



بررسی تجربی جوشش استخری نانوسیال اکسید مس روی سطح تخت مسی و اندازه‌گیری شار حرارت بحرانی

امیراحمد جامی‌الاحمدی، احمد نظری*، محمد حسن کیهانی

دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۰
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۲/۰۱
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۳۱
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۷/۰۸

کلمات کلیدی:

جوشش استخری
نانوسیال اکسیدمس-آب
شار حرارت بحرانی
نانوپوشش

خلاصه: پدیده جوشش به دلیل بزرگتر بودن حرارت نهان تبخیر نسبت به حرارت محسوس و در نتیجه نرخ انتقال حرارت بالا، یکی از پرکاربردترین فرآیندهای انتقال حرارت در صنعت به شمار می‌رود. اما استفاده از فرآیند جوشش در شار حرارتی بالا محدودیت امکان وقوع جوشش فیلمی در نقطه شار حرارت بحرانی را دارد. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در زمینه جوشش استخری نانوسیال برای افزایش شار حرارت بحرانی انجام شده و بعضاً نتایج متناقضی در این مورد ارائه شده است. این پژوهش با هدف درک رفتار نانوسیال و تأثیر نانوپوشش ایجاد شده در طی فرآیند انتقال حرارت جوشش استخری بر شار حرارت بحرانی انجام شده است. بنابراین از ترکیب نانوذرات اکسید مس/آب با اندازه نانوذرات ۴۰ و غلظت‌های (mg/l) ۱-۱۰۰۰ و هیتر مسی با سطح تخت و قطر ۱۰ mm و زبری سطح ۷/۵ nm استفاده شده است. اندازه‌گیری شار حرارت بحرانی در غلظت‌های مختلف نانوسیال نشان داد که شار حرارت بحرانی با افزایش غلظت تا ۱۰۰ mg/l حداکثر به میزان ۹۲٪ نسبت به آب دیونیزه افزایش می‌یابد. بعد از جوشش نانوسیال، برای بررسی خواص سطوح و نانوپوشش ایجاد شده روی سطح، اندازه‌گیری‌های میکروسکوپ نیروی اتمی، میکروسکوپ الکترونی روبشی و اندازه‌گیری زاویه تماس سطح روی نمونه‌ها انجام شده است. نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت زبری و اثر منفی افزایش ضخامت بر افزایش شار حرارت بحرانی می‌باشد.

۱- مقدمه

جوشش یکی از فرآیندهای بسیار پیچیده در علوم مهندسی می‌باشد. به دلیل بزرگ بودن گرمای نهان تبخیر سیال، در طی فرآیند جوشش، انرژی زیادی در کمترین اختلاف دما سطح با سیال از سطح دفع می‌شود. این ویژگی مهم جوشش در بسیاری از کاربردهای صنعتی مانند تهویه مطبوع، تبرید، سامانه‌های تولید توان، رآکتورهای هسته‌ای، مدیریت گرمایی هواپیما و فضاپیما و سامانه خنک‌کاری دستگاه‌های الکترونیکی با قدرت بالا استفاده می‌شود.

هنگامی که شار حرارت ورودی به سطح از یک مقدار معین تجاوز کند، از به هم پیوستن حباب‌های کوچک تولید شده در هسته‌زها^۱، حباب‌های بزرگ‌تری ایجاد می‌شود که روی سطح را می‌پوشاند و از انتقال حرارت بین سطح و سیال جلوگیری می‌کند. در این حالت به دلیل کوچک‌تر بودن ضریب انتقال حرارت حباب بخار در مقایسه با مایع، دمای سطح به سرعت بالا می‌رود و امکان ذوب شدن یا آسیب

دیدن سطح وجود دارد. مقدار شار حرارت در این لحظه، شار حرارت بحرانی^۲ نامیده می‌شود. بنابراین افزایش شار حرارت بحرانی باعث به تاخیر افتادن وقوع جوشش فیلمی و همچنین افزایش نرخ انتقال حرارت در سامانه خنک‌کاری در تجهیزاتی که دارای شار حرارت بالائی هستند خواهد شد [۱]. یکی از تکنیک‌های بهبود انتقال حرارت در جوشش و بالا بردن شار حرارت بحرانی، افزودن نانوذرات به سیال عامل است. بنابراین هدف از این پژوهش، درک بیشتر رفتار حرارتی نانوسیال در فرآیند جوشش استخری و تأثیر آن روی شار حرارت بحرانی است.

نانوسیال اولین بار توسط چویی در سال ۱۹۹۵ مورد استفاده قرار گرفت [۲]. این سیال با اضافه کردن پودر ذرات جامد با اندازه ۱-۱۰۰ نانومتر به سیال عامل پایه که در فاز مایع است، ساخته می‌شود. جوشش نانوسیال از سال ۲۰۰۳ مطرح و به یک حوضه مهم پژوهش در نانوسیال تبدیل شد. یو و همکاران [۳] شار حرارتی

1 Nucleation sites

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: anazari@shahroodut.ac.ir

2 Critical Heat Flux



پوشش ذرات، مقدار انتقال حرارت و شار حرارت بحرانی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. بیشترین ضریب انتقال حرارت برای پوشش $67 \mu\text{m}$ و ضخامت $296 \mu\text{m}$ برابر 400 K.kW/m^2 اندازه‌گیری شد. که تقریباً ۸ برابر ضریب انتقال حرارت مس بدون پوشش است. و بیشترین مقدار شار حرارت بحرانی $2/1 \text{ MW/m}^2$ برای پوشش با ذرات $67 \mu\text{m}$ و ضخامت $428 \mu\text{m}$ اندازه‌گیری شد. که تقریباً دو برابر مقدار شار حرارت بحرانی سطح مس بدون پوشش است. آن‌ها نتیجه گرفتند، به طور کلی با افزایش اندازه ذرات ضریب انتقال حرارت و شار حرارت بحرانی افزایش می‌یابد.

دادجو و همکاران [۸] مطالعات تجربی جوشش استخری نانوسیال آب-سیلیکون دی اکسید انجام دادند و افزایش شار حرارت بحرانی در غلظت‌های کمتر از $0/01$ درصد حجمی را نسبت به آب خالص گزارش کردند. دلیل این افزایش مربوط به افزایش تعداد هسته‌زاهای تولید حباب، ناشی از افزایش زبری سطح که حاصل از رسوب نانوذرات بود، اعلام شد.

نظری و همکاران [۱۰ و ۹] از فرایند پوشش‌دهی الکتروشیمیایی به نام آنودایز برای ایجاد پوشش نانو ساختار متخلخل اکسید آلومینیوم روی سطح تخت نمونه‌های آلومینیومی استفاده کردند. در این مرحله با کنترل پارامترهای آنودایز مانند دما و ولتاژ و استفاده از محلول‌های الکترولیت اسیدی مختلف، نانو ساختارهای متخلخل با اندازه حفره‌های متفاوت روی سطح نمونه‌های آلومینیومی ایجاد نموده و سپس آزمایش جوشش استخری با آب مقطر روی آن‌ها انجام دادند. نتایج به‌دست آمده در این آزمایش نشان دادند که استفاده از نمونه‌های آنودایز شده باعث افزایش ضریب انتقال حرارت و شار حرارت بحرانی می‌شود. بطوریکه با افزایش قطر حفره‌ها ضریب انتقال حرارت افزایش و شار حرارت بحرانی کاهش می‌یابد. نتیجه مهم دیگر تغییرات خطی شار حرارت بحرانی با زاویه تماس سطح است. بطوریکه با افزایش زاویه تماس شار حرارت بحرانی به صورت خطی کاهش می‌یابد.

نظری و همکاران [۱۱] آزمایش جوشش استخری نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با غلظت‌های کم نانوذرات حداکثر تا 1000 mg/l روی نمونه‌های آلومینیومی با سطح صاف و بدون پوشش انجام دادند. نتایج به‌دست آمده از آزمایش نشان داد که استفاده از نانوسیال به طور کلی باعث افزایش شار حرارت بحرانی و کاهش ضریب انتقال حرارت جوشش می‌شود. و در غلظت حدود 100 mg/l شار حرارت بحرانی

بحرانی جوشش استخری روی سطح هیتر مسی تخت مربع شکل با نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در فشار 20 kPa را اندازه گرفتند و اثر غلظت نانوذرات بر شار حرارت بحرانی بررسی کردند. در سیال با غلظت 50 mg/l نانوذرات اکسید آلومینیوم، حدود 200 درصد افزایش شار حرارتی بحرانی مشاهده کردند.

ون و دینگ [۴] آزمایش‌های انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم روی صفحه دیسکی از جنس فولاد ضدزنگ در داخل یک ظرف استوانه‌ای انجام دادند. ضریب انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیال در غلظت $1/25$ درصد وزنی در مقایسه با آب به مقدار 40 درصد افزایش یافت.

ساکاشیتا [۵] شار حرارتی بحرانی جوشش اشباع استخری نانوسیال آب-تیتانیوم دی‌اکسید روی سطح مسی به قطر 7 mm و در فشار $100-800 \text{ kPa}$ را مورد بررسی قرار داد. مشخص شد که نانوسیال، شار حرارتی بحرانی را در فشار 100 kPa حدود دو برابر افزایش می‌دهد. باین حال، با افزایش فشار، افزایش شار حرارتی بحرانی نانوسیال کاهش می‌یابد تا اینکه در فشار 800 kPa شار حرارت بحرانی بحرانی با سیال پایه برابر می‌شود. افزایش شار حرارت بحرانی به علت بهبود ترشوندگی سطح، ناشی از رسوب نانوذرات بر سطح جوشش گزارش شد.

سرافراز و همکاران [۶] تحقیقات تجربی بر روی شار حرارتی بحرانی و انتقال حرارت جوشش استخری ترکیب نانوسیالات زیرکونیا-آب با اتیلن گلیکول با $1-0/25$ درصد حجمی انجام دادند. بعد از جوشش رسوب بسیار جزئی ذرات بر روی سطح مشاهده شد، این لایه رسوب هیچ تأثیری بر ضریب انتقال حرارت نداشت ولی شار حرارتی بحرانی را به میزان 29 درصد افزایش داد. رسوب نانوذرات اکسید زیرکونیم بر روی سطح، یک لایه متخلخل ایجاد می‌کند که باعث تشدید عمل موینگی می‌شود و در نتیجه به خاطر کاهش زاویه تماس استاتیک مایع بیشتری توسط لایه متخلخل جذب شده و به منطقه داغ زیر حباب‌های در حال رشد منتقل می‌شود. در نهایت شار حرارتی بحرانی افزایش می‌یابد.

جون و همکاران [۷] با پوشش ذرات مس با اندازه مختلف μm 10 ، 25 و 67 روی سطح مس به روش زینترینگ، تاثیر ضخامت و اندازه ذرات را بر انتقال حرارت جوشش استخری در فشار اتمسفر بررسی کردند. نتایج به دست آمده از آزمایش نشان دادند که با

پرداخته شده است.

۲- روش آزمایش

۲-۱- تهیه نانوسیال

برای تهیه نانوسیال دو روش مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش تک‌مرحله‌ای و روش دومرحله‌ای. در این پژوهش از روش دومرحله‌ای که دارای کاربرد بیشتری است، استفاده شده است. در روش دومرحله‌ای نانوذرات ابتدا تولید و سپس در سیال پایه پخش می‌شوند. به طور معمول برای جلوگیری از کلوخه‌شدن نانوذرات و توزیع بهتر و منظم‌تر آن‌ها در سیال پایه از دستگاه همزن اولتراسونیک استفاده می‌شود. در این پژوهش از نانوپودر اکسید مس و سیال پایه آب مقطر برای تولید نانوسیال استفاده شده است. نانوذرات اکسید مس با خلوص ۹۹/۹ درصد و با اندازه ۴۰ nm با شکل تقریباً کروی استفاده شده است. همچنین برای جلوگیری از تغییر خواص و ویژگی حرارتی نانوسیال، هیچ گونه ماده پایدارکننده به سیال پایه اضافه نشده است. جرم نانوذرات با استفاده از ترازویی با دقت ۰/۰۰۰۱ gI اندازه‌گیری می‌شود. برای پایداری و توزیع یکنواخت نانوذرات در سیال پایه، ابتدا از همزن مغناطیسی به مدت ۱۲ ساعت و سپس از دستگاه اولتراسونیک با قدرت ۴۰۰ W و فرکانس ۴۰ kHz و مدت ۸ ساعت استفاده شده است. نانوسیال در ۷ غلظت مختلف شامل ۱، ۵، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰ و غلظت بیشینه ۱۰۰۰ mg/l آماده شده و به منظور جلوگیری از ته‌نشینی نانوذرات بلافاصله پس از آماده شدن در آزمایش جوشش استخری مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نقطه جوشش نانوسیال در فشار اتمسفری (فشار محلی ۸۶ کیلوپاسکال) اندازه‌گیری شد و با نقطه جوش آب خالص مقایسه شد. جدول ۱ مقادیر نقطه جوش اندازه‌گیری شده نانوسیال در غلظت‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به داده‌های جدول ۱ مشاهده می‌شود که بیش‌ترین مقدار اختلاف نقطه جوش نانوسیال نسبت به آب خالص مربوط به غلظت ۱۰۰۰ mg/l است و برابر با $0/2^{\circ}\text{C}$ می‌باشد.

ویسکوزیته نانوسیال با استفاده از دستگاه رئومتر (۳۰۲ MCR، شرکت Anton-Paar اتریش) اندازه‌گیری شد. ویسکوزیته نانو سیال با غلظت ۱۰۰۰ mg/l در دو دمای 25°C و 80°C اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل نشان داد که ویسکوزیته در دمای 25°C برابر با

دارای بیشترین مقدار بوده و ۲۶٪ افزایش را نسبت به آب مقطر نشان می‌دهد.

محمدپور و همکاران [۱۲] و همچنین امین‌فر و همکاران [۱۳] تاثیر اعمال میدان مغناطیسی خارجی بر انتقال حرارت بحرانی برای جریان جوششی مادون‌سرد آب و سیال مغناطیس‌شونده در یک لوله قائم را به صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نشان دادند انتقال حرارت بحرانی در یک لوله قائم با تغییر سیال عامل به نانوسیال افزایش می‌یابد که عمدتاً به دلیل رسوب نانوذرات بر روی سطح داخلی و تغییر مشخصات آن می‌باشد. همچنین اعمال میدان مغناطیسی باعث اصلاح مقدار انتقال حرارت بحرانی در نانوسیال مغناطیس‌شونده می‌شود. دلیل این موضوع را جذب نانوذرات به سمت سطح به دلیل اعمال میدان مغناطیسی و افزایش ترشوندگی سطح اعلام کردند.

گودنیز و همکاران [۱۴] ابتدا با قرار دادن نمونه آلومینیومی با سطح تخت و صاف در معرض جوشش استخری آب خالص در فشار اتمسفر برای مدت ۱۸۰ دقیقه، یک لایه پایدار از اکسید آلومینیوم روی سطح ایجاد کردند؛ به طوری‌که زاویه تماس سطح از ۵۵ به ۱۲ درجه کاهش یافت. سپس با انجام آزمایش جوشش استخری این نمونه در آب و در فشار اتمسفر نشان دادند که شار حرارت بحرانی به میزان ۸۰ درصد افزایش یافت.

لی و همکاران [۱۵] تاثیر اندازه نانوذرات سیلیکا را روی شار حرارت بحرانی در جوشش استخری نانوسیال آب-سیلیکا در غلظت‌های از ۰/۱ تا ۱۰ درصد حجمی و در فشار اتمسفر بررسی کردند. آن‌ها از یک هیتر استیل با سطح تخت و صاف و نانوذرات سیلیکا با اندازه‌های ۸، ۱۵، ۶۵ و ۴۰۰ نانومتر استفاده کردند. نتایج به‌دست آمده از آزمایش نشان دادند که اولاً صرف‌نظر از اندازه نانوذرات، در غلظت‌های زیاد شار حرارت بحرانی همیشه افزایش می‌یابد. ثانیاً در غلظت‌های نسبتاً پائین و نانوذرات با اندازه کوچکتر از ۱۰۰ نانومتر، شار حرارت بحرانی کاهش می‌یابد. ثالثاً در نانوذرات با اندازه ۴۰۰ نانومتر و نانوسیال با غلظت پائین، کاهشی در مقدار شار حرارت بحرانی مشاهده نشد.

هدف کلی پژوهش حاضر درک بیشتر تاثیر نانوپوشش اکسیدمس بر روی شار حرارت بحرانی خواهد بود. با بررسی مطالعاتی که تاکنون انجام شده، تاثیر همزمان زاویه تماس سیال و میزان زبری در جوشش استخری نانو سیال اکسید مس با غلظت کمتر از ۱۰۰۰ mg/l صورت نگرفته است. در این مطالعه به بررسی اثر زاویه تماس و زبری سطح

جدول ۱. مقادیر نقطه جوش نانوسیال در غلظت‌های مختلف
Table 1. The boiling points of nanofluid in different concentrations

غلظت (میلی گرم بر لیتر)	نقطه جوش (سانتی‌گراد)
آب خالص	۹۵
۵۰	۹۵
۱۰۰	۹۵
۵۰۰	۹۵/۱
۱۰۰۰	۹۵/۲

بنابراین با توجه به غلظت بسیار پایین نانوذرات و عدم استفاده از سورفکتانت در تهیه نانو سیال و دقت در نتایج ذکر شده می‌توان خواص ترموفیزیکی نانوسیال را با دقت خوبی برابر با خواص سیال پایه یعنی آب خالص فرض نمود.

۲-۲- معرفی دستگاه آزمایش جوشش و آماده سازی نمونه

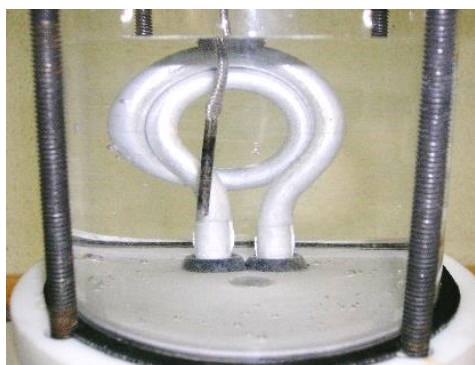
برای انجام آزمایش جوشش استخری از دستگاهی که تصویر مخزن و هیتر آن شکل ۱ نشان داده شده، استفاده شده است. همچنین شکل شماتیک تجهیزات اصلی دستگاه که شامل: مخزن سیال، سیستم خنک‌کننده بخار، سیستم تولید شار حرارتی و سیستم اندازه‌گیری و ثبت دما می‌باشد، در شکل ۲ نشان داده شده است. این دستگاه برای اندازه‌گیری شار حرارت بحرانی طراحی شده است. مخزن جوشش از لوله شفاف پلکسی گلاس به شعاع خارجی mm ۱۲۰ و ضخامت mm ۵ و المنت پیش‌گرم‌کن تشکیل شده است. برای جلوگیری از کاهش حجم و تغییر غلظت سیال در طول آزمایش از سیستم خنک‌کننده برای میعان بخار استفاده می‌شود. این سیستم شامل یک کندانسور شیشه‌ای به طول mm ۴۰۰ است، که از بالا روی محفظه جوشش قرار گرفته و به وسیله نوار تفلون آب‌بندی می‌شود. آب خنک‌کاری به وسیله پمپ آکواریوم از مخزن آب خنک‌کاری وارد کندانسور شده و دوباره به ظرف برمی‌گردد. بخار وارد شده به کندانسور توسط آب خنک میعان شده و به مخزن باز گردانده می‌شود.

۱ mPa.s و در دمای °C ۸۰ برابر با ۰/۴ mPa.s است. همچنین برای آب خالص ویسکوزیته اندازه‌گیری شده توسط دستگاه رئومتر در دماهای ذکر شده با اختلاف خیلی ناچیز برابر با مقادیر بدست آمده برای نانوسیال در بیشترین غلظت می‌باشد.

کیم و همکاران [۱۶] با اندازه‌گیری خواص ترموفیزیکی نانوسیال با غلظت‌های کم در دمای محیط °C ۲۲ نتیجه گرفتند که انحراف خواص ترموفیزیکی نانو سیال در بیشترین غلظت ۱۰۰۰ mg/l نسبت به آب خالص برابر ۰/۴ درصد است. کوارک و همکارانش [۱۷] با مطالعه جوشش نانوسیال با غلظت‌های کم، حداکثر ۱ گرم در لیتر، و اندازه‌گیری خواص ترموفیزیکی نانوسیال، نشان دادند که در غلظت‌های کم نانوذرات، تغییرات خواص ترموفیزیکی سیال پایه ناشی از افزودن نانوذرات ناچیز بوده و می‌توان خواص ترموفیزیکی نانوسیال را تقریباً برابر با سیال پایه فرض نمود.

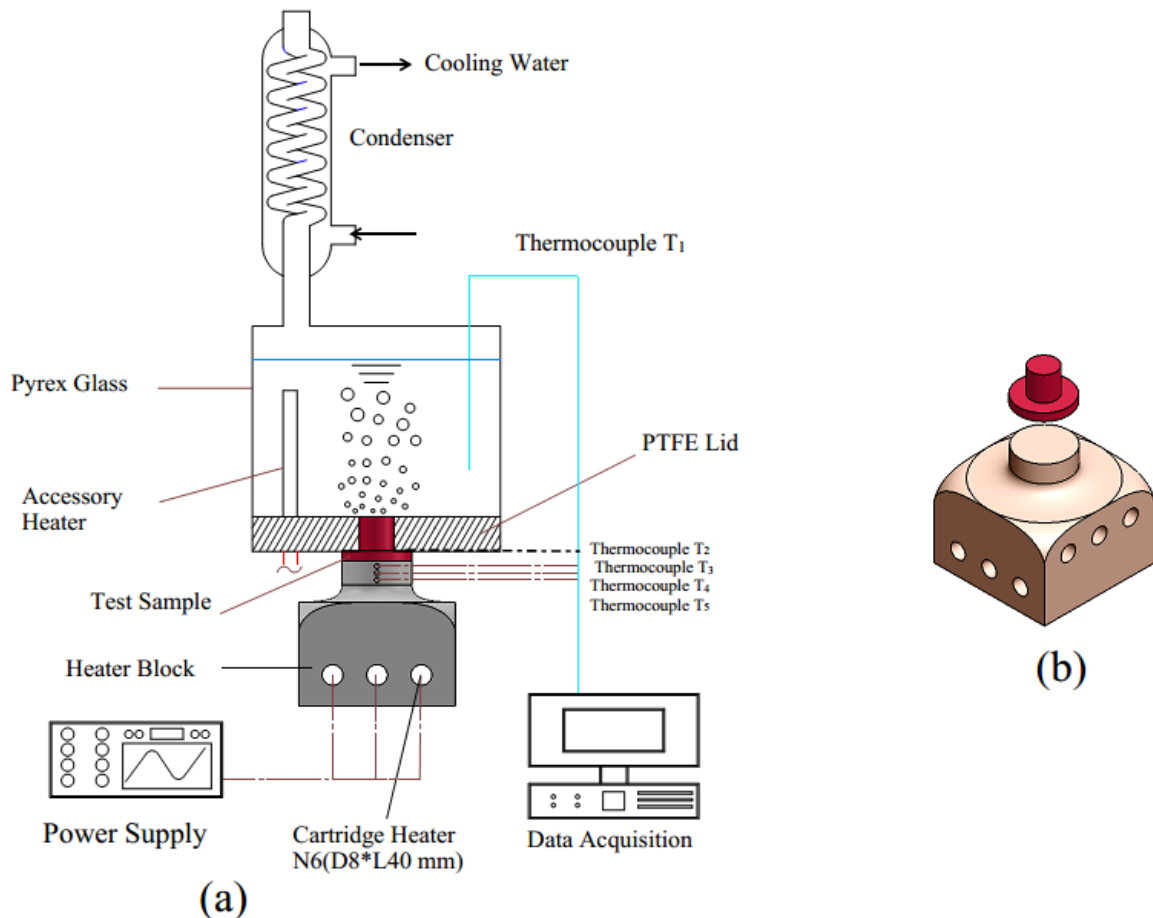


الف) مجموعه کامل هیتر و مخزن



ب) تصویر سطح جوشش نمونه و هیتر کمکی

شکل ۱. دستگاه آزمایش جوشش استخری و تصویر سطح جوشش
Fig. 1. The pool boiling setup and image of boiling surface



شکل ۲. قسمت‌های مختلف دستگاه آزمایش جوشش استخری و سامانه جمع‌آوری داده‌ها

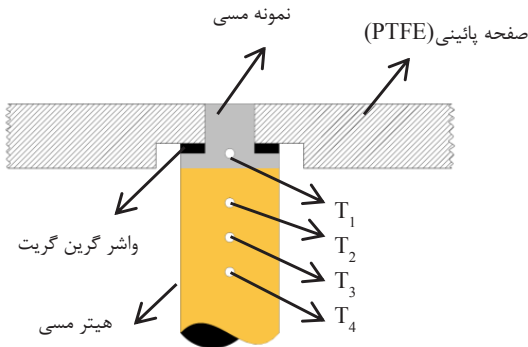
Fig. 2. A schematic diagram of an experimental setup for pool boiling test and data acquisition system

این آزمایش پس از پانزده دقیقه افزایش داده می‌شود. در نزدیکی نقطه شار حرارت بحرانی باید دقت نمود افزایش توان ورودی در هر مرحله با مقدار کمتر و پس از رسیدن به شرایط تقریباً دائم انجام شود. و در لحظه شار حرارت بحرانی در فاصله زمانی کمی دمای سطح هیتر، بطور ناگهانی افزایش می‌یابد. در این لحظه به منظور جلوگیری از آسیب دیدن هیتر باید بلافاصله هیتر را خاموش کرد. این افزایش ناگهانی دما توسط سامانه ثبت و ذخیره‌سازی داده‌ها ثبت شده و می‌توان مقدار شار حرارت بحرانی را اندازه‌گیری و محاسبه نمود.

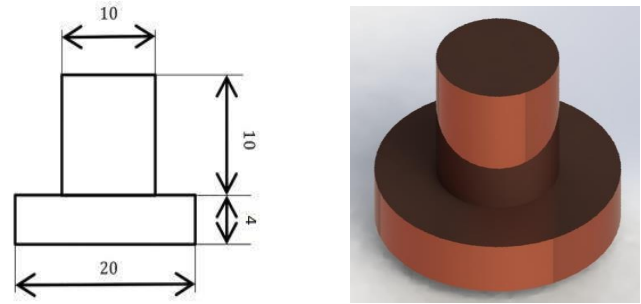
نمونه‌های آزمایش از جنس مس با خلوص ۹۹/۹ درصد و هدایت حرارتی $400 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ است. نمونه‌های مسی که در شکل ۳ به صورت شماتیک نشان داده شده است، از مفتول مسی به قطر 3 mm با استفاده از دستگاه تراش به دقت $\pm 0/1$ ساخته شده‌اند. سپس سطوح مورد نظر (سطوح تخت با قطر 20 mm و 10 mm) با استفاده از دستگاه پولیش (ساخت شرکت metco کشور هند) پولیش کاری شد.

به دلیل باز بودن طرف انتهایی قسمت بخار کندانسور، فشار مخزن جوشش برابر با فشار اتمسفر می‌باشد.

از دستگاه آزمایش جوشش استخری طراحی شده می‌توان برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت و شار حرارت بحرانی هر یک از نمونه‌ها، استفاده کرد. پس از مونتاژ و آماده‌سازی دستگاه آزمایش جوشش مطابق شکل ۱، مقدار 500 سانتی‌متر مکعب از نانوسیال تهیه شده را داخل مخزن ریخته و سپس هیتر کمکی نصب شده داخل مخزن روشن می‌شود تا دمای سیال سریعتر به دمای اشباع برسد. پس از جوشش و رسیدن دمای سیال به دمای اشباع، به منظور خروج حباب‌های هوا در سیال، هیتر کمکی به مدت 30 دقیقه روشن می‌ماند. سپس هیتر اصلی را روشن نموده و هیتر کمکی خاموش می‌شود و توان ورودی در حداقل مقدار لازم برای نگهداشتن دمای سیال در دمای اشباع تنظیم می‌شود. توان ورودی به هیتر در طی چند مرحله و به صورت پله‌ای پس از رسیدن به شرایط دائم (در



شکل ۴. جزئیات هدایت و اندازه‌گیری شار حرارت در هیتر کف مخزن
Fig. 4. Details of conducting and measuring heat flux in the tank floor heater



شکل ۳. تصویر نمونه مسی و ابعاد آن (ابعاد بر حسب میلی‌متر)
Fig. 3. Copper sample (dimensions in mm)

اکنون با مشخص بودن شار حرارت ورودی به سطح هیتر و محاسبه دمای مافوق اشباع سطح هیتر و با استفاده از رابطه زیر می‌توان ضریب انتقال حرارت جوشش سطح را محاسبه نمود:

$$h = \frac{q''}{T_w - T_{sat}} \quad (3)$$

اطراف نمونه با استفاده از تفلون نسوز با ضریب انتقال حرارت هدایت $0.3 \text{ W/m} \cdot \text{C}$ عایق شده است. از آن جهت که بزرگی هدایت حرارتی مس نسبت به تفلون نسوز بسیار بزرگ‌تر است، می‌توان از افت حرارتی شعاعی به طور کامل صرف‌نظر کرد و انتقال حرارت در نمونه را خطی در نظر گرفت. برای اطمینان از انتقال حرارت خطی نمونه مسی و استفاده از برون‌یابی، نمونه مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت^۱ شبیه‌سازی شد. نتیجه بدست آمده نشان داد که تغییرات دما در طول نمونه با دقت خوبی خطی است. مقدار تلفات حرارتی از بلوک مسی از محاسبه توان مصرفی هیتر با استفاده از قانون ژول با اندازه‌گیری مقدار ولتاژ و جریان الکتریکی مصرفی هیترهای فشنگی و تفاضل آن از شار حرارت ورودی به سطح به دست آمده از رابطه (۱) به دست می‌آید. با توجه به این که این مقدار کمتر از ۵ درصد است و افزون بر این به دلیل هدایت حرارتی بالای بلوک مسی و نمونه مسی، بنابراین می‌توان تلفات حرارتی را ناچیز فرض نمود.

۴- آنالیز عدم قطعیت

به دلیل داشتن احتمال خطا در اندازه‌گیری‌ها و از آنجا که داده‌های

عملیات پولیش‌کاری ابتدا با استفاده از سنباده شماره P ۳۰۰۰ برای به حداقل رساندن زبری سطح انجام شد. پولیش نهایی سطح از چند مرحله نمد پولیش‌کاری نرم و خمیر الماسه با اندازه ذرات از $0.5 \mu\text{m}$ تا ۱ انجام شده است. بعد از هر مرحله آزمایش جوشش، برای ایجاد شرایط یکسان، تمام اجزا دستگاه از هم جدا شده و نانوذرات باقی‌مانده در قسمت‌های مختلف، با آب شستشو داده می‌شوند.

۳- اندازه‌گیری شار حرارت و دمای سطح

به منظور جلوگیری از تلفات حرارت و اندازه‌گیری دقیق‌تر شار حرارت ورودی به سطح، اطراف هیتر مسی کاملاً با مواد عایق نسوز پوشانده و عایق‌بندی می‌شود. با فرض اینکه انتقال حرارت در قسمت استوانه‌ای بالای بلوک مسی و در داخل نمونه مسی به صورت یک‌بعدی در امتداد محوری است و با اندازه‌گیری دماهای T_2 ، T_3 و T_4 و با استفاده از قانون هدایت فوری می‌توان مقدار شار حرارت را از رابطه هدایت فوری زیر محاسبه نمود:

$$q'' = K \frac{T_4 - T_3}{d} \quad (1)$$

d فاصله بین دو ترموکوپل برابر ۷ میلی‌متر و K ضریب هدایت حرارتی مس است. دمای سطح نمونه مسی T_w را می‌توان با اندازه‌گیری دمای نقطه T_1 که به فاصله ۱۰ میلی‌متر پایین‌تر از سطح هیتر است و با استفاده از قانون هدایت حرارت فوری طبق رابطه زیر برون‌یابی کرد:

$$T_w = T_1 - q'' \frac{\Delta}{K} \quad (2)$$

جدول ۳. مقایسه شار حرارت بحرانی اندازه‌گیری شده با مدل‌های تجربی

Table 3. Comparison of critical heat flux measured with experimental models

مدل زوبر (مگاوات بر متر مربع) شار حرارت بحرانی اندازه‌گیری شده (مگاوات بر متر مربع)	۱/۲
۱/۲۲±۰/۰۲۶	

دستگاه انجام شد. سپس نتایج حاصل از آزمایش با مدل‌های تجربی ارایه شده توسط زوبر و رزنوف [۲۰] مطابق با رابطه (۷) مقایسه شدند (جدول ۳).

$$q_{CHF}'' = 0.131 h_{fg} \rho_g^{0.5} [\sigma g (\rho_l - \rho_g)]^{0.25} \quad (7)$$

۶- نتایج و بحث

نتایج حاصل از آزمایش جوشش و اندازه‌گیری شار حرارت بحرانی آب مقطر و نانو سیال در غلظت‌های مختلف در جدول ۴ نشان داده شده است. به منظور اطمینان از تکرارپذیری آزمایش‌ها، هر آزمایش طی سه مرحله روی هریک از نمونه‌ها تحت شرایط یکسان انجام شد. حداکثر خطای استاندارد ۵/۷۴ درصد، مربوط به غلظت ۱۰۰ mg/l می‌باشد، که میزان قابل قبولی در آزمایشات جوشش است.

مقادیر شار حرارت بحرانی اندازه‌گیری شده برای آب مقطر و همچنین نانو سیال آب-اکسید مس از غلظت ۱ تا ۱۰۰۰ mg/l در شکل ۵ نشان داده شده است. افزایش شار حرارت بحرانی برای تمامی غلظت‌ها مشهود است اما تغییرات شار حرارت بحرانی با غلظت نانوسیال به گونه‌ای است که در غلظت ۱ mg/l شار حرارت بحرانی نسبت به آب مقطر ۲۳ درصد افزایش داشته و در غلظت ۱۰۰ mg/l این افزایش به ۹۲ درصد رسیده و سپس شار حرارت بحرانی با افزایش دمای سوپرهیت سطح در دو غلظت ۵۰۰ mg/l و ۱۰۰۰ mg/l کاهش می‌یابد. افزون‌براین با دقت در شکل ۶ می‌توان متوجه شد که در شار حرارتی یکسان اختلاف دمای سوپرهیت در تمامی غلظت‌ها بجز غلظت ۱۰۰ mg/l کمتر از آب مقطر است. علاوه‌براین بیشترین دمای سطح به‌دست آمده مربوط به غلظت بیشینه ۱۴۰/۷۸°C است. که این دما در نقطه شار حرارت بحرانی، ۱۴۰/۷۸°C ثبت شده است.

به منظور بررسی عوامل تغییر شار حرارت بحرانی در منحنی

جدول ۲. عدم قطعیت تجهیزات اندازه‌گیری مختلف

Table 2. The uncertainty of different measuring equipment

دقت	واحد اندازه‌گیری	کمیت اندازه‌گیری
±۰/۱	درجه سانتی‌گراد	دما
±۰/۱	درجه	زاویه تماس
±۱	میکرومتر	ضخامت سنج
±۰/۰۵	میلی‌متر	ابعاد نمونه
±۱	ولت	ولتاژ
±۰/۱	آمپر	جریان
±۱	میلی‌گرم	وزن
۵	سی‌سی	حجم

این پژوهش، حاصل آزمایش و استفاده از تجهیزات اندازه‌گیری با دقت متفاوت می‌باشد، بنابراین خطای اندازه‌گیری در نتایج آزمایش بر مبنای هریک از پارامترهای اندازه‌گیری شده محاسبه شده است. عدم قطعیت پارامترهای مهم جوشش مانند شار حرارت، ضریب انتقال حرارت و دمای سطح جوشش را می‌توان با استفاده از روش کلاین و مک کلین تاک [۱۹ و ۱۸] با مشخص بودن مقدار خطای هر یک از تجهیزات اندازه‌گیری در جدول ۲ محاسبه نمود.

$$\frac{U_{q''}}{q''} = \sqrt{\left(\frac{U_k}{k}\right)^2 + \left(\frac{U_{\Delta T}}{T_4 - T_3}\right)^2 + \left(\frac{U_{\Delta x}}{\Delta x}\right)^2} \quad (4)$$

$$\frac{U_{\Delta h}}{\Delta h} = \sqrt{\left(\frac{U_{q''}}{q''}\right)^2 + \left(\frac{U_{\Delta T}}{\Delta T}\right)^2} \quad (5)$$

$$\frac{U_{T_w}}{T_w} = \sqrt{\left(\frac{U_{T_{max}}}{T_w}\right)^2 + \left(\frac{1}{T_w} \cdot \frac{q''}{K} \cdot U_{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{T_w} \cdot \frac{q'' \cdot \Delta x}{k^2} \cdot U_k\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_{q''}}{T_w}\right)^2} \quad (6)$$

بنابراین عدم قطعیت‌های شار حرارت ۷/۸ درصد و ضریب انتقال حرارت ۷/۳ درصد و دمای سطح جوشش ۸/۶ درصد محاسبه شد. عدم قطعیت در اندازه‌گیری غلظت نانوذرات ۰/۲۵ محاسبه شد.

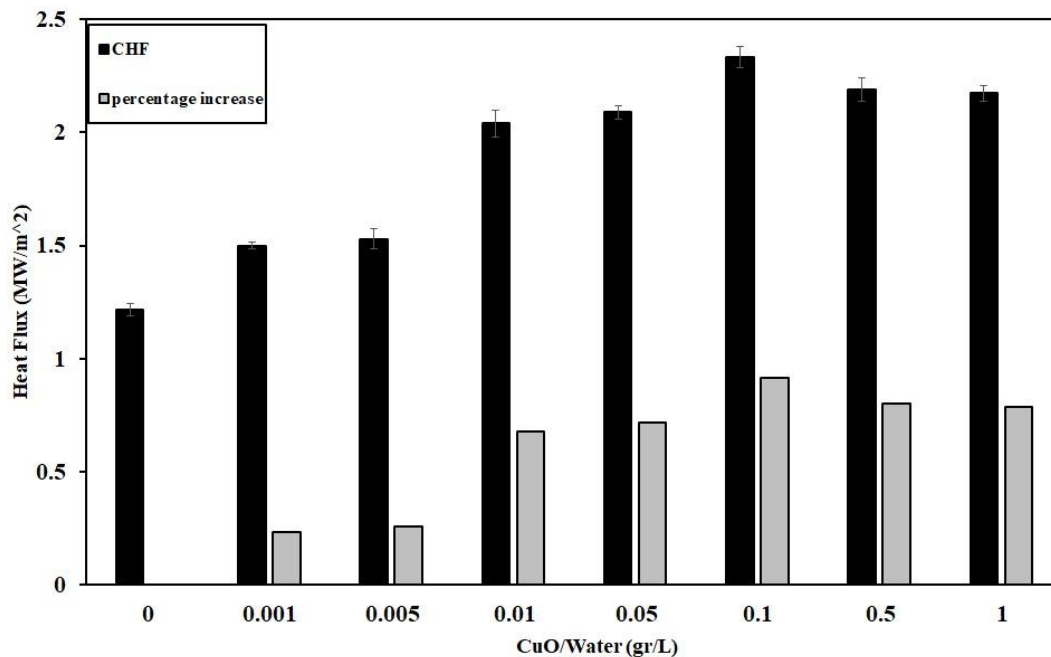
۵- کالیبره کردن دستگاه آزمایش جوشش

قبل از انجام آزمایش با نانوسیال، آزمایشاتی با آب مقطر به عنوان سیال پایه روی نمونه با سطح صاف و پولیش خورده که دارای زبری متوسط ۷/۵ nm است، برای اعتبارسنجی و بررسی دقت داده‌های

جدول ۴. مقادیر شار حرارت بحرانی اندازه‌گیری شده در غلظت‌های مختلف نانوسیال

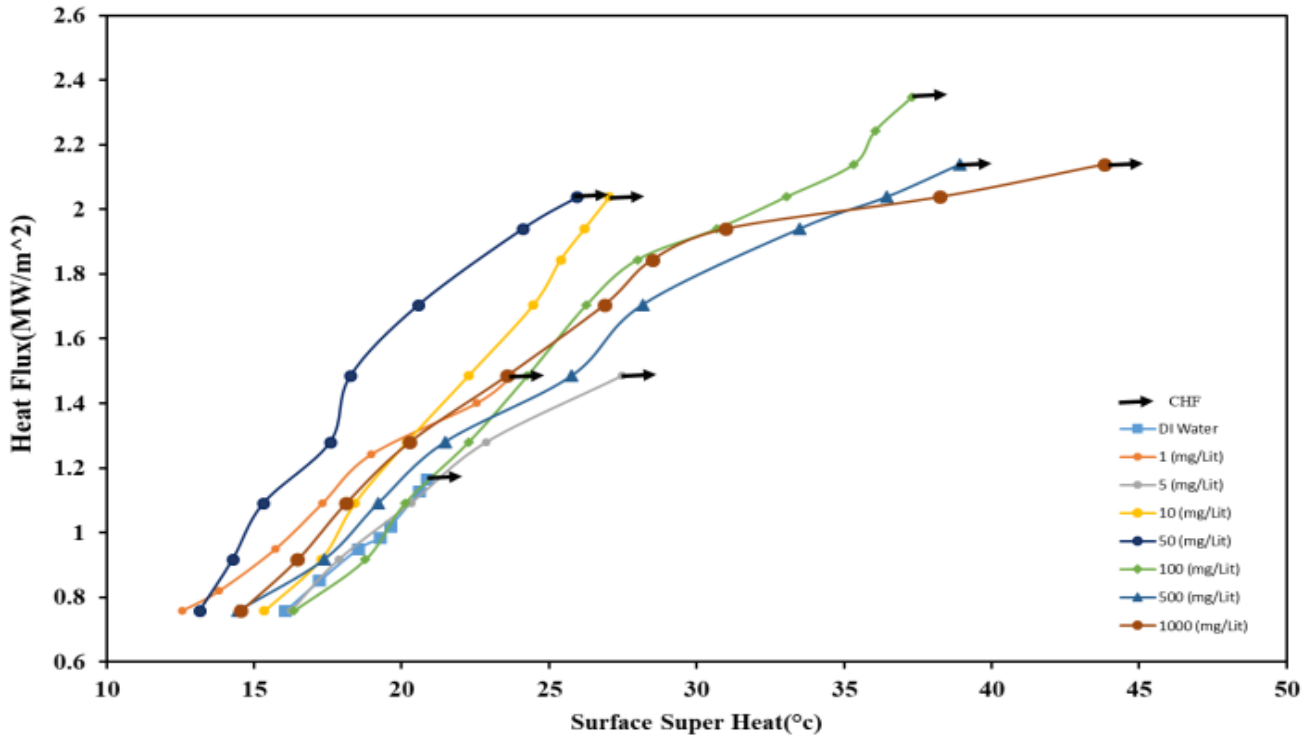
Table 4. The measured amounts of critical heat flux at different concentrations

غلظت (میلی گرم بر لیتر)	شار حرارت بحرانی (مگاوات بر متر مربع)			درصد انحراف استاندارد
	آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳	
	۰	۱/۲۴	۱/۲۴	
۱	۱/۴۸	۱/۵۳	۱/۴۸	۱/۴۲
۵	۱/۴۸	۱/۴۸	۱/۶۲	۴/۳۴
۱۰	۲/۱۴	۱/۹۴	۲/۰۴	۵/۷۴
۵۰	۲/۰۹	۲/۱۴	۲/۰۴	۲/۹۰
۱۰۰	۲/۴۰	۲/۲۴	۲/۳۵	۴/۶۷
۵۰۰	۲/۱۴	۲/۲۹	۲/۱۴	۵/۱۸
۱۰۰۰	۲/۲۴	۲/۱۴	۲/۱۴	۳/۴۴



شکل ۵. درصد تغییرات شار حرارت بحرانی نانوسیال با غلظت‌های مختلف نسبت به آب مقطر و دمای سطح جوش

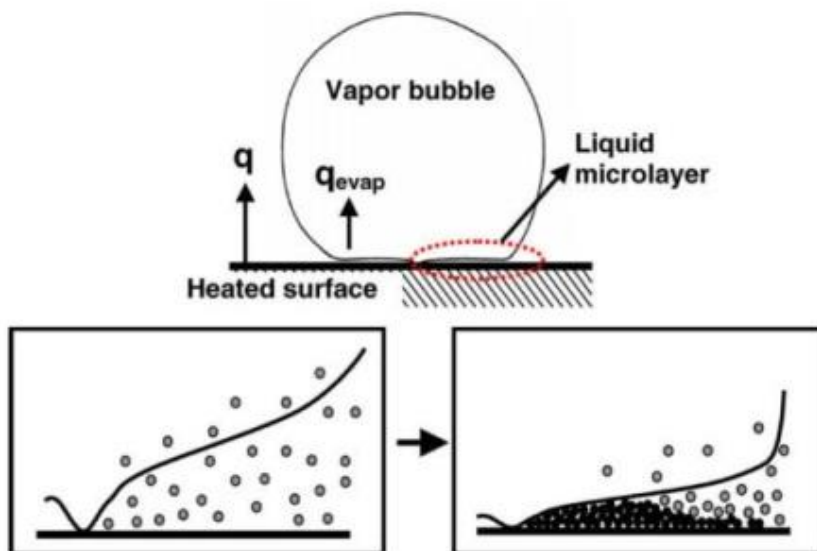
Fig. 5. Percentage of changes in critical heat flux at different concentrations relative to distilled water and temperature of boiling surface



شکل ۶. نمودار تغییرات شار حرارت با دمای فوق اشباع سطح در آزمایش جوشش آب مقطر و نانو سیال آب-اکسید مس در غلظت‌های مختلف
Fig. 6. Changes in the heat flux with superheat temperature in the experiment of boiling distilled water and nanofluid water-copper oxide at different concentrations

بوده و هیچ واکنشی بین نانوذرات و سیال پایه صورت نمی‌گیرد. افزون‌براین به دلیل عدم استفاده از مواد افزودنی و سورفکتانت و همچنین کسر حجمی پائین نانوذرات، می‌توان فرض نمود که ترکیب شیمیایی و خواص ترموفیزیکی نانوسیال تقریباً برابر سیال پایه است [۲۱]. بنابراین عامل اول نمی‌تواند دلیل تغییر شار حرارت بحرانی

جوشش شکل ۶، دو عامل می‌تواند در نظر گرفته شود. عامل اول می‌تواند ناشی از تغییر خواص ترموفیزیکی سیال به دلیل اضافه کردن نانوذرات باشد. عامل دوم ممکن است ناشی از تغییر خواص هندسی سطح به دلیل ته‌نشینی نانوذرات روی سطح جوشش باشد. نانوذرات اضافه‌شده به سیال پایه (آب مقطر)، به شکل محلول سوسپانسیون



شکل ۷. مکانیسم تشکیل لایه رسوب نانو ذرات در فرایند جوشش نانو سیال
Fig. 7. Mechanism of nanoparticle deposition at nanofluid pool boiling

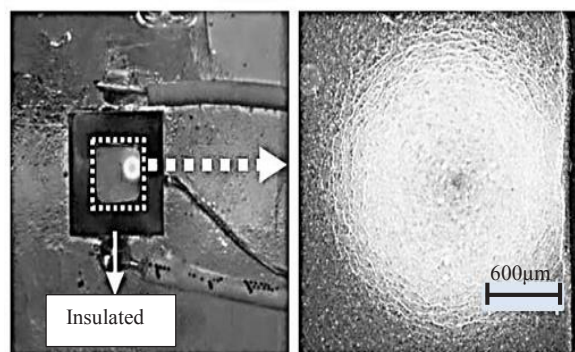
تعداد هسته‌زاهای فعال در واحد سطح^۱ یکی از پارامترهای مهم جوشش است که بستگی به زبری سطح دارد. ته‌نشینی نانوذرات باعث تغییر مورفولوژی، خصوصاً زبری، سطح می‌شود. لذا بعد از آزمایش جوشش، زبری سطح کلیه نمونه‌ها با استفاده از دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی^۲ اندازه‌گیری شد. شکل ۸ تغییرات زبری متوسط سطح (Ra) با غلظت نانوذرات را نشان می‌دهد. با دقت در شکل ۹ مشاهده می‌شود زبری تا غلظت 500 mg/l افزایش یافته است و سپس در غلظت ماکزیمم کاهش می‌یابد. با بررسی میزان زبری متوسط سطح قبل از آزمایش جوشش ($7/5$ نانومتر) و مقایسه اندازه نانوذرات (40 نانومتر) می‌توان گفت به دلیل بزرگ‌تر بودن اندازه نانوذرات نسبت به زبری متوسط سطح، مورفولوژی سطح بعد از جوشش نانوسیال تغییر زیادی نموده و زبری سطح افزایش می‌یابد. زیرا تاثیر ته‌نشینی نانوذرات بر زبری سطح بستگی به اندازه نسبی حفره‌های سطح و اندازه نانوذرات دارد. طوریکه اگر اندازه نانوذرات کوچکتر از اندازه حفره‌های سطح باشد، ته‌نشینی نانوذرات باعث پرشدن حفره‌ها و در نتیجه کاهش زبری سطح و همچنین کاهش تعداد هسته‌زها می‌شود. اما بالعکس اگر اندازه نانوذرات بزرگتر از زبری سطح باشد، همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، ته‌نشینی نانوذرات می‌تواند باعث افزایش زبری و در نتیجه افزایش تعداد هسته‌زاهای فعال روی سطح شود. در غلظت 1000 mg/l به دلیل افزایش ضخامت پوشش و تشکیل لایه یکنواخت و ضخیم از نانوذرات روی سطح زبری کاهش می‌یابد.

برای بررسی ساختار سطح و همچنین اندازه‌گیری ضخامت نانوپوشش تشکیل شده روی سطح از تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی^۳ ساخت شرکت تی‌ای‌اسکن^۴ مدل VEGA/ XMU استفاده شده است. شکل ۱۱ نشان دهنده ساختار سطح بعد از آزمایش جوشش در غلظت حداکثر می‌باشد. برای اندازه‌گیری ضخامت نانوپوشش از مقطع جانبی نمونه‌های مسی تصویربرداری شده است. مطابق با شکل ۱۲ بر اساس اسکیل‌بار داخل عکس و نانوپوشش ایجاد شده بر روی سطح که به رنگ سیاه دیده می‌شود، ضخامت نانوپوشش اندازه‌گیری شده است. شکل ۱۳ مقدار ضخامت

باشد و دلیل اصلی، ته‌نشینی نانوذرات روی سطح جوشش و تغییر خواص هندسی و شیمی سطح است. در ادامه با اندازه‌گیری خواص سطح جوشش مانند زبری، قابلیت ترشوندگی و ضخامت پوشش، تاثیر این پارامترهای سطح بر شار حرارت بحرانی و ضریب انتقال حرارت بررسی خواهد شد.

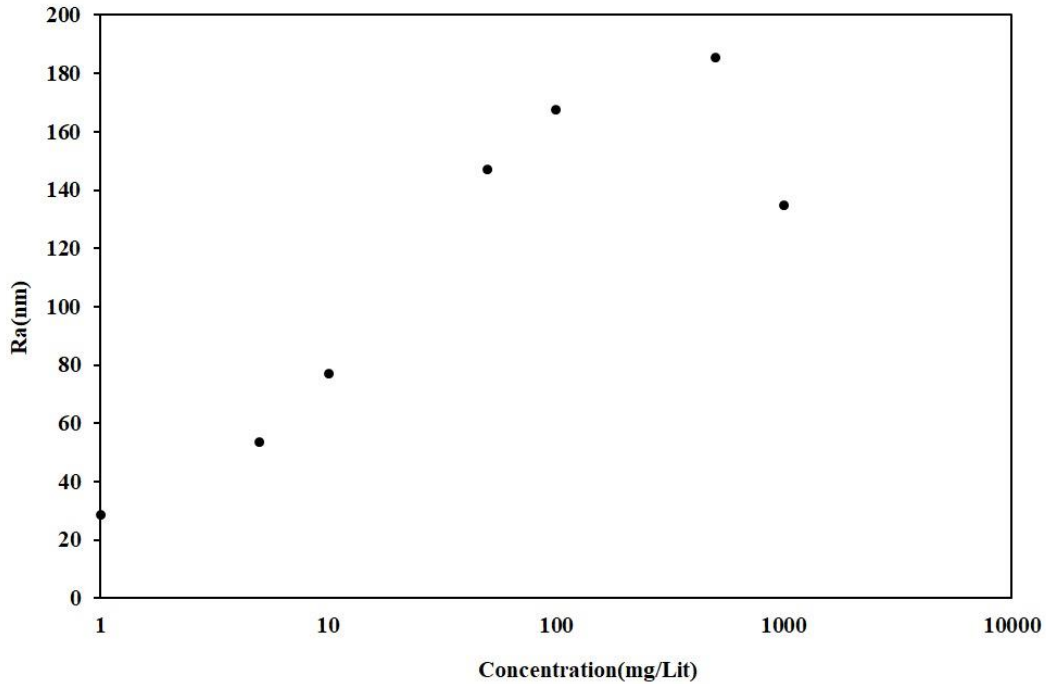
بعد از آزمایش جوشش، کلیه نمونه‌ها با دقت بررسی و آنالیز شدند. با تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی از سطح نمونه‌ها، همان‌طور که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است، مشاهده شد یک لایه نازک از نانوذرات به صورت یکنواخت کل سطح را پوشش داده است. باید به این نکته توجه داشت، ته‌نشینی نانوذرات در این حالت، ته‌نشینی ثقلی نیست و با برگرداندن ظرف پس از جوشش، نانوذرات از سطح جدا نمی‌شوند، بلکه کاملاً به سطح چسبیده و جوش خورده‌اند. ته‌نشینی نانوذرات همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، می‌تواند به دلیل تبخیر شدن مایع در ناحیه زیر حباب، ناحیه میکرولایه، باشد. در این ناحیه با تبخیر شدن مایع، حباب به تدریج رشد کرده و غلظت نانوذرات در این ناحیه افزایش می‌یابد و نانوذرات به سطح جوشش که در دمای بالایی است، جوش خورده و می‌چسبند [۱۷].

کوارک و همکاران [۱۷] این نظریه را به صورت تجربی مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها آزمایشی از جوشش نانو سیال اکسید آلومینیوم در غلظت 1000 mg/l روی هیتر مسی انجام دادند. شار گرمایی را به آرامی تا وقتی که اولین حباب تشکیل شود افزایش دادند و ۲ دقیقه سیستم را برای رسیدن به حالت پایدار نگه داشتند. سپس شار حرارتی را قطع کردند و پس از خارج نمودن هیتر از دستگاه آزمایش، لایه رسوب نانو ذرات دایره‌ای شکل را فقط در محل هسته‌های فعال جوشش مشاهده کردند (شکل ۸).

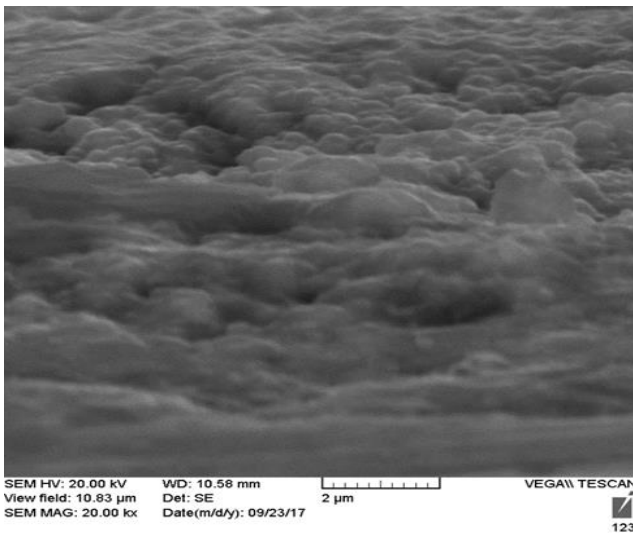


شکل ۸. تصویر نانو پوشش تشکیل شده در ناحیه اطراف هسته‌زا [۱۷]
Fig. 8. A nano-coating image formed in the area around the nucleation site [17]

- 1 - Active Nucleation Site Density
- 2 - Atomic Force Microscopic/AFM
- 3 Scan Electron Microscopic
- 4 TESCAN



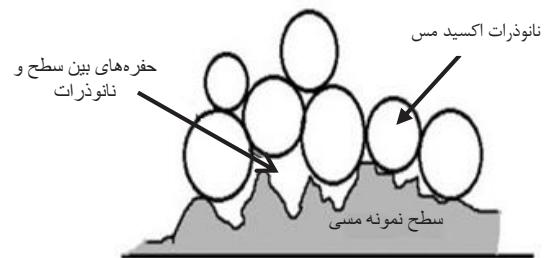
شکل ۹. نمودار تغییر زبری متوسط سطح با غلظت نانو سیال اکسیدمس-آب
Fig. 9. The Change of average surface roughness with the concentration of nanofluid



شکل ۱۱. ساختار سطح نمونه مسی بعد از آزمایش جوشش نانو سیال ۵۰۰ mg/l

Fig. 11. The surface structure of the copper specimen after the nanofluid boiling test (500 mg/l)

دارای خاصیت آب‌گریزی است، وجود این لایه باعث کاهش قابلیت ترشوندگی سطح می‌شود. با کاهش قابلیت ترشوندگی سطح امکان محبوس شدن هوا در هسته‌ها افزایش می‌یابد و این خود باعث افزایش تعداد هسته‌های فعال در واحد سطح می‌شود [۲۲]. بنابراین در جوشش نانوسیال اکسید مس وجود لایه نانوذرات ته‌نشین شده باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جوشش شده و در غلظت‌های

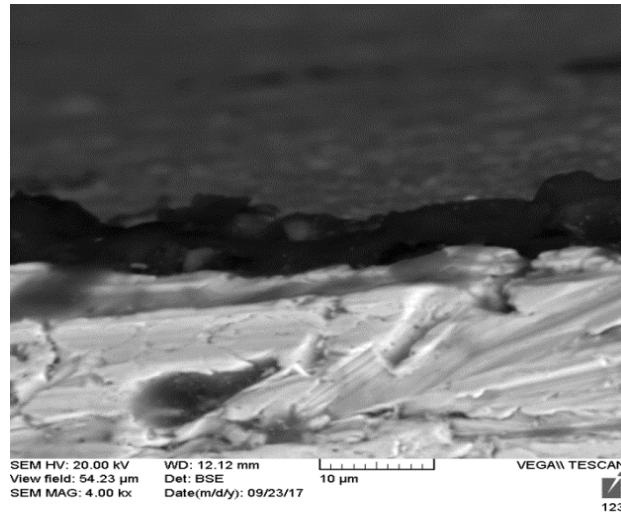


شکل ۱۰. ایجاد حفره‌های جدید و افزایش زبری بعد از ته‌نشینی نانوذرات با ابعاد بزرگتر از زبری متوسط سطح

Fig. 10. Creating new cavities and increasing roughness after deposition of nanoparticles with dimensions larger than the average surface roughness

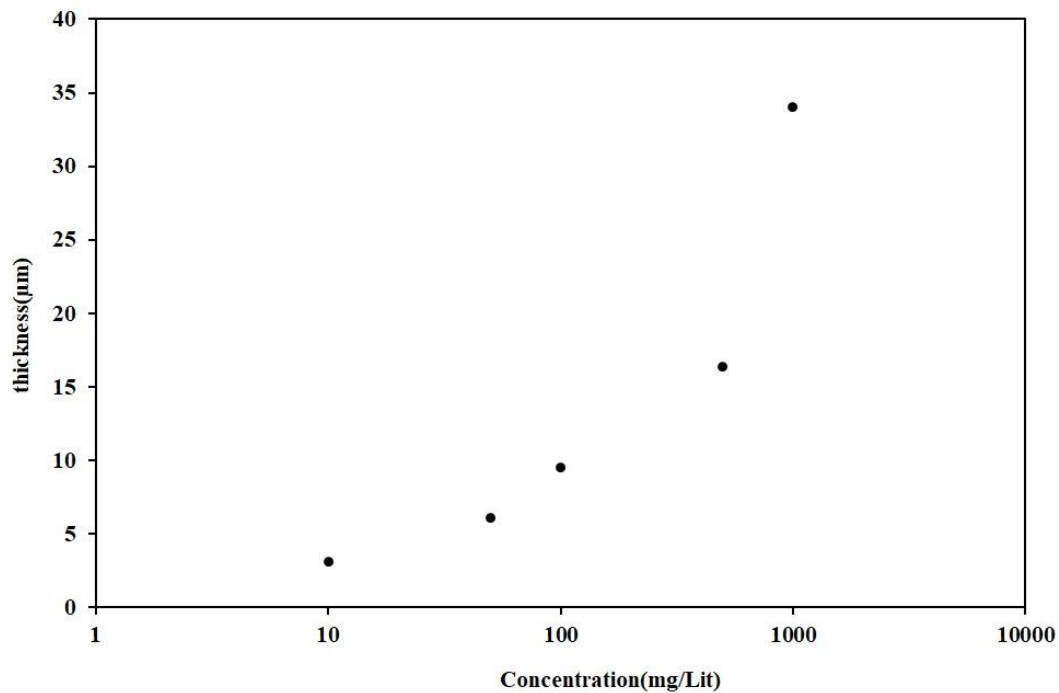
نانوپوشش تشکیل شده روی نمونه‌هایی که در آزمایش شار حرارت بحرانی با غلظت‌های مختلف استفاده شدند، را نشان می‌دهند، با دقت در این شکل متوجه می‌شویم که افزایش غلظت باعث افزایش ضخامت پوشش می‌شود به طوری که حداکثر ضخامت مربوط به غلظت ۱۰۰۰ mg/l برابر با $7/87 \mu\text{m}$ می‌باشد.

کمتر بودن ضریب هدایت حرارت لایه ته‌نشین شده اکسید مس نسبت به زیر لایه مسی می‌تواند باعث کاهش نرخ انتقال حرارت از سطح به سیال شود. از سوی دیگر ته‌نشینی نانوذرات روی سطح جوشش باعث تغییر ترکیب شیمیایی سطح شده و چون اکسید مس



شکل ۱۲. اندازه ضخامت پوشش نانو ذرات اکسید مس بعد از آزمایش جوشش نانو سیال ۱۰۰۰ mg/l

Fig. 12. The thickness of the copper oxide nanoparticle coating after the nanofluid boiling test (1000 mg/l)

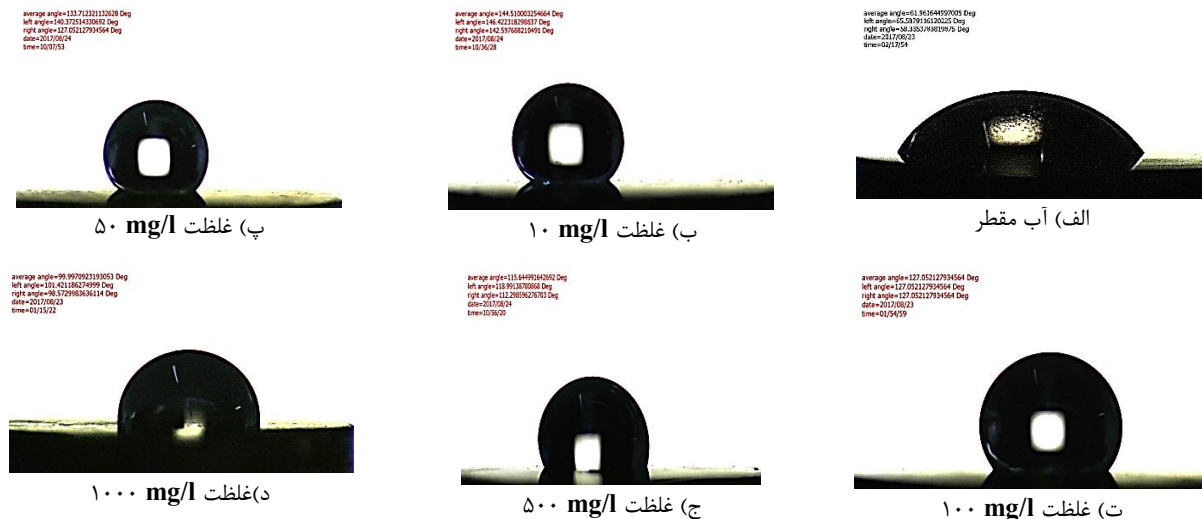


شکل ۱۳. نمودار تغییرات ضخامت پوشش نانو ذرات اکسید مس با غلظت

Fig. 13. The change of thickness of copper oxide nanoparticle coating with concentration

ضخامت این لایه مقدار ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد. ضخامت لایه ته‌نشین شده نیز تابع غلظت نانوذرات و مدت زمان جوشش است. در این تحقیق مدت زمان جوشش برای همه نمونه‌ها تقریباً یکسان (دو ساعت) است. لذا ضخامت پوشش بیشتر تابع غلظت نانوذرات است. یعنی با افزایش غلظت ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد. به همین

بیشتر نانوذرات به دلیل افزایش ضخامت این لایه، ضریب انتقال حرارت جوشش کمتر می‌شود. افزون بر این اندازه ضریب هدایت حرارت و ضخامت پوشش نانوذرات ته‌نشین شده نیز تاثیر زیادی در ضریب انتقال حرارت دارند. که در اینجا به دلیل کوچکتر بودن ضریب هدایت حرارت نانوذرات اکسید مس نسبت به زیر لایه مسی با افزایش



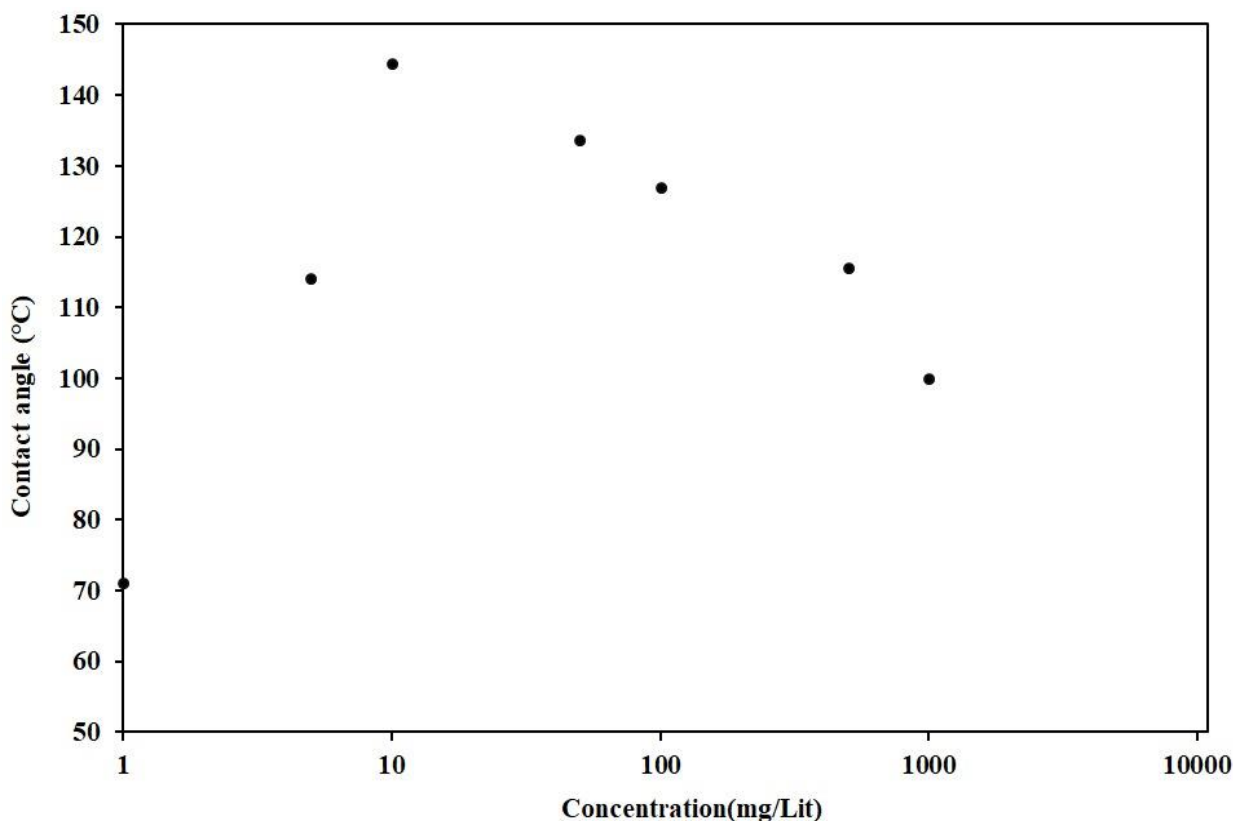
شکل ۱۴. اندازه زاویه تماس سطح نمونه‌ها بعد از آزمایش جوشش نانوسیال در غلظت‌های مختلف

Fig. 14. The contact angle of the surface of the samples after nanofluid pool boiling test at different concentrations

همانطور که در نمودار شار حرارت برحسب دمای سوپرهیت سطح در شکل ۶ مشاهده می‌شود تغییرات شار حرارت بحرانی در نانوسیال با غلظت‌های مختلف طوری است که تا غلظت ۱۰۰ mg/l با افزایش غلظت مقدار شار حرارت بحرانی نیز افزایش می‌یابد اما از این غلظت بالاتر مقدار آن کاهش می‌یابد. همچنین در شارهای حرارت پائین، پائین‌تر بودن دمای مافوق اشباع سطح در نانوسیال نسبت به آب خالص نشان‌دهنده تاثیر نانوذرات در افزایش ضریب انتقال حرارت است. اما در شارهای حرارتی بالا، بالاتر بودن دمای سطح در غلظت‌های بالاتر نانوذرات به دلیل ضخامت بیشتر پوشش نانوذرات روی سطح است که مانع انتقال حرارت و در نتیجه افزایش دمای سطح می‌شود. زیرا ضریب هدایت حرارت نانوذرات اکسید مس (۳۳ W/m.K) خیلی کمتر از ضریب هدایت حرارت زیرلایه مسی (۴۰۰ W/m.K) است. از سوی دیگر افزایش زبری سطح سبب افزایش تعداد هسته‌زاهای فعال جوشش شده و در نتیجه سبب افزایش انتقال حرارت خواهد شد. با توجه به داده‌های میکروسکوپ نیروی اتمی زبری سطح در غلظت ۵۰۰ mg/l بیشترین میزان را دارد ولی به علت تأثیر منفی ضخامت پوشش نانو ذرات بر انتقال حرارت، افزایش انتقال حرارت ناشی از زبری در این غلظت را خنثی کرده است. با توجه به موارد ذکر شده، افزایش شار حرارت بحرانی ترکیبی از تأثیر دو عامل ضخامت و زبری است و مقدار بهینه از هر دو عامل سبب حداکثر مقدار شار حرارت بحرانی خواهد شد. میزان بهینه غلظت نانو ذرات با توجه به نمودار آزمایش‌های شار حرارت بحرانی ۱۰۰ mg/l است که دارای بیشترین

دلیل در غلظت بیشینه ۱۰۰۰ mg/l به علت ضخامت زیاد پوشش نانوذرات ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد. یکی دیگر از پارامترهای مهم در جوشش، قابلیت ترشوندگی^۱ سطح می‌باشد. زاویه تماس استاتیکی^۲ همه نمونه‌ها با استفاده از سامانه تصویربرداری نوری مدل CA ES ۱۰ ساخت شرکت فارس ای‌اوترک^۳ که مجهز به دوربین تصویربرداری و نرم‌افزار پردازش تصویر است با روش آنالیز شکل قطره^۴ اندازه‌گیری شد. شکل ۱۴ مقدار زاویه تماس هر یک از نمونه‌ها بعد از آزمایش جوشش نانوسیال در غلظت‌های مختلف و شکل ۱۵ تغییرات زاویه تماس با غلظت نانوذرات را نشان می‌دهد. شکل (۱۴-الف) نشان‌دهنده زاویه تماس روی سطح مسی صیقلی می‌باشد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود سطح مسی قبل از آزمایش جوشش دارای قابلیت ترشوندگی با زاویه تماس ۶۲ درجه می‌باشد. و از آب‌دوستی بالایی برخوردار است. ولی پوشش نانو پودر اکسیدمس ایجاد شده روی سطح در اثر جوشش، علاوه بر تغییر در ساختار سطح، در تمامی غلظت‌ها باعث آب‌گریزی سطح می‌شود. همچنین بیشترین میزان آب‌گریزی سطح در غلظت ۱۰ mg/l رخ می‌دهد و با افزایش بیشتر غلظت به دلیل افزایش ضخامت و زبری سطح و همچنین افزایش تخلخل سطحی، زاویه تماس کاهش یافته است.

- 1 Wettability
- 2 . Static Contact Angle
- 3 . Fars EOR Tech
- 4 - Drop Shape Analysis



شکل ۱۵. تغییرات زاویه تماس نمونه‌ها بعد از جوشش نانو سیال آب-اکسیدمس در غلظت‌های مختلف

Fig. 15. The contact angle of the samples after the water-copper oxide nanofluid pool boiling test at different concentrations

حرارت لایه ته‌نشین شده اکسید مس نسبت به زیر لایه مسی باعث کاهش نرخ انتقال حرارت از سطح به سیال می‌شود. از سوی دیگر ته‌نشینی نانوذرات روی سطح جوشش باعث تغییر ترکیب شیمیایی سطح شده و چون اکسید مس دارای خاصیت آب‌گریزی است، وجود این لایه باعث کاهش قابلیت ترشوندگی سطح می‌شود. با کاهش قابلیت ترشوندگی سطح امکان محبوس شدن هوا در هسته‌ها افزایش می‌یابد و این خود باعث افزایش تعداد هسته‌های فعال در واحد سطح می‌شود. افزون‌براین به دلیل بزرگتر بودن اندازه نانو ذرات نسبت به حفره‌ها و زبری اولیه سطح، ته‌نشینی نانوذرات می‌تواند باعث افزایش زبری سطح و همچنین افزایش تعداد هسته‌های فعال شود. بنابراین در مجموع با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت در جوشش نانو سیال اکسید مس وجود لایه نانوذرات ته‌نشین شده باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جوشش شده و در غلظت‌های بیشتر نانوذرات به دلیل افزایش ضخامت این لایه، ضریب انتقال حرارت جوشش کمتر می‌شود. افزون‌براین چون پوشش ته‌نشین شده نانوذرات دارای ساختار متخلخل است و این باعث افزایش جریان

میزان شار حرارت بحرانی می‌باشد. به صورت کلی مطالعه تأثیر شرایط سطح بر شار حرارت بحرانی، مستلزم در نظر گرفتن اثر زبری سطح و زاویه تماس به طور همزمان می‌باشد.

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با انجام آزمایش جوشش اشباع استخری نانو سیال آب-اکسید مس روی سطح تخت مسی در غلظت‌های مختلف و در فشار اتمسفر، شار حرارت بحرانی اندازه‌گیری شد و با جوشش آب مقطر مقایسه شد و مورد بررسی قرار گرفت. باید توجه داشت ضریب انتقال حرارت جوشش متأثر از زبری سطح، تعداد هسته‌های فعال در واحد سطح و همچنین ضریب هدایت حرارت پوشش روی سطح است اما شار حرارت بحرانی بیشتر متأثر از سرعت جریان موئینگی سیال در میکرو لایه زیر حباب و سرعت خشک شدن سطح است. ته‌نشینی تدریجی نانوذرات در حین جوشش باعث تغییر مشخصات هندسی، زبری و شیمی سطح می‌شود. و کمتر بودن ضریب هدایت

1 - Dry out

- [2] S.U. Choi, J.A. Eastman, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, Argonne National Lab., IL (United States), 1995.
- [3] S. You, J. Kim, K. Kim, Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer, Applied physics letters, 83(16) (2003) 3374-3376.
- [4] D. Wen, Y. Ding, Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based γ -alumina nanofluids, Journal of Nanoparticle Research, 7(2-3) (2005) 265-274.
- [5] H. Sakashita, Pressure effect on CHF enhancement in pool boiling of nanofluids, Journal of nuclear science and technology, 53(6) (2016) 797-802.
- [6] M. Sarafraz, T. Kiani, F. Hormozi, Critical heat flux and pool boiling heat transfer analysis of synthesized zirconia aqueous nano-fluids, International Communications in Heat and Mass Transfer, 70 (2016) 75-83.
- [7] S. Jun, J. Kim, D. Son, H.Y. Kim, S.M. You, Enhancement of pool boiling heat transfer in water using sintered copper microporous coatings, Nuclear Engineering and Technology, 48(4) (2016) 932-940.
- [8] M. Dadjoo, N. Etesami, M.N. Esfahany, Influence of orientation and roughness of heater surface on critical heat flux and pool boiling heat transfer coefficient of nanofluid, Applied Thermal Engineering, 124 (2017) 353-361.
- [9] A. Nazari, S. Saedodin, Porous anodic alumina coating for optimisation of pool-boiling performance, Surface Engineering, 33(10) (2017) 753-759.
- [10] A. Nazari, S. Saedodin, Critical heat flux enhancement of pool boiling using a porous nanostructured coating, Experimental Heat Transfer, 30(4) (2017) 316-327.
- [11] A. Nazari, S. Saedodin, An experimental study of the nanofluid pool boiling on the aluminium surface, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 135(3) (2019) 1753-1762.
- [12] M. Mohammadpourfard, H. Aminfar, A. Qhafuri, R. Maroofiazar, Experimental Study on the Effect of

موئینگی سیال روی سطح می‌شود، لذا این عامل مانع از خشک شدن سطح در شار حرارت زیاد و در نتیجه افزایش شار حرارت بحرانی در همه غلظت‌ها می‌شود.

فهرست علائم

d	فاصله ترموکپل ۲ تا سطح جوشش (mm)
K	ضریب هدایت حرارتی (W/m.oC)
"q	شار حرارتی (W/m ^۲)
r	شعاع (mm)
R	مقاومت (Ω)
Ra	زبری متوسط سطح (nm)
T	دما ($^{\circ}\text{C}$)
U	عدم قطعیت (%)
V	اختلاف ولتاژ (V)
ΔT	اختلاف دما ($^{\circ}\text{C}$)

علائم یونانی

θ	زاویه تماس (o)
ρ	چگالی (kg.m^3)
σ	کشش سطحی (N.m^{-1})
γ_{sv}	انرژی آزاد سطحی N.m
γ_{sl}	کشش سطحی N.m^{-1}

زیرنویس‌ها

cr	بحرانی
g	فاز گاز
l	فاز مایع
sat	اشباع
w	سطح جوشش
sl	سطح تماس جامد مایع
sv	سطح تماس جامد بخار

مراجع

- [1] L.S. Tong, Y.S. Tang, Boiling Heat Transfer And Two-Phase Flow, Taylor & Francis, 1997.

- wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(19-20) (2007) 4105-4116.
- [17] S.M. Kwark, R. Kumar, G. Moreno, J. Yoo, S.M. You, Pool boiling characteristics of low concentration nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(5-6) (2010) 972-981.
- [18] J.P. Holman, *Experimental methods for engineers*, (1966).
- [19] S.J. Kline, F. McClintock, Describing uncertainties in single-sample experiments, *Mechanical engineering*, 75(1) (1953) 3-8.
- [20] J.G. Collier, J.R. Thome, *Convective boiling and condensation*, Clarendon Press, 1994.
- [21] A. Nayak, P. Kulkarni, A. Chinchole, Experimental investigation on pool boiling critical heat flux with nanofluids, *Journal of Nanofluids*, 4(2) (2015) 140-146.
- [22] S. Kandlikar, V. Dhir, Y. Iida, R.H. Heist, *Handbook of phase change: Boiling and condensation*, (1999).
- Magnetic Field on Critical Heat Flux of Ferrofluid Flow Boiling in a Vertical Tube, *Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of the ISME*, 19(2) (2018) 116-126.
- [13] H. Aminfar, M. Mohammadpourfard, R. Maroofiazar, Experimental study on the effect of magnetic field on critical heat flux of ferrofluid flow boiling in a vertical annulus, *Experimental thermal and fluid science*, 58 (2014) 156-169.
- [14] J.C. Godinez, D. Fadda, J. Lee, S.M. You, Development of a stable Boehmite layer on aluminum surfaces for improved pool boiling heat transfer in water, *Applied Thermal Engineering*, 156 (2019) 541-549.
- [15] M.S. Lee, D.H. Kam, Y.H. Jeong, Effects of silica nanoparticles and low concentration on the deterioration of critical heat flux in a pool boiling experiment with a flat-type heater, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 144 (2019) 118420.
- [16] S.J. Kim, I.C. Bang, J. Buongiorno, L. Hu, Surface

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

A. A. Jamialahmadi, A. Nazari, M. H. Kayhani, *Experimental study of CuO/Water nanofluid pool boiling on the copper flat surface and measurement of the critical heat flux*, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 53(5) (2021) 3099-3114.

DOI: [10.22060/mej.2020.17892.6685](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17892.6685)

