



Experimental Study of the Effect of Hybrid Nanofluids Deposition on Microchannels with Different Sections in Pool Boiling

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mohebbi M.¹ MSc,

Khayat M.*¹ PhD

How to cite this article

Mohebbi M, Khayat M. Experimental Study of the Effect of Hybrid Nanofluids Deposition on Microchannels with Different Sections in Pool Boiling. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(11):2653-2666.

ABSTRACT

This study aims to investigate the effect of nanoparticle deposition on the boiling surface in the presence of microchannel on the characteristics of boiling heat transfer. In this experimental study, the copper boiling surfaces including polished circular surface, rectangular and trapezoidal microchannels were used. The microchannels include feeding sub-channels perpendicular to the main channel, which increases the boiling surface and separates the downward cool fluid flow and upward hot bubbles. Nuclear boiling experiments on microchannel surfaces in the presence of a hybrid water-based nanofluid containing 70% titanium oxide and 30% OH-based multi-wall carbon nanotubes in volumetric concentrations of 0.1% and 0.5% have been conducted. The results of nanofluid boiling experiments on both microchannel surfaces show that with increasing concentrations, critical heat flux and heat transfer coefficient increases and the highest increase in critical heat flux and heat transfer coefficient is related to the hybrid nanofluid with 0.5 % volumetric concentration on the surface with trapezoidal microchannel and their values are 64.64% and 344.76%, respectively, compared to pure water boiling on the polished copper surface. Also, in boiling of pure water on the deposited surfaces with nanoparticles, the greatest increase in critical heat flux and heat transfer coefficient is related to the surface with trapezoidal microchannels with 0.1% volumetric concentration and 0.5% and volumetric concentration and their values are 120.16% and 149.4% respectively, compared to pure water boiling on the polished copper surface.

Keywords Pool Boiling; Hybrid Nanofluids; Microchannels; Nano Particle Deposition; Critical Heat Flux

¹Mechanical Engineering Department, Science & Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Science & Research Branch, Daneshgah Boulevard, Simon Bulvar Boulevard, Tehran, Iran
Phone: +98 (21) 44868536
Fax: +98 (21) 44867141
mkhayat@srbiau.ac.ir

Article History

Received: January 12, 2019

Accepted: May 21, 2019

ePublished: November 2, 2019

CITATION LINKS

[1] Effect of open microchannel geometry on pool boiling ... [2] Enhanced pool boiling heat transfer mechanisms for ... [3] Pool boiling enhancement through bubble induced ... [4] Surface structuring with inclined minichannels for pool ... [5] Investigation pool boiling heat transfer in U-shaped mesochannel ... [6] Comparative study of pool boiling heat transfer from ... [7] Pool boiling characteristics of nano ... [8] Pool boiling heat transfer characteristics of ZrO₂-water ... [9] Effect of surface particle interactions during ... [10] Pool boiling heat transfer to dilute copper oxide ... [11] Pool boiling heat transfer of CNT/water ... [12] Experimental investigation of pool boiling ... [13] Experimental investigation of nucleate pool boiling ... [14] Thermal behavior of aqueous iron oxide nano-fluid as ... [15] An experimental study on deposited surfaces due to... [16] The effect of functionalisation method on the stability ... [17] Calculation of heat transfer coefficient ... [18] Pool boiling CHF enhancement with Al₂O₃-CuO/H₂O ... [19] An experimental investigation on flow ... [20] Effect of Cu-Al₂O₃ nanocomposite coating on flow boiling ... [21] Describing the uncertainties in experimental ... [22] Hydrodynamic aspects of boiling heat ... [23] A method of correlating heat transfer data for surface ... [24] Experimental evaluation of constants for the ... [25] Pool boiling of ammonia/water and its pure component ... [26] Experimental investigation of the effect of particle deposition ... [27] Ultra-high pool boiling performance and effect of channel ...

بررسی تجربی اثر نشست نانوسیالات هیبریدی بر میکروکانال‌ها با مقاطع مختلف در جوش استخری

مائه محبی MSc

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

مرتضی خیاط PhD

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

چکیده

هدف از این تحقیق، بررسی تجربی اثر نشست نانوذرات روی سطح جوش در حضور میکروکانال‌های تغذیه‌کننده، بر مشخصه‌های انتقال حرارت جوش استخری می‌باشد. در این مطالعه تجربی، از سطوح جوش مسی شامل سطح دایروی صیقلی و میکروکانال‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای استفاده شده است. میکروکانال‌ها شامل کانال‌های فرعی تغذیه‌کننده عمود بر کانال اصلی می‌باشند که باعث افزایش سطح جوش و تفکیک مسیر سیال سرد پایین‌رونده و حباب‌های داغ بالا رونده می‌شوند. آزمایشات جوش هسته‌ای روی سطوح میکروکانال‌شده، در حضور نانو سیال هیبریدی شامل ۷۰ درصد اکسید تیتانیوم و ۳۰ درصد نانولوله کربنی چند جداره اصلاح شده با پایه OH و در غلظت‌های حجمی ۰/۱ و ۰/۵ درصد، با سیال پایه آب یون‌زدایی‌شده انجام گرفته‌اند. نتایج آزمایشات جوش نانو سیالات روی هر دو سطح میکروکانال‌شده نشان می‌دهند با افزایش غلظت، شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت بهبود یافته و بیشترین افزایش در شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت، مربوط به نانوسیال هیبریدی با غلظت حجمی ۰/۵ درصد روی سطح با میکروکانال‌های دوزنقه‌ای به ترتیب به میزان $64/64\%$ و $34/76\%$ درصد نسبت به جوش آب خالص روی سطح صیقلی مس می‌باشد. همچنین در جوش آب خالص بر سطوح نشست‌یافته توسط نانوذرات، بیشترین افزایش شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت به ترتیب مربوط به سطح با میکرو کانال‌های دوزنقه‌ای نشست‌یافته ۰/۱ و ۰/۵ درصد حجمی، به مقدار $12/16\%$ و $49/4\%$ درصد نسبت به جوش آب خالص روی سطح صیقلی مس می‌باشد.

کلید واژگان: جوش استخری، نانوسیالات هیبریدی، میکروکانال، نشست نانوذرات، شار حرارتی بحرانی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۳۱

*نویسنده مسئول: mkhayat@srbiau.ac.ir

مقدمه

وجود بارهای حرارتی بالا در سیستم‌هایی نظیر دستگاه‌های الکترونیکی، راکتورهای هسته‌ای و توربین‌های گاز باعث ایجاد تنش حرارتی و نیز آسیب به دستگاه می‌شود. بنابراین نیاز به استفاده از سیستم‌های خنک‌کننده کارآمد همانند سیستم‌های خنک‌کننده دوفازی، به علت تمرکز آنها بر گرمای نهان و گرمای محسوس، وجود دارد. همین امر موجب شده تا پدیده جوشش به علت بالابودن گرمای نهان تبخیر و نیز دفع زیاد انرژی از سطح جامد، مورد توجه صنایع گرمایشی و سرمایه‌ی قرار گیرد.

تکنیک‌های مورد استفاده برای بهبود فرآیند جوشش استخری به دو دسته فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. روش‌های فعال شامل استفاده از قدرت خارجی جهت ایجاد اختلاط مکانیکی، چرخش سطح یا مایع، لرزش، مکش، تزریق یا القای یک میدان الکترواستاتیکی یا مغناطیسی می‌باشند. این روش‌ها برای کاربردهای خنک‌سازی، عمدتاً پرهزینه و غیرقابل دسترس هستند. از روش‌های غیرفعال می‌توان به اضافه نمودن افزودنی‌ها به سیال پایه و بهبود خواص هندسی، فیزیکی و شیمیایی سطح اشاره نمود. افزودن نانوذرات به سیال پایه، هدایت گرمایی سیال پایه را افزایش داده و باعث یکنواخت شدن گرادیان دما در سیال می‌گردد. علاوه بر

آن نشست نانوذرات روی سطح، تغییر در زبری سطح، ترشوندگی و نیز افزایش چگالی سایت‌های هسته‌زا را به دنبال خواهد داشت. از جمله روش‌های اصلاح سطح می‌توان به ایجاد میکروکانال روی سطح اشاره نمود. ایجاد این کانال‌ها به افزایش مساحت سطح انتقال حرارت و بهبود انتقال حرارت جوششی کمک شایانی می‌نماید. علاوه بر آن، ابعاد و هندسه کانال‌ها و همچنین روش‌های ساخت کانال روی سطح می‌تواند اثر قابل توجهی بر مشخصه‌های انتقال حرارت در جوشش استخری داشته باشد. بنابراین می‌توان با ترکیب مکانیزم‌های مختلف اصلاح سطح و سیال، به بهبود پارامترهای انتقال حرارت در جوشش استخری کمک شایانی نمود. تعداد زیادی از محققان در این خصوص مطالعه نموده‌اند.

کوک و کندلیکار^[1]، به بررسی اثر ابعاد میکروکانال‌ها روی سطح در جوشش استخری پرداختند. نتایج نشان دادند که عمق و عرض کانال‌ها اثر قابل توجهی بر انتقال حرارت دارد. در واقع در کانال‌های عمیق، سطح پایین کانال به گرم‌کن نزدیک‌تر است و بیشترین دما را دارد و هسته‌زایی در شار حرارتی کمتری نسبت به سطوح ساده و کانال‌های کم عمق رخ می‌دهد. علاوه بر آن در کانال‌های عریض، حباب‌ها می‌توانند سایز بیشتری داشته باشند و بنابراین، گرمای بیشتری را از سطح جدا می‌کنند. جایکومار و کندلیکار^[2]، در آزمایشی اثر نشست لایه‌های متخلخل بر میکروکانال را در جوشش استخری در حضور سیال آب و در فشار اتمسفر مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان دادند در سطحی که کاملاً متخلخل است، هسته‌زایی در طول کانال‌ها و بالای پره‌ها رخ می‌دهد و بنابراین مانع ایجاد مسیر جداگانه برای حباب و مایع می‌شود. در این سطح به علت وجود سایت‌های هسته‌زایی فعال در سرتاسر سطح، ضریب انتقال حرارت جابجایی (Heat Transfer Coefficient; HTC) و شار حرارتی بحرانی (Critical Heat Flux; CHF) بهبود چشم‌گیری داشتند. جایکومار و کندلیکار^[3]، در آزمایشی دیگر اثر کانال‌های تغذیه‌کننده روی سطح را بر عملکرد جوشش استخری مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دادند که برای جلوگیری از درهم آمیختن عرضی حباب‌ها، فاصله بین کانال‌های ناحیه هسته‌زایی به قطر جدایی حباب بستگی دارد و اگر مضرب صحیحی از قطر حباب باشد، بهبود در عملکرد جوشش استخری حاصل می‌شود.

میرزا قیطاقی و همکاران^[4]، روی سطوح دایروی افقی از جنس مس، کانال‌های شیب‌داری ایجاد کردند و جوشش استخری را روی سطوح با کانال‌های با شیب ۴۵ درجه با ابعاد مختلف و کانال‌های متقاطع در حضور سیال آب مقطر بررسی نمودند. با توجه به نتایج به دست آمده در این آزمایش، سطح با بیشترین عمق و مساحت سطح، بیشترین شار حرارتی بحرانی و سطح با کانال عریض‌تر و همان افزایش مساحت، بیشترین ضریب انتقال حرارت را داشتند. میرزا قیطاقی و همکاران^[5]، کانال‌هایی با عرض ۴۰۰ میکرومتر و عمق ۵۰۰ میکرومتر روی سطح مسی ایجاد نمودند. سپس روی این کانال‌ها، پوشش میکرومتخلخل با استفاده از روش الکترونشست (Electrodeposition) دو مرحله‌ای ایجاد کردند. با توجه به نتایج به دست آمده، بهترین عملکرد مربوط به سطح متخلخل میکروکانال شده بود که در شارهای حرارتی پایین، به علت افزایش در سایت‌های هسته‌زایی و فرکانس تولید حباب و در شارهای حرارتی بالا، به علت افزایش میکروجابجایی ناشی از جدا شدن حباب‌های کوچک با فرکانس بالا، افزایش انتقال حرارت مشاهده شد. والونج و ساتیام‌ها^[6]، با ایجاد میکروکانال‌های پله‌ای، مستطیلی و سهموی روی سطح دایروی از جنس مس به بررسی اثر تغییر هندسه میکروکانال بر مشخصه‌های جوشش استخری پرداختند. آنها با

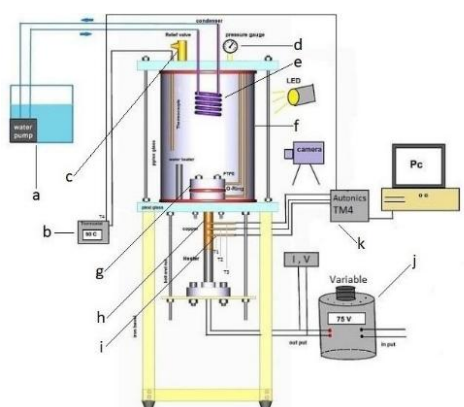
حباب، شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت را بررسی کردند. نتایج نشان داد که ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت جرمی و شار حرارتی اعمالی، افزایش می‌یابد. علاوه بر آن، نرخ شکل‌گیری حباب به طور چشم‌گیری در شارهای حرارتی بالاتر شدت یافته و در نتیجه حباب‌های بزرگتری به علت شدت درهم آمیختگی حباب‌ها از سطح جدا می‌شوند. سلیم‌پور و همکاران^[15]، اثر غلظت نانوسیالات، ضخامت نشست و شار حرارتی را بر زبری سطح بعد از آزمایش جوشش مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که اثر نشست ذرات در غلظت‌های بالا مشهودتر است. همچنین در شارهای حرارتی بالا به علت فعال‌شدن حفره‌های کوچک، با افزایش غلظت، حفره‌ها پر شده و ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد ولی در شارهای پایین، به علت فعال‌بودن حفره‌های کوچک، افزایش غلظت اثر زیادی در انتقال حرارت ندارد. عباسی و همکاران^[16]، به بررسی خصوصیات انتقال حرارت نانوسیال هیبریدی γ - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MWCNT}$ با سیال پایه آب پرداختند. نانوسیال با غلظت پایین گروه‌های کربوکسیلیک‌اسید، پایداری بهتر و هدایت حرارتی بالاتری نسبت به غلظت‌های بالای گروه‌های کربوکسیلیک‌اسید داشته است. همچنین مشخص شد که هدایت حرارتی نانوسیال، به پایداری ذرات در سیال بستگی دارد و برای نانوسیال با غلظت 0.01 درصد حجمی، بهبود در هدایت حرارتی به $14/75$ درصد رسید. صافی و همکاران^[17]، از نانوسیال هیبریدی MWCNT-TiO_2 با غلظت‌های مختلف استفاده کردند. هدایت حرارتی همه نمونه‌ها از دمای 36 تا 52 درجه سانتی‌گراد به صورت خطی بهبود یافت و هدایت حرارتی موثر همه نمونه‌ها در دمای 60 درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. بوسال و برس^[18]، به طور تجربی اثر استفاده از نانوسیال هیبریدی $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CuO}$ با سیال پایه آب را در غلظت‌های حجمی 0.5 ، 0.25 و 1 درصد حجمی و در حضور سیم نیکرومی، بر مشخصه انتقال حرارت جوشش استخری بررسی کردند. آنها مشاهده کردند با افزایش غلظت نانوسیال، شار حرارتی بحرانی افزایش می‌یابد و بیشترین مقدار شار حرارتی بحرانی برای نانوسیال 1 درصد حجمی به دست آمد که حدود 90 درصد نسبت به آب خالص افزایش داشت. همچنین مدت زمان جوشش برای رسیدن به شار حرارتی بحرانی نسبت به آب خالص کاهش یافت. کومار گوپتا و دومیسرا^[19]، عملکرد انتقال حرارت جوشش جریانی سطح پوشش‌یافته توسط نانوکامپوزیت Cu-TiO_2 را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. در این آزمایش لایه نازکی از نانوکامپوزیت Cu-TiO_2 توسط روش الکترون‌نشست روی سطح ایجاد شد. آنها مشاهده کردند که ضریب انتقال حرارت تک‌فاز افزایش کمی داشت در حالی که بهبود در ناحیه دوفازی تا 94 درصد گزارش شده که این افزایش وابسته به دبی جریان سرد و دمای سطح گرم‌کن می‌باشد. همچنین به علت افزایش زبری سطح، تر شوندگی و چگالی سایت‌های هسته‌زایی روی سطح، شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت روی سطوح پوشش داده شده، افزایش یافتند. بیشترین شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت مربوط به سطح پوشش‌یافته در چگالی جریان 300 mA/cm^2 نسبت به سطح بدون پوشش گزارش شد. مرشد و همکاران^[20]، انتقال حرارت جابجایی دوفاز و تک‌فاز پوشش کامپوزیت $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ ایجادشده روی سطح میکروکانال مسی را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. در ناحیه تک‌فاز، ضریب انتقال حرارت نسبت به سطح بدون پوشش 7 درصد افزایش و در ناحیه دوفاز 100 درصد افزایش یافت. آنها علت اصلی بهبود در عملکرد جوششی را تغییر در مورفولوژی سطح به علت ایجاد پوشش روی آن گزارش کردند.

بررسی قطر و فرکانس جدایی حباب به این نتیجه رسیدند که قطر جدایی حباب تحت تاثیر شار حرارتی و پروفیل میکروکانال‌ها می‌باشد.

کومار داس و همکاران^[7]، جوشش نانوسیال اکسید آلومینیوم با سایز 38 نانومتر و در غلظت‌های 4 – 1 درصد حجمی را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که نانوذرات با افزایش غلظت، باعث تضعیف عملکرد انتقال حرارت می‌شوند. چوپکار و همکاران^[8]، جوشش هسته‌ای نانوسیال اکسید زیرکونیوم را مورد بررسی قرار دادند. با انجام آزمایشات مشاهده شد که در کمترین غلظت نانوسیال (0.005 درصد حجمی)، ضریب انتقال حرارت در ناحیه جوشش هسته‌ای در مقایسه با آب خالص افزایش یافته و با افزایش غلظت نانوسیال، یک کاهش پایدار در ضریب انتقال حرارت به وجود می‌آید. هاریش و همکاران^[9]، به بررسی تعاملات بین نانوذرات و سطح جوشش پرداختند و نمودار جوشش نانوسیال Al_2O_3 با پایه آب را در غلظت‌های مختلف و روی سطوح زبر و صاف مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان دادند، شار حرارتی بحرانی در مقایسه با سیال پایه بهبود می‌یابد و این بهبود متناسب با غلظت نانوذرات می‌باشد و بیشترین مقدار شار حرارتی بحرانی برای نانوسیال با غلظت 2 درصد حجمی حدود 21 درصد می‌باشد.

سرافراز و هرمزی^[10]، یک مجموعه آزمایش جهت تعیین ضریب انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیال آب-اکسید مس با غلظت 0.1 تا 0.4 درصد انجام دادند. نتایج نشان دادند، با افزودن فعال‌کننده‌های سطحی و افزایش غلظت، زاویه تماس حباب‌ها کاهش می‌یابد و تر شوندگی سطح به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. در طول آزمایش با افزایش غلظت و به علت نشست ذرات و کاهش تعداد سایت‌های هسته‌زایی، زبری سطح کاهش یافته و ضریب انتقال حرارت تضعیف می‌گردد. امیری و همکاران^[11]، اثرات استفاده از ساختارهای نانولوله‌های کربنی مختلف را بر ضریب انتقال حرارت و شار حرارتی بحرانی مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان دادند که با افزایش قطر نانوذرات، شار حرارتی بحرانی افت پیدا می‌کند و ذرات با قطر کمتر از 10 نانومتر بیشترین شار حرارتی بحرانی (1586 کیلووات بر متر مربع) را دارند. همچنین در گروه‌های غیرکواالانسی، با افزایش غلظت، ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد در حالی که در گروه‌های کووالانسی، یک روند صعودی در ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت مشاهده می‌گردد. هام و همکاران^[12]، برای بررسی اثر زبری سطح بر مشخصه‌های انتقال حرارت، به انجام آزمایش جوشش استخری روی سطح با زبری‌های نسبی مختلف در حضور نانوسیال Al_2O_3 با درصدهای حجمی مختلف پرداختند. آنها در این آزمایش به این نتیجه رسیدند که با افزایش غلظت نانوسیال، شار حرارتی بحرانی فلز روی افزایش می‌یابد. همچنین ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال با افزایش غلظت به علت نشست، کاهش می‌یابد.

محمدعلی و همکاران^[13]، به بررسی اثر نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم بر سطح فوق گرم در فشار اتمسفر پرداختند. در این آزمایش دو غلظت متفاوت 12 و 15 درصد وزنی مورد بررسی قرار گرفتند و بهبود ضریب انتقال حرارت به مقدار $1/38$ و $1/24$ برابری به ترتیب برای 2 غلظت 15 و 12 درصد نسبت به سیال آب خالص گزارش شد. همچنین نانوسیال با غلظت 15 درصد، حدود 13 درصد شار حرارتی بالاتری نسبت به نانوسیال با غلظت 12 درصد وزنی داشت. سالاری و همکاران^[14]، به بررسی خصوصیات انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیال اکسید آهن در حضور سطح صاف پرداختند. آنها اثر پارامترهای مختلف از جمله شار حرارتی، غلظت جرمی، شکل‌گیری



شکل ۲) شماتیک دستگاه آزمایش جوشش استخری

از گیج فشار برای نمایش فشار درون مخزن استفاده می‌شود تا اطمینان حاصل شود که همه آزمایشات در فشار اتمسفر صورت گرفته‌اند. این گیج محدوده فشار بین صفر تا ۱۲ اتمسفر را نمایش می‌دهد. از بخش بالایی مخزن و از طریق منافذ موجود روی درپوش مخزن، پیش‌گرم‌کن میله‌ای M شکل با توان ۵۰۰ وات، وارد مخزن شده و درون سیال قرار می‌گیرد تا سیال عامل را تا دمای اشباع آن در فشار یک اتمسفر گرم کند. در بخش زیرین دستگاه، کندانسور با لوله‌های مارپیچ از جنس برنج با قطر ۱۰ سانتی‌متر و طول ۱۵ سانتی‌متر قرار گرفته است. این لوله مارپیچ جهت خنک‌سازی و میعان بخار آب داخل مخزن به کار می‌رود تا سطح سیال همواره در یک ارتفاع معین بماند و از ایجاد خطا جلوگیری شود.

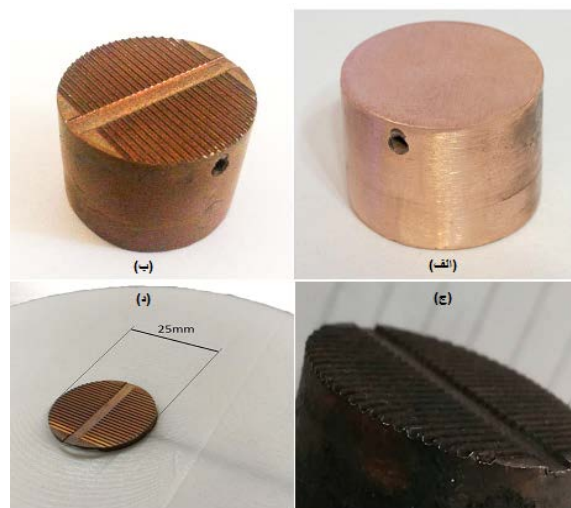
کارتیج مورد استفاده در این دستگاه از جنس مس ۹۹ درصد است که به شکل یک استوانه با دو سطح مقطع با ابعاد مختلف می‌باشد. ارتفاع کل کارتیج ۱۲۰ میلی‌متر و قطر بخش بالایی و پایینی به ترتیب ۲۵ و ۱۴۰ میلی‌متر می‌باشند. از سطح مقطع بالایی به عنوان سطح جوش استفاده می‌شود و روی بخش بالایی ۳ سوراخ با قطر ۲ میلی‌متر و فاصله ۷ میلی‌متر از یکدیگر، جهت تعبیه ترموکوپل‌ها ایجاد شده‌اند. در بخش زیرین کارتیج، ۸ سوراخ با قطر ۱۰ میلی‌متر و عمق ۵۵ میلی‌متر ایجاد گردیده است که محل قرارگیری هیترهای فشنگی می‌باشد. شکل ۳، نمایی از این کارتیج به همراه هیترهای فشنگی مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جهت جلوگیری از اتلاف حرارت، در مکان‌های قرارگیری هیترها در کانتینر و سوراخ‌های تعبیه‌شده برای قرارگیری ترموکوپل‌ها، از خمیر سیلیکون استفاده شده است. علاوه بر آن، جهت آب‌بندی در قطعات بزرگ و اتصالات مانند پیرکس و فولاد زیرین آن و نیز در فاصله بین کانتینر و عایق حرارتی (تفلون: Polytetrafluoroethylene)

هدف از تحقیق حاضر، بررسی اثر ایجاد میکروکانال‌های فرعی با دو سطح مقطع مستطیلی و دوزنقه‌ای در حضور نانوسیال هیبریدی شامل ذرات اکسید تیتانیوم و نانولوله‌های کربنی چند دیواره می‌باشد. تاکنون اثر نشست و جوشش نانوسیالات هیبریدی شامل نانوذرات اکسید تیتانیوم و نانولوله‌های کربنی با پایه OH، روی سطح جوشش میکروکانال‌شده به صورت الگوی ۲۱ میکروکانال فرعی تغذیه‌کننده با مقاطع مختلف مستطیلی و دوزنقه‌ای عمود بر کانال اصلی بر مشخصه‌های انتقال حرارت، مورد مطالعه قرار نگرفته است که نوآوری، کار حاضر محسوب می‌گردد.

شرح مسئلہ

در تحقیق حاضر، همه آزمایشات جوش هسته‌ای استخری در شرایط یکسان آزمایشگاهی و در فشار ۸۶ کیلو پاسکال و دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و در دمای جوشش آب ۹۳ درجه سانتی‌گراد صورت گرفته است. این آزمایشات روی سطوح مسی دایروی شکل با قطر ۲۵ میلی‌متر انجام گرفته‌اند. این سطوح مسی، شامل یک سطح صیقلی و ۲ سطح میکروکانال شده می‌باشند. در ۲ سطح میکروکانال شده، ابتدا یک کانال اصلی با عرض ۳۰۰ میکرومتر و عمق ۴۰۰ میکرومتر ایجاد شده است. روی سطح اول، ۲۱ عدد کانال فرعی تغذیه‌کننده مستطیلی با عرض کانال ۷۷۰ میکرومتر، عرض پره ۲۰۰ میکرومتر و عمق ۴۰۰ میکرومتر و در سطح دوم ۲۱ عدد میکروکانال فرعی دوزنقه‌ای شکل با عرض دهانه و کف ۷۷۰ میکرومتر و ۳۸۵ میکرومتر و عمق ۴۰۰ میکرومتر، عمود بر کانال اصلی ایجاد می‌شوند. کانال‌ها توسط دستگاه وایرکات با دقت ۲ میکرومتر روی سطح ایجاد شده‌اند. نمایی از این سطوح جوشش در شکل ۱، نشان داده شده است. اثر تغییر مقطع میکروکانال‌ها با ایجاد مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای، در حضور نانوسپال هیبریدی، با غلظت‌های مختلف بر پارامترهای انتقال حرارت بررسی شده است.



شکل ۱ سطوح جوشش: (الف) سطح مسی صیقلی، (ب) سطح مسی میکروکانال‌شده با مقطع دوزنقه‌ای، (د) نحوه قرارگیری سطح جوشش و PTFE

شمتاتیک دستگاه جوشش استخری مورد استفاده در این تحقیق، در شکل ۲ نشان داده شده است. این دستگاه شامل بخش‌سازه و پایه‌های نگهدارنده و محفظه آزمایش می‌باشد که بخش‌های داده‌پردازی، نورپردازی، انتقال قدرت و حرارت در قسمت بالا و زیر

برای محاسبه وزن مورد نیاز از هر نمونه، جهت رسیدن به غلظت مورد نظر از نانوسیال در یک لیتر سیال پایه آب مقطر، از رابطه (۱) استفاده شده است.

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

که طبق این رابطه جرم مورد نیاز نانوذرات جهت ساخت نانوسیال هیبریدی در سیال پایه آب مقطر در غلظت‌های حجمی متفاوت، در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول (۱) مشخصات نانوذرات

نوع نانوذره	اکسید تیتانیوم (TiO ₂)	نانولوله‌های کربنی چند جداره پایه OH (MWCNT (OH))
رنگ	سفید	سیاه
ابعاد (nm)	۲۰-۲۵	قطر خارجی: ۲۰-۳۰ قطر داخلی: ۵-۱۰
دانسیته (g/cm ³)	۴۲/۶	۲۱
ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)	۴۸	۳۰۰۰

جدول (۲) جرم مورد نیاز نانوذرات در غلظت‌های حجمی متفاوت

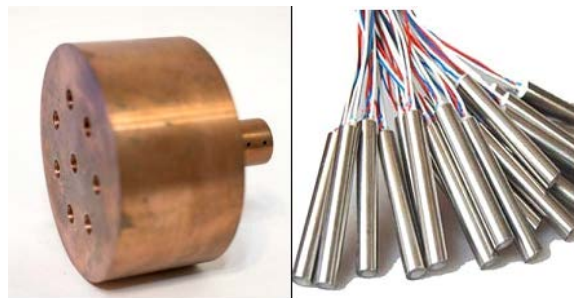
غلظت (درصد)	جرم اکسید تیتانیوم (gr)	جرم نانولوله‌های کربنی چند جداره پایه OH (gr)
۰/۱	۲/۹۸۴	۰/۶۳۰
۰/۵	۱۴/۹۶۲	۳/۱۵۵

جهت ساخت نانوسیال، از همزن مغناطیسی جهت توزیع ذرات درون سیال پایه، دستگاه التراسونیک جهت پایدارسازی محلول و نهایتاً از مخزن حمام التراسونیک جهت همگن‌سازی و از بین رفتن کلوخه استفاده شده است. پس از آماده‌سازی و همگن‌نمودن نانوسیال، با انجام تست رسوب با گذشت زمان، میزان پایداری نانوسیال مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۵، میزان رسوب ذرات درون محلول را با گذشت زمان نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، نانوسیال بعد از گذشت ۳۰ روز، از پایداری خوبی برخوردار است و مقدار بسیار کمی از آن ته‌نشین شده است که این ته‌نشینی بیشتر مربوط به سورفکتانت می‌باشد.



شکل (۵) تست نشست ذرات در نانوسیال MWCNT (OH)-TiO₂ با غلظت‌های حجمی ۰/۱ درصد و ۰/۵ درصد

(PTFE) از چسب‌های سیلیکونی با مقاومت حرارتی ۳۰۰°C استفاده شده است.



شکل (۳) کارتریج مسی و هیترهای فشنگی ۲۵۰ وات

عایق حرارتی تفلون، یکی از بخش‌های بسیار مهم دستگاه می‌باشد که به صورت یک قرص با قطر ۱۴ سانتی‌متر و ضخامت ۳ سانتی‌متر بوده و جهت عایق‌بندی حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. روی جداره این قطعه، سوراخ‌هایی با قطر ۳ میلی‌متر جهت عبور ترموکوپل‌ها و در راستای محل قرارگیری ترموکوپل‌ها روی کارتریج، ایجاد شده‌اند که ترموکوپل‌ها از آن عبور کرده و به کارتریج متصل می‌شوند. ترموکوپل‌های مورد استفاده در این دستگاه، از نوع k می‌باشند و حساسیت این ترموکوپل‌ها، ۴۱ میکروولت بر درجه سانتی‌گراد می‌باشد و محدوده دمایی ۲۰۰- تا ۱۳۵۰°C را پوشش می‌دهند. ۳ عدد ترموکوپل به کارتریج متصل می‌شود و یک عدد ترموکوپل درون مخزن حاوی سیال قرار می‌گیرد تا دمای آب را اندازه‌گیری کند. شکل ۴، نمایی از نحوه قرارگیری PTFE به همراه ترموکوپل‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد.

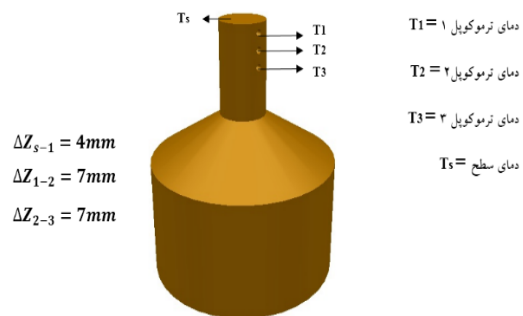
با توجه به این که باید انتقال حرارت در طول کارتریج به صورت یک‌بعدی باشد، لازم است اطراف کارتریج به خوبی عایق‌بندی شود تا از اتلاف حرارت جلوگیری شود. بنابراین ابتدا اطراف کارتریج توسط پشم شیشه با ضریب هدایت حرارتی $0.04 \frac{W}{m.K}$ و تحمل دمایی ۷۵۰°C پوشانده شده است. سپس یک لایه ورق تفلون ضخیم PTFE روی پشم شیشه بسته شده و پس از آن یک لایه دیگر پشم شیشه روی PTFE پوشیده می‌شود و در آخر، یک عایق الاستومری، روی کل مجموعه قرار گرفته و محکم بسته می‌شود.



شکل (۴) نحوه قرارگیری PTFE دور کارتریج مسی به همراه ترموکوپل‌ها

ساخت نانوسیال هیبریدی

سیال‌های مورد استفاده برای آزمایش جوشش استخری، آب مقطر و نانوسیال هیبریدی شامل نانولوله‌های کربنی چند جداره (Multiwall Carbon Nanotubes; MWCNT) با پایه OH و اکسید تیتانیوم در سیال پایه آب مقطر می‌باشند. نانوسیال هیبریدی در دو غلظت حجمی ۰/۱ و ۰/۵ درصد و با نسبت ذرات ۷۰ درصد اکسید تیتانیوم و ۳۰ درصد نانولوله‌های کربنی چند جداره پایه OH، تهیه شده است. مشخصات نانوذرات در جدول ۱ ارائه شده است.

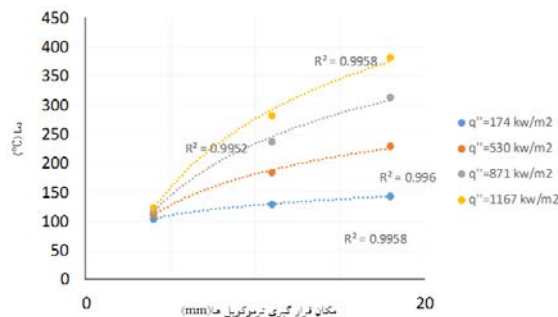


شکل ۷) شمتاتیک قرارگیری ترموکوپل‌ها داخل کارت‌ریج مسی

ضریب انتقال حرارت جوششی نیز از رابطه (۳) به دست می‌آید.

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

برای اطمینان از فرض انتقال حرارت یک‌بعدی، در ۴ شار حرارتی مختلف، تغییرات دمای ۳ ترموکوپل برحسب موقعیت قرارگیری آنها روی کارت‌ریج، در نمودار ۱ نشان داده شده و با روش حداقل‌مربعات، میزان انحراف بیشتر از ۰/۹۸ محاسبه گردیده است، بنابراین نحوه عایق‌بندی و نیز فرض یک‌بعدی بودن انتقال حرارت، صحیح می‌باشد؛ اما همواره مقداری اتلاف در بخشی از حرارت تولیدشده در المنت‌ها وجود دارد.



نمودار ۱) تغییرات دمای ترموکوپل‌ها برحسب مکان قرارگیری

دو نوع خطا اغلب باعث فاصله گرفتن نتایج داده‌های آزمایشی با مقادیر واقعی می‌شوند. این خطاها شامل، خطای اندازه‌گیری ناشی از کالیبره‌نبودن دستگاه‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری و خطاهای انسانی می‌باشند. برای محاسبه عدم قطعیت شار حرارتی، ضریب انتقال حرارت و اختلاف دمای سوپرهیت از روش موفات^[21]، طبق روابط (۴) تا (۶) استفاده گردیده است.

$$q'' = f(K, \Delta T, \Delta Z)$$

$$\frac{U_{q''}}{q''} = \sqrt{\left(\frac{U_{T_3-T_1}}{T_3 - T_1}\right)^2 + \left(\frac{U_{Z_3-Z_1}}{Z_3 - Z_1}\right)^2 + \left(\frac{U_K}{K}\right)^2} \quad (4)$$

$$T_s = f(Z_1, q'', K)$$

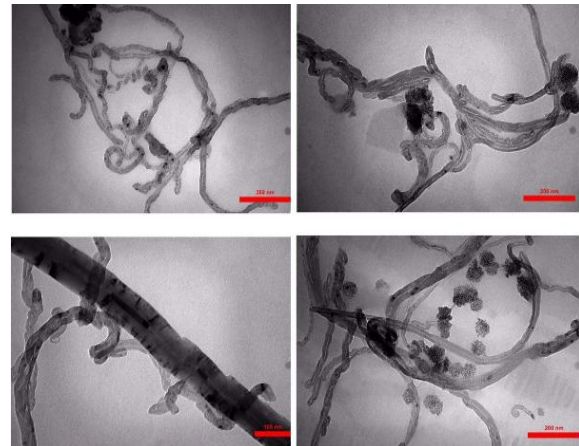
$$\frac{U_{\Delta T_s}}{\Delta T_s} = \sqrt{\left(\frac{U_{T_1-T_{sat}}}{T_1 - T_{sat}}\right)^2 + \left(\frac{U_{Z_1}}{Z_1}\right)^2 + \left(\frac{U_K}{K}\right)^2} \quad (5)$$

$$h = f(q'', \Delta T)$$

$$\frac{U_h}{h} = \sqrt{\left(\frac{U_{q''}}{q''}\right)^2 + \left(\frac{U_{\Delta T_s}}{\Delta T_s}\right)^2} \quad (6)$$

عدم قطعیت دماهای خوانده‌شده توسط ترموکوپل‌ها، در دماهای بالاتر از ۳۰۰°C، ۱/۱۲°C ± می‌باشد.

جهت بررسی صحت ابعاد ذرات، با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری (Transmission Electron Microscopy-TEM) تصاویر TEM نشان داده شده در شکل ۶ که برای نانوسیال با غلظت حجمی ۰/۵ درصد می‌باشد، مشاهده می‌شود که ابعاد گزارش شده در تصاویر با ابعاد اعلام شده هم‌خوانی دارند و ذرات نیز به خوبی در سیال پایه پخش شده‌اند.



شکل ۶) تصاویر TEM نانوسیال MWCNT (OH)-TiO2 با غلظت حجمی ۰/۵ درصد

نحوه انجام آزمایشات و آنالیز خطای داده‌ها

آزمایشات جوشش صورت‌گرفته در تحقیق حاضر، در ناحیه جوشش هسته‌ای می‌باشند. در ابتدا مخزن پیرکس توسط یک لیتر سیال کاری پر می‌شود و پیش‌گرم‌کن با توان ۵۰۰ وات روشن شده تا آب درون مخزن تا دمای اشباع آب (۹۳°C در فشار ۸۶kPa) گرم شود. سپس به مدت ۱۵ دقیقه در این دما می‌جوشد تا سیال درون مخزن گاززدایی شود. پس از آن هیترهای اصلی روشن شده تا شار حرارتی به سطح و سیال اعمال گردد. همچنین دمای سیال درون مخزن همواره در دمای اشباع نگه‌داشته می‌شود. دماهای ۳ ترموکوپل متصل به کارت‌ریج و نیز دمای سیال درون مخزن با استفاده از ترموستات نوع TM4 به صورت ثانیه‌ای در کامپیوتر ثبت می‌گردند. در طول تست بعد از هر بار رسیدن به شرایط پایا (تغییر دمای کارت‌ریج کمتر از ۰/۳°C در یک دقیقه) که در همه آزمایشات تحقیق حاضر، هر ۱۵ دقیقه می‌باشد، ولتاژ منبع تغذیه به صورت پله‌های ۱۰ ولتی تا رسیدن به شار حرارتی بحرانی، افزایش می‌یابد. پس از رسیدن به شار حرارتی بحرانی، به علت عدم تماس سیال خنک با سطح جوشش و خشک شدن سطح، پرش دمای ناگهانی رخ داده و تلاطم ایجادشده درون سیال کاهش می‌یابد و یک لایه حباب روی سطح را می‌پوشاند و جوشش وارد فاز گذرا می‌شود.

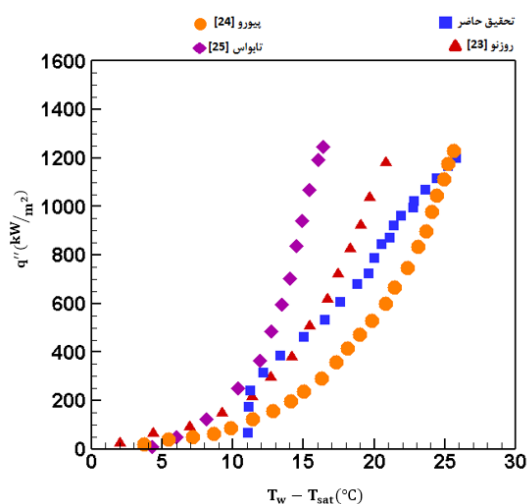
با عایق‌کاری مناسب اطراف کارت‌ریج مسی، می‌توان از انتقال حرارت شعاعی به محیط صرف نظر نمود و انتقال حرارت را به صورت یک‌بعدی در نظر گرفت. شمتاتیک قرارگیری ترموکوپل‌ها داخل کارت‌ریج در شکل ۷، نشان داده شده است. با توجه به اینکه شار حرارتی توسط هیترهای فشنگی زیر کارت‌ریج ایجاد می‌گردد، به ازای هر شار ثابت می‌توان با استفاده قانون فوریه، دمای سطح را از رابطه (۲) پیش بینی نمود.

$$T_s = T_1 - \frac{q'' \Delta Z_{s-1}}{K} \quad (2)$$

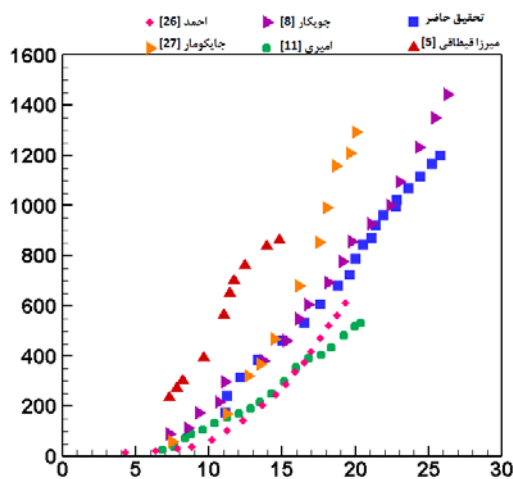
با استفاده از رابطه تجربی زوبر^[22]، شار حرارتی بحرانی برای آب خالص طبق رابطه (۸) محاسبه گردد.

$$q''_{max} = 0.131 h_{fg} \rho_g^{0.5} [g \sigma (\rho_l - \rho_g)]^{1/4} \quad (9)$$

با جای‌گذاری خواص آب خالص در رابطه زوبر، مقدار شار حرارتی بحرانی 120.5 kW/m^2 به دست می‌آید که میزان خطا در مقایسه با شار حرارتی بحرانی آب خالص در تحقیق حاضر، $\pm 0.4\%$ درصد می‌باشد. به طور کلی در این تحقیق به ۳ روش به بررسی صحت و دقت داده‌های آزمایشگاهی پرداخته شده است: الف) مقایسه داده‌ها با روابط تجربی در حوزه جوشش، ب) مقایسه با نتایج داده‌های تجربی سایر محققان در این زمینه، ج) انجام آزمون تکرارپذیری. مقایسه شار حرارتی مربوط به آزمایش جوشش آب یون‌زدایی‌شده روی سطح صاف و صیقلی مس با سایر روابط تجربی در نمودار ۳ و با نتایج سایر محققان در نمودار ۴ نشان داده شده است. طبق این نمودارها می‌توان مشاهده نمود که آزمایشات تحقیق حاضر، از دقت خوبی برخوردار می‌باشد.



نمودار ۳) مقایسه منحنی جوشش استخری تحقیق حاضر با روابط تجربی



نمودار ۴) مقایسه منحنی جوشش استخری تحقیق حاضر با نتایج سایر محققان

همچنین جهت بررسی تکرارپذیری، آزمایشات برای جوشش آب یون‌زدایی‌شده روی سطح صیقلی در ۲ روز مختلف انجام شده است و نتایج آن در نمودار ۵، گزارش شده است. میزان خطا در شار حرارتی بحرانی $\pm 0.15\%$ بوده است که نشان‌دهنده صحت نتایج می‌باشد.

با استفاده از جریان و ولتاژ خوانده‌شده در هر آزمایش، شار حرارتی به صورت رابطه (۷) محاسبه می‌شود که عدم قطعیت جریان و ولتاژ در تحقیق حاضر به ترتیب $\pm 0.1\%$ و $\pm 1\%$ درصد و عدم قطعیت مساحت سطح کارتریج 0.001 متر مربع می‌باشند.

$$q'' = \frac{VI}{A_{surf}} \quad (7)$$

سوراخ‌های محل قرارگیری ترموکوپل‌ها توسط فرآیند ماشین‌کاری کنترل عددی (CNC) تولید شده‌اند و خطای آن در بازه $\pm 0.1 \text{ mm}$ می‌باشد. با ضریب هدایت حرارتی مس با افزایش دما، کاهش می‌یابد. از آنجایی‌که محاسبات با فرض ثابت بودن ضریب هدایت حرارتی مس صورت گرفته است، نیاز می‌باشد تا عدم قطعیت آن محاسبه شود. این ضریب در دمای 100°C در حدود $\frac{400 \text{ W}}{\text{m.K}}$ و در دمای 300°C در حدود $\frac{400 \text{ W}}{\text{m.K}}$ می‌باشد. بنابراین عدم قطعیت آن از رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$\Delta K_{cu} = K_{100} - K_{300} = 401.6 - 400 = 1.6 \frac{\text{W}}{\text{m.K}}$$

مقادیر عدم قطعیت داده‌ها در جدول ۳، ذکر شده است.

جدول ۳) محاسبه عدم قطعیت داده‌های آزمایش

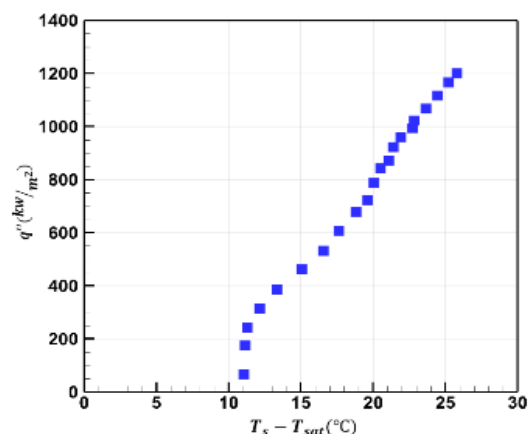
پارامتر	عدم قطعیت (درصد)
جریان (I)	± 0.1
ولتاژ (V)	± 1
عدم قطعیت مساحت سطح (m^2)	0.001
دمای ترموکوپل‌ها (K)	± 0.1
اختلاف دمای سطح (K)	± 0.6
شار حرارتی بحرانی (kW/m^2)	± 0.1
ضریب انتقال حرارت ($\text{kW/m}^2\text{K}$)	$\pm 7/6$

* برحسب درصد نیست

بر مبنای دقت دستگاه اندازه‌گیری در روش فوق، حداکثر خطا در محاسبه شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت به ترتیب برابر $5/1$ و $7/6$ درصد محاسبه شده است.

راستی آزمایشی نتایج

در ابتدا آزمایش جوشش آب یون‌زدایی‌شده بر سطح دایروی صیقلی از جنس مس و با قطر 2.5 سانتی‌متر جهت اعتبارسنجی صورت می‌گیرد. سطح مس توسط سنباده 1500 دانه پولیش داده می‌شود تا کاملاً صاف و صیقلی شود. تغییرات شار حرارتی برحسب اختلاف دمای سوپرهیت دیواره در نمودار ۲، نشان داده شده است.

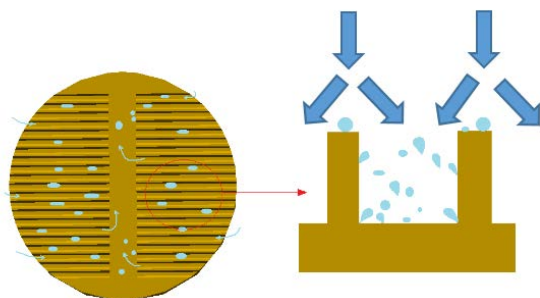


نمودار ۲) نمودار شار حرارتی برحسب اختلاف دمای سوپرهیت برای سطح صیقلی مس در حضور آب یون‌زدایی‌شده

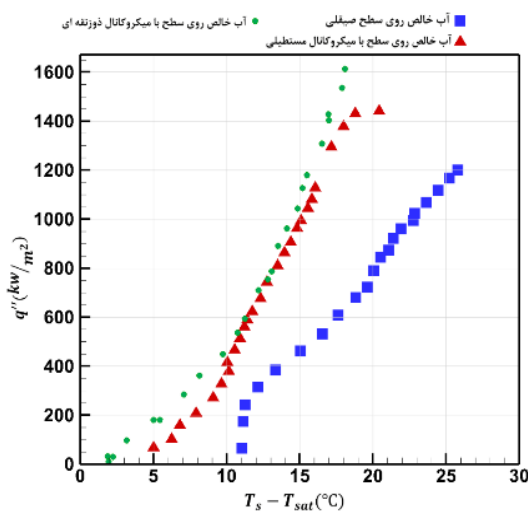
نتایج

جوشش آب یون زدایی شده خالص روی سطح میکروکانال شده

با ایجاد میکروکانال‌ها روی سطح جوشش، می‌توان با افزایش اثر مویینگی و تسهیل تغذیه مایع، ایجاد مسیر مجزا برای جریان مایع و بخار جهت اصلاح دینامیک حباب‌ها و افزایش مساحت سطح جوشش، انتقال حرارت را بهبود بخشید. شماتیک نحوه شکل‌گیری حباب‌ها درون میکروکانال‌ها و نیز تغذیه سایت‌های هسته‌زایی توسط سیال سرد پایین رونده در شکل ۹ نشان داده شده است. نمودار ۶، منحنی مقایسه‌ای جوشش آب دیونیزه خالص روی سطوح با میکروکانال‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای و سطح صیقلی را نشان می‌دهد. مطابق شکل، با افزایش دمای سطح، سایت‌های هسته‌زایی بیشتری فعال می‌شوند و چگالی سایت‌های هسته‌زا، انتقال حرارت میکروجابجایی و فرکانس جدایی حباب‌ها بیشتر شده و در نتیجه ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد.



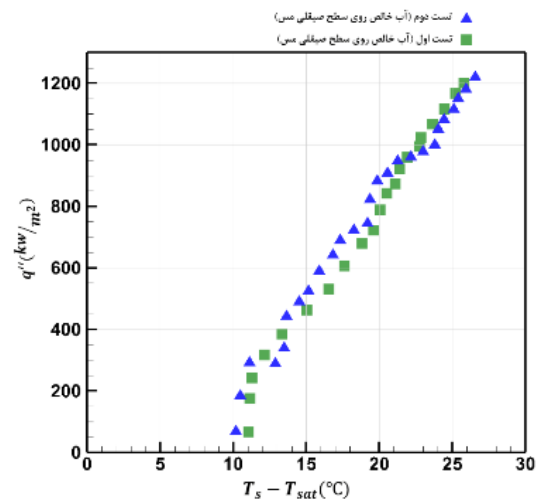
شکل ۹) نحوه تولید حباب و تغذیه سایت‌های هسته‌زایی درون میکروکانال‌ها



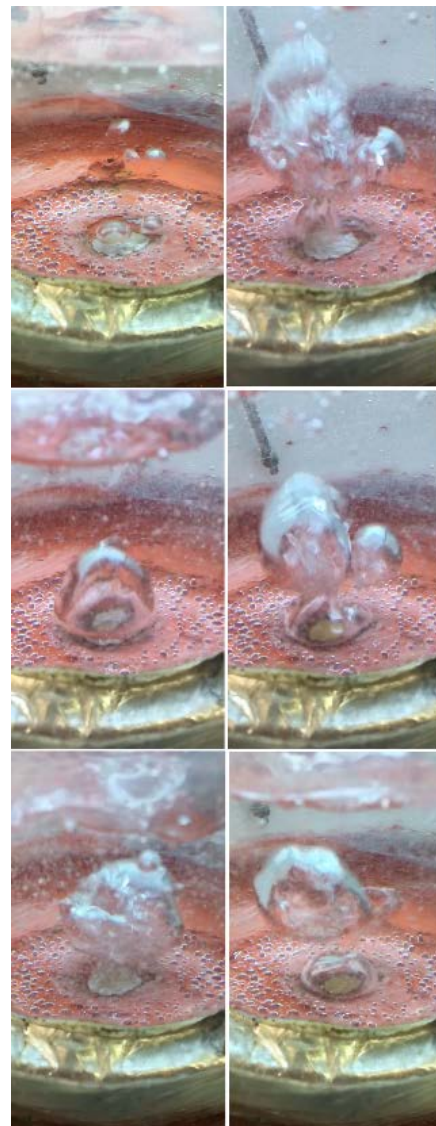
نمودار ۶) منحنی جوشش آب دیونیزه خالص روی سطح صیقلی و سطوح میکروکانال شده

شار حرارتی بحرانی برای جوشش آب یون‌زدایی شده در حضور سطح با میکروکانال‌های تغذیه‌کننده مستطیلی و دوزنقه‌ای به ترتیب 1440.26 kW/m^2 در اختلاف دمای سوپرهیت 20.4°C و 1612.02 kW/m^2 در اختلاف دمای سوپرهیت 18.07°C می‌باشد. در واقع، شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت جوششی در سطح با میکروکانال مستطیلی، به ترتیب ۲۰ و ۹/۸ درصد و در میکروکانال دوزنقه‌ای به ترتیب ۳۴/۳۲ و ۳۸/۹ درصد نسبت به سطح صیقلی مس بهبود داشته‌اند و در هر دو سطح میکروکانال شده، شروع هسته‌زایی در دماهای پایین‌تری نسبت به سطح صیقلی اتفاق

نحوه ایجاد حباب‌ها روی سطح صیقلی مس در شکل ۸ نشان داده است. با افزایش شار حرارتی، حباب‌های کوچک به یکدیگر می‌پیوندند و تشکیل حباب‌های بزرگتری را می‌دهند که به صورت ستونی از بخار از سطح جدا می‌شوند.

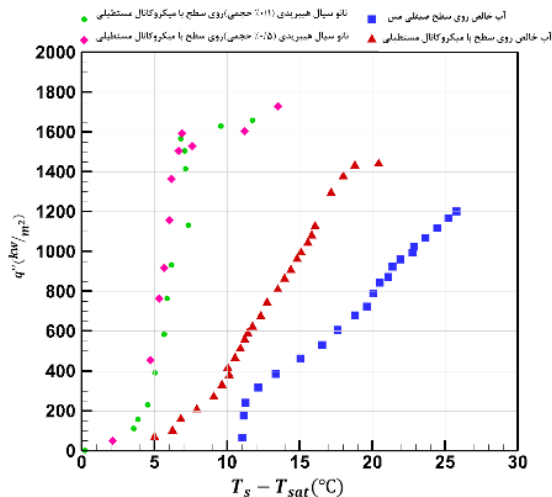


نمودار ۵) تکرارپذیری جوشش آب یون‌زدایی شده روی سطح صیقلی مس

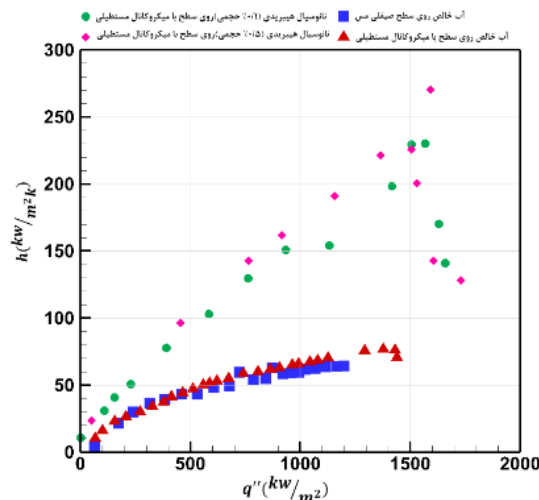


شکل ۸) نحوه تشکیل حباب روی سطح صیقلی مس

همچنین شروع هسته‌زایی در دماهای پایین‌تری نسبت به جوشش آب یون‌زدایی‌شده روی سطح صیقلی صورت گرفته است و نمودارهای جوشش هم نسبت به جوشش آب خالص روی سطح صیقلی و هم نسبت به جوشش آب خالص روی سطح با میکروکانال مستطیلی به سمت چپ حرکت کرده‌اند.



نمودار (۷) منحنی جوشش نانوسیال هیبریدی و آب دیونیزه خالص روی سطح با میکروکانال مستطیلی



نمودار (۸) منحنی مقایسه ضریب انتقال حرارت برحسب شار حرارتی برای جوشش نانوسیال هیبریدی و آب دیونیزه خالص روی سطح با میکروکانال مستطیلی

نمودارهای ۹ و ۱۰ به ترتیب مقایسه منحنی جوشش و ضریب انتقال حرارت برای نانوسیال هیبریدی در غلظت‌های حجمی مختلف، روی میکروکانال دوزنقه‌ای و آب دیونیزه خالص روی سطح صیقلی و میکروکانال دوزنقه‌ای را نشان می‌دهند.

برای جوشش نانوسیال هیبریدی در حضور سطح با میکروکانال‌های دوزنقه‌ای، برای دو غلظت ۰/۱ و ۰/۵ درصد حجمی، شار حرارتی بحرانی به ترتیب $1890/68 \text{ kW/m}^2$ در اختلاف دمای سوپرهیت دیواره $11/14^\circ\text{C}$ و $1975/93 \text{ kW/m}^2$ در اختلاف دمای سوپرهیت دیواره 12°C می‌باشد. بیشترین شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت جوششی مربوط به جوشش نانوسیال هیبریدی با غلظت حجمی ۰/۵ درصد روی سطح با میکروکانال دوزنقه‌ای می‌باشد که نسبت به

می‌افتد. در واقع به علت وجود ۳ سطح گرم در میکروکانال‌ها و افزایش مساحت سطح جوشش نسبت به سطح صیقلی، شروع هسته‌زایی در دماهای پایین‌تری اتفاق می‌افتد. همچنین به علت نیروی مویینگی ایجادشده درون میکروکانال‌ها، سیال به درون میکروکانال‌ها کشیده شده و باعث کنده‌شدن حباب‌های تولید شده روی دیواره‌ها می‌شود و این حباب‌ها را به سمت کف کانال‌ها و محل تقاطع کانال اصلی و میکروکانال‌های فرعی هدایت می‌کند، بنابراین یک سیکل چرخشی مداوم درون میکروکانال‌ها ایجاد شده و وجود کانال اصلی باعث تسهیل در گریز حباب‌ها می‌گردد. در نتیجه در سطوح با میکروکانال‌های دوزنقه‌ای و مستطیلی، ضریب انتقال حرارت جوششی نسبت به سطح صیقلی افزایش یابد.

همچنین شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت جوششی در سطح با میکروکانال‌های دوزنقه‌ای به ترتیب ۱۱/۹۲ و ۲۶/۵۱ درصد نسبت به سطح با میکروکانال‌های مستطیلی افزایش یافته است. به این علت که در میکروکانال‌های دوزنقه‌ای، مساحت سطح موثر نسبت به میکروکانال‌های مستطیلی افزایش می‌یابد. نتایج نهایی جوشش آب یون‌زدایی‌شده در حضور میکروکانال‌های تغذیه‌کننده مستطیلی و دوزنقه‌ای در جدول ۴ ذکر شده‌اند.

جدول (۴) نتایج جوشش آب خالص روی سطح صیقلی و سطوح میکروکانال‌شده

سطح جوشش	اختلاف دمای سوپرهیت ($^\circ\text{C}$)	شار حرارتی بحرانی (kW/m^2)	انتقال حرارت جوششی ($\text{kW/m}^2\text{K}$)	مکزیتم ضریب
سطح صیقلی	۲۵/۸	۱۲۰۰/۱۵	۶۴/۲	
سطح با میکروکانال مستطیلی	۲۰/۴۲	۱۴۴۰/۲۶	۷۰/۵۱	
سطح با میکروکانال دوزنقه‌ای	۱۸/۰۷	۱۶۱۲/۰۲	۸۹/۲	

جوشش نانوسیال هیبریدی روی سطوح میکروکانال‌شده

اگرچه با ایجاد میکروکانال‌های فرعی تغذیه‌کننده، عملکرد سطح جوشش نسبت به سطح صیقلی بهبود یافته است اما با پخش نمودن نانوذرات درون سیال پایه می‌توان به افزایش هدایت حرارتی و بهبود انتقال حرارت جوششی کمک نمود. پس از انجام آزمایشات جوشش هسته‌ای آب دیونیزه در حضور سطوح میکروکانال‌شده، آزمایشات جوشش هسته‌ای نانوسیال هیبریدی شامل ۳۰ درصد نانولوله‌های کربنی چند جداره پایه OH و ۷۰ درصد اکسید تیتانیوم در غلظت‌های حجمی ۰/۱ و ۰/۵ درصد در سیال پایه آب روی سطوح میکروکانال‌شده صورت می‌گیرد.

نمودارهای ۷ و ۸ به ترتیب مقایسه منحنی جوشش نانوسیال هیبریدی و ضریب انتقال حرارت جوششی در غلظت‌های حجمی مختلف، روی میکروکانال مستطیلی و آب دیونیزه خالص روی سطح صیقلی و میکروکانال مستطیلی را نشان می‌دهند.

با توجه به کدام نمودار ۷، برای سطح با میکروکانال‌های تغذیه‌کننده مستطیلی و در حضور نانوسیال هیبریدی با غلظت‌های ۰/۱ و ۰/۵ درصد حجمی، شار حرارتی بحرانی به ترتیب $1659/19 \text{ kW/m}^2$ در اختلاف دمای سوپرهیت دیواره $11/76^\circ\text{C}$ و 173 kW/m^2 در اختلاف دمای سوپرهیت دیواره $13/5^\circ\text{C}$ به دست آمده است. جوشش نانوسیال هیبریدی با غلظت‌های ۰/۱ و ۰/۵ درصد حجمی، در حضور سطح با میکروکانال‌های مستطیلی به ترتیب باعث ۳۸/۲ و ۴۴/۱ درصد بهبود در شار حرارتی بحرانی و ۲۵۷/۴ و ۳۲۱/۱۸ درصد بهبود در بیشترین ضریب انتقال حرارت جوششی شده است.

جوشش آب خالص روی سطح صیقلی، به ترتیب ۶۴/۶۴ و ۳۴۴/۷۶ درصد افزایش یافته است.

با گذشت زمان و افزایش شار حرارتی، نشست ذرات روی سطح جوشش صورت می‌گیرد و در هر لحظه، جوشش، روی سطح با مشخصه‌های فیزیکی جدید صورت می‌گیرد. این نشست ذرات در طول جوشش نانوسیال، باعث ایجاد لایه متخلخل روی سطح جوشش می‌شود که بر اثر خاصیت مویینگی، سیال به درون این لایه کشیده شده و سایت‌های هسته‌زایی تغذیه می‌شوند و در نتیجه وقوع شار حرارتی بحرانی به تاخیر می‌افتد. همچنین در شارهای حرارتی پایین، به علت فعال‌بودن حفره‌های بزرگ، نشست ذرات باعث تبدیل یک سایت هسته‌زایی به ۲ یا چند سایت هسته‌زایی می‌شود؛ اما در شارهای حرارتی بالا، حفره‌های کوچک فعال می‌شوند و با افزایش نشست ذرات، دهانه این حفره‌ها بسته شده و در نتیجه چگالی سایت‌های هسته‌زا کاهش می‌یابد و با افزایش ضخامت لایه نشست‌یافته، یک عایق حرارتی روی سطح تشکیل شده و مانع انتقال حرارت از سطح به سیال می‌شود. بنابراین همان طور که در نمودارها مشخص است، برای جوشش نانوسیال هیبریدی روی هر دو مقطع میکروکانال و در هر دو غلظت، با افزایش شار حرارتی، ضریب انتقال حرارت کاهش یافته است.

در جوشش نانوسیال هیبریدی روی هر دو مقطع میکروکانال، شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت نانوسیال بهبود یافته است. به این صورت که در میکروکانال دوزنقه‌ای و مستطیلی، جوشش نانوسیال هیبریدی با غلظت حجمی ۰/۵ درصد، به ترتیب باعث ۴/۵ و ۴/۲۷ درصد افزایش در شار حرارتی بحرانی و ۱۷/۰۸ و ۱۷/۸۳ درصد افزایش در ضریب انتقال حرارت جوششی نسبت به نانوسیال هیبریدی با غلظت حجمی ۰/۱ درصد شده است. زیرا با افزایش غلظت، تعداد ذرات در واحد حجم سیال افزایش یافته و بنابراین هدایت حرارتی موثر سیال نیز بیشتر می‌شود. همچنین با افزایش غلظت، نرخ نشست ذرات روی سطح بیشتر شده و الگوی نشست نسبت به غلظت ۰/۱ درصد حجمی، نامنظم‌تر می‌باشد. بنابراین سیال سرد می‌تواند در نقاطی با سطح در تماس باشد و سطح خنک شده و در نتیجه شار حرارتی بحرانی به تاخیر می‌افتد. به عنوان نمونه سطوح نشست‌یافته، تصویر سطح با میکروکانال مستطیلی نشست‌یافته، در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۵، جمع‌بندی نتایج جوشش نانوسیال هیبریدی با غلظت‌های ۰/۱ و ۰/۵ درصد روی سطوح میکروکانال شده را نشان می‌دهد.



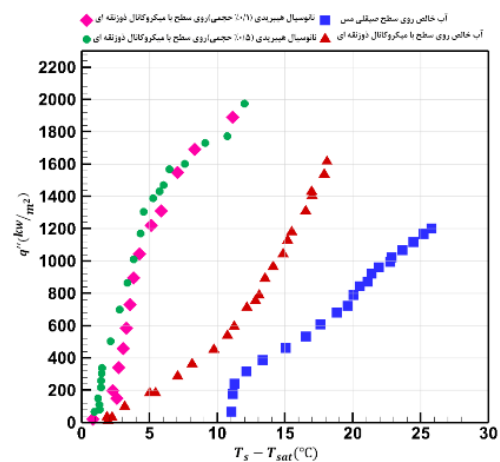
شکل ۱۰) سطح با میکروکانال مستطیلی نشست‌یافته

جدول ۵) نتایج جوشش نانوسیال هیبریدی با غلظت‌های ۰/۱ و ۰/۵ درصد روی سطوح میکروکانال شده

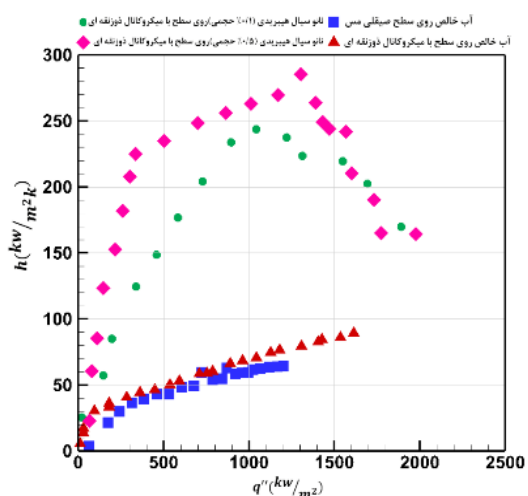
غلظت حجمی (درصد)	اختلاف دمای سوپرهیت (°C)	شار حرارتی بحرانی (kW/m²)	انتقال حرارت جوششی (kW/m²K)	ماکزیمم ضریب
نانوسیال هیبریدی روی سطح با میکروکانال مستطیلی				
۰/۱	۱۱/۷	۱۶۵۹/۱۹	۲۲۹/۴۸	
۰/۵	۱۳/۵	۱۷۳۰/۰۵	۲۷۰/۴	
نانوسیال هیبریدی روی سطح با میکروکانال دوزنقه‌ای				
۰/۱	۱۱/۱۴	۱۸۹۰/۶۸	۲۴۳/۸۷	
۰/۵	۱۲/۰۱	۱۹۷۵/۹۳	۲۸۵/۵۴	

جوشش آب یون‌زدایی‌شده خالص روی سطح میکروکانال نشست‌یافته

جهت بررسی اثر نشست نانوسیال هیبریدی در طی پروسه جوشش روی سطح جوشش، ابتدا این نانوسیال به مدت ۳ ساعت می‌جوشد تا نانوذرات، روی سطح نشست پیدا کنند. سپس مخزن حاوی نانوسیال تخلیه شده و به جای آن آب یون‌زدایی‌شده داخل مخزن قرار گرفته و آزمایشات جوشش هسته‌ای، روی سطوح میکروکانال نشست‌داده‌شده، انجام می‌گیرند. نمودارهای ۱۱ و ۱۲، به ترتیب منحنی‌های مقایسه‌ای جوشش و ضریب انتقال حرارت جوششی برحسب شار حرارتی را برای آب خالص یون‌زدایی‌شده روی سطح میکروکانال شده مستطیلی نشست‌یافته، نشان می‌دهند.



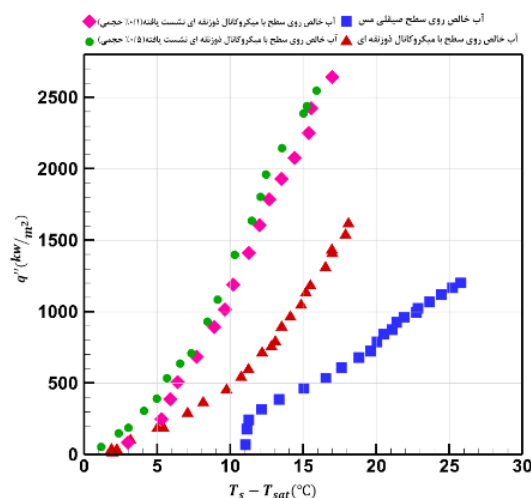
نمودار ۹) منحنی جوشش نانوسیال هیبریدی و آب دی‌یونیزه خالص روی سطح با میکروکانال دوزنقه‌ای



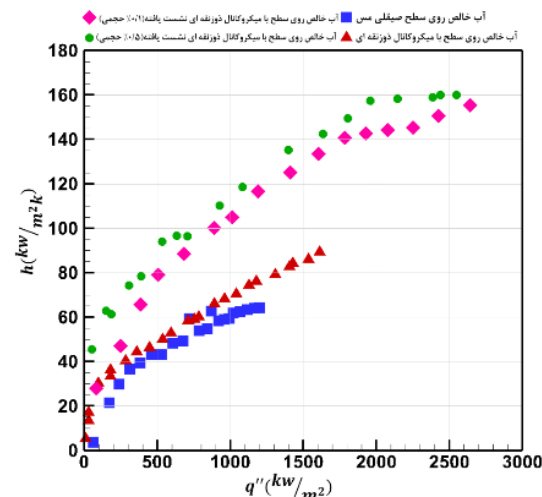
نمودار ۱۰) منحنی مقایسه ضریب انتقال حرارت برحسب شار حرارتی برای جوشش نانوسیال هیبریدی و آب دی‌یونیزه خالص روی سطح با میکروکانال دوزنقه‌ای

برای سطح با میکروکانال‌های دوزنقه‌ای نشست‌یافته توسط نانوسیال هیبریدی با غلظت‌های حجمی ۰/۱ و ۰/۵ درصد، شار حرارتی بحرانی به ترتیب ۲۶۴۲ و $2547/85 \text{ kW/m}^2$ و ضریب انتقال حرارت جوششی به ترتیب $155/41$ و $160/12 \text{ kW/m}^2\text{K}$ در اختلاف دمای سوپرهیت دیواره 17°C و $15/91^\circ\text{C}$ به دست آمده‌اند که شار حرارتی به ترتیب ۱۲۰/۱۴ و $112/29$ درصد و ضریب انتقال حرارت جوششی به ترتیب $142/07$ و $149/4$ درصد نسبت به آب خالص روی سطح صیقلی افزایش یافته‌اند.

در واقع تخلخل سطوح، با نشست ذرات افزایش یافته است و بنابراین چگالی سایت‌های هسته‌زایی افزایش یافته و فرکانس جدایی حباب‌ها بیشتر می‌شود و حباب‌ها سریع تر از سطح جدا شده و نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد.



نمودار ۱۳) منحنی جوشش برای آب دیونیزه خالص روی سطح میکروکانال دوزنقه‌ای نشست‌یافته

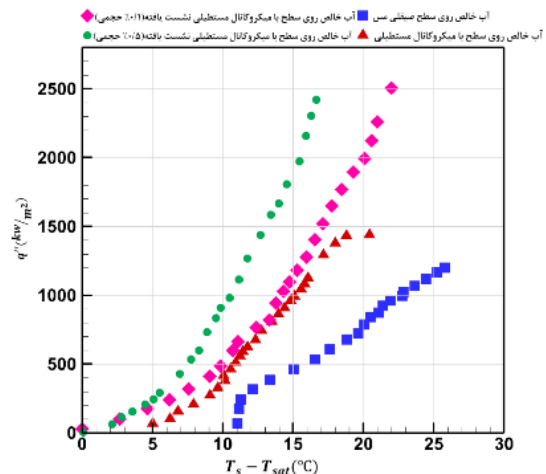


نمودار ۱۴) منحنی ضریب انتقال حرارت جوششی برحسب شار حرارتی برای آب دیونیزه خالص روی سطح میکروکانال دوزنقه‌ای نشست‌یافته

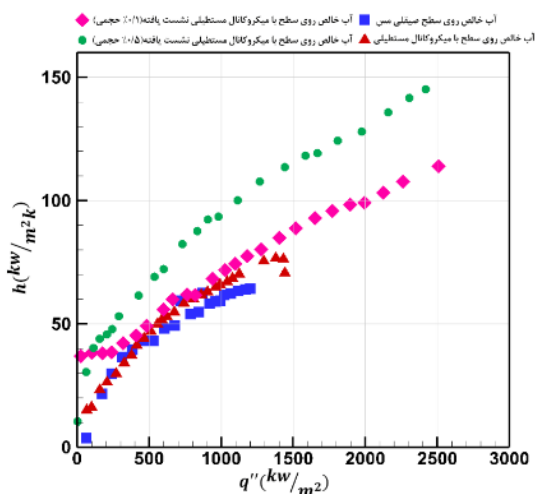
با افزایش غلظت در سطح نشست‌یافته دوزنقه‌ای، ضریب انتقال حرارت ۳ درصد نسبت به غلظت ۰/۱ درصد حجمی افزایش یافته است. طبق تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح میکروکانال دوزنقه‌ای نشست‌یافته، در ۲ غلظت ۰/۱ و ۰/۵ درصد که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده‌اند، میزان حفره‌های سطوح نشست‌یافته با افزایش غلظت، افزایش یافته و بنابراین چگالی

با توجه به این نمودارها، برای جوشش آب خالص روی سطح با میکروکانال‌های مستطیلی نشست‌یافته توسط نانوسیال هیبریدی با غلظت حجمی ۰/۱ و ۰/۵ درصد، شار حرارتی بحرانی به ترتیب $2507/99$ و $2419/83 \text{ kW/m}^2$ و ضریب انتقال حرارت جوششی به ترتیب $113/99$ و $145/26 \text{ kW/m}^2\text{K}$ می‌باشند که نسبت به جوشش آب خالص روی سطح صیقلی به ترتیب، $108/9$ ، $101/63$ ، $77/55$ و $126/26$ درصد افزایش یافته‌اند. همچنین در سطوح نشست‌یافته توسط غلظت‌های ۰/۱ و ۰/۵ درصد حجمی، شار حرارتی به ترتیب $74/13$ و 68 درصد و ضریب انتقال حرارت به ترتیب $61/69$ و $106/01$ درصد نسبت به جوشش آب یون‌زدایی‌شده روی سطح با میکروکانال‌های مستطیلی بدون نشست، افزایش یافته‌اند. با افزایش غلظت ذرات نشست‌یافته، نمودار جوشش به سمت اختلاف دماهای سوپرهیت دیواره کمتر حرکت کرده و ضریب انتقال حرارت نسبت به نانوسیال با غلظت ۰/۱ درصد حجمی، $27/43$ درصد افزایش یافته است، اما شار حرارتی بحرانی، با افزایش غلظت نشست، $3/5$ درصد کاهش پیدا کرده است.

نمودارهای ۱۳ و ۱۴، به ترتیب منحنی‌های مقایسه‌ای جوشش و ضریب انتقال حرارت جوششی برحسب شار حرارتی را برای آب خالص یون‌زدایی‌شده روی سطح میکروکانال‌های دوزنقه‌ای نشست‌یافته، نشان می‌دهند.

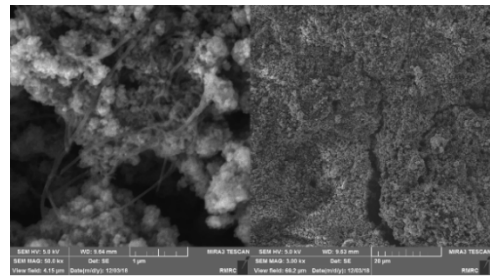


نمودار ۱۱) منحنی جوشش برای آب دیونیزه خالص روی سطح میکروکانال مستطیلی نشست‌یافته

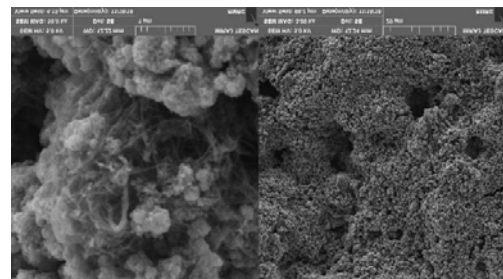


نمودار ۱۲) منحنی ضریب انتقال حرارت جوششی برحسب شار حرارتی برای آب دیونیزه خالص روی سطح میکروکانال مستطیلی نشست‌یافته

سایت‌های هسته‌زا و نرخ تولید حباب بیشتر می‌شود و ضریب انتقال حرارت جوششی با افزایش غلظت ذرات در سطوح نشست‌یافته بیشتر می‌شود.



شکل (۱۱) تصاویر SEM از سطح میکروکانال دوزنقه‌ای نشست‌یافته با غلظت حجمی ۰/۱ درصد



شکل (۱۲) تصاویر SEM از سطح میکروکانال دوزنقه‌ای نشست‌یافته با غلظت حجمی ۰/۵ درصد

به طور کلی با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که در جوشش آب دیونیزه روی سطح با میکروکانال مستطیلی نشست‌یافته با غلظت‌های ۰/۱ و ۰/۵ درصد، شار حرارتی بحرانی به ترتیب ۵۱/۱۶ و ۳۹/۸۷ درصد نسبت به جوشش نانوسیال هیبریدی با غلظت‌های ۰/۱ و ۰/۵ درصد افزایش یافته است که این افزایش در سطح با میکروکانال دوزنقه‌ای به ترتیب ۳۹/۷۳ و ۲۸/۹۴ درصد می‌باشد. ضریب انتقال حرارت جوششی برای جوشش آب دیونیزه روی میکروکانال‌های نشست‌یافته دوزنقه‌ای و مستطیلی با غلظت ۰/۱ درصد حجمی، به ترتیب ۳۶/۲۷ و ۵۰/۳۲ درصد و برای غلظت ۰/۵ درصد به ترتیب ۴۳/۹۴ و ۴۶/۲۸ درصد نسبت به جوشش نانوسیال هیبریدی با غلظت‌های ۰/۱ و ۰/۵ درصد کاهش یافته است. به این علت که سطوح نشست‌یافته بسیار آب‌دوست هستند و با انجام تست ترشوندگی مشاهده می‌شود که قطره آب روی سطح سریعاً پخش می‌شود و بنابراین سایت‌های هسته‌زایی توسط سیال کاملاً پر و غیرفعال شده و ضریب انتقال حرارت جوششی کاهش می‌یابد.

جمع‌بندی نتایج آزمایشات آب دیونیزه روی سطوح میکروکانال نشست‌یافته در جدول ۶، نشان داده شده است.

جدول ۶) نتایج جوشش آب دیونیزه روی سطوح میکروکانال‌های نشست‌یافته

غلظت حجمی (درصد)	اختلاف دمای سوپرهیت (°C)	شار حرارتی بحرانی (kW/m^2)	ماکزیمم ضریب انتقال حرارت جوششی (kW/m^2K)
جوشش آب خالص روی سطح با میکروکانال مستطیلی نشست‌یافته			
۰/۱	۲۲	۲۵۰۷/۹۹	۱۱۳/۹۹
۰/۵	۱۶/۶۵	۲۴۱۹/۸۳	۱۴۵/۲۶
جوشش آب خالص روی سطح با میکروکانال دوزنقه‌ای نشست‌یافته			
۰/۱	۱۷	۲۶۴۲	۱۵۵/۴۱
۰/۵	۱۵/۹۱	۲۵۴۷/۸۵	۱۶۰/۱۲

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق، اثر نشست نانوذرات روی سطوح با میکروکانال‌های تغذیه‌کننده با مقاطع دوزنقه‌ای و مستطیلی بر مشخصه‌های انتقال حرارت جوشش استخری بررسی شده است. آزمایشات جوشش در حضور نانوسیال هیبریدی که حاصل ترکیب ۲ نوع نانوذره اکسید تیتانیوم و نانولوله‌های کربنی چند جداره اصلاح‌شده با پایه OH می‌باشد و در غلظت‌های حجمی ۰/۱ و ۰/۵ درصد تهیه شده‌اند، صورت گرفته‌اند. از فعال‌کننده سطحی سدیم دودسیل سولفات (SDS) نیز جهت پایداری نانوسیال استفاده شده است.

در ابتدا جهت اعتبارسنجی نتایج، آزمایش جوشش آب یون‌زدایی‌شده خالص روی سطح صیقلی مس انجام شده است. در این حالت شار حرارتی بحرانی $1200/15 kW/m^2$ و بیشترین ضریب انتقال حرارت جوششی $64/2 kW/m^2K$ در اختلاف دمای سوپرهیت دیواره $25/8^\circ C$ به دست آمده است. جهت بررسی تکرارپذیری، آزمایشات ۲ بار و در ۲ روز مختلف انجام گرفته‌اند که تفاوت نتایج بسیار ناچیز بود. به علت کوچک‌بودن سطح انتقال حرارت و کمبود حفره‌ها و سایت‌های هسته‌زایی، جهت مهندسی نمودن سطح جوشش، یک میکروکانال اصلی با عرض ۳ میلی‌متر و عمق ۴۰۰ میکرومتر روی سطح دایروی از جنس مس، توسط دستگاه CNC ایجاد شده است، سپس ۲۱ عدد میکروکانال تغذیه‌کننده فرعی با ۲ سطح مقطع مستطیلی و دوزنقه‌ای به صورت عمود بر کانال اصلی ایجاد شده‌اند. عمق میکروکانال‌ها ۴۰۰ میکرومتر، عرض میکروکانال‌های مستطیلی ۷۷۰ میکرومتر و عرض دهانه و کف میکروکانال‌های دوزنقه‌ای به ترتیب ۷۷۰ و ۳۸۵ میکرومتر می‌باشد. برای سطح با میکروکانال‌های دوزنقه‌ای شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت به ترتیب $1612/02 kW/m^2K$ و $89/2 kW/m^2K$ در اختلاف دمای سوپرهیت دیواره $18/07^\circ C$ به دست آمده‌اند. همچنین برای سطح با میکروکانال‌های مستطیلی، شار حرارتی بحرانی و بیشترین ضریب انتقال حرارت جوششی به ترتیب $1440/26 kW/m^2K$ و $70/5 kW/m^2K$ در اختلاف دمای سوپرهیت دیواره $20/4^\circ C$ به دست آمده‌اند. بنابراین میکروکانال‌های دوزنقه‌ای به علت افزایش سطح موثر انتقال حرارت، عملکرد بهتری نسبت به میکروکانال‌های مستطیلی دارد. با ایجاد میکروکانال‌ها روی سطح جوشش، مسیر حباب‌های داغ بالارونده و سیال سرد پایین‌رونده تفکیک شده و عملکرد خنک‌کاری سطح دچار اختلال نمی‌شود. همچنین در میکروکانال‌ها به علت وجود ۳ سطح داغ، مساحت سطح جوشش نسبت به سطح صیقلی افزایش می‌یابد. در میکروکانال‌ها به علت وجود خاصیت مویینگی، سیال به درون کانال کشیده شده و باعث خنک‌کاری و تغذیه سایت‌های هسته‌زا و در نتیجه کاهش اختلاف دمای سوپرهیت می‌شود و نیز تاخیر در وقوع شار حرارتی بحرانی اتفاق می‌افتد.

با وجود بهبود ساختار سطح جوشش، سیال آب خالص دارای ظرفیت گرمایی کمی جهت انتقال حرارت می‌باشد. به این منظور از نانوسیال هیبریدی با مشخصاتی که پیشتر ذکر گردید به عنوان سیال حامل جوششی استفاده شده است. برای جوشش نانوسیال هیبریدی در غلظت ۰/۱ و ۰/۵ درصد حجمی، روی سطح با میکروکانال‌های مستطیلی، شار حرارتی بحرانی به ترتیب ۱۶۵۹/۱۹ و $1730/05 kW/m^2$ و بیشترین ضریب انتقال حرارت جوششی به ترتیب $229/48 kW/m^2K$ و $270/4 kW/m^2K$ در اختلاف دماهای سوپرهیت دیواره $11/7^\circ C$ و $13/5^\circ C$ به دست آمده‌اند. همچنین برای میکروکانال‌های دوزنقه‌ای و در حضور نانوسیال هیبریدی با

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.
تاییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده است.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.
سهم نویسندگان: مائده محبی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)، مرتضی خیاط (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۵۰٪)
منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

پی‌نوشت

علامه

ضریب انتقال حرارت جوششی (W/m^2K)	h
جرم (kg)	m
ضریب انتقال حرارت هدایتی (W/mK)	K
آنتالپی اشباع kJ/kg	h_{fg}
حجم (m^3)	V
شار حرارتی (W/m^2)	q''
دما (K)	T
عدم قطعیت	U
موقعیت ترموکوپل‌ها در کارتریج هیتر (mm)	Z
علامه یونانی	
درصد حجمی ذرات	ϕ
دانسیته (Kg/m^3)	ρ
کشش سطحی (N/m)	σ
زیرنویس‌ها	
نانوذرات	np
نانوسیال	nf
سطح جوشش	S
اشباع	sat
بخار	g
مایع	l

منابع

- 1- Cooke D, Kandlikar SG. Effect of open microchannel geometry on pool boiling enhancement. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2012;55(4):1004-1013.
- 2- Jaikumar A, Kandlikar SG. Enhanced pool boiling heat transfer mechanisms for selectively sintered open microchannels. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015;88:652-661.
- 3- Jaikumar A, Kandlikar SG. Pool boiling enhancement through bubble induced convective liquid flow in feeder microchannels. Applied Physics Letters. 2016;108(4):041604.
- 4- Mirza Gheithaghy A, Samimi A, Saffari H. Surface structuring with inclined minichannels for pool boiling improvement. Applied Thermal Engineering. 2017;126:892-902.
- 5- Mirza Gheithaghy A, Saffari H, Mohebbi M. Investigation pool boiling heat transfer in U-shaped mesochannel with electrodeposited porous coating. Experimental Thermal and Fluid Science. 2016;76:87-97.
- 6- Walunj A, Sathyabhama A. Comparative study of pool boiling heat transfer from various microchannel geometries. Applied Thermal Engineering. 2017;128:672-683.
- 7- Kumar Das S, Djaya Putra NS, Roetzel W. Pool boiling characteristics of nano-fluids. International Journal of

غلظت‌های ۰/۱ و ۰/۵ درصد حجمی، شار حرارتی بحرانی به ترتیب 1890.68 kW/m^2 و 2507.9 kW/m^2 و بیشترین ضریب انتقال حرارت جوششی به ترتیب 243.8 W/m^2K و 285.5 W/m^2K در اختلاف دماهای سوپرهیت دیواره $11/14^\circ C$ و $12^\circ C$ به دست آمده‌اند که با افزایش غلظت در هر دو سطح، شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت افزایش یافته‌اند.

پس از جوشش نانوسیالات هیبریدی تا رسیدن به نقطه CHF، جهت بررسی اثر نشست، نانوسیالات از مخزن تخلیه شده و مخزن جهت خارج نمودن ذرات باقی‌مانده تمیز می‌گردد. سپس آزمایشات جوشش آب یون‌زدایی‌شده خالص روی سطوح نشست‌یافته انجام گرفته‌اند. در این حالت شار حرارتی بحرانی برای سطح با میکروکانال‌های مستطیلی نشست‌یافته با غلظت‌های ۰/۱ و ۰/۵ درصد حجمی به ترتیب 2419.8 kW/m^2 و 2507.9 kW/m^2 و بیشترین ضریب انتقال حرارت جوششی به ترتیب 243.8 W/m^2K و 285.5 W/m^2K در اختلاف دماهای سوپرهیت دیواره $11/14^\circ C$ و $12^\circ C$ به دست آمده‌اند. در واقع در پژوهش حاضر با ترکیب مکانیزم‌های اصلاح سطح و نیز افزایش هدایت حرارتی سیال پایه، به بهبود مشخصه‌های انتقال حرارت کمک شده است. همچنین استفاده از دو نوع نانوذره در سیال پایه، یک روش مقرون به صرفه از نظر عملکرد حرارتی نسبت به استفاده از یک نوع ذره می‌باشد. مقایسه نهایی بین میکروکانال‌های دوزنقه‌ای و مستطیلی در حضور نانوسیال هیبریدی در ۲ غلظت مختلف و نیز در آزمایشات نشست در نمودار ۱۵ نشان داده شده است که در آن اثر تغییر پروفیل میکروکانال‌ها بر شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت مشخص شده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده، بیشترین شار حرارتی بحرانی مربوط به سطح با میکروکانال‌های دوزنقه‌ای می‌باشد.



نمودار ۱۵) نمودار میله‌ای مقایسه نتایج نهایی آزمایشات جوشش و نشست نانوسیالات هیبریدی روی سطوح میکروکانال‌شده

- Calculation of heat transfer coefficient of MWCNT-TiO₂ nanofluid in plate heat exchanger. *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2014;3(10):153-162.
- 18- Bhosale GH, Borse SL. Pool boiling CHF enhancement with Al₂O₃-CuO/H₂O hybrid nanofluid. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2013;2(10):946-950.
- 19- Kumar Gupta S, Dev Misra R. An experimental investigation on flow boiling heat transfer enhancement using Cu-TiO₂ nanocomposite coating on copper substrate. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018;98:406-419.
- 20- Morshed AKMM, Paul TC, Khan J. Effect of Cu-Al₂O₃ nanocomposite coating on flow boiling performance of a microchannel. *Applied Thermal Engineering*. 2013;51(1-2):1135-1143.
- 21- Moffat RJ. Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1988;1(1):3-17.
- 22- Zuber N. Hydrodynamic aspects of boiling heat transfer transfer (Thesis). Technical Report. US: OSTI.GOV; 1959 June. Report No: AECU-4439.
- 23- Rohsenow WM. A method of correlating heat transfer data for surface boiling liquids. Technical Report. Cambridge: M.I.T. Division of Industrial Cooperation. 1951. Report No: 5.
- 24- Pioro LII. Experimental evaluation of constants for the Rohsenow pool boiling correlation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1999;42(11):2003-2013.
- 25- Táboas F, Vallès M, Bourouis M, Gorenflo R. Pool boiling of ammonia/water and its pure component: Comparison data in literature with predictions of standard correlations. *International Journal of Refrigeration*. 2007;30(5):778-788.
- 26- Ahmed O, Hamed MS. Experimental investigation of the effect of particle deposition on pool boiling of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010;55(13-14):3423-3436.
- 27- Jaikumar A, Kandlikar SG. Ultra-high pool boiling performance and effect of channel width with selectively coated open microchannel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016;95:795-805.
- Heat and Mass Transfer. 2003;46(5):851-862.
- 8- Chopkar M, Das AK, Manna I, Das PK. Pool boiling heat transfer characteristics of ZrO₂-water nanofluids from a flat surface in a pool. *Heat and Mass Transfer*. 2008;44(8):999-1004.
- 9- Harish G, Emlin V, Sajith V. Effect of surface particle interactions during pool boiling of nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*. 2011;50(12):2318-2327.
- 10- Sarafraz MM, Hormozi F. Pool boiling heat transfer to dilute copper oxide aqueous nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*. 2015;90:224-237.
- 11- Amiri A, Shanbedi M, Amiri H, Zeinali Heris S, Kazi SN, Chew BT, et al. Pool boiling heat transfer of CNT/water nanofluids. *Applied Thermal Engineering*. 2014;71(1):450-459.
- 12- Ham J, Kim H, Yunchan S, Cho H. Experimental investigation of pool boiling characteristics in Al₂O₃ nanofluid according to surface roughness and concentration. *International Journal of Thermal Sciences*. 2017;114:86-97.
- 13- Muhammad Ali H, Mustafa Generous M, Ahmad F, Irfan M. Experimental investigation of nucleate pool boiling heat transfer enhancement of TiO₂-water based nanofluids. *Applied Thermal Engineering*. 2017;113:1146-1151.
- 14- Salari E, Peyghambarzadeh SM, Sarafraz MM, Hormozi F, Nikkhah V. Thermal behavior of aqueous iron oxide nano-fluid as a coolant on a flat disc heater under the pool boiling condition. *Heat and Mass Transfer*. 2017;53(1):265-275.
- 15- Salimpour MR, Abdollahi A, Afrand M. An experimental study on deposited surfaces due to nanofluid pool boiling: Comparison between rough and smooth surfaces. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2017;88:288-300.
- 16- Abbasi SM, Rashidi A, Nemati A, Arzani K. The effect of functionalisation method on the stability and the thermal conductivity of nanofluid hybrids of carbon nanotubes/gamma alumina. *Ceramics International*. 2013;39(4):3885-3891.
- 17- Safi MA, Ghosatloo A, Hamidi AA, Shariaty-Niassar M.