مجله مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1396، دوره 17، شماره 12، ص‌ص 531-541

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تجربی اثر جهت‌گیری زبری سطح بر نحوه حرکت حباب و شار حرارتی بحرانی در جوشش استخری

مهدی محمدی[1]، مرتضی خیاط[2*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

* تهران، صندوق پستی 775- 14515، mkhayat@srbiau.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 29 مهر 1396
پذیرش: 02 آذر 1396
ارائه در سایت: 01 دی 1396

کلید واژگان:
جوشش استخری
جهت گیری سطح
حرکت حباب
شار حرارتی بحرانی
ضریب انتقال حرارت

چکیده

جوشش استخری توانایی دارد که شار حرارتی زیادی را در یک اختلاف دمای کوچک منتقل نماید و این امر می‌تواند با استفاده از روش‌های اصلاح و بهبود سطح افزایش پیدا کند. در پژوهش حاضر به بررسی انتقال حرارت جوشش استخری بر روی 4 سطح با جهت گیری‌های مختلف پرداخته شده است. به همین منظور یک دستگاه آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. هدف اصلی، ارائه یک روش ساده و مقرون به صرفه و با ماندگاری طولانی‌تر در کارهای صنعتی، همراه با داشتن بیش‌ترین میزان شار حرارتی بحرانی در برابر کم‌ترین اختلاف دمای سوپر هیت سطح بوده است. نتایج بدست آمده از مطالعه نشان داده که فاکتور زبری سطح باعث به تعویق افتادن اتصال حباب‌ها شده و شار حرارتی اندکی افزایش می‌یابد. علاوه بر فاکتور زبری، دو فاکتور تفکیک حباب از سیال در فرآیند دفع گرما و تغذیه بیشتر سایت‌های هسته‌زایی و میکرولایه زیرین حباب می‌توانند با اهمیت‌تر از زبری سطح باشند. به طوری که سطح با زبری کم‌تر و با جهت گیری زبری یک بعدی افزایش شار حرارتی بیش‌تری را نسبت به سطح با زبری بیش‌تر و با جهت گیری زبری دایروی شکل نشان داده است. در انتها با ایجاد یک سطح میکروکانال که ترکیبی از روش‌های تفکیک سیال- حباب و تغذیه بیش‌تر میکرولایه زیرین حباب بوده است، می‌توان بدون اضافه کردن هیچ گونه ذرات اضافی به سیال پایه، شار حرارتی را تا 131% و ضریب انتقال حرارت را تا 211% افزایش داد.

Experimental investigation of the effect of roughness orientation of surface on motion of bubbles and critical heat flux

Mehdi Mohammadi, Morteza Khayat*

Department of Mechanical Engineering, Science and Research branch Islamic Azad University, Tehran, Iran
*P.O.P. 14515-775, Tehran, Iran, mkhayat@srbiau.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 21 October 2017
Accepted 23 November 2017
Available Online 22 December 2017

Keywords:
Pool Boiling
Orientation of Surface
Bubble Motion
Critical Heat Flux
Heat Transfer Coefficient

ABSTRACT

Pool boiling has the ability to remove large heat flux at low difference temperature of wall and this can be further enhanced by using surface modification methods. This article investigates pool boiling heat transfer on 4 levels with different orientations. For this purpose, a laboratory device was designed and built. The main goal was to provide a simple and cost-effective manner with high durability in industrial applications, maintaining the highest amount of critical heat flux at the lowest level of super -heated temperature difference. The results showed that surface roughness factor causes a delay in connecting the bubbles and heat flux increased slightly. In addition to roughness factor, two factors separating bubbles from the fluid in the heat dissipation and more power nucleation sites and micro-bubble layer can be more important than the surface roughness. The surface polished in one direction with lower roughness has higher critical heat flux than circular rough surface. Ultimately, by creating a microchannel surface which has been a combination of bubble liquid separation method and further feeding of bubble microlayer. It would be possible to increase the critical heat flux and heat transfer coefficient to 131% and 211% respectively, without adding any additional particles to the base fluid.

1- مقدمه

در سال‌های اخیر، با پیشرفت سریع مرزهای دانش و به تبع آن تولید محصولات جدید که با بارهای حرارتی به شدت بالا کار می‌نمایند، نیاز به یک مبدل حرارتی موثر و کوچک به خصوص در قطعات میکروالکترونیک به شدت احساس شده و همین امر محرک و انگیزشی ایجاد می‌نماید تا یک تکنیک موثر برای افزایش انتقال حرارت ایجاد شود. جوشش به‌دلیل دارا بودن گرمای نهان تبخیر که در نتیجه تغییر فاز ایجاد می‌شود در مقایسه با انتقال حرارتی که با سیال و یا هوا به‌طور مجزا در ارتباط باشند، موثرتر می‌باشد، چرا که برخلاف سایر روش‌های انتقال‌حرارت، سطح که بر روی آن جوشش روی می‌دهد به‌طور یکنواخت خنک کاری شده و نقطه داغی بر روی آن باقی نمی‌ماند.

زمانی که شار حرارتی از یک مقدار معینی تجاوز نماید، یک لایه از بخار

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Mohammadi, M. Khayat, Experimental investigation of the effect of roughness orientation of surface on motion of bubbles and critical heat flux, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 531-541, 2018 (in Persian)

که حاصل به یکدیگر پیوستن حباب‌های کوچک و تولید یک حباب پوشاننده بزرگ است روی سطح جوشش را فرا گرفته و مانع از تبادل حرارتی بین سطح و سیال می‌شود (به‌دلیل پایین‌تر بودن ضریب انتقال حرارت بخار در مقایسه با آب) در این شرایط دما روی سطح به سرعت پرش کرده و این می‌تواند به سطح جوشش و کارتریج هیتر آسیب برساند. این نقطه محدود کننده در پدیده جوشش، شار حرارتی بحرانی CHF[1] نامیده می‌شود. شار حرارتی بحرانی زمانی‌که هر یک از دو عامل تولید و یا گریختن حباب با مشکل روبه‌رو شوند، روی می‌دهد.

هدف تمامی پژوهش‌های پیشین، توسعه و ترقی دادن هندسه یک سطح خاص برای افزایش جوشش هسته‌زایی، کاهش دادن دمای سوپرهیت سطح و به تعویق انداختن شار حرارتی بحرانی CHF می‌باشد. روش‌های زیادی بدین منظور ارائه شده‌اند که به دو دسته روش‌های فعال و روش‌های غیرفعال تقسیم بندی می‌شوند. روش‌های غیر فعال مانند سطوح زبر، سطوح متخلخل و آبدوست، اضافه نمودن نانو ذرات به سیال پایه، استفاده از سطوح گسترش یافته و پره‌ها و روش‌های فعال مانند ایجاد میدان الکتروستاتیک و ارتعاش سطح و سیال در حال جوشش می‌باشد. عملا استفاده از روش‌های فعال در صنعت غیرعملی و یا مستلزم هزینه‌های بالا می‌باشند [1]. ساده‌ترین راه و متد از روش‌های غیرفعال، اصلاح سطح به‌وسیله زبر نمودن سطح توسط ماشین‌کاری و پولیش با کاغذ سنباده می‌باشد. با زبر نمودن سطح مراکز و حفره‌های به دام اندازی حباب افزایش یافته و حباب‌ها دیرتر در یکدیگر ادغام شده و CHF افزایش می‌یابد [2].

تلاش‌های زیادی به‌منظور ایجاد روابط صحیح بین ضریب انتقال حرارت HTC[2] و پارامتر زبری و جدول‌بندی و مقایسه با پارامترهای تجربی انجام گرفته است که می‌توان به کارهای جونز و همکاران اشاره نمود [3]. تلاش‌های اولیه روی سطوح، برای بهبود ضریب انتقال حرارت، توسط فریتز [4] انجام شد در این پژوهش سطوح مسی با شیارهایی به عمق 1.6 میلی‌متر و گام 1.2 میلی‌متر زبر گردید و 3 برابر بهبود در ضریب انتقال حرارت جوششی مشاهده شد. برنسون [2] با زبر نمودن سطح توسط انواع سنباده‌ها با زبری‌های مختلف موفق به افزایش ضریب انتقال حرارت تا 6 برابر سطح صیقلی شد، همچنین طبق گزارش برنسون، از یک میزان زبری به بعد روند افزایشی در شارحرارتی مشاهده نشده است. از تاثیر شرایط سطح در اکثر آزمایش‌ها و روابط تا زمان رمیلسون [5] چشم پوشی شده بود. او به کمک همکارانش در طی آزمایشات تجربی گزارش کردند که اثر خیسی‌پذیری بر پدیده CHF موثرتر از اثر زبری سطح بوده است. چرا که زبری تنها سبب کاهش نیروی چسبندگی سطح و حباب و جدا شدن سریع‌تر حباب از سطح شده، وجود میکرو ناهمواری‌ها بر روی سطح مانع از به یکدیگر پیوستن سریع حباب‌ها و افزایش شار حرارتی بحرانی در سطوح زبر می‌شود در حالی که با آبدوست شدن سطح، سایت‌ها و محل‌های هسته‌زایی افزایش یافته و فرکانس تولید حباب افزایش می‌یابد و به سبب حالت مویینگی سایت‌های هسته زایی، سیال به درون این حفره‌ها کشیده شده و زاویه برخورد قطره و سطح کاهش یافته و حفره‌ها و سایت‌های فعال هسته‌زایی بیش‌تر توسط سیال‌کاری تغذیه می‌شوند که این امر می‌تواند به افزایش بیش‌تر شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت به طور همزمان منجر شود. روش‌های گوناگونی برای متخلخل کردن سطوح انتقال حرارت ارائه شده که از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های شیمیایی، روش تفت جوش نمودن، روش الکترونشست و نشست دادن نانوذرات برروی سطح اشاره نمود. شکل گرفتن یک لایه متخلخل نازک بر روی سطح هیتر می‌تواند کشش سطحی، خیسی‌پذیری، زبری سطح، چگالی سایت‌های فعال هسته‌زایی و ضریب انتقال حرارت را به‌طور قابل توجهی تغییر دهد. ایجاد پوشش متخلخل برروی سطح دارای پتانسیل قوی می‌باشد تا بالانس نیروها در خط سه گانه و رفتار دینامیک حباب از قبیل زمان تشکیل و فرکانس تولید و جدایش حباب را تغییر دهد [6].

صفاری و همکاران [7] با الکترونشست نمودن سطح مس صیقلی در طی دو مرحله یک بار با مدت زمان زیاد و جریان کم و بار دیگر با مدت زمان کوتاه و جریان اعمالی بالا برای دست‌یابی به استحکام بیشتر لایه الکترونشست شده پرداختند. تصاویر عکس‌برداری شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبوشی SEM[3] و آزمایش ایستایی تست قطره و سطح نشان‌گر آن بوده که، سطح الکترونشست شده در این مطالعه کاملا متخلخل و آبدوست شده و در ادامه منجر به افزایش شار حرارتی از میزان $800\ \mathrm{kW/m^2}$ به $1200\ \mathrm{kW/m^2}$ شده است. نتایج پژوهش سوزا و همکاران [8] روی اثر نشست نانو ذرات $\gamma-\mathrm{Fe_2O_3}$ با ابعاد 80-10 نانومتر بر روی یک سطح افقی با زبری متوسط $R_a = 0.16\ \mu\mathrm{m}$ در حضور HFE7100 به عنوان سیال کاری نشان داد که در حضور و نشست نانوذرات با ابعاد کوچک، در مقایسه با سطح بدون نشست نانوذره در میزان CHF و HTC افزایش مشاهده شده است، در صورتی که با افزایش ابعاد نانوذرات در همان غلظت، ضریب انتقال حرارت نسبت به سطح بدون نشست نیز کمتر گزارش شده است. آن‌ها دلیل این کاهش را عایق شدن سطح و عدم نفوذ سیال خنک کننده به درون بافت اسفنجی نانوذرات نشست پیدا کرده و کاهش چگالی سایت‌های فعال هسته‌زایی ذکر نمودند. احمد و همکاران [9] گزارش کردند که ضخامت لایه نشست پیدا کرده بر روی سطح در طی فرآیند جوشش نانوسیال، با تمرکز نانو ذرات درون سیال متناسب است و با افزایش تمرکز نانوذرات نرخ نشست افزایش و HTC کاهش می‌یابد در حالی که سطحی که توسط نانو ذرات با تمرکز کم نشست داده شده است میزان HTC را افزایش می‌دهد. نرایان به کمک همکارانش [10] به توصیف اثر متقابل پارامتر سطح که به وسیله نسبت بین زبری سطح و قطر متوسط نانو ذرات مشخص می‌شود پرداختند. آن‌ها گزارش دادند که تنها زمانی که $\mathrm{SIP} = R_a/d_\mathrm{p} > 1$ باشد در میزان ضریب انتقال حرارتی افزایش رخ می‌دهد. علت این امر بدین خاطر بیان شده است که زمانی که سایز نانو ذرات کوچک‌تر از زبری متوسط سطح باشد این نانو ذرات درون حفره نشست یافته و یک حفره فعال را به چندین حفره و سایت فعال تبدیل می‌نماید در حالی که درحضور نانو ذرات بزرگ‌تر، این نانو ذرات با پوشاندن حفره‌ها سبب کاهش هسته‌زایی و تولید حباب می‌شوند. نتایج بررسی اثر متخلخل کردن سطح جوشش با گذر زمان توسط بسیاری از محققان نشان دهنده این نکته بوده که علاوه بر کمبود استحکام این لایه‌های نشست داده شده و جدا شدن از سطح جوشش در شارهای حرارتی بالا از دیگر معایب این گونه پوشش‌ها، به سبب آب دوست بودن این گونه از سطوح می‌باشد، چرا که با افزایش نفوذ سیال درون حفره‌ها، گاز زدایی آهسته از حفره‌ها صورت گرفته و حفره‌های فعال با گذشت زمان توسط سیال کاری به‌طور کامل پر شده و توانایی تولید حباب را از دست می‌دهند، بنابراین این بهبود خواص جوشش زیاد دوام نمی‌آورد [11]. افزایش سطح انتقال حرارت به‌صورت ایجاد میکروکانال‌ها و ترکیب نمودن آن با پدیده جوشش امری بسیار جالب می‌باشد. سطوح گسترش یافته مسیر و گذرگاه مجزا برای عبور سیال و بخار فراهم می‌کنند، به‌علاوه مساحت سطح انتقال حرارت را برای

[1] Critical Heat Flux
[2] Heat Transfer Coefficient
[3] Scan Electron Microscope

اتلاف شارهای حرارتی بالا از سطح کم افزایش می‌دهند. کندلیکار و همکاران [12] با ایجاد یک سطح میکروکانال با کانال‌هایی با طول کوتاه بر روی سطح مس توانستند نرخ اتلاف حرارتی را تا میزان $2400\ kW/m^2$ در حضور سیال کاری آب بالا برند که در مقایسه با سطح صیقلی مس 120% افزایش در شارحرارتی بحرانی را نشان داده است. صفاری [13] با کمک همکارانش با ایجاد میکروکانال‌های U شکل و ترکیب روش افزایش مساحت سطح توسط میکروکانال‌ها و متخلخل نمودن سطح توسط فرآیند الکترونشست، جوشش استخری در حضور آب یون‌زدایی شده را مورد آزمایش قرار دادند. با این روش آن‌ها عملا روش‌های غیرفعال افزایش سطح انتقال حرارت و ایجاد مسیر گذر بخار- سیال و ایجاد سایت‌های هسته‌زایی بیش‌تر را با یکدیگر ترکیب نمودند. نتایج بررسی‌های تجربی آن‌ها نشان داد که شار حرارتی به میزان 1650 kW/m^2 و ضریب انتقال حرارت به $225\ kW/m^2K$ رسیده است، که شار حرارتی در مقایسه با سطح صیقلی مس 100% و HTC نیز در حدود 80% افزایش نشان داده است. کندلیکار و همکاران [12] با ایجاد میکروکانال‌هایی بر روی سطح مس و با متخلخل کردن تنها بخش‌هایی از دیواره میکروکانال‌ها نه تمام سطح میکروکانال به روش تفت جوشی موفق به افزایش شار حرارتی تا میزان $3250\ kW/m^2$ و ضریب انتقال حرارت تا میزان $565\ kW/m^2K$ شدند که به عدد بی‌سابقه 782% افزایش در ضریب انتقال حرارت دست یافته‌اند.

علی‌رغم استفاده از روش زبر کردن توسط بسیاری از محققان و بررسی‌های زیاد روی تاثیر میزان زبری برروی شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت، به نظر می‌رسد که تاکنون بررسی‌های کمی در زمینه جهت‌گیری و نحوه حرکت کاغذ سنباده بر روی سطح و تاثیر آن بر دینامیک سیال و حباب در به تعویق افتادن شار حرارتی بحرانی انجام شده است. همچنین این روش برای افزایش بهبود خواص سطح، هم از نظر ساده بودن تولید، ارزان بودن و مدت زمان پایداری در فرآیند جوشش مناسب‌تر بوده و می‌توان به عنوان یک روش کارآمد در صنعت بر روی آن تمرکز نمود.

در انجام این تحقیق پس از ساخت دستگاه جوشش استخری، با صیقلی نمودن سطح جوشش با سنباده 1500 دندانه به انجام آزمایش جوشش استخری در حضور سیال‌کاری آب پرداخته شده است. به‌منظور بررسی صحت و میزان اعتبار داده‌های استخراج شده در پژوهش حاضر، داده‌ها با معادلات تجربی و داده‌های تجربی سایر محققان مورد مقایسه قرار گرفت. در ادامه آزمایش، میکروشیارهای دایروی شکل روی سطح مس توسط تراش CNC[1] و پولیش نمودن سطح توسط کاغذ سنباده 600 دندانه به‌صورت دایره‌ای ایجاد گردید، همچنین در آزمایش دیگر سطح جوشش توسط سنباده 600 دندانه این بار در یک راستا پرداخت شده است و آزمایش جوشش در حضور آب بر روی این دو سطح مورد آزمایش قرار گرفت و دینامک حباب و میزان شار حرارتی با حالت قبل مقایسه شده است. سطح بار دیگر به منظور بررسی تاثیر افزایش سطح و ایجاد جریان چرخشی و تاثیر آن بر انحراف حباب‌ها و ایجاد یک مسیر برای تفکیک سیال پایین رونده از حباب داغ صعود کننده به‌صورت میکروکانال ماشین‌کاری شده، تعداد 13 عدد میکروکانال با سطح مقطع ذوزنقه‌ای شکل توسط ماشین‌کاری وایرکات ایجاد شده و در نهایت به بررسی شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت در حضور میکروکانال و مقایسه کلی همه حالت پرداخته شده است.

2- نحوه انجام آزمایش

2- 1- ساخت دستگاه

همان‌طور که در "شکل 1" مشخص شده است، دستگاه ساخته شده به منظور انجام آزمایش جوشش استخری شامل چهار بخش اصلی می‌باشد. بخش اول، قسمت جوشش دستگاه شامل محفظه جوشش، کارتریج هیتر، عایق‌ها، چهارچوب نگه دارنده می‌باشد. بخش دوم، قسمت سرمایش دستگاه شامل کندانسور مارپیچ، مخزن سیال خنک، پمپ و شیلنگ می‌باشد. بخش سوم، قسمت کنترلی دستگاه شامل ترموستات، شیر اطمینان، گیج فشار، مولتی متر، اتوترانس واریاک می‌باشد. بخش چهارم، قسمت حساس برداشت و ثبت داده‌ها شامل ترموکوپل‌ها، کارت داده برداری DAQ[2]، کامپیوتر، دوربین عکاسی با فریم بالا به همراه لامپ LED می‌باشد.

قسمت جوشش دستگاه از یک شیشه از جنس بورسیلیکات که توانایی تحمل تنش‌های بالای حرارتی را دارا می‌باشد و همچنین شفاف است تا بتوان جریان و پدیده جوشش را عکس‌برداری و مشاهده نمود، تشکیل شده است (ارتفاع 300 mm، قطر بیرونی 200 mm، ضخامت 5 mm) همچنین اطراف شیشه نیز توسط پشم شیشه و پوشش بازتابی کاملا عایق شده تا دمای سیال در حال جوشش به سرعت از حالت اشباع افت ننماید. در دو انتهای استوانه پیرکس اورینگ سیلیکونی قرار داده شده و توسط چسب حرارتی و اورینگ ساز آر تی وی- سیلیکون با تحمل حرارتی 300ºC از بالا و پایین به دو صفحه از جنس استیل ضد اسید (استیل - 316) به ابعاد 300×300 mm که کاملا پولیش و صیقلی شده‌اند چسبانده شده تا مانع از نشت آب و بخار به محیط شود. در مرکز استیل سه سوراخ تعبیه شده است که محل قرارگیری سطح جوشش و شیر تخلیه مخزن و هیتر پیش گرم‌کننده به توان 500 وات می‌باشد. کارتریج هیتر، به سبب هدایت حرارتی بالا و ماشین‌کاری مناسب، از جنس فلز مس ساخته شده است. کارتریج همان‌گونه که در "شکل 1" مشخص می‌باشد از یک استوانه به قطر 40 mm و به طول 300 mm ساخته شده است. هندسه بلوک به گونه‌ای طراحی شده است که انتقال حرارت به یک سو نزدیک‌تر باشد. کارتریج هیتر محل قرارگیری سه ترموکوپل نوع k و یک سنسور مقاومتی RTD-Pt100 می‌باشد. در انتهای کارتریج مسی نیز محل قرارگیری هیتر فشنگی از جنس استیل (200×20 mm) به توان 2000W می‌باشد. محفظه جوشش به همراه سطوح استیل بالایی و پایینی بر روی یک چهارچوب فلزی قرار گرفته‌اند تا از لرزش و حرکت دستگاه در هنگام جوشش جلوگیری نماید.

همچنین به‌منظور آن‌که سطح جوشش کاملا افقی و تراز باشد، چهارچوب نگه‌دارنده دستگاه دارای پایه‌های قابل تنظیم ارتفاع می‌باشد. به‌منظور آن که اتلاف حرارت در اطراف کارتریج مسی به حداقل برسد و فرض انتقال حرارت یک‌بعدی در راستای کارتریج هیتر به‌منظور تخمین زدن دمای سطح فرض صحیح و معتبری باشد از عایق‌کاری ترکیبی در اطراف کارتریج بهره برده شده است. بدین‌گونه که یک استوانه از جنس سرامیک تهیه و کارتریج هیتر درون آن قرار داده شده است. لایه‌های ابتدایی اطراف استوانه سرامیکی را توسط عایق پشم سنگ پوشانده و لایه‌های بعدی با عایق پشم شیشه نسوز تابانده شده است. در هنگام عایق کاری باید به این نکته توجه کرد که عایق‌ها فشرده نشود، زیرا در صورت فشرده شدن و خارج شدن هوای میان بافتی عایق‌ها بازدهی عایق‌ها تا 50% می‌تواند کاهش یابد. در انتهای عایق‌کاری با یک ورقه تفلون و پوشش بازتابی سطح بیرونی عایق پوشانده می‌شود. در قسمت بالایی کارتریج هیتر که در تماس با سیال در حال جوشش است از عایق حرارتی تفلون PTFE[3] استفاده شده

[1] Computer Numerical Control

[2] Data acquisition system

[3] Poly tetra fluoro ethylene

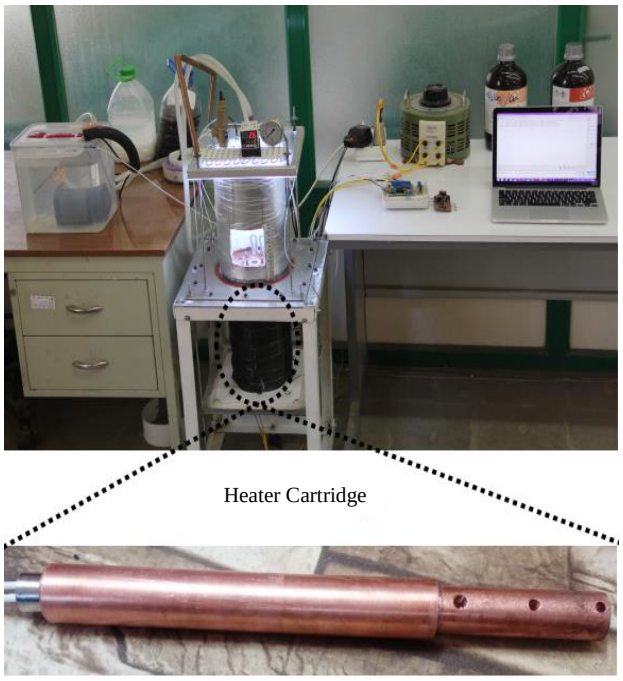

Fig. 1 Image of Experimental Setup

شکل 1 تصویر دستگاه آزمایش

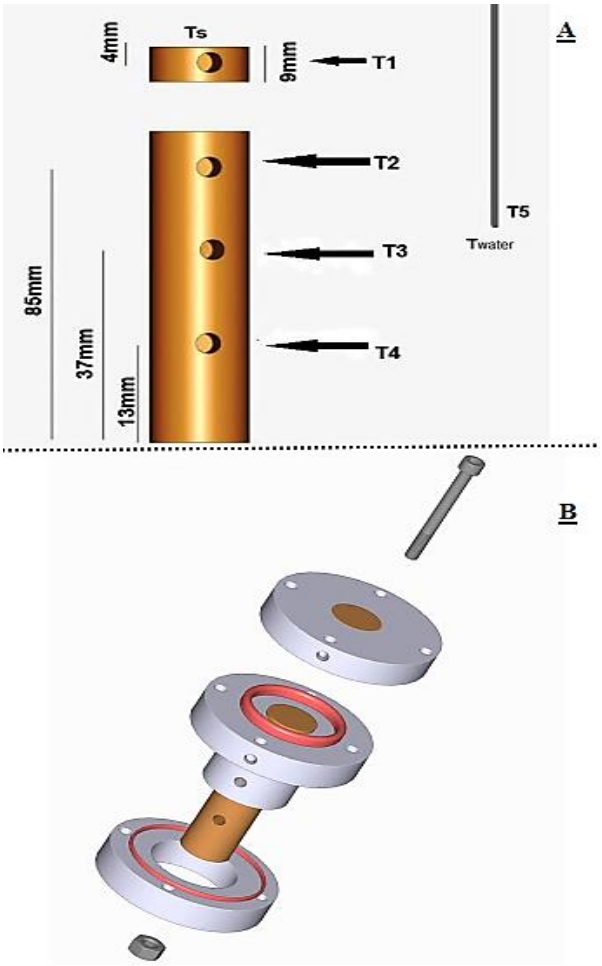

Fig.2 A: picture of heater cartridge, and picture of the location of thermocouples, B: Image of how to assemble cartridges and locations of thermal silicon oring

شکل2- A: تصویر کارتریج هیتر و تصویر محل‌های قرار گیری ترموکوپل‌ها B: تصویر نحوه مونتاژ کارتریج و محل‌های قرارگیری اورینگ‌های سیلیکونی حرارتی

است مطابق "شکل 2" قسمت B، که دارای ضریب انتقال حرارت خیلی پایین‌تر و چسبندگی اندک به نسبت مس ($h_{\mathrm{Copper}} = 400$ و $h_{\mathrm{PTFE}} = 0.25\,\mathrm{W/mK}$) می‌باشد.

با شروع آزمایش جوشش پیوسته سیال بخار شده و حجم سیال کاهش و غلظت نانوذرات معلق در صورت وجود افزایش می‌یابد بدین منظور، میعان بخار و ثابت نگه داشتن حجم و غلظت سیال از نکات با اهمیت می‌باشد. در این دستگاه از یک کندانسور مارپیچ مسی که درون محفظه جوشش قرار گرفته، استفاده شده است. این کندانسور توسط شیلنگ به یک پمپ با دبی 400 لیتر بر ساعت که درون محفظه سیال خنکی به حجم 12 لیتر قرار گرفته، متصل شده است. (تمامی اتصالات و مخزن سیال خنک و محفظه جوشش به‌منظور کاهش اتلاف حرارتی توسط پشم سنگ و ورقه آلومینیومی عایق شده است).

در بخش کنترلی دستگاه از یک هیتر درون آبی بهره گرفته شده است تا همواره سیال درون محفظه را در حالت اشباع نگه دارد این هیتر به یک ترموستات مدل آتونیکس TCN4 متصل شده است، تا زمانی‌که اندکی دمای سیال پایین آمد با فرمان ترموستات هیتر ثانویه روشن شده و دمای سیال را به حالت اشباع باز گرداند. فشار محل انجام آزمایش به‌علت تاثیر ارتفاع 80 کیلوپاسکال و دمای محیط آزمایش $23^{\circ}\mathrm{C}$ بوده، بنابراین دمای جوشش سیال تقریبا $94^{\circ}\mathrm{C}$ به‌دست آمده است. برای تحت کنترل قرار دادن فشار درون محفظه جوشش از یک گیج فشار برای مشاهده فشار درون محفظه و یک شیر اطمینان کالیبره شده به‌منظور تخلیه مازاد بخار تولید شده به محیط و باز گرداندن فشار درون محفظه به فشار اتمسفر بهره برده شده است. از یک اتوترانس واریاک با توان 3000W برای افزایش تدریجی ولتاژ هیتر استفاده شده است. این واریاک به یک مولتی‌متر برای ثبت ولتاژ و جریان هر پله افزایش (برای ثابت بودن شرایط در تمامی آزمایش‌ها) متصل شده است.

مهم‌ترین بخش دستگاه ساخته شده بخش داده برداری می‌باشد این بخش شامل 6 ترموکوپل (3 ترموکوپل نوع Kو 3 سنسور مقاومتی سه سیم Pt100) به ضخامت 5 mm بوده است و تمامی ترموکوپل‌ها در حمام دما ثابت کالیبره شده‌اند و دارای دقت $\pm 0.1^{\circ}\mathrm{C}$ می‌باشند. برای آن که سیم‌های ترموکوپل‌ها در برابر دما مقاومت مناسب داشته و همچنین به علت نزدیک بودن محل قرارگیری سنسورها در کارتریج هیتر موجب ایجاد اختلال روی یکدیگر نگردند، جنس سیم سنسورها از تفلون انتخاب شده است. محل قرارگیری ترموکوپل‌ها درون کارتریج هیتر رزوه شده‌اند تا از حرکت و جا به جایی ترموکوپل‌ها جلوگیری به عمل آید. به‌منظور تماس و انتقال حرارت مناسب بین بدنه استیل ترموکوپل‌ها و کارتریج هیتر از خمیر سیلیکون نقره‌ای با ضریب انتقال حرارت $h = 4.5\,\mathrm{W/mK}$ بهره گرفته شده است. تمامی ترموکوپل‌ها به یک کارت داده برداری 6 کاناله متصل می‌باشند. سنسور Pt100 به خاطر داشتن دقت بالاتر در 2.5 mm زیر سطح جوشش قرار گرفته و جهت تخمین زدن دمای سطح از آن استفاده می‌شود. دو ترموکوپل نیز به منظور محاسبه دمای اشباع سیال در حالت جوشش در دو ارتفاع متفاوت درون محفظه جوشش قرار گرفته و یک لامپ LED در قسمت بالایی محفظه جوشش نصب گردیده تا توانایی فیلم برداری با فریم بالا را برای ما تسهیل نماید.

2-2- نحوه اندازه گیری و آنالیز خطای داده‌ها

با عایق‌کاری مناسب اطراف کارتریج هیتر می‌توان از انتقال حرارت شعاعی به محیط صرف‌نظر کرد و انتقال حرارت را به‌صورت یک‌بعدی در نظر گرفت.

بنابراین برای به‌دست آوردن و تخمین دمای سطح با فرض یک‌بعدی بودن انتقال حرارت می‌توان از رابطه (1) قانون هدایت حرارتی فوریه بهره برد و شار حرارتی را به‌دست آورد.

$$q'' = K\frac{\partial T}{\partial Z} = K\frac{T_4 - T_1}{Z_4 - Z_1} \quad (1)$$

در یک شار حرارتی با ثابت بودن q'' و ثابت بودن ضریب هدایت حرارتی مس نتیجه گرفته می‌شود که گرادیان دما برحسب ارتفاع نیز ثابت می‌ماند.

$$\frac{\partial T}{\partial Z} = cte = a \rightarrow T = az + b \quad (2)$$

یک سنسور مقاومتی RTD با دقت بالای $\pm 0.1°C$ در 2.5 میلی متری زیر سطح جوشش جایگذاری شده است به‌منظور تخمین دمای سطح جوشش و با استفاده از روش برازش یک خط از میان دماها بر طبق رابطه (3) می‌توان دمای سطح را با تقریب خوبی تخمین زد.

$$T_s = T_1 - \left(\frac{q'' Z_1}{K}\right) \quad (3)$$

برای محاسبه‌ی دمای سیال در حال جوشش از دو سنسور PT100 که عایق ضد آب شده‌اند و در دو ارتفاع، یکی در سطح سیال و دیگری نزدیک سطح در حال جوشش نصب شده‌اند، استفاده شده است. با داشتن دمای سطح و دمای سیال کاری، طبق رابطه (4) می‌توان اختلاف دمای سوپرهیت سطح را نیز مشخص نمود.

$$\Delta T = T_1 - \left(\frac{q'' Z_1}{K}\right) - T_{sat} \quad (4)$$

ضریب انتقال حرارت سطح و سیال نیز بر طبق رابطه (5) محاسبه شده است.

$$h = \frac{Q/A}{T_s - T_{sat}} \quad (5)$$

دو نوع خطا اغلب باعث فاصله گرفتن نتایج داده‌های آزمایشی با مقادیر واقعی می‌شود. خطای اندازه‌گیری که ناشی از کالیبره نبودن دستگاه‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری بوده است و خطاهای انسانی. برای محاسبه عدم قطعیت در آزمایش جوشش استخری از روش موفات [14] استفاده گردید. شار حرارتی به ضریب انتقال حرارت مس و اختلاف دما و محل قرارگیری ترموکوپل‌ها وابسته است. ضریب انتقال حرارتی مس در دمای 100°C در حدود 401.6 و در دمای 300°C در حدود 400 W/mK است بنابراین:

$$\Delta K_{cu} = K_{100} - K_{300} = 401.6 - 400 = 1.6$$

خطای عدم قطعیت سنسورهای حرارتی در حدود $\pm 0.1°C$ بوده است و از آنجایی که سوراخ‌های محل قرارگیری ترموکوپل‌ها توسط فرآیند ماشین‌کاری CNC تولید شده‌اند فاصله محل‌های قرارگیری سوراخ‌ها نسبت به هم کاملا دقیق بوده و خطای کم‌تر از ± 0.1 mm دارا می‌باشند.

$$q'' = f(K, \Delta T, \Delta Z)$$
$$\frac{U_{q''}}{q''} = \sqrt{\left(\frac{U_{T4-T1}}{T_4 - T_1}\right)^2 + \left(\frac{U_{Z4-Z1}}{Z_4 - Z_1}\right)^2 + \left(\frac{U_K}{K}\right)^2} \quad (6)$$

$$T_s = f(Z_1, q'', K)$$
$$\frac{U_{\Delta T_S}}{\Delta T_S} = \sqrt{\left(\frac{U_{T1-TSat}}{T_1 - T_{Sat}}\right)^2 + \left(\frac{U_{Z1}}{Z_1}\right)^2 + \left(\frac{U_K}{K}\right)^2} \quad (7)$$

$$h = f(q'', \Delta T)$$
$$\frac{U_h}{h} = \sqrt{\left(\frac{U_{q''}}{q''}\right)^2 + \left(\frac{U_{\Delta T_S}}{\Delta T_S}\right)^2} \quad (8)$$

برمبنای دقت دستگاه اندازه‌گیری در روش فوق، حداکثر خطا در محاسبه شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت به ترتیب برابر 6.3% و 9% محاسبه شده است. فاصله کم ترموکوپل‌ها از هم و اختلاف کم دماها باعث زیاد شدن عدم قطعیت می‌شود. با افزایش شار حرارتی، اختلاف دماها افزایش می‌یابد و در نتیجه درصد عدم قطعیت کاهش می‌یابد، در "شکل 3" این مقدار در شارهای بالای $500\ kW/m^2$ به کم‌تر از 1.4% برای محاسبه شار حرارتی و 2.8% برای ضریب انتقال حرارت رسیده است.

جدول 1 محاسبه عدم قطعیت داده‌های آزمایش

Table 1 Uncertainty Calculation of Experimental Data

پارامتر	عدم قطعیت
سنسورها (K)	±0.1 °C
ولتاژ (V)	±1%
جریان (A)	±0.1%
ضریب انتقال حرارت (kW/m^2 K)	±6.3%
شار حرارتی بحرانی (kW/m^2)	±9.6%
اختلاف دما سطح (K)	±9 %

3- نتایج

3-1- آزمایش جوشش استخری انواع سطوح در حضور سیال کاری آب

در بخش اول آزمایش، سطح جوشش پس از ماشین‌کاری، توسط کاغذ سنباده 1500 دندانه کاملا پولیش و صیقلی شده است. سطح صیقلی تولید شده توسط آب یون‌زدایی شده، دستمال کتان و استون شسته شده تا هرگونه چربی و آلودگی از سطح مس جدا شود. زبری سطح پولیش شده توسط زبری سنج اندازه‌گیری شده است. به‌منظور انجام آزمایش جوشش ابتدا کارتریج هیتر پیش گرم شده و سپس میزان 3 لیتر آب یون زدایی شده درون محفظه جوشش ریخته شده است. همزمان هیتر درون آبی نیز به‌منظور تحت اشباع نگه داشتن سیال کاری روشن شده است. پس از بازرسی‌های چشمی مبنی بر گاززدایی سیال و عدم وجود حباب معلق درون سیال فعالیت کنداسور به منظور میعان نمودن بخارات حاصله از جوشش نیز آغاز شده است. در شرایط انتقال حرارت جابه‌جایی واریاک با پله‌های 15 ولتی، در مراحل جوشش با پله‌های 10 ولتی و در نزدیکی نقطه بحرانی توان واریاک با پله‌های 5 ولتی بالا برده شده است. حالت پایدار برای هر پله افزایش زمانی در نظر گرفته شده است که تمامی سنسورها به مدت 10 دقیقه تغییر بیش از 0.1°C

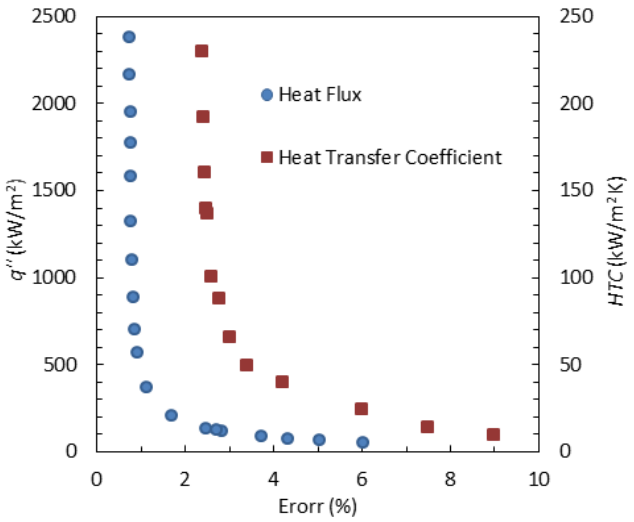

Fig. 3 Uncertainty of Heat Transfer Coefficient and Flux

شکل 3 عدم قطعیت ضریب انتقال حرارت و شار حرارتی

تغییرات نداشته باشند. در این تحقیق به سه روش به بررسی صحت و دقت داده‌های استخراج شده پرداخته شده است.

الف) مقایسه داده‌ها با روابط تجربی در حوزه جوشش ب) مقایسه با نتایج داده‌های تجربی سایر محققان در این زمینه ج) برگزاری آزمون تکرار پذیری آزمایش. قبل از آزمایش بر روی انواع مختلف سطوح، آزمایشاتی با استفاده از آب مقطر به‌عنوان سیال عامل بر روی سطح با زبری 0.114 میکرومتر برای بررسی صحت و دقت عملکرد دستگاه انجام شد. سپس نتایج حاصل از آزمایش با مدل‌های تجربی ارائه شده توسط روزنو و گرنفلو [15] مطابق روابط (9) و (10) مقایسه شدند.

$$\frac{Cp_l \Delta T}{h_{fg} Pr^{1}} = C_{sf}\left[\frac{q''}{\mu_l h_{fg}}\sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l-\rho_g)}}\right]^{0.33} \quad (9)$$

که در آن Cp_l ظرفیت گرمایی سیال، h_{fg} آنتالپی تبخیر، Pr عدد بی بعد پرانتل، C_{sf} ضریب اصلاح سطح و سیال، q'' شار حرارتی، μ_l ویسکوزیته مایع و σ کشش سطحی است.

$$\frac{h}{h_0} = F_{pr}\left(\frac{q''}{20000}\right)^{n} Ra^{0.133} \quad (10)$$

در رابطه (10)، R_a زبری متوسط و h_0 برای سیال عامل آب 5.6 بوده و ضریب تصحیح فشار F_{pr} و پارامتر n از روابط (11) و (12) محاسبه می‌شوند.

$$F_{pr} = 1.73\left(\frac{P}{P_{cr}}\right)^{0.27} + \left(6.1+\frac{0.68}{1-(P/P_{cr})}\right)\left(\frac{P}{P_{cr}}\right)^{2} \quad (11)$$

$$n = 0.9 - 0.3\left(\frac{P}{P_{cr}}\right)^{0.3} \quad (12)$$

همان‌گونه که در "شکل 4" قابل مشاهده است. نتایج حاصل از آزمایش جوشش، مطابقت نسبتا خوبی با مدل‌های ارائه شده دارد. به‌علاوه در "شکل 5" نتایج با کارهای ارائه شده توسط سایر پژوهشگران در این زمینه مقایسه شده است، که تطابق مناسبی مشاهده می‌شود. به‌منظور بررسی صحت داده‌های ارائه شده که وابسته به شرایط محیطی آزمایش هستند، آزمایش همان‌گونه که در "شکل 6" ارائه شده در طی دو روز مختلف برگزار شده است. نتایج استخراج شده از انحراف کم و قابل قبول داده‌ها حکایت دارد. با انجام این سه مقایسه در صحت‌سنجی دستگاه، مشاهده شد اعتبار داده‌ها دقیق و قابل اطمینان بوده است.

در آزمایش اول به بررسی پدیده جوشش استخری بر روی سطح صیقلی با زبری متوسط 0.057 میکرومتر پرداخته شده است. با انجام آزمایش بر روی این سطح در حضور 3 لیتر آب یون‌زدایی شده، نمودار شار حرارتی برحسب دمای سوپرهیت سطح و ضریب انتقال حرارت ترسیم گردیده است. همان‌گونه که در "شکل 7" قسمت 1 از تصاویر SEM گرفته شده از سطح صیقلی مشخص شده است. این سطح زبری و چگالی سایت‌های هسته‌زایی کمی را دارا بوده است. به همین خاطر سطح توانایی تولید و پاسخ‌گویی به حجم زیادی از حباب‌های تولید شده را دارا نبوده و حباب‌ها خیلی سریع به یکدیگر متصل شده و تولید حباب پوشاننده سطح را کرده‌اند.

برطبق "شکل‌های 8 و 9" سطح در اختلاف دمای سوپرهیت بالای 20.83°C به شار حرارتی ماکزیمم 790 kW/m^2 و ضریب انتقال حرارت 45 kW/m^2K دست یافته است، دمای بالای سطح در برابر شار حرارتی کم نشان‌دهنده‌ی وجود مانعی در برابر سطح جوشش بوده است. در ادامه آزمایش به زبرسازی سطح به صورت دورانی توسط تراش CNC پرداخته شده است. همان‌گونه که در "شکل 7"- قسمت 2 نمایش داده شده است، با پولیش‌کاری نمودن سطح تولید شده به‌صورت دایروی شکل با کاغذ سنباده 600 دندانه می‌توان سطحی با زبری و چگالی سطحی به مراتب بالاتری تولید نمود. افزایش زبری سطح سبب تولید حباب‌هایی با سایز کوچک‌تر شده و این

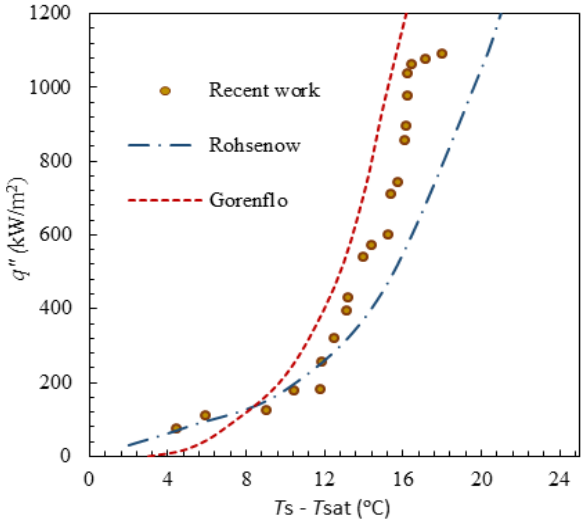

Fig. 4 Comparison Curve of Pool Boiling with Experimental Relation

شکل 4 مقایسه منحنی جوشش استخری با روابط تجربی

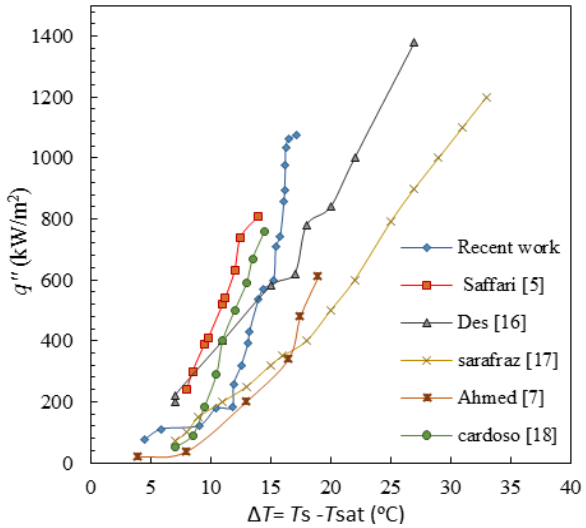

Fig. 5 Experimental Data Comparison with other works

شکل 5 مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با سایر کارهای محققان [16][17] [18]

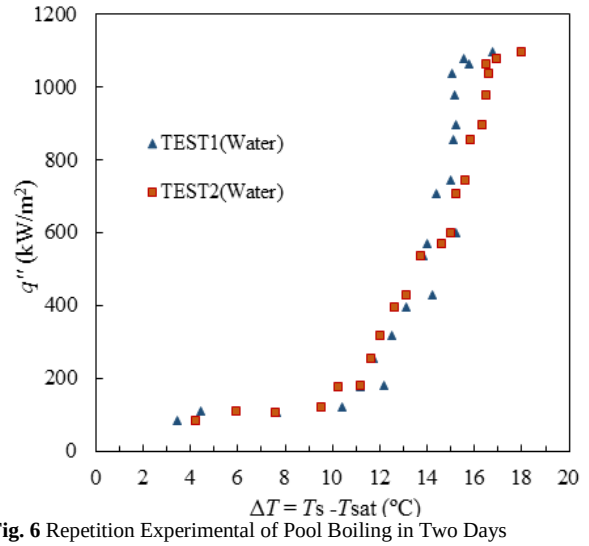

Fig. 6 Repetition Experimental of Pool Boiling in Two Days

شکل 6 آزمایش تکرارپذیری جوشش استخری در طی دو روز

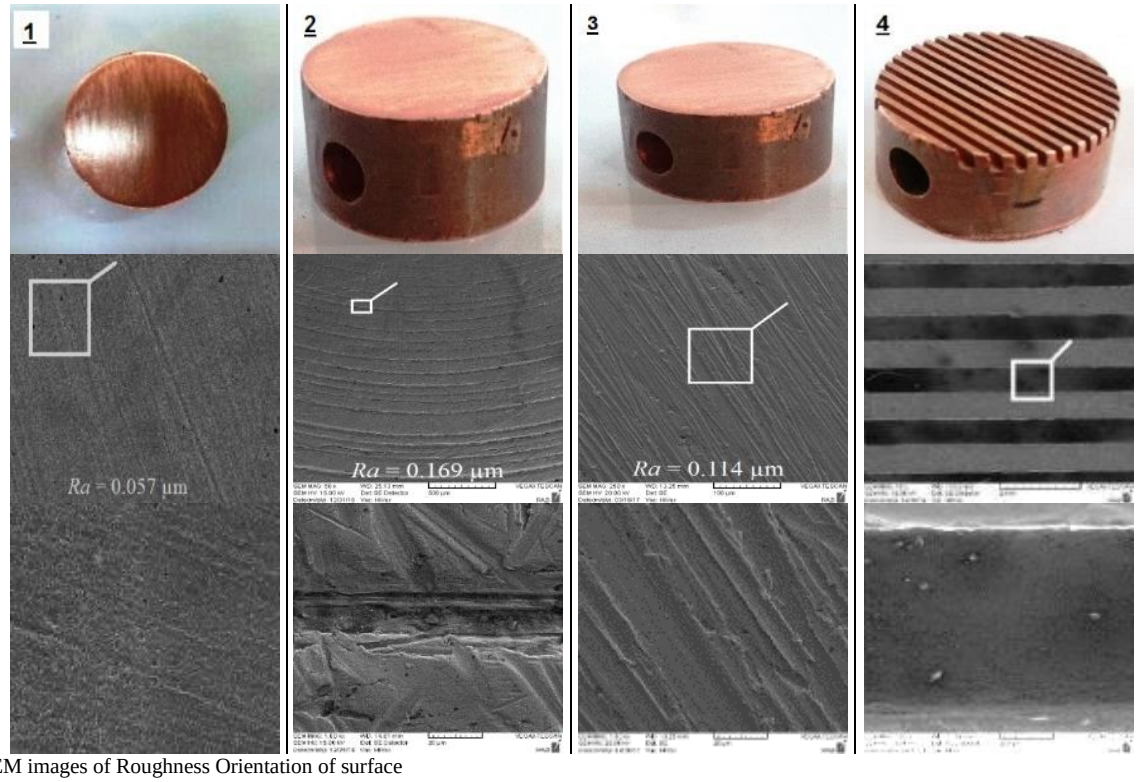

Fig.7 SEM images of Roughness Orientation of surface

شکل 7 تصویر SEM انواع جهت‌گیری‌های سنباده بر روی سطح

قله‌ها و فرو رفتگی‌ها در ابعاد میکرو بر روی سطح، مانع از متصل شدن سریع حباب‌های عایق کننده بر روی سطح شده‌اند و تا شارهای بالاتری نسبت به آزمایش سطح صیقلی توانایی تفکیک حباب خود را حفظ نموده است. با انجام آزمایش جوشش استخری در حضور این سطح، همانند "شکل‌های 10 و 11" نتایج به‌دست آمده گویای آن است که شار حرارتی ماکزیمم به میزان $903\ kW/m^2$ و ضریب انتقال حرارت به $53\ kW/m^2K$ افزایش یافته است. این نکته حائز اهمیت بوده است که اختلاف دمای سوپر هیت سطح در شار حرارتی بحرانی به میزان $18.97^{\circ}C$ رسیده که نشان‌دهنده این امر بوده که نمودار شار حرارتی به سمت چپ منتقل شده و در دمای سوپر هیت کم‌تری شار حرارتی بالاتری به نسبت سطح صیقلی روی داده است که نشان‌دهنده افزایش کارایی سطح بوده است.

در آزمایش بعدی با پولیش نمودن سطح توسط سنباده 600 دندانه در یک راستا "شکل 7" قسمت 3، آزمایش جوشش استخری در حضور این سطح و سیال کاری آب یون زدایی شده انجام شده است. داده‌های استخراج شده در "شکل‌های 12 و 13" نشان می‌دهند که در اختلاف دمای سوپر سطح $16.83^{\circ}C$ شار حرارتی به میزان $1095\ kW/m^2$ و ضریب انتقال حرارت به میزان $70\ kW/m^2K$ افزایش یافته است. این افزایش در مقادیر CHF و HTC علاوه بر تاثیر افزایش چگالی سایت‌های هسته‌زایی و زبری در به تعویق افتادن شار حرارتی بحرانی، عوامل دیگری نیز دارد. حجم هر حباب برابر میزان سیال موجود در میکرولایه آن حباب بوده و با تبخیر شدن و

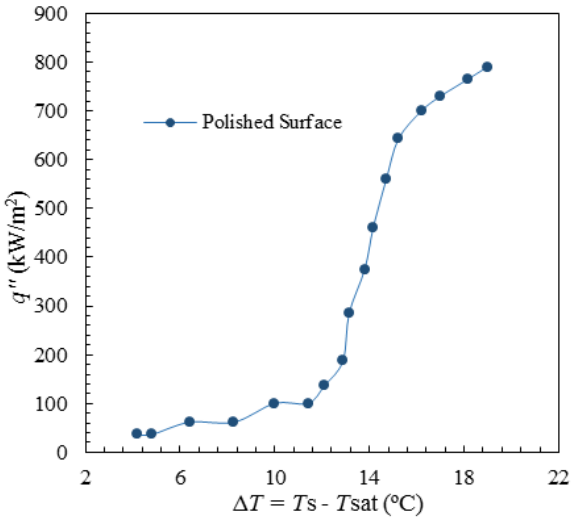

Fig. 8 Graph of heat flux for polished surface

شکل 8 نمودار شار حرارتی برحسب دمای سوپر هیت سطح صیقلی

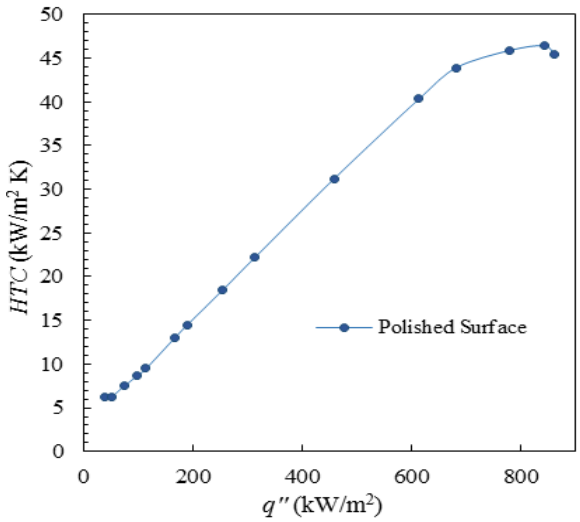

Fig. 9 Graph of heat transfer coefficient for polished surface

شکل 9 نمودار ضریب انتقال حرارت برحسب شارحرارتی برای سطح صیقلی

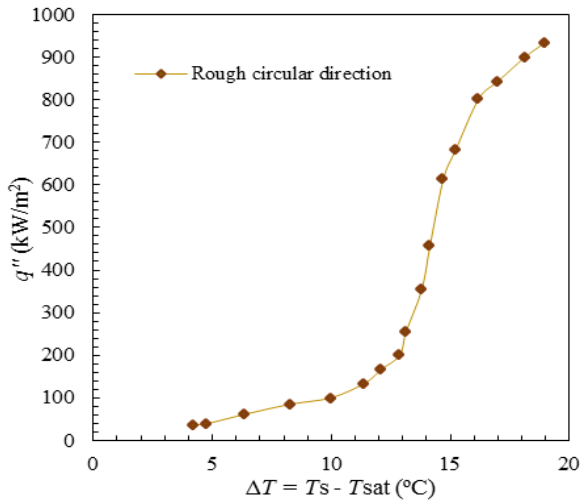

Fig. 10 Graph of heat flux for circular polished surface

شکل 10 نمودار شار حرارتی برحسب دمای سوپرهیت سطح زبر دایره

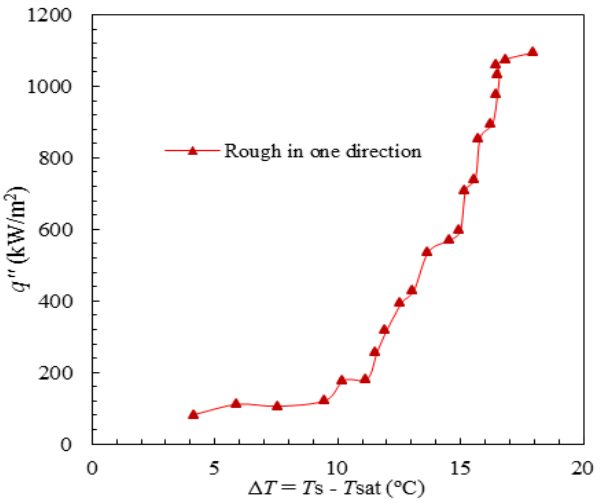

Fig.12 Graph of heat flux for roughness in one direction

شکل 12 نمودار شار حرارتی برحسب دمای سوپرهیت سطح زبر در یک راستا

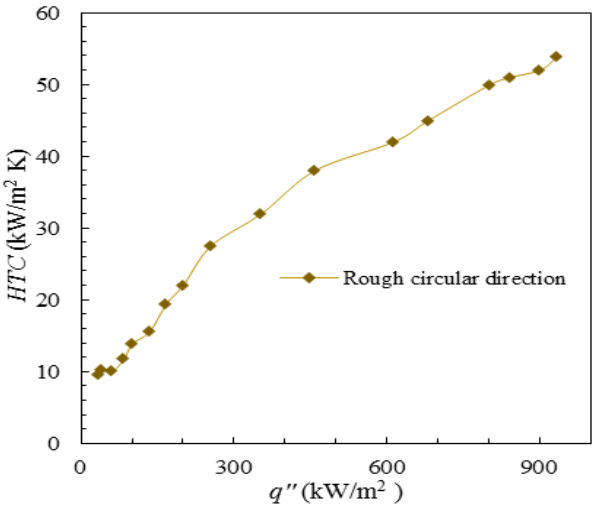

Fig. 11 Graph of heat transfer coefficient for circular polished surface

شکل 11 نمودار ضریب انتقال حرارت برای سطح زبر شده دایره‌ای

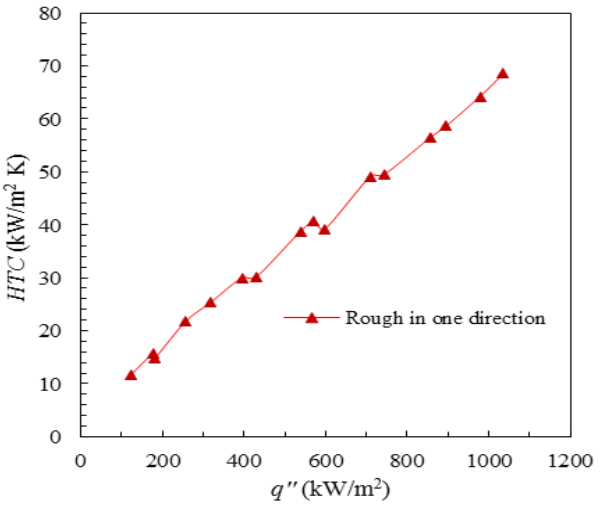

Fig. 13 Graph of heat transfer Coefficient for roughness in one direction

شکل 13 نمودار ضریب انتقال حرارت برای سطح زبر شده در یک راستا

خشک شدن سیال موجود در میکرو لایه با غلبه کردن نیروی بویانسی بر مجموع نیروهای حاصل از وزن و کشش سطحی، حباب از سطح جدا شده و به سمت بالا حرکت می‌نماید. با ایجاد میکرو شیارهای منظم و در یک راستا بر روی سطح جوشش، این شیارها همانند مویرگ‌هایی بر روی سطح و در ناحیه زیر میکرولایه عمل کرده و توسط نیروی مویینگی خود، سیال در مجاورت ناحیه میکرولایه را به داخل زیر لایه کشانده و باعث افزایش حجم سیال در میکرولایه و به تعویق افتادن خشک شدن میکرو لایه شده است. این روش به نوعی مهندسی نمودن سطح برای داشتن کارایی بالاتر سطح جوشش بدون نیاز به هزینه‌های گزاف و کم بازده می‌باشد.

در حدود 80% انتقال حرارت در فرآیند جوشش توسط مکانیزم کوئنچ جابه‌جا می‌شود بدین صورت که حباب داغ با خروج جت مانند از درون سایت‌ها و حفره‌های فعال هسته‌زایی باعث به حرکت در آمدن سیال سرد بالا دست حباب به سمت این حفره‌ها شده و این سیکل خنک کاری همواره ادامه دارد. در واقع عاملی که مانع از افزایش چشمگیر در شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت بر روی جوشش در حضور سطوح تخت شده است، برخورد سیال نسبتا سرد پایین رونده با حباب‌های داغ خارج شده از درون حفره‌ها بوده است. برای رفع این مشکل ایجاد مسیر گذر سیال از بخار توسط ایجاد میکروکانال بر روی سطح پیشنهاد شده است. با افزایش دادن مساحت سطح جوشش توسط ایجاد 13 عدد میکروکانال با مقطع ذوزنقه‌ای توسط ماشین‌کاری وایرکات همانند "شکل7" قسمت 4 بر روی سطح پرداخته شده است. در میکروکانال‌ها همواره دما در کف کانال‌ها بالاتر از دما در نوک پره‌ها بوده به همین خاطر سایت‌های موجود در انتهای کانال فعالیت بیشتری نسبت به سایت‌های موجود در لبه‌های کانال‌ها داشته و اکثر حباب‌ها از کف کانال‌ها تشکیل شده‌اند. این حباب‌ها از مرکز کانال‌ها به سمت بالا گریخته و سیال سرد جایگزین از کناره‌های کانال، حفره‌ها را تغذیه کرده همان‌گونه که در "شکل شماتیک 14" مشاهده می‌شود و به همین دلیل برخورد بین سیال و حباب به حداقل خواهد رسید.

همچنین این جریان جت ایجاد شده درون کانال‌ها با برخورد به حباب‌های در حال تشکیل برروی دیواره باعث کنده شدن و افزایش سریع‌تر فرکانس تولید حباب می‌شوند. در ادامه فرآیند جوشش، با افزایش شار حرارتی به دلیل نیروی تکانه تبخیر، حباب‌ها به سمت مرکز کانال‌ها منحرف شده و تولید یک سیکل و مکانیزم چرخشی که سبب تفکیک و عدم برخورد حباب و سیال شده است نموده‌اند. به خاطر مجموع این عوامل در سطح میکروکانال شار حرارتی بحرانی، همان‌گونه که در "شکل 15" مشاهده

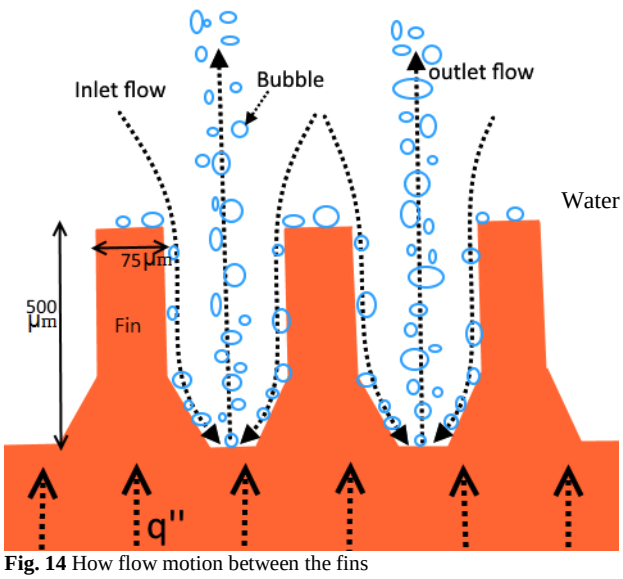

Fig. 14 How flow motion between the fins

شکل 14 تصویر شماتیک نحوه حرکت جریان از میان پره‌ها

می‌شود، به میزان $1826\ kW/m^2$ و ضریب انتقال حرارت، در "شکل 16" به میزان $140\ kW/m^2K$ در اختلاف دمای سوپر هیت $12.98°C$ رسیده است که این کاهش اختلاف دمای سطح حاکی از افزایش کارایی فوق‌العاده سطح میکروکانال نسبت به سطوح صاف دارد. در تصاویر گرفته شده از سطوح صیقلی در برابر میکروکانال به وضوح مشخص است که در شارهای حرارتی پایین نرخ تولید حباب بر روی سطوح میکروکانال بیش‌تر از سطوح صاف بوده است. همچنین با افزایش شار حرارتی در سطوح صاف به سرعت حباب‌های ریز به یک دیگر متصل شده و تولید حباب بزرگ‌تر کرده، در حالی که سطوح میکروکانال این توانایی را دارا بوده که مطابق "شکل 17" قسمت‌های 2 و 3 تا شارهای بالاتری از اتصال و برخورد حباب‌های کوچک و تولید حباب‌های بزرگ‌تر جلوگیری نمایند.

همچنین با افزایش شار حرارتی در میکروکانال‌ها همان‌طور که در "شکل17" قسمت‌های 2 و 3 مشخص شده است، حباب‌ها به سمت درون میکروکانال منحرف شده‌اند در حالی که لبه‌های کانال‌ها فاقد هر گونه حبابی بوده است و این حباب‌ها در مرکز میکروکانال‌ها به یکدیگر برخورد کرده و در

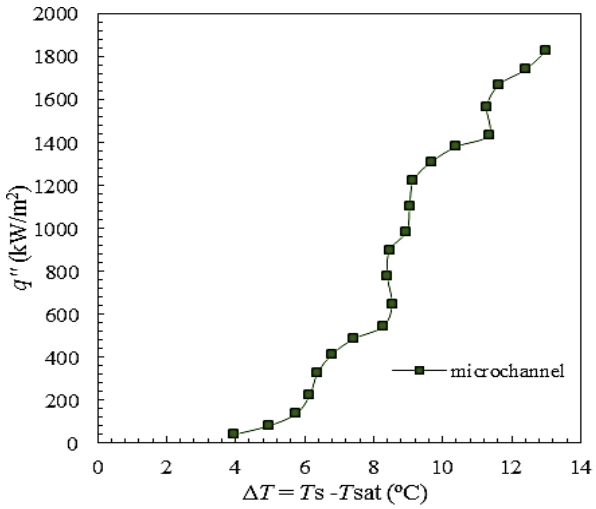

Fig. 15 Graph of heat flux for micro channel

شکل 15 نمودار شار حرارتی برحسب اختلاف دما سطح برای میکروکانال

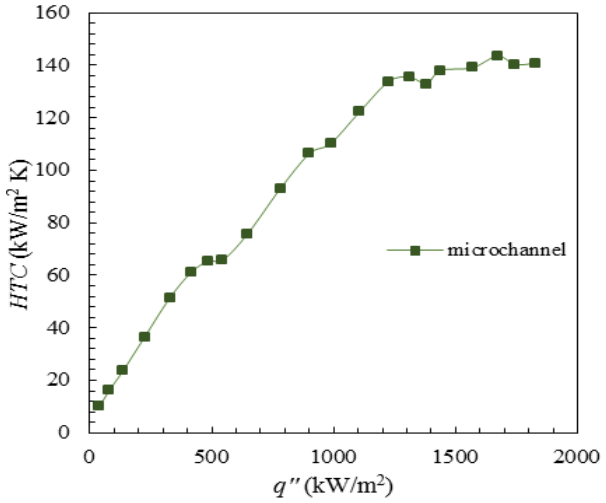

Fig. 16 Graph of heat transfer coefficient for micro channel

شکل 16 نمودار ضریب انتقال حرارت بر شار حرارتی برای میکروکانال

Fig. 17 Image of comparison of bubbles formation in flat plate and micro channel

شکل 17 تصویر مقایسه نحوه ایجاد حباب سطح صاف و سطح میکروکانال

هم ادغام می‌شوند و تولید یک حباب غالب را می‌نمایند. این حباب غالب با بلعیدن سایر حباب‌های ریز در خود به بزرگ شدن ادامه داده تا جایی که به قطر بحرانی برسد و توسط نیروی بویانسی از سطح جدا شود. با افزایش سایز حباب‌ها که وابسته به افزایش شار حرارتی است، در مرحله جدایش حباب غالب از سطح جوشش، در پایین دست حباب پدیده برخاستگی[1] ایجاد شده که منجر به ادغام سریع‌تر حباب‌های کوچک موجود بر روی سطح و تولید حباب غالب دیگری می‌شود. پدیده برخاستگی حباب و اغتشاش در پایین دست حباب بالا رونده باعث کشیده شدن سیال سرد مجاور به نزدیکی سطح جوشش و انجام فرآیند خنک‌کاری سطح می‌گردد. در واقع این پدیده بیان‌گر وجود یک سیکل چرخشی خنک کننده در اطراف میکروکانال به سمت مرکز کانال‌ها بوده، که سبب تفکیک حباب بالا رونده از سیال پایین رونده شده و یکی از عوامل افزایش CHF و HTC محسوب شده است و به خاطر مجموع حضور این سیکل‌های خنک‌کاری و نیروی مومنتوم تبخیر حباب در اطراف پره‌ها دما در سطح پره‌ها برخلاف افزایش زیاد شار حرارتی افزایش زیادی پیدا ننموده است.

4- نتیجه‌گیری

در این آزمایش به بررسی اثر 4 جهت‌گیری مختلف سطح صیقلی، سطح زبر شده به‌صورت دایره‌ای، سطح زبر شده در یک راستا و میکروکانال پرداخته شده است. سطح کاملا صیقلی در اختلاف دمای سطح 20.83°C به شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت 790 kW/m^2 و 45 kW/m^{2}K دست یافته است. با زبر کردن سطح به‌صورت دایره‌ای و با افزایش زبری و سایت‌های هسته‌زایی، شار حرارتی به میزان 14.4% و ضریب انتقال حرارت 17.7% نسبت به سطح صیقلی افزایش یافته است. همچنین با ایجاد زبری‌هایی در یک راستا علاوه بر زبر کردن سطح به تغذیه بیشتر میکرولایه زیرین حباب و سایت‌های هسته‌زایی توسط کانال‌های مویرگی کمک شده است. که در این حالت حباب‌هایی با سایز بزرگ‌تر ایجاد شده است، با ایجاد حباب با قطر بزرگ‌تر، حرکت این گونه حباب‌ها به سمت بالا حجم بیش‌تری از سیال سرد بالا دست حباب را به سمت سطح در حال جوشش حرکت داده و انتقال حرارت افزایش می‌یابد. شار حرارتی بر روی این سطح به میزان 38.6% و ضریب انتقال حرارت 55.5% افزایش را نسبت به سطح صیقلی اولیه نشان داده است. این نکته بسیار حائز اهمیت بوده که بدون متحمل شدن هزینه‌های بالا و فقط با مهندسی نمودن جهت‌گیری زبری‌ها می‌توان تا این میزان شاهد افزایشCHF و HTC بود. همچنین با ترکیب نمودن روش تغذیه زیرلایه حباب و تفکیک سیال پایین رونده از حباب داغ بالا رونده به صورت ایجاد میکروکانال بر روی سطح می‌توان علاوه‌بر سیال روی سطح تا حدودی مسیر حباب جدا شده از سطح را نیز مدیریت نمود، در این حالت شار حرارتی بحرانی به میزان 131% و ضریب انتقال حرارت تا 211% افزایش را نسبت به حالت سطح صیقلی نشان داده است. درنهایت با رسم نمودار شار حرارتی برحسب اختلاف دمای سوپر هیت و ضریب انتقال حرارت هر 4 سطح مطابق "شکل‌های 18 و 19" مشخص شده است که با افزایش کارایی و بهینه کردن سطح، نمودار به سمت چپ متمایل شده و شار حرارتی بحرانی در اختلاف دمای سوپر هیت کم‌تری روی داده است. در "شکل 18" در نمودار مربوط به جوشش سطح میکروکانال در مقایسه با سایر سطوح تخت مشاهده می‌شود که در شارهای پایین حرارتی به‌دلیل تولید حباب بیشتر نمودار سطح میکروکانال در یک دمای سوپر هیت سطح یکسان شار

[1] Wake

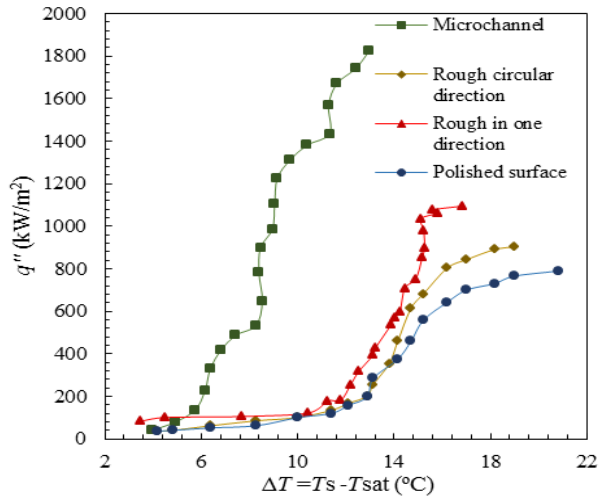

Fig. 18 Comparison graphs of heat flux for all surfaces

شکل 18 نمودار مقایسه شار حرارتی تمامی سطوح

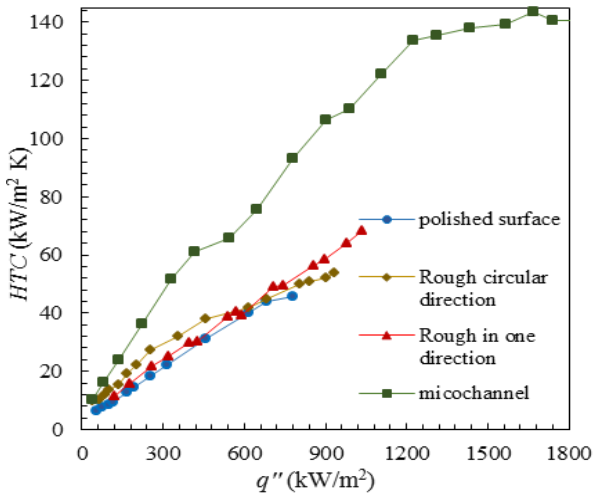

Fig.19 Comparison graphs of HTC for all surfaces

شکل 19 نمودار مقایسه ضریب انتقال حرارت تمامی سطوح

جدول 2 مقایسه نتایج استخراج شده برای سطوح

Table2 Comparison results for all surfaces

CHF (W/m^2)	HTC (kW/m^2 K)	ΔT (°C)	Ra (μm)	نوع سطح
790000	45	20.83	0.057	سطح صیقلی
903826.6	53	18.97	0.169	سطح پولیش شده به صورت دایره‌ای
1095167	70	16.83	0.114	سطح پولیش شده در یک جهت
1826880	140	12.98	…	سطح میکروکانال

حرارتی بالاتری را دارا می‌باشد.

5- فهرست علایم

H	ضریب انتقال حرارت جوششی (W/m^2 K)
F_{pr}	ضریب تصحیح فشار
K	ضریب رسانندگی گرمایی (W/m K)
P	فشار(Pa)
Pr	عدد بی بعد پرانتل
q''	شار حرارتی (W/m^2)
Ra	زبری متوسط (μm)

T	دما (K)
U	عدم قطعیت
Z	موقعیت ترموکوپل‌ها در کارتریج هیتر (mm)

علایم یونانی

μ	لزجت دینامیکی (N/m^2)
ρ	دانسیته (kg/m^3)
σ	کشش سطحی (N/m)

زیرنویس‌ها

cr	بحرانی
l	مایع
S	سطح جوشش
sat	اشباع
v	بخار

6- مراجع

[1] A. Abdollahi, M. R. Salimpour, N. Etesami, Experimental analysis of pool boiling heat transfer of ferrofluid on surface deposited with nanofluid, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, pp. 19-30, 2016. (in Persian فارسی)

[2] P. J. Berenson, Experiments on pool boiling heat transfer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 5, No. 10, pp. 985-999, 1962.

[3] B. J. Jones, J. P. McHale, S. V. Garimella, The influence of surface roughness on nucleate pool boiling heat transfer, *Cooling Technologies Research Center*, Vol. 131, pp. 253, 2009.

[4] M. Jacob and W. Fritz, Experiments on the evaporation process, *Research in Engineering*, Vol. 2, pp. 435-447, 1931.

[5] J. M. Ramilson, P. Sadasivan, J. H. Lien Hard, Surface factor influencing burnout on flat heaters, *Heat Transfer*, Vol. 114, pp. 287-290, 1992.

[6] S. Vafaei, T. B. Tasciuc, Role of nanoparticles on nanofluid boiling phenomenon: Nanoparticle deposition, *Chemical Engineering Reasearch and Design*, Vol. 92, No. 5, pp. 842-856, 2013.

[7] A. M. Gheitaghy, H. Saffari, J. S. Shendi, Pool boiling enhancement by electrodeposited porous micro/nanostructured on copper surface, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, pp. 159-167, 2015. (in Persian فارسی)

[8] R. R. Souza, J. C. Passos, E. M. Cardoso, Influence of nanoparticle size and gap size on nucleate boiling using HFE7100, *Experimental Thermal Fluid Science*, Vol. 59, pp. 195-201, 2014.

[9] O. Ahmed, M. S. Hamed, Experimental investigation of the effect of particle deposition on pool boiling of nanofluid, *International Journal Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp. 3423-3436, 2012.

[10] G. P. Narayan, K. B. Anoop, S. K. Das, Mechanism of enhancement/deterioration of boiling heat transfer using stable nanoparticle suspensions over vertical tubes, *Journal of Applied Physics*, Vol. 102, No. 7, pp. 74317, 2007.

[11] S. Vafaei, Nanofluid pool boiling heat transfer phenomenon, *Journal of Powder Technology*, Vol. 277, pp. 181-192, 2015.

[12] A. Jaikumar, S. G. Kandlikar, Enhanced pool boiling heat transfer mechanisms for selectively sintered open microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 88, pp. 652-661, 2015.

[13] A. M. Gheitaghy, H. Saffari, M. Mohebbi, Investigation pool boiling heat transfer in U shaped mesochannel with electrodeposited porous coating, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 79, pp. 87-97, 2016.

[14] R. J. Moffat, Describing the uncertainties in experimental results, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 1, pp. 3-17, 1988.

[15] A. Mourgues, V. Hourtane, T. Muller, M. C. Charles, Boiling behaviors and critical heat flux on a horizontal and vertical plate in saturated pool boiling with and without Zno nanofluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 57, pp. 595-606, 2013.

[16] S. Das, S. Bhaumik, Experimental study of nucleate pool boiling heat transfer using water on thin-film surface, *Iran Journal Science Technology Trans. Mechanical Engineering*, Vol. 40, No. 1, pp. 21-29, 2016.

[17] M. M. Sarafraz, T. Kiani, F. Hrmozi, Critical heat flux and pool boiling heat transfer analysis os synthesized zirconia aqueous nanofluid, *International Communication in Heat and Mass Transfer*, Vol. 70, pp. 75-83, 2016.

[18] I. S. Kiyomura, L. L. Manetti, A. P. da Cunha, G. Ribatski, E. M. Cardoso, An analysis of nanoparticles deposition on characteristics of the heating surface and on pool boiling of water, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 106, pp. 666-674, 2017.