasonic bath tank (FUNGILAB S.A., Spain)

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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.573]

جدول ۲: مشخصات فیزیکی و تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نانوذره مورداستفاده 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 به‌مدت دو هفته در دمای اتاق نگه‌داری شدند. در طول این مدت، نمونه‌ها به‌صورت دوره‌ای و منظم از نظر احتمال تشکیل رسوب نانوذرات، مورد بررسی بصری قرار گرفتند. مطابق شکل ۴)، در هیچ‌یک از نمونه‌ها رسوب قابل‌توجهی 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 ۴۵± mV به‌عنوان نانوسیالات با پایداری بالا در نظر گرفته می‌شوند، درحالی‌که مقادیر در بازه ۳۰± تا ۴۰± mV نشان‌دهنده پایداری متوسط هستند [۲۶]، [۲۷]. مقادیر پتانسیل زتای اندازه‌گیری شده در فواصل زمانی ۷، ۱۴ و ۲۱ روز پس از تهیه نانوسیال به‌ترتیب برابر با ۴۳/۸-، ۳۹/۸- و ۳۷/۶ mV- به‌دست‌آمده 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 سوسپانسیون جلوگیری شود.

۴-۲- نحوه انجام آزمایش:

در بسیاری از کاربردهای صنعتی، سامانه‌های جوشش به‌طور دوره‌ای از مدار خارج شده و پس از توقف، سطح جوشش به‌طور طبیعی تا دمای محیط سرد می‌شود. تکرار این چرخه‌های جوشش - سردشدن می‌تواند منجر به تغییر ویژگی‌های سطح و ایجاد الگوهای متفاوت رسوب‌گذاری گردد. به‌منظور شبیه‌سازی این شرایط، در این پژوهش هر آزمایش پس از ۱۰ ساعت و ۳۰ دقیقه جوشش متوقف شده و سطح جوشش بدون هیچ‌گونه مداخله خارجی تا دمای محیط سرد می‌شود. هم‌چنین به‌منظور 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 به‌منظور ایجاد شرایط پایدار به‌صورت تدریجی و در گام‌های ۱۰ ولتی افزایش می‌یابد تا شرایط شار حرارتی بحرانی حاصل شود. دما و فشار محفظه به‌ترتیب توسط ترموکوپل‌ها و حسگر فشار اندازه‌گیری شده و داده‌ها به‌طور پیوسته توسط دیتالاگرها 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 = ۰/۰۱ K/min) به مدت حداقل ۱۰ min می‌باشد.

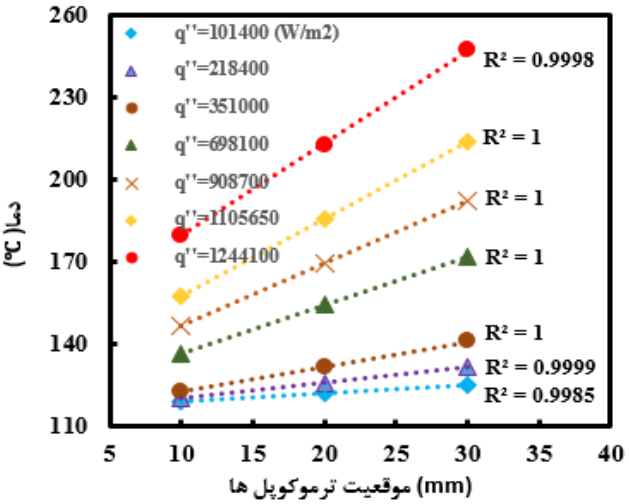
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.573]

۲-۵- پردازش داده‌ها و تحلیل خطا

۲-۵-۱- توزیع دما در کارتریج مسی

توزیع دما برای مقادیر مختلف شار حرارتی اعمالی به بلوک مسی، به‌صورت 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.



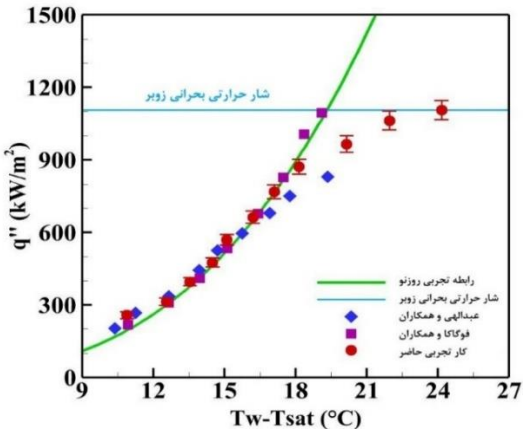
شکل ۵: الف) توزیع دمای خطی



شکل ۴: تست پایداری نانوسیالات در غلظت ۲٪ جرمی

۲-۶- اعتبارسنجی داده‌های آزمایشگاهی

به‌منظور اعتبارسنجی نتایج تجربی، داده‌های آزمایشگاهی با نتایج تجربی روزنو [۲۸] و هم‌چنین نتایج تجربی در مطالعات عبدالهی [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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.573]

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 حراموا به ترتیب ۰/۱۳٪ و ۰/۲۶٪ 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.

$$q'' = \left(\frac{C_{pf}\,\Delta T_{sat}}{\left(\frac{C_{pf}\,\mu_f}{K_f}\right)^{n}\, h_{fg}\, C_{sf}}\right)^{3/0303} \left(\frac{\mu_f\, h_{fg}}{\sqrt{\frac{\sigma}{g\,(\rho_f-\rho_g)}}}\right) \quad (۸)$$

دراین‌رابطه، q'' شار حرارتی، C_{pf} ظرفیت گرمایی ویژه مایع، h_{fg} گرمای نهان تبخیر، $\Delta Tsat$ اختلاف دمای بین سطح جوشش و دمای اشباع و Csf ثابت وابسته به ترکیب سطح و سیال (برابر با ۰/۰۱۲۸) هستند. هم‌چنین μf 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.

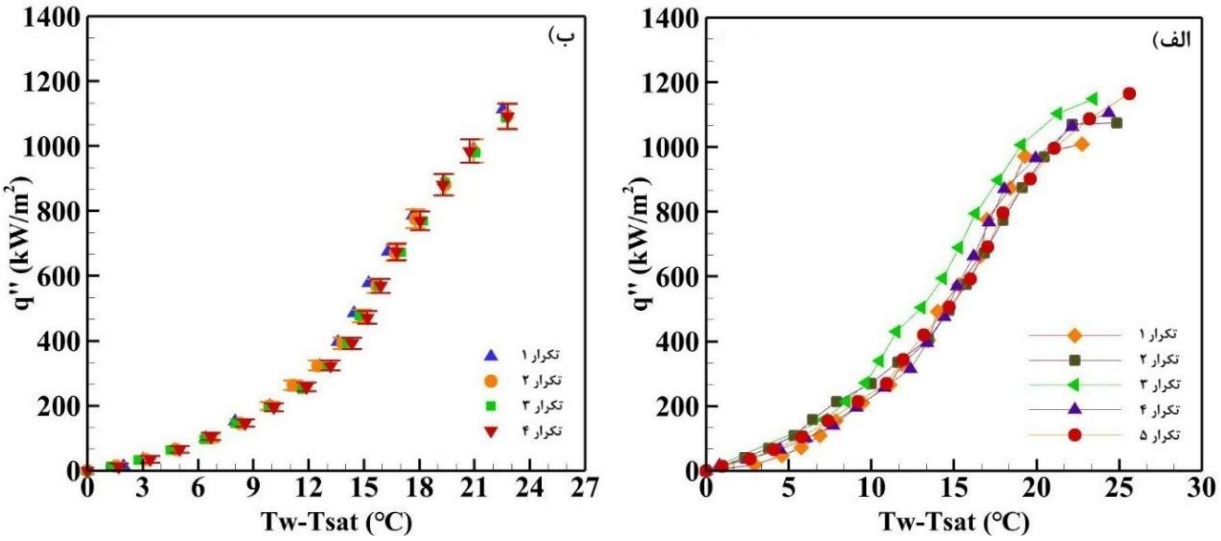
$$q''_{Critical} = K\,\rho_g\,h_{fg}\left[\frac{g\,\sigma\,(\rho_f-\rho_g)}{\rho_g^2}\right]^{1/4}\left[\frac{\rho_f+\rho_g}{\rho_f}\right]^{1/2} \quad (۹)$$

$$q''_{Critical} = \rho_g\,h_{fg}\left[\frac{g\,\sigma\,(\rho_f-\rho_g)}{\rho_g^2}\right]^{\left(\frac{1}{4}\right)} * \left[\frac{\frac{\rho_f+\rho_g}{\rho_g}}{\left[\left(\left(\frac{11}{16}\right)*\left(\frac{\rho_f}{\rho_g}\right)\right)+1\right]^{\left(\frac{3}{5}\right)}}\right]^{\left(\frac{5}{16}\right)} * \left[\frac{A_g}{A_w}\right]^{\left(\frac{5}{8}\right)} * \left[1-\frac{A_g}{A_w}\right]^{\left(\frac{5}{16}\right)} * \left[\frac{\pi^4}{2^{11}*9}\right]^{\left(\frac{1}{16}\right)} \quad (۱۰)$$

$$\frac{A_g}{A_w} = 0{,}0584\,\left(\frac{\rho_g}{\rho_f}\right)^{\left(\frac{1}{5}\right)} \quad (۱۱)$$

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

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.573]

بااین‌حال، ازآن‌جاکه فرایند انتقال حرارت در جوشش استخری به‌شدت به ویژگی‌های ریزساختاری سطح وابسته است، سنباده‌کاری مجدد سطح پیش از هر آزمایش لزوماً منجر به ایجاد شرایط سطحی پایدار و یکنواخت برای تحلیل‌های مقایسه‌ای نمی‌شود. ازاین‌رو، استفاده از سطوحی با زبری مشخص، کنترل شده و ثابت در طول انجام آزمایش‌ها، برای تضمین قابلیت مقایسه داده‌ها امری ضروری تلقی می‌شود. به‌منظور بررسی اثر تغییرات سطح ناشی از فرایند سنباده‌کاری، جهت حرکت سنباده، تعداد رفت و برگشت‌ها و میزان فشار اعمالی در تمامی آزمایش‌ها ثابت نگه داشته شد. همان‌گونه که در شکل ۶-الف) مشاهده می‌شود، سطح جوشش در پنج نوبت متوالی سنباده‌کاری 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 بیش‌ترین 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 قابل‌توجه بیان‌گر آن است که حتی با کنترل دقیق تمامی پارامترهای سنباده‌کاری، باز تولید یک زبری سطح کاملاً مشابه امکان‌پذیر نبوده و این مسئله می‌تواند منجر به نوسانات محسوس در داده‌های تجربی شود. به‌منظور رفع این محدودیت و ارزیابی دقیق تکرارپذیری دستگاه آزمایشگاهی حاضر، سطح جوشش تنها پیش از نخستین آزمایش سنباده‌کاری شد و آزمایش‌های بعدی با استفاده از آب دیونیزه، بدون انجام سنباده‌کاری مجدد، بر روی همان سطح اکسید شده مسی انجام پذیرفت. نتایج این مجموعه آزمایش‌ها که در شکل ۶-ب) ارائه شده‌اند، نشان می‌دهد که بیش‌ترین انحراف مشاهده شده در چهار آزمایش متوالی تنها ۰/۵۷٪ بوده است. این مقدار ناچیز انحراف، بیان‌گر یکنواختی مناسب سطح جوشش و تکرارپذیری بسیار بالای داده‌های تجربی به‌دست‌آمده از دستگاه آزمایشگاهی حاضر است. در شرایط واقعی بهره‌برداری صنعتی، انجام سنباده‌کاری یا پرداخت سطح جوشش پیش از هر بار راه‌اندازی سامانه عملاً امکان‌پذیر نیست. در اغلب کاربردها، سطح جوشش تنها در مرحله اولیه آماده‌سازی پرداخت شده و سپس چرخه‌های متوالی جوشش - سردشدن بر روی همان سطح، بدون اعمال هرگونه عملیات پرداخت مجدد، ادامه می‌یابد. با تبعیت از این رویکرد عملی، در پژوهش حاضر نیز سطح جوشش تنها پیش از انجام آزمایش اولیه سنباده‌کاری شد و تمامی آزمایش‌های بعدی بر روی همان سطح و بدون سنباده‌کاری مجدد انجام گرفت. در نتیجه این فرایند، سطح جوشش در طول تکرار آزمایش‌ها به‌طور طبیعی دچار اکسیداسیون و رسوب‌گذاری شد و ویژگی‌های سطحی آن صرفاً تحت‌تأثیر چرخه‌های متوالی جوشش - سردشدن و بدون هیچ‌گونه مداخله خارجی تغییر یافت. اتخاذ این رویکرد موجب می‌شود داده‌های تجربی حاصل، رفتار واقعی سطوح در شرایط کاری صنعتی را بادقت بیش‌تری بازتاب داده و از نظر فیزیکی و کاربردی، تطابق بالاتری با شرایط بهره‌برداری واقعی داشته باشند.

۸-۲- تحلیل عدم قطعیت

جدول ۳) خلاصه‌ای از عدم قطعیت‌های اندازه‌گیری شناسایی شده در این پژوهش را ارائه می‌دهد. رسانایی حرارتی مس در دماهای ۱۰۰ و □ ۳۰۰ به‌ترتیب برابر با ۳۹۵/۸۹ و ۳۸۲/۸۹ W/(m.K) گزارش شده است [۳۲]. در آزمایش‌های جوشش هسته‌ای، فرض شد که رسانایی حرارتی مس ثابت باقی می‌ماند. برای این فرض، عدم قطعیتی برابر با ±۳,۲٪ 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 اندازه‌گیری

پارامتر	عدم قطعیت
دمای ترموکوپل‌ها	±0.1 K
سوراخ‌کاری (موقعیت ترموکوپل‌ها)	±0.1 mm
ولتاژ	±1 V
جریان	±0.1 A

عدم قطعیت‌های 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 می‌دهد که بیشینه عدم قطعیت شار حرارتی، دمای مافوق گرم و ضریب انتقال حرارت جوشش به ترتیب برابر با ۴/۴٪، ۴٪ و ۵/۵٪ است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.573]

$$\delta q''_{Exp} = \sqrt{(\frac{\partial q''}{\partial k_{cu}}.\delta k_{cu})^2 + (\frac{\partial q''}{\partial T_1}.\delta T_1)^2 + (\frac{\partial q''}{\partial T_2}.\delta T_2)^2 + (\frac{\partial q''}{\partial T_3}.\delta T_3)^2 + (\frac{\partial q''}{\partial \Delta x}.\delta \Delta x)^2} \quad (۱۲)$$

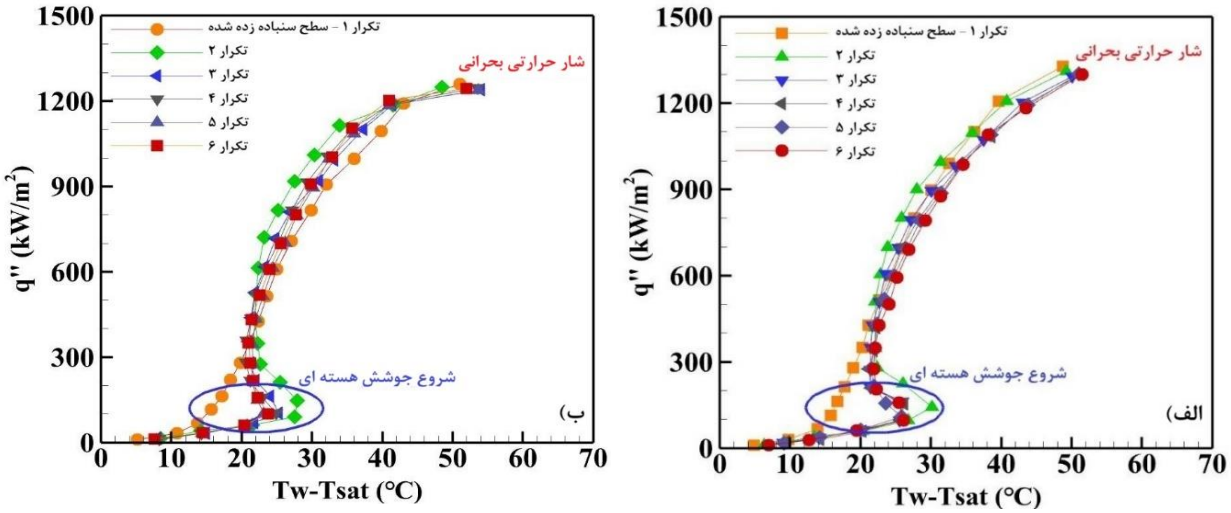
$$\delta \Delta T_{sat} = \sqrt{(\frac{\partial \Delta T_{sat}}{\partial q''}.\delta q'')^2 + (\frac{\partial \Delta T_{sat}}{\partial k_{cu}}.\delta k_{cu})^2 + (\frac{\partial \Delta T_{sat}}{\partial \Delta x}.\delta \Delta x)^2 + (\frac{\partial \Delta T_{sat}}{\partial T_{sat}}.\delta T_{sat})^2 + (\frac{\partial \Delta T_{sat}}{\partial T_1}.\delta T_1)^2} \quad (۱۳)$$

$$\delta h_{nb} = \sqrt{(\frac{\partial h}{\partial q''_{Exp}}.\delta q''_{Exp})^2 + (\frac{\partial h}{\partial T_{wall}}.\delta T_{wall})^2 + (\frac{\partial h}{\partial T_{sat}}.\delta T_{sat})^2} \quad (۱۴)$$

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 - سردشدن 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 سه‌چرخه پایانی جوشش - سردشدن محاسبه می‌شوند، کم‌تر از ۲±٪ باشند. براساس نتایج گزارش شده توسط حیدری و همکاران [۹] اعمال چرخه‌های طولانی‌مدت و مکرر جوشش - سردشدن در نانوسیال SiO_2 با غلظت جرمی ۲٪ 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. 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 - سردشدن بدون اعمال هرگونه عملیات پرداخت مجدد، تکرار می‌شوند.



شکل ۷: منحنی‌های جوشش نانوسیال‌های ۲٪ جرمی [۹]، الف) ۳۰-۲۰ nm، ب) ۷۰-۶۰ nm

نتایج حاصل از این چرخه‌ها برای نانوسیال با اندازه نانوذرات ۳۰-۲۰ و ۷۰-۶۰nm 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 - سردشدن تغییر محسوسی نشان نداده و رفتار

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.573]

جوشش در غلظت ۲٪ جرمی به یک حالت پایدار می‌رسد. مقدار شار حرارتی بحرانی برای نانوذرات ۳۰-۲۰ nm برابر با kW/m^2 ۱۳۰۰ و برای نانوذرات ۷۰-۶۰ nm برابر با kW/m^2 ۱۲۵۰ اندازه‌گیری شد. این مقادیر به‌ترتیب با انحراف معیار ۰/۲۷٪ و ۰/۲۵٪ و در دمای مافوق گرم حدود □ ۵۲ با انحراف معیار ۱/۰۹٪ و ۱/۴۴٪ رخ داده‌اند. علاوه بر پایداری مناسب، سطوح پایدار ایجاد شده با نانوسیال ۲٪ موجب افزایش قابل‌توجه مقدار شار حرارتی بحرانی نسبت به آب دیونیزه شدند، به‌طوری‌که این افزایش برای نانوذرات با اندازه ۳۰-۲۰ و ۷۰-۶۰ nm به‌ترتیب حدود ۱۸٪ و ۱۳٪ به‌دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که در غلظت‌های بالای نانوسیال، لایه رسوبی نانوذرات به‌سرعت به یک ساختار متخلخل پایدار تبدیل می‌شود. بااین‌حال، 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.

۲-۳- شروع انتقال حرارت جوشش هسته‌ای[7]

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 به‌طور محسوسی افزایش‌یافته و از رفتار تقریباً خطی مشخصه ناحیه همرفت طبیعی انحراف پیدا می‌کند. بلافاصله پس از وقوع جوشش هسته‌ای، افزایش ناگهانی نرخ تولید و جداشدن حباب‌ها منجر به بهبود تبخیر سطحی و افزایش موقتی ضریب انتقال حرارت می‌شود که این پدیده به‌صورت 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 - سردشدن، وقوع نقطه شروع جوشش هسته‌ای به‌طور قابل‌توجهی به تأخیر افتاده است، به‌گونه‌ای که برای نانوسیال با نانوذرات ۳۰-۲۰ nm دمای مافوق گرم از □ ۱۴/۱ در اولین چرخه به حدود □ ۲۵/۱۵ در آخرین چرخه معادل با ۸۵٪ افزایش می‌یابد. درحالی‌که برای نانوسیال با نانوذرات ۷۰-۶۰ nm دمای مافوق گرم از □ ۱۳/۶ در اولین چرخه به حدود □ ۲۳/۸ در آخرین چرخه معادل با ۷۵٪ افزایش می‌یابد.

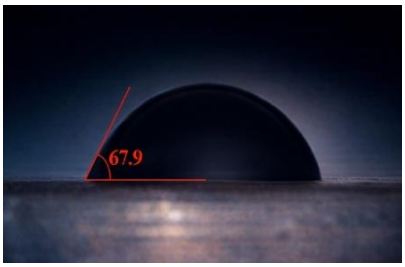
۳-۳- ترشوندگی سطح جوشش

ترشوندگی سطح جوشش یکی از عوامل مهم در تعیین مقدار شار حرارتی بحرانی در فرایند جوشش است. در رژیم جوشش هسته‌ای، پس از جداشدن 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. همان‌گونه که در شکل ۸-الف) نشان‌داده‌شده است، زاویه تماس آب دیونیزه بر روی سطح مسی سنباده خورده حدود $67/9^{\circ}$ است. رسوب‌گذاری نانوذرات باعث کاهش قابل‌توجه زاویه تماس شده (شکل ۸-ب) و آن را به حدود صفر درجه کاهش می‌دهد، به‌طوری‌که سطح به‌شدت آب‌دوست می‌شود. در این حالت، قطره مایع به‌سرعت بر روی سطح جوشش پخش شده و بخش قابل‌توجهی از آن را می‌پوشاند. این بهبود ترشوندگی که ناشی از افزایش خاصیت موئینگی سطح به‌دلیل 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.

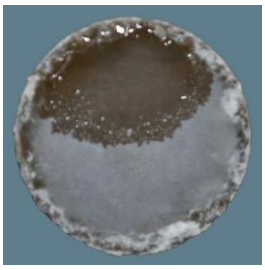
[7] Onset of nucleate boiling (ONB)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.573]



الف)

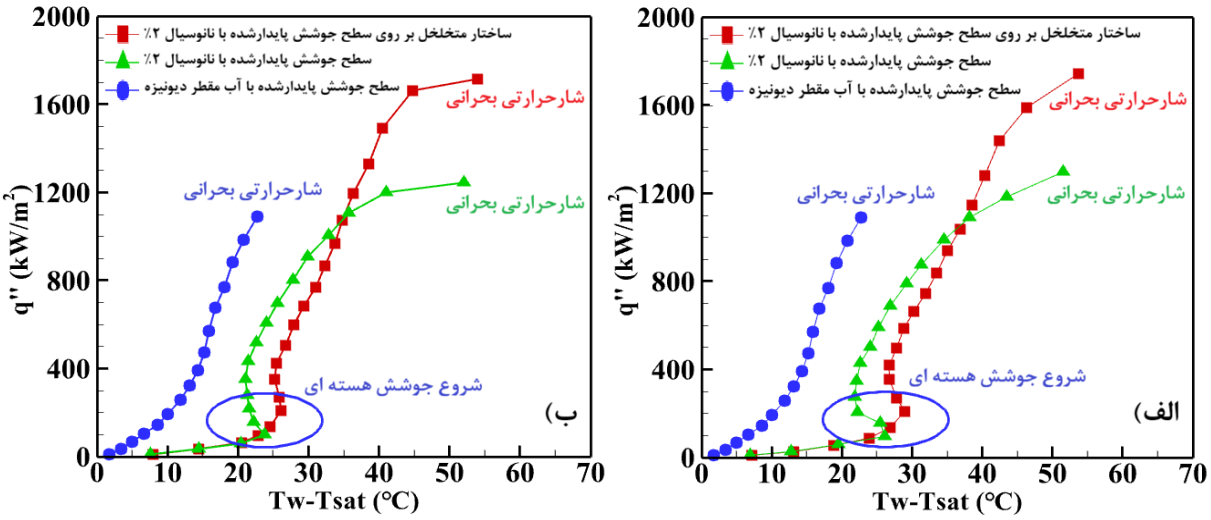


ب)

شکل ۸: زاویه تماس قبل و بعد از آزمایش جوشش استخری. الف) آب دیونیزه روی سطح سنباده خورده = ۶۷,۹°، ب) آب دیونیزه روی سطح پایدار با نانوسیال ۲٪ جرمی

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

باتوجه‌به 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. ازاین‌رو در مطالعه تجربی حاضر نیز همین ضخامت برای ساختار متخلخل مورداستفاده قرار گرفته است. باتوجه‌به این‌که در بخش قبل نشان داده شد سطح جوشش با نانوسیال SiO_2 با غلظت ۲٪ جرمی پس از اعمال چرخه‌های متوالی جوشش - سردشدن 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 ۷۰-۶۰ nm به ترتیب برابر با ۱۷۴۱/۹ و ۱۷۱۶/۲ kW/m^2 اندازه‌گیری شد، درحالی‌که دمای مافوق گرم متناظر با این مقادیر حدود □ ۵۴ می‌باشد.

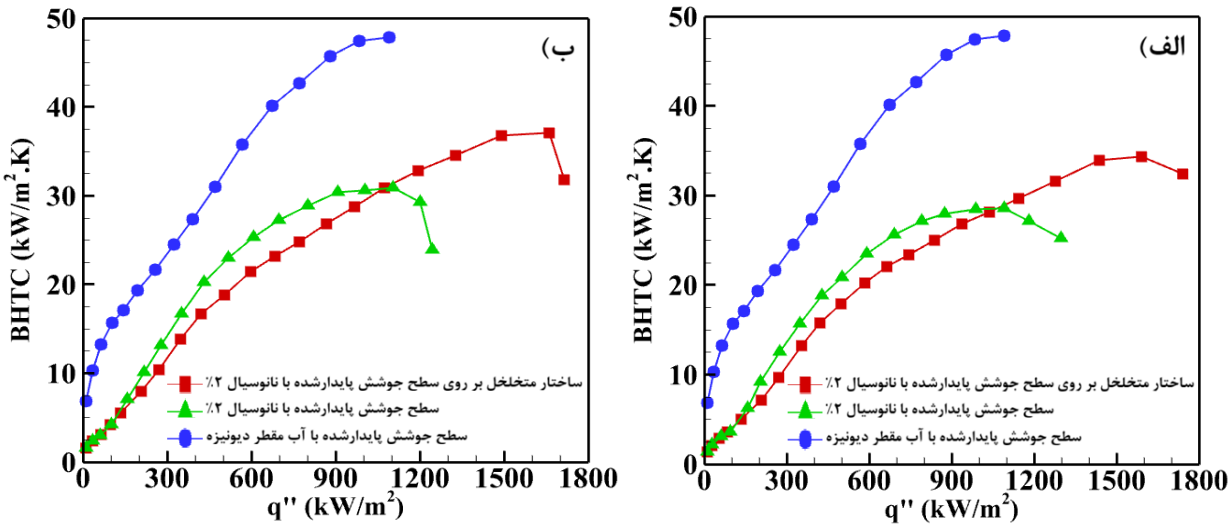


شکل ۹: منحنی‌های شار حرارتی سطح جوشش پایدار شده با نانوسیال‌های ۲٪ جرمی و متصل به ساختار متخلخل لانه‌زنبوری، الف) ۳۰-۲۰ nm، ب) ۷۰-۶۰ nm

نتایج نشان داد اتصال سطح متخلخل لانه‌زنبوری به سطح جوشش پایدار باعث افزایش قابل‌توجه شار حرارتی بحرانی می‌شود. این افزایش نسبت به سطح پایدار ۲٪ جرمی بدون ساختار متخلخل و آب دیونیزه به ترتیب ۳۴/۱٪ و ۵۷/۵٪ برای نانوسیال دارای نانوذرات ۳۰-۲۰ nm و ۳۷/۹٪ و ۵۵/۲٪ برای نانوسیال دارای نانوذرات ۷۰-۶۰ nm می‌باشد. علاوه براین، استفاده از ساختار متخلخل موجب تأخیر در شروع جوشش هسته‌ای نیز شده است. به‌عبارت‌دیگر، دمای لازم برای شروع جوشش هسته‌ای در حضور این ساختار افزایش می‌یابد. برای نانوسیال با اندازه نانوذرات ۳۰-۲۰ nm دمای شروع جوشش هسته‌ای از □ ۲۶/۱۵ به مقدار □ ۲۸/۹ رسیده که معادل ۱۰/۵٪ افزایش را نشان می‌دهد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.573]



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

به‌طور مشابه برای نانوسیال با اندازه نانوذرات ۷۰-۶۰nm دمای شروع جوشش هسته‌ای از □ ۲۳/۸ به مقدار □ ۲۶/۱ رسیده که معادل ۹/۷٪ افزایش را نشان می‌دهد. این افزایش به‌علت 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 و ۷۰-۶۰ 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.

۱-۴- 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 طولانی‌مدت جوشش - سردشدن 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 قابل‌تکرار 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 قابل‌توجه 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 طولانی‌مدت جوشش - سردشدن به پایداری فیزیکی و حرارتی می‌رسد. مقدار شار حرارتی بحرانی برای نانوسیال با اندازه نانوذرات ۳۰-۲۰ nm و برای نانوسیال با اندازه نانوذرات ۷۰-۶۰ nm به ترتیب در حدود ۱۳۰۰ و ۱۲۵۰ kW/m^2 با انحراف معیار ۰/۲۷٪ و ۰/۲۵٪ و در دمای مافوق گرم حدود □ 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 ۳۰-۲۰ nm و برای نانوسیال با اندازه نانوذرات ۷۰-۶۰ nm به ترتیب موجب افزایش حدود ۱۸٪ و ۱۳٪ شار حرارتی بحرانی نسبت به آب دیونیزه می‌شود.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]
[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.573]

- 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 nm ۲۰-۳۰ و ۳۷/۹٪ و ۵۵/۲٪ برای نانوسیال با اندازه نانوذرات nm ۶۰-۷۰ می‌شود.
- اتصال ساختار متخلخل لانه‌زنبوری به سطح جوشش پایدار شده توسط نانوسیال ۲٪ جرمی، ضریب انتقال حرارت جوشش را برای نانوسیال با اندازه نانوذرات nm۲۰-۳۰ و برای نانوسیال با اندازه نانوذرات nm ۶۰-۷۰ 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 گرم بیش‌تر 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 ۳۰-۲۰ و nm ۶۰-۷۰ 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 موردتوجه قرار گیرد. آزمایش‌ها با نانوسیال SiO_2، در مقیاس آزمایشگاهی و طی چرخه‌های مکرر جوشش - سردشدن با مدت‌زمان ۶۰-۵۰ ساعت انجام شده است. علاوه بر این، در طول چرخه‌های متوالی و طولانی‌مدت، احتمال رسوب تدریجی نانوذرات در داخل منافذ ساختار متخلخل وجود دارد. تجمع این رسوبات می‌تواند به‌مرورزمان 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 طولانی‌مدت یا مقیاس‌های عملیاتی واقعی کاهش یابد. بنابراین، اگرچه نتایج این پژوهش نشان‌دهنده بهبود قابل‌توجه 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 طولانی‌تر جوشش - سردشدن، نیازمند مطالعات تجربی بیش‌تری در آینده خواهد بود.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.573]

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	Ø
شتاب گرانشی، (m/s^2)	g	چگالی، (kg/m^3)	ρ
ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، ($kW/(m^2.K)$)	h	کشش سطحی، (N/m)	σ
گرمای نهان تبخیر، (kJ/kg)	h_{fg}	زیرنویس‌ها	
رسانایی حرارتی، ((W/(m·K)	k	موقعیت ترموکوپل‌ها	1-3
جرم نانوذرات، (kg)	M	جوشش	b
شروع جوشش هسته‌ای	ONB	مس	cu
شار حرارتی، (kW/m^2)	q''	آزمایشگاهی	EXP
دما، (°C)	T	مایع	f
ضخامت دیواره ساختار متخلخل، (mm)	t	بخار	g
حجم، (m^3)	V	جوشش هسته‌ای	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.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.573]

[9] Mohammad G.Heidari, Masoud. Zareh, Cyrus. Aghanajafi, M. Behshad. Shafii, "Effects of successive pool boiling cycles of SiO_2 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 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.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.573]

[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.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.573]

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

Mohammad Ghorbani[1], Masoud Zareh[1,*], Cyrus Aghanajafi[2], Mohammad Behshad Shafii[3]

[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 SiO_2 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**.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-06]

[DOI: 10.82377/jeed.2026.w.573]