

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تبدیل انرژی

بهینه سازی فرآیند جوشش استخری و کنترل شار حرارت بحرانی با استفاده از نانوسیال

نگارنده:

امیراحمد جامی الاحمدی

استاد راهنما:

دکتر محمد حسن کیهانی

استاد مشاور:

دکتر احمد نظری

بهمن ۱۳۹۶

شماره: ۳۵۲۹۶/۱۷۹
تاریخ: ۹۷/۱۱/۱۷

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای امیراحمد جامی الاحمدی با شماره دانشجویی ۹۴۰۴۹۰۴ رشته مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان بهینه سازی فرآیند جوش استخری و کنترل شار حرارت بحرانی با استفاده از نانوسیال که در تاریخ ۹۶/۱۱/۰۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: عالی) مردود
نوع تحقیق: نظری عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر محمدحسن کیهانی	استاد	
۲- استاد راهنمای دوم	_____	_____	_____
۳- استاد مشاور	دکتر احمد نظری	استادیار	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محسن نظری	دانشیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر محمود چهارطاقی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر علی جباری مقدم	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد محسن شاه مردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تیمبره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



سیاسگزاری

خداوند بزرگ را شاکرم که لطف خود را شامل حال من نمود تا بتوانم تحقیق خود را به پایان برسانم و بتوانم سهمی هر چند اندک، در راه توسعه علمی ایران عزیز بردارم که چو ایران نباشد، تن من مباد.

تقدیم به پدر و مادرم؛

فداکارانی که در سایه درخت پر بار وجودشان آسودم و از ریشه آنها شاخ و برگ گرفتم و در سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش قدم برداشتم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم. این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی ام بوده‌اند، دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند. آموزگارانی که برایم زندگی بودند و انسان بودن را معنا کردند.

تشکر و قدردانی

در این راه خود را مدیون اساتید بزرگواری می دانم که علم و اخلاق را به من آموختند. بر خود لازم می دانم از استاد با کمالات و شایسته، جناب آقای دکتر محمدحسن کیهانی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند، جناب آقای دکتر احمد نظری به دلیل یاری های بی چشمداشتشان که مشاوره این رساله را پذیرفتند و بسیاری از سختی ها را برایم آسان تر نمودند، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

همچنین از همکاری و مساعدت تمامی اساتید محترم دانشکده، کارمندان محترم دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود، آقایان و خانم ها راهرو، غضنفری، زنگنه، گردان، کاظمی و سایر کسانی که در تدوین این تحقیق مرا یاری نمودند تشکر می کنم و از خداوند منان سلامت و سعادت ایشان را خواستارم.

تعهد نامه

اینجانب امیراحمد جامی الاحمدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک، گرایش تبدیل انرژی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بهینه سازی فرایند جوشش استخری و کنترل شار حرارتی بحرانی با استفاده از نانوسیال تحت راهنمایی آقای دکتر محمدحسن کیهانی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

انتقال حرارت جوشش به دلیل قابلیت نرخ انتقال حرارت بالا، یکی از پرکاربردترین فرآیندهای انتقال حرارت در صنعت است. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در زمینه جوشش استخری نانوسیال انجام شده است. این پژوهش با هدف درک رفتار نانوسیالات و تأثیر نانوپوشش ایجادشده در طی فرآیند انتقال حرارت جوشش استخری می‌باشد. در این راستا رفتار نانوسیالات با غلظت پایین ($\leq 1 \text{ gr/Lit}$)، بر روی هیتر صاف مسی با قطر ۱۰ میلی‌متر و زبری سطح $R_a=7/5$ نانومتر به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. نانوسیال اکسید مس - آب با استفاده از نانوذرات با اندازه ۴۰ نانومتر و غلظت‌های ۱ تا ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر آماده و در این پژوهش استفاده گردید. با بررسی ضریب انتقال حرارت جوشش و شار حرارت بحرانی در غلظت‌های متفاوت نانوسیال، ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت تا ۵۰ میلی‌گرم در لیتر افزایش و بعد از آن با افزایش غلظت کاهش می‌یابد. بنابراین ضریب انتقال حرارت جوشش در غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر از نانوسیال حداکثر به میزان ۵۰ درصد افزایش است. شار حرارت بحرانی نیز در غلظت‌های بالاتر از ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر کاهش و در غلظت‌های پایین با افزایش غلظت افزایش می‌یابد. مقدار شار حرارت بحرانی در غلظت بهینه ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، ۹۲ درصد نسبت به آب دیونیزه افزایش یافته است. برای بررسی خواص سطوح و نانوپوشش ایجاد شده بعد از جوشش نانوسیال از تست‌های SEM، AFM و زاویه تماس استفاده شده است. نتایج نشان دهنده تأثیر مثبت افزایش زبری و اثر مخرب افزایش ضخامت بر افزایش شار حرارت بحرانی و بهبود ضریب انتقال حرارت است. با افزایش آب‌گریزی سطح، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. در این پژوهش به منظور تحلیل هیدرودینامیکی جوشش و تعیین فرکانس جدایش و قطر حباب، تصویربرداری پرسرعت و پردازش تصویر صورت گرفته است. فرکانس جدایش در نانوسیال بیشتر از آب دیونیزه و شعاع حباب جدا شده در نانوسیال کمتر از سیال پایه به دست آمده است.

کلید واژگان: جوشش استخری نانوسیال، ضریب انتقال حرارت، شار حرارت بحرانی، پردازش تصویر

فهرست مطالب

۱.....	فصل اول: مقدمه و مطالعات پیشین.....	
۲.....	مقدمه.....	۱-۱
۲.....	هدف و بیان مساله.....	۲-۱
۳.....	انگیزه انجام پژوهش حاضر.....	۳-۱
۴.....	دامنه تحقیق.....	۴-۱
۵.....	فرآیند تشکیل حباب در هسته‌زا.....	۵-۱
۶.....	نیروهای وارد بر حباب در حال رشد.....	۶-۱
۷.....	پارامترهای مهم جوش.....	۷-۱
۷.....	قطر حباب در لحظه جدایش.....	۱-۷-۱
۸.....	زمان انتظار.....	۲-۷-۱
۸.....	فرکانس تشکیل حباب.....	۳-۷-۱
۹.....	جوشش استخری.....	۸-۱
۱۰.....	منحنی جوشش استخری نوکیاما.....	۱-۸-۱
۱۱.....	رژیم های مختلف جوشش استخری.....	۲-۸-۱
۱۲.....	جوشش هسته‌ای.....	۳-۸-۱
۱۳.....	جوشش گذرا (انتقالی).....	۴-۸-۱
۱۴.....	جوشش فیلمی (لایه‌ای).....	۵-۸-۱
۱۴.....	عوامل تاثیرگذار بر انتقال حرارت جوششی.....	۹-۱
۱۵.....	بهبود انتقال حرارت جوشش هسته‌ای.....	۱۰-۱
۱۵.....	روشهای بهبود فرآیند جوشش.....	۱-۱۰-۱
۱۷.....	نانوسیالات.....	۲-۱۰-۱
۱۸.....	مروری بر مطالعات پیشین.....	۱۱-۱
۲۶.....	نواوری.....	۱۲-۱

۲۷.....	فصل دوم: مواد و روش ها.....	
۲۸.....	مقدمه.....	۱-۲
۲۸.....	نانوسیال.....	۲-۲
۲۹.....	تهیه نانوسیال.....	۳-۲
۲۹.....	انواع روش های تولید نانوسیالات.....	۱-۳-۲
۲۹.....	روش یک مرحله ای.....	۲-۳-۲
۳۰.....	روش دو مرحله ای.....	۳-۳-۲
۳۲.....	تعیین خواص ترموفیزیکی نانو سیال.....	۴-۲
۳۴.....	آماده سازی نمونه های مسی آزمایش تست جوشش.....	۵-۲
۳۵.....	ترازو.....	۶-۲
۳۶.....	منبع تغذیه (اتوترانس و استابیلایزر).....	۷-۲
۳۶.....	داده نگار و حسگر دما.....	۸-۲
۳۷.....	دستگاه آزمایش.....	۹-۲
۳۸.....	روش آزمایش.....	۱۰-۲
۳۹.....	محاسبات.....	۱۱-۲
۴۲.....	زاویه تماس.....	۱۲-۲
۴۳.....	روش اندازه گیری زاویه تماس.....	۱۳-۲
۴۳.....	آنالیز شکل قطره.....	۱-۱۳-۲
۴۴.....	تست زاویه تماس.....	۱۴-۲
۴۵.....	تست non-contact AFM.....	۱۵-۲
۴۷.....	تست SEM.....	۱۶-۲
۴۹.....	دوربین با سرعت عکسبرداری بالا.....	۱۷-۲
۵۰.....	تحلیل هیدرو دینامیکی حباب به روش تصویر برداری سرعت بالا.....	۱۸-۲

۵۰	پردازش تصویر	۱-۱۸-۲
۵۱	فیلتر کردن تصویر	۲-۱۸-۲
۵۳	تشخیص برجستگی (saliency)	۳-۱۸-۲
۵۴	محاسبه قطر حباب جدا شده از سطح	۴-۱۸-۲
۵۴	محاسبه فرکانس جدا شدن حباب از سطح	۵-۱۸-۲
۵۵	فصل سوم: تحلیل و نتایج	
۵۶	مقدمه	۱-۳
۵۷	اعتبار سنجی	۲-۳
۵۸	تکرارپذیری	۳-۳
۶۳	تأثیر ذرات نانو بر روی انتقال حرارت	۴-۳
۶۵	شار حرارت بحرانی (CHF) بر روی سطح صاف مسی	۵-۳
۶۵	نتایج شار حرارتی بحرانی	۶-۳
۶۶	بررسی دلایل افزایش شار حرارت بحرانی	۷-۳
۶۶	خواص ترموفیزیکی نانو سیال	۸-۳
۶۸	مشخصات سطح	۹-۳
۶۸	پروفیل سه بعدی نمونه اسکن شده توسط AFM	۱-۹-۳
۷۲	نتایج تست زاویه تماس	۲-۹-۳
۷۴	نتایج تست (SEM)	۳-۹-۳
۷۹	میکرو لایه	۱۰-۳
۸۰	فرآیند تشکیل لایه رسوب نانو ذرات در جوشش نانو سیال	۱۱-۳
۸۲	نتایج تست‌های CHF نانو سیال CuO/Water	۱۲-۳
۸۴	نتیجه گیری	۱۳-۳
۸۷	تحلیل خطا و عدم قطعیت	۱۴-۳

۹۰.....	نتایج تحلیل هیدرودینامیکی حباب در جوشش	۱۵-۳
۹۲.....	نتیجه گیری تحلیل هیدرودینامیکی حباب در جوشش	۱-۱۵-۳
۹۵.....	فصل چهارم: نتیجه گیری و پیشنهادات.....	
۹۶.....	نتیجه گیری	۱-۴
۹۷.....	پیشنهادها	۲-۴
۹۸.....	فهرست منابع:	

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- نیروهای وارد شده بر حباب در حال رشد روی سطح گرم [۵] ۷
- شکل ۲-۱- رفتار یک هسته‌زا حباب بر حسب زمان [۷] ۹
- شکل ۳-۱- منحنی جوشش نوکیاما برای جوشش استخری آب در حالت اشباع [۸] ۱۱
- شکل ۴-۱- رژیم های مختلف جوشش استخری [۸] ۱۲
- شکل ۵-۱- نمایی از وسایل آزمایشگاهی و نتایج حاصله ون دینگ و همکاران [۱۹] ۲۰
- شکل ۶-۱- اثر غلظت نانو سیال و فشار کاری بر انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیال
[۲۳]Cu/R141b ۲۲
- شکل ۱-۲- تصویر TEM از نانوذره CuO در نانو سیال اکسید مس/آب ۳۱
- شکل ۲-۲- دستگاه همزن اولتراسونیک مدل Q700 شرکت Qsonic ۳۲
- شکل ۳-۲- دستگاه رئومتر مدل MCR 302 ۳۳
- شکل ۴-۲- خواص ترموفیزیکی نانو سیال اکسید مس در غلظتهای ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ درصد
جرمی [۳۷] ۳۳
- شکل ۵-۲- نمای شماتیک نمونه مسی ۳۴
- شکل ۶-۲- دستگاه پولیش شرکت metco ۳۵
- شکل ۷-۲- ترازو مدل PRACTUM124-1S از شرکت Sartorius ۳۵
- شکل ۸-۲- اتوترانس و استابلازر شرکت Omega با توان خروجی ۵ کیلوولت آمپر ۳۶
- شکل ۹-۲- داده نگار مدل TM-947SD شرکت Lutron ۳۷
- شکل ۱۰-۲- نمای شماتیک دستگاه آزمایش تست جوشش ۳۸
- شکل ۱۱-۲- شبیه سازی نمونه مسی با استفاده از نرم افزار ANSYS Fluent ۴۰
- شکل ۱۲-۲- نمودار تغییرات دما در طول نمونه محاسبه شده با استفاده ANSYS Fluent ۴۱
- شکل ۱۳-۲- شکل زاویه تماس قطره بر سطح جامد ۴۲
- شکل ۱۴-۲- شکل تقسیم‌بندی سطوح بر اساس اندازه زاویه تماس با آب ۴۳
- شکل ۱۵-۲- روش قطره چسبیده و کانتور فیت شده ۴۴
- شکل ۱۶-۲- دستگاه تعیین زاویه تماس و کشش سطحی شرکت ازدیاد برداشت فارس ۴۵
- شکل ۱۷-۲- نمودار تغییرات نیروی واندروالسی بین پراب و سطح نمونه در دستگاه AFM ۴۶
- شکل ۱۸-۲- دستگاه AFM ساخت شرکت JPK کشور آلمان، مدل Nanowizard II ۴۷
- شکل ۱۹-۲- دستگاه (SEM) مدل VEGA//XMU شرکت TESCAN ۴۹

- شکل ۲-۲۰- دوربین سرعت بالا مدل Dimax S/4500 frames per second از شرکت PCO..... ۴۹
- شکل ۲-۲۱- عدم توانایی تکنیک imfindcircles در تشخیص حباب غیر کروی..... ۵۱
- شکل ۲-۲۲- ماتریس وزن مربوط به روش فیلتر مکانی..... ۵۲
- شکل ۲-۲۳- تشخیص حباب آبدیونیزه با استفاده از روش فیلتر مکانی..... ۵۳
- شکل ۲-۲۴- مقایسه تشخیص حباب به روش فیلتر کردن تصویر و تشخیص برجستگی..... ۵۴
- شکل ۳-۱- کالیبره کردن دستگاه تست جوشش با آب مقطر و مقایسه آن با مدل روزنو..... ۵۷
- شکل ۳-۲- نمودار میزان سوپرهیت سطح آب..... ۵۹
- شکل ۳-۳- نمودار میزان سوپرهیت سطح نانو سیال اکسید مس با غلظت ۱ میلی گرم بر لیتر با تکرارپذیری ۳..... ۵۹
- شکل ۳-۴- نمودار میزان سوپرهیت سطح نانو سیال اکسید مس با غلظت ۵ میلی گرم بر لیتر با تکرارپذیری ۳..... ۶۰
- شکل ۳-۵- نمودار میزان سوپرهیت سطح نانو سیال اکسید مس با غلظت ۱۰ میلی گرم بر لیتر با تکرارپذیری ۳..... ۶۰
- شکل ۳-۶- نمودار میزان سوپرهیت سطح نانو سیال اکسید مس با غلظت ۵۰ میلی گرم بر لیتر با تکرارپذیری ۳..... ۶۱
- شکل ۳-۷- نمودار میزان سوپرهیت سطح نانو سیال اکسید مس با غلظت بهینه ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر با تکرارپذیری ۳..... ۶۱
- شکل ۳-۸- نمودار میزان سوپرهیت سطح نانو سیال اکسید مس با غلظت ۵۰۰ میلی گرم بر لیتر با تکرارپذیری ۳..... ۶۲
- شکل ۳-۹- نمودار میزان سوپرهیت سطح نانو سیال اکسید مس با غلظت ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر با تکرارپذیری ۳..... ۶۲
- شکل ۳-۱۰- ضریب انتقال حرارت جوششی بر حسب شار حرارتی برای غلظتهای متفاوت نانوسیال..... ۶۴
- شکل ۳-۱۱- مقادیر شار حرارت بحرانی بر اساس مقادیر غلظت نانو سیال CuO/Water..... ۶۶
- شکل ۳-۱۲- نمودار ویسکوزیته نانو سیال ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر CuO/Water در دمای $6725^{\circ}C$ ۶۷
- شکل ۳-۱۳- نمودار ویسکوزیته نانو سیال ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر CuO/Water در دمای $6780^{\circ}C$ ۶۷
- شکل ۳-۱۴- تصویر سطح نمونه خام مسی صیقلی قبل از تست..... ۶۸
- شکل ۳-۱۵- پروفیل دو و سه بعدی سطح نمونه خام مسی صیقلی قبل از تست جوشش با زبری میانگین سطح $Ra=7/5$ نانومتر..... ۶۹

- شکل ۳-۱۶ - پروفیل دو و سه بعدی سطح نمونه مسی بعد از تست جوشش نانو سیال CuO/Water
 ۱ میلی گرم در لیتر با زبری میانگین سطح $Ra=28/7$ نانومتر ۶۹
- شکل ۳-۱۷ - پروفیل دو و سه بعدی سطح نمونه مسی بعد از تست جوشش نانو سیال CuO/Water
 ۵ میلی گرم در لیتر با زبری میانگین سطح $Ra=53/6$ نانومتر ۶۹
- شکل ۳-۱۸ - پروفیل دو و سه بعدی سطح نمونه مسی بعد از تست جوشش نانو سیال CuO/Water
 ۱۰ میلی گرم در لیتر با زبری میانگین سطح $Ra=77/1$ نانومتر ۷۰
- شکل ۳-۱۹ - پروفیل دو و سه بعدی سطح نمونه مسی بعد از تست جوشش نانو سیال CuO/Water
 ۵۰ میلی گرم در لیتر با زبری میانگین سطح $Ra=147/1$ نانومتر ۷۰
- شکل ۳-۲۰ - پروفیل دو و سه بعدی سطح نمونه مسی بعد از تست جوشش نانو سیال CuO/Water
 ۱۰۰ میلی گرم در لیتر با زبری میانگین سطح $Ra=167/5$ نانومتر ۷۰
- شکل ۳-۲۱ - پروفیل دو و سه بعدی سطح نمونه مسی بعد از تست جوشش نانو سیال CuO/Water
 ۵۰۰ میلی گرم در لیتر با زبری میانگین سطح $Ra=185/6$ نانومتر ۷۱
- شکل ۳-۲۲ - پروفیل دو و سه بعدی سطح نمونه مسی بعد از تست جوشش نانو سیال CuO/Water
 ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر با زبری میانگین سطح $Ra=134/7$ نانومتر ۷۱
- شکل ۳-۲۳ - نمودار میزان زبری متوسط سطح Ra بر اساس غلظت‌های مختلف نانو سیال
 CuO/Water ۷۱
- شکل ۳-۲۴ - تصویر زاویه آب مقطر با سطح نمونه خام مسی صیقلی قبل از تست جوشش ۷۲
- شکل ۳-۲۵ - نمایش زاویه آب مقطر با سطح نمونه‌های تست بعد جوشش نانو سیال CuO/Water ۷۳
- شکل ۳-۲۶ - تغییرات زاویه تماس نمونه‌ها بعد از جوشش نانو سیال با غلظت‌های مختلف ۷۴
- شکل ۳-۲۷ - ساختار نمونه (تصویر SEM) و سه بعدی شبیه سازی شده سطح نمونه مسی بعد از
 تست جوشش نانو سیال ۵ میلی گرم در لیتر CuO/Water با بزرگنمایی ۲۲۰۰۰ ۷۵
- شکل ۳-۲۸ - ساختار نمونه (تصویر SEM) و سه بعدی شبیه سازی شده سطح نمونه مسی بعد از
 تست جوشش نانو سیال ۱۰ میلی گرم در لیتر CuO/Water با بزرگنمایی ۲۶۰۰۰ ۷۵
- شکل ۳-۲۹ - ساختار نمونه (تصویر SEM) و سه بعدی شبیه سازی شده سطح نمونه مسی بعد از
 تست جوشش نانو سیال ۵۰ میلی گرم در لیتر CuO/Water با بزرگنمایی ۲۶۰۰۰ ۷۶
- شکل ۳-۳۰ - ساختار نمونه (تصویر SEM) و سه بعدی شبیه سازی شده سطح نمونه مسی بعد از
 تست جوشش نانو سیال ۱۰۰ میلی گرم در لیتر CuO/Water با بزرگنمایی ۲۸۰۰۰ ۷۶

- شکل ۳-۳۱ - ساختار نمونه (تصویر SEM) و سه بعدی شبیه‌سازی شده سطح نمونه مسی بعد از تست جوشش نانو سیال ۵۰۰ میلی گرم در لیتر CuO/Water با بزرگنمایی ۲۰۰۰۰..... ۷۷
- شکل ۳-۳۲ - ساختار نمونه (تصویر SEM) و سه بعدی شبیه‌سازی شده سطح نمونه مسی بعد از تست جوشش نانو سیال ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر CuO/Water با بزرگنمایی ۲۲۰۰۰..... ۷۷
- شکل ۳-۳۳ - اندازه ضخامت پوشش نانو ذرات CuO بعد از تست جوشش نانو سیال CuO/Water بر اساس تصاویر SEM..... ۷۸
- شکل ۳-۳۴ - نمودار تغییرات ضخامت پوشش نانو ذرات CuO بر روی سطح نمونه بعد از تست جوشش در غلظت نانو سیال..... ۷۹
- شکل ۳-۳۵ - نواحی و مکانیزم‌های انتقال حرارت در حباب بخار..... ۸۰
- شکل ۳-۳۶ - مکانیسم تشکیل لایه رسوب نانو ذرات در فرایند جوشش نانو سیالات [۵۱]..... ۸۱
- شکل ۳-۳۷ - تصویر نانو پوشش تشکیل شده در محل هسته فعال تشکیل حباب [۵۲]..... ۸۱
- شکل ۳-۳۸ - نمودار دمای سطح بر حسب زمان DI Water..... ۸۲
- شکل ۳-۳۹ - نمودار دمای سطح بر حسب زمان برای تست جوشش آب و نانو سیال CuO/Water در غلظت‌های مختلف..... ۸۳
- شکل ۳-۴۰ - نمودار میزان سوپرهیت سطح تست جوشش آب و نانو سیال CuO/Water در غلظت‌های مختلف..... ۸۳
- شکل ۳-۴۱ - تاثیر زاویه تماس روی پارامترهای جوشش هسته‌های [۱۱]..... ۸۵
- شکل ۳-۴۲ - نمودار مقایسه میزان CHF با دو فرمول تجربی زوبر و کاندلیکار..... ۸۶
- شکل ۳-۴۳ - نمودار افزایش CHF، به‌عنوان نسبت میزان CHF نانو سیال به اندازه CHF پیش‌بینی شده توسط زوبر برای آب در دمای شار حرارت بحرانی هر نانو سیال..... ۸۶
- شکل ۳-۴۴ - تصاویر مربوط به حباب در شار حرارتی ۱/۰۹۱۴ مگاوات بر مترمربع..... ۹۰
- شکل ۳-۴۵ - تصاویر مربوط به حباب در شار حرارتی ۱/۲۸۰۸ مگاوات بر مترمربع..... ۹۱
- شکل ۳-۴۶ - تصاویر مربوط به حباب در شار حرارتی ۱/۴۸۵۴ مگاوات بر مترمربع..... ۹۱
- شکل ۳-۴۷ - تصاویر مربوط به حباب در شار حرارتی ۱/۷۰۵۲ مگاوات بر مترمربع..... ۹۲

فهرست جداول

- جدول ۱-۱- روش های بهبود در فرآیند جوشش ۱۷
- جدول ۱-۲- رابطه میان قدرت برهم کنش مایع/ مایع و جامد/ مایع، درجه ترشوندگی را بر اساس زاویه تماس ۴۳
- جدول ۱-۳- مقادیر شارحرارت بحرانی اندازه گیری شده در غلظتهای مختلف ۵۸
- جدول ۲-۳- دقت وسایل اندازه گیری آزمایشگاهی ۸۸
- جدول ۳-۳- مقدار عدم قطعیت برای آزمایش جوشش نانوسیال ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر اکسید مس/آب ۸۸
- جدول ۴-۳- مقدار عدم قطعیت برای آزمایش جوشش آب ۸۹

فهرست علائم

نماد	توضیح	واحد
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه	$J/kg^{\circ}c$
C_{sf}	ضریب تصحیح رابطه رزنو	-
h	ضریب انتقال حرارت	$W/m^{2\circ}c$
h_{fg}	گرمای نهان سیال	J/kg
k	ضریب هدایت حرارتی	$W/m^{\circ}c$
q''	شار حرارتی	W/m^2
R_a	متوسط زبری سطح	nm
U	عدم قطعیت	-
μ	لزجت دینامیکی	Pa.s
ρ_g	چگالی مایع	Kg/m^2
ρ_g	چگالی بخار	Kg/m^2
σ	کشش سطحی	N/m
g	شتاب گرانش	m/s^2
θ	زاویه تماس	$^{\circ}$
α	زاویه سطح	$^{\circ}$
D_{BD}	قطر جدایش حباب	cm
f_r	فرکانس جدایش حباب	s^{-1}
t_w	زمان انتظار	s
t_g	زمان رشد	s
T	دما	$^{\circ}c$
ΔT	اختلاف دما	$^{\circ}c$
V	ولتاژ	v
R	مقاومت	Ω
r	شعاع	mm
N	تعداد حباب جدا شده	-
n	تعداد عکس	-

فصل اول:

مقدمه و مطالعات پیشین

۱-۱ مقدمه

جوشش یکی از فرآیندهای متداول و بسیار پیچیده در علوم مهندسی به دلیل دینامیک رشد حبابها است. فهم و مدل سازی دقیق تر فرآیند جوشش مستلزم مدل سازی این زیر فرآیندها می باشد. در این فصل کلیاتی درباره جوشش بیان شده است تا علاوه بر آشنایی با جوشش (به خصوص جوشش استخری)، پارامترهای مؤثر بر آن و منحنی جوشش، یک دیدگاه کلی از این فرآیند به دست آید.

۲-۱ هدف و بیان مساله

از انتقال حرارت جوششی در موارد صنعتی مانند تهویه مطبوع، تبرید، ژنراتورهای گرمایی قدرت، رآکتورهای هسته ای مهندسی شیمی، مدیریت گرمایی هواپیما و فضاپیما و خنک کننده های دستگاه های الکترونیکی با قدرت بالا استفاده می شود. شدت انتقال حرارت با ضریب انتقال حرارت اندازه گیری می شود. بالا بردن ضریب انتقال حرارت جوششی برای ساختن سیستم های جوششی با کارآمدی انرژی بیشتر، کاهش قابل توجه مصرف انرژی و افزایش در شار حرارتی بحرانی، امری حیاتی محسوب می شود. سیستم های حرارتی جوششی کوچک بایستی امن و با قابلیت تحمل شار حرارتی بالا ساخته شوند [۱].

هدف کلی پژوهش حاضر درک بیشتر رفتار حرارتی نانوسیالات و نانو پوشش تولیدی در حین انتقال حرارت جوشش استخری می باشد. تأثیر نانو پوشش اکسید مس بر روی شار حرارت بحرانی از اهداف پروژه خواهد بود.

برای درک بهتر ضریب انتقال حرارت جوشش^۱ و شار حرارت بحرانی^۲، تقریباً در تمام بخش های مطالعات پیشین دلیل افزایش در میزان شار حرارت بحرانی به رسوب نانوذرات بر سطح هیتر در طی جوشش نانوسیال نسبت داده شده است. اگر چه دلیل اصلی افزایش شار حرارت بحرانی و تغییر در میزان ضریب انتقال حرارت جوششی به طور کامل کشف نشده است، تقریباً در تمام بخش های

¹ Heat Transfer Coefficient/HTC

² Critical Heat Flux/CHF

مطالعات پیشین دلیل افزایش در میزان شار حرارت بحرانی به رسوب نانوذرات بر سطح هیتر در طی جوشش نانوسیال نسبت داده شده است.

هدف از این پژوهش مطالعه جامع برای درک بیشتر دلیل اصلی تغییر در شارحرارت بحرانی و در میزان ضریب انتقال حرارت جوششی است. بر اساس پژوهش‌های گذشته که فقط در نانوسیالات با غلظت کم (۰/۰۰۱ تا ۱ گرم بر لیتر) حداکثر افزایش را شامل می‌شود، بررسی شده است. در این غلظت‌های پایین خواص حرارتی نانوسیال که شامل نقطه جوش، ویسکوزیته، هدایت حرارتی و کشش سطحی تقریباً با سیال پایه برابر خواهد بود. بر این اساس تمرکز پژوهش حاضر بر روی رسوب و چگونگی تأثیر آن بر شارحرارت بحرانی و تغییر در میزان ضریب انتقال حرارت جوششی خواهد بود. مکانیزم تشکیل رسوب نانوذرات، رفتار آب‌دوستی، زبری و ضخامت آن، به صورتی که بیشترین میزان در شار حرارت بحرانی و ضریب انتقال حرارت را داشته باشد، مورد مطالعه و بررسی قرار خواهد گرفت. اهداف برجسته به صورت خلاصه در زیر آمده است.

- اندازه‌گیری خواص حرارتی نانوسیال
- آزمایشات انجام شده برای مشاهده ویژگی‌های جوشش استخری نانوذرات
- درک علت تنوع ضریب انتقال حرارت جوششی و افزایش شار حرارت بحرانی در طی جوشش نانوسیال

- بررسی نانوذرات رسوب کرده و تأثیر آن بر عملکرد سطح هیتر
- پیدا کردن یک غلظت بهینه برای حداکثر شار حرارت بحرانی

۳-۱ انگیزه انجام پژوهش حاضر

انگیزه بسیاری از مطالعات پیشین، فرموله کردن یک روش پیش‌بینی مدل انتقال حرارتی در سیستم‌های خنک کننده برای راکتورهای هسته‌ای، چرخه‌های تبرید و لوازم الکترونیکی بر مبنای تغییر سیال و زبر کردن سطح برای بهبود قابل ملاحظه در توانایی ایجاد هسته‌زاهای حباب و به دنبال آن افزایش قابل توجه در انتقال حرارت جوششی می‌باشد.

این سطوح بهبود یافته در بسیاری از دستگاه‌های تجاری بر مبنای جوشش استفاده می‌شوند، چون این سطوح سبب افزایش قابل ملاحظه در ضریب انتقال حرارت جوششی و افزایش شار حرارت بحرانی می‌شوند.

انتظار می‌رود که نتایج این مطالعه توسط طراحان سیستم‌های خنک کننده الکترونیکی ظرفیت بالا، سیستم‌های انرژی و همچنین در خنک کننده راکتورهای هسته‌ای که سیال و سطح با ظرفیت بالا نیاز دارند استفاده شود.

۴-۱ دامنه تحقیق

دامنه پژوهش حاضر انجام آزمایش جوشش استخری نانوسیال اکسید مس / آب در غلظت پایین ($\leq 1 \text{ gr/Lit}$) در فشار اتمسفر و بر روی سطح صاف افقی است؛ که با تغییر تدریجی شار حرارتی به سطح گرم، شار گرمایی ماکزیمم (شار حرارت بحرانی) قابل دستیابی است.

جوشش

جوشش به علت تفاوت بسیار زیاد آنتالپی تبخیر نسبت به آنتالپی سیال در همان دما (در دما ۹۵ درجه سانتی‌گراد و فشار ۸۶ کیلو پاسکال، آنتالپی آب ۳۹۸ و تبخیر ۲۲۷۰ کیلوژول بر کیلوگرم است)، قابلیت نرخ انتقال حرارت بسیار بالاتری نسبت به سیال تک‌فاز در همان دما دارد. به همین دلیل، قابلیت جلوگیری از افزایش دمای سطح در شار حرارتی بالا را دارد.

جوشش یک فرآیند تغییر فاز است که طی آن حباب‌های بخار بر روی سطح گرم شده و یا در لایه مایع سوپرهیت که در مجاورت یک سطح گرم است، شکل می‌گیرد. جوشش با فرآیند تبخیر که در سطح مشترک و قابل پیش‌بینی مایع گاز رخ می‌دهد، متفاوت است. در فرآیند جوشش این سطوح بر روی سطح گرم در مرز بین هسته‌زای حباب، سیال و بخار رخ می‌دهد [۲].

انتقال حرارت جوششی به دو نوع کلی تقسیم می‌شود: جوشش استخری^۱ و جوشش در جریان^۲

¹ Pool boiling

² Flow boiling

جوشش استخری به انتقال انرژی گرمایی از یک سطح گرم که در دمای بالاتر از دمای اشباع است به مایع ساکن در یک مخزن با دمای اشباع گفته می‌شود. جوشش در جریان به تغییر فاز سیال به بخار در مخلوط دوفازی در حال جریان مایع و بخار نسبت داده می‌شود. به دلیل نرخ انتقال حرارت بالا در فرآیند جوشش، از این پدیده برای خنک کردن دستگاه‌هایی که نیاز به سرعت انتقال حرارت زیاد دارند، مانند موتور موشک‌ها، راکتورهای هسته‌ای و سیستم‌های الکترونیکی ظرفیت بالا استفاده می‌شود. درک پدیده و رفتار پیچیده جوشش به عوامل مختلفی همچون خواص ترموفیزیکی سیال و شرایط سطح از جمله، زبری، میزان رسوب و مقدار جذب گاز بر روی حفرات سطح بستگی دارد [۳].

۱-۵ فرآیند تشکیل حباب در هسته‌زا

در تحقیقات گذشته که از میکروسکوپ الکترونی استفاده شده است، تمامی حفرات، خراشیدگی‌ها، میکروصخره‌ها می‌توانند به عنوان هسته‌زای حباب، فعال شوند. عملکرد هسته‌زای جوشش، وابسته به نحوه فعال شدن و فعال ماندن آن است. اگر حفره کاملاً از سیال پر شده باشد، اختلاف دمای سطح و سیال باید به حدی زیاد باشد که انرژی لازم برای تشکیل حباب تأمین شود. حال اگر حباب به حد کافی رشد کرده و آزاد شود یکی از سه حالت زیر اتفاق خواهد افتاد.

- حفره کاملاً از سیال پر می‌شود، بنابراین به زمان مشخصی برای فعال شدن دوباره نیاز دارد.
- سیال بخشی از حفره را پر کرده و در زمانی کوتاه، حباب دیگری شروع به رشد می‌کند.
- یک حباب میکروسکوپی در حفره باقی می‌ماند که توانایی رشد و تبدیل به حباب بزرگ‌تر را دارد.

با توجه به حالت‌های بالا فعالیت و قدرت تولید حباب توسط حفره به توانایی نگه داشتن حباب بخار بستگی دارد که باعث افزایش تولید حباب بعدی خواهد شد.

سینگ و همکاران [۴] حرکت سطح مشترک مایع-بخار را بررسی کردند. آن‌ها با توجه به بررسی نیروهای بین سطح جوشش و فاز مایع و بخار و زاویه تماس سطح با قطره سیال دریافتند که با کاهش زاویه تماس، نفوذ مایع به درون هسته‌زا بیشتر شده است و در نتیجه دمای سوپرهیت سطح بیشتری

برای فعال شدن حفره به عنوان هسته جوشش لازم است. آن‌ها با توجه به سرعت اولیه نفوذ مایع دریافتند که با افزایش سرعت نفوذ سیال به حفره، میزان نفوذ سیال به حفره افزایش یافته و پایداری هسته فعال جوشش کاهش می‌یابد.

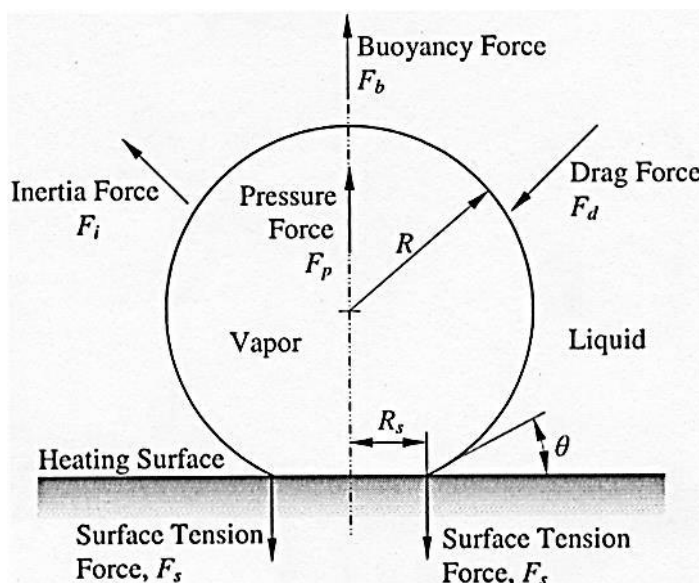
جوشش بر اساس محل قرارگیری هسته‌زا و تشکیل حباب به دو دسته هسته‌زایی همگن^۱ (که تشکیل هسته حباب درون مایع مافوق گرم صورت گرفته، به سوپرهیت بسیار زیادی برای تشکیل آن نیاز است و عملاً به ندرت اتفاق می‌افتد) و هسته‌زایی ناهمگن^۲ (که در حفره‌های سطح مشترک مایع و سطح گرم جامد تشکیل می‌گردد)، تقسیم‌بندی می‌شود.

۱-۶ نیروهای وارد بر حباب در حال رشد

استمن در سال ۱۹۸۴ [۵] تجزیه و تحلیل مربوط به دینامیک حباب را ارائه کرد. در طی جوشش هسته‌ای در آغاز تشکیل حباب که حجم آن کوچک است، نیروهای رو به پایین که حباب را در سطح جوشش نگه می‌دارند بسیار بزرگ‌تر از نیروهای رو به بالایی که سعی در جدا کردن حباب دارند، می‌باشند. در طی رشد حباب نیروهای رو به بالا با سرعت بیشتری نسبت به نیروهای رو پایین افزایش می‌یابند تا جایی که حباب از سطح جدا می‌شود. نیروهای نگه‌دارنده حباب (رو به پایین) کشش سطحی و درگ هیدرودینامیکی که در برابر جدایش حباب مقاومت می‌کنند و نیروهای رو به سمت بالا اینرسی، فشار داخلی حباب و شناوری است که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.

^۱ Homogeneous nucleation

^۲ Heterogeneous nucleation



شکل ۱-۱- نیروهای وارد شده بر حباب در حال رشد روی سطح گرم [۵]

۷-۱ پارامترهای مهم جوشش

۱-۷-۱ قطر حباب در لحظه جدایش

محاسبه قطر حباب در لحظه جدایش نیازمند تحلیل و ساده‌سازی است. به دلیل بزرگ بودن حباب در لحظه جدایش نیروهای مؤثر دو نیروی خلاف جهت شناوری و کشش سطحی می‌باشند. در لحظه جدایش نیروی شناوری بر کشش سطحی غلبه کرده و حباب آزاد می‌شود. نیروی کشش سطحی به مقدار زاویه تماس بستگی دارد. فریتز [۶] معادله ۱-۱ را از تعادل دو نیروی کشش سطحی و شناوری برای قطر جدایش پیشنهاد کرده است.

$$D_{BD} = 0.0208 \theta^0 \left(\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_V)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-1)$$

پارامترهای D_{BD} و θ^0 به ترتیب قطر حباب در لحظه جدایش و زاویه تماس سیال با سطح، σ کشش سطحی سیال و ρ_L و ρ_V به ترتیب چگالی سیال و بخار است.

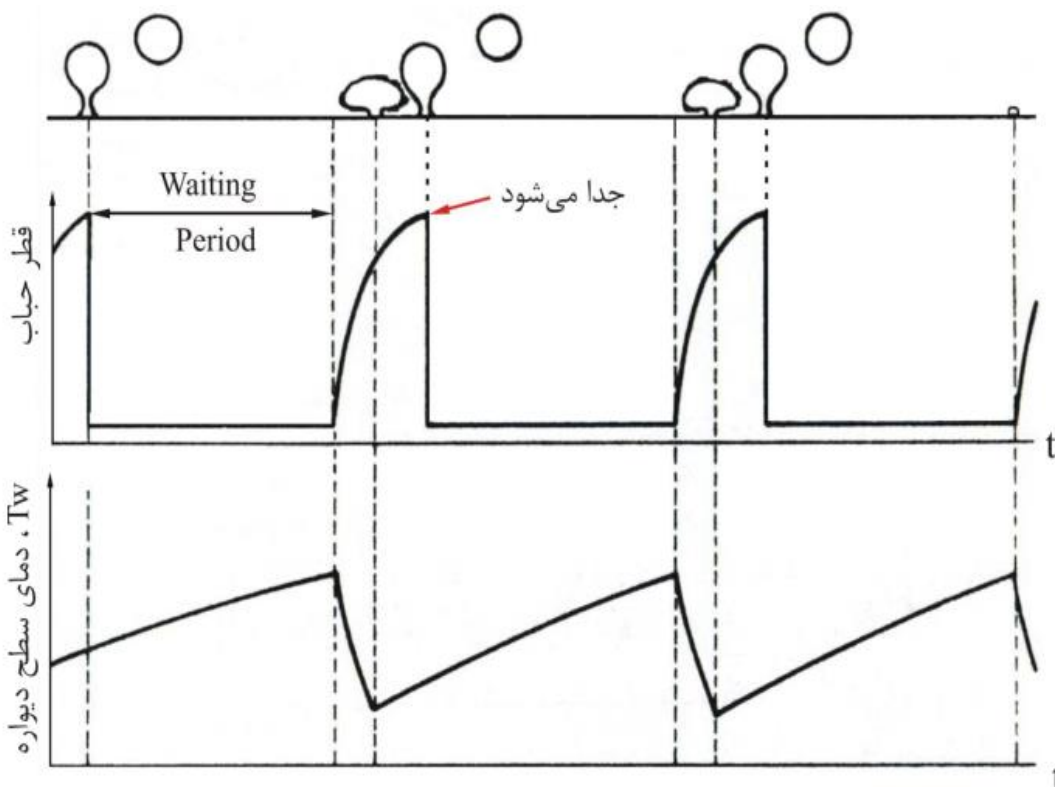
۱-۷-۲ زمان انتظار

پس از جدا شدن حباب از هسته، مدت زمان لازم برای تشکیل حباب بعدی در همان هسته‌ها زمان انتظار گفته می‌شود. به عبارت دیگر پس از جدایش حباب، مدت زمان لازم برای رسیدن هسته حباب به نقطه گذار را زمان انتظار (t_w) گویند. در شار حرارتی پایین، زمان انتظار خیلی بیشتر از زمان رشد حباب می‌باشد. زمان انتظار وابسته به شار حرارتی، قابلیت ترشوندگی یا سرعت جریان موئینگی سیال بر روی سطح، ضریب نفوذ گرمایی سطح و سیال و مقدار مافوق گرم مورد نیاز برای هسته‌زای حباب است. این پارامتر به زمان رشد ارتباطی ندارد.

۱-۷-۳ فرکانس تشکیل حباب

پس از رسیدن حباب به نقطه گذار، حباب خیلی سریع رشد کرده و مایع سوپرهیت را از سطح کنار می‌زند؛ فقط یک لایه نازک مایع (میکرو لایه)^۱ به ضخامت چند میکرومتر در تماس با سطح در زیر حباب باقی می‌ماند. مایع موجود در این لایه نازک بلافاصله با گرفتن حرارت تبدیل به بخار می‌شود و سبب کاهش شدید دما خواهد شد. (زمان رشد t_g) در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.

^۱ microlayer



شکل ۲-۱- رفتار یک هسته‌زا حباب بر حسب زمان [۷]

با استفاده از زمان انتظار و زمان رشد، فرکانس جدایش حباب بر حسب واحد هرتز به صورت زیر تعریف می‌شود (رابطه ۲-۱).

$$fr = \frac{1}{t_w + t_g} \quad (2-1)$$

در رابطه فوق، پارامترهای t_w و t_g بر حسب واحد ثانیه تعریف شده است. مشاهده و اندازه‌گیری فرکانس جدایش حباب در آزمایش معیار خوبی برای مطالعه عملکرد جوشش می‌باشد.

۸-۱ جوشش استخری

هرگاه جوشش در مایع ساکن در محفظه ثابت بر روی سطح هیتر با دمای سطح بالاتر از دمای اشباع باشد رخ دهد، جوشش استخری نامیده می‌شود. مایع درون محفظه در اثر جابجایی طبیعی و حرکت حباب‌ها حرکت می‌کند. اگر این استخر سیال به حالت لایه کم ضخامت سیال روی سطح، گرم شده

باشد تبخیر مستقیماً از سطح لایه کم ضخامت سیال انجام می‌شود. جوشش هسته‌ای^۱ در شارهای حرارتی بالا با به وجود آمدن حباب روی سطح جوشش اتفاق می‌افتد. جوشش از نظر دمای سیال به دو دسته فرو سرد^۲ و اشباع^۳ تقسیم‌بندی می‌شوند: در حالت فرو سرد دمای مایع از دمای اشباع کمتر می‌باشد و حباب‌های تشکیل شده از سطح، در سیال چگالیده می‌شوند. در حالت اشباع دمای مایع برابر با دمای اشباع می‌باشد و حباب‌های جدا شده از سطح گرم به وسیله نیروهای شناوری از سطح آزاد سیال خارج می‌شوند.

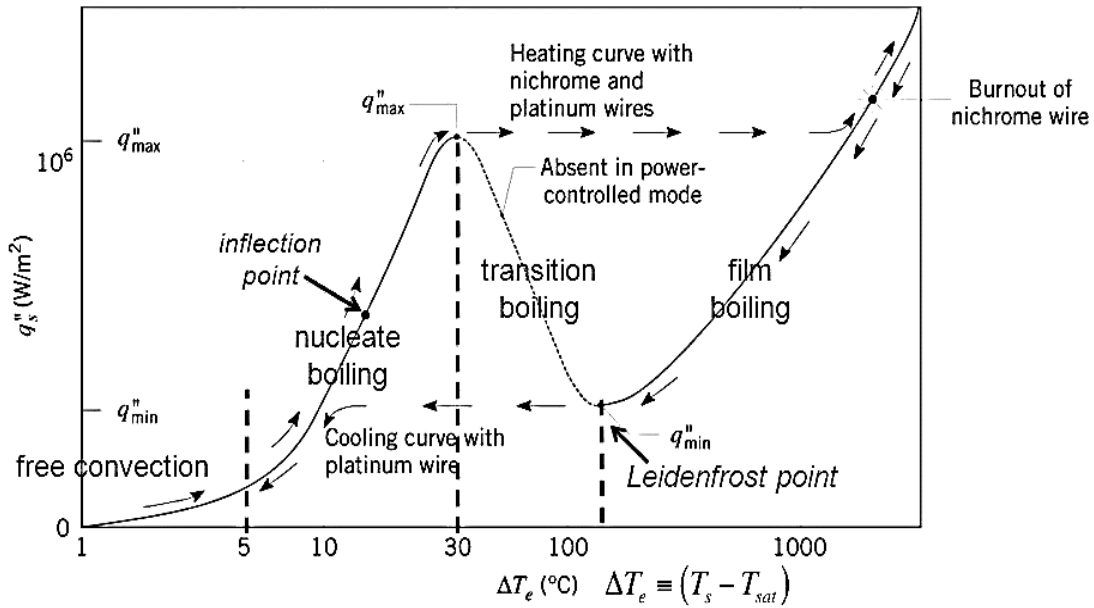
۱-۸-۱-۱ منحنی جوشش استخری نوکیاما

نوکیاما در سال ۱۹۳۴ جوشش استخری را با کمک گرمایش سیم را مطالعه نمود و با اندازه گرفتن مقدار ولتاژ و جریان الکتریکی، شار گرمایی که به سیم نیکل-کروم وارد شد را به دست آورد و تغییرات آن را بر حسب اختلاف دمای سیم با سیال بررسی نمود. نتیجه این آزمایش نشان‌گر افزایش اندک اختلاف دمای سیم با افزایش شار حرارتی بود. در ادامه با افزایش شار، سیم ناگهان ذوب شد. نوکیاما آزمایش فوق را با سیم پلاتینیومی تکرار کرد. با افزایش شار حرارتی سیم ذوب نشد. با کاهش توان ورودی به سیم گداخته، دما به صورت پیوسته کاهش پیدا کرد تا جایی که شار حرارتی به مقدار بسیار کمتر از مقداری که اولین جهش در دما مشاهده شد، رسید. بعد دما به طور ناگهانی کاهش پیدا کرد تا زمانی که در منحنی ΔT_{sat} بر حسب q قرار بگیرد. در شکل ۱-۳ منحنی جوشش برای آب اشباع در فشار یک اتمسفر بر روی سطح صاف افقی، نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، مسیر زیاد شدن شار با کم شده آن تفاوت دارد. قسمت نقطه چین در شکل مرتبط با حالت گذار است که با کنترل توان منبع حاصل می‌شود [۸].

¹ Nucleate

² Subcooled boiling

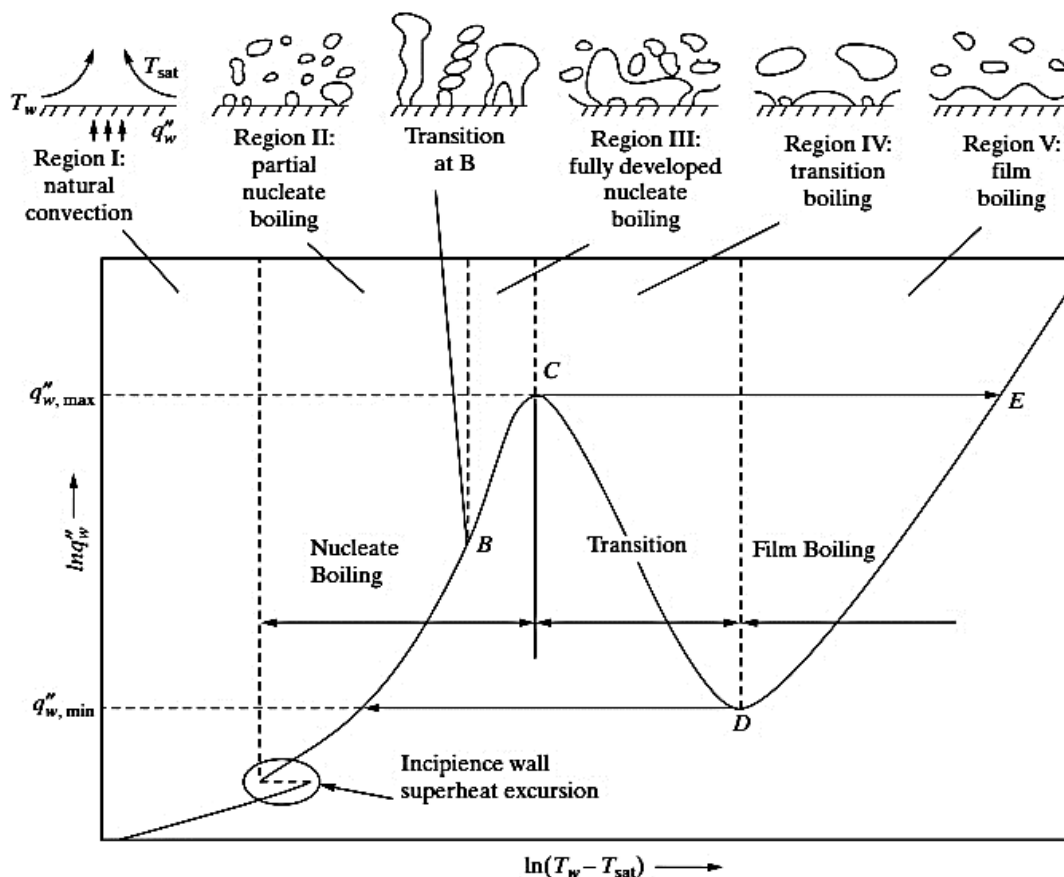
³ Saturated boiling



شکل ۳-۱- منحنی جوشش نوکیاما برای جوشش استخری آب در حالت اشباع [۸]

۲-۸-۱ رژیم‌های مختلف جوشش استخری

برای فهم مکانیزم‌های فیزیکی انتقال حرارت در فرآیند جوشش استخری می‌توان از بررسی رژیم‌های مختلف جوشش استخری استفاده کرد. با توجه به شرایط جوشش از جمله نوع سیال، سطح و شرایط محیط جوشش، منحنی رفتار تمامی سیالات در جوشش استخری تقریباً مشابه می‌باشد. در شکل ۴-۱ رژیم‌های مختلف جوشش استخری بر روی سطح صاف به صورت کلی بر حسب شار ورودی و اختلاف دمای اشباع سیال با دمای سطح رسم شده است.



شکل ۱-۴- رژیم‌های مختلف جوشش استخری [۸]

۱-۸-۳ جوشش هسته‌ای^۱

جوشش هسته‌ای زمانی اتفاق می‌افتد که دمای سطح به اندازه کافی از دمای اشباع سیال بیشتر شود تا هسته‌ها فعال شوند یعنی بین نقطه آغاز ایجاد حباب و اولین نقطه انتقالی نوکیاما: در قسمت A-B حباب‌های مجزا در نواحی هسته‌زا ایجاد و از سطح جدا می‌شوند این جدایش سبب آمیختگی شدید سیال نزدیک سطح گرم، شده و در نتیجه انتقال حرارت افزایش می‌یابد. در جوشش استخری، قسمت اعظم تبادل گرما به صورت مستقیم از سطح به مایع بر روی سطح اتفاق می‌افتد (توسط حباب‌های بخار که از سطح به طرف بالا حرکت می‌کنند، اتفاق نمی‌افتد). با افزایش مقدار شار حرارتی و اختلاف دمای سوپرهیت سطح، تعداد هسته‌های فعال افزایش می‌یابد. در قسمت B-C که تعداد هسته‌های فعال افزایش زیادی یافته است، حباب‌ها به همدیگر می‌پیوندند و در نتیجه نوع متفاوتی از حرکت

^۱ Nucleate Boiling

بخار به شکل ستون و جت حباب تشکیل می‌شود. در نقطه‌ای بین B و C، ضریب انتقال حرارت به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد. پس از این نقطه، ضریب انتقال حرارت با افزایش دمای سوپرهیت، شروع به کم شدن می‌کند از این جهت که شار حرارتی از حاصل ضرب ضریب انتقال حرارت و دمای سوپرهیت به دست می‌آید، شار حرارتی تا جایی افزایش می‌یابد که مقدار افزایش دمای سوپرهیت با کاهش ضریب انتقال حرارت موازنه شود، در اینجا شار حرارتی ماکزیمم یا شار حرارت بحرانی نقطه C اتفاق می‌افتد. در این نقطه بحرانی، بخار زیادی به سبب شار حرارت زیاد تشکیل شده که رسیدن سیال به سطح را با مشکل مواجه می‌کند.

در سیستم‌هایی که شار حرارتی متغییر مستقل است (مانند راکتورهای هسته‌ای) کارکرد سیستم در نزدیکی شار حرارت بحرانی خطرناک است. اگر شار حرارتی از مقدار شار حرارت بحرانی بیشتر شود دمای سوپرهیت سطح ناگهان تا چند صد درجه بالا رفته و به نقطه E می‌رسد که خطرناک بوده و سبب خرابی سیستم می‌شود.

به دلیل ماکزیمم بودن ضریب انتقال حرارت در رژیم جوشش هسته‌ای، در ناحیه‌ای قبل از شار حرارت بحرانی و توانایی بیشتر در انتقال حرارت، بهتر است سیستم‌های خنک کننده تجهیزات با ظرفیت گرمایی بالا در نقطه قبل از شار حرارت بحرانی و نزدیک به ماکزیمم ضریب انتقال حرارت برای بیشترین بازده طراحی شوند.

۱-۸-۴ جوشش گذرا (انتقالی)^۱

بعد از شار حرارت بحرانی نقطه C ناحیه که برخلاف رژیم‌های قبلی که با کنترل شار به دست می‌آمد با کنترل بر روی دمای سوپرهیت، ناحیه C-D رژیم جوشش گذرا حاصل می‌شود [۹]. در این ناحیه در هر نقطه از سطح جوشش بین جوشش فیلمی و هسته در نوسان می‌باشد، سطح با لایه‌ای ناپایدار از بخار پوشانده شده است. قسمتی از سطح که با لایه حباب پوشیده شده است، با افزایش دما، گسترش می‌یابد. میزان جدایش حباب از سطح به مرور کمتر شده تا نقطه D (لیدن فراست^۲) که سطح کاملاً با

^۱ Transition Boiling

^۲ Leidenfrost

لایه بخار پوشانده شده است، شار حرارتی به کمترین میزان خود می‌رسد. به علت اینکه رسانایی گرمایی لایه بخار بسیار پایین‌تر از رسانایی گرمایی سیال می‌باشد، با زیاد شدن دما در قسمت مقدار ضریب جابجایی و انتقال شار گرمایی کم می‌شود. در واقعیت جوشش انتقالی کمتر اتفاق رخ می‌دهد زیرا فقط با کنترل درجه حرارت سطح که بسیار دشوار و نیازمند دستگاه‌های پیشرفته می‌باشد می‌توان به آن دست یافت. حد بالای این نوع جوشش مورد توجه قرار می‌گیرد چون در آن لایه پایدار بخار ایجاد شده و شار گرما به مینیمم مقدار خود می‌رسد. اگر شار گرمایی کمتر از مقدار مینیمم خود شود سطح سرد شده و لایه بخار از بین می‌رود در نتیجه رژیم جوشش هسته‌ای برقرار می‌شود.

۱-۸-۵ جوشش فیلمی (لایه‌ای)^۱

در نقطه D منحنی جوشش، که شار گرمایی مینیمم است، سطح کاملاً با فیلم (لایه) پایدار بخار پوشیده شده است. با افزایش درجه حرارت سطح به صورت کنترل شده شار گرمایی در ناحیه D-E زیاد شده و در روند انتقال گرما علاوه بر رسانش، تشعشع نیز حائز اهمیت می‌شود. ضریب انتقال گرما در جوشش فیلمی پایین است؛ زیرا گرما از طریق لایه بخار به سیال هدایت شده، تشکیل و جدایش حباب از سطح لایه بخار و سیال شکل می‌گیرد.

برای رسیدن به نقطه لیدن فراست علاوه بر کنترل دمای با کنترل شار حرارتی نیز میسر است، با این تفاوت که پس از نقطه شار حرارت بحرانی C با ثابت نگه داشتن شار، دما ناگهان افزایش یافته و به نقطه E رسیده، سپس با کاهش شار منحنی در حالت برگشت به نقطه لیدن فراست می‌رسد [۱۰].

۱-۹ عوامل تأثیرگذار بر انتقال حرارت جوششی

در انتقال حرارت جوششی عوامل بسیار زیادی مؤثر هستند. بررسی بعضی از این پارامترها به دلیل پیچیدگی به تنهایی مقدور نمی‌باشد. بعضی از پارامترها از جمله محدوده دمایی کارکرد سیال، فشار سیستم و نوع سیال عامل، به نوع سیستم و مشخصات آن بستگی دارند. برخی دیگر همچون جنس، ابعاد، زاویه، شکل و مشخصات سطح مانند: زبری، ترشوندگی و تخلخل به مشخصات هندسی سطح

^۱ Film Boiling

جوشش وابسته هستند [۱۱]. تغییر مشخصات سطح و نوع سیال بیشترین تأثیر را بر شار حرارت بحرانی و ضریب انتقال حرارت دارد که مورد مطالعه قرار خواهند گرفت.

۱-۱۰ بهبود انتقال حرارت جوشش هسته‌ای

در بحث بهبود انتقال حرارت جوشش هسته‌ای به دو عامل مهم افزایش شار حرارت بحرانی و افزایش ضریب انتقال حرارت می‌توان اشاره نمود. در شارهای حرارتی پایین یا رژیم جوششی مادون سرد، شروع فرآیند جوشش یا فعال شدن هسته‌ها از حباب امری با اهمیت می‌باشد. در شارهای حرارتی متوسط که در رژیم جوشش هسته‌ای قرار می‌گیرند، انتقال شار حرارتی بالاتر در اختلاف دمایی سوپرهیت پایین یا به عبارت دیگر ضریب انتقال حرارت بالا با اهمیت می‌باشد؛ که یکی از راه‌کارها ساخت سطوح آب‌گریز برای بالا بردن ضریب انتقال حرارت می‌باشد. در شارهای بالاتر که به جوشش فیلمی نزدیک می‌شوند، افزایش شار حرارت بحرانی با هدف کاهش احتمال وقوع این پدیده خطرناک است؛ که این مهم با تغییر ساختار سطح و افزایش زبری درعین حال آب‌دوستی به دست می‌آید [۱۲]. در دماهای سوپرهیت بالاتر از نقطه شار حرارت بحرانی که نزدیک به پدیده لیدن فراست می‌باشد، گاهی هدف سرمایش آهسته سطح مورد نظر است که با آب‌گریزی و ایجاد لایه بخار پایدار رابطه مستقیم دارد.

با وجود اینکه در سیستم‌های صنعتی معمولاً انتقال حرارت در حال پایدار است و در یک رژیم خاص عمل می‌کند، ولی امکان دارد در یک سیستم در شرایط ویژه، بخشی یا تمامی رژیم‌ها رخ دهد. یا به بیان دیگر دامنه شار حرارتی ورودی به سیال وسیع باشد. که در این شرایط سطح مورد نظر باید ترکیبی از خواص بالا را داشته باشد. در نتیجه طراحی سطوح برای ارتقاء جوشش، به کاربرد و دامنه کاری سیستم بستگی دارد.

۱-۱۰-۱ روش‌های بهبود فرآیند جوشش

شبیه‌سازی و پژوهش آزمایشگاهی انتقال حرارت جوششی که همراه با تغییر فاز است، دشوار می‌باشد؛ چون یک پدیده گذرا است، و فاکتورهای زیادی از جمله نوع حرکت دینامیکی سطح مشترک در این

پدیده دخیل می‌باشد. با وجود این پیچیدگی‌ها، پژوهشگران همیشه به دنبال راهی برای ارتقاء این فرآیند بودند. مهم‌ترین پیشرفت در این زمینه مربوط به تغییر در شرایط سطح جوشش با مشخصات ویژه می‌باشد. ساختن این سطح‌ها بر پایه نظریه‌های بهبود فرآیند جوشش، انجام شده و به صورت عملی آزمایش می‌شود. به علت ناشناخته بودن عوامل دخیل در این فرآیند و همچنین تأثیرگذاری این عوامل بر یکدیگر، سطح ایده‌آلی با حداکثر بازدهی مشخص نشده است [۱۳].

راه‌های مختلفی برای بهبود فرآیند جوشش ارائه شده است. در یک طبقه‌بندی می‌توان روش‌های فعال، غیر فعال و ترکیبی را نام برد که در جدول ۱-۱ نشان داده شده است. در روش غیر فعال روی بهبود هندسه سطح جوشش و افزودن مواد به سیال پایه بررسی تجربی و شبیه‌سازی انجام می‌شود. ایجاد میدان الکتریکی یا اکوستیکی و ارتعاش سطح از مهم‌ترین روش‌های فعال هستند. معمولاً برای استفاده از روش‌های فعال به محیط آزمایشگاهی و شرایط خاص نیاز است، و توجیه اقتصادی ندارند. از مهم‌ترین روش‌های غیر فعال می‌توان به افزودن نانوذرات و مایعات دیگر به سیال پایه و ارتقاء خواص فیزیکی، شیمیایی و هندسی سطح نام برد. روش‌های بهبود خواص سطح به دو دسته کلی مکانیکی و شیمیایی تقسیم‌بندی شده است. تغییر در مشخصات هندسی سطوح مانند ایجاد زبری، حفره و شیار در دسته مکانیکی قرار گرفته‌اند. روش‌های شیمیایی نیز به دو دسته پوشش دهی متخلخل و خوردگی سطوح تقسیم‌بندی شده است. از روش‌های ترکیبی نیز که حاصل از ترکیب چند روش مختلف می‌باشد، می‌توان استفاده همزمان از میدان الکتریکی و نانوذرات را نام برد [۱۴].

روش‌های بهبود سطح در شاخه غیرفعال با تغییر در شرایط زیر باعث ارتقاء فرآیند جوشش هسته‌ای می‌شود:

- سطوح با بهبود خواص سطح جوشش، نقاط هسته‌زای حباب بیشتری نسبت به سطوح صاف دارند.

- به علت بزرگ‌تر بودن حفره‌های سطحی در سطوح بهبود یافته، میزان سوپرهیت کمتری نسبت به سطوح صاف نیاز است.

- گاز حبس شده در حفره‌های سطوح ارتقاء یافته، سبب بهتر شدن فعال‌سازی هسته‌زها و افزایش فرکانس آزاد شدن حباب از سطح می‌شوند.
- تغییر ایجاد شده در خصوصیات سطح باعث افزایش اغتشاش در لایه‌مرزی مجاور سطح و تأثیر بر دینامیک حباب خواهد شد.

از جدیدترین روش‌های غیر فعال برای بهبود انتقال حرارت جوششی، استفاده نانوسیالات است. نانوذرات باعث بهبود خواص سیال و تولید پوشش نانو ساختار بر سطح جوشش برای ایجاد هسته‌های فعال و تغییر در میزان آب‌دوستی می‌شوند. بر اساس پژوهش‌های انجام شده در سال‌های اخیر ساختار سطح به میزان زاویه تماس، زبری و تخلخل تقسیم می‌شوند. که رسوب نانو ذرات باعث بهبود در سه فاکتور فوق می‌شود [۱۵].

جدول ۱-۱- روش‌های بهبود در فرآیند جوشش

روش‌های غیر فعال	روش‌های فعال	روش‌های ترکیبی
ایجاد انحنای در لوله	تزریق و مکش سیال	
ایجاد چرخش در جریان	جت برخوردی	
عملیات بر روی سطح	جابه‌جا نمودن سیال	تمامی ترکیبات استفاده شده از روش‌های فعال و غیرفعال
افزایش زبری سطح	ارتعاش سطح	
سطوح گسترش یافته	ارتعاش سیال	
استفاده از نانوسیالات	استفاده از میدان الکتروستاتیکی	

۱-۱۰-۲ نانوسیالات

نانوسیالات معمولاً از پخش کردن ذرات جامد با اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر در سیال پایه ساخته می‌شوند. در بیشتر آزمایش‌های محققین در شاخه انتقال حرارت از نانوذرات اکسید فلزی به دلیل ضریب رسانایی بالاتر آن‌ها نسبت به سیال استفاده شده است.

اصطلاح نانوسیال^۱ برای اولین بار توسط چوی [۱۶] در سال ۱۹۹۵ معرفی شد. سپس توسط محققین زیادی بر خواص ترموفیزیکی نانوسیالات به دلیل قابلیت بالای استفاده آن‌ها در کاربردهای انتقال حرارتی مورد آزمایش قرار گرفتند. هرچند که پراکنده کردن ذرات جامد در سیال پایه برای بالا بردن انتقال حرارت هدایتی توسط مکسول [۱۷] در سال ۱۸۷۳ پیشنهاد شده بود. رسوب، فرسایش، مسدود شدن، حل کردن (پخش کردن) و افت فشار مشکلاتی بودند که استفاده از ذرات در سیال پایه را به مدت طولانی تعلیق کردند [۱۷].

برای درک اثر نانوسیالات بر میزان شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال، مطالعات تجربی و نظری با در نظر گرفتن پارامترهای مختلفی از جمله غلظت، اندازه نانوذرات، نوع نانوذرات و سیال پایه انجام گرفته است.

۱-۱۱ مروری بر مطالعات پیشین

جوشش نانوسیال یک حوضه تحقیقاتی مهم از نانوسیالات است که فرصت‌های زیادی را برای کشف مرزهای جدید، فراهم می‌کند. در این بخش یک بررسی جامع در انتقال حرارت نانوسیال و شار حرارتی بحرانی در جوشش استخری جمع‌آوری شده است. نتایج تحقیقات جوشش استخری نانوسیال و شار حرارتی بحرانی نیز آورده شده است.

یکی از روش‌های مورد توجه برای افزایش انتقال حرارت جوششی و شار حرارتی بحرانی، استفاده از نانوسیالات است. نانوسیال اولین بار توسط چویی در سال ۱۹۹۵ مورد استفاده قرار گرفت. این مواد یک گروه جدید از مایعات مهندسی شده با پراکنندگی ذرات جامد در مقیاس نانومتر (۱-۱۰۰) در مایع اصلی است [۱۶].

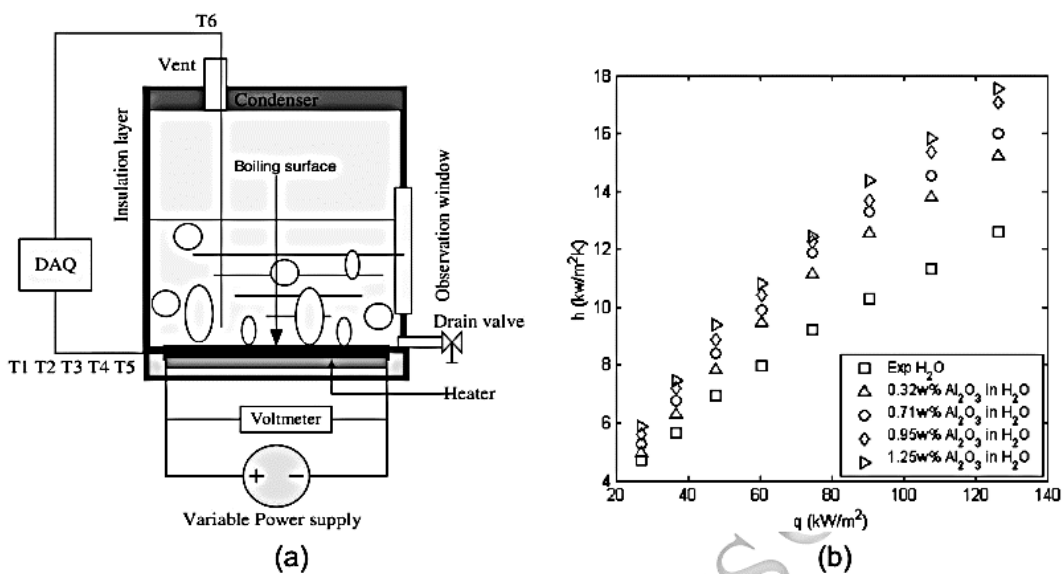
بحث جوشش نانوسیال از سال ۲۰۰۳ مطرح و به یک حوضه مهم پژوهش در نانوسیال تبدیل شد. موضوعات اصلی جوشش نانوسیالات شامل جوشش استخری، جوشش در جریان، و جوشش در برخورد جت است. بررسی‌ها در حیطه جوشش نانوسیالات، نشان می‌دهد که حدوداً ۷۰٪ از مقالات

^۱Nanofluid

نشریات در مورد جوشش استخری، ۲۰٪ در حوضه جوشش در جریان و بقیه عمدتاً در جوشش در برخورد جت است. در بررسی‌ها و جزئیاتی که در انتقال حرارت و شار حرارتی بحرانی جوشش استخری نانوسیال ارائه شد، توسعه و کاربردهای بالقوه نانوسیال به صورت خلاصه معرفی شد و سپس اثرات مختلف پارامترها در جوشش استخری نانوسیالات نیز مورد بحث قرار گرفت [۱۸].

یو و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۰۳ شار حرارتی بحرانی در جوشش استخری یک صفحه هیتر تخت مربع شکل مسی با نانوسیالات در فشار ۲/۸۹ Psia را اندازه گرفتند. فشار سیستم تأثیر زیادی بر روی انتقال حرارت جوششی و افزایش شار حرارتی بحرانی دارد به طوری که با کاهش فشار ضریب انتقال حرارت و شار حرارت بحرانی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابند. اثر غلظت نانوذرات در مقایسه با آب خالص بر روی شار حرارتی بحرانی بررسی شد. برای سیال که تنها ۰/۰۰۵ gr/L (حدود ۰/۰۰۰۱ درصد حجمی) نانوذرات اکسید آلومینیوم دارد، حدود ۲۰٪ افزایش شار حرارتی بحرانی مشاهده شده است.

ون و دینگ [۲۰] در سال ۲۰۰۵ آزمایش‌هایی روی انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیال اکسید آلومینیوم بر روی دیسکی از جنس فولاد ضدزنگ (SS) در داخل یک ظرف استوانه‌ای انجام دادند (شکل ۱-۵ قسمت a). ضریب انتقال حرارت جوشش استخری به مقدار ۴۰ درصد با افزایش غلظت نانوسیال اکسید آلومینیوم در غلظت ۱/۲۵ درصد وزنی در مقایسه با آب افزایش یافت (شکل ۱-۵ قسمت b).



شکل ۱-۵ نمایی از وسایل آزمایشگاهی و نتایج حاصله ون دینگ و همکاران [۲۰] پارک و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۰۹ تحقیقات آزمایشگاهی روی جوشش استخری یک صفحه هیتر مسی مربعی شکل صاف در استخر نانوسیال CNT انجام دادند. برای اطمینان از پراکنندگی نانولوله‌های کربن در آب مقطر، از پلیمر^۱ pvp استفاده شد. نتایج حاکی از آن بود که ضریب انتقال حرارت جوشش استخری با نانولوله‌های کربنی کمتر از آب خالص است و نانوسیال CNT با غلظت ۰/۰۰۱ درصد حجمی شار حرارتی بحرانی را تا ۲۰۰٪ افزایش می‌دهد. محققین یک لایه نازک CNT بر روی سطح مشاهده کردند که این لایه رسوب هسته‌های فعال را کاهش داده و به مقاومت حرارتی تبدیل می‌شود و تولید حباب را کاهش می‌دهد. در نتیجه ضریب انتقال حرارت نیز کاهش می‌یابد. همچنین این لایه منجر به کاهش زاویه تماس و افزایش قابل توجه در شار حرارتی بحرانی می‌شود.

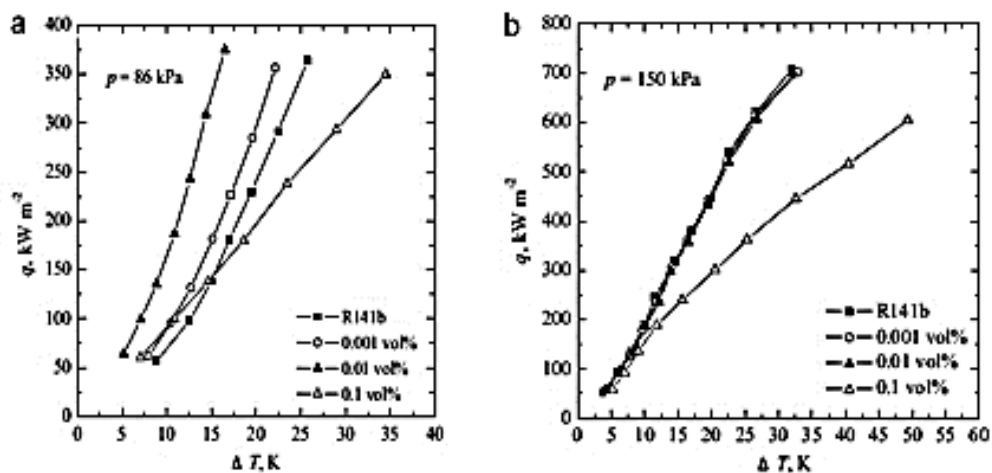
شیخ بابایی و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۱۲ بر روی انتقال حرارت نانوسیال Fe₃O₄/EG-water تحت فشار اتمسفری بر روی یک سیم نازک افقی از جنس نیکل کروم در یک استخر استوانه‌ای شکل از جنس پیرکس آزمایش‌هایی انجام دادند. ضریب انتقال حرارت جوشش توسط رسوب نانوذرات کاهش یافت. از سوی دیگر شار حرارتی بحرانی برای نانوسیال با ۰/۱ درصد حجمی تا ۱۰۰٪ افزایش پیدا کرد. علت اصلی این نتایج، تغییر مشخصات سطح ناشی از رسوب نانوذرات در طول جوشش بود. افزایش

^۱ polyvinyl pyrrolidone

ترشوندگی و زبری سطح باعث به تأخیر افتادن فیلم بخار و نیز افزایش شار حرارتی بحرانی می‌شود. یک لایه متخلخل با ضریب هدایت معین در سطح تشکیل می‌شود و در نتیجه ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد.

وو و زوو [۲۳] در مورد خواص ترموفیزیکی، عملکرد انتقال حرارت همرفتی، شیوه انتقال حرارت جوششی و افزایش شار حرارتی بحرانی مطالعه کردند.

دیاو و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۱۴، تحقیقات تجربی بر روی ویژگی‌های نانوسیالات Cu/R141b بر صفحات مسی عمودی پوشش داده‌شده با میکروکانال‌های مستطیلی - با نانوذرات مس و یا بدون آن‌ها انجام دادند. غلظت نانوذرات مس ۰/۰۰۱، ۰/۰۱ و ۰/۱ درصد حجمی و فشار کاری ۲۰۰-۸۶ KPa است. برای کانال با سطح ساده، انتقال حرارت در غلظت‌های ۰/۰۰۱ و ۰/۰۱ درصد حجمی، افزایش یافت و برای ۰/۱ درصد حجمی، کاهش یافت. با شار حرارتی بالا و یا فشار بالا نیز نرخ افزایش انتقال حرارت با افزایش فشار کاهش یافت. افزایش انتقال حرارت به لایه نانوذرات رسوب‌کرده بر روی سطح میکروکانال، نسبت داده شد. چراکه سطح انتقال حرارت را گسترش و تراکم هسته‌زا را افزایش می‌دهد و در نتیجه انتقال حرارت جوششی بهبود می‌یابد. نتایج همچنین نشان داد که نانوسیالات Cu/R141b با ۰/۰۰۱ و ۰/۰۱ درصد حجمی غلظت، در سطح ساده مشابه R141b خالص که بر روی سطح نانوذرات پوشش داده‌شده‌اند افزایش انتقال حرارت تولید می‌کنند.



شکل ۶-۱ - اثر غلظت نانو سیال و فشار کاری بر انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیال [۲۴]Cu/R141b

سرافراز و هرمزی [۲۵] در سال ۲۰۱۴ مجموعه‌ای از آزمایش‌ها را برای تعیین کمیت ضریب انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیال Cu/water در ۰/۱ تا ۰/۴ درصد وزنی همراه و بدون سورفکتانت (SDS، SDBS یا تریون -۱۰۰x) انجام دادند. ضریب انتقال حرارت نانوسیالات بدون سورفکتانت، به‌طور قابل ملاحظه‌ای افت کرد. درحالی‌که افزایش ضریب انتقال حرارت با حضور سورفکتانت، مشاهده شد. با در نظر گرفتن مقاومت رسوب، تغییرات مستقیمی بین رسوب نانوذرات در سطح جوشش نسبت به زمان هم در سطوح با انتقال گرمای آزاد و هم در هسته غالب انتقال گرما، مشاهده می‌شود. تا پیش از آن گمان بر این بود که در جوشش استخری نانوسیالات ممکن است به علت رسوب نانوذرات، تعداد هسته‌زها کاهش و در نتیجه ضریب انتقال حرارت کم شود. با تشکیل یک لایه ضخیم از نانوذرات بر روی سطح، مقاومت حرارتی تشدید شده، با استفاده از سورفکتانت‌ها کشش سطحی کاهش یافته و شکل‌گیری حباب به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. به تبع آن نقل و انتقال حباب و انتقال حرارت نیز بهبود می‌یابد.

کاماتچی و ونکاتاجالپاتی [۲۶] در سال ۲۰۱۵ بررسی جامعی در افزایش شار حرارتی بحرانی جوشش استخری به‌وسیله نانوسیال انجام دادند. با توجه به عوامل سازمان‌یافته‌ای چون سورفکتانت، اندازه و غلظت نانوذرات، خواص انتقال حرارتی، فشار سیستم و لایه رسوب نانوذرات بررسی شد.

کاماتچی و ونکاتاچالاپاتی [۲۷] نیز با بررسی جزئیات شار حرارتی بحرانی نانوسیالات در جوشش استخری به این نتیجه رسیدند که رسوب نانوذرات روی سطح جوشش در طی جوشش نانوسیالات عامل اصلی برای افزایش شار حرارتی بحرانی است. تئوری جامعی درباره توزیع مکانیزم افزایش شار حرارتی بحرانی روی طیف وسیعی از اندازه و غلظت نانوسیالات، وجود ندارد.

دیاو و همکاران [۲۸] در سال ۲۰۱۵ آزمایش‌هایی با موضوع انتقال حرارت و ضریب انتقال حرارت جوشش استخری با استفاده از نانو مبرد Cu/R141b+SDBS بر روی سطح صاف در فشار یک اتمسفر انجام دادند. غلظت نانوذرات مبرد ۰/۰۰۸، ۰/۰۱۵ و ۰/۰۵ درصد حجمی بود. نتایج حاکی از آن بود که نانوذرات مبرد Cu/R141b+SDBS باعث افزایش ضریب انتقال حرارت شده و این افزایش به دو عامل نسبت داده شد. اول، سورفکتانت که کشش سطحی سیال عامل را کاهش می‌دهد و در نتیجه هسته-زهای حباب و فرکانس خروج حباب افزایش یافته و قطر خروجی حباب کاهش می‌یابد. دوم، نانوذرات که در طول آزمایش جوشش به‌طور مداوم رسوب می‌کنند و در نتیجه ویژگی‌های سطح دائماً تغییر می‌کند. عامل غلظت نانوذرات، به دلیل اثر متقابل بین نانوذرات و افزایش هسته‌های سطح، باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود. درحالی‌که مقاومت حرارتی رسوب باعث کاهش ضریب انتقال حرارت جوشش و زوال شار حرارتی بحرانی می‌شود. با اضافه کردن سورفکتانت فرکانس خروج حباب افزایش یافته و در نتیجه تشکیل حباب که مانع از دسترسی مایع به سطح است و در نتیجه کاهش شار حرارتی بحرانی، آسان‌تر می‌شود. همچنین آزمایشی شامل R141b خالص روی سطحی با رسوب نانوذرات مبرد برای بی‌اثر کردن خواص مایع در حال جوش نیز انجام شد. نتایج نشان داد که سطح با کمترین مقدار رسوب نانوذرات، ضریب انتقال حرارت را افزایش می‌دهد ولی شار حرارتی بحرانی کاهش می‌یابد. وقتی R141b خالص روی سطح با رسوب باقی‌مانده می‌جوشد، شار حرارتی بحرانی بالاتری نسبت به جوشش نانوسیال Cu/R141b+SDBS روی سطح تمیز مشاهده می‌شود.

وفایی [۲۹] در سال ۲۰۱۵ آزمایش‌هایی را روی جوشش استخری انجام داد تا تأثیر غلظت نانوسیال، زبری سطح و شار حرارتی را روی ضریب انتقال حرارت توضیح دهد. در این راستا، انتقال حرارت

جوششی نانوسیال $Al_2O_3/Water$ در بستر صاف و زبر سطح جوشش مسی در فشار جو، مورد بررسی قرار داد. بستر سطح جوشش که با یک لایه متخلخل نازک رسوب نانوذرات پوشیده شده و سایز حفره‌ها اصلاح شده، ضریب انتقال حرارت را افزایش داده، نانوذرات را غلیظ کرده و در نتیجه اندازه فرم متراکم شده رسوب را افزایش داد. برای سطح جوشش صاف، ناهمواری و چگالی هسته‌ها افزایش می‌یابد. چون افزایش رسوب نانوذرات بزرگ‌تر از ناهمواری سطح است، در نتیجه ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. ضریب انتقال حرارت با کاهش شار حرارتی، افزایش پیدا می‌کند؛ زیرا حفره‌های بزرگ با شار حرارتی کم تبدیل به هسته‌ها می‌شوند و حفره‌های کوچک با شار حرارتی بالا فعال می‌شوند. وفایی همچنین تأثیر نانوذرات معلق بر روی رفتار خط سه‌گانه، با استفاده از روش شکل‌گیری حباب را نیز بررسی کرد. نانوذرات معلق ته‌نشین شده نقش مهمی در تغییر حرکت خط سه‌گانه، فرصت تشکیل حباب و همچنین فرکانس حباب، ایفا می‌کند.

راجو و اومش [۳۰] در سال ۲۰۱۵ آزمایش‌هایی روی انتقال حرارت به روش جوشش استخری نانوسیال $CuO/Pentane$ بر روی دایره صاف برنجی به قطر ۲۰ میلی‌متر در فشار ۱۰۰ کیلو پاسکال و شار حرارتی ۱۰ تا ۱۰۰ کیلووات بر سانتی‌متر مربع انجام دادند. نتایج نشان داد که نانوسیال $CuO/Pentane$ در غلظت حجمی کمتر از ۰/۰۰۵، ضریب انتقال حرارت را افزایش می‌دهد به طوری که این افزایش با افزایش غلظت نانوذرات کاهش می‌یابد و افزایش بیشتر در شار حرارتی کمتر رخ می‌دهد. افزایش ضریب انتقال حرارت به اثر نانوذرات بر حباب‌ها و افزایش ضریب هدایتی توسط تجمع نانوذرات بسیار رسانا نسبت داده شد. علاوه بر این، اثر مواد سطح بر روی ضریب انتقال حرارت جوششی مورد مطالعه قرار گرفت. در سطوح مختلف نرخ افزایش متفاوت مشاهده شد و سطوح برنجی نیز شار حرارتی بالاتری در شرایط آزمایشگاه، نسبت به سطوح فولادی نشان داد.

ساکاشیتا [۳۱] در سال ۲۰۱۵ شار حرارتی بحرانی جوشش اشباع استخری نانوسیالات $TiO_2/Water$ بر روی سطح مسی به قطر ۷ میلی‌متر و در فشار ۱۰۰ تا ۸۰۰ کیلو پاسکال را مورد بررسی قرار داد. مشخص شد که نانوسیال، شار حرارتی بحرانی را حدود دو برابر در فشار یک اتمسفر افزایش می‌دهد.

با این حال، با افزایش فشار، افزایش شار حرارتی بحرانی نانوسیال کاهش می‌یابد تا اینکه در فشار ۸۰۰ کیلوپاسکال شار حرارت بحرانی با سیال پایه برابر می‌شود. افزایش شار حرارتی بحرانی به علت بهبود ترشوندگی سطح، به خاطر رسوب نانوذرات بر سطح گرم است.

لی و نیو [۳۲] در سال ۲۰۱۵ بررسی تجربی روی سطوح براق و متخلخل پوشش داده شده توسط مس در خصوص انتقال حرارت جوش استخری، انجام دادند. نانوسیالات CuO/Water و $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Water}$ مورد استفاده قرار گرفتند. هر یک از نانوسیالات، روی هر دو سطوح صیقلی و متخلخل، ضریب انتقال حرارت را افزایش دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که اندازه حباب خروجی برای سطوح پولیش خورده، نسبت به سطوح متخلخل و برای نانوسیالات، نسبت به سیال پایه بزرگ‌تر است و فرکانس خروج به صورت بدیهی روی سطوح متخلخل بزرگ‌تر از سطوح پولیش خورده برای دو نانوسیال است.

سرافراز و همکاران [۳۳] در سال ۲۰۱۶ به‌طور تجربی بر روی یک هیتر دایره‌ای شکل با استفاده از نانولوله‌های کربنی عامل دار و غیرعامل دار FCNT و CNT به‌عنوان نانوسیال و آب به‌عنوان سیال پایه شده، مطالعاتی انجام دادند. نتایج نشان داد که FCNT تا دو یا سه هفته بیشتر از CNT پایدار است و نانوسیالات FCNT نسبت به CNT پیشرفت بیشتری در افزایش شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت دارند. رفتار رسوبات نانوسیالات FCNT و CNT بسیار متفاوت است، در مورد FCNT، دارای مسیر مستقیم و برای CNT مسیر مجانبی مشاهده می‌شود. رسوب نانوذرات روی سطح جوش که پدیده موینگی آن کاهش یافته است، به علت مقاومت حرارتی رسوب، ضریب انتقال حرارت را کاهش و شار حرارتی بحرانی را کمی افزایش می‌دهد. به علت عدم تغییر عمده در زبری سطح، خاصیت ترشوندگی زیاد و زاویه تماس کم بین قطره مایع و سطح، نانوسیالات FCNT/Water در مقایسه با نانوسیالات CNT/Water به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت دارند. هنگامی که مایع بیشتری توسط رسوب متخلخل جذب شود، افزایش شار حرارتی بحرانی قابل توجهی مشاهده خواهد شد. به‌طور کلی نانوسیالات FCNT/Water در شار حرارتی

بحرانی بیشتری نسبت به نانوسیالات CNT/Water دارد که علت آن رسوب‌گذاری کمتر و باقاعده روی سطح است.

سرافراز و همکاران [۳۴] در سال ۲۰۱۶ تحقیقات تجربی را بر روی شار حرارتی بحرانی و انتقال حرارت جوشش استخری ترکیب نانوسیالات Zirconia/Water با اتیلن گلیکول (ZrO₂/WEG50) با درصد حجمی ۰/۱-۰/۰۲۵ انجام دادند. WEG50 به معنی ۵۰٪ آب و ۵۰٪ اتیلن گلیکول مخلوط است که به عنوان سیال پایه مورد استفاده قرار گرفته است. تحقیق در هدایت حرارتی نشان داد که نانوذرات ZrO₂ در WEG50 در دمای ۳۵۳ کلوین می‌تواند هدایت حرارتی را تا ۱۸٪ افزایش دهد که نشان می‌دهد نانوسیالات (ZrO₂/WEG50) پتانسیل کافی برای کاربردهای انتقال حرارتی را دارند. نتایج تجربی حاکی از آن است که نانوسیال (ZrO₂/WEG50) با غلظت جرمی ۰/۰۲۵، ۰/۰۰۵، ۰/۰۷۵ و ۰/۱ به ترتیب ضریب انتقال حرارت را ۴/۱٪، ۷/۲٪، ۱۰/۴٪ و ۱۲/۱٪ افزایش می‌دهد. رسوب بسیار جزئی ذرات بر روی سطح جوشش، بعد از جوشش مشاهده شد این رسوب (لایه) هیچ تأثیری بر ضریب انتقال حرارت نداشت ولی شار حرارتی بحرانی را به میزان ۲۹٪ افزایش داد. رسوب نانوذرات ZrO₂ بر روی سطح، یک لایه متخلخل ایجاد می‌کند؛ بنابراین عمل موپینگی تشدید می‌شود و در نتیجه مایع بیشتری توسط لایه متخلخل جذب شده و به منطقه داغ زیر حباب‌های در حال رشد به خاطر کاهش زاویه تماس استاتیک، منتقل می‌شود. در نهایت افزایش شار حرارتی بحرانی اتفاق می‌افتد.

۱-۱۲ نوآوری

مهم‌ترین نوآوری‌های این پروژه بررسی جامع و کامل پارامترهای جوشش استخری نانوسیال اکسید مس/آب و عوامل تأثیرگذار بر پارامترهای جوشش است. دیگر نوآوری این پروژه استفاده از دوربین پرسرعت برای تصویربرداری از فرآیند جوشش نانوسیال و سپس استفاده از پردازش تصویر برای به دست آوردن فرکانس جداسدن حباب و شعاع حباب‌های جدا شده که از مهم‌ترین پارامترهای بررسی فرآیند جوشش می‌باشد، به حساب آورد.

فصل دوم:

مواد و روش ها

در طول پنج دهه گذشته پیشرفت‌های وسیعی در فناوری‌های مهندسی مربوط به انرژی هسته‌ای، سوخت‌های فسیلی، تولید برق و خنک‌سازی تراشه‌های الکتریکی انجام شده و تحقیقات در مورد موضوعات مختلف مربوط به انتقال حرارت پیش برده شده است. در این میان بسیاری از موضوعات سیستم‌های مهندسی، شامل مسائل مربوط به جوشش بوده است. در این راستا به‌طور گسترده، تحقیقات برای به دست آوردن عملکرد انتقال حرارت با تغییر فاز مورد استفاده قرار گرفته است. بر این اساس روش‌های مختلفی برای افزایش انتقال حرارت جوششی پیشنهاد شده و مورد مطالعه قرار گرفته است. روش‌های در نظر گرفته شده برای، بهبود شار حرارت بحرانی و ضریب انتقال حرارت جوشش استخری عبارت‌اند از:

- ۱- اکسیداسیون یا رسوب انتخابی سطح گرم‌کن برای افزایش ترشوندگی سطح
- ۲- گرم‌کن ارتعاشی به‌منظور افزایش سرعت خروج حباب‌ها از سطح جوشش
- ۳- پوشش سطح گرم‌کن به‌منظور افزایش سطح انتقال حرارت
- ۴- گرم‌کن چرخشی به‌منظور افزایش خروج حباب از سطح جوشش
- ۵- مایع لرزاننده برای افزایش خروج حباب و تأمین مایع
- ۶- استفاده از میدان الکتریکی برای خروج حباب از سطح که موجب افزایش ترشوندگی سطح جوشش می‌شود.

علاوه بر این تکنولوژی نانوسیال‌ها به‌عنوان یک تکنیک جدید در سال‌های اخیر پدید آمده است.

۲-۲ نانوسیال

سیالی که از توزیع ذرات با ابعاد نانو در سیالات معمولی حاصل می‌شود، نسل جدیدی از سیالات با پتانسیل بسیار زیاد در کاربردهای صنعتی است. اندازه ذرات مورد استفاده در نانو سیالات از یک نانومتر تا صد نانومتر متغیر می‌باشد. این ذرات از جنس ذرات فلزی همچون مس (Cu)، نقره (Ag) و یا اکسیدهای فلزی همچون آلومینیوم اکسید (Al_2O_3) و اکسید مس (CuO) هستند. سیالات

متداولی که در زمینه انتقال حرارت استفاده می‌شوند ضریب هدایت حرارتی پایینی دارند. ذرات نانو به دلیل بالا بودن ضریب هدایتی‌شان با توزیع در سیال پایه باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال که یکی از پارامترهای اساسی انتقال حرارت محسوب می‌شود، می‌گردند [۳۴-۳۵].

در تحقیقات گذشته ذراتی که به سیالات افزوده می‌شد دارای اندازه‌های میکرومتری بودند. این ذرات پایداری لازم در سوسپانسیون را نداشته و به سرعت ته‌نشین می‌شدند. همین امر سبب می‌شد که مجاری عبور سیال به سرعت مسدود گردد. درحالی‌که ذرات با اندازه نانو، تشکیل سوسپانسیون‌های بسیار پایدارتری داده و پایین بودن سرعت ته‌نشینی آن‌ها سبب می‌گردد که مشکل گرفتگی و انسداد مجاری به حداقل برسد.

۳-۲ تهیه نانوسیال

۳-۲-۱ انواع روش‌های تولید نانوسیالات

۳-۲-۲ روش یک مرحله‌ای

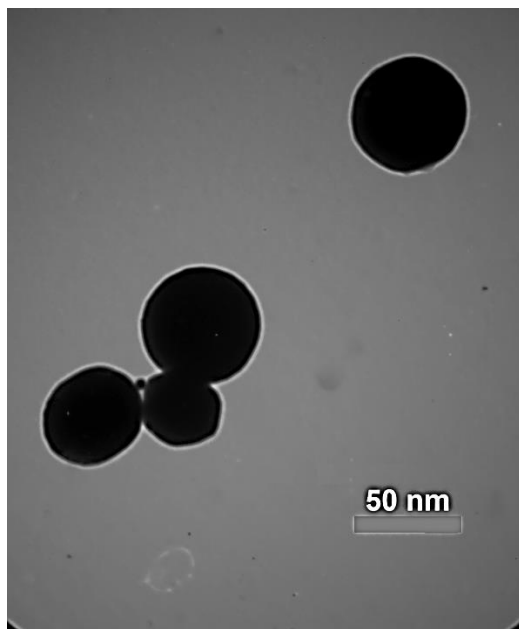
به‌منظور جلوگیری از تجمع و آگلومره شدن نانوذرات درون سیال روش یک مرحله‌ای استفاده شد، با استفاده از این روش نانوسیالاتی شامل نانوذرات فلزی با استفاده از روش تبخیر مستقیم، تهیه شدند. طی روش یک مرحله‌ای منبع فلزی تحت شرایط خلأ تبخیر شده و تراکم توده نانوذرات به حداقل خود می‌رسد [۳۷]. لازم به ذکر است که پایین بودن فشار بخار سیال یکی از معایب این فرآیند محسوب می‌شود؛ ولی با این حال روش‌های شیمیایی تک مرحله‌ای مختلفی برای تهیه نانو سیال به وجود آمده است که از آن جمله می‌توان به روش احیای نمک فلزات و تهیه سوسپانسیون آن در حلال‌های مختلف برای تهیه نانو سیال فلزات اشاره کرد. مزیت اصلی روش یک مرحله‌ای، کنترل بسیار مناسب روی اندازه و توزیع اندازه ذرات است. از معایب این روش می‌توان به عدم امکان تولید نانوسیالات در مقیاس بالا و زیاد بودن هزینه تولید نام برد. همچنین در این روش مقداری از واکنش‌دهنده‌ها در نانو سیال تولیدی باقی می‌ماند که به علت پایداری سوسپانسیون، جدا کردن آن‌ها و کاهش غلظتشان در سیال کار دشواری است.

۲-۳-۳ روش دو مرحله‌ای

یکی از روش‌های متداول تهیه نانو سیال، روش دو مرحله‌ای است؛ در این روش ابتدا نانوذره، نانولوله، نانوالیاف یا سایر نانومواد که قرار است در سیال پراکنده شوند معمولاً به وسیله روش رسوب شیمیایی بخار (CVD) در اتمسفر گاز خنثی به صورت پودرهای خشک تهیه شده، در مرحله بعد نانوماده تولیدی در داخل سیال پراکنده می‌گردد. برای این کار از روش‌هایی مانند لرزاننده‌های مغناطیسی، لرزاننده‌های مافوق صوت (اولتراسونیک) و یا سورفکتانت‌ها استفاده می‌شود تا تشکیل توده‌های نانوذره‌ای (کلوخه‌ها) به حداقل رسیده و پراکندگی نانوذرات در سیال بهبود یابد [۳۷]. روش دو مرحله‌ای برای بعضی موارد مانند اکسید فلزاتی که در آب، دیونیزه شده‌اند، بسیار مناسب است و برای نانوسیالات شامل نانوذرات فلزی سنگین، خیلی موفق عمل نکرده است. این روش دارای مزایای اقتصادی زیادی است؛ مثلاً یکی از مزایای آن توانایی تولید نانوپودر در مقیاس صنعتی توسط بسیاری از شرکت‌ها است که همین امر تولید نانوسیالات را برای صنایع تسهیل می‌کند. از مسائل حائز اهمیت در تولید دو مرحله‌ای نانوسیالات، پایداری سوسپانسیون ایجاد شده و جلوگیری از تجمع نانوذرات و کلوخه شدن آن‌ها است. معمولاً توسط سورفکتانت‌ها از تجمع نانوذرات جلوگیری به عمل می‌آید؛ البته با توجه به اینکه سورفکتانت خواص ترموفیزیکی سیال را عوض می‌کند و نیز تاثیر بسیار زیاد آن بر کشش سطحی و به تبع تاثیر مخرب بر عملکرد جوشش، معمولاً در سیال‌هایی که مورد استفاده در جوشش هستند، به کار برده نمی‌شود.

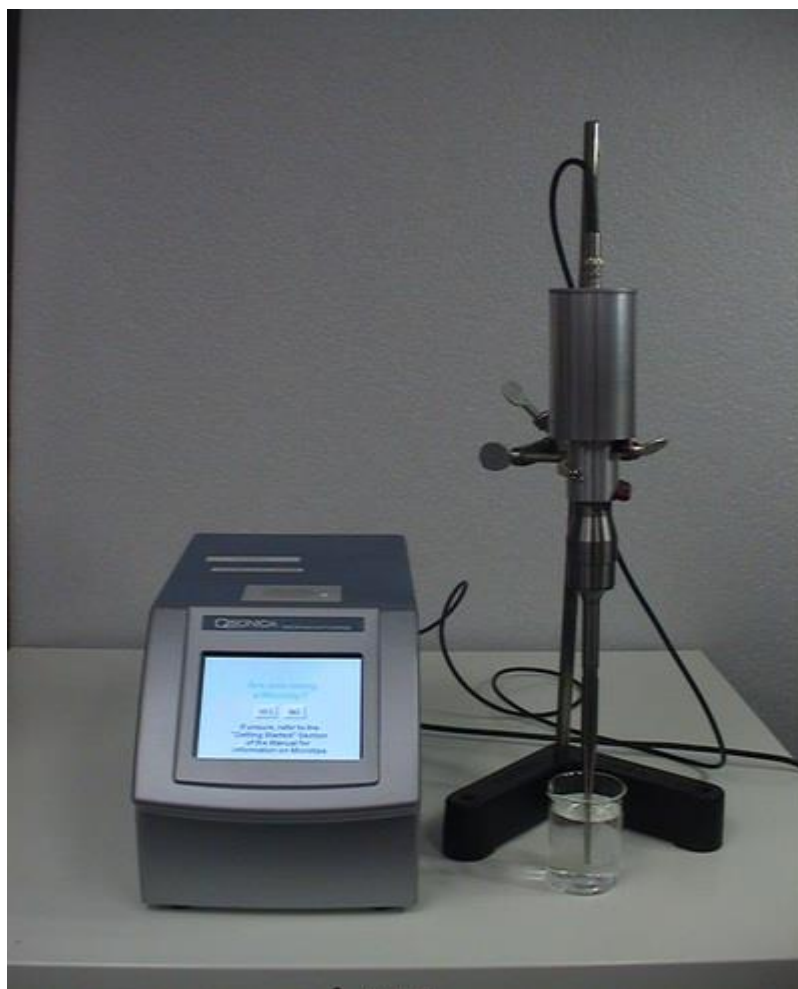
روش مورد استفاده در پژوهش حاضر روش دو مرحله‌ای می‌باشد. برای تهیه نانوسیال اکسید مس/آب، نانو ذرات استفاده شده، اکسید مس از شرکت US Research nanomaterial آمریکا با خلوص ۹۹/۹ درصد با اندازه ذرات ۴۰ نانومتر با شکل تقریباً کروی است که برای اطمینان بیشتر از تست TEM^۱ نیز استفاده شده است. شکل ۱-۲ نانو سیال اکسید مس/آب را نشان می‌دهد که گواهی بر گزارش شرکت سازنده در مورد نانوذرات می‌باشد.

^۱ Transmission Electron Microscope



شکل ۱-۲- تصویر TEM از نانوذره CuO در نانو سیال اکسید مس/آب

برای توزیع ذرات نانو در سیال پایه آب از دستگاه اولتراسونیک مدل Q700 از شرکت Qsonic کشور آمریکا با قدرت ۴۰۰ وات و فرکانس ۴۰ کیلوهرتز استفاده شده است. برای پایداری سیال ابتدا از همزن مغناطیسی به مدت ۱۲ ساعت و سپس از دستگاه اولتراسونیک برای مدت ۶ تا ۸ ساعت استفاده گردید. نانوسیال بلافاصله پس از همگن سازی توسط هموژنایزر برای تست جوشش مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به اینکه سیال مورد نظر در تست جوشش استفاده می شود و برای عدم تاثیر منفی بر خواص آن، از هیچ کدام از پایدار کننده ها استفاده نشده است. نانوسیال در ۷ غلظت پایین شامل، ۱، ۵، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰ و غلظت بیشینه ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر آماده شد و در تست جوشش استخری مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۲-۲- دستگاه همزن اولتراسونیک مدل Q700 شرکت Qsonic

۲-۴ تعیین خواص ترموفیزیکی نانو سیال

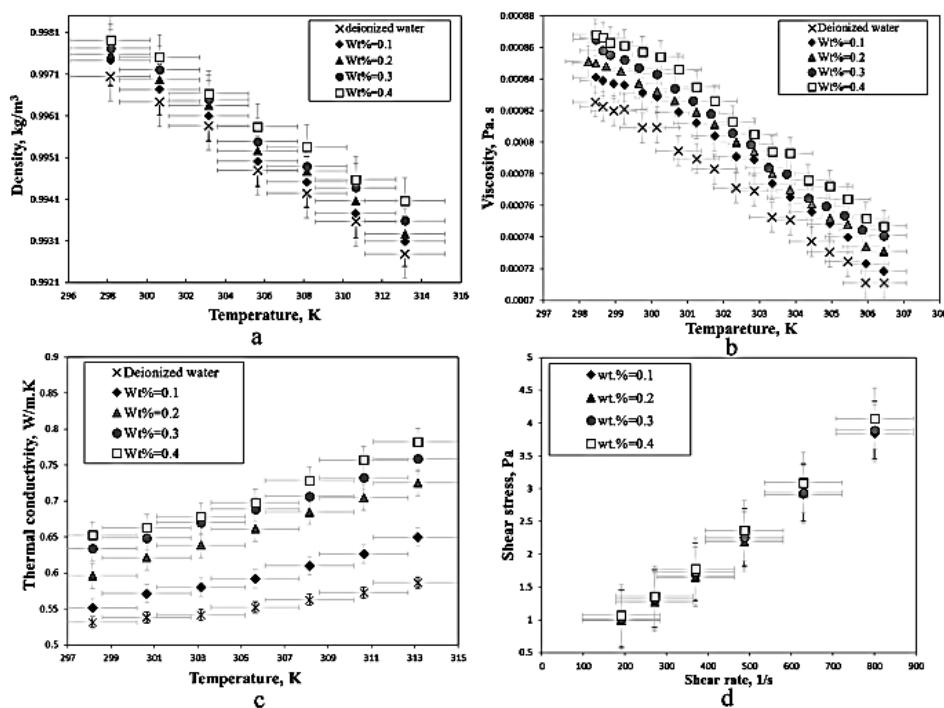
برای تعیین خواص نانو سیال غلظت پایین (کمتر از ۱ گرم بر لیتر) از حداکثر غلظت و نیز مطالعات تجربی پیشین استفاده شده است. برای این کار ابتدا از نقطه جوش استفاده شد. در هر تست، نقطه جوش نانوسیال و فشار محیطی به ترتیب توسط سنسور نوع K و حس گر فشار LPS25H اندازه گیری شد. در فشار محیطی ۸۵/۷ کیلوپاسکال نقطه جوش آب مقطر ۹۵/۱ درجه سانتی گراد اندازه گیری شد. نقطه جوش اندازه گیری شده با نقطه جوش آب خالص بر اساس جداول ترمودینامیکی در آن فشار، ۰/۲ درجه سانتی گراد اختلاف مشاهده شد.

با استفاده از دستگاه رئومتر مدل MCR 302 ساخت شرکت anton-paar اتریش، ویسکوزیته غلظت حداکثری نانوسیال اکسید مس/ آب (۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر) اندازه گیری شده است.



شکل ۲-۳- دستگاه رئومتر مدل MCR 302

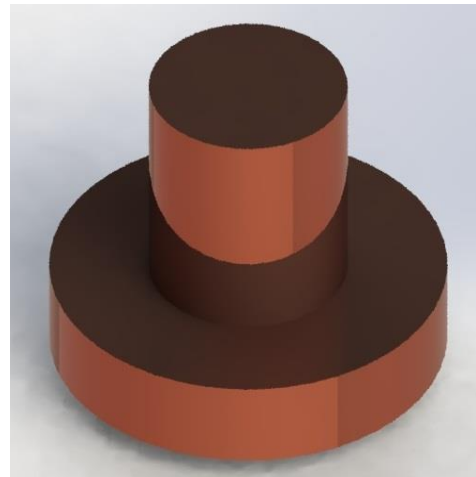
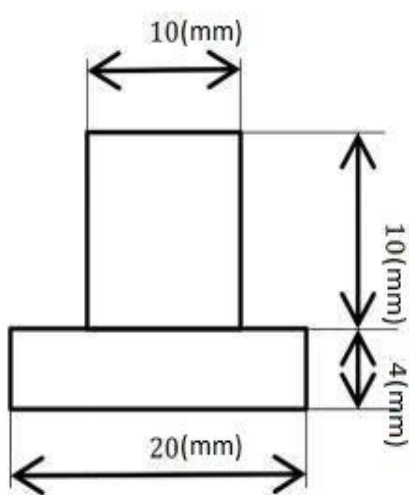
سرافراز و هرمزی [۳۸] با استفاده از نتایج تجربی خواص ترموفیزیکی (چگالی، ویسکوزیته، ضریب انتقال حرارت جابجایی و تنش برشی) نانو سیال اکسید مس در غلظت‌های ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۴ درصد جرمی را به دست آوردند. خواص در غلظت ۰/۱ درصد جرمی و آب، تقریباً برابر گزارش شد.



شکل ۲-۴- خواص ترموفیزیکی نانو سیال اکسید مس در غلظت‌های ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۴ درصد جرمی [۳۸]

۵-۲ آماده‌سازی نمونه‌های مسی آزمایش تست جوشش

نمونه‌های تست جوشش از مس با خلوص ۹۹ درصد به دلیل در دسترس بودن این فلز و نیز هدایت حرارتی بالا مس (۴۰۰ وات بر متر درجه سانتی گراد) استفاده شده است. نمونه‌های مسی که در شکل ۵-۲ به صورت شماتیک نشان داده شده است، از مفتول مسی به قطر ۲ سانتی‌متر با استفاده از دستگاه تراش به دقت ± 0.1 میلی‌متر ساخته شده‌اند. سپس سطوح مورد نظر (سطوح تخت با قطر ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر) با استفاده از دستگاه پولیش شکل ۲-۶ ساخت شرکت metco کشور هند پولیش کاری شد. عملیات پولیش کاری ابتدا با استفاده از سنباده ضد آب تا شماره p۳۰۰۰ برای به حداقل رساندن زبری سطح انجام شد. پولیش نهایی سطح، با استفاده از نم‌د پولیش کاری نرم و خمیر الماسه به اندازه ذرات ۰/۵ تا ۱ میکرومتر تهیه شده است.



شکل ۵-۲- نمای شماتیک نمونه مسی



شکل ۶-۲- دستگاه پولیش شرکت metco

۶-۲ ترازو

ترازو مدل PRACTUM124-1S از شرکت Sartorius آلمان شکل ۷-۲ با دقت ± 0.0001 گرم برای اندازه‌گیری وزن استفاده شده است.



شکل ۷-۲ ترازو مدل PRACTUM124-1S از شرکت Sartorius

۷-۲ منبع تغذیه (اتوترانس^۱ و استابلیزر^۲)

برای تامین و کنترل شارحرارتی اعمال شده بر هیترهای دستگاه آزمایش، از اتوترانس متغیر و استابلیزر شرکت Omega کره جنوبی شکل ۸-۲ با توان خروجی ۵ کیلو ولت آمپر استفاده شده است. جریان برق شهری ابتدا به استابلیزر وارد شده و پس از حذف نویز و ارائه جریان بدون اختلال یا نوسان، جریان برق به اتوترانس متغیر وارد می شود.

اتوترانس متغیر مورد استفاده، توانایی کنترل ولتاژ به صورت دستی بین ۰ تا ۳۰۰ ولت را دارد. جریان خروجی اتوترانس به صورت کاملا سینوسی است و ولتاژ موثر پایدار ایجاد می کند. برای محاسبه توان حرارتی اعمال شده به سیستم می توان از ولتاژ موثر ایجاد شده توسط اتوترانس در قانون ژول استفاده نمود.



شکل ۸-۲- اتوترانس و استابلیزر شرکت Omega با توان خروجی ۵ کیلوولت آمپر

۸-۲ داده نگار^۳ و حسگر دما

داده نگار مورد استفاده، مدل TM-947SD ساخت شرکت Lutron کشور تایوان است. این دستگاه توانایی اتصال به چهار سنسور دما، نمایش دما روی صفحه نمایشگر و ثبت داده ها بر روی حافظه

¹ Autotransformer

² Stabilizer

³ Data Logger

خارجی به فرمت اکسل با دقت ± 0.1 درجه سانتی‌گراد می‌باشد. سرعت ثبت داده‌ها بر روی یک بار بر ثانیه تنظیم شده است.

سنسورهای دمای انتخاب شده از نوع K با دقت ± 0.1 درجه سانتی‌گراد ساخت تایوان است، که در محدوده دمایی مورد نظر کالیبره شده‌اند. دلیل انتخاب این نوع سنسور دقت بالای آن‌ها می‌باشد.



شکل ۹-۲- داده نگار مدل TM-947SD شرکت Lutron

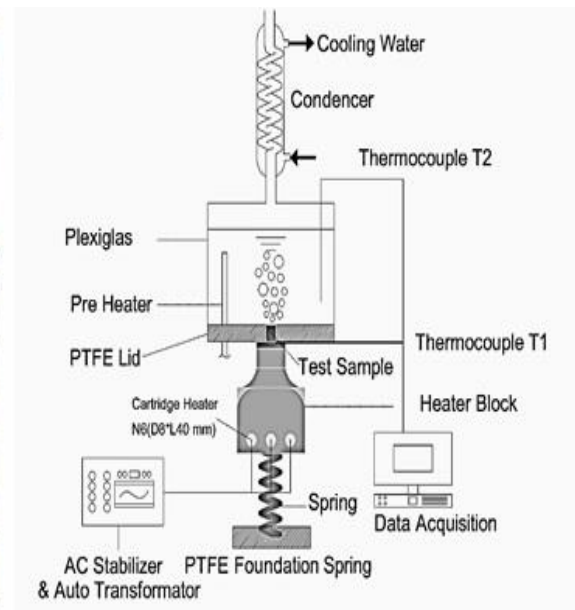
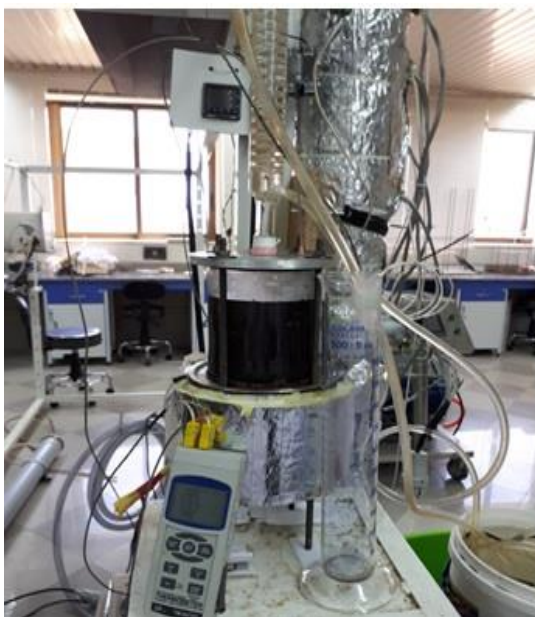
۹-۲ دستگاه آزمایش

برای انجام آزمایش جوشش استخری از دستگاهی که شماتیک آن در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده، استفاده شده است. تجهیزات اصلی دستگاه شامل: مخزن سیال، سیستم خنک کننده بخار، لایه‌های عایق، سیستم تولید شار حرارتی و سیستم اندازه‌گیری دما و ثبت داده‌ها می‌باشد. این تجهیزات برای اندازه‌گیری شار حرارت بحرانی و ضریب انتقال حرارت جوشش طراحی شده‌اند.

مخزن تست جوشش از لوله پلکسی گلاس به شعاع خارجی ۱۲۰ میلی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر و المنت پیش گرم‌کن تشکیل شده است. برای جلوگیری از کاهش حجم و تغییر غلظت سیال، در طول تست از سیستم خنک کننده برای میعان بخار استفاده شد. این سیستم شامل یک کندانسور شیشه‌ای به طول ۴۰۰ میلی‌متر است که از بالا روی محفظه تست جوشش قرار گرفته و به وسیله نوار تفلون آب‌بندی می‌شود. آب مخصوص خنک کاری به وسیله پمپ آکواریوم از ظرف وارد کندانسور شده و دوباره به ظرف برمی‌گردد. بخار وارد شده به کندانسور توسط آب خنک میعان شده و به محفظه باز

گردانده می‌شود. به دلیل باز بودن طرف انتهایی قسمت بخار کندانسور، فشار محفظه جوشش با فشار اتمسفر می‌باشد.

ابتدا سنسور نوع K روی نمونه مسی نصب و سپس قطعه از جنس تفلون نسوز^۱ برای عایق‌بندی نصب شده، و در کف محفظه جوشش قرار داده می‌شود. نمونه از طریق بلوک مسی که درون آن شش هیتر با قدرت خروجی هریک ۲۰۰ وات و مقاومت کلی ۴۲ اهم تعبیه شده، به اتوترانس متصل شده است. شار حرارتی از زیر به آن وارد می‌شود. برای تماس بهتر سطح بلوک مسی با سطح هیتر در زیر بلوک، از یک فنر استفاده می‌شود و سپس کل دستگاه با چهار عدد پیچ بلند و مهره به هم سفت می‌گردد؛ به صورتی که محفظه تست نیز آب‌بندی می‌شود. برای حذف اتلافات حرارتی قسمت بلوک مسی و نمونه توسط چندین لایه پشم سنگ و پشم شیشه پوشانده می‌شود. جهت کنترل شار حرارتی از ولت-متر با دقت $\pm 0.1\%$ ولت و تغییر ولتاژ به وسیله اتوترانس استفاده شده است.



شکل ۲-۱۰- نمای شماتیک دستگاه آزمایش تست جوشش

۲-۱۰ روش آزمایش

برای اطمینان از درستی و صحت داده‌ها، نتایج به دست آمده از دستگاه آزمایش جوشش با داده‌های جداول ترمودینامیکی بر اساس فشار محیط مقایسه می‌شوند؛ که بیانگر درستی داده‌های دما می‌باشد.

^۱ PTFE

حال برای انجام آزمایش در ابتدای هر تست، از آب‌بندی دستگاه و تمیزی نمونه باید اطمینان حاصل گردد و با نصب عایق پشم شیشه بر روی محفظه از اتلافات حرارتی جلوگیری شود.

به منظور اندازه‌گیری و مقایسه شار حرارت بحرانی، غلظت‌های مختلفی از نانو سیال اکسیدمس/آب مشخص و آماده شد. به منظور مشابه نمودن شرایط آزمایش سطح نمونه مسی قبل از هر تست، با استون تمیز می‌گردد. برای تمامی تست‌ها ابتدا یک لیتر نانو سیال داخل مخزن استوانه‌ای شکل از جنس پلکسی گلاس ریخته می‌شود و دمای سیال با هیتر کمکی به دمای اشباع رسانده شده و سپس خاموش می‌شود تا شار حرارتی از نمونه مسی استوانه شکل به سیال وارد شود.

شار حرارتی را به تدریج و در طی چندین مرحله افزایش داده و در هر مرحله قبل از افزایش شار، مدت زمان ده دقیقه برای به تعادل حرارتی رسیدن وقفه ایجاد می‌شود. در تمام طول آزمایش دمای مایع داخل استخر و نیز دمای نمونه مسی توسط دستگاه ضبط می‌شود. شار گرمایی با تنظیم ولتاژ، پله‌ای بالا می‌رود تا دمای سطح به صورت لحظه‌ای به طوری که در نمودارهای دمای سطح برحسب زمان مشهود است، بالا برود و شار حرارت بحرانی رخ دهد. دمای سطح در لحظه شار حرارت بحرانی -دمای سطح به سرعت و در فاصله زمانی کوتاه افزایش می‌یابد- در نظر گرفته می‌شود.

پس از رخ دادن شار حرارت بحرانی جریان الکتریکی قطع شده و پس از جدا کردن نمونه مسی از دستگاه آزمایش آن را در محفظه بسته و ثابت قرار داده می‌شود تا تست‌های زاویه تماس، AFM غیر تماسی برای تعیین مورفولوژی سطح و SEM برای شکل ساختار سطح و ضخامت پوشش نانوذرات با استفاده از آن، مورد تحقیق قرار گیرد.

۱۱-۲ محاسبات

برای به دست آوردن نمودارهای جوشش لازم است شارحرارتی انتقالی به سیال و دمای مافوق اشباع سطح اندازه‌گیری شوند. به دلیل پوشانده شدن بلوک مسی با پشم سنگ و پشم شیشه، از اتلافات حرارتی صرفه نظر شده و شار حرارتی با استفاده از رابطه ۱-۲ به دست می‌آید.

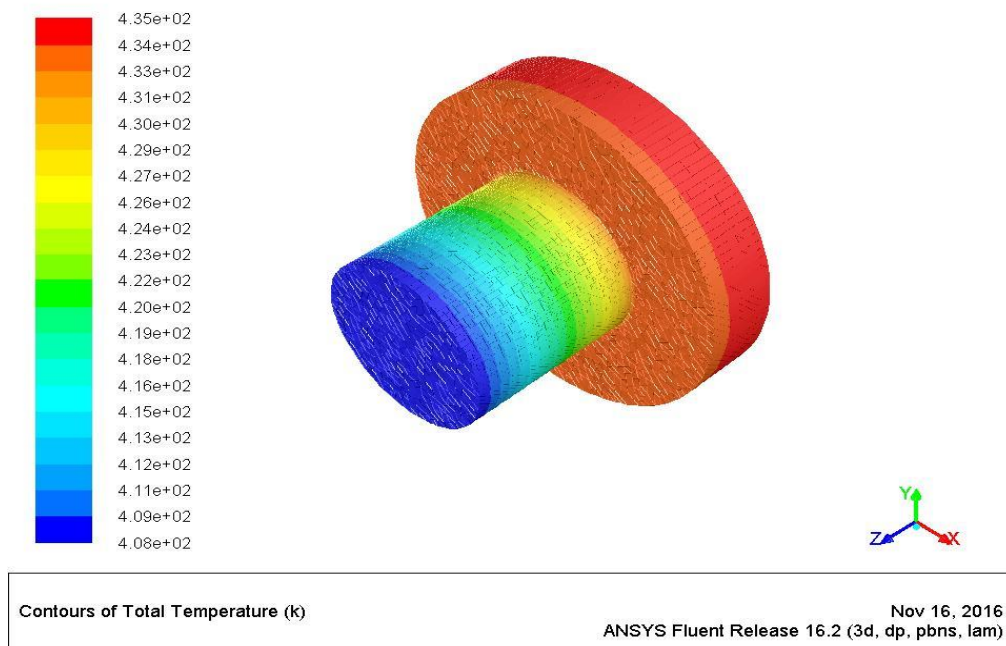
$$q'' = \frac{V^2}{R(\pi r^2)} \quad (1-2)$$

پارامترهای V ، R و r به ترتیب ولتاژ ورودی به هیتر بر حسب ولت، مقاومت معادل المنت‌های هیتر بر حسب اهم و شعاع استوانه سطح جوشش بر حسب متر می‌باشند.

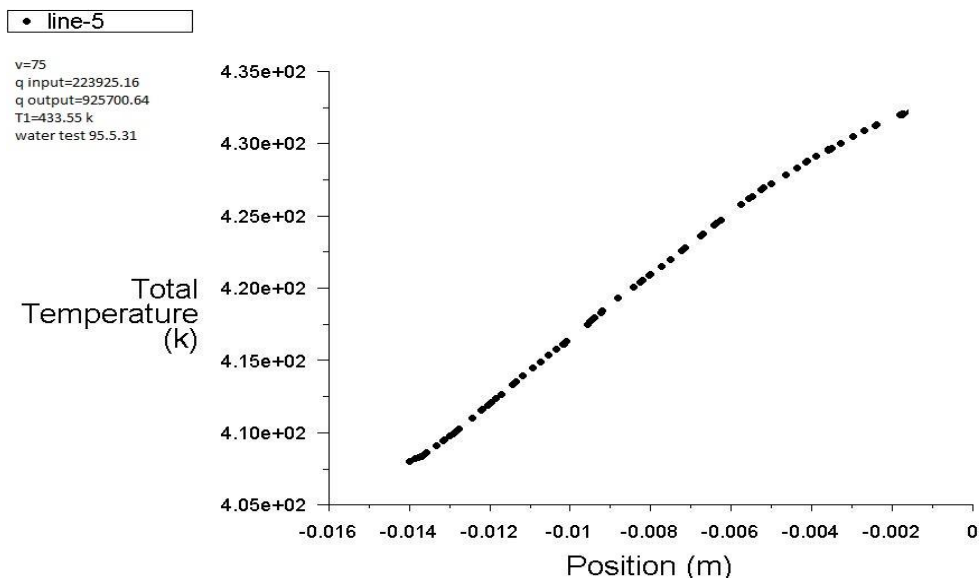
نمونه آزمایش از جنس مس با درصد خلوص ۹۹ درصد تهیه شده است و اطراف آن از تفلون نسوز با ضریب انتقال حرارت 0.30 وات بر متر درجه سانتی‌گراد، عایق شده است. از آن جهت که بزرگی هدایت حرارتی مس (400 وات بر متر درجه سانتی‌گراد) نسبت به تفلون نسوز بسیار بزرگ‌تر است، می‌توان از افت حرارتی شعاعی به طور کامل صرفه نظر 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 ANSYS Fluent شبیه‌سازی شده است.

همان طور که در شکل ۲-۱۱ و شکل ۲-۱۲ مشاهده می‌شود، تغییرات دما در طول نمونه به صورت خطی می‌باشد.



شکل ۲-۱۱- شبیه‌سازی نمونه مسی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Fluent



Total Temperature Nov 16, 2016
ANSYS Fluent Release 16.2 (3d, dp, pbns, lam)

شکل ۲-۱۲- نمودار تغییرات دما در طول نمونه محاسبه شده با استفاده از ANSYS Fluent

دمای سطح (T_w) با استفاده از دمای اندازه گیری شده توسط سنسور شماره یک و شار حرارتی محاسبه شده، از قانون هدایت فوریه، رابطه ۲-۲ برون یابی می شود.

$$T_w = T_1 - \frac{\dot{q} d_1}{K} \quad (2-2)$$

پارامتر T_1 ، دمای اندازه گیری شده توسط سنسور شماره یک و d_1 ، فاصله سنسور یک تا سطح جوشش می باشد. لازم به ذکر است که مقدار d_1 در نمونه مورد آزمایش ۱۰ میلی متر می باشد.

دمای سوپرهیت از دمای سطح به دست می آید (رابطه ۳-۲).

$$\Delta T_s = T_w - T_{sat} \quad (3-2)$$

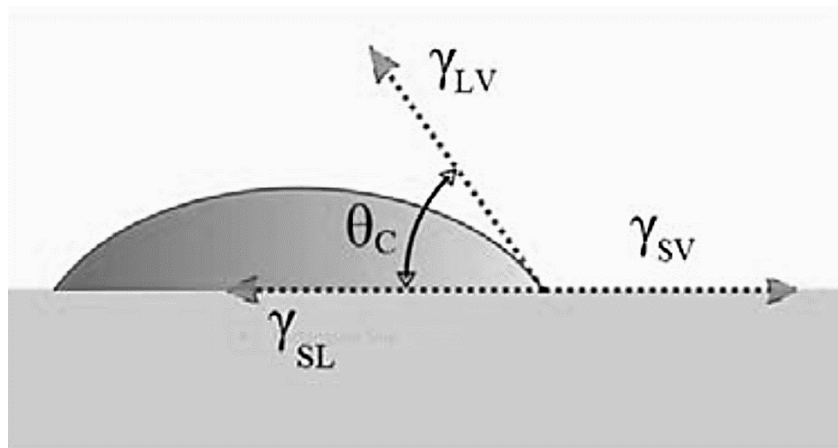
پارامتر T_{sat} ، دمای اشباع سیال که سنسور شماره دو آن را اندازه گیری می کند.

میزان ضریب انتقال حرارت جوششی از دمای سوپرهیت و شار حرارتی محاسبه می شود (رابطه ۴-۲).

$$h = \frac{\dot{q}}{\Delta T_s} \quad (4-2)$$

۲-۱۲ زاویه تماس^۱

زاویه تماس به زاویه بین خط تماس مایع-بخار با سطح جسم که قطره مایع بر روی آن قرار دارد، گفته می‌شود. بر طبق نظریه یانگ^۲ رفتار زاویه تماس قطره بر سطح جامد، همواره تحت تاثیر سه کشش سطحی می‌باشد. در فصل مشترک فازهای مایع و بخار، $\gamma_{\text{Liquid-Vapor}}$ در فصل مشترک جامد و مایع، $\gamma_{\text{solid-Liquid}}$ و در فصل مشترک جامد و بخار، $\gamma_{\text{solid-Vapor}}$ می‌باشد. قطره مایع به دلیل کشش بین سطحی^۳ که بر آن اثر می‌گذارد، به شکل معینی در می‌آید. که در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۳- شکل زاویه تماس قطره بر سطح جامد [۳۹]

زاویه تماس، بر اساس محاسبه زاویه‌ای که مرز قطره با سطح جامد می‌سازد به دست می‌آید که معیاری برای میزان ترشوندگی سطح با مایع است. بر اساس بزرگتر یا کوچکتر بودن زاویه از ۹۰ درجه، سطح آب‌گریز^۴ یا آب‌دوست^۵ می‌باشد؛ در زاویه صفر سطح کاملاً خیس^۶ شده و در زاویه بیشتر از ۱۵۰ درجه سطح اصطلاحاً کاملاً آب‌گریز^۷ است. به عبارت دیگر زاویه ۹۰ درجه مرز بین آب‌دوستی

¹ contact angle

² Thomas young

³ Interfacial tension

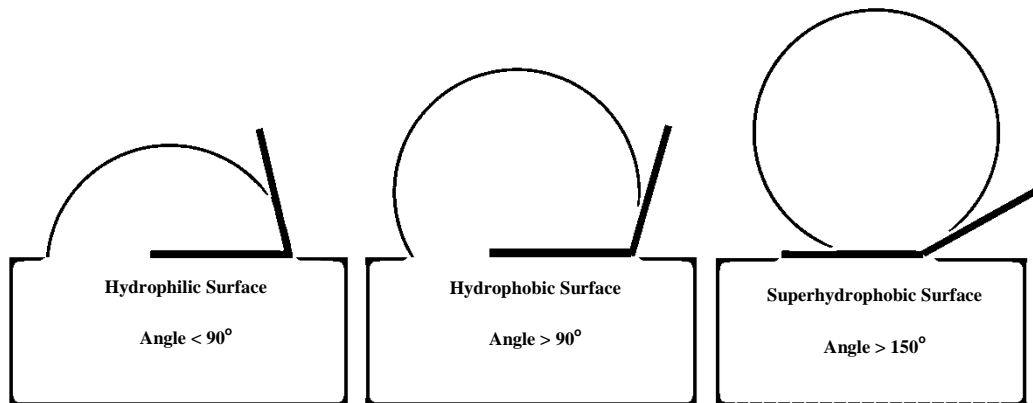
⁴ hydrophobic

⁵ hydrophilic

⁶ Complete wetting

⁷ Superhydrophobic

و آب‌گریزی در نظر گرفته شده است. شکل ۱۴-۲ نشان‌گر تقسیم‌بندی سطوح مختلف بر اساس زاویه تماس است.



شکل ۱۴-۲- شکل تقسیم‌بندی سطوح بر اساس اندازه زاویه تماس با آب [۳۹]

زاویه تماس یک قطره از مایع با سطح در تعیین ترشوندگی، موثر است. هر چقدر زاویه تماس به 180° درجه نزدیکتر شود آب‌گریزی افزایش می‌یابد و هر چه به صفر درجه نزدیکتر باشد، ترشوندگی بیشتر خواهد بود. جدول ۱-۲ رابطه میان قدرت برهمکنش مایع/مایع و جامد/مایع و همچنین درجه ترشوندگی را بر اساس زاویه تماس نشان می‌دهد.

جدول ۱-۲- رابطه میان قدرت برهمکنش مایع/مایع و جامد/مایع، درجه ترشوندگی را بر اساس زاویه تماس

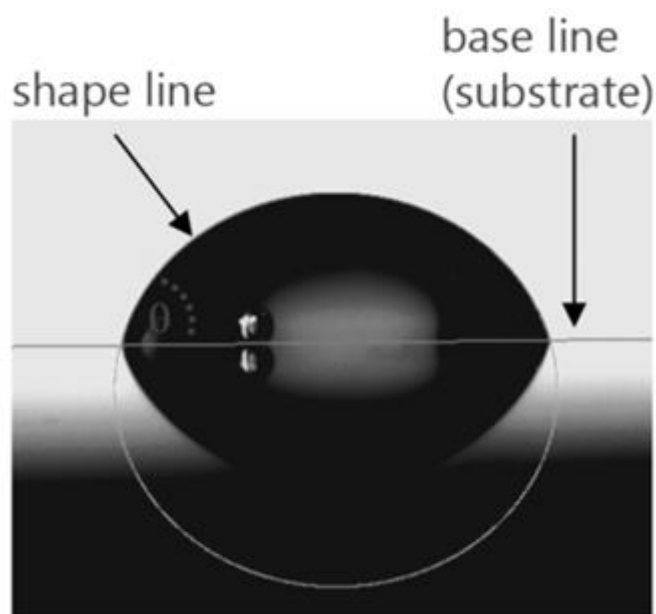
زاویه تماس	درجه ترشوندگی	قدرت	
		برهم‌کنش مایع/مایع	برهم‌کنش جامد/مایع
$\theta = 0^\circ$	تری کامل	ضعیف	قوی
$0^\circ < \theta < 90^\circ$	ترشوندگی بالا	ضعیف	قوی
$90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$	ترشوندگی کم	قوی	ضعیف
$\theta = 180^\circ$	تر نشدن کامل	قوی	ضعیف

۱۳-۲ روش اندازه‌گیری زاویه تماس

۱-۱۳-۲ آنالیز شکل قطره

در این روش از روش آنالیز تصویر قطره چسبیده و تنش فصل مشترک، به منظور تعیین زاویه تماس استفاده می‌شود. قطره مایع روی سطح قرار می‌گیرد که به آن قطره چسبیده گفته می‌شود. تصویر این

قطره توسط یک دوربین، ثبت می‌شود و به نرم‌افزار آنالیز شکل قطره منتقل می‌شود. محیط قطره بر اساس آنالیز تصویر سیاه و سفید انجام می‌شود. در مرحله بعد، برای کانتور شکل فیت شده روی قطره، مدل هندسی توصیف می‌شود شکل ۲-۱۵. زاویه تماس از زاویه محاسبه شده بین تابع شکل قطره و سطح نمونه تعیین می‌شود.



شکل ۲-۱۵- روش قطره چسبیده و کانتور فیت شده [۳۹]

۲-۱۴ تست زاویه تماس

دستگاه اندازه گیری زاویه تماس^۱ دستگاهی است که با استفاده از تصویربرداری شکل قطره بر روی سطوح، زاویه تماس مایعات بر سطح مواد جامد را به دست می‌آورد. اندازه‌گیری زاویه تماس معمولاً با قطره آب مقطر (با حجم ۴ تا ۱۰ میلی سانتیمتر مکعب) توسط سیستمی مجهز به یک دوربین CCD با قابلیت عکس‌برداری از قطره و دارای نرم افزار سنجش زاویه تماس قطره با سطح مورد نظر انجام می‌شود. تست زاویه تماس آب روی نمونه‌های تست جوشش نانو سیال CuO/Water با استفاده دستگاه تعیین زاویه تماس ساخت شرکت Fars EOR Tech ایران شکل ۲-۱۶، گرفته شده است. این دستگاه با استفاده از پمپ سرنگی، قطره‌ای بر روی سطح قرار داده و پس از پایداری قطره

¹ Contact angle measurement device

بر روی سطح با استفاده از نرم‌افزار پردازش تصویر، عکس‌های گرفته شده از دوربین را پردازش و دو زاویه تماس چپ و راست و میزان میانگین آن را نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۱۶- دستگاه تعیین زاویه تماس و کشش سطحی شرکت از دیاد برداشت فارس

۱۵-۲ تست non-contact AFM

میکروسکوپ نیروی اتمی^۱ به دلیل عدم توانایی میکروسکوپ‌های نوری در نشان دادن و واضح کردن ابعاد نانومتری ابداع شده است. در میکروسکوپ نیروی اتمی نیروی بین سوزن روبشگر و سطح نمونه که باعث خم شدن کانتیلور می‌شود، توسط آشکارساز اندازه‌گیری می‌شود. با کمک این نوع از میکروسکوپ‌ها انواع نانولیتوگرافی و تولید نانو ساختار و نانو ماشین‌کاری مطالعه می‌شود. همچنین بررسی خواص مکانیکی، سایش یا خراش نیز از موارد کاربردهای آن است. این میکروسکوپ به دو صورت تماسی (استاتیکی) و غیر تماسی (دینامیکی) کار می‌کند. حالت تماسی دارای دو نوع ارتفاع ثابت و نیرو ثابت است. در حالت تماسی، فاصله کانتیلور از سطح نمونه، کم است و هنگام روبش سوزن روی سطح نمونه، نیروی استاتیکی باعث خم شدن کانتیلور می‌شود. لازم به ذکر است نیروی دافعه بین کانتیلور و نمونه وجود دارد.

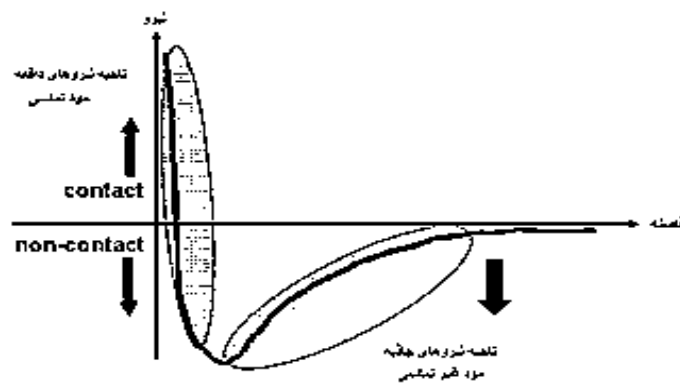
^۱ Atomic Force Microscopy (AFM)

در حالت غیر تماسی، می‌توان از فرکانس رزونانس کانتیلور برای تغییر فاصله سوزن تا نمونه یا تغییر نیرو استفاده کرد. در این حالت نیروی اتمی بین کانتیلور و نمونه، از نوع جاذبه است. یکی از تفاوت‌های شاخص این حالت با حالت قبل عدم تماس با نمونه‌های نرم و در نتیجه عدم تخریب است. البته حالت دینامیکی نسبت به حالت استاتیکی سرعت روبش کمتری دارد.

از میکروسکوپ نیروی اتمی برای بررسی سطوح گوناگون، تحت شرایط محیطی متفاوت اعم از خلأ، هوا و مایع استفاده می‌شود. میکروسکوپ نیروی اتمی برای بررسی سطوح عملاً محدودیت خاصی ندارد و می‌توان برای تمامی سطوح آن را بکار برد.

خواص اندازه‌گیری شده توسط میکروسکوپ نیروی اتمی عبارت است از مورفولوژی سطح، توزیع چسبندگی، جنس نواحی مختلف، ناخالصی، اندازه پیوندهای شیمیایی و توزیع میزان بار در سطح برای بررسی خوردگی، یکنواختی، اندازه، تمیزی، زبری و چسبندگی است [۴۰].

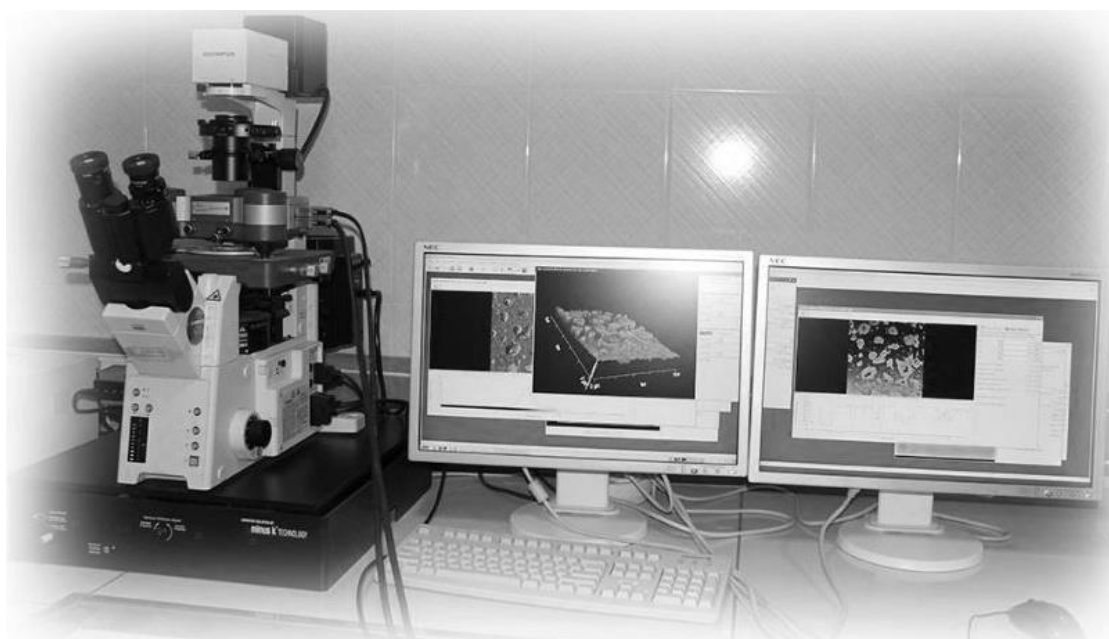
در میکروسکوپ نیروی اتمی از یک سنسور (prob) به شعاع مخروطی شکل کمتر از ۱۰ نانومتر استفاده شده است. پراب سطح به شکل مربع را اسکن می‌کند. اگر نوک مخروط (تیپ) به سطح زیاد نزدیک شود نیروهای بین سطح نمونه و نوک تیپ طبق شکل ۲-۱۷ تغییر خواهد کرد.



شکل ۲-۱۷- نمودار تغییرات نیروی و اندروالسی بین پراب و سطح نمونه در دستگاه AFM [۴۰] محور افقی فاصله با سطح و محور عمودی، نیرو (واندروالسی) است. در ابتدای نزدیک شدن پراب به سطح، نیرو به شکل جاذبه و وقتی خیلی نزدیک شود به شکل دافعه می‌شود. با حرکت کانتیلور بر روی نمونه به دلیل وجود ناصافی‌ها در سطح، نیروی و اندروالسی در راستای قائم دائماً تغییر می‌کند و

سبب تغییر ارتفاع کانتلیور می‌شود. ثبت این تغییرات ارتفاع، اسکن سه بعدی و اطلاعات سطح را نشان خواهد داد [۴۰].

برای عدم آسیب دیدن سطح نمونه و عدم تغییر مشخصات سطح، از میکروسکوپ نیروی اتمی غیر تماسی با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی ساخت شرکت JPK کشور آلمان، مدل Nanowizard II شکل ۱۸-۲ استفاده و پردازش داده‌های خام با نرم افزارهای JPKSPM Data Processing و Gwyddion انجام شد.



شکل ۱۸-۲- دستگاه AFM ساخت شرکت JPK کشور آلمان، مدل Nanowizard II

۱۶-۲ تست SEM

استفاده از (SEM) برای مطالعه نمونه‌های ضخیم غیر شفاف اولین بار در سال ۱۹۴۲ در آمریکا توسط ژورکین و همکاران بکار گرفته شد. در دانشگاه کمبریج پرفسور چارلز اتلی و همکارش گری استوارت توسعه بیشتری به (SEM) داده و در سال ۱۹۶۵ برای اولین بار به صورت تجاری وارد بازار شد [۴۱]. امروزه دانشمندان از روش‌های زیادی جهت شناسایی و آنالیز مواد استفاده می‌کنند. یکی از مهم‌ترین و معروف‌ترین آن‌ها روش‌های میکروسکوپی است. این روش بر پایه بزرگنمایی تصاویر نمونه است. میکروسکوپ‌های الکترونی به خاطر محدودیت میکروسکوپ‌های نوری توسعه یافتند. در میکروسکوپ‌های نوری با تغییر میزان تقعر و تحدب، می‌توان بزرگنمایی را زیاد کرد اما به علت بلندی

طول موج نور، تصاویر در بزرگنمایی بیشتر از ۲۰۰۰ برابر وضوح (کمترین فاصله بین دو نقطه قابل تفکیک) خود را از دست می‌دهد. در میکروسکوپ‌های الکترونی بجای نور از پرتو الکترون استفاده می‌شود. قابلیت کوتاه بودن طول موج الکترون باعث بزرگنمایی بسیار بالا (تا حد یک میلیون) در این میکروسکوپ‌ها شده است [۴۲].

میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ یکی از پرکاربردترین میکروسکوپ‌های الکترونی است زیرا علاوه بر دستیابی و تهیه تصاویر بزرگنمایی شده، از آن می‌توان برای آنالیز شیمیایی و دیگر بررسی‌ها - با مجهز کردن به تجهیزات اضافی - استفاده نمود.

مواد هادی الکتریسیته نیازی به پولیش و ایچ ندارند ولی در مورد نمونه‌های غیر هادی برای اتصال نمونه به بدنه با فویل آلومینیوم پوشش و سپس با لایه نازکی از کربن، طلا، نقره یا آلیاژهای آن‌ها پوشش داده می‌شوند. در این دستگاه نمونه با پرتویی از الکترون بمباران شده تا فوتون‌ها و الکترون‌هایی از نمونه خارج و به سمت آشکارساز رها و در آنجا تبدیل به سیگنال شوند. (SEM) بدین صورت می‌تواند سطح را به صورت زنده نشان دهد. بعدها این دستگاه توسعه یافت و برای تعیین ترکیبات شیمیایی به اشعه ایکس و برای تشخیص وضعیت بلور به کانال‌های الکترونی مجزا مجهز گردید [۴۲].

برای مشاهده سطح نمونه‌های مسی بعد از تست جوشش نانو سیال CuO/Water و اندازه‌گیری ضخامت پوشش از میکروسکوپ الکترون روبشی ساخت شرکت TESCAN، مدل VEGA//XMU ساخت کشور جمهوری چک شکل ۲-۱۹، با دقت اندازه‌گیری ۱۰ نانومتر استفاده شد. به دلیل نارسا بودن نانو ذرات و عدم مشاهده آن در حالت بدون پوشش، از پوشش نقره و فویل آلومینیوم برای اتصال به بدنه دستگاه استفاده شده است. تصاویر با استفاده نرم‌افزار ImageJ از شرکت Fiji پردازش و اندازه‌گذاری گردید.

¹ Scanning Electron Microscope (SEM)

برای اندازه‌گیری ضخامت پوشش، تصویربرداری از کنار نمونه گرفته شده است. برای درک و مشاهده بهتر سطح نمونه با نرم‌افزار ImageJ ساختار سه بعدی سطح نیز شبیه سازی شده است.



شکل ۲-۱۹- دستگاه (SEM) مدل VEGA/XMU شرکت TESCAN

۲-۱۷ دوربین با سرعت عکس برداری بالا

برای تصویربرداری از فرآیند جوشش و حباب‌ها از دوربین سرعت بالا مدل Dimax S/4500 frames per second از شرکت PCO کشور آلمان (شکل ۲-۲۰) استفاده شده است. دوربین فوق قابلیت تصویربرداری و ذخیره عکس تا حداکثر ۴۵۰۰ عکس در ثانیه را دارد.



شکل ۲-۲۰- دوربین سرعت بالا مدل Dimax S/4500 frames per second از شرکت PCO

۱۸-۲ تحلیل هیدرودینامیکی حباب به روش تصویربرداری سرعت بالا

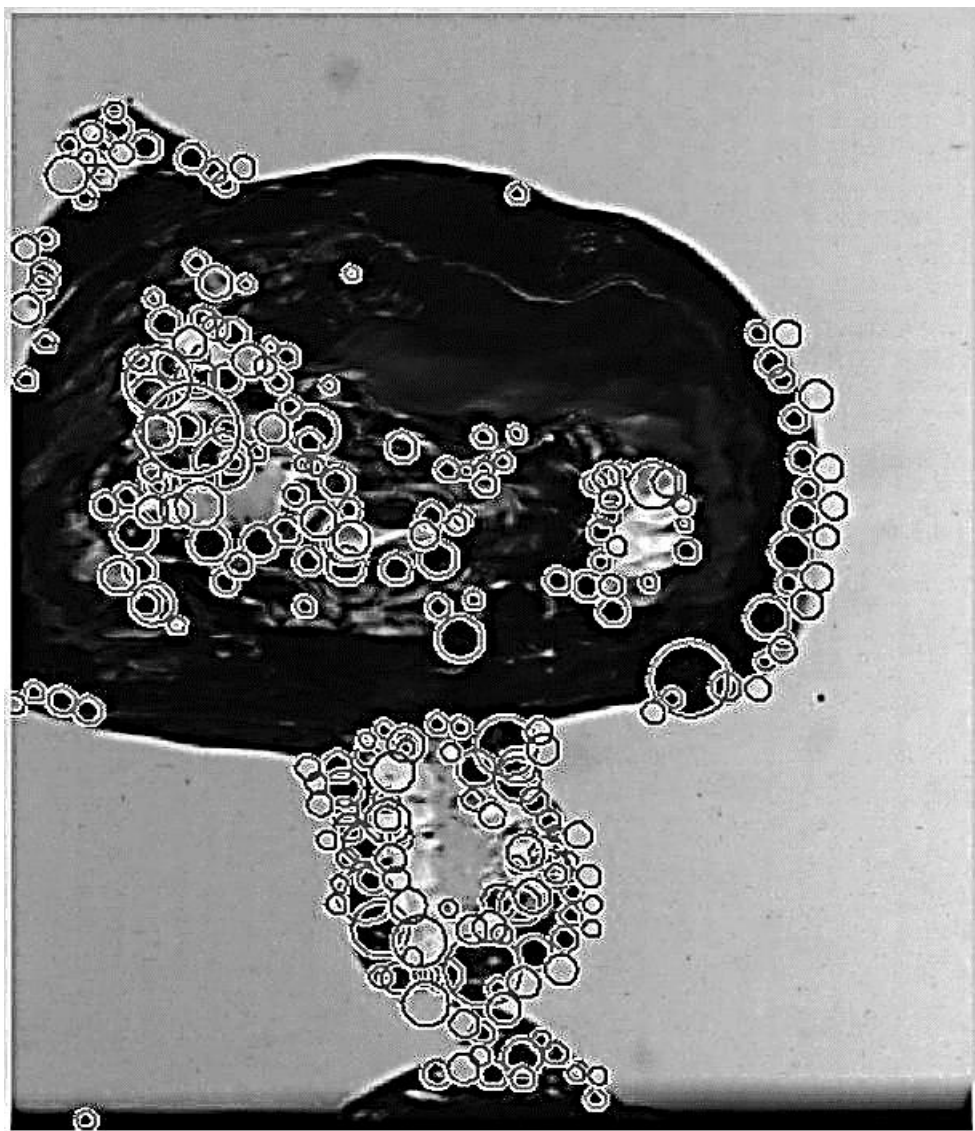
در این قسمت تفاوت پارامترهای مهم جوشش استخری آب و نانوسیال اکسیدمس/آب که شامل قطر حباب در لحظه جدایش و فرکانس جدایش حباب می‌باشد با استناد بر مشاهدات تجربی، به تفصیل بررسی می‌شود.

۱-۱۸-۲ پردازش تصویر

جهت مطالعه بیشتر تاثیر نانوذرات اکسید مس بر جوشش استخری و اندازه‌گیری قطر حباب‌های آزاد شده از سطح از عکس‌های گرفته شده با دوربین پرسرعت و برنامه نوشته شده توسط نرم افزار matlab استفاده می‌شود.

بطور کلی مهم‌ترین و بهترین روش جهت تحلیل هیدرودینامیکی حباب در تصویر، استفاده از تکنیک-های پردازش تصویر است. در بعضی مواقع که شکل حباب به صورت دایره باشد، کار آسان‌تر است، برای تشخیص حباب از تکنیک `imfindcircles` استفاده می‌شود. این روش برای تصاویری که شکل حباب حدوداً به صورت کروی باشد، درصد تشخیص بالایی دارد. پس از بررسی بیشتر تصاویر، مشاهده شد که در اکثر موارد، شکل حباب، به صورت کاملاً نامنظم است. به طوری که به هیچ گونه شکل هندسی، شبیه نیست.

در مواقعی که شکل حباب به صورت یک شکل هندسی منظم نیست، باید از دیگر تکنیک‌های پردازش تصویر جهت تشخیص آن استفاده کرد. پس از مطالعه بیشتر راه‌های تشخیص این نوع حباب، نهایتاً دو راه حل ارائه و پیاده‌سازی شده است.



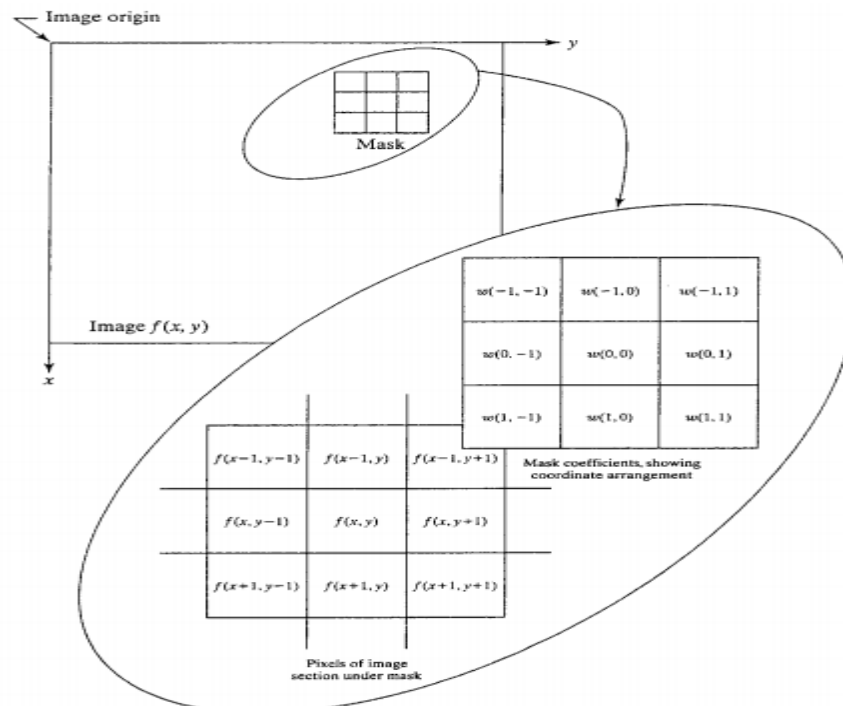
شکل ۲-۲۱- عدم توانایی تکنیک imfindcircles در تشخیص حباب غیر کروی

۲-۱۸-۲ فیلتر کردن تصویر

فیلترهای مکانی^۱، به گونه‌ای روی تصویر اعمال می‌شود که تعداد پیکسل با توجه به مقدار پیکسل‌های همسایگی آن تغییر می‌کند. مثلاً می‌توان مقدار یک پیکسل را با اعمال یک فیلتر میانگین، برابر مقدار میانگین هشت پیکسل همسایگی آن قرار داد. فیلترها به دو نوع خطی و غیرخطی تقسیم می‌شوند، نوع خطی را کانولوشن مکانی هم می‌گویند.

^۱ spatial filter

در بحث فیلترهای خطی، همسایگی‌های یک پیکسل با وزن‌های مشخص شده باهم جمع می‌شوند و نرمالایز می‌شوند و به عنوان مقدار پیکسل میانی قرار داده می‌شوند. برای مشخص کردن وزن‌ها از یک ماتریس استفاده شده است، به این ماتریس وزن‌ها (ضرایب)، ماسک، کرنل، پنجره، ماسک فیلتر و ... گفته می‌شود. ابعاد همسایگی با ابعاد ماتریس مشخص می‌شود. به عنوان مثال می‌توان مقدار یک پیکسل مرکزی را متناسب با وزن‌های خاصی از هشت همسایگی آن به دست آورد، یک ماتریس سه در سه شامل مقادیر وزن‌ها تعریف کرده و نظیر به نظیر در همسایگی‌ها ضرب و جمع آن‌ها را به عنوان مقدار پیکسل مرکزی قرار داد. تصویر شکل ۲-۲۲ گویای موارد فوق است.

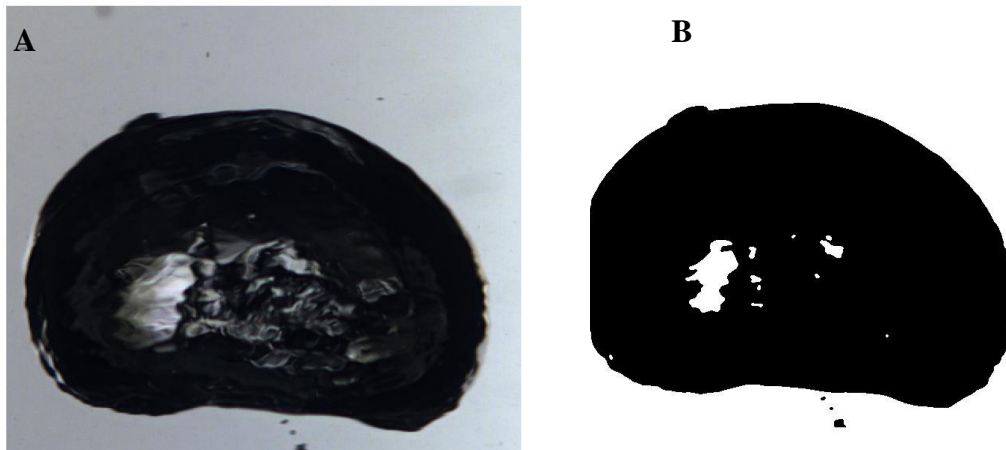


شکل ۲-۲۲- ماتریس وزن مربوط به روش فیلتر مکانی

این کار باید برای تک تک پیکسل‌های تصویر صورت بگیرد، متلب با دستور `imfilter` این کار را انجام می‌دهد، ضرب ماسک در تصویر به دو روش `convolution` و `correlation` انجام می‌شود.

اندازه پنجره یا ماسک، بسته به حباب می‌تواند تغییر کند. هرچه اندازه ماسک افزایش یابد، تشخیص اندازه حباب از اندازه واقعی آن بیشتر می‌شود و برعکس. با آزمایش و خطا، اندازه ماسک، 4×4 برای

تصاویر موردنظر انتخاب شده است. پس از اینکه چندین آزمایش با این روش، انجام داده شد، با استفاده از تصاویر به‌خوبی با دقت بسیار بالا، حباب تشخیص داده شده و مساحت آن محاسبه شد.



شکل ۲-۲۳- تشخیص حباب آب‌دیونیزه با استفاده از روش فیلتر مکانی

در بعضی تصاویر، حباب به‌درستی تشخیص داده نمی‌شود، بنابراین دقت محاسبه حجم آن کاهش می‌یابد. روش دیگری جهت تشخیص حباب ارائه می‌گردد. روش دوم بنام تشخیص برجستگی تصویر بیان و در بعضی از تصاویر پیاده‌سازی شد.

۳-۱۸-۲ تشخیص برجستگی (saliency)

در این روش، به دنبال تشخیص برجستگی تصویر هستیم. برای تشخیص برجستگی موجود در تصویر از روش الگوریتم کلونی مورچه به همراه همبستگی فازی استفاده می‌شود. این روش برای اولین بار توسط L.Ma در سال ۲۰۱۰ ارائه شد [۴۳]. در این روش پس از اینکه، حباب توسط این الگوریتم، تشخیص داده شد، مساحت سطح آن نیز محاسبه می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۲-۲۴ مشاهده می‌شود دقت روش تشخیص برجستگی تصویر در تشخیص حباب تصویر (C) نسبت به روش فیلتر کردن تصویر (B) در این حباب بهتر عمل کرده است.



شکل ۲-۲۴- مقایسه تشخیص حباب به روش فیلتر کردن تصویر و تشخیص برجستگی

۴-۱۸-۲ محاسبه قطر حباب جدا شده از سطح

جهت محاسبه مساحت حباب، به صورت زیر عمل می‌شود. ابتدا تصویری متناسب با تصاویر مورد آزمایش که شامل یک مقیاس اندازه گیری باشد را انتخاب کرده، سپس با استفاده از تابع `imdistline` رابطه بین تعداد پیکسل‌ها و مقیاس موردنظر یافته می‌شود. پس از آن، با در نظر گرفتن حباب به صورت دایره و با توجه به اینکه، اندازه حباب با توجه به تعداد پیکسل‌های آن محاسبه شده است، می‌توان شعاع دایره را محاسبه کرد.

۵-۱۸-۲ محاسبه فرکانس جدا شدن حباب از سطح

پس از انجام چند تست و تصویربرداری با سرعت‌های مختلف، سرعت ۷۰۰ فریم بر ثانیه بهترین سرعت برای مشاهده و بررسی حباب‌ها در تنظیمات دوربین انتخاب شده است. با کمک تعداد فریم انتخابی و مشاهده تک به تک عکس‌ها و شمارش تعداد حباب‌های جدا شده، فرکانس جدایش حباب به دست می‌آید.

فرکانس جدایش حباب از رابطه ۲-۵ به دست می‌آید.

$$fr = \frac{N}{n}$$

frame rate

(۲-۵)

در رابطه ۲-۵، N تعداد حباب جدا شده از سطح، n تعداد عکس و frame rate تعداد عکس بر حسب ثانیه که در دوربین تنظیم می‌شود، است.

فصل سوم:

تحليل و نتايج

۱-۳ مقدمه

جوشش استخری به فرآیندی که با تولید بخار بر روی سطح جوشش در داخل سیال ساکن روی می‌دهد، گفته می‌شود. هرچند که سیال داخل استخر می‌تواند با جابه‌جایی طبیعی و حرکت حباب‌ها حرکت کند. در صورتی که استخر به صورت لایه نازکی از سیال بر روی سطح، گرم شده باشد، تبخیر به صورت مستقیم از سطح لایه نازک سیال رخ می‌دهد. در شارهای حرارتی بالاتر، جوشش هسته‌ای بر روی سطح هیتر با تولید حباب رخ می‌دهد. جوشش به دو صورت فرسرد^۱ و اشباع^۲ دسته‌بندی می‌شود: در جوشش فرسرد دمای سیال از دمای اشباع آن کمتر است و اکثر حباب‌های جدا شده از سطح، در درون سیال چگالیده می‌شوند؛ ولی در جوشش اشباع، مایع در دمای اشباع است و حباب‌های جدا شده از سطح توسط نیروهای شناوری به سطح آزاد سیال می‌رسند.

جوشش، لحظه تبخیر مایع در (سایت‌های هسته‌زایی) در سطح مشترک جامد مایع که تولید حباب بخار می‌کنند، رخ می‌دهد. این حالت انتقال حرارت، در انواع تجهیزات نظیر مبدل‌های حرارتی، خنک‌کننده دستگاه‌های الکترونیکی، فرایند کوچینگ در صنعت متالورژی و آب‌گرمکن‌های خانگی و صنعتی ظرفیت بالا، کاربرد دارد.

در فرایند جوشش نرخ انتقال حرارت از سطح به سیال، به دمای مایع، فشار سیستم، خواص ترمودینامیکی مایع، هندسه سطح و جهت سطح جوشش بستگی دارد. در جوشش استخری، با افزایش شار حرارتی، مقدار سوپرهیت شدن نیز افزایش می‌یابد؛ اما زمانی که لایه‌ای از بخار تمام سطح جوشش را می‌پوشاند دمای سطح به شدت افزایش خواهد یافت که منجر به وقوع پدیده شار حرارت بحرانی و پایان دادن به انتقال حرارت جوشش استخری می‌شود. این نقطه حداکثری انتقال حرارت با افزایش سریع لحظه‌ای دمای سطح حتی تا چند صد درجه سانتی‌گراد همراه است.

¹ Subcooled boiling

² Saturated boiling

۲-۳ اعتبار سنجی

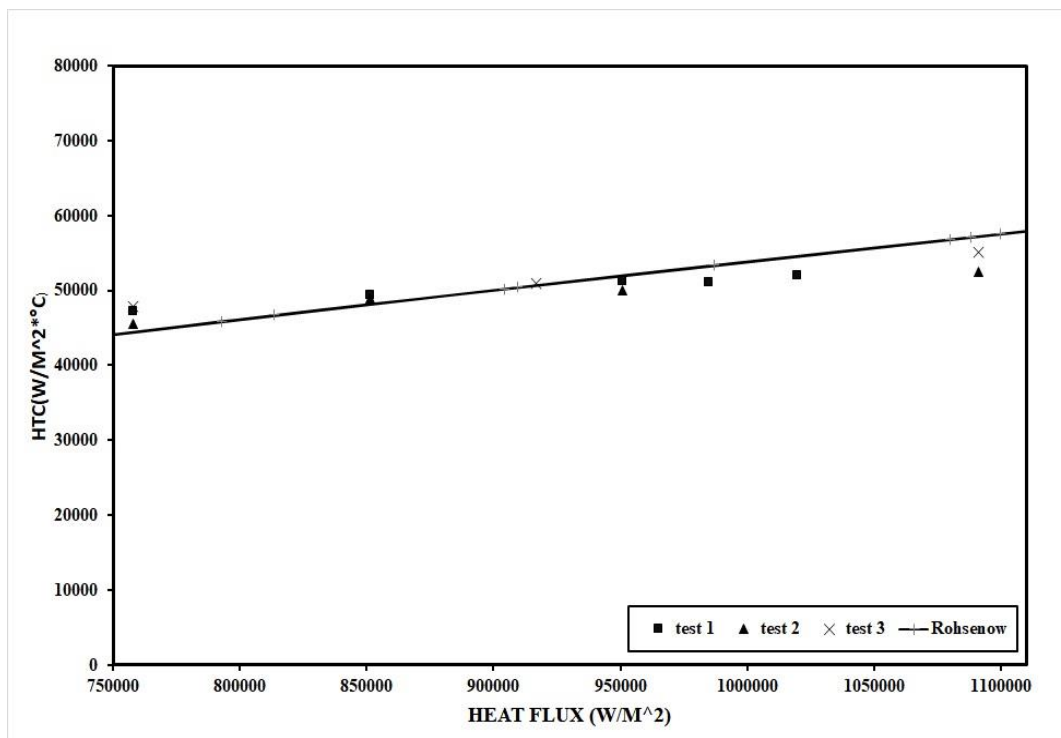
قبل از انجام تست جوشش با نانو سیال، برای کالیبره کردن دستگاه تست جوشش، آزمایشاتی با آب بر روی سطح صیقلی مسی انجام شد و سپس منحنی جوشش با مدل تجربی روزنوف [۴۴] معادله ۱-۳ مقایسه شدند.

$$\frac{C_p \cdot \Delta T}{h_{fg}} = C_{sf} \left[\frac{q''}{\mu \cdot h_{fg}} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)}} \right]^{\frac{1}{3}} \left(\frac{C_p \cdot \mu}{k} \right) \quad (1-3)$$

$$h = \frac{q''}{\Delta T_s} \quad (2-3)$$

Csf مقدار ضریب تصحیح سطح می‌باشد. روزنو در جوشش استخری برای سطح افقی مسی صاف Csف=۰/۰۱۲۸ را پیشنهاد کرده است [۴۴]

شکل ۱-۳ نشان دهنده نتایج آزمایش آب و اعتبار سنجی آن با فرمول تجربی روزنو [۴۴] برای ضریب انتقال حرارت می‌باشد. این تست سه بار تکرار شده و رسم گردیده است. برای به دست آوردن خواص ترمودینامیکی و محاسبه مقادیر مدل‌های تجربی، از نرم‌افزار EES استفاده گردیده است.



شکل ۱-۳- کالیبره کردن دستگاه تست جوشش با آب مقطر و مقایسه آن با مدل روزنو

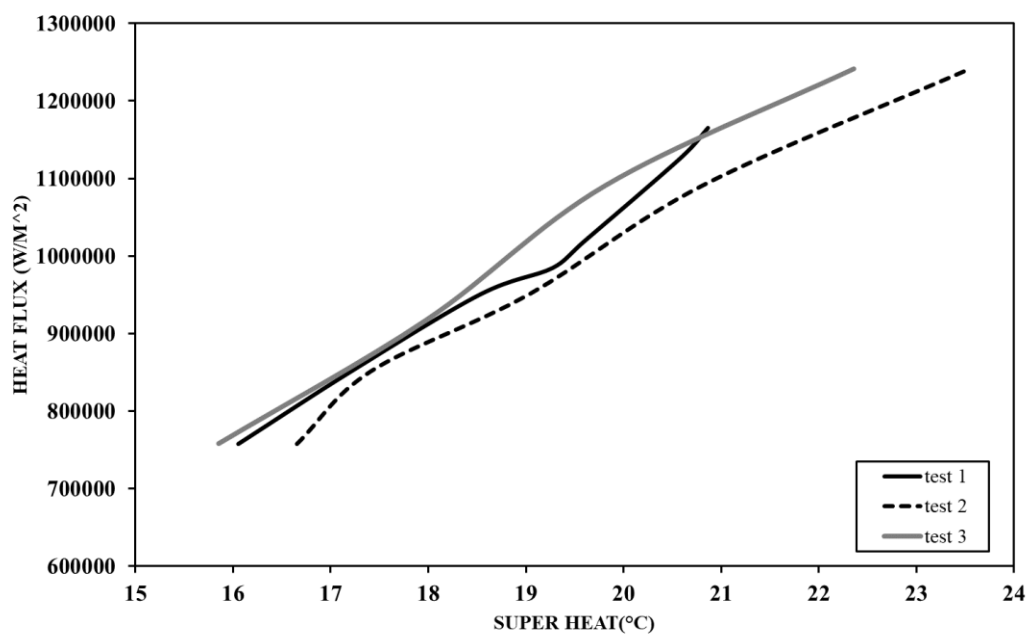
۳-۳ تکرارپذیری

به منظور یکپارچگی داده‌های آزمایش و تکرارپذیری تست‌ها، هر آزمایش بر روی سطح یکسان و طی سه دوره تحت شرایط یکسان انجام شد. نتایج حاصل از آب مقطر و جوشش نانو سیال در ادامه نشان داده شده است. لازم به ذکر است به منظور کم کردن خطای آزمایش و نتایج دقیق‌تر، تمام سطوح تمیز و نو بوده و از شرایط یکسان برخوردار بودند.

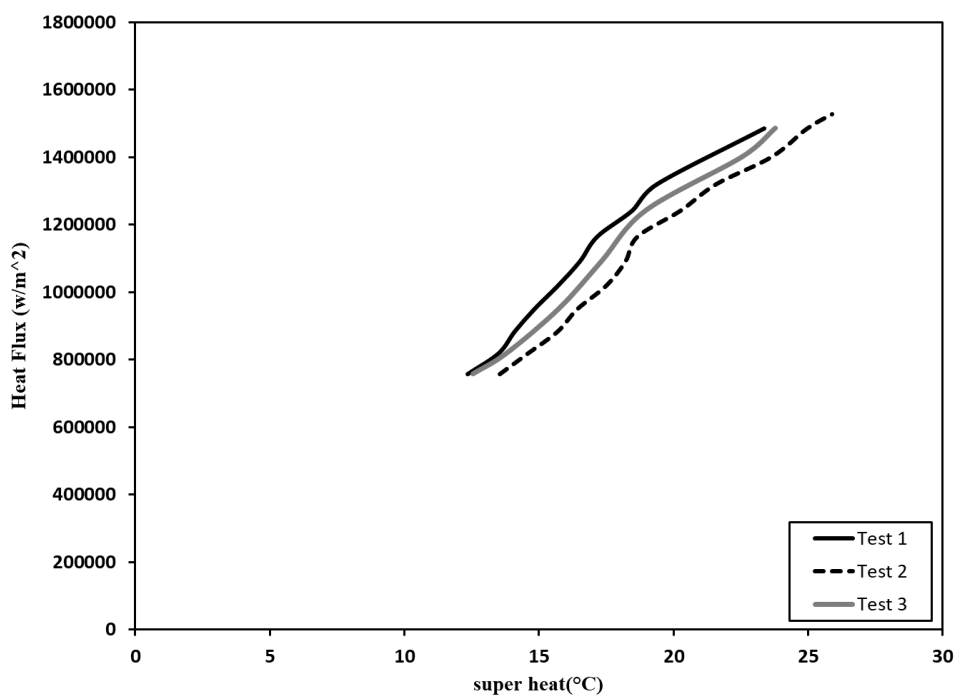
شکل ۳-۲ تا شکل ۳-۹ و نیز جدول ۳-۱ به خوبی نشان‌دهنده مطابقت زیاد سه تست متفاوت آب و نانو سیال اکسید مس در غلظت‌های مختلف در تکرارپذیری داده‌ها است. با افزایش شارحرارتی، دمای سطح و مقدار سوپرهیت سطح افزایش می‌یابد. در نقطه انتهایی نمودارها، شار حرارت بحرانی رخ می‌دهد. از نمودارهای بالا به خوبی می‌توان دریافت که داده‌های آب بیشترین تطبیق را دارند و داده‌های نانو سیال نیز به دلیل زیادتر بودن نرخ تشکیل و آزادسازی حباب سبب حساسیت بالاتر آن‌ها نسبت به تغییرات محیطی شده است. و از انحراف دمای بیشتری برخوردار بودند.

جدول ۳-۱- مقادیر شارحرارت بحرانی اندازه‌گیری شده در غلظت‌های مختلف

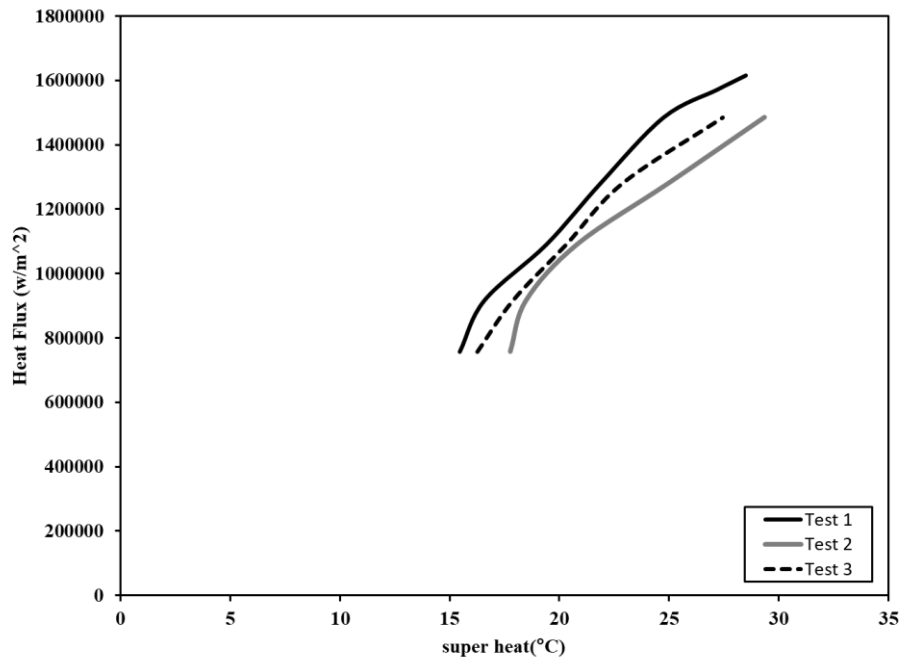
Concentration (mg/lit)	CHF(MW/m ²)			Standard Error %
	Test 1	Test 2	Test 3	
0	1.24	1.24	1.16	2.54
1	1.48	1.53	1.48	1.42
5	1.48	1.48	1.62	4.34
10	2.14	1.94	2.04	5.74
50	2.09	2.14	2.04	2.90
100	2.40	2.24	2.35	4.67
500	2.14	2.29	2.14	5.18
1000	2.24	2.14	2.14	3.44



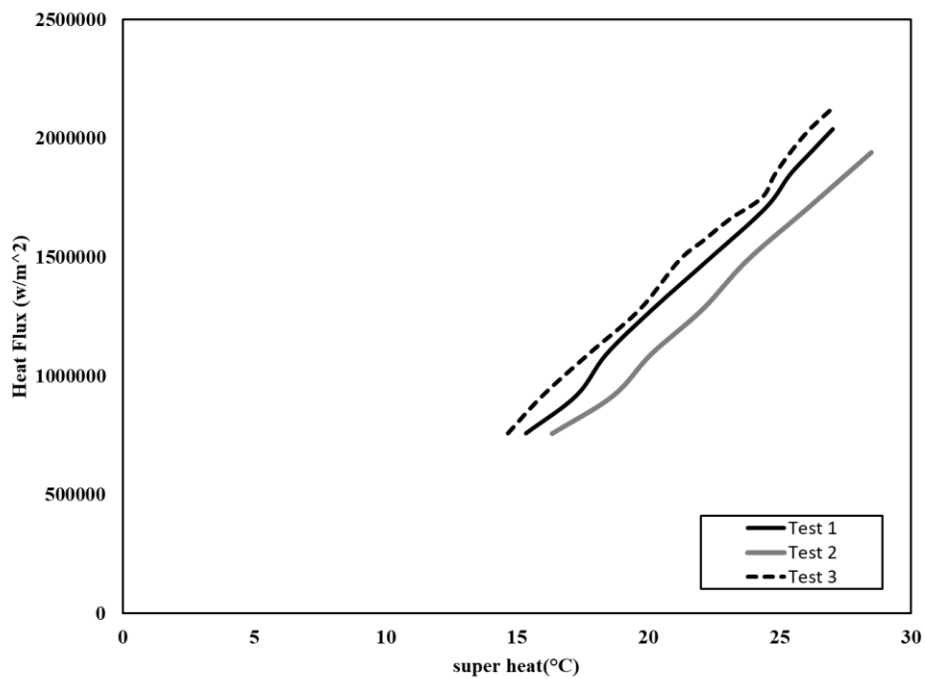
شکل ۳-۲ - نمودار میزان سوپرهیت سطح آب



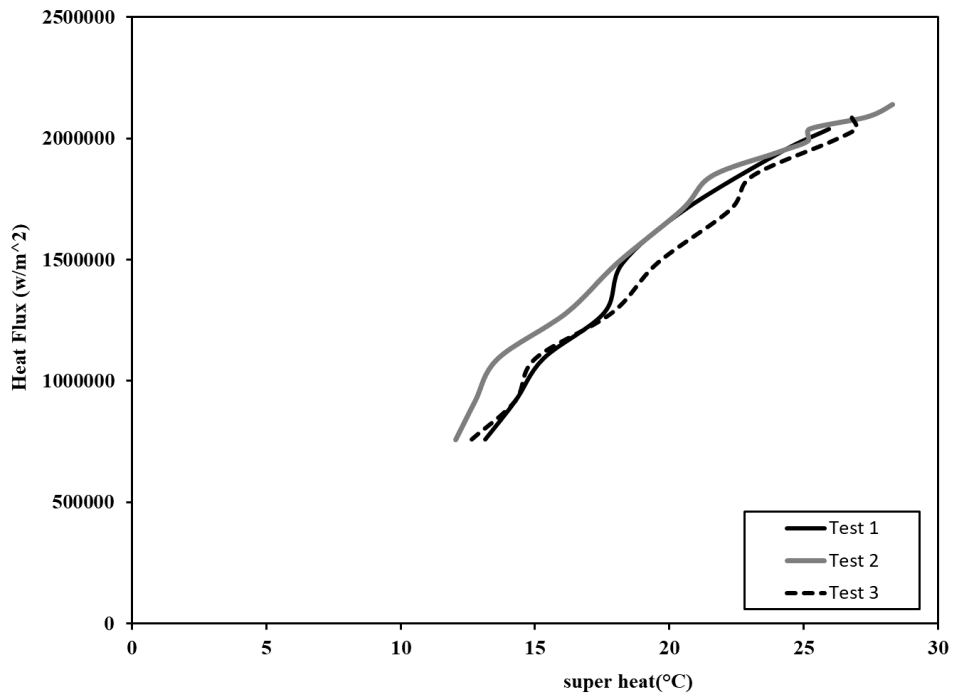
شکل ۳-۳ - نمودار میزان سوپرهیت سطح نانو سیال اکسید مس با غلظت ۱ میلی گرم بر لیتر با تکرارپذیری ۳



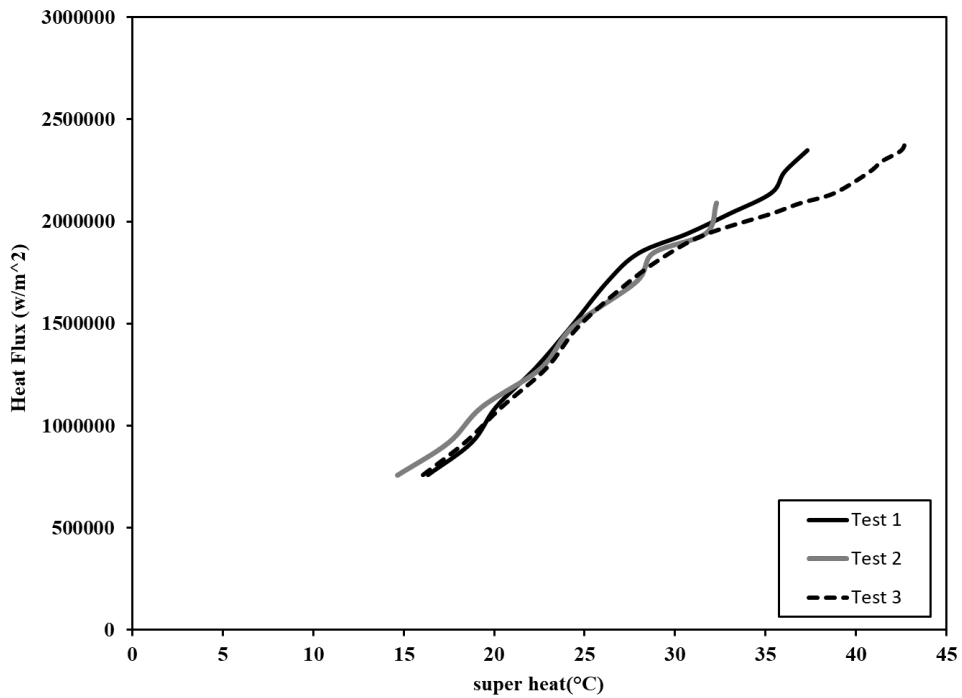
شکل ۳-۴ - نمودار میزان سوپرهیت سطح نانو سیال اکسید مس با غلظت ۵ میلی گرم بر لیتر با تکرارپذیری ۳



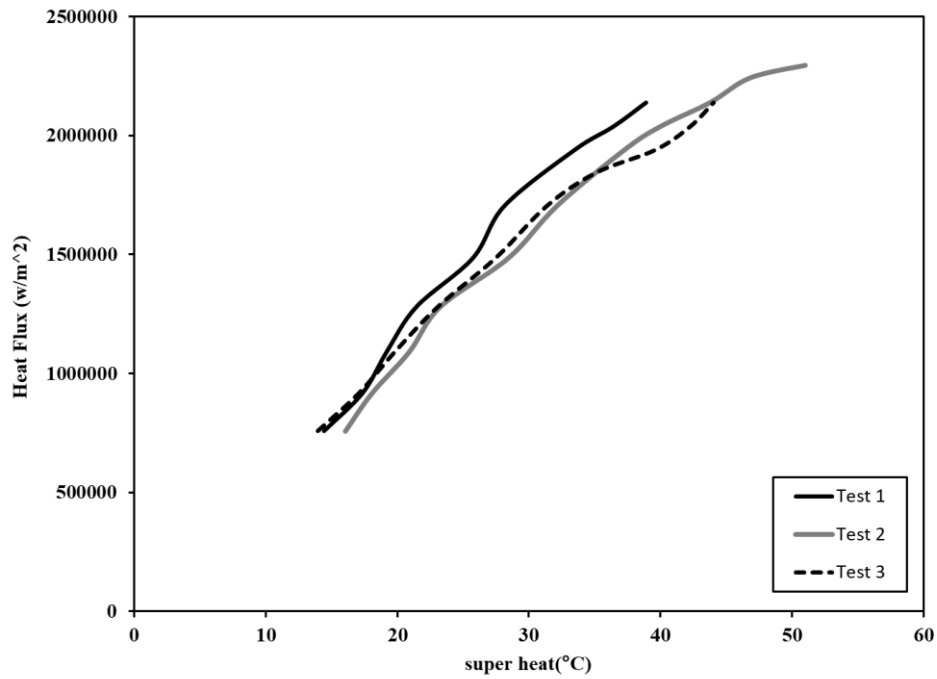
شکل ۳-۵ - نمودار میزان سوپرهیت سطح نانو سیال اکسید مس با غلظت ۱۰ میلی گرم بر لیتر با تکرارپذیری ۳



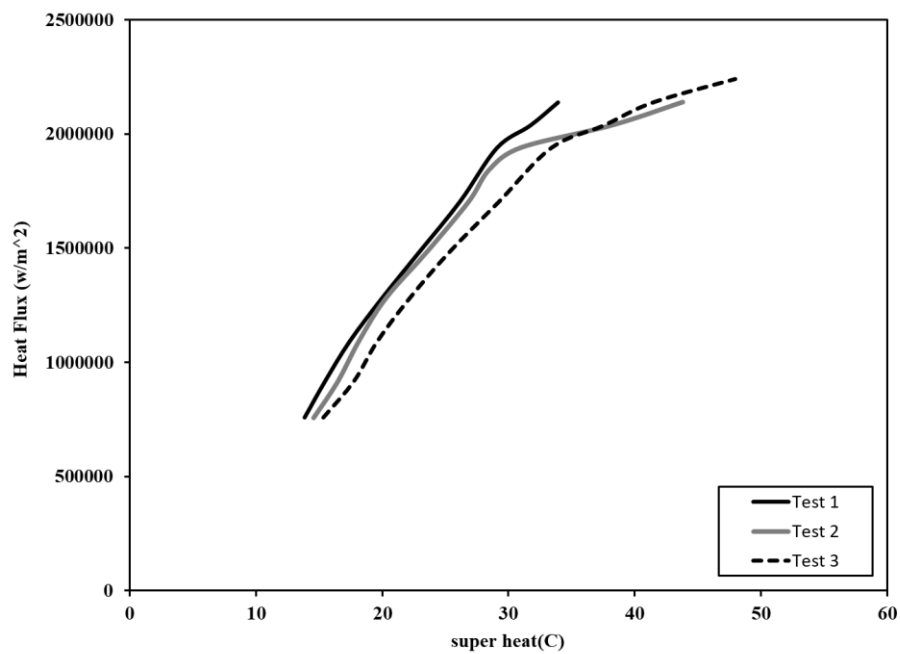
شکل ۳-۶- نمودار میزان سوپرهیت سطح نانو سیال اکسید مس با غلظت ۵۰ میلی گرم بر لیتر با تکرارپذیری ۳



شکل ۳-۷- نمودار میزان سوپرهیت سطح نانو سیال اکسید مس با غلظت بهینه ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر با تکرارپذیری



شکل ۳-۸- نمودار میزان سوپرهیت سطح نانو سیال اکسید مس با غلظت ۵۰۰ میلی گرم بر لیتر با تکرارپذیری ۳



شکل ۳-۹- نمودار میزان سوپرهیت سطح نانو سیال اکسید مس با غلظت ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر با تکرارپذیری ۳

۴-۳ تأثیر ذرات نانو بر روی انتقال حرارت

از مشخصه‌های مهم در سیستم‌های انتقال حرارت می‌توان به ضریب انتقال حرارت جوششی نام برد که هر چه در یک شار حرارتی ثابت بالاتر باشد، دمای سطح کاهش یافته و به طبع آن ظرفیت سیستم بیشتر می‌شود. یکی از تکنیک‌ها برای بهبود ضریب انتقال حرارت استفاده از نانو ذرات در سیال پایه می‌باشد. برخی پژوهش‌ها در مورد نانو سیال اکسید مس-آب که در این آزمایش‌ها نیز مورد استفاده قرار گرفته شده در ادامه آورده شده است.

لی و همکاران [۴۵] با مطالعه جوشش استخری نانو سیال آب-اکسید مس در غلظت‌های ۰/۰۰۵ تا ۰/۲ درصد جرمی بر روی هیتر مسی، دریافتند که به دلیل ته‌نشینی نانو ذرات و پر شدن حفره‌های فعال، انتقال حرارت کاهش می‌یابد.

سیس لینسکی و همکاران [۴۶] جوشش استخری آب-آلومینا و آب-مس در غلظت‌های ۰/۱، ۰/۰۱ و ۱ درصد جرمی بر روی سطوح مسی و فولاد ضد زنگ را بررسی کردند. آن‌ها برای نانو سیال آب-آلومینا بر روی سطح مسی ضریب انتقال حرارت در تمامی غلظت‌ها کاهش و برای نانو سیال آب-مس بر روی سطح مسی ضریب انتقال حرارت فقط در غلظت ۰/۰۱ درصد جرمی افزایش و در بقیه غلظت‌ها کاهش را نسبت به آب مقطر مشاهده نمودند.

یومش و همکاران [۳۰] جوشش استخری پنتان و نانو سیال پنتان-اکسید مس را بر روی هیتر برنجی در دو حالت صاف و ارتقا یافته در فشار اتمسفر بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که ضریب انتقال حرارت فقط در غلظت ۰/۰۰۵ درصد حجمی بین ۵ تا ۲۵ درصد افزایش یافته و در بقیه غلظت‌ها، با افزایش میزان نانو ذرات، ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد.

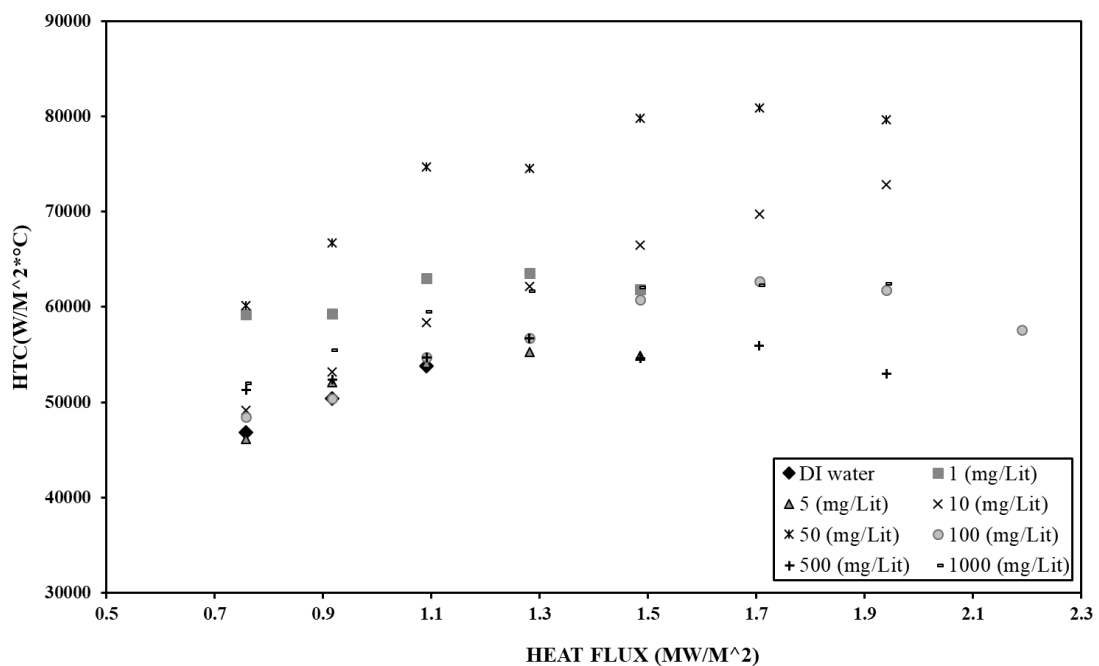
به طور کلی نتایج گزارش شده بر اساس تأثیر ذرات نانو بر ضریب انتقال حرارت متناقض بوده است.

گروهی از محققین بهبود و تعدادی کاهش ضریب انتقال حرارت را مشاهده کردند [۱].

نتایج آزمایش‌های ضریب انتقال حرارت بر روی سطح صاف صیقلی قبل از تست جوشش، در شکل

۳-۱۰ نمایش داده شده است.

با توجه به شکل ۳-۱۰ مشاهده می‌شود با افزایش مقدار شار حرارتی در اکثر موارد ضریب انتقال حرارت افزایش یافته است. و تا غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر میزان ضریب انتقال حرارت افزایش و در غلظت‌های بعدی کاهش می‌یابد. ولی در تمامی غلظت‌ها به ازای شارحرارتی ثابت ضریب انتقال حرارت جوششی نانو سیال بیشتر از سیال پایه مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۱۰ - ضریب انتقال حرارت جوششی برحسب شار حرارتی برای غلظت‌های متفاوت نانو سیال

چوپکار و همکاران [۴۷] نیز نتایج مشابه برای نانو سیال آب-دی اکسید زیرکونیم گزارش کردند. یکی از دلایل افزایش ضریب انتقال حرارت، افزایش تعداد هسته‌های فعال به دلیل افزایش زبری سطح است [۴۸]. با استفاده از نتایج AFM مشخص شد که زبری متوسط سطح با افزایش غلظت افزایش می‌یابد؛ بدین سبب موجب افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود. همچنین دلیل کاهش ضریب انتقال حرارت از غلظت ۰/۱ گرم بر لیتر، افزایش ضخامت لایه پوشش داده شده توسط نانو ذرات بر روی سطح که با تست SEM مشخص شده در نظر گرفته شد. افزایش ضخامت لایه پوشش نانو به دلیل تفاوت زیاد میزان ضریب هدایت آن نسبت به مس (ضریب هدایت حرارتی نانوذرات اکسیدمس ۱۸ و مس ۴۰۰ وات بر متر درجه سانتی‌گراد) سبب کاهش ضریب انتقال حرارت جوششی می‌شود.

۳-۵ شار حرارت بحرانی (CHF) بر روی سطح صاف مسی

در طراحی سیستم‌های انتقال حرارت جوششی ظرفیت بالا، مانند آنچه در راکتورهای هسته‌ای استفاده می‌شود، شار حرارت بحرانی عاملی محدود کننده می باشد؛ اگر شار حرارتی از مقدار شار حرارت بحرانی بیشتر شود دمای سوپرهیت سطح ناگهان تا چند صد درجه بالا رفته، که خطرناک بوده و سبب خرابی سیستم می‌شود. پس دانستن محدوده آن برای جلوگیری از خرابی سیستم، عامل حیاتی است.

۳-۶ نتایج شار حرارتی بحرانی

ابتدا به نتایج آب پرداخته و نتایج آن با فرمول‌های تجربی و راستی آزمایی مقایسه می‌شود. مقدار (CHF) آب مقدار $(0.26 \pm 0.12) \text{ MW/m}^2$ اندازه‌گیری شده است. این مقدار از پیش‌بینی زوبر [۴۹] (رابطه ۳-۴ که مقدار آن در رابطه ۳-۳ قرار می‌گیرد) 1.15 MW/m^2 برای سطح مسطح صاف بیشتر ولی از مدل کاندلیکار [۵۰] (رابطه ۳-۵ که مقدار آن در رابطه ۳-۳ قرار داده می‌شود) MW/m^2 1.29 که زاویه تماس سیال با سطح نیز در آن تأثیر دارد کمتر است.

$$\frac{q''_{\text{CHF}}}{\rho_g h_{\text{fg}} [\sigma g (\rho_f - \rho_g)]^{1/4}} = k \quad (3-3)$$

$$k = 0.131 \quad (4-3)$$

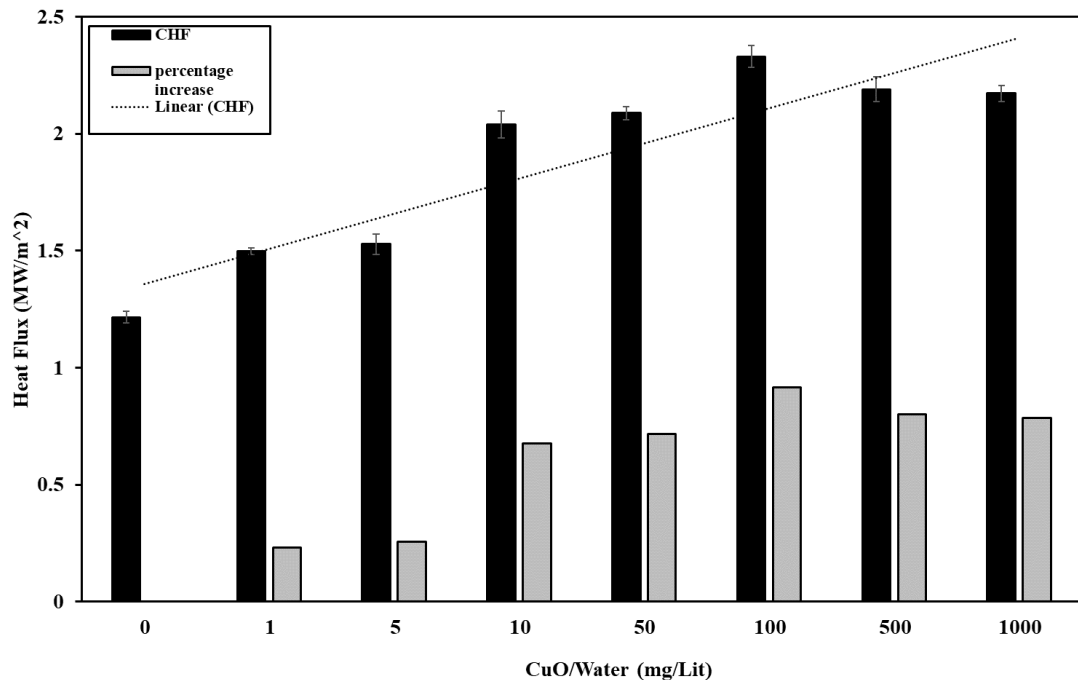
$$k = \frac{1 + \cos \alpha}{16} \left[\frac{2}{\pi} + \frac{\pi}{4} (1 + \cos \alpha) \cos \theta \right]^{1/2} \quad (5-3)$$

$$\alpha = \text{Contact angle} \quad \theta = 0-90^\circ$$

در رابطه ۳-۴ k ثابت زوبر می‌باشد. در رابطه کاندلیکار α و θ به ترتیب زاویه تماس و زاویه سطح جوش نسبت به افق می‌باشد.

مقادیر شار حرارت بحرانی برای آب و نانو سیال آب/اکسید مس از غلظت ۱ تا ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر که از آزمایش‌ها به دست آمده است در شکل ۳-۱۱ نشان داده شده است. افزایش برای تمامی غلظت‌ها مشهود است. ولی در این افزایش رابطه‌ای بین افزایش شار حرارت بحرانی و غلظت نانو سیال یافت

نشد. به صورتی که از غلظت ۱ میلی گرم در لیتر به مقدار ۲۳ درصد افزایش نسبت به سیال پایه شروع و در مقدار بهینه ۱۰۰ میلی گرم در لیتر به ۹۲ درصد رسیده و سپس کاهش یافته است.



شکل ۳-۱۱ - مقادیر شار حرارت بحرانی بر اساس مقادیر غلظت نانو سیال CuO/Water

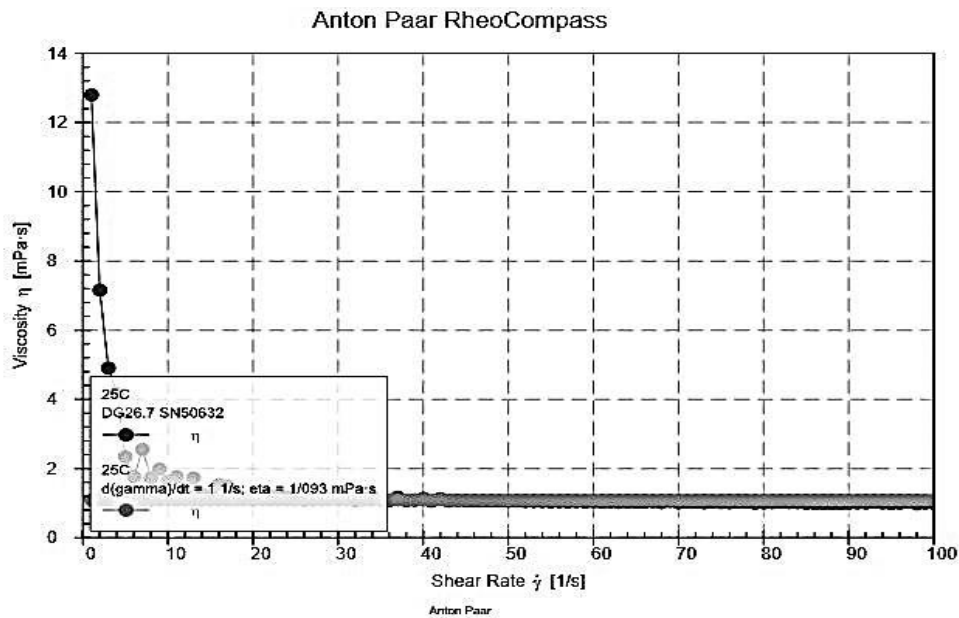
همان طور که در شکل ۳-۱۱ نشان داده شده است، داده‌های شار حرارت بحرانی نظم خاصی در افزایش ندارد ولی به یک غلظت بهینه به میزان ۰/۱ گرم بر لیتر نانو سیال CuO/Water رسیده است. تکرارپذیری در آزمایش‌های شار حرارت بحرانی ۳ بار در سه روز متفاوت انجام گردیده است. حداکثر خطای استاندارد ۰/۵٪ است که مربوط به غلظت ۰/۰۱ گرم بر لیتر می باشد و میزان قابل قبولی در آزمایشات جوشش است.

۳-۷ بررسی دلایل افزایش شار حرارت بحرانی

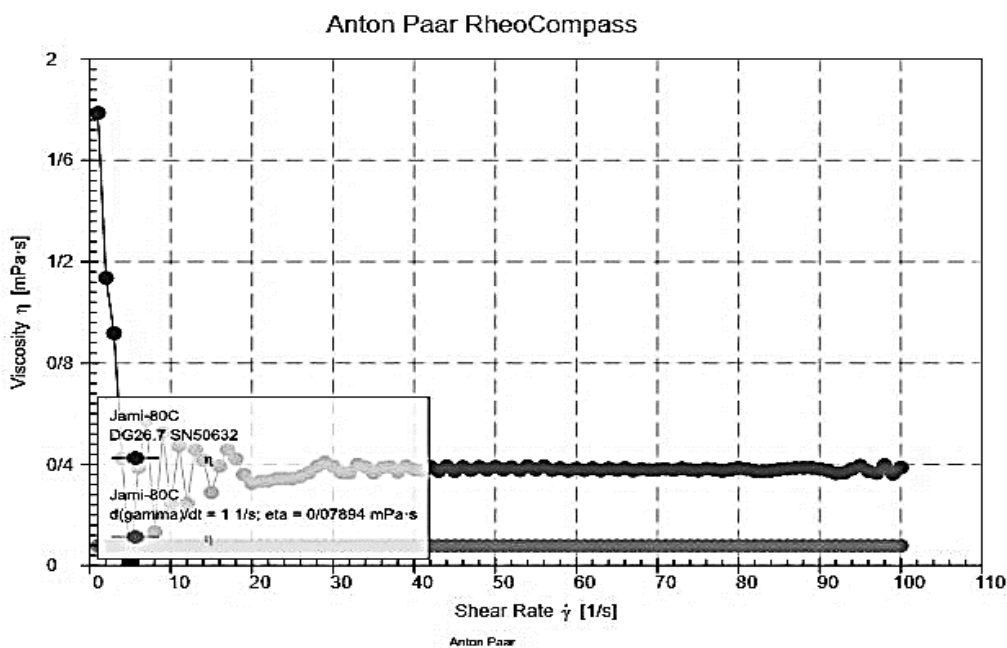
۳-۸ خواص ترموفیزیکی نانو سیال

با استفاده از دستگاه رئومتر، نانو سیال ۱۰۰۰ میلی گرم بر لیتر اکسید مس/آب را در دو دمای ۲۵ و ۸۰ درجه سانتی گراد مورد آزمایش قرار داده شده است. در شکل ۳-۱۲ و شکل ۳-۱۳ مشاهده می شود که ویسکوزیته در دمای ۲۵°C به ۱ (mPa.s) و در دمای ۸۰°C به ۰/۴ (mPa.s) همگرا شده که با

ویسکوزیته آب خالص برابر است. به علت برابری نقطه جوش اندازه گیری شده با نقطه جوش آب خالص در آن فشار، و نتایج تست ویسکوزیته در بالاترین غلظت مورد استفاده خواص ترموفیزیکی نانو سیال اکسید مس/آب بسیار نزدیک به آب مقطر است.



شکل ۳-۱۲ - نمودار ویسکوزیته نانو سیال ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر CuO/Water در دمای ۲۵°C



شکل ۳-۱۳ - نمودار ویسکوزیته نانو سیال ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر CuO/Water در دمای ۸۰°C

نایاک و همکاران [۵۱] افزایش میزان شار حرارت بحرانی نانو سیالات Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 و CuO در سیال پایه Water را مربوط به دو عامل تغییر در مشخصات ساختار سطح و یا تغییر در خواص ترموفیزیکی نانو سیال حدس زدند؛ که با انجام آزمایش‌ها و استفاده از روابط تجربی بر روی خواص ترموفیزیکی از قبیل ضریب انتقال حرارت جابجایی، ظرفیت گرمایی ویژه، چگالی و ویسکوزیته دریافتند تغییر در خواص بسیار ناچیز است که سبب افزایش زیاد در شار حرارت بحرانی می‌شود. با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده در نانو سیال CuO/Water ، تغییر اندک خواص ترموفیزیکی نانوسیال نمی‌تواند دلیل تغییر زیاد ایجاد شده در شار حرارت بحرانی و ضریب انتقال شود. در ادامه تأثیر تغییر در مورفولوژی سطح توسط پوشش نانو ذرات و تأثیر آن بر شار حرارت بحرانی و ضریب انتقال حرارت بررسی می‌شود.

۳-۹ مشخصات سطح

۳-۹-۱ پروفیل سه بعدی نمونه اسکن شده توسط AFM

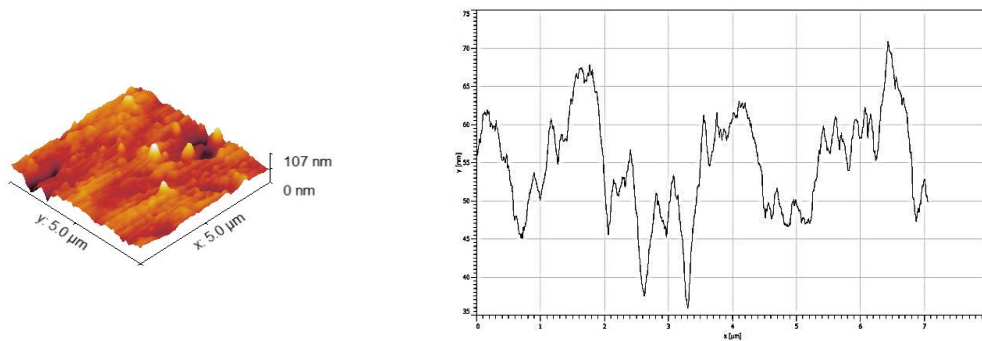
تست AFM بر روی سطح در مقطع 5×5 میکرومتر گرفته شده و سپس با نرم‌افزار JPKSPM Data Processing داده‌ها پردازش و در نهایت با Gwyddion پروفیل دو و سه بعدی سطح رسم گردیده است.



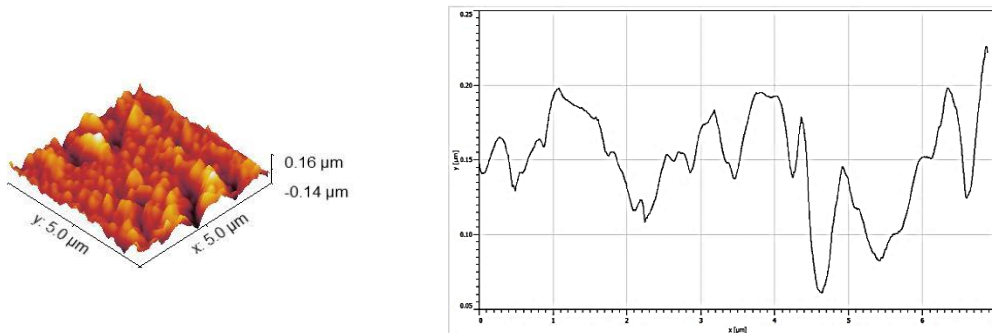
شکل ۳-۱۴- تصویر سطح نمونه خام مسی صیقلی قبل از تست

با بررسی شکل ۲-۱ و شکل ۳-۱۵ و مقایسه اندازه نانوذرات با زبری میانگین سطح، تغییر زیاد مورفولوژی سطح بعد از جوشش نانوسیال به دلیل بزرگ‌تر بودن سایز نانوذرات رسوب کرده بر سطح

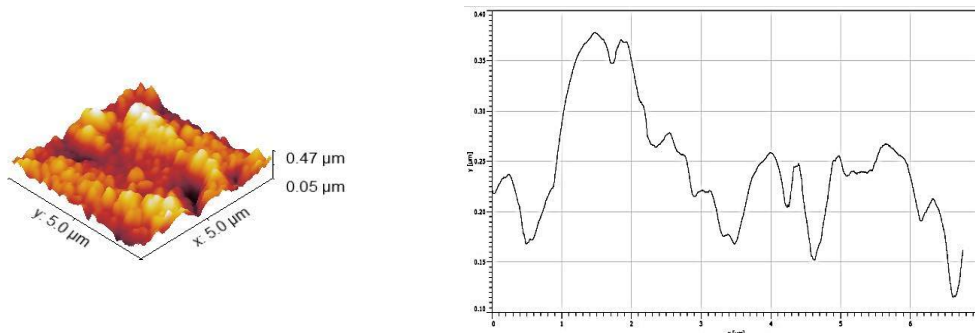
جوشش نسبت به زبری متوسط سطح صیقلی مسی قبل از تست می‌باشد. افزایش غلظت نانوسیال در تست‌ها، رابطه مستقیمی با زبری سطح نمونه نشان می‌دهد. هرچه میزان R_a بیشتر باشد، میزان کانون‌های فعال هسته زا و در نتیجه انتقال حرارت جوششی نیز بیشتر خواهد شد. داده‌های شکل ۳-۲۳ و نیز پروفیل‌های سه بعدی سطح (شکل ۳-۱۵ تا شکل ۳-۲۲)، نشان دهنده افزایش زبری تا غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر و سپس کاهش در غلظت ماکزیمم است.



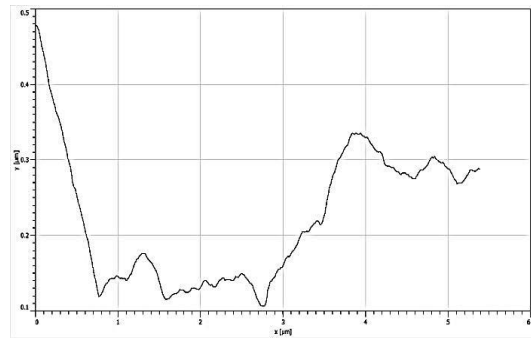
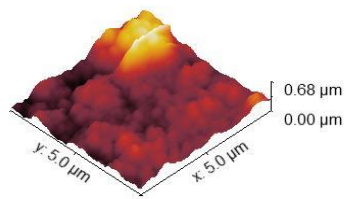
شکل ۳-۱۵ - پروفیل دو و سه بعدی سطح نمونه خام مسی صیقلی قبل از تست جوشش با زبری میانگین سطح $R_a=7/5$ نانومتر



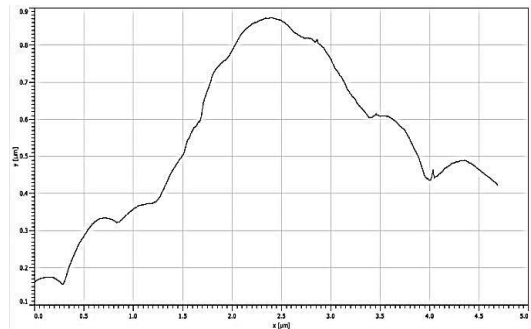
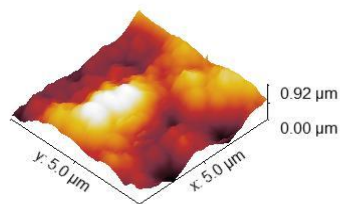
شکل ۳-۱۶ - پروفیل دو و سه بعدی سطح نمونه مسی بعد از تست جوشش نانو سیال $CuO/Water$ ۱ میلی‌گرم در لیتر با زبری میانگین سطح $R_a=28/7$ نانومتر



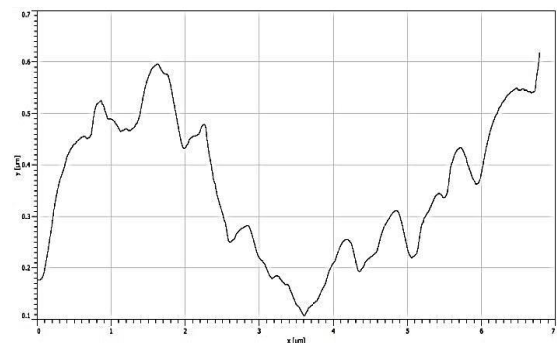
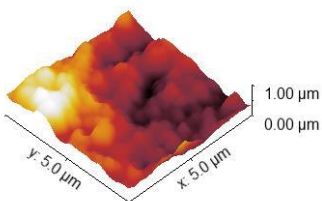
شکل ۳-۱۷ - پروفیل دو و سه بعدی سطح نمونه مسی بعد از تست جوشش نانو سیال $CuO/Water$ ۵ میلی‌گرم در لیتر با زبری میانگین سطح $R_a=53/6$ نانومتر



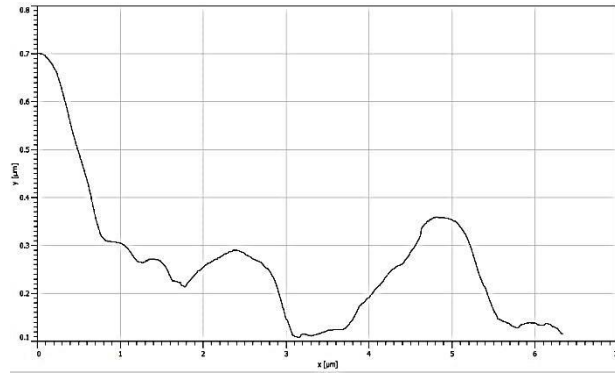
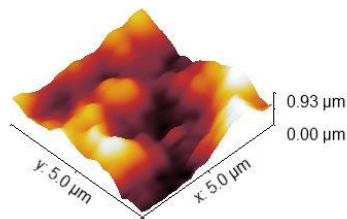
شکل ۳-۱۸- پروفیل دو و سه بعدی سطح نمونه مسی بعد از تست جوشش نانو سیال CuO/Water ۱۰ میلی گرم در لیتر با زبری میانگین سطح $Ra=77/1$ نانومتر



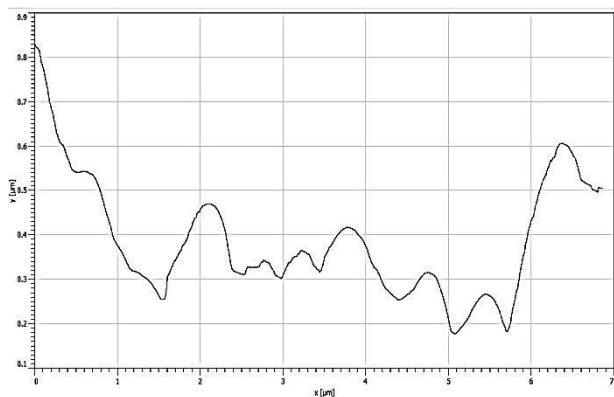
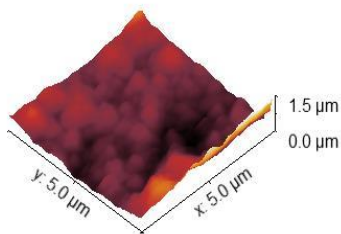
شکل ۳-۱۹- پروفیل دو و سه بعدی سطح نمونه مسی بعد از تست جوشش نانو سیال CuO/Water ۵۰ میلی گرم در لیتر با زبری میانگین سطح $Ra=147/1$ نانومتر



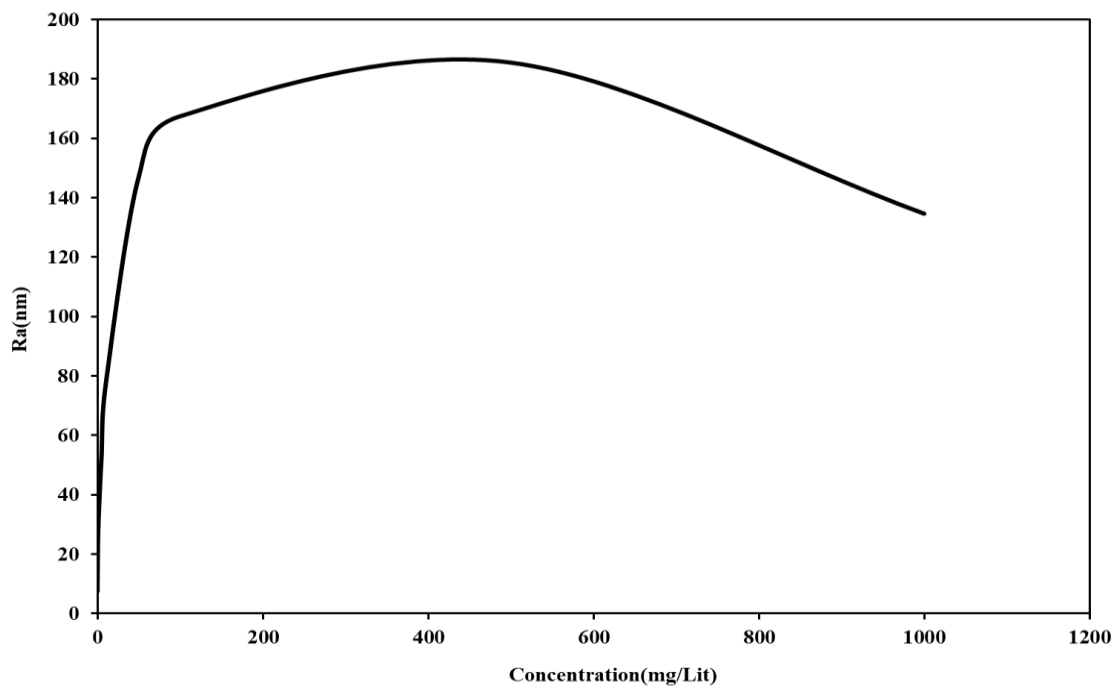
شکل ۳-۲۰- پروفیل دو و سه بعدی سطح نمونه مسی بعد از تست جوشش نانو سیال CuO/Water ۱۰۰ میلی گرم در لیتر با زبری میانگین سطح $Ra=167/5$ نانومتر



شکل ۳-۲۱- پروفیل دو و سه بعدی سطح نمونه مسی بعد از تست جوشش نانو سیال CuO/Water ۵۰۰ میلی گرم در لیتر با زبری میانگین سطح $Ra=185/6$ نانومتر



شکل ۳-۲۲- پروفیل دو و سه بعدی سطح نمونه مسی بعد از تست جوشش نانو سیال CuO/Water ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر با زبری میانگین سطح $Ra=134/7$ نانومتر



شکل ۳-۲۳- نمودار میزان زبری متوسط سطح Ra بر اساس غلظت‌های مختلف نانو سیال CuO/Water

۳-۹-۲ نتایج تست زاویه تماس

تست زاویه تماس آب روی نمونه‌های تست جوشش نانو سیال CuO/Water با استفاده دستگاه تعیین زاویه تماس ساخت شرکت Fars EOR Tech ایران، گرفته شده است. این دستگاه با استفاده از پمپ سرنگی، قطره‌ای بر روی سطح گذاشته و پس از پایداری قطره بر روی سطح با استفاده از نرم‌افزار پردازش تصویر، عکس‌های گرفته شده از دوربین را پردازش و دو زاویه تماس چپ و راست و میزان میانگین آن را نمایش می‌دهد.

شکل ۳-۲۴ و شکل ۳-۲۵ به ترتیب نشان دهنده زاویه تماس قطره آب بر روی سطح مسی صیقلی و سطح مسی بعد از تست جوشش با غلظت‌های متفاوت می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود سطح آب‌دوست مسی پس از تست جوشش نانوسیال اکسید مس / آب با نشست ذرات نانوذرات اکسید مس به سطح آب گریز تبدیل شده است.

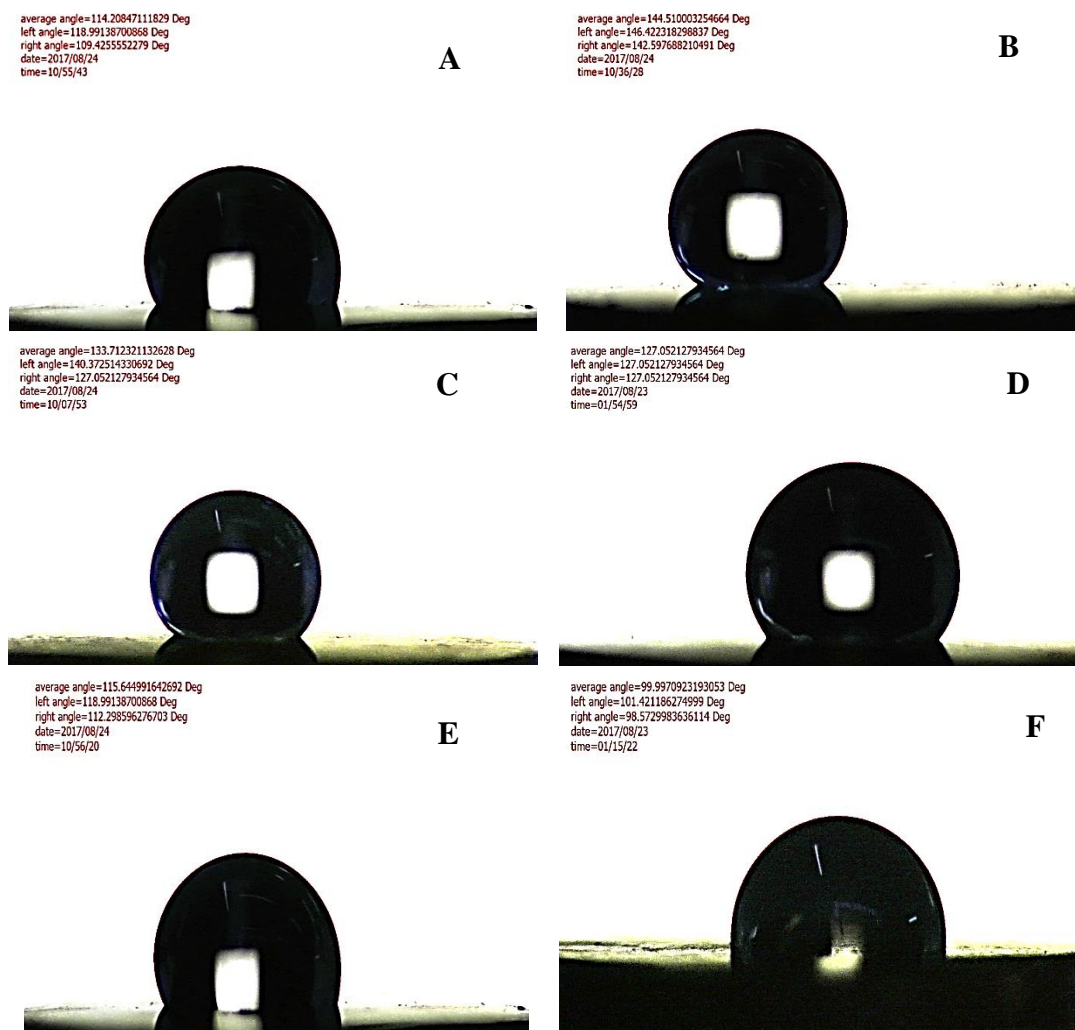
average angle=61.961644997005 Deg
left angle=65.5879116120225 Deg
right angle=58.3353783819875 Deg
date=2017/08/23
time=02/17/54



شکل ۳-۲۴- تصویر زاویه آب مقطر با سطح نمونه خام مسی صیقلی قبل از تست جوشش

شکل ۳-۲۵ نشان دهنده زاویه تماس بر روی سطوح پس جوشش نانوسیال اکسید مس / آب به ترتیب

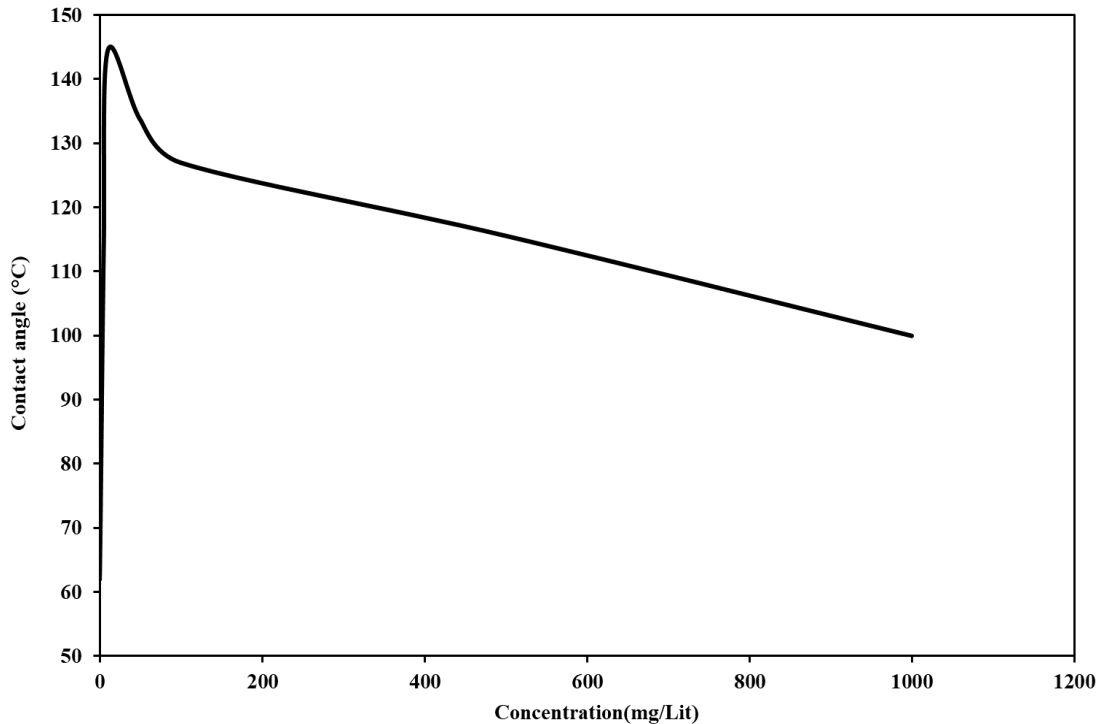
با غلظت‌های ۵ میلی‌گرم در لیتر (A)، ۱۰ میلی‌گرم در لیتر (B)، ۵۰ میلی‌گرم در لیتر (C)، ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر (D)، ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر (E)، ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر (F) نشان داده شده است.



شکل ۳-۲۵- نمایش زاویه آب مقطر با سطح نمونه‌های تست بعد جوشش نانو سیال CuO/Water

با توجه به شکل ۳-۲۶، نمونه خام مسی از آب‌دوستی بالایی برخوردار است ولی پوشش نانو پودر CuO ایجاد شده بر روی سطح در اثر جوشش، علاوه بر تغییر در ساختار سطح، تقریباً در تمامی غلظت‌ها باعث می‌شود سطح آب‌گریز شود. بیشترین میزان آب‌گریزی مربوط به غلظت ۱۰ میلی‌گرم

در لیتر بوده و پس از این غلظت، زاویه تماس تقریباً با افزایش غلظت به دلیل افزایش زبری سطح کاهش یافته است.

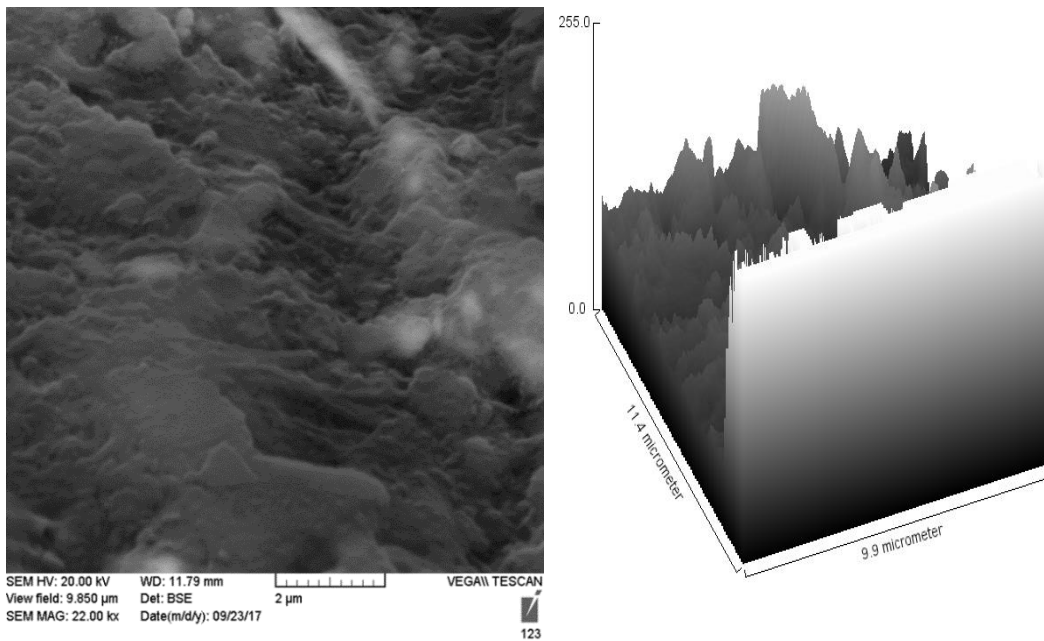


شکل ۳-۲۶ - تغییرات زاویه تماس نمونه‌ها بعد از جوشش نانو سیال با غلظت‌های مختلف

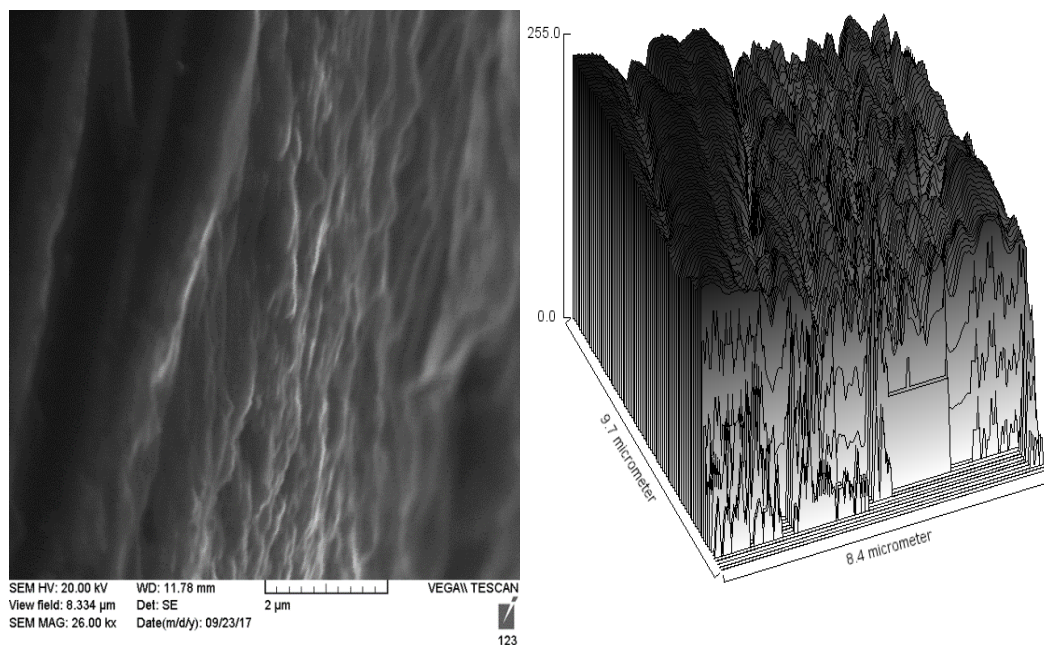
۳-۹-۳ نتایج تست (SEM)

با مقایسه شکل ۳-۲۷ تا شکل ۳-۳۲ مربوط به ساختار سطح و مدل سه بعدی شبیه‌سازی سطح، مشاهده می‌شود که میزان پستی بلندی و حفرات با افزایش غلظت افزایش پیدا کرده و فقط در غلظت حداکثری (۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر) روند تغییر شکل عوض شده و ساختار متراکم و مسطح‌تر مشاهده می‌شود.

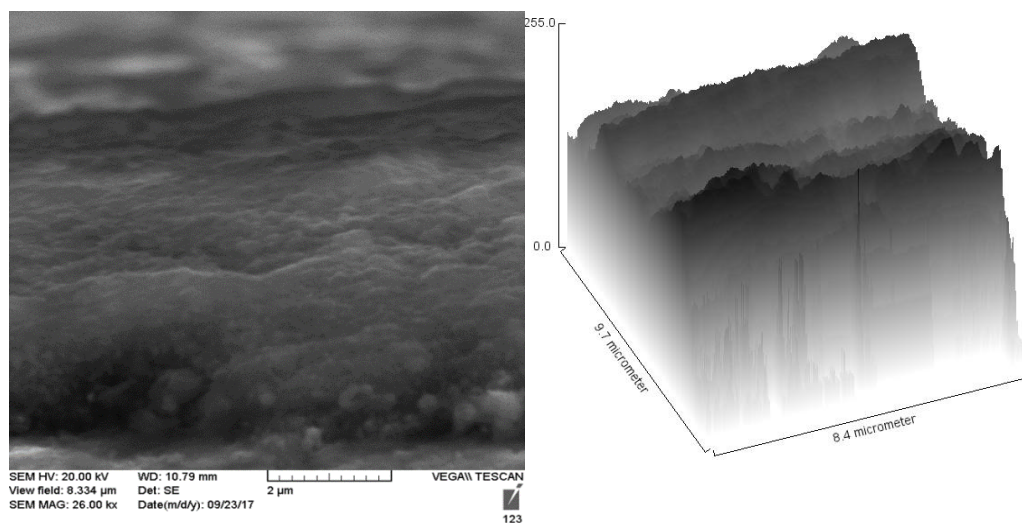
به دلیل پایین بودن ضریب انتقال حرارت هدایتی نانو ذرات CuO نسبت به سطح مسی (حدود ۰/۰۴) هرچه ضخامت بیشتر شود، انتقال حرارت جوششی کمتر شده، دمای سطح بالاتر رفته و در نتیجه شار حرارت بحرانی زودتر اتفاق خواهد افتاد.



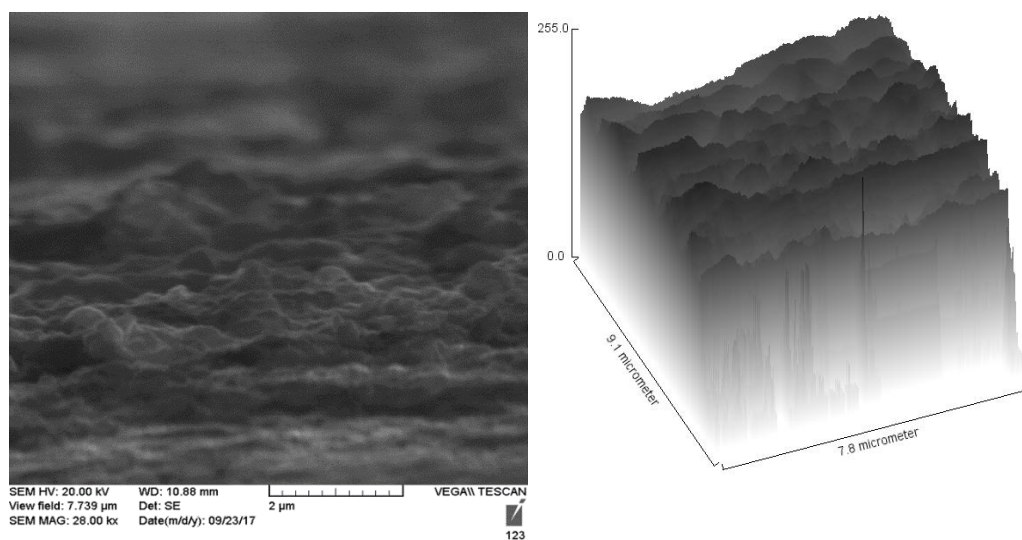
شکل ۳-۲۷ - ساختار نمونه (تصویر SEM) و سه بعدی شبیه سازی شده سطح نمونه مسی بعد از تست جوشش نانو سیال ۵ میلی گرم در لیتر CuO/Water با بزرگنمایی ۲۲۰۰۰



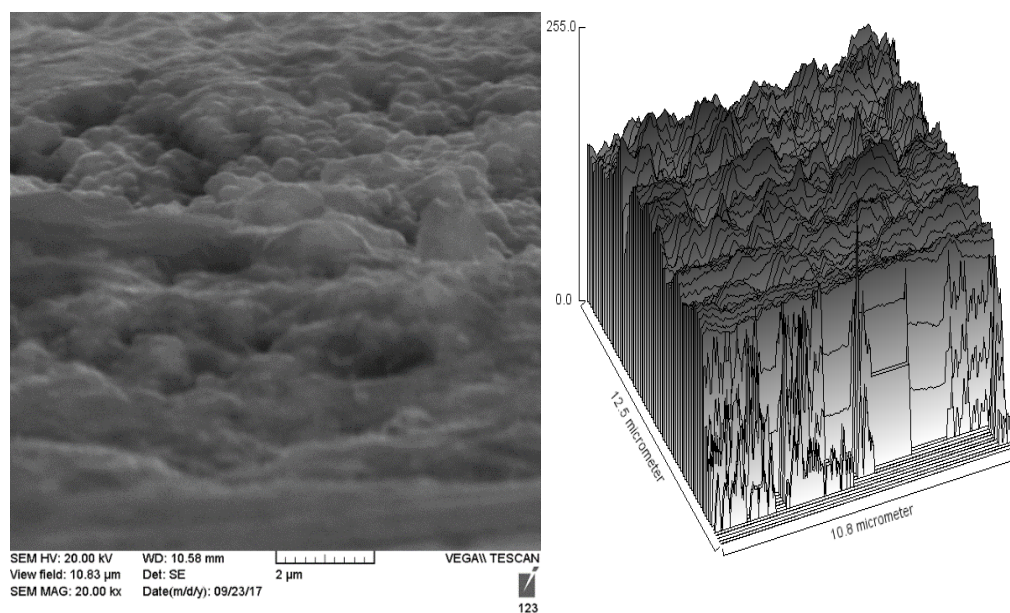
شکل ۳-۲۸ - ساختار نمونه (تصویر SEM) و سه بعدی شبیه سازی شده سطح نمونه مسی بعد از تست جوشش نانو سیال ۱۰ میلی گرم در لیتر CuO/Water با بزرگنمایی ۲۶۰۰۰



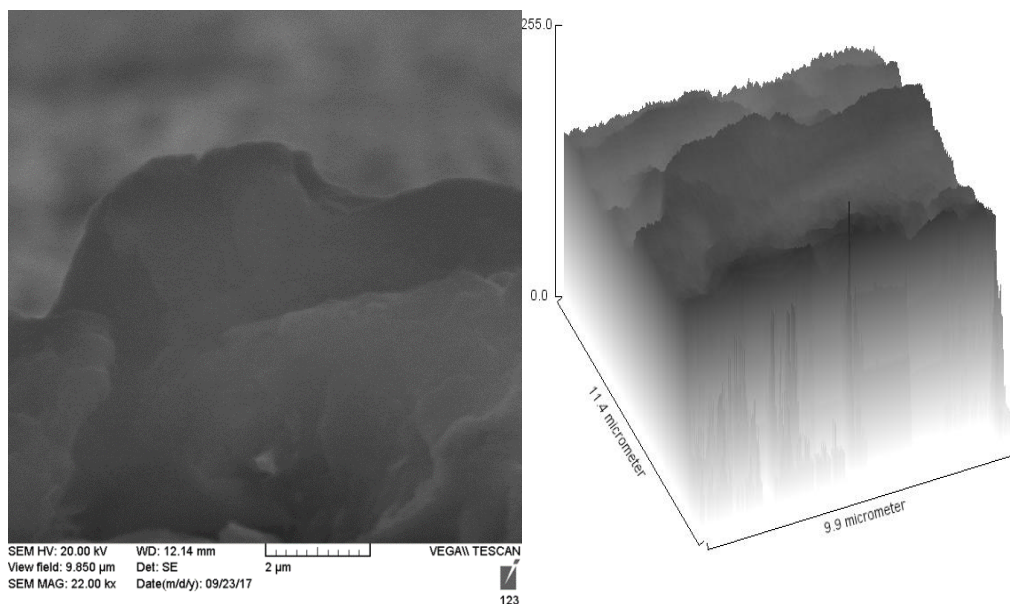
شکل ۳-۲۹ - ساختار نمونه (تصویر SEM) و سه بعدی شبیه‌سازی شده سطح نمونه مسی بعد از تست جوشش نانو سیال ۵۰ میلی‌گرم در لیتر CuO/Water با بزرگنمایی ۲۶۰۰۰



شکل ۳-۳۰ - ساختار نمونه (تصویر SEM) و سه بعدی شبیه‌سازی شده سطح نمونه مسی بعد از تست جوشش نانو سیال ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر CuO/Water با بزرگنمایی ۲۸۰۰۰

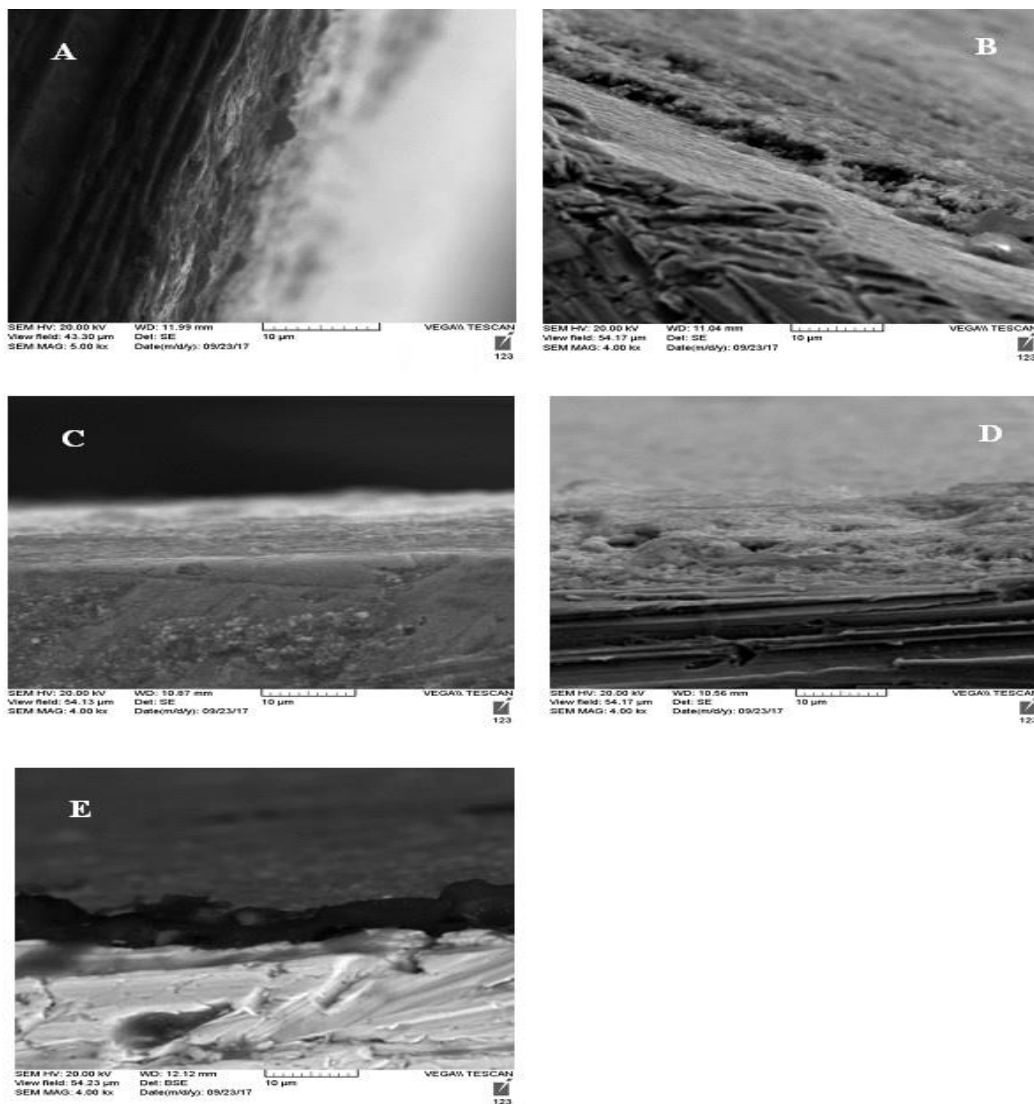


شکل ۳-۳۱ - ساختار نمونه (تصویر SEM) و سه بعدی شبیه‌سازی شده سطح نمونه مسی بعد از تست جوشش نانو سیال ۵۰۰ میلی گرم در لیتر CuO/Water با بزرگنمایی ۲۰۰۰۰



شکل ۳-۳۲ - ساختار نمونه (تصویر SEM) و سه بعدی شبیه‌سازی شده سطح نمونه مسی بعد از تست جوشش نانو سیال ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر CuO/Water با بزرگنمایی ۲۲۰۰۰

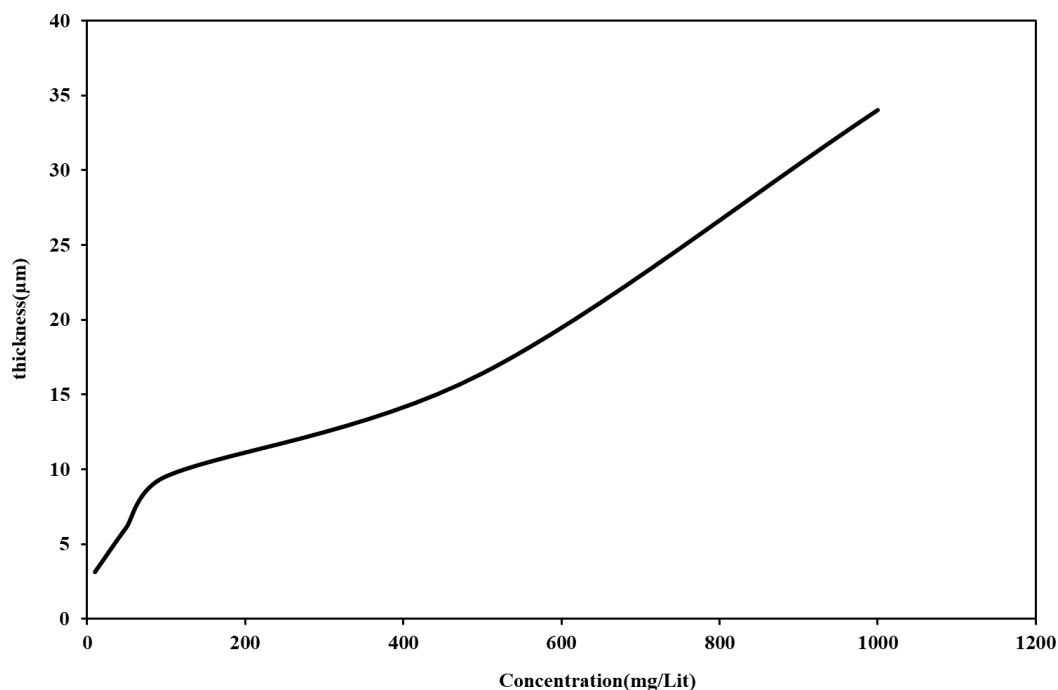
در شکل ۳-۳۳ میزان ضخامت پوشش نانو ذرات CuO بعد از تست جوشش بر اساس تصاویر SEM به ترتیب غلظت ۱۰ میلی گرم در لیتر (A)، ۵۰ میلی گرم در لیتر (B)، ۱۰۰ میلی گرم در لیتر (C)، ۵۰۰ میلی گرم در لیتر (D) و غلظت ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر (E) نشان داده شده است.



شکل ۳-۳۳ - اندازه ضخامت پوشش نانو ذرات CuO بعد از تست جوشش نانو سیال CuO/Water بر اساس تصاویر SEM

شکل ۳-۳۴ نشان دهنده نمودار مقدار ضخامت پوشش نانو ذرات بر روی نمونه‌هایی که در تست CHF با غلظت‌های مختلف استفاده شدند، می‌باشد، افزایش ضخامت پوشش را بر اساس افزایش غلظت نشان می‌دهد. حداکثر ضخامت مربوط به غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر با مقدار ۷/۸۷ میکرومتر است.

به طور کلی بر اساس مطالعات صورت گرفته، عملکرد جوشش نانو سیالات با غلظت پایین (< 1 گرم در لیتر) تحت تأثیر دو عامل ضخامت پوشش و ساختار آن (زبری و آبدوستی) قرار دارد. از آنجا که این پوشش به طور عمده از عوامل شار حرارتی، مدت زمان جوشش و نیز میزان غلظت نانو ذرات تأثیر می‌پذیرد، تأثیر این عوامل در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

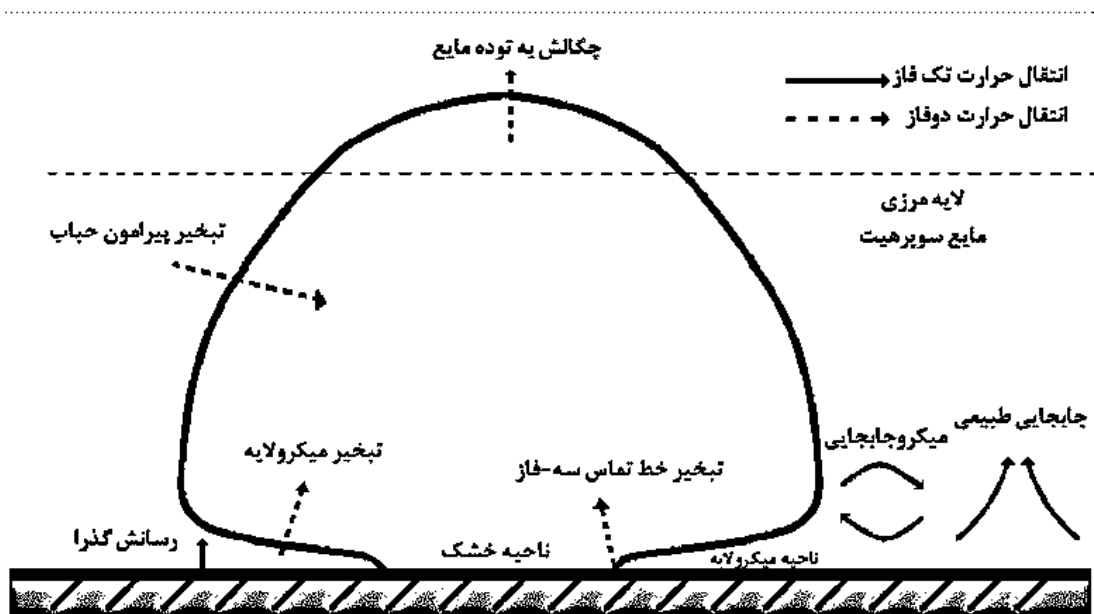


شکل ۳-۳۴ - نمودار تغییرات ضخامت پوشش نانو ذرات CuO بر روی سطح نمونه بعد از تست جوشش در غلظت نانو سیال

۳-۱۰ میکرو لایه

در طی فرآیند جوشش روی سطح حرارتی و در محل اتصال حباب به سطح (نقطه سه‌گانه جامد-مایع-گاز)، یک لایه نازک از مایع که با عنوان لایه میکرو شناخته می‌شود، بوجود می‌آید و در طی

مراحل رشد حباب فیلم نازکی از مایع در زیر حباب تشکیل می‌گردد. ضخامت این لایه در بیشترین مقدار خود یعنی در زیر حباب از مرتبه میکرومتر و در کمترین مقدار خود یعنی نقطه سه‌گانه به اندازه قطر چند مولکول مایع می‌باشد. به دلیل ضخامت بسیار کم این لایه، شدت انتقال حرارت در این ناحیه بسیار بالا است. با تبخیر مایع موجود در میکرو لایه، به دلیل نیروهای چسبندگی و کشش سطحی، مایع جدید جایگزین می‌گردد و فیلم مایع تا انتهای مراحل رشد حباب باقی می‌ماند. مطالعات تجربی انجام شده توسط کیم و جانگ و نیز یوبوکی و ناکاپو بر روی جوشش حبابی نشان می‌دهد که توزیع انتقال حرارت در دیوار شدیداً به لایه میکرو و موقعیت سطح مشترک مایع-بخار وابسته بوده و شدت انتقال حرارت به سیال زیاد است. سهم لایه میکرو از کل انتقال حرارت به سیال تا زمان رشد کامل حباب، بین ۱۷٪ تا ۵۰٪ است [۵۲-۱۳].

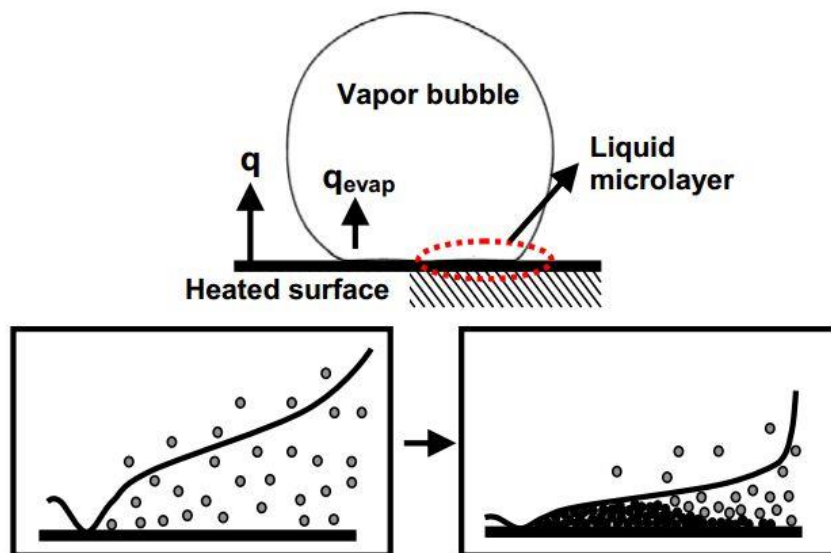


شکل ۳-۳۵ - نواحی و مکانیزم‌های انتقال حرارت در حباب بخار

۳-۱۱ فرآیند تشکیل لایه رسوب نانو ذرات در جوشش نانو سیال

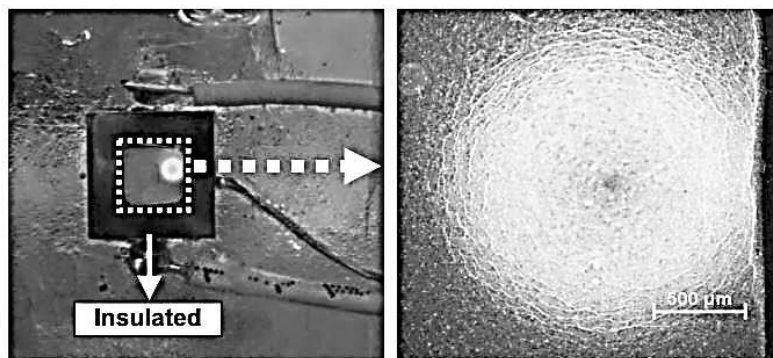
عامل رسوب نانو ذرات در فرآیند جوشش بر اساس آزمایشات صورت گرفته توسط بسیاری از محققین مکانیسم مشخصی گزارش شده است. کیم و همکاران [۵۳] تئوری ارائه دادند که بر اساس آن نانو پوشش به وجود آمده در طی فرآیند جوشش به واسطه میکرو لایه خشک شده در حباب بخار به وجود می‌آید. با رشد حباب بخار نانو سیال، در میکرو لایه تشکیل شده در زیر آن محبوس شده و با تبخیر

سیال میکرو لایه چگالی نانو سیال و غلظت نانو ذرات آن ناحیه افزایش می یابد. با جدا شدن حباب و خشک شدن محل جدایش، نانو ذرات موجود در نانو سیال به سطح جوشش می چسبند که در شکل ۳-۳۶ نشان داده شده است.



شکل ۳-۳۶ - مکانیسم تشکیل لایه رسوب نانو ذرات در فرایند جوشش نانو سیالات [۵۱]

کوارک و همکاران [۵۴] این نظریه را به صورت تجربی مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها آزمایشی از جوشش نانو سیال اکسید آلومینیوم در غلظت ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر بر روی هیتر مسی انجام دادند. شار گرمایی را به آرامی تا وقتی اولین حباب تشکیل شود افزایش دادند و ۲ دقیقه سیستم را برای رسیدن به حالت پایدار نگه داشتند. سپس شار حرارتی قطع و پس از خارج کردن هیتر از دستگاه آزمایش، لایه رسوب نانو ذرات دایره‌ای شکل را فقط در محل هسته‌های فعال جوشش مشاهده کردند.



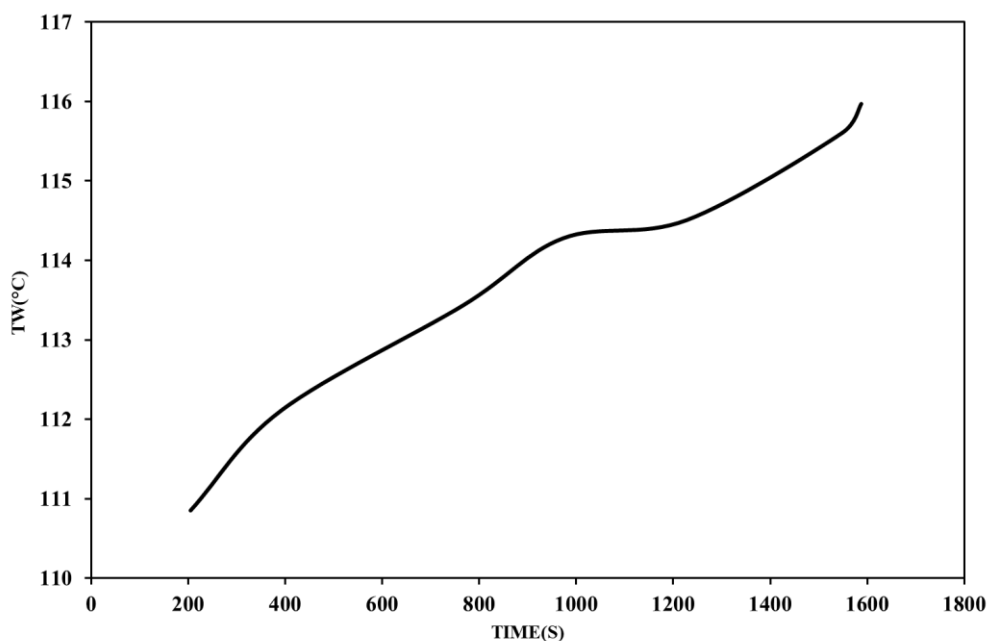
شکل ۳-۳۷ - تصویر نانو پوشش تشکیل شده در محل هسته فعال تشکیل حباب [۵۲]

۳-۱۲ نتایج تست‌های CHF نانو سیال CuO/Water

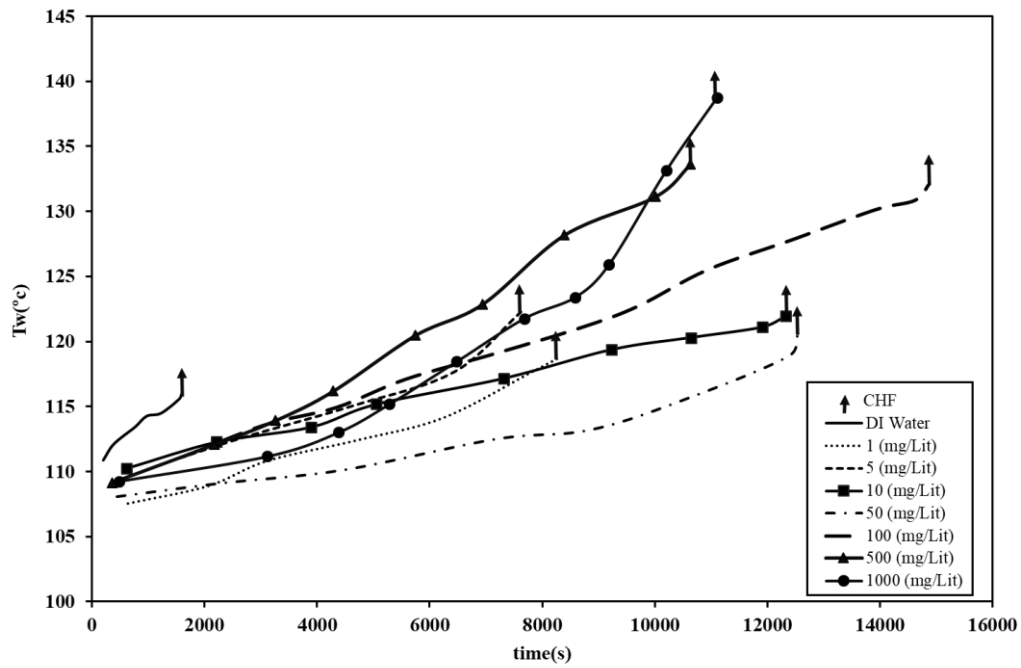
برای بررسی مدت زمان تست و میزان شار حرارتی بر روی میزان CHF و لایه رسوب و نیز مقایسه تغییرات آن نسبت به سیال پایه آب نمودارهای میزان سوپرهیت و تغییرات دمای سطح برحسب زمان برای تمامی غلظت‌ها رسم شده است.

در شکل ۳-۳۸ نمودار تغییرات دمای سطح جوشش در طول زمان آزمایش برای آب خالص رسم شده است.

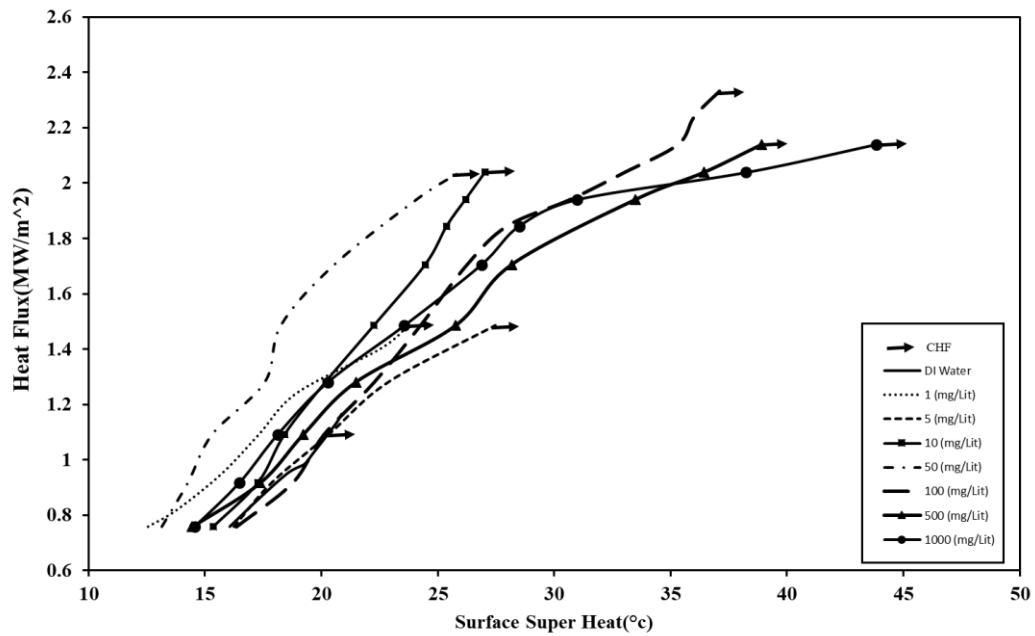
با مشاهده شکل ۳-۳۹ و شکل ۳-۴۰، دریافت می‌شود، دمای سطح، مدت زمان تست جوشش و دمای نهایی تا رسیدن به حالت شار حرارت بحرانی، با افزایش غلظت نانو ذرات افزایش یافته است. بیشترین دمای سطح، مربوط به غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر است و با توجه به شکل ۳-۳۴ که بیشترین ضخامت نانو پوشش را مربوط به این غلظت نشان می‌دهد، در شار حرارتی یکسان هر چه ضخامت پوشش بیشتر شود، ضریب انتقال کاهش و دمای سطح افزایش می‌یابد. دلیل ماکزیمم بودن دمای سطح در غلظت بیشینه می‌باشد.



شکل ۳-۳۸ - نمودار دمای سطح برحسب زمان DI Water



شکل ۳-۳۹ - نمودار دمای سطح برحسب زمان برای تست جوشش آب و نانو سیال CuO/Water در غلظت‌های مختلف



شکل ۳-۴۰ - نمودار میزان سوپرهیت سطح تست جوشش آب و نانو سیال CuO/Water در غلظت‌های مختلف

۳-۱۳ نتیجه گیری

با مشاهده نمودار شار حرارتی برحسب دمای سوپرهیت سطح شکل ۳-۴۰ میزان شار حرارتی انتقالی به سیال و افزایش دمای سطح که ناشی از افزایش شار حرارتی می‌باشد، تا غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر با افزایش غلظت افزایش یافته است. شار حرارتی انتقالی به سیال (ظرفیت سیال برای انتقال شار حرارتی ماکزیمم) تا غلظت بهینه ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر، افزایش نشان داده و همچنین دما در یک شار ثابت در غلظت‌های بالاتر - بیشینه آن مربوط به غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر مربوط به افزایش ضخامت پوشش با افزایش غلظت است - افزایش یافته است.

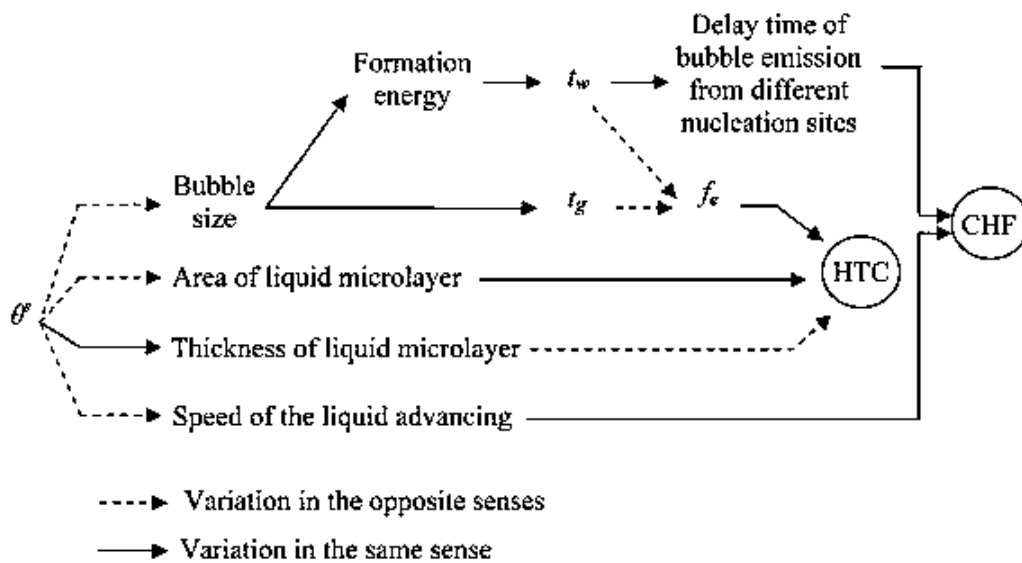
با توجه به نمودار دمای سطح برحسب زمان شکل ۳-۳۹، شار حرارتی برحسب سوپرهیت سطح شکل ۳-۴۰ مشاهده می‌شود که زمان تست و میزان شار حرارتی با غلظت، رابطه مستقیم نشان داده است؛ با افزایش غلظت، زمان تست و شار حرارت بحرانی افزایش یافته است.

افزایش زبری سطح R_a سبب افزایش تعداد هسته‌های فعال جوشش در نتیجه سبب افزایش انتقال حرارت خواهد شد. با توجه به داده‌های AFM زبری سطح در غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر بیشترین میزان را دارد ولی به علت تأثیر مخرب ضخامت نانو ذرات چسبیده به سطح بر انتقال حرارت، افزایش انتقال حرارت ناشی از R_a 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 تست‌های CHF، ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر است که دارای بیشترین میزان شار حرارت بحرانی می‌باشد.

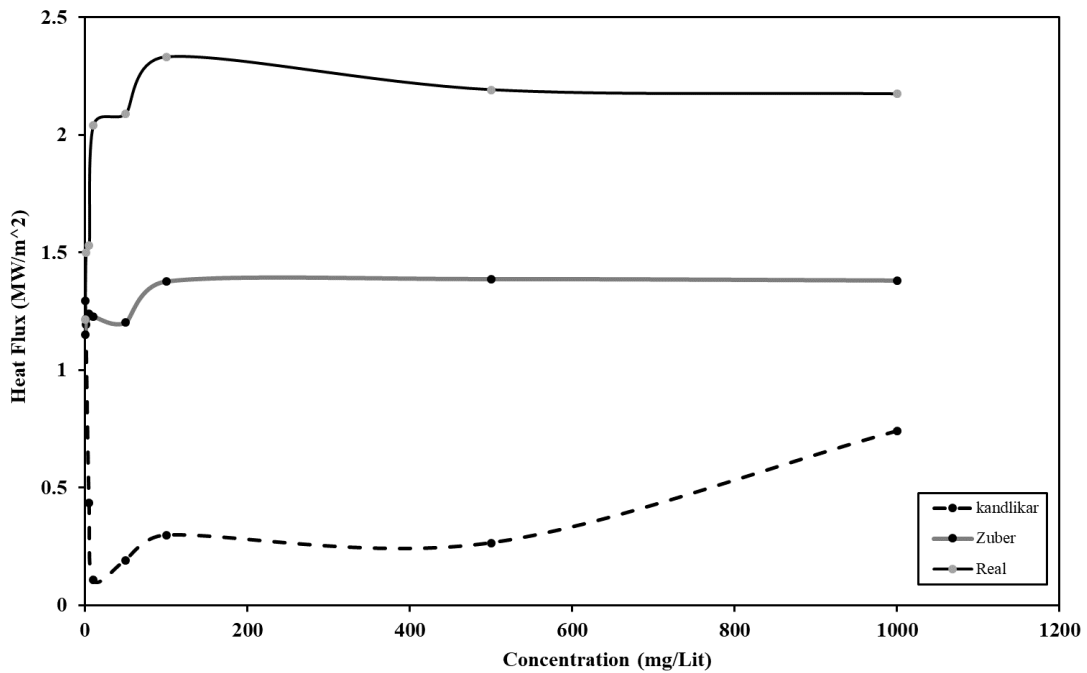
به صورت کلی مطالعه تأثیر شرایط سطح بر شار حرارت بحرانی، مستلزم در نظر گرفتن اثر زبری سطح و زاویه تماس به طور همزمان می‌باشد. البته که اثر آن‌ها بر ضریب انتقال حرارت برعکس یکدیگر است، به طوری که در اکثر گزارش‌ها افزایش زاویه تماس یا آب‌گریزی سبب افزایش در میزان ضریب انتقال حرارت شده است، به همین علت رابطه کلی برای پیش‌بینی اثر زاویه تماس بر ضریب

انتقال حرارت به دست آورده نشده است. پان و همکاران [۱۲] در شکل ۳-۴۱ تأثیر زاویه تماس از طریق پارامترهایی گوناگون دینامیک حباب روی شار حرارت بحرانی و ضریب انتقال حرارت به شکل فلش‌های هم‌جهت و خلاف جهت نشان داده است. در این شکل‌شکل ۳-۴۱ مشاهده می‌شود که کاهش زاویه تماس باعث کاهش ضخامت و افزایش مساحت میکرو لایه زیر حباب، افزایش اندازه و کاهش فرکانس جدایش حباب و افزایش پیشروی مایع می‌شود که افزایش شار حرارتی بحرانی و کاهش ضریب انتقال حرارت جوشی را به دنبال دارد.



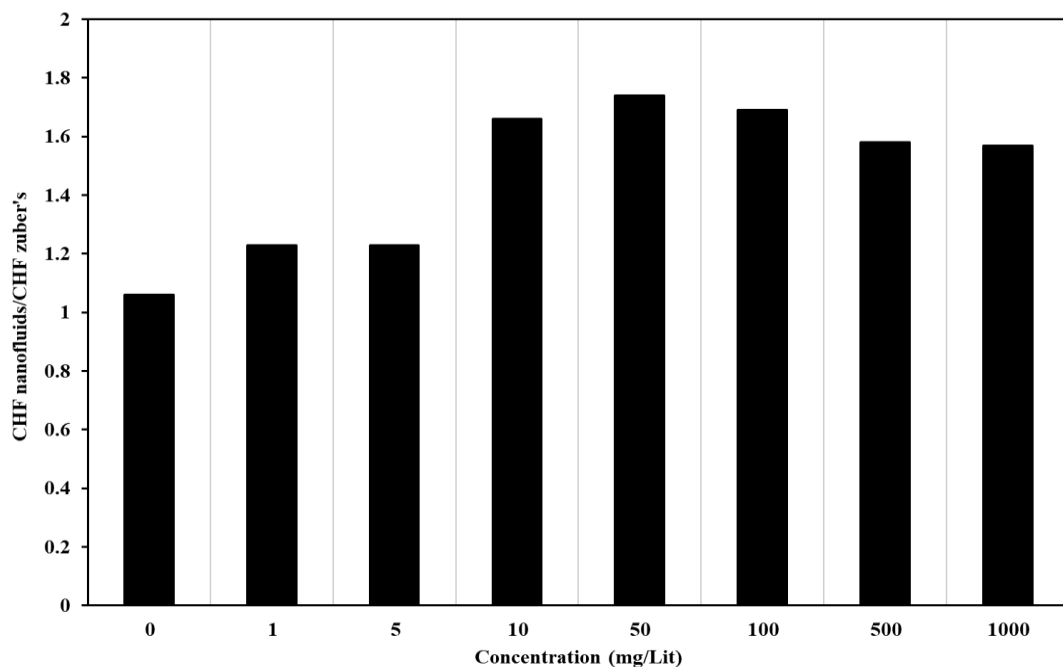
شکل ۳-۴۱ - تأثیر زاویه تماس روی پارامترهای جوش هسته‌ای [۱۱]

فرمول‌های تجربی زیادی برای پیش‌بینی شار حرارت بحرانی برای مایعات خالص بر اساس مشخصات سطح جوشش گزارش شده است؛ ولی به دلیل دخیل بودن عوامل بسیار زیاد در جوشش نانو سیالات تاکنون فرمول تجربی که بتواند شار حرارت بحرانی نانو سیالات را پیش‌بینی کند، ارائه نشده است. برای راستی آزمایی شار حرارتی بحرانی از دو فرمول تجربی زوبر و کاندلیکار که با دقت بالا با شار حرارت بحرانی سیال پایه مطابقت داشتند استفاده شد. ولی همان‌طور که شکل ۳-۴۲ مشاهده می‌شود هیچ تطابقی با شار حرارتی بحرانی نانو سیالات ندارند.



شکل ۳-۴۲- نمودار مقایسه میزان CHF با دو فرمول تجربی زوبر و کاندلیکار

با توجه به شکل ۳-۴۲، از دو رابطه تجربی زوبر و کاندلیکار، به دلیل آب‌گریز شدن سطح و تأثیر زاویه تماس در رابطه کاندلیکار، رابطه تجربی زوبر تطابق بیشتری با داده‌های آزمایشگاهی این پژوهش دارد.



شکل ۳-۴۳- نمودار افزایش CHF، به‌عنوان نسبت میزان CHF نانو سیال به اندازه CHF پیش‌بینی شده توسط زوبر برای آب در دمای شار حرارت بحرانی هر نانو سیال

بر اساس شکل ۳-۴۳، مقدار افزایش CHF بر اساس فرمول تجربی زوبر برای تمامی غلظت‌ها یکسان نبوده و ترتیب خاصی نیز مشاهده نشد.

۳-۱۴ تحلیل خطا و عدم قطعیت

به دلیل داشتن احتمال خطا در اندازه‌گیری‌ها و از آنجا که داده‌های این پژوهش، حاصل آزمایش و استفاده از دستگاه‌های آزمایشگاهی با دقت متفاوت می‌باشد، بنابراین خطای اندازه‌گیری در نتایج آزمایش بر مبنای هریک از پارامترهای اندازه‌گیری شده محاسبه شده است.

مطابق نظریه انتشار خطا بر اساس سری تیلور برای به دست آوردن عدم قطعیت حاصل نتایج آزمایشگاهی با درصد ۹۵٪ از رابطه زیر استفاده می‌شود [۵۵].

$$U_{95} = \left[\sum_{i=1}^j \left(\frac{\partial r}{\partial X_i} \right)^2 U_i^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

که با جایگذاری در معادلات زیر می‌توان عدم قطعیت برای شار حرارتی، ضریب انتقال حرارت و اختلاف دمای اشباع را به دست آورد.

$$q'' = \frac{V^2}{R(\pi r^2)}$$

$$\frac{U_{q''}}{q''} = \sqrt{\left(\frac{2U_V}{V} \right)^2 + \left(\frac{U_R}{R} \right)^2 + \left(\frac{2U_r}{r} \right)^2}$$

$$h = \frac{q''}{\Delta T_s}$$

$$\frac{U_h}{h} = \sqrt{\left(\frac{U_{q''}}{q''} \right)^2 + \left(\frac{U_{\Delta T_s}}{\Delta T_s} \right)^2}$$

$$\Delta T_s = T_w - T_{sat}$$

$$T_w = T_1 - \frac{q'' d_1}{K}$$

$$\frac{U_{\Delta T_s}}{\Delta T_s} = \sqrt{\left(\frac{U_{T_1} - T_{sat}}{T_1 - T_{sat}} \right)^2 + \left(\frac{U_{d_1}}{d_1} \right)^2 + \left(\frac{U_{q''}}{q''} \right)^2}$$

جدول ۲-۳- دقت وسایل اندازه گیری آزمایشگاهی

وسایل اندازه گیری آزمایشگاهی	دقت
ولت متر	$\pm 0/1$ ولت
اهم متر	$\pm 0/1$ اهم
کولیس	$\pm 0/0.5$ میلی متر
سنسور دما	$\pm 0/1$ درجه سلسیوس

جدول ۲-۳ نشان دهنده دقت وسایل آزمایشگاهی مورداستفاده در تست ها برای محاسبه نتایج تست جوشش می باشد .

جدول ۳-۳- مقدار عدم قطعیت برای آزمایش جوشش نانوسیال ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر اکسید مس/آب

$T_1(oC)$	$T_2(oC)$	$V(v)$	$U \Delta Ts$	$U h$	$U q$
130.1	94.8	50	0.2765	0.2772	0.02053
136.5	94.8	55	0.2343	0.2352	0.02047
142.2	94.8	60	0.2064	0.2074	0.02042
149.1	94.8	65	0.1804	0.1816	0.02037
156.2	94.8	70	0.1599	0.1612	0.02034
163.7	94.8	75	0.1428	0.1442	0.02032
168.8	94.7	78	0.1329	0.1345	0.0203
174	94.8	80	0.1246	0.1263	0.0203
178.8	94.8	82	0.1177	0.1195	0.02029
183.6	94.8	84	0.1116	0.1134	0.02028
186.9	94.8	86	0.1077	0.1096	0.02028
190.8	94.8	88	0.1035	0.1055	0.02027

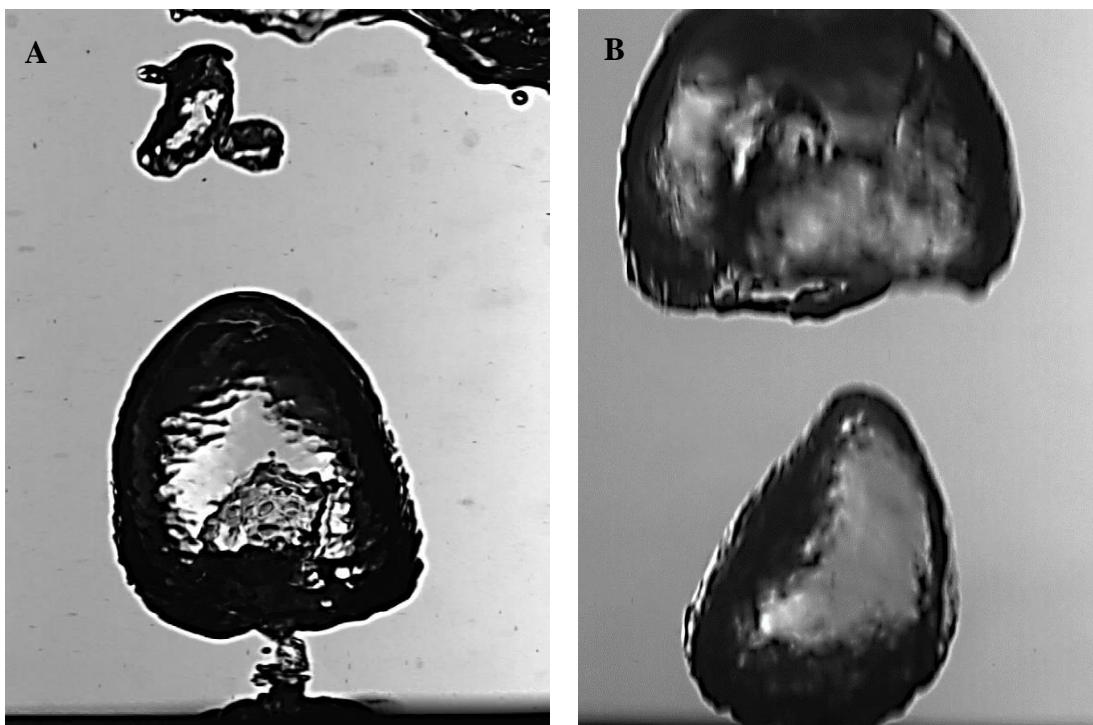
جدول ۴-۳ - مقدار عدم قطعیت برای آزمایش جوشش آب

$T_1(oC)$	$T_2(oC)$	$V(v)$	$U \Delta Ts$	$U h$	$U q$
129.8	94.8	50	0.2788	0.2796	0.02053
133.4	94.9	53	0.2538	0.2546	0.02049
137.2	94.9	56	0.2311	0.232	0.02046
138.9	95	57	0.2229	0.2238	0.02044
140	94.9	58	0.2169	0.2179	0.02043
143.8	95	61	0.2007	0.2018	0.02041
145.1	95.1	62	0.1961	0.1971	0.0204

با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول ۳-۳ و جدول ۴-۳، دقت وسایل آزمایشگاهی در جدول ۳-۳ و نیز داده‌های تست جوشش محاسبه شده، بیشترین عدم قطعیت برای شار حرارتی، ۲ درصد و برای ضریب انتقال حرارت جوششی، ۲۸ درصد است، که با افزایش شار حرارتی به ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۳-۱ مشاهده شد نتایج تست آب با رابطه تجربی رزنو مطابقت زیادی دارد. لازم به ذکر است که نتایج تست‌ها با تکرارپذیری سه مرتبه در شرایط یکسان در روزهای متفاوت انجام شده است. نتایج نشان دهنده نزدیک بودن ویژگی‌های اصلی در تست‌های بعدی می‌باشد که همگی این نتایج نشان از دقت داده‌ها و پروسه آزمایش می‌باشد.

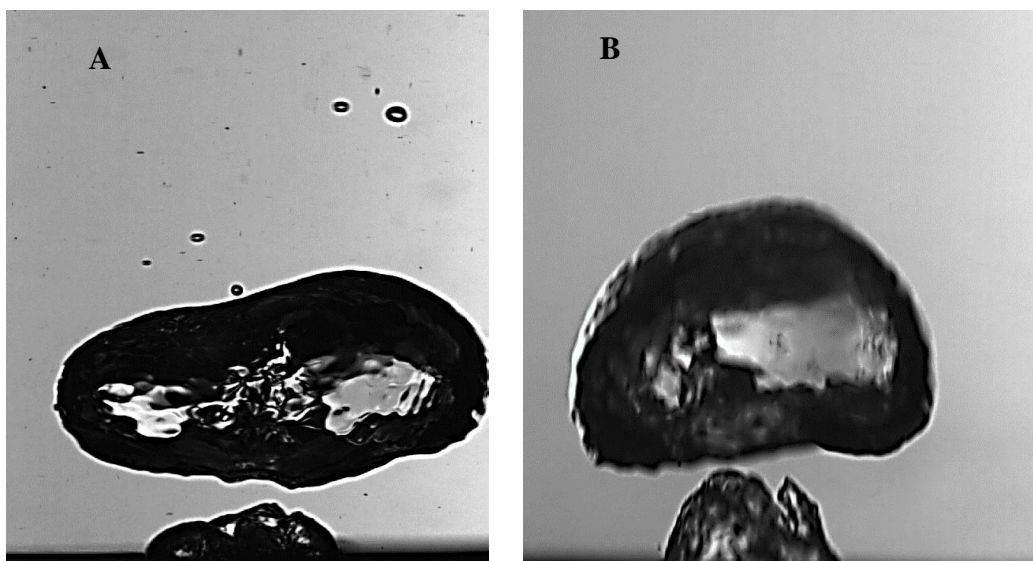
۳-۱۵ نتایج تحلیل هیدرودینامیکی حباب در جوشش

شکل ۳-۴۴ نشان دهنده حباب در شار حرارتی $1/0.914$ مگاوات بر مترمربع است. به ترتیب از چپ به راست در قسمت A حباب در سیال پایه آب و در قسمت B نانوسیال اکسید مس / آب با غلظت 10 میلی گرم بر لیتر قرار دارد. شعاع میانگین و فرکانس جدایش برای قسمت A و B به ترتیب $1/12$ و $1/13$ سانتی متر و $23/84$ و $30/88$ حباب بر ثانیه است.



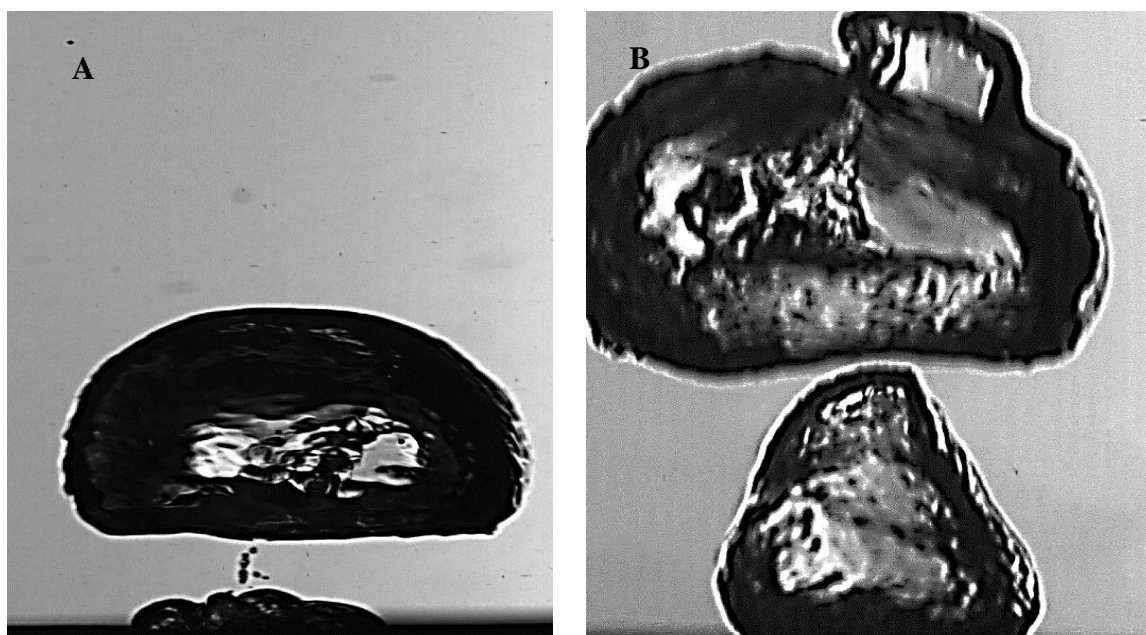
شکل ۳-۴۴- تصاویر مربوط به حباب در شار حرارتی $1/0.914$ مگاوات بر مترمربع

شکل ۳-۴۵ نشان دهنده حباب در شار حرارت $1/2808$ مگاوات بر مترمربع است. به ترتیب از چپ به راست در قسمت A حباب در سیال پایه آب و در قسمت B نانوسیال اکسید مس / آب با غلظت 10 میلی گرم بر لیتر قرار دارد. شعاع میانگین و فرکانس جدایش برای قسمت A و B به ترتیب $1/21$ و $1/14$ سانتی متر و $17/34$ و $21/65$ حباب بر ثانیه است.



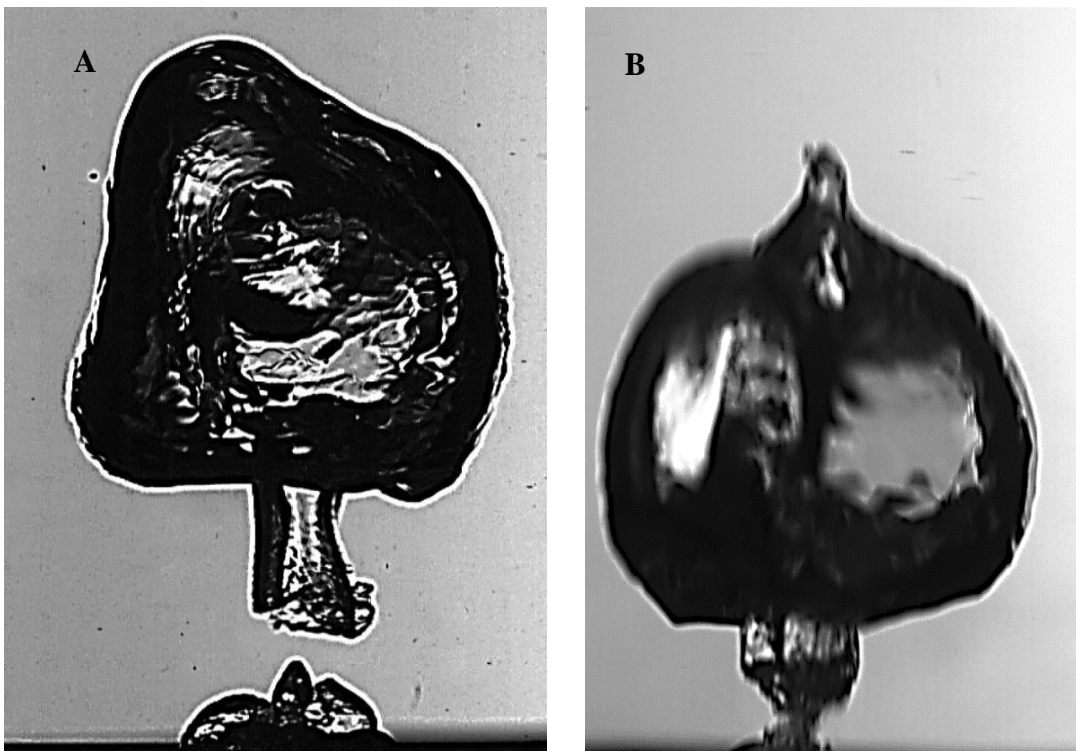
شکل ۳-۴۵- تصاویر مربوط به حباب در شار حرارتی ۱/۲۸۰۸ مگاوات بر مترمربع

شکل ۳-۴۶- شکل ۳-۴۶ نشان دهنده حباب در شار حرارتی ۱/۴۸۵۴ مگاوات بر مترمربع است. به ترتیب از چپ به راست در قسمت A حباب در سیال پایه آب و در قسمت B نانوسیال اکسید مس / آب با غلظت ۱۰ میلی گرم بر لیتر قرار دارد. شعاع میانگین و فرکانس جدایش برای قسمت A و B به ترتیب ۱/۳۱ و ۱/۲۳ سانتی متر و ۱۴/۹۵ و ۲۰/۸۹ حباب بر ثانیه است.



شکل ۳-۴۶- تصاویر مربوط به حباب در شار حرارتی ۱/۴۸۵۴ مگاوات بر مترمربع

شکل ۳-۴۷ نشان دهنده حباب در شار حرارتی $1/7052$ مگاوات بر مترمربع است. به ترتیب از چپ به راست در قسمت A حباب در سیال پایه آب و در قسمت B نانوسیال اکسید مس / آب با غلظت 10 میلی گرم بر لیتر قرار دارد. شعاع میانگین و فرکانس جدایش برای قسمت A و B به ترتیب $1/35$ و $1/44$ سانتی متر و $15/22$ و $23/93$ حباب بر ثانیه است.



شکل ۳-۴۷- تصاویر مربوط به حباب در شار حرارتی $1/7052$ مگاوات بر مترمربع

۳-۱۵-۱ نتیجه گیری تحلیل هیدرودینامیکی حباب در جوشش

با مقایسه تصاویر نتایج آزمایش مربوط به آب و نانوسیال اکسید مس / آب با غلظت 10 میلی گرم بر لیتر، نتیجه گیری های زیر حاصل گردید.

- فرکانس جدایش حباب در نانوسیال فوق به دلیل تولید کانون هسته زای اضافی بیشتر از آب می باشد.

- شعاع متوسط حباب‌های جدا شده از سطح آب نسبت به نانوسیال اکسید مس / آب با غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر اندکی بیشتر است. با توجه به برابر بودن کشش سطحی دو سیال و نیز ثابت بودن حاصل ضرب عبارت فرکانس جدایش در شعاع حباب این تغییر را توجیه می‌کند.
- با افزایش شار حرارتی به دلیل فعال شدن کانون‌های هسته‌زای حباب کوچک‌تر و بیشتر شدن تعداد کانون‌های فعال، میزان فرکانس و شعاع میانگین افزایش پیدا کرده است.

فصل چهارم:

نتیجه گیری و پیشنهادات

۱-۴ نتیجه گیری

در این پژوهش مقایسه تست جوشش استخری نانوسیال اکسید مس / آب نسبت به سیال پایه آب دیونیزه در فشار اتمسفری بر سطح صاف مسی انجام گرفته است. و مهم‌ترین پارامترهای جوشش یعنی ضریب انتقال حرارت و شار حرارت بحرانی اندازه گیری و عوامل تغییر آنها نسبت به جوشش آب مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از پروژه در زیر به صورت جامع آمده است.

- بیشترین ضریب انتقال حرارت جوششی در غلظت ۵۰ میلی گرم برلیتر و شار حرارتی ۱/۷۰ مگاوات بر مترمربع به مقدار ۸۰۹۲۷/۰۲ وات بر مترمربع درجه سانتی‌گراد به دست آمده است، که ۵۰ درصد افزایش نسبت به بیشترین ضریب انتقال حرارت آب دیونیزه می‌باشد.
- ضریب انتقال حرارت تا غلظت ۵۰ میلی گرم در لیتر افزایش و در غلظت‌های بیشتر به دلیل افزایش ضخامت لایه رسوب نانوذرات بر سطح جوشش و ایجاد مقاومت گرمایی کاهش می‌یابد.
- بیشترین شار حرارت بحرانی به ثبت رسیده ۲/۳۳ مگاوات بر مترمربع برای غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر به ثبت رسیده است. این مقدار، نسبت به شار حرارت بحرانی آب دیونیزه (۱/۲۲ مگاوات بر مترمربع) ۹۲ درصد افزایش داشته است.
- به دلیل تأثیر همزمان زبری سطح، ضخامت نانوپوشش و زاویه تماس بر شار حرارت بحرانی با افزایش غلظت بیشتر از ۱۰۰ میلی گرم در لیتر به دلیل افزایش ضخامت رسوب نانوذرات تأثیر مخرب آن، شار حرارت بحرانی کاهش یافته است.
- فرکانس آزاد شدن حباب از سطح جوشش برای نانوسیال به دلیل بیشتر شدن زبری سطح و افزایش تعداد کانون‌های فعال هسته‌زا در تمامی شارهای حرارتی بیشتر از آب دیونیزه شده است.
- قطر حباب‌های جدا شده از سطح در نانوسیال کوچک‌تر از آب دیونیزه می‌باشد.

۲-۴ پیشنهادها

می‌توان برای بررسی بیشتر در مورد جوشش استخری، موضوعات زیر را بررسی کرد.

- می‌توان برای بهبود فرآیند جوشش نانوسیالات از روش‌های پوشش‌دهی سطح جوشش مانند: ایجاد حفره، شیار و زبری به صورت مکانیکی و الکترولیز، حکاکی شیمیایی و تکنیک پوشش‌دهی لایه متخلخل روی سطوح جوشش به روش‌های شیمیایی استفاده کرد.
- برای مطالعه کامل‌تر در مورد نحوه تأثیر رسوب نانوذرات بر دینامیک رشد، جدایش حباب و تغییر در کانون‌های هسته‌زا حباب می‌توان با استفاده از تصویربرداری و پردازش تصویر سطوح جوشش شفاف مانند ویفر سیلکونی استفاده کرد.
- پژوهش در رابطه با ارائه فرمول تجربی قابل اطمینان که با توجه به نوع نانوسیال و سطح جوشش مورد استفاده، شار حرارت بحرانی و ضریب انتقال حرارت در نانوسیالات را پیش‌بینی کند.

۵ فهرست منابع:

- [1] X. Fang, Y. Chen, H. Zhang, W. Chen, A. Dong, and R. Wang, "Heat transfer and critical heat flux of nanofluid boiling: A comprehensive review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp. 924–940, 2016.
- [2] S. G. Kandlikar, *Handbook of phase change: boiling and condensation*. CRC Press, 1999.
- [3] L. S. Tong and Y. S. Tang, *Boiling heat transfer and two-phase flow*. CRC press, 1997.
- [4] A. Singh, B. B. Mikic, and W. M. Rohsenow, "Active sites in boiling," *J. Heat Transfer*, vol. 98, no. 3, pp. 401–406, 1976.
- [5] R. E. Eastman, "Dynamics of bubble departure," in *AIAA, 19th Thermophysics Conference*, 1984.
- [6] W. Fritz, "Maximum volume of vapor bubbles," *Phys. Z.*, vol. 36, no. 11, pp. 379–384, 1935.
- [7] J. G. Collier and J. R. Thome, *Convective boiling and condensation*. Clarendon Press, 1994.
- [8] S. Nukiyama, "The maximum and minimum values of the heat Q transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 9, no. 12, pp. 1419–1433, 1966.
- [9] N. Almalki, "An Experimental Investigation of the Effect of Heater Surface Preparation Method on Pool Boiling of Nanofluids." 2015.
- [10] S. M. Ghiaasiaan, *Two-phase flow, boiling, and condensation: in conventional and miniature systems*. Cambridge University Press, 2007.
- [11] I. L. Pioro, W. Rohsenow, and S. S. Doerffer, "Nucleate pool-boiling heat transfer. I: review of parametric effects of boiling surface," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 47, no. 23, pp. 5033–5044, 2004.
- [12] H. T. Phan, N. Caney, P. Marty, S. Colasson, and J. Gavillet, "How does surface wettability influence nucleate boiling?," *Comptes Rendus Mécanique*, vol. 337, no. 5, pp. 251–259, 2009.
- [13] M.-C. Lu, *Exploring the limits of boiling and evaporative heat transfer using micro/nano structures*. University of California, Berkeley, 2010.
- [14] R. L. Webb, "Principles of Enhancement Heat Transfer." John Wiley & Sons, New York, 1994.
- [15] H. O'Hanley *et al.*, "Separate effects of surface roughness, wettability, and porosity on the boiling critical heat flux," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 103, no. 2, p. 24102, 2013.
- [16] S. U. S. Choi and J. A. Eastman, "Enhancing thermal conductivity of fluids with

- nanoparticles,” Argonne National Lab., IL (United States), 1995.
- [17] S. K. Das, S. U. S. Choi, and H. E. Patel, “Heat transfer in nanofluids—a review,” *Heat Transf. Eng.*, vol. 27, no. 10, pp. 3–19, 2006.
- [18] D. Ciloglu and A. Bolukbasi, “A comprehensive review on pool boiling of nanofluids,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 84, pp. 45–63, 2015.
- [19] S. M. You, J. H. Kim, and K. H. Kim, “Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 83, no. 16, pp. 3374–3376, 2003.
- [20] D. Wen and Y. Ding, “Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based γ -alumina nanofluids,” *J. Nanoparticle Res.*, vol. 7, no. 2, pp. 265–274, 2005.
- [21] K.-J. Park, D. Jung, and S. E. Shim, “Nucleate boiling heat transfer in aqueous solutions with carbon nanotubes up to critical heat fluxes,” *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 35, no. 6, pp. 525–532, 2009.
- [22] M. Sheikhhahai, M. N. Esfahany, and N. Etesami, “Experimental investigation of pool boiling of Fe₃O₄/ethylene glycol–water nanofluid in electric field,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 62, pp. 149–153, 2012.
- [23] J. M. Wu and J. Zhao, “A review of nanofluid heat transfer and critical heat flux enhancement—research gap to engineering application,” *Prog. Nucl. Energy*, vol. 66, pp. 13–24, 2013.
- [24] Y. Diao, Y. Liu, R. Wang, Y. Zhao, and L. Guo, “Experimental investigation of the Cu/R141b nanofluids on the evaporation/boiling heat transfer characteristics for surface with capillary micro-channels,” *Heat Mass Transf.*, vol. 50, no. 9, pp. 1261–1274, 2014.
- [25] M. M. Sarafraz and F. Hormozi, “Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of dilute Al₂O₃–ethyleneglycol nanofluids,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 58, pp. 96–104, 2014.
- [26] R. Kamatchi and S. Venkatachalapathy, “Parametric study of pool boiling heat transfer with nanofluids for the enhancement of critical heat flux: a review,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 87, pp. 228–240, 2015.
- [27] R. Kamatchi, S. Venkatachalapathy, and C. Nithya, “Experimental investigation and mechanism of critical heat flux enhancement in pool boiling heat transfer with nanofluids,” *Heat Mass Transf.*, vol. 52, no. 11, pp. 2357–2366, 2016.
- [28] Y. H. Diao, C. Z. Li, Y. H. Zhao, Y. Liu, and S. Wang, “Experimental investigation on the pool boiling characteristics and critical heat flux of Cu-R141b nanorefrigerant under atmospheric pressure,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 89, pp. 110–115, 2015.
- [29] S. Vafaei, “Nanofluid pool boiling heat transfer phenomenon,” *Powder Technol.*, vol. 277, pp. 181–192, 2015.

- [30] V. Umesh and B. Raja, "A study on nucleate boiling heat transfer characteristics of pentane and CuO-pentane nanofluid on smooth and milled surfaces," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 64, pp. 23–29, 2015.
- [31] H. Sakashita, "Pressure effect on CHF enhancement in pool boiling of nanofluids," *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 53, no. 6, pp. 797–802, 2016.
- [32] G. Niu and J. Li, "Comparative studies of pool boiling heat transfer with nanofluids on porous surface," *Heat Mass Transf.*, vol. 51, no. 12, pp. 1769–1777, 2015.
- [33] M. M. Sarafraz, F. Hormozi, M. Silakhori, and S. M. Peyghambarzadeh, "On the fouling formation of functionalized and non-functionalized carbon nanotube nano-fluids under pool boiling condition," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 95, pp. 433–444, 2016.
- [34] M. M. Sarafraz, T. Kiani, and F. Hormozi, "Critical heat flux and pool boiling heat transfer analysis of synthesized zirconia aqueous nano-fluids," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 70, pp. 75–83, 2016.
- [35] R. Saidur, K. Y. Leong, and H. A. Mohammad, "A review on applications and challenges of nanofluids," *Renew. Sustain. energy Rev.*, vol. 15, no. 3, pp. 1646–1668, 2011.
- [36] K. Khanafer and K. Vafai, "A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 54, no. 19, pp. 4410–4428, 2011.
- [37] S. Mukherjee and S. Paria, "Preparation and stability of nanofluids-A Review," *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, vol. 9, no. 2, pp. 63–69, 2013.
- [38] M. M. Sarafraz and F. Hormozi, "Pool boiling heat transfer to dilute copper oxide aqueous nanofluids," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 90, pp. 224–237, 2015.
- [39] C. N. C. Lam, R. Wu, D. Li, M. L. Hair, and A. W. Neumann, "Study of the advancing and receding contact angles: liquid sorption as a cause of contact angle hysteresis," *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 96, no. 1–3, pp. 169–191, 2002.
- [40] P. Eaton and P. West, *Atomic force microscopy*. Oxford University Press, 2010.
- [۴۱] م. کرباسی، میکروسکوپ الکترونی روبشی و کاربردهای آن در علوم مختلف و فناوری نانو. اصفهان: جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، ۱۳۸۸.
- [42] P. J. Goodhew, J. Humphreys, and R. Beanland, *Electron microscopy and analysis*. CRC Press, 2000.
- [43] L. Ma, J. Tian, and W. Yu, "Visual saliency detection in image using ant colony optimisation and local phase coherence," *Electron. Lett.*, vol. 46, no. 15, pp. 1066–1068, 2010.
- [44] I. L. Pioro, "Experimental evaluation of constants for the Rohsenow pool boiling correlation," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 42, no. 11, pp. 2003–2013, 1999.
- [45] C. H. Li, B. X. Wang, and X. F. Peng, "Experimental investigations on boiling of

- nano-particle suspensions,” in *2003 Boiling heat transfer conference, Jamaica, USA*, 2003.
- [46] J. T. Cieslinski and T. Z. Kaczmarczyk, “Pool boiling of water-Al₂O₃ and water-Cu nanofluids on horizontal smooth tubes,” *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 6, no. 1, p. 220, 2011.
- [47] M. Chopkar, A. K. Das, I. Manna, and P. K. Das, “Pool boiling heat transfer characteristics of ZrO₂–water nanofluids from a flat surface in a pool,” *Heat Mass Transf.*, vol. 44, no. 8, pp. 999–1004, 2008.
- [48] M. R. Raveshi, A. Keshavarz, M. S. Mojarrad, and S. Amiri, “Experimental investigation of pool boiling heat transfer enhancement of alumina–water–ethylene glycol nanofluids,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 44, pp. 805–814, 2013.
- [49] N. Zuber, “On the stability of boiling heat transfer,” *Trans. Am. Soc. Mech. Engrs.*, vol. 80, 1958.
- [50] S. G. Kandlikar, “A theoretical model to predict pool boiling CHF incorporating effects of contact angle and orientation,” *Trans. Soc. Mech. Eng. J. Heat Transf.*, vol. 123, no. 6, pp. 1071–1079, 2001.
- [51] A. K. Nayak, P. P. Kulkarni, and A. S. Chinchole, “Experimental Investigation on Pool Boiling Critical Heat Flux with Nanofluids,” *J. Nanofluids*, vol. 4, no. 2, pp. 140–146, 2015.
- [52] S. Jung and H. Kim, “An experimental method to simultaneously measure the dynamics and heat transfer associated with a single bubble during nucleate boiling on a horizontal surface,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 73, pp. 365–375, 2014.
- [53] S. J. Kim, I. C. Bang, J. Buongiorno, and L. W. Hu, “Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 50, no. 19, pp. 4105–4116, 2007.
- [54] S. M. Kwark, R. Kumar, G. Moreno, J. Yoo, and S. M. You, “Pool boiling characteristics of low concentration nanofluids,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 53, no. 5, pp. 972–981, 2010.
- [55] H. W. Coleman and W. G. Steele, *Experimentation, validation, and uncertainty analysis for engineers*. John Wiley & Sons, 2009.

Abstract

Boiling heat transfer is one of the most applicable heat transfer processes within the industry. In recent years, many researches have been investigated in nanofluids pool boiling field and reported some contradictory results. This research is a qualitative and quantitative investigation to understand the behaviors of nanofluids and nanocoated surfaces during pool boiling heat transfer. The pool boiling behavior of low concentration (≤ 1 gr/Lit) nanofluids have been studied experimentally on a cooper flat heater that dispersed CuO nanoparticles in pure water. In this study the boiling surface is considered to be cooper flat surfaces with, 10mm diameter and surface roughness of $R_a=7.5$ nm. CuO-water nanofluids have been craeted by 40nm nanoparticles and 1 to 1000 (mg/Lit) of concentrations is used in this resarch. Repeatatability and accuraecy of set up have been tested tree times for DI Water, indicating a sutable concordance with the traditional correlations. By investigating heat transfer coefficient and critical heat flux in different concentration of nanofluids, it is seen that heat transfer increases by enhancing concentration to 50 (mg/Lit) and decreases for further amount. Thus, for 50 (mg/Lit) concentration of nanofluid heat transfer coefficient has it's maximum amount wich is 50% improvement. Critical heat flux also decreases for higher concentration more than 100 (gr/Lit) and decreases as the concentration increase for lower concentration. Critical heat flux has improved 92% in optimised concentration with is 100 (gr/Lit) compared to DI Water. AFM, SEM and contact angle metods have been conducted for analysing properties of surface and nanocoated which are formed after nanofluids boiling. Results demonstrate that there is a positive effect in increasing roughness and a negetive impact of thickness enhancement on critical heat flux and also improvement in heat transfer coefficient. Also it is seen that the heat transfer coefficient increases as the surface hydrophobe increases. In this study high spead camera and image procecing is used for investigating bubble hydrodynamic, and frequency analysis of departure and diameter of departed bubbles. It has been concluded that departed frequency in Cuo-water nanofluids is more than DI Water and diameter of bubble is less than DI Water.

Keywords: nannofluid pool boiling, heat trasfer coefficient, critical heat flux, image procecing



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Energy Conversion Engineering

Pool boiling enhancement by using nanofluids

By:

Amir Ahmad JamiAlahmadi

Supervisor:

Dr. Mohammad Hassan kayhani

Advisor:

Dr. Ahmad Nazari

January 2018