نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)
دوره ۸، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰

Journal Of Energy Conversion
Volume: 8, Issue: 2, 2021

مطالعه‌ی تجربی اثر ترکیب استفاده از تکنیک‌های نانوسیال و میکروکانال روی عملکرد جوشش هسته‌ای و فیلمی

سید هادی گل‌کار[۱]، مرتضی خیاط[۲و*] و مسعود زارع[۳]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، hadi.golkar@srbiau.ac.ir
*۲- ستادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، mkhayat@srbiau.ac.ir
۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، m.zareh@srbiau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۹، بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۲۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۱

چکیده

در مطالعه‌ی حاضر، انتقال حرارت جوشش هسته‌ای و فیلمی نانوسیالات آلومینا-آب دیونیزه و سیلیکا-آب دیونیزه در حضور سطح میکروکانال به صورت تجربی بررسی شده است. برای این منظور، هر دو نوع نانوسیال با غلظت‌های حجمی ۰/۱٪، ۰/۳٪ و ۰/۵٪ با استفاده از روش دو مرحله‌ای تهیه شده‌اند. آزمایشات جوشش آب دیونیزه‌ی خالص روی سطوح ساده و میکروکانال مسی و آزمایشات جوشش نانوسیالات فقط روی سطح میکروکانال مسی انجام شده است. نتایج نشان داد که ترکیب حضور نانوسیال و میکروکانال در فرایند جوشش، شار حرارتی بحرانی و شار حرارتی مینیمم را به مقدار قابل توجهی افزایش داده است. در جوشش نانوسیالات روی سطح میکروکانال، غلظت ۰/۵٪ بهترین عملکرد را داشته است، به طوری که بیشترین مقدار شار حرارتی بحرانی و شار حرارتی مینیمم برای نانوسیال آلومینا-آب دیونیزه ۹۳/۰۲٪ و ۱۰۵/۳۲٪ و برای نانوسیال سیلیکا-آب دیونیزه ۹۰/۸۲٪ و ۹۷/۱۵٪ نسبت به جوشش آب دیونیزه‌ی خالص روی سطح ساده افزایش داشته است. علاوه بر این، مشاهده شد که با نشست نانوذرات روی سطح میکروکانال، میزان ترشوندگی سطح افزایش یافته و ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای نانوسیالات نسبت به آب دیونیزه‌ی خالص کاهش یافته است. اما در جوشش فیلمی، اثرات بهبود خواص حرارتی نانوسیالات بر اثرات مخرب نشست نانوذرات روی سطح غلبه کرده است.

* **عهده‌دار مکاتبات:** mkhayat@srbiau.ac.ir

کلمات کلیدی: جوشش هسته¬ای، جوشش فیلمی، شار حرارتی، میکروکانال، نانوسیالات.

۱- مقدمه

پدیده‌ی جوشش، یکی از روش‌های کارآمد انتقال حرارت است که اهمیت ویژه‌ی آن در توانایی انتقال شارهای حرارتی زیاد در ازای یک اختلاف دمای کم است. این توانایی، به دلیل بالا بودن میزان حرارت نهان تبخیر در حین وقوع فرایند جوشش حاصل می‌شود. با توجه به این مزیت، پدیده‌ی جوشش همواره به عنوان یک روش انتقال حرارت مؤثر در بسیاری از کاربردهای صنعتی از جمله نیروگاه‌های حرارتی، راکتورهای هسته‌ای، دیگ‌های بخار، مبدل‌ها و پمپ‌های حرارتی و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. در برخی از این کاربردها نیاز است که فرایند جوشش دامنه‌ی گسترده‌ای از تغییرات دمای سطح و شار حرارتی را پوشش دهد، به طوری که انتقال حرارت در رژیم‌های جوشش هسته‌ای، گذرا و فیلمی واقع می‌شود. وجود بارهای حرارتی زیاد در سیستم‌های حرارتی باعث ایجاد تنش حرارتی در تجهیزات انتقال حرارت می‌شود که در نهایت منجر به تخریب

نحوه استناد به این مقاله: سید هادی گل‌کار، مرتضی خیاط، مسعود زارع. مطالعه‌ی تجربی اثر ترکیب استفاده از تکنیک‌های نانوسیال و میکروکانال روی عملکرد جوشش هسته‌ای و فیلمی. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۰; ۸ (۲) :۶۵-۸۴

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.1.7]

دستگاه‌ها می‌شود. لذا، برای آن که بتوان بازده، ایمنی و طول عمر سیستم‌های حرارتی را افزایش داد لازم است که عملکرد فرایند جوشش بهبود یابد.

برای بهبود انتقال حرارت جوشش، تکنیک‌های متفاوتی توسط محققان پیشنهاد شده که بیشتر روی اصلاح خواص سیال و سطح جوشش متمرکز بوده است. از تکنیک‌های مؤثر برای اصلاح سطح جوشش می‌توان به افزایش مساحت، ترشوندگی و زبری سطح اشاره کرد که در این میان، افزایش مساحت سطح توسط میکروکانال اثرات قابل توجهی روی بهبود عملکرد جوشش دارد [۲]. همچنین، یکی از جدیدترین تکنیک‌هایی که برای اصلاح خواص حرارتی و ترموفیزیکی سیال پیشنهاد شده، افزودن نانوذرات به سیال پایه است که امروزه به عنوان یک روش مؤثر برای بهبود عملکرد جوشش پذیرفته شده است [۳]. پیشرفت فناوری نانو و مزایای حضور نانوسیالات در انتقال حرارت باعث شده که امروزه در بسیاری از تحقیقات تجربی از نانوسیالات به عنوان سیال تحت جوشش استفاده شود. حضور نانوذرات در سیال پایه باعث افزایش توربولانس، اختلاط و هدایت حرارتی سیال می‌شود که در نهایت منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود. در سال‌های اخیر، مقالات متعددی با هدف بررسی اثرات سطوح اصلاح شده و استفاده از نانوسیالات در رژیم‌های جوشش هسته‌ای و فیلمی منتشر شده که در ادامه برخی از آن‌ها مرور شده است:

والونج و ساتیابهاما [۴]، آزمایشات جوشش هسته‌ای آب را روی سطوح میکروکانال به منظور بررسی پارامترهای هندسی کانال انجام دادند. برای این منظور، میکروکانال‌های مستطیلی، سهموی و پله‌ای روی سطح دایروی از جنس مس ایجاد شد. نتایج نشان داد که در همه‌ی هندسه‌های مورد بررسی، ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای و شار حرارتی بحرانی نسبت به سطح ساده افزایش می‌یابد. کواک و همکاران [۵]، آزمایشات جوشش هسته‌ای آب را روی سطوح میکروکانال مستطیلی انجام دادند. عرض کانال‌ها ثابت و ارتفاع کانال‌ها متفاوت در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که حضور سطوح میکروکانال در فرایند جوشش، ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای و شار حرارتی بحرانی را افزایش می‌دهد. سطح میکروکانال با نسبت منظری بالاتر بهترین عملکرد را داشت.

های و همکاران [۶]، آزمایشات جوشش هسته‌ای آب را روی سطوح میکروکانال با عرض و عمق یکسان اما با طول متفاوت بررسی کردند. نتایج نشان داد که در میکروکانال‌ها، شارهای حرارتی زیاد در اختلاف دمای مازاد بسیار کم‌تری در مقایسه با سطح ساده واقع می‌شود. دلیل این امر، انحراف سریع حباب‌ها، افزایش اثر مویینگی و تسهیل تغذیه‌ی مایع عنوان شد. گودا و همکاران [۲]، آزمایشات جوشش هسته‌ای آب را روی سطح ساده و دو نوع میکروکانال (ساده و متقاطع) انجام دادند. نتایج نشان داد که حضور میکروکانال در فرایند جوشش، ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای را به مقدار قابل توجهی افزایش می‌دهد. دلیل بهبود انتقال حرارت در میکروکانال‌ها، تعداد بیشتر سایت‌های هسته‌زایی و رشد مطلوب‌تر حباب‌ها عنوان شد.

محبی و خیاط [۷]، جوشش هسته‌ای نانوسیال هیبریدی تیتانیا-نانولوله‌ی کربنی با پایه‌ی آب را با غلظت‌های حجمی ۰/۱٪ و ۰/۵٪ روی سطح میکروکانال بررسی کردند. نتایج نشان داد که مقدار ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای و شار حرارتی بحرانی نانوسیال بیشتر از آب خالص است و با افزایش غلظت، انتقال حرارت جوشش هسته‌ای بهبود می‌یابد. دره و همکاران [۳]، جوشش هسته‌ای نانوسیال آلومینا-آب را با غلظت‌های حجمی ۰/۰۰۲۵٪، ۰/۰۱٪ و ۰/۰۲٪ روی سطوح میکروساختار و نانوساختار بررسی کردند. نتایج نشان داد که در همه‌ی غلظت‌های مورد بررسی، مقدار شار حرارتی بحرانی نانوسیالات بیشتر از آب خالص است. علاوه بر این، مشخص شد که سطح میکروساختار عملکرد بهتری نسبت به سطح نانوساختار دارد. ردی و ونکاتاچالاپاتی [۸]، جوشش هسته‌ای نانوسیال هیبریدی آلومینا-اکسید مس با پایه‌ی آب را با غلظت-های حجمی مختلف روی سطح ساده از جنس مس بررسی کردند. نتایج نشان داد که مقدار شار حرارتی بحرانی نانوسیال هیبریدی بیشتر از نانوسیال نوع تکی است. مشاهده شد که با افزایش غلظت از ۰/۰۱٪ تا ۰/۱٪، ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای کاهش می‌یابد و دلیل آن، نشست نانوذرات روی سطح جوشش عنوان شد.

کامل و لزسویتس [۹]، جوشش هسته‌ای نانوسیال اکسید تنگستن-آب را با غلظت‌های حجمی ۰/۰۰۵٪، ۰/۰۱٪ و ۰/۰۵٪ روی لوله‌ای از جنس مس بررسی کردند. نتایج نشان داد که در همه‌ی غلظت‌های مورد بررسی، حضور نانوسیال در فرایند جوشش، ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای را کاهش می‌دهد. دلیل این کاهش، نشست نانوذرات روی سطح جوشش و

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.1.7]

کاهش سایت‌های هسته‌زایی عنوان شد. محمدی و خیاط [۱۰]، جوشش هسته‌ای نانوسیالات آلومینا-آب و اکسید مس-آب را با غلظت حجمی ۰/۱٪ روی سطح ساده از جنس مس بررسی کردند. نتایج نشان داد که مقدار شار حرارتی بحرانی نانوسیالات بیشتر از آب خالص است. مشاهده شد که نمی‌توان از نانوسیالات برای مدت زمان طولانی استفاده کرد، زیرا نانوذرات در طول زمان روی سطح جوشش نشست می‌کنند و با ایجاد یک لایه‌ی عایق، عملکرد جوشش هسته‌ای را تخریب می‌کنند. دلالی و همکاران [۱۱]، آزمایشات جوشش هسته‌ای را با حضور نانولوله‌های کربنی در سیال پایه آب و سیال پایه هیبریدی آب-اتیلن گلیکول روی سطح میکروساختار برنجی انجام دادند. نتایج نشان داد که با ترکیب سازوکارهای اصلاح سطح و نیز افزایش هدایت حرارتی سیال پایه، عملکرد جوشش هسته‌ای بهبود می‌یابد. مشخص شد که در جوشش نانوسیالات روی سطح میکروساختار، با افزایش غلظت از ۰/۰۲۵٪ تا ۰/۱٪ شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای افزایش می‌یابد.

سیلگلو و همکاران [۱۲]، جوشش هسته‌ای و فیلمی نانوسیالات آلومینا، سیلیکا، تیتانیا و اکسید مس با پایه‌ی آب را با غلظت حجمی ۰/۱٪ روی میله‌ی برنجی بررسی کردند. مشاهده شد که پس از جوشش نانوسیالات، سطح جوشش آب‌دوست‌تر می‌شود و این امر دلیل اصلی افزایش شار حرارتی بحرانی است. همچنین، مشخص شد که در جوشش فیلمی، مقدار شار حرارتی نانوسیالات تفاوت چندانی با آب خالص ندارد. کانگ و همکاران [۱۳]، آزمایشات جوشش فیلمی آب خالص را به منظور ارزیابی اثرات فوق آب‌دوستی سطح روی مشخصه‌های جوشش فیلمی انجام دادند. برای این منظور، سطوح کروی فوق آب-دوست توسط روش اکسیداسیون آندی روی سطح زیرکونیوم تهیه شد. نتایج نشان داد که سطح فوق آب‌دوست، دمای مینیمم جوشش فیلمی و شار حرارتی مینیمم را افزایش می‌دهد.

لی و همکاران [۱۴]، آزمایشات جوشش فیلمی را به منظور ارزیابی اثرات مادون سردی مایع روی دمای مینیمم جوشش فیلمی انجام دادند. برای این منظور، آزمایشات جوشش آب خالص روی میله‌های استوانه‌ای از جنس فولاد ضد زنگ و زیرکونیوم انجام شد. نتایج نشان داد که در مادون سردی‌های بیشتر، فیلم بخار نازک‌تر است و جوشش فیلمی عملکرد بهتری دارد. تالاری و همکاران [۱۵]، آزمایشات جوشش فیلمی قطره‌ی آب را روی سطوح میکروساختار و نانوساختار انجام دادند. مشاهده شد که سطوح چند مقیاسی با داشتن مزایای هر دو ساختار نانو و میکرو دارای عملکرد بهتری است و دمای لیدن-فراست[1] را به مقدار قابل توجهی افزایش می‌دهد. رحیمیان و همکاران [۱۶]، آزمایشات جوشش هسته‌ای و فیلمی نانوسیالات سیلیکا-آب و تیتانیا-آب را با غلظت وزنی ۰/۰۱٪ روی میله‌ی استوانه‌ای از جنس فولاد ضد زنگ انجام دادند. نتایج نشان داد که حضور نانوسیال سیلیکا-آب در فرایند جوشش، شار حرارتی بحرانی و شار حرارتی مینیمم را افزایش می‌دهد و با نشست نانوذرات سیلیکا روی سطح، دمای مینیمم جوشش فیلمی افزایش می‌یابد. همچنین، مشاهده شد که حضور نانوسیال تیتانیا-آب در فرایند جوشش، اثر قابل توجهی روی شار حرارتی مینیمم و دمای مینیمم جوشش فیلمی ندارد.

بررسی تاریخچه‌ی تحقیق نشان می‌دهد که اثر ترکیب استفاده از تکنیک‌های میکروکانال و نانوسیال روی مشخصه‌های انتقال حرارت در جوشش فیلمی مطالعه نشده و در جوشش هسته‌ای کم‌تر مورد توجه بوده است. وقوع جوشش فیلمی در دماهای بالا، مطالعه‌ی تجربی آن را محدود کرده و بیشتر تحقیقات روی جوشش هسته‌ای متمرکز بوده است. در مقاله‌ی حاضر، با توجه به قابلیت دستگاه برای کار در دماهای بالا (تا حدود ۴۰۰°C)، بررسی آزمایشات جوشش فیلمی نانوسیالات روی سطح میکروکانال نیز امکان‌پذیر شده است. در واقع، نوآوری مقاله‌ی حاضر، توسعه‌ی مطالعه‌ی تجربی جوشش فیلمی نانوسیالات روی سطح میکروکانال است که علاوه بر مطالعه‌ی جوشش هسته‌ای انجام شده است. برای این منظور، اثر ترکیب استفاده از تکنیک‌های میکروکانال و نانوسیال روی ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای و فیلمی، شار حرارتی بحرانی، شار حرارتی مینیمم و دمای مینیمم جوشش فیلمی به صورت تجربی مطالعه شده است.

[1] Leidenfrost

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.1.7]

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تهیه‌ی نانوسیال

در تحقیق حاضر، از آب دیونیزه‌ی خالص و دو نوع نانوسیال آلومینا-آب دیونیزه و سیلیکا-آب دیونیزه به عنوان سیال کاری در آزمایشات جوشش استفاده شده است. به منظور بررسی اثرات غلظت، هر دو نوع نانوسیال با سه غلظت حجمی ۰/۱٪، ۰/۳٪ و ۰/۵٪ تهیه شده‌اند. در جدول ۱، مشخصات نانوذرات مورد استفاده در تحقیق حاضر ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات نانوذرات

نوع نانوذره	آلومینا (Al_2O_3 -α)	سیلیکا (SiO_2)
رنگ	سفید	سفید
ابعاد (nm)	۵۰	۱۲
چگالی (g/cm^3)	۳/۹۷	۲/۲۴

برای تهیه‌ی نانوسیال با غلظت حجمی مشخص، مقدار جرم مورد نیاز از هر نانوذره از رابطه‌ی ۱ قابل محاسبه است. در جدول ۲، جرم مورد نیاز نانوذرات برای غلظت‌های حجمی متفاوت ارائه شده است.

$$m = \frac{\rho_{np} \times V_{nf} \times (\varphi \times 10^{-2})}{(1 - \varphi \times 10^{-2})} \qquad (1)$$

در رابطه‌ی ۱، ρ_{np} چگالی نانوذره، V_{nf} حجم نانوسیال و φ درصد حجمی نانوسیال است.

جدول ۲- جرم مورد نیاز نانوذرات برای غلظت‌های حجمی متفاوت

غلظت حجمی (٪)	جرم آلومینا (g)	جرم سیلیکا (g)
۰/۱	۳/۹۷۴	۲/۲۴۲
۰/۳	۱۱/۹۴۵	۶/۷۴۰
۰/۵	۱۹/۹۵۰	۱۱/۲۵۶

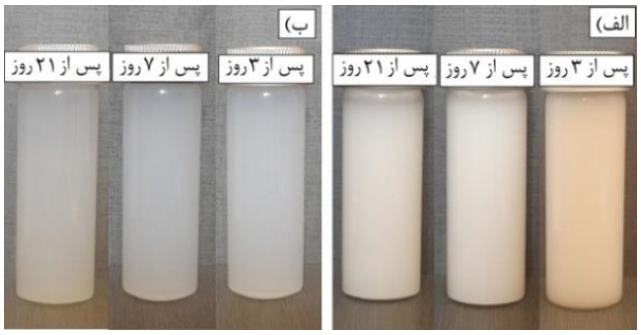
در تحقیق حاضر، نانوسیالات با استفاده از روش دو مرحله‌ای ساخته شده‌اند. ابتدا نانوذرات خشک در یک لیتر آب دیونیزه مخلوط شده‌اند. برای این منظور، از یک هم‌زن مغناطیسی استفاده شده تا نانوذرات به خوبی درون سیال پایه توزیع شوند. در مرحله‌ی بعد، به منظور پایدارسازی، همگن‌سازی و از بین بردن کلوخه‌ها، مخلوط تحت فرایند التراسونیک قرار گرفته است. برای این منظور، هر مخلوط یک لیتری به مدت ۲ ساعت در دستگاه پراب التراسونیک[1] با قدرت ۴۰۰ وات و فرکانس ۲۴ کیلوهرتز قرار گرفته است. سپس، به مدت ۱ ساعت در مخزن حمام التراسونیک[2] با قدرت ۶۶۵ وات و فرکانس ۴۰ کیلوهرتز قرار گرفته است.

پس از تهیه‌ی نانوسیالات، با انجام تست رسوب با گذشت زمان، میزان پایداری نانوسیالات مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان نمونه، میزان رسوب نانوسیالات آلومینا-آب دیونیزه و سیلیکا-آب دیونیزه با غلظت حجمی ۰/۵٪ در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر دو نانوسیال پس از گذشت ۲۱ روز از پایداری خوبی برخوردار بوده‌اند. قابل توجه است که آزمایشات جوشش، یک روز پس از ساخت نانوسیالات انجام شده است.

[1] Ultrasonic probe (UP400St, Hielscher)
[2] Ultrasonic bath tank (WUC-D10H, DAIHAN Scientific Co, Ltd)

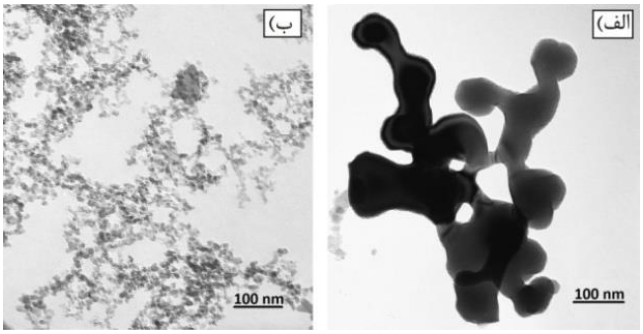
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.1.7]



شکل ۱- تست رسوب نانوذرات در سیال پایه با غلظت حجمی ۰/۵٪: الف) آلومینا، ب) سیلیکا

به منظور بررسی ابعاد و شکل نانوذرات، تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) از نانوسیالات تهیه شده است. در شکل ۲، تصویر TEM نانوذرات آلومینا و سیلیکا با غلظت حجمی ۰/۵٪ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، نانوذرات به خوبی درون سیال پایه توزیع شده‌اند و ابعاد نانوذرات با ابعاد اعلام شده توسط شرکت سازنده مطابقت دارد.



شکل ۲- تصاویر TEM نانوذرات: الف) آلومینا، ب) سیلیکا

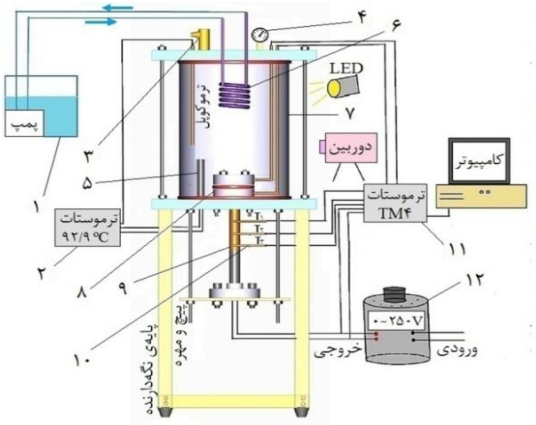
۲-۲- دستگاه آزمایش جوشش استخری

در شکل ۳، شماتیک دستگاه جوشش استخری مورد استفاده در تحقیق حاضر نشان داده شده است. مطابق شکل ۳، دستگاه شامل پایه‌های نگه‌دارنده، محفظه‌ی جوشش، تجهیزات داده‌برداری و نورپردازی، بخش انتقال قدرت و حرارت و سیستم خنک‌سازی است. محفظه‌ی جوشش، از جنس پیرکس ساخته شده که قطر، ارتفاع و ضخامت آن به ترتیب ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵ میلی‌متر می‌باشد. یک صفحه از جنس شیشه‌ی نشکن شفاف با مقاومت حرارتی بالا روی آن قرار گرفته است. به منظور اطمینان از ثابت ماندن فشار داخل محفظه‌ی جوشش از گیج فشار و شیر اطمینان استفاده شده است. یک گرم‌کن میله‌ای ۵۰۰ واتی درون محفظه‌ی جوشش قرار گرفته تا در شروع هر آزمایش، دمای سیال را به دمای اشباع برساند. برای میعان مداوم بخارات تولید شده و ثابت نگه داشتن حجم مایع درون محفظه از یک کندانسور با قطر ۱۰ میلی‌متر و طول ۱۵ سانتی‌متر استفاده شده است. برای آن که آب درون کندانسور همواره در چرخش باشد از یک پمپ با دبی ۴۰۰ لیتر بر ساعت استفاده شده است.

کارتریج مورد استفاده در تحقیق حاضر، یک بلوک از جنس مس با خلوص ۹۹٪ است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، این بلوک به شکل استوانه‌ای با دو سطح مقطع متفاوت طراحی شده که قطر بخش بالایی آن ۲۵ میلی‌متر، قطر بخش پایینی آن ۱۴۰ میلی‌متر و ارتفاع کل آن ۱۲۰ میلی‌متر است. در بخش بالایی کارتریج، سه سوراخ تعبیه شده که محل قرارگیری ترموکوپل‌ها است. قطر این سوراخ‌ها ۲ میلی‌متر و فاصله‌ی مرکز هر سوراخ تا مرکز سوراخ مجاور ۹ میلی‌متر است. در بخش پایینی کارتریج نیز، ۸ سوراخ ایجاد شده که محل قرارگیری گرم‌کن‌های فشنگی است. قطر و عمق این سوراخ‌ها به

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.1.7]

ترتیب ۱۰ و ۵۵ میلی‌متر است. برای قرار دادن ترموکوپل‌ها و گرم‌کن‌ها در سوراخ‌ها، از چسب سیلیکون استفاده شده تا از اتلاف حرارت جلوگیری شود.



شکل ۳- شماتیک دستگاه آزمایش جوشش استخری



شکل ۴- تصویر کارتریج مسی تحقیق حاضر

در دستگاه حاضر، از یک اتوترانس واریاک با توان ۳۰۰۰ وات و با ولتاژ خروجی متغیر از ۰ تا ۲۵۰ ولت برای اعمال توان استفاده شده است. ترموکوپل‌های مورد استفاده از نوع K هستند که برای محدوده‌ی دمایی ۲۰۰°C- تا ۱۳۵۰°C استفاده می‌شوند. برای مشاهده و ثبت دمای ترموکوپل‌های متصل به کارتریج و ترموکوپل درون سیال کاری، از یک ترموستات نوع TM۴ استفاده شده که داده‌ها را به صورت ثانیه‌ای در کامپیوتر ثبت می‌نماید.

با فرض یک‌بعدی بودن انتقال حرارت در کارتریج، می‌توان دمای سطح جوشش را تخمین زد. لذا لازم است که اطراف کارتریج مسی به خوبی عایق‌بندی شود تا بتوان از انتقال حرارت در راستای شعاعی صرف نظر نمود. برای عایق‌بندی قسمت بالایی کارتریج از عایق حرارتی تفلون (PTFE)[1] استفاده شده به طوری که یک قرص PTFE دور کارتریج قرار گرفته است. قطر این قرص ۱۴ سانتی‌متر و ضخامت آن ۳ سانتی‌متر است. برای آب‌بندی مناسب فاصله‌ی بین کارتریج و PTFE از چسب سیلیکون با مقاومت حرارتی بالا استفاده شده است. در قسمت پایینی کارتریج نیز، عایق‌بندی به صورت ترکیبی توسط پشم شیشه با ضریب هدایت حرارتی ۰/۰۴ W/m.°C، ورق تفلون PTFE و عایق الاستومتری انجام شده است.

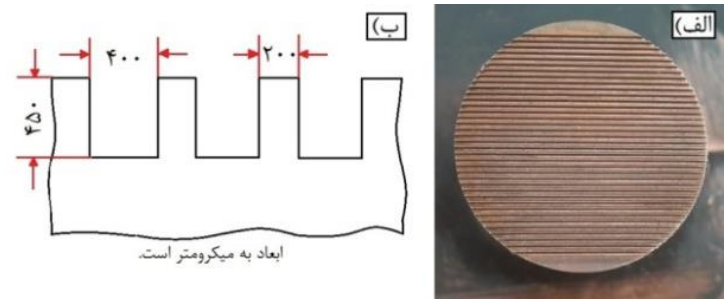
۲-۳- هندسه‌ی میکروکانال

در تحقیق حاضر، از سطوح ساده و میکروکانال برای جوشش آب خالص و از سطح میکروکانال برای جوشش نانوسیالات استفاده شده است. هر دو سطح ساده و میکروکانال از جنس مس و با قطر ۲۵ میلی‌متر ساخته شده‌اند. در شکل ۵ الف، تصویر سطح میکروکانال مورد استفاده در تحقیق حاضر نشان داده شده است. روی این سطح، ۳۷ عدد میکروکانال توسط ماشین‌کاری وایرکات ایجاد شده است. در مرجع [۱۷]، میکروکانال با عرض کانال بیشتر از ۳۵۰ میکرومتر، عمق کانال بیشتر از ۴۰۰ میکرومتر و ضخامت پره ۲۰۰ میکرومتر بهترین عملکرد را در جوشش آب خالص داشته است. بر همین اساس، همان‌طور که در شکل ۵ ب مشاهده می‌شود، میکروکانال تحقیق حاضر با عرض کانال ۴۰۰ میکرومتر، عمق کانال ۴۵۰ میکرومتر و ضخامت پره ۲۰۰ میکرومتر ساخته شده است.

[1] Poly tetra fluoro ethylene

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.1.7]



شکل ۵- تصویر و شماتیک سطح میکروکانال مورد استفاده در تحقیق حاضر

۲-۴- نحوه‌ی انجام آزمایشات

در تحقیق حاضر، آزمایشات جوشش در شرایط یکسان آزمایشگاهی و در فشار kPa ۸۰، دمای ۲۳°C و دمای جوشش آب ۹۲/۹°C انجام شده است. در هر آزمایش، از یک لیتر سیال کاری استفاده شده است. در شروع هر آزمایش، پیش گرم‌کن درون سیال کاری روشن شده تا دمای سیال به دمای اشباع برسد. سپس، کندانسور روشن شده تا بخارات، میعان نموده و به محفظه‌ی جوشش برگردد. در مرحله‌ی بعد، به منظور اعمال شار حرارتی به سطح و سیال، گرم‌کن‌های اصلی (فشنگی) روشن شده و افزایش ولتاژ منبع تغذیه به صورت پلکانی اعمال شده تا فرایند جوشش به شار حرارتی بحرانی برسد. پس از هر افزایش ولتاژ و رسیدن به حالت پایا، دمای ترموکوپل‌ها توسط ترموستات نوع TM۴ ثبت شده تا بتوان دمای سطح و شار حرارتی را تخمین زد. بعد از رسیدن به شار حرارتی بحرانی، به دلیل تشکیل یک لایه‌ی بخار ناپایدار روی سطح جوشش و عدم تماس مایع با سطح، افزایش ناگهانی در دماهای ثبت شده توسط ترموکوپل‌ها مشاهده می‌شود و جوشش گذرا واقع می‌شود. در این مرحله، در صورتی که ولتاژ ثابت نگه داشته شود، دمای ترموکوپل‌ها همچنان افزایش می‌یابد. برای آن که بتوان جوشش فیلمی پایدار را مشاهده و بررسی نمود، لازم است که دمای سطح به اندازه‌ی کافی بالا باشد و لذا پس از وقوع شار حرارتی بحرانی، به فرایند جوشش زمان داده شده تا دمای بالاترین ترموکوپل به حدود ۴۰۰°C برسد. سپس، ولتاژ اعمالی کاهش داده شده تا نرخ افزایش دمای ترموکوپل‌ها کم‌تر شود. در این مرحله، با تغییر ولتاژ اعمالی (کاهش و افزایش ولتاژ)، دمای ترموکوپل‌ها تقریباً ثابت شده و فرایند جوشش در ناحیه‌ی جوشش فیلمی پایدار قرار می‌گیرد (نقطه‌ی A در شکل ۶). پس از رسیدن به شرایطی پایا، کاهش ولتاژ به صورت پلکانی اعمال شده تا فرایند جوشش فیلمی به شار حرارتی مینیمم برسد و بتوان منحنی هیسترزیس[1] جوشش فیلمی را مطابق شکل ۶ رسم نمود [۱۸].

۲-۵- اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل خطای داده‌ها

برای ترسیم منحنی جوشش، لازم است که دمای سطح جوشش تخمین زده شود. با فرض انتقال حرارت یک‌بعدی در کارتریج مسی و با اندازه‌گیری دمای ترموکوپل‌های تعبیه شده در زیر سطح جوشش می‌توان دمای سطح را تخمین زد. در شکل ۷، شماتیک محل قرارگیری ترموکوپل‌ها در کارتریج مسی نشان داده شده است. مطابق شکل ۷، T_1، T_2 و T_3 به ترتیب دمای ترموکوپل‌های ۱، ۲ و ۳ است و T_s، نشان‌دهنده‌ی دمای سطح جوشش است.

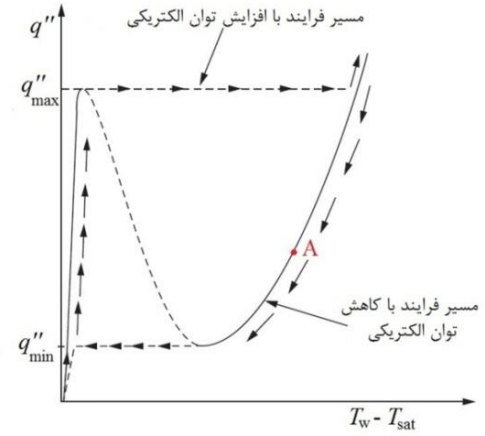
با فرض انتقال حرارت یک‌بعدی در کارتریج مسی، شار حرارتی از رابطه‌ی ۲ قابل محاسبه است:

$$q'' = -k\frac{T_3 - T_1}{\Delta Z_{1-3}} \qquad (۲)$$

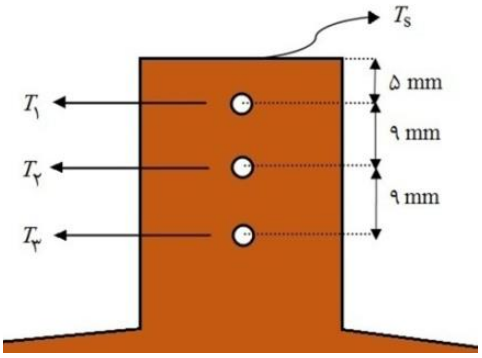
در رابطه‌ی ۲، k ضریب هدایت حرارتی مس و ΔZ_{1-3} فاصله‌ی بین ترموکوپل‌های ۱ و ۳ است.

[1] Hysteresis

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.1.7]



شکل ۶- شماتیک منحنی جوشش استخری [۱۸]



شکل ۷- شماتیک قرارگیری ترموکوپل‌ها در کارتریج مسی

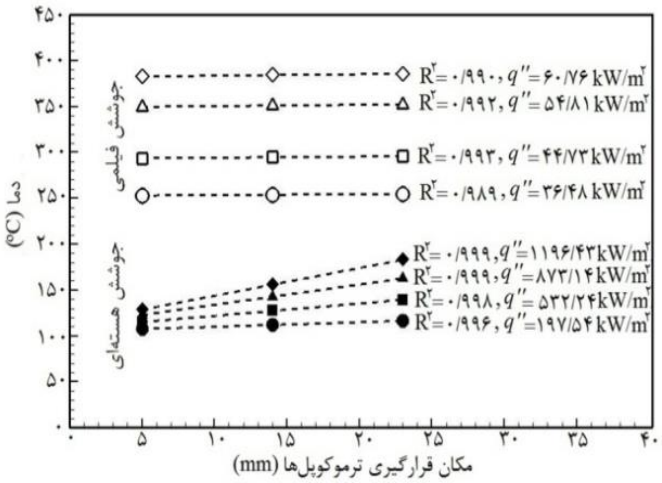
برای تخمین دمای سطح در هر شار حرارتی ثابت، می‌توان از قانون فوریه استفاده کرد:

$$T_s = T_1 - \frac{q''\Delta Z_{s-1}}{k} \quad (۳)$$

در رابطه‌ی ۳، ΔZ_{s-1} فاصله‌ی بین سطح جوشش و ترموکوپل ۱ است.
ضریب انتقال حرارت جوشش نیز از رابطه‌ی ۴ قابل محاسبه است:

$$h = \frac{q''}{(T_s - T_{sat})} \quad (۴)$$

برای اطمینان از صحت فرض انتقال حرارت یک‌بعدی در کارتریج، نمودار تغییرات دمای ترموکوپل‌ها بر حسب مکان قرارگیری آن‌ها روی کارتریج برای شارهای حرارتی مختلف در نواحی جوشش هسته‌ای و فیلمی در شکل ۸ ترسیم شده است. مطابق شکل ۸، با روش حداقل مربعات، میزان انحراف برای جوشش هسته‌ای و فیلمی به ترتیب بیشتر از ۹۹٪ و ۹۸٪ به دست آمده که نشان‌دهنده‌ی صحت فرض انتقال حرارت یک‌بعدی است. به عبارت دیگر، اتلاف حرارت بسیار کم بوده و عایق-بندی به خوبی انجام شده است.



شکل ۸- تغییرات خطی دمای ترموکوپل‌ها بر حسب مکان قرارگیری روی کارتریج

در جدول ۳، عدم قطعیت داده‌های آزمایشات تحقیق حاضر ارائه شده است. لازم به توضیح است که سوراخ‌های محل قرار-گیری ترموکوپل‌ها در بلوک مسی توسط ماشین‌کاری کنترل عددی CNC ایجاد شده است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.1.7]

جدول ۳- عدم قطعیت داده‌های آزمایش

پارامتر	عدم قطعیت
دمای ترموکوپل‌ها (°C)	±۰/۱°C
ولتاژ (V)	±٪۱
شدت جریان الکتریکی (I)	±٪۰/۱
ماشین‌کاری CNC	±۰/۱ mm

فرض ثابت ماندن ضریب هدایت حرارتی مس در حین آزمایش، ممکن است باعث ایجاد خطا در نتایج آزمایش شود و لذا عدم قطعیت آن محاسبه شده است. مقدار ضریب هدایت حرارتی مس در ۱۰۰°C و ۳۰۰°C به ترتیب ۳۹۵/۸۹ W/m.°C و ۳۸۲/۸۹ W/m.°C است [۱۹]. در آزمایشات جوشش هسته‌ای، ضریب هدایت حرارتی مس ثابت در نظر گرفته شده و عدم قطعیت آن ٪۳/۲۸ است. با توجه به این که در آزمایشات جوشش فیلمی، تغییرات دمای سطح جوشش زیاد است، لذا تغییرات ضریب هدایت حرارتی مس با دما قابل صرف نظر نیست و مقدار آن به ازای هر دمای معلوم از جداول مرجع [۱۹] میان‌یابی شده و عدم قطعیت آن ٪۰/۰۶۳ می‌باشد.

در تحقیق حاضر، عدم قطعیت پارامترهای جوشش با استفاده از روش موفات [۲۰] محاسبه شده است. همان‌طور که از رابطه‌ی هدایت حرارتی فوریه مشخص می‌شود، میزان خطای شار حرارتی به خطاهای ضریب هدایت حرارتی مس، دماها و موقعیت قرارگیری ترموکوپل‌ها وابسته است. لذا عدم قطعیت شار حرارتی با استفاده از رابطه‌ی ۶ قابل محاسبه است:

$$q'' = f\,(k, \Delta T, \Delta Z) \tag{۵}$$

$$\frac{U_{q''}}{q''} = \sqrt{\left(\frac{U_{T_2 - T_1}}{T_2 - T_1}\right)^2 + \left(\frac{U_{Z_2 - Z_1}}{Z_2 - Z_1}\right)^2 + \left(\frac{U_k}{k}\right)^2} \tag{۶}$$

برای محاسبه‌ی عدم قطعیت اختلاف دمای مازاد (ΔT_s) و ضریب انتقال حرارت جوشش (h)، با فرض انتقال حرارت یک‌بعدی می‌توان از روابط ۷ و ۸ استفاده نمود:

$$\frac{U_{\Delta T_s}}{\Delta T_s} = \sqrt{\left(\frac{U_{T_1 - T_{sat}}}{T_1 - T_{sat}}\right)^2 + \left(\frac{U_{z_1}}{Z_1}\right)^2 + \left(\frac{U_k}{k}\right)^2} \tag{۷}$$

$$\frac{U_h}{h} = \sqrt{\left(\frac{U_{q''}}{q''}\right)^2 + \left(\frac{U_{\Delta T_s}}{\Delta T_s}\right)^2} \tag{۸}$$

در جدول ۴، عدم قطعیت شار حرارتی، اختلاف دمای مازاد و ضریب انتقال حرارت برای هر دو رژیم جوشش هسته‌ای و فیلمی ارائه شده است. مقادیر ارائه شده در جدول ۴ نشان‌دهنده‌ی حداکثر خطا است.

جدول ۴- عدم قطعیت پارامترها در جوشش هسته‌ای و فیلمی

پارامتر	جوشش هسته‌ای	جوشش فیلمی
شار حرارتی (kW/m^2)	±٪۸/۶	±٪۱۱/۷
اختلاف دمای مازاد (°C)	±٪۴/۵	±٪۲
ضریب انتقال حرارت ($kW/m^2.°C$)	±٪۹/۷	±٪۱۱/۹

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.1.7]

۳- صحت سنجی نتایج

در تحقیق حاضر، صحت سنجی داده‌های آزمایشگاهی برای هر دو رژیم جوشش هسته‌ای و فیلمی انجام شده است. برای این منظور، داده‌های جوشش آب دیونیزه‌ی خالص روی سطح ساده‌ی مس با روابط تجربی معتبر و نتایج سایر محققان مقایسه شده است. قبل از انجام آزمایشات، سطح ساده‌ی مس توسط سنباده‌ی ۱۵۰۰ دانه پولیش داده شده تا کاملاً صیقلی شود.

با استفاده از رابطه‌ی تجربی روزنو [۲۱]، شار حرارتی جوشش هسته‌ای بر حسب اختلاف دمای مازاد مطابق رابطه‌ی ۹ قابل محاسبه است:

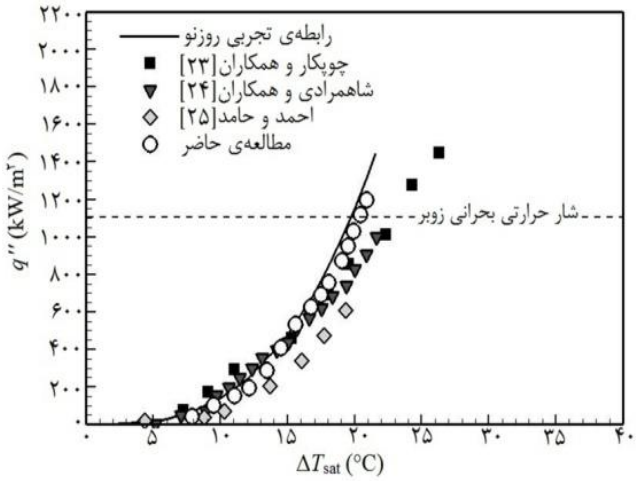
$$\left[\frac{c_{pl}\Delta T_{sat}}{i_{lv}}\right]=C_{sf}\left[\frac{q''}{\mu_l i_{lv}}\sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l-\rho_v)}}\right]^{n}\left[\frac{c_p\mu}{k}\right]_l^{m+1} \qquad (۹)$$

در رابطه‌ی ۹، μ_l، c_{pl} ، k و ρ_l به ترتیب ظرفیت حرارتی ویژه، لزجت، ضریب هدایت حرارتی و چگالی مایع است و ρ_v چگالی بخار، i_{lv} حرارت نهان تبخیر و σ کشش سطحی است. برای جوشش آب $n=۰/۳۳$ ، $m=۰$ و ضریب تصحیح سطح و سیال برای ترکیب آب-مس $C_{sf}=۰/۰۱۳$ است.

با استفاده از رابطه‌ی تجربی زوبر [۲۲]، شار حرارتی بحرانی برای آب خالص مطابق رابطه‌ی ۱۰ قابل محاسبه است:

$$q''_{max}=۰/۱۳۱ i_{lv}\rho_v^{۰/۵}\left[\sigma g(\rho_l-\rho_v)\right]^{۰/۲۵} \qquad (۱۰)$$

در شکل ۹، منحنی جوشش هسته‌ای آب دیونیزه‌ی خالص روی سطح ساده‌ی مس با رابطه‌ی تجربی روزنو و نتایج تجربی سایر محققان [۲۳-۲۵] مقایسه شده است. بیشترین اختلاف داده‌های تحقیق حاضر با رابطه‌ی روزنو ۹/۷٪ است که نشان-دهنده‌ی صحت نتایج است. همچنین، با مقایسه‌ی داده‌های مطالعه‌ی حاضر با نتایج سایر محققان مشخص می‌شود که داده‌ها از دقت قابل قبولی برخوردار است. شار حرارتی بحرانی برای جوشش آب خالص روی سطح ساده‌ی مس با استفاده از رابطه‌ی تجربی زوبر ۱۱۰۸ kW/m^2 محاسبه شده که با مقدار به دست آمده از آزمایشات مطالعه‌ی حاضر ۷/۹٪ اختلاف دارد.



شکل ۹- مقایسه‌ی منحنی جوشش هسته‌ای مطالعه‌ی حاضر با رابطه‌ی تجربی روزنو و نتایج سایر محققان

با استفاده از رابطه‌ی تجربی برنسون [۲۶]، ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی (h_{fb}) بر حسب اختلاف دمای مازاد قابل محاسبه است:

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

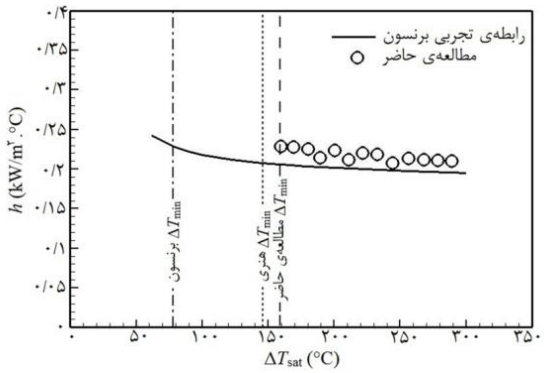
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.1.7]

$$h_{fb} = ۰/۴۲۵\left[\frac{k_v^{۳}\rho_v \Delta\rho g i'_{lv}}{\mu_v \Delta T_{sat}\sqrt{\sigma/g(\Delta\rho)}}\right]^{\frac{۱}{۴}} \quad (۱۱)$$

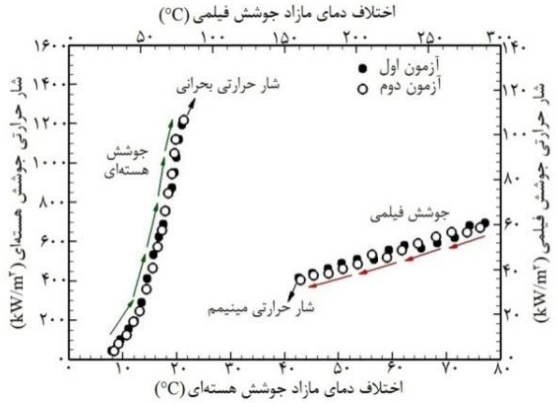
در رابطه‌ی ۱۱، i'_{lv} حرارت نهان تبخیر مؤثر است.
هنری [۲۷]، با در نظر گرفتن اثرات خواص ترموفیزیکی سطح جامد، رابطه‌ی ۱۲ را برای محاسبه‌ی دمای مینیمم جوشش فیلمی ارائه داده است:

$$\frac{T_{min}-T^*_{min}}{T^*_{min}-T_l} = ۰/۴۲\left[\sqrt{\frac{(\rho ck)_f}{(\rho ck)_w}}\frac{i_{lv}}{C_w(T^*_{min}-T_{sat})}\right]^{۰/۶} \quad (۱۲)$$

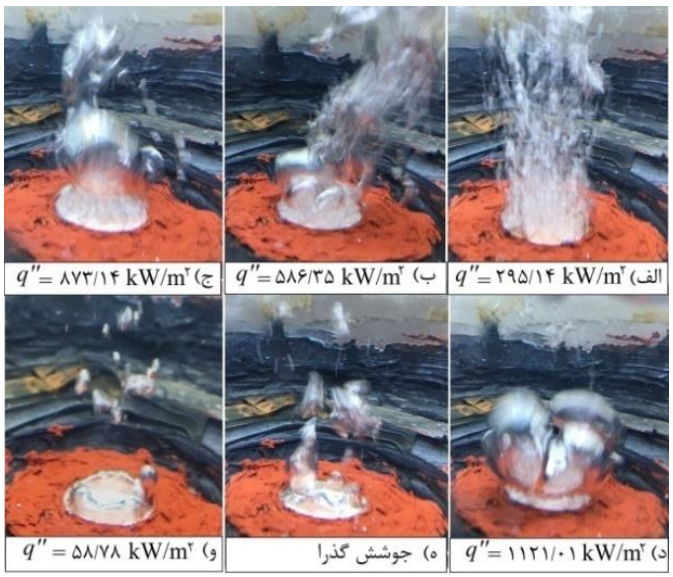
در رابطه‌ی ۱۲، T^*_{min} دمای مینیمم جوشش فیلمی است که با استفاده از روابط برنسون به دست می‌آید. اندیس f برای مایع اشباع و w برای سطح جامد است.



شکل ۱۰- مقایسه‌ی منحنی ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی مطالعه‌ی حاضر با رابطه‌ی تجربی برنسون



شکل ۱۱- تکرارپذیری جوشش آب دیونیزه‌ی خالص روی سطح ساده‌ی مس



شکل ۱۲- نحوه‌ی شکل‌گیری حباب‌ها و فیلم بخار روی سطح ساده‌ی مس

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.1.7]

در شکل ۱۰، منحنی ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی آب دیونیزه‌ی خالص روی سطح ساده‌ی مس با رابطه‌ی تجربی برنسون مقایسه شده که حداکثر خطا ۱۰/۷٪ می‌باشد. مقدار اختلاف دمای مازاد شروع جوشش فیلمی ($\Delta T_{\min}$) برای آب خالص با استفاده از روابط برنسون و بدون در نظر گرفتن اثرات جنس سطح ۷۷/۰۲°C و با استفاده از رابطه‌ی هنری و در نظر گرفتن خواص ترموفیزیکی مس ۱۴۶°C به دست آمده است. در مطالعه‌ی حاضر، مقدار $\Delta T_{\min}$ برای جوشش آب خالص روی سطح ساده‌ی مس ۱۵۹/۷°C است که با مقدار به دست آمده از رابطه‌ی هنری ۹/۳٪ اختلاف دارد.

به منظور بررسی آزمون تکرارپذیری، آزمایشات در دو روز مختلف انجام شده است. مطابق شکل ۱۱، نتایج آزمون تکرارپذیری جوشش آب دیونیزه‌ی خالص روی سطح ساده‌ی مس نشان می‌دهد که میزان خطا برای شار حرارتی بحرانی ±۱/۹٪ و برای شار حرارتی مینیمم ±۲/۸٪ است که نشان‌دهنده‌ی دقت خوب نتایج است.

در شکل ۱۲، تصاویری از نحوه‌ی شکل‌گیری حباب‌ها روی سطح ساده‌ی مس در شارهای حرارتی مختلف نشان داده شده است. در شارهای حرارتی کم (شکل ۱۲ الف)، حباب‌ها ریزتر بوده و با افزایش شار حرارتی، حباب‌های ریز در یکدیگر ادغام شده و حباب‌های بزرگ‌تر تشکیل شده است (شکل ۱۲ ب تا د). پس از عبور از شار حرارتی بحرانی و ناحیه‌ی جوشش گذرا، لایه‌ای از بخار پایدار روی سطح جوشش را پوشانده و جوشش فیلمی واقع شده است (شکل ۱۲ و).

۴- نتایج

۴-۱- نتایج جوشش هسته‌ای روی سطح میکروکانال

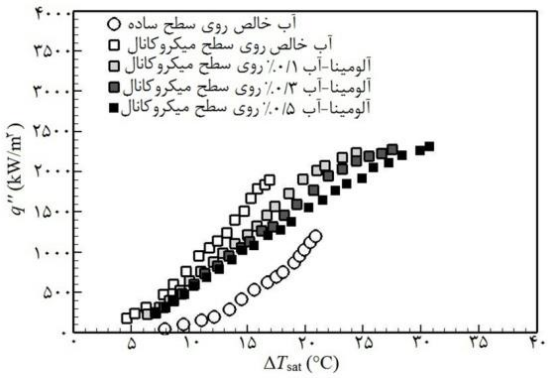
در شکل ۱۳، منحنی جوشش هسته‌ای نانوسیال آلومینا-آب دیونیزه با سه غلظت مختلف روی سطح میکروکانال و آب دیونیزه‌ی خالص روی سطوح ساده و میکروکانال ترسیم شده است. مطابق شکل ۱۳، در یک اختلاف دمای مازاد ثابت، شار حرارتی آب دیونیزه‌ی خالص برای سطح میکروکانال نسبت به سطح ساده افزایش قابل توجهی داشته است. به عبارت دیگر، در سطح میکروکانال، فرایند هسته‌زایی در اختلاف دمای مازاد کم‌تری شروع شده است. در واقع، پره‌های میکروکانال به عنوان یک مانع در برابر ادغام شدن حباب‌ها عمل کرده و حباب‌های بزرگ‌تر در شارهای حرارتی بالاتری تشکیل شده است. به همین دلیل، حضور سطح میکروکانال در جوشش آب دیونیزه‌ی خالص، شار حرارتی بحرانی را افزایش داده است. مقدار شار حرارتی بحرانی آب دیونیزه‌ی خالص برای سطح ساده ۱۱۹۶/۴۳ kW/m^2 است که در اختلاف دمای مازاد ۲۰/۸۹°C به دست آمده و برای سطح میکروکانال ۱۸۹۸/۰۷ kW/m^2 است که در اختلاف دمای مازاد ۱۶/۹۳°C به دست آمده است. شکل ۱۳ همچنین نشان می‌دهد که حضور نانوسیال آلومینا-آب دیونیزه در فرایند جوشش روی سطح میکروکانال، وقوع شار حرارتی بحرانی را به تعویق انداخته و این امر باعث شده که مقدار شار حرارتی بحرانی نانوسیال در مقایسه با آب دیونیزه‌ی خالص افزایش یابد. مقدار شار حرارتی بحرانی برای سطح میکروکانال در حضور نانوسیال آلومینا-آب دیونیزه با غلظت‌های ۰/۱٪، ۰/۳٪ و ۰/۵٪ به ترتیب ۲۲۳۴/۵۸ kW/m^2، ۲۲۸۰/۷۷ kW/m^2 و ۲۳۰۹/۳۶ kW/m^2 است که در اختلاف دمای مازاد به ترتیب ۲۴/۳۸°C، ۲۷/۴۹C و ۳۰/۷۳°C به دست آمده است.

در شکل ۱۴، منحنی ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای بر حسب شار حرارتی برای نانوسیال آلومینا-آب دیونیزه با سه غلظت مختلف روی سطح میکروکانال و آب دیونیزه‌ی خالص روی سطوح ساده و میکروکانال ترسیم شده است. مطابق شکل ۱۴، حضور سطح میکروکانال در فرایند جوشش، ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای آب دیونیزه‌ی خالص را افزایش داده است. بیشترین مقدار ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای آب دیونیزه‌ی خالص برای سطوح ساده و میکروکانال به ترتیب ۵۷/۲۷ $kW/m^{2.}°C$ و ۱۱۲/۱ $kW m^{2.°} C$ است. در حین وقوع پدیده‌ی جوشش روی سطح میکروکانال، دمای کف کانال‌ها از دمای نوک پره‌ها بیشتر است و لذا حباب‌ها بیشتر در کف کانال‌ها تشکیل می‌شوند و مطابق شکل ۱۵ از مرکز کانال به سمت بالا می‌گریزند. از طرفی دیگر، وجود نیروی مویینگی در میکروکانال باعث می‌شود که مایع از کناره‌های کانال به درون کانال کشیده شود و جایگزین حباب‌های بالا رونده شود. این سیکل چرخشی باعث می‌شود که فرکانس تولید حباب افزایش یابد و در نتیجه، ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای بهبود یابد. همچنین، همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، حضور نانوسیال آلومینا-آب دیونیزه در فرایند جوشش روی سطح میکروکانال، ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای را کاهش داده

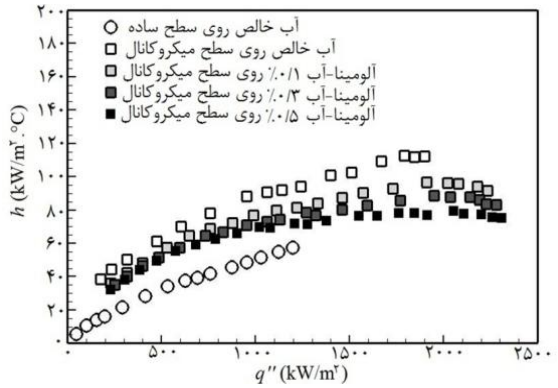
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.1.7]

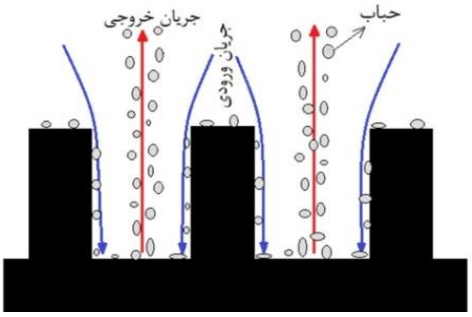
است. با افزایش غلظت نانوسیال، این اثر کاهشی بیشتر قابل مشاهده است. دلیل این کاهش، نشست نانوذرات روی سطح میکروکانال است که با آب‌دوست‌تر نمودن سطح و ایجاد یک نانولایه‌ی عایق، عملکرد جوشش هسته‌ای را تخریب کرده است. در شارهای حرارتی بالاتر، کاهش بیشتری قابل مشاهده است، زیرا با آغاز فرایند جوشش و گذشت زمان، نانوذرات بیشتری روی سطح نشست می‌کنند. بیشترین مقدار ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای برای سطح میکروکانال در حضور نانوسیال آلومینا-آب دیونیزه با غلظت‌های ۰/۱٪، ۰/۳٪ و ۰/۵٪ به ترتیب ۹۶/۴۶ kW/m^{۲}.°C، ۸۸/۶۴ kW/m^{۲}.° C و ۷۹/۳۴ kW/m^{۲}.° C است.



شکل ۱۳- منحنی جوشش هسته‌ای نانوسیال آلومینا-آب و آب خالص روی سطح میکروکانال



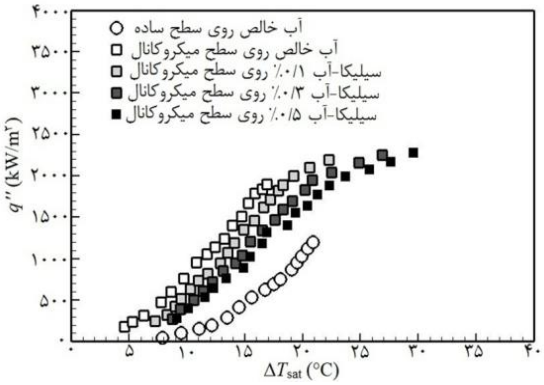
شکل ۱۴- منحنی ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای بر حسب شار حرارتی برای نانوسیال آلومینا-آب و آب خالص روی سطح میکروکانال



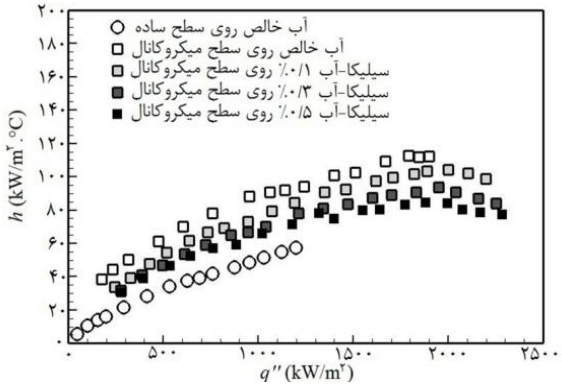
شکل ۱۵- شماتیک مسیر جریان بخار-مایع در میکروکانال

در شکل ۱۶، منحنی جوشش هسته‌ای نانوسیال سیلیکا-آب دیونیزه با سه غلظت مختلف روی سطح میکروکانال ترسیم شده و با منحنی جوشش آب دیونیزه‌ی خالص روی سطوح ساده و میکروکانال مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، حضور نانوسیال سیلیکا-آب دیونیزه در فرایند جوشش روی سطح میکروکانال، شار حرارتی بحرانی را افزایش داده است. با افزایش غلظت، مقدار شار حرارتی بحرانی افزایش یافته به طوری که مقدار آن برای غلظت‌های ۰/۱٪، ۰/۳٪ و ۰/۵٪ به ترتیب ۲۱۹۷/۱۹ kW/m^{۲}، ۲۲۵۲/۱۷ kW/m^{۲} و ۲۲۸۲/۹۷ kW/m^{۲} است. اختلاف دمای مازاد برای وقوع شار حرارتی بحرانی نانوسیال سیلیکا-آب دیونیزه در غلظت‌های ۰/۱٪، ۰/۳٪ و ۰/۵٪ به ترتیب ۲۲/۲۵°C، ۲۶/۸۵C و ۲۹/۵۶C به دست آمده است. در واقع، حضور نانوذرات سیلیکا در سیال پایه باعث شده که شار حرارتی بحرانی در اختلاف دمای مازاد بیشتری در مقایسه با آب دیونیزه‌ی خالص واقع شود و این امر دلیل اصلی افزایش شار حرارتی بحرانی نانوسیال سیلیکا-آب دیونیزه در مقایسه با آب دیونیزه‌ی خالص است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.1.7]



شکل ۱۶- منحنی جوشش هسته‌ای نانوسیال سیلیکا-آب روی سطح میکروکانال



شکل ۱۷- منحنی ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای بر حسب شار حرارتی برای نانوسیال سیلیکا-آب روی سطح میکروکانال

در شکل ۱۷، منحنی ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای بر حسب شار حرارتی برای نانوسیال سیلیکا-آب دیونیزه با سه غلظت مختلف روی سطح میکروکانال ترسیم شده و با جوشش آب دیونیزه‌ی خالص روی سطوح ساده و میکروکانال مقایسه شده است. مطابق شکل ۱۷، حضور نانوسیال سیلیکا-آب دیونیزه در فرایند جوشش روی سطح میکروکانال، ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای را در مقایسه با جوشش آب دیونیزه‌ی خالص روی سطح میکروکانال کاهش داده است. بیشترین مقدار ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای برای سطح میکروکانال در حضور نانوسیال سیلیکا-آب دیونیزه با غلظت‌های ۰/۱٪، ۰/۳٪ و ۰/۵٪ به ترتیب ۱۰۴/۱۶ kW/m².°C، ۹۳/۷۵ kW/m².°C و ۸۴/۳۰ kW/m².°C است.

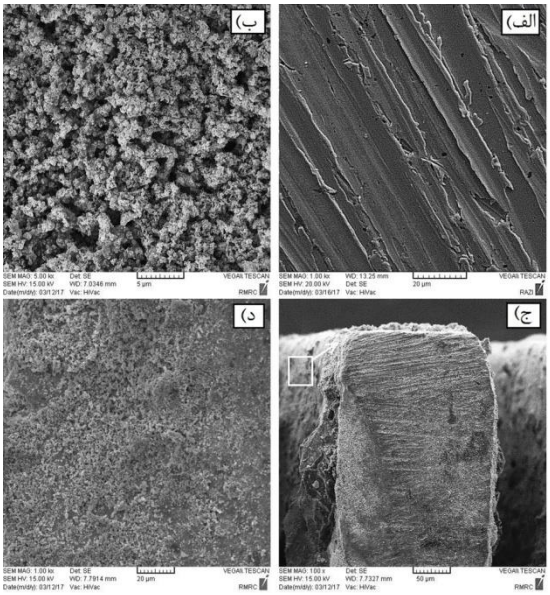
۴-۲- اثرات سطح جوشش

علاوه بر خواص سیال، بررسی خصوصیات سطح جوشش نیز عاملی مهم برای درک عمیق‌تر عملکرد انتقال حرارت جوشش است. لذا همان‌طور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، به منظور بررسی مورفولوژی سطح، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح میکروکانال قبل و بعد از جوشش نانوسیال آلومینا-آب دیونیزه ارائه شده است. مطابق شکل ۱۸، نشست نانوذرات روی کف و پره‌ی میکروکانال قابل مشاهده است. نشست نانوذرات، مورفولوژی سطح را تغییر داده و یک نانولایه‌ی عایق روی سطح ایجاد کرده است. در فرایند جوشش، میزان ترشوندگی سطح، عامل مؤثری است که در اثر نشست نانوذرات تغییر می‌یابد. لذا، به منظور بررسی تغییر میزان ترشوندگی سطح، تست قطره نیز انجام شده است. مطابق شکل ۱۹، زاویه‌ی تماس قطره‌ی آب و سطح، قبل از جوشش °۸۳ و بعد از جوشش نانوسیالات آلومینا-آب دیونیزه و سیلیکا-آب دیونیزه به ترتیب °۲۵ و °۲۸ است. بنابراین، نتایج تست قطره حاکی از آن است که نشست نانوذرات، میزان ترشوندگی سطح را افزایش داده است.

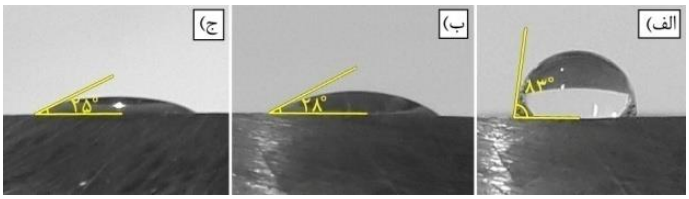
حضور نانوذرات در سیال پایه باعث می‌شود که هدایت حرارتی، جابه‌جایی و توربولانس در سیال افزایش یابد. اما از طرفی دیگر، نشست نانوذرات روی سطح باعث می‌شود که ترشوندگی سطح افزایش و چگالی سایت‌های هسته‌زایی کاهش یابد که اثرات مخربی روی عملکرد جوشش دارد. به عبارت دیگر، رقابت بین دو عامل بهبود خواص حرارتی سیال و کاهش تعداد سایت‌های هسته‌زایی سطح تعیین می‌کند که حضور نانوسیال در فرایند جوشش، انتقال حرارت را افزایش یا کاهش دهد. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که در جوشش هسته‌ای روی سطح میکروکانال، اثر کاهشی بر اثر افزایشی غلبه کرده و ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای نانوسیالات آلومینا-آب دیونیزه و سیلیکا-آب دیونیزه در تمامی غلظت‌های مورد بررسی نسبت به آب دیونیزه‌ی خالص کاهش یافته است. در واقع، آب‌دوست‌تر شدن سطح باعث شده که قطره به سرعت روی سطح پخش شود و سایت‌های هسته‌زایی توسط سیال پر و غیر فعال شود و در نتیجه، ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای کاهش یابد. علاوه بر این، با نشست نانوذرات و آب‌دوست‌تر شدن سطح، اندازه و زمان رشد حباب‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه، فرکانس جدایش حباب‌ها کاهش می‌یابد و وقوع شار حرارتی بحرانی به تعویق می‌افتد. به همین دلیل، شار حرارتی بحرانی برای هر دو نانوسیال

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.1.7]

آلومینا-آب دیونیزه و سیلیکا-آب دیونیزه در هر سه غلظت مورد بررسی در مقایسه با آب دیونیزه‌ی خالص در دماهای بالاتری واقع شده که دلیل اصلی افزایش شار حرارتی بحرانی نانوسیالات است.



شکل ۱۸- تصاویر SEM از سطح جوشش: الف) کف میکروکانال قبل از جوشش، ب) کف میکروکانال بعد از جوشش نانوسیال آلومینا-آب، ج و د) پره‌ی میکروکانال بعد از جوشش نانوسیال آلومینا-آب



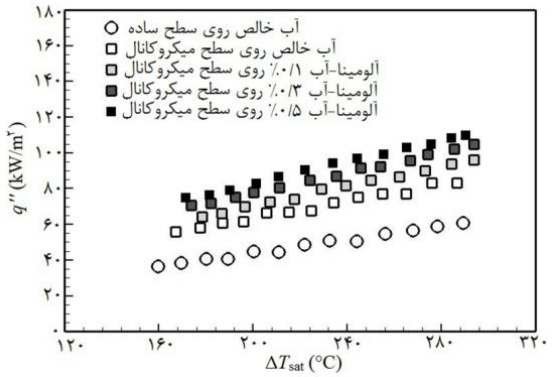
شکل ۱۹- زاویه‌ی تماس استاتیکی قطره‌ی آب روی سطح: الف) قبل از جوشش، ب) بعد از جوشش نانوسیال سیلیکا-آب، ج) بعد از جوشش نانوسیال آلومینا-آب

۴-۳- نتایج جوشش فیلمی روی سطح میکروکانال

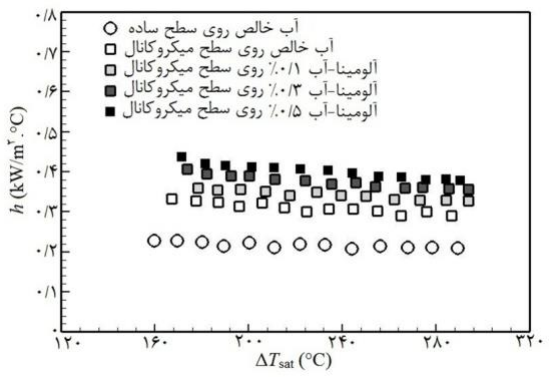
در شکل ۲۰، منحنی جوشش فیلمی نانوسیال آلومینا-آب دیونیزه با سه غلظت مختلف روی سطح میکروکانال و آب دیونیزه‌ی خالص روی سطوح ساده و میکروکانال ترسیم شده است. مطابق شکل ۲۰، حضور سطح میکروکانال در جوشش آب دیونیزه‌ی خالص، شار حرارتی مینیمم را افزایش داده است. مقدار شار حرارتی مینیمم برای آب دیونیزه‌ی خالص در حضور سطوح ساده و میکروکانال به ترتیب $۳۶/۴۸\ kW/m^۲$ و $۵۵/۷۱\ kW/m^۲$ است که در اختلاف دمای مازاد به ترتیب ۱۵۹/۷۰°C و ۱۶۷/۰۸°C به دست آمده است. به دلیل این که دمای کف کانال بیشتر از دمای دیواره‌ی کانال می‌باشد، فیلم بخار ابتدا در کف کانال تشکیل می‌شود و سپس در امتداد دیواره گسترش می‌یابد. به عبارت دیگر، پره‌های میکروکانال مانند یک مانع در برابر تشکیل فیلم بخار عمل می‌کنند. به همین دلیل، در جوشش فیلمی آب دیونیزه‌ی خالص روی سطح میکروکانال، شار حرارتی مینیمم در اختلاف دمای مازاد بیشتری نسبت به سطح ساده واقع شده است. شکل ۲۰ همچنین نشان می‌دهد که حضور نانوسیال آلومینا-آب دیونیزه در فرایند جوشش روی سطح میکروکانال، دمای مینیمم جوشش فیلمی و شار حرارتی مینیمم را افزایش داده است. آب‌دوست‌تر شدن سطح، وقوع شار حرارتی مینیمم را به تعویق انداخته و دمای مینیمم جوشش فیلمی نانوسیالات را در مقایسه با آب دیونیزه‌ی خالص افزایش داده است. مقدار شار حرارتی مینیمم برای سطح

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.1.7]

میکروکانال در حضور نانوسیال آلومینا-آب دیونیزه با غلظت‌های ۰/۱٪، ۰/۳٪ و ۰/۵٪ به ترتیب ۶۴/۱۵ kW/m^2، ۷۰/۶۲ kW/m^2 و ۷۴/۹۰ kW/m^2 است که در اختلاف دمای مازاد به ترتیب ۱۷۸/۳۷°C، ۱۷۳/۶۸°C و ۱۷۱/۴۸°C به دست آمده است.



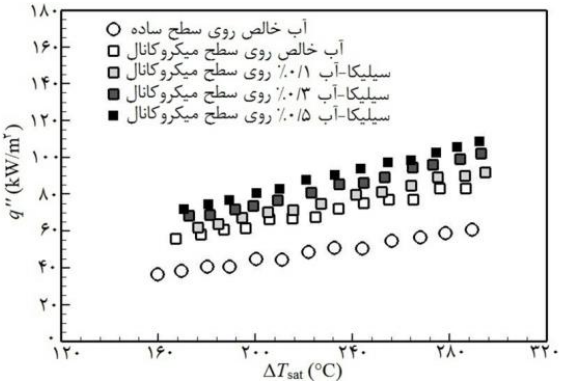
شکل ۲۰- منحنی جوشش فیلمی نانوسیال آلومینا-آب و آب خالص روی سطح میکروکانال



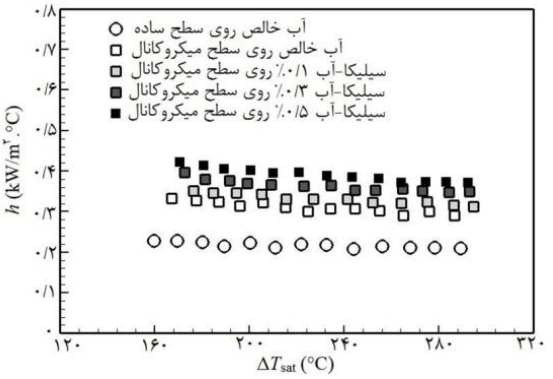
شکل ۲۱- منحنی ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی بر حسب اختلاف دمای مازاد برای نانوسیال آلومینا-آب و آب خالص روی سطح میکروکانال

در شکل ۲۱، منحنی ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی بر حسب اختلاف دمای مازاد برای نانوسیال آلومینا-آب دیونیزه با سه غلظت مختلف روی سطح میکروکانال و آب دیونیزه‌ی خالص روی سطوح ساده و میکروکانال ترسیم شده است. مطابق شکل ۲۱، حضور سطح میکروکانال در جوشش آب دیونیزه‌ی خالص، ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی را در مقایسه با سطح ساده افزایش داده است. بیشترین مقدار ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی آب دیونیزه‌ی خالص برای سطح میکروکانال ۰/۳۳۳ kW/m^2.°C و برای سطح ساده ۰/۲۲۸ kW/m^2.°C به دست آمده است. شکل ۲۱ همچنین نشان می‌دهد که حضور نانوسیال آلومینا-آب دیونیزه در فرایند جوشش روی سطح میکروکانال، ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی را افزایش داده است. بیشترین مقدار ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی برای نانوسیال آلومینا-آب دیونیزه با غلظت‌های ۰/۱٪، ۰/۳٪ و ۰/۵٪ به ترتیب ۰/۳۶۰ kW/m^2.°C، ۰/۴۰۷ kW/m^2.°C و ۰/۴۳۷ kW/m^2.°C است.

در شکل ۲۲، منحنی جوشش فیلمی نانوسیال سیلیکا-آب دیونیزه با سه غلظت مختلف روی سطح میکروکانال ترسیم شده و با جوشش آب دیونیزه‌ی خالص روی سطوح ساده و میکروکانال مقایسه شده است. مطابق شکل ۲۲، حضور نانوسیال سیلیکا-آب دیونیزه در فرایند جوشش روی سطح میکروکانال، دمای مینیمم جوشش فیلمی و شار حرارتی مینیمم را افزایش داده است. مقدار شار حرارتی مینیمم برای سطح میکروکانال در حضور نانوسیال سیلیکا-آب دیونیزه با غلظت‌های ۰/۱٪، ۰/۳٪ و ۰/۵٪ به ترتیب ۶۲/۰۳ kW/m^2، ۶۸/۵۰ kW/m^2 و ۷۱/۹۲ kW/m^2 است که در اختلاف دمای مازاد به ترتیب ۱۷۶/۲۹°C، ۱۷۲/۷۱°C و ۱۷۰/۵۰°C به دست آمده است.



شکل ۲۲- منحنی جوشش فیلمی نانوسیال سیلیکا-آب روی سطح میکروکانال



شکل ۲۳- منحنی ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی بر حسب اختلاف دمای مازاد برای نانوسیال سیلیکا-آب روی سطح میکروکانال

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.1.7]

در شکل ۲۳، منحنی ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی بر حسب اختلاف دمای مازاد برای نانوسیال سیلیکا-آب دیونیزه با سه غلظت مختلف روی سطح میکروکانال ترسیم شده و با جوشش آب دیونیزه‌ی خالص روی سطوح ساده و میکروکانال مقایسه است. مطابق شکل ۲۳، حضور نانوسیال سیلیکا-آب دیونیزه در فرایند جوشش روی سطح میکروکانال، ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی را افزایش داده است. بیشترین مقدار ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی برای سطح میکروکانال در حضور نانوسیال سیلیکا-آب دیونیزه با غلظت‌های ۰/۱٪، ۰/۳٪ و ۰/۵٪ به ترتیب ۰/۳۵۲ kW/m^{2}.°C، ۰/۳۹۷ kW/m^{2}.°C و ۰/۴۲۲ kW/m^{2}.°C است.

وقوع جوشش فیلمی در دماهای بالا، باعث می‌شود که یک لایه‌ی بخار پایدار روی سطح جوشش تشکیل شود و تماسی بین مایع و سطح جامد وجود نداشته باشد. عدم تماس مستقیم جامد-مایع، باعث می‌شود که سایت‌های هسته‌زایی توسط قطرات مایع پر و غیر فعال نشوند. به همین دلیل، در جوشش فیلمی، آب‌دوست‌تر شدن سطح اثرات مخرب قابل توجهی روی فرایند حباب‌سازی نداشته است. در نتیجه، عامل بهبود خواص حرارتی نانوسیالات توانسته بر عامل مخرب غیر فعال شدن سایت‌های هسته‌زایی غلبه کند، به طوری که برای هر دو نانوسیال آلومینا-آب دیونیزه و سیلیکا-آب دیونیزه در هر سه غلظت مورد بررسی، ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی در مقایسه با آب دیونیزه‌ی خالص افزایش یافته است.

در جوشش فیلمی، انتقال حرارت عمدتاً توسط هدایت و جابه‌جایی از طریق فیلم بخار انجام می‌شود. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که حضور نانوذرات در سیال پایه، عملکرد انتقال حرارت هدایت و جابه‌جایی را در جوشش فیلمی بهبود می‌دهد. قابلیت حرکت براونی[1] نانوذرات در سیال پایه، باعث می‌شود که توربولانس و اختلاط در سیال افزایش یابد. از طرفی دیگر، نانوذرات معلق در سیال از سطح جوشش تا سطح آزاد سیال به صورت زنجیره‌ای به یکدیگر متصل می‌شوند و نرخ انتقال حرارت را افزایش می‌دهند، زیرا ضریب هدایت حرارتی نانوذرات نسبت به آب خالص بیشتر است. به همین دلیل، مقدار شار حرارتی مینیمم برای هر دو نانوسیال آلومینا-آب دیونیزه و سیلیکا-آب دیونیزه در هر سه غلظت مورد بررسی در مقایسه با آب دیونیزه‌ی خالص افزایش یافته است.

۵- نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر، مشخصه‌های انتقال حرارت جوشش هسته‌ای و فیلمی نانوسیالات روی سطح میکروکانال به صورت تجربی بررسی شده است. برای این منظور، آزمایشات جوشش نانوسیالات آلومینا-آب دیونیزه و سیلیکا-آب دیونیزه با غلظت‌های حجمی ۰/۱٪، ۰/۳٪ و ۰/۵٪ روی سطح میکروکانال مسی انجام شده و با جوشش آب دیونیزه‌ی خالص روی سطوح ساده و میکروکانال مقایسه شده است. نتایج تحقیق حاضر را می‌توان به صورت زیر جمع‌بندی نمود:

- حضور سطح میکروکانال در جوشش آب دیونیزه‌ی خالص، ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای و فیلمی را به ترتیب ۹۵/۷۶٪ و ۴۶/۰۵٪ در مقایسه با سطح ساده افزایش داده است. همچنین، حضور سطح میکروکانال، شار حرارتی بحرانی و شار حرارتی مینیمم آب دیونیزه‌ی خالص را به ترتیب ۵۸/۶۴٪ و ۵۲/۷۱٪ در مقایسه با سطح ساده افزایش داده است.
- در جوشش نانوسیالات روی سطح میکروکانال، نشست نانوذرات روی سطح، میزان ترشوندگی سطح را افزایش داده و ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای را کاهش داده است. اما از طرفی دیگر، افزایش میزان ترشوندگی سطح، وقوع شار حرارتی بحرانی را به تعویق انداخته و مقدار شار حرارتی بحرانی نانوسیالات را در مقایسه با آب دیونیزه‌ی خالص افزایش داده است.
- برای هر دو نانوسیال، بیشترین مقدار افزایش شار حرارتی بحرانی در غلظت ۰/۵٪ به دست آمده است. ترکیب استفاده از سطح میکروکانال و نانوسیالات آلومینا-آب دیونیزه و سیلیکا-آب دیونیزه با غلظت ۰/۵٪، مقدار شار حرارتی بحرانی را به ترتیب ۹۳/۰۲٪ و ۹۰/۸۲٪ در مقایسه با جوشش آب دیونیزه‌ی خالص روی سطح ساده افزایش داده است.

[1] Brownian motion

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.1.7]

- در جوشش فیلمی نانوسیالات روی سطح میکروکانال، عامل بهبود خواص حرارتی نانوسیالات بر اثرات مخرب نشست نانوذرات غلبه کرده و ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی نانوسیالات نسبت به آب دیونیزه‌ی خالص افزایش یافته است.
- آب‌دوست‌تر شدن سطح، باعث شده که دمای مینیمم جوشش فیلمی نانوسیالات نسبت به آب دیونیزه‌ی خالص افزایش یابد. علاوه بر این، حضور نانوسیالات در جوشش فیلمی روی سطح میکروکانال، مقدار شار حرارتی مینیمم را افزایش داده است.
- برای هر دو نانوسیال، بیشترین مقدار افزایش شار حرارتی مینیمم در غلظت ۰/۵٪ به دست آمده است. ترکیب استفاده از سطح میکروکانال و نانوسیالات آلومینا-آب دیونیزه و سیلیکا-آب دیونیزه با غلظت ۰/۵٪، مقدار شار حرارتی مینیمم را به ترتیب ۱۰۵/۳۲٪ و ۹۷/۱۵٪ در مقایسه با جوشش آب دیونیزه‌ی خالص روی سطح ساده افزایش داده است.

فهرست علائم

علائم انگلیسی			
ضریب ثابت	C	موقعیت ترموکوپل‌ها در کارتریج، (m)	Z
ظرفیت حرارتی ویژه، (J/kg.°C)	c_p	دما، (°C)	T
شتاب گرانش، (m/s^2)	g	عدم قطعیت	U
ضریب انتقال حرارت جوشش، ($W/m^2.°C$)	h	حجم، (m^3)	V
حرارت نهان تبخیر، (J/kg)	i	علائم یونانی	
ضریب هدایت حرارتی، (W/m.°C)	k	لزجت دینامیکی، (kg/m.s)	μ
جرم، (kg)	m	چگالی، (kg/m^3)	ρ
شار حرارتی، (W/m^2)	q''	کشش سطحی، (N/m)	σ
		درصد حجمی نانوسیال	φ

مراجع

[۱] سبط الشیخ انصاری، محمدجواد، پیرمحمدی، محسن، "مدلسازی عددی جوشش و بررسی دمای دیواره در لوله‌های بویلر نیروگاهی"، مجله علمی تخصصی مهندسی مکانیک تبدیل انرژی، دوره ۶، شماره ۳، صفحه ۳۹-۳۳، ۱۳۹۸.

[2] Gouda, R.K., Pathak, M. and Khan, M.K. "Pool boiling heat transfer enhancement with segmented finned microchannels structured surface", *Int. J. Heat Mass Transf.*, **127**, pp. 39-50 (2018).

[3] Dareh, F.R., Haghshenasfard, M., Esfahany, M.N. and Jazi, H.R.S. "An experimental investigation of pool boiling characteristics of alumina-water nanofluid over micro/nano-structured surfaces", *Heat Transfer Eng.*, **40**(20), pp. 1691-1708 (2019).

[4] Walunj, A. and Sathyabhama, A. "Comparative study of pool boiling heat transfer from various microchannel geometries", *Appl. Therm. Eng.*, **128**, pp. 672-683 (2018).

[5] Kwak, H.J., Kim, J.H., Myung, B.S., Kim, M.H. and Kim, D.E. "Behavior of pool boiling heat transfer and critical heat flux on high aspect-ratio microchannels", *Int. J. Therm. Sci.*, **125**, pp. 111-120 (2018).

[6] Hai, F., Zhu, W., Liang, S., Yang, X. and Deng, Y. "Enhanced pool boiling performance of microchannel patterned surface with extremely low wall superheat through capillary feeding of liquid", *Nanoscale Microscale Thermophys. Eng.*, **24**(2), pp. 66-79 (2020).

[7] Mohebbi, M. and Khayat, M. "Experimental study of the effect of hybrid nanofluids deposition on microchannels with different sections in pool boiling", *Modares Mechanical Engineering*, **19**(11), pp. 2653-2666 (2019).

[8] Reddy, Y.A. and Venkatachalapathy, S. "Heat transfer enhancement studies in pool boiling using hybrid nanofluids", *Thermochim. Acta*, **672**, pp. 93-100 (2019).

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.1.7]

[9] Kamel, M.S. and Lezsovits, F. "Experimental investigation on pool boiling heat transfer performance using tungsten oxide WO_3 nanomaterial-based water nanofluids", *Materials*, **13**(8), 1922 (2020).
[10] Mohammadi, M. and Khayat, M. "Experimental investigation of the effect of one-dimensional roughened surface on the pool boiling of nanofluids", *Sci. Iran*., **27**(6), pp. 2954-2966 (2020).
[11] Dallali, A., Khayat, M. and Zareh, M. "Experimental study of the effect of surface type on the pool boiling heat transfer characteristics in the presence of nanofluids with hybrid base fluid", *Sharif Journal of mechanical Engineering*, **36.3**(2), pp. 83-95 (2020).
[12] Ciloglu, D. and Bolukbasi, A. "The quenching behavior of aqueous nanofluids around rods with high temperature", *Nucl. Eng. Des.*, **241**(7), pp. 2519-2527 (2011).
[13] Kang, J.Y., Kim, T.K., Lee, G.C., Park, H.S. and Kim, M.H. "Minimum heat flux and minimum film-boiling temperature on a completely wettable surface: Effect of the Bond number", *Int. J. Heat Mass Transf.*, **120**, pp. 399-410 (2018).
[14] Li, J.Q., Mou, L.W., Zhang, Y.H., Yang, Z.S., Hou, M.H., Fan, L.W. and Yu, Z.T. "An experimental study of the accelerated quenching rate and enhanced pool boiling heat transfer on rodlets with a superhydrophilic surface in subcooled water", *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **92**, pp. 103-112 (2018).
[15] Talari, V., Behar, P., Lu, Y., Haryadi, E. and Liu, D. "Leidenfrost drops on micro/nanostructured surfaces", *Front Energy*, **12**(1), pp. 22-42 (2018).
[16] Rahimian, A., Kazeminejad, H., Khalafi, H., Mirvakili, S. M. and Akhavan, A. "An experimental study of the steel cylinder quenching in water-based nanofluids", *International Journal of Engineering*, **33**(1), pp. 28-33 (2020).
[17] Cooke, D. and Kandlikar, S.G. "Effect of open microchannel geometry on pool boiling enhancement", *Int. J. Heat Mass Transf.*, **55**(4), pp. 1004-1013 (2012).
[18] Ghiaasiaan, S.M., *Two phase flow, boiling and condensation in conventional and miniature systems*, Cambridge University Press, New York (2008).
[19] Hust, J.G. and Lankford, A.B., *Thermal conductivity of aluminum, copper, iron, and tungsten for temperatures from 1 K to the melting point*, U.S. Department of Commerce, Malcolm Baldrige, Colorado (1984).
[20] Moffat, R.J. "Describing the uncertainties in experimental results", *Exp. Therm. Fluid Sci*., **1**(1), pp. 3-17 (1988).
[21] Rohsenow, W.M. "A method of correlating heat transfer data for surface boiling liquids", *Trans. ASME*, **74**, pp. 969-975 (1952).
[22] Zuber, N. "On the stability of boiling heat transfer", *Trans. ASME*, **80**, pp. 711-720 (1958).
[23] Chopkar, M., Das, A.K., Manna, I. and Das, P.K. "Pool boiling heat transfer characteristics of ZrO2-water nanofluids from a flat surface in a pool", *Heat Mass Transf*., **44**(8), pp. 999-1004 (2008).
[24] Shahmoradi, Z., Etesami, N. and Esfahany, M.N. "Pool boiling characteristics of nanofluid on flat plate based on heater surface analysis", *Int. Commun. Heat Mass Transf*., **47**, pp. 113-120 (2013).
[25] Ahmed, O. and Hamed, M.S. "Experimental investigation of the effect of particle deposition on pool boiling of nanofluids", *Int. J. Heat Mass Transf*., **55**(13-14), pp. 3423-3436 (2012).
[26] Berenson, P.J. "Film-boiling heat transfer from a horizontal surface", *J. Heat Transf*., **83**, pp. 351-356 (1961).
[27] Henry, R.E. "A correlation for the minimum film boiling temperature", *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser*., **70**(138), pp. 81-90 (1974).

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.1.7]

چکیده انگلیسی:

Experimental study of the combined effect of using nanofluid and microchannel techniques on nucleate and film boiling performance

Seyed Hadi Golkar, Morteza Khayat*, Masoud Zareh

Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: April 2021, Accepted: July 2021

Abstract

In the present study, the nucleate and film boiling heat transfer of alumina-deionized water and silica-deionized water nanofluids in the presence of microchannel surface has been investigated experimentally. For this purpose, both types of nanofluids with volumetric concentrations of 0.1%, 0.3% and 0.5% were prepared using two-step method. Pure deionized water boiling experiments on polished and microchannel copper surfaces and nanofluid boiling experiments on microchannel copper surface were performed. The results showed that the combination of the presence of nanofluid and microchannel in the boiling process significantly increased the critical heat flux and the minimum heat flux. In the boiling of nanofluids on microchannel surface, the volumetric concentration of 0.5% had the best performance, so that the maximum values of critical heat flux and minimum heat flux for alumina-deionized water nanofluid increased by 93.02% and 105.32%, and for silica-deionized water nanofluid increased by 90.82% and 97.15%, respectively, compared to pure deionized water boiling on the polished surface. In addition, it was observed that with the deposition of nanoparticles on the microchannel surface, the surface wettability increased and the nucleate boiling heat transfer coefficient of nanofluids decreased compared to pure deionized water. But in film boiling, the effects of improving the thermal properties of nanofluids have overcome the destructive effects of nanoparticles deposition on the surface.

Key words: Nucleate boiling, Film boiling, Heat flux, Microchannel, Nanofluids.

*corresponding author: **mkhayat@srbiau.ac.ir**

Cite this article as: Seyed Hadi Golkar, Morteza Khayat, Masoud Zareh, Experimental study of the combined effect of using nanofluid and microchannel techniques on nucleate and film boiling performance. Journal of Energy Conversion, 2021, 8(2), 65-84.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.1.7]