مجله مهندسی مکانیک مدرس، شهریور 1394، دوره 15، شماره 6، ص‌ص 327-334

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

# بررسی آزمایشگاهی اثر سرعت و زبری روی جوشش جریانی مادون سرد

باقر سلیمانی[1]، علی کشاورز ولیان[2*]، تورج ملک پور[3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
3-- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
* تهران، صندوق پستی 19395-1999، keshavarz@kntu.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 18 اسفند 1393
پذیرش: 22 فروردین 1394
ارائه در سایت: 14 اردیبهشت 1394

*کلید واژگان:*
جوشش جریانی مادون سرد
شار حرارتی
زبری سطح
سرعت

**چکیده**

جوشش جریانی مادون سرد زمانی رخ می‌دهد که دمای توده سیال کمتر و دمای سطح تماس بیشتر از دمای اشباع متناظر با فشار سیال باشد. اهمیت ویژه جوشش در این است که با وجود اختلاف دمای کم میان مایع و سطح تماس، انتقال حرارت زیادی مبادله می‌شود، که دلیل این امر بالا بودن میزان گرمای نهان سیال است. در این مقاله اثر سرعت جریان و زبری سطح روی جوشش جریانی مادون سرد آب خالص بررسی شد. بدین منظور یک دستگاه آزمایش طراحی و ساخته شد. دستگاه متشکل از یک کانال شیشه‌ای به سطح مقطع 30×20 میلی‌متر و طول 120 سانتی‌متر است. قطعه مورد آزمایش که یک هیتر استوانه‌ای مسی به قطر 12 میلی‌متر هست، در کف کانال تعبیه شده است. آزمایش‌ها برای زبری‌های 0/65، 2/5 و 4/4 میکرومتر در سرعت‌های 0/5، 0/7 و 0/9 متر بر ثانیه انجام شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد با افزایش زبری سطح، ضریب انتقال حرارت جوشش جریانی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت، در دماهای سطح جوشش پایین، افزایش انتقال حرارت مشاهده شد. در حالی که در دماهای سطح جوشش بالا، عکس روند مذکور مشاهده شد. نتیجه بدست آمده برای اثر سرعت در دماهای سطح جوشش بالا، ناشی از در نظر گرفتن همزمان جابجایی و جوشش و بر هم کنش آن‌ها می‌باشد که تا کنون به صورت آزمایشگاهی ارایه نشده بود. این کار آزمایشگاهی برای سطح مسی انجام نشده بود.

# Experimental investigation of velocity and roughness effects on subcooled flow boiling

Bagher Soleimani, Ali Keshavarz Valian*, Touraj Malek Pour

Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
* P.O.B. 19395-1999, Tehran, Iran, Keshavarz@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 09 March 2015
Accepted 11 April 2015
Available Online 04 May 2015

*Keywords:*
Subcooled Flow Boiling
Heat Flux
Surface Roughness
Velocity

ABSTRACT

The subcooled flow boiling occurs when the bulk temperature is less than saturation temperature of the liquid at that pressure though the surface temperature is higher. The most important feature of boiling phenomenon is related to the high latent heat of fluid which could remove high heat flux at relatively low temperature difference between the liquid and the hot surface. In this study, the impact of velocity and roughness on the subcooled flow boiling were investigated experimentally for pure water. An experimental setup was designed and manufactured. The experimental setup consists of a plexiglass channel with cross section 20×30 mm and length of 120 cm. A cylindrical heater made of copper with diameter 12 mm is located on the bottom surface of the plexiglass channel. All the experiments were conducted for the surface roughness of 0.65, 2.5 and 4.4 µm at velocities of 0.5, 0.7 and 0.9 m/s. The experimental results show that the surface heat flux increases as the surface roughness and velocity increase. However, this effect of velocity enhancement was only observed for lower boiling surface temperature and an opposite trend has occurred for higher boiling surface temperature. This is due to the simultaneous consideration of the convection and boiling terms along with the interaction between them, which has not been presented experimentally yet. It appears that this kind of experimental study has not been carried out for copper type surfaces.

## 1- مقدمه

امروزه در صنعت سرمایش و گرمایش با توجه به مسأله بحران انرژی و مسائل زیست‌محیطی تمام تلاش محققان بر این است که روش‌هایی اقتصادی‌تر و سازگار با محیط‌زیست در پیش‌گرفته شود. استفاده از پدیده جوشش موضوعی است که سال‌هاست برای افزایش نرخ انتقال حرارت مورد توجه محققان این زمینه بوده است. دلیل این امر افزایش انتقال حرارت بدون افزایش سطح انتقال حرارت یا افزایش اختلاف دمای سطح و دمای سیال هست. به دلیل بالا بودن گرمای نهان سیال در طی فرایند جوشش انرژی

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

B. Soleimani, A. Keshavarz Valian, T. Malek Pour, Experimental investigation of velocity and roughness effects on subcooled flow boiling, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 6, pp. 327-334, 2015 (In Persian)

زیادی از سطح جامد جذب می‌شود. جوشش زمانی در سطح مشترک جامد-مایع رخ می‌دهد که دمای سطح جامد بیشتر از دمای اشباع سیال در فشار متناظر باشد. با افزایش دمای سطح جامد حباب‌های بیشتری تشکیل شده و در نتیجه ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. این ویژگی مهم جوشش در بسیاری از کاربردهای صنعتی ازجمله تهویه مطبوع، خنک کاری موتورهای احتراق داخلی و سیستم یخچال‌ها [1] بکار گرفته می‌شود.

خصوصیات سطح جامد مانند زبری تأثیر مهمی روی انتقال حرارت جوشش جریانی دارند. جاکوب و فریتز [2] اثر پرداخت سطح را روی جوشش استخری آب خالص مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها از یک سطح ماشین‌کاری شده با شیارهای مربعی شکل به ابعاد 0/16 میلی‌متر استفاده کرده و نشان دادند که عملکرد انتقال حرارت بهبود یافت.

برنسون [3] به بررسی اثر زبری سطح روی جوشش استخری n-پنتان به‌صورت آزمایشگاهی در فشار اتمسفر پرداخت و مشاهده کرد با افزایش زبری، انتقال حرارت افزایش می‌یابد و به این نتیجه رسید که با تغییر پرداخت سطح، می‌توان 500 تا 600 درصد ضریب انتقال حرارت را تغییر داد.

کاندلیکار و اسپیسمن [4] به بررسی انتقال حرارت جوشش جریانی مادون سرد آب خالص روی یک سطح داغ در چهار زبری پرداختند و به این نتیجه رسیدند که عملکرد انتقال حرارت به تعداد حفره‌ها و توزیع اندازه حفره‌ها، بیشتر از میانگین شاخص زبری بستگی دارد. همچنین آن‌ها دریافتند که تعداد حفره‌ها در زبری سطوح مهم نیست، بلکه تعداد حفره‌های فعال در ایجاد هسته‌های حباب‌ها مهم است.

کمپل [5] جوشش در موتورهای احتراق داخلی و تأثیرات زبری سطح بر این پدیده را بررسی کرد و به این نتیجه رسید که به ازای سرعت یکسان، افزایش زبری منجر به افزایش انتقال حرارت می‌شود، همچنین افزایش سرعت در زبری یکسان، در دماهای سطح پایین افزایش انتقال حرارت و در دماهای سطح بالا کاهش انتقال حرارت را در پی دارد.

کانگ [6] تأثیر زبری سطح جوشش بر ضریب انتقال حرارت جوششی را با سیال عامل آب و یک گرم‌کن لوله‌ای از جنس فولاد ضدزنگ، در فشار اتمسفر بررسی نمود. نتایج آزمایش نشان می‌داد که با افزایش زبری سطح جوشش، ضریب انتقال حرارت بهبود می‌یابد و زمانی‌که سطح جوشش از حالت افقی به حالت عمودی در می‌آید، این تأثیر بیش‌تر می‌شود. همچنین مشخص شد، زمانی‌که سطح جوشش در حالت عمودی است با افزایش نسبت طول لوله گرم‌کن به قطر آن، تأثیر زبری سطح جوشش بر ضریب انتقال حرارت جوشش استخری، افزایش می‌یابد.

یو و همکارانش [7] اثر سرعت جریان روی جوشش جریانی مخلوط آب و شکر را درون دو استوانه هم‌محور به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و مشاهده کردند که با افزایش سرعت جریان، ضریب انتقال حرارت افزایش پیدا می‌کند.

برتش و همکارانش [8] اثر دبی جرمی برای میکروکانال‌ها با صفحه‌ی مسی روی جوشش جریانی را برای مبرد R-134a و R-245fa بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش دبی جرمی ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

جباردو و همکارانش [9] اثر زبری سطح را به‌صورت آزمایشگاهی برای جنس‌های مختلف روی انتقال حرارت جوشش هسته‌ای مبرد R-134a و R123 بررسی کردند. آزمایش‌ها را روی یک سطح استوانه‌ای برنجی، مسی و فولاد ضدزنگ انجام دادند و مشاهده کردند که افزایش زبری، اثرات مثبتی روی ضریب انتقال حرارت در پی دارد و سطوح با زبری بالا نسبت به سطوح صاف، عملکرد حرارتی بهتری در جوشش دارند.

جونز و گریملا [10] تأثیر زبری روی انتقال حرارت جوشش جریانی میکرو کانال‌ها را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و مشاهده کردند که با افزایش زبری سطح، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد، ولی این افزایش ضریب انتقال حرارت در زبری‌های بالا کمتر بود.

حسینی و همکارانش [11] تأثیر زبری سطح جوشش بر ضریب انتقال حرارت جوشش استخری را با استفاده از مبرد R-113 و سطح جوشش مدور افقی از جنس مس، بررسی نمودند. نتایج آزمایش حاکی از آن بود که با افزایش زبری سطح جوشش، ضریب انتقال حرارت جوششی به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌یابد.

سرافراز و پیغمبرزاده [12] جوشش جریانی هسته‌ای را برای مخلوط آب و اتیلن گلیکول رقیق درون دو استوانه‌ی هم‌محور به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

الام و همکارنش [13] اثر زبری سطح روی جوشش جریانی را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش زبری سطح، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

دنگ و همکارانش [14] به بررسی اثر دبی جرمی، روی جوشش جریانی میکروکانال‌های متخلل پرداختند و مشاهده کردند که دبی جرمی اثر کمی روی ضریب انتقال حرارت دارد.

پاز و همکارانش [15] اثر زبری سطح روی جوشش جریانی برای سه جنس مسی، آلومینیمی و فولاد ضدزنگ را بررسی کردند و مشاهده کردند با افزایش زبری سطح، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

در تحقیقات انجام شده همگی بر این که افزایش زبری سطح باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود، اتفاق نظر دارند، ولی تأثیر سرعت بر ضریب انتقال حرارت به خوبی بررسی نشده است. در نمودارهای ارایه شده توسط کمپل مشاهده می‌شود که در دماهای سطح جوشش بالا، افزایش سرعت باعث کاهش ضریب انتقال حرارت خواهد شد، ولی در این نتایج، اثر سرعت در دماهای سطح جوشش بالا بررسی نشده است.

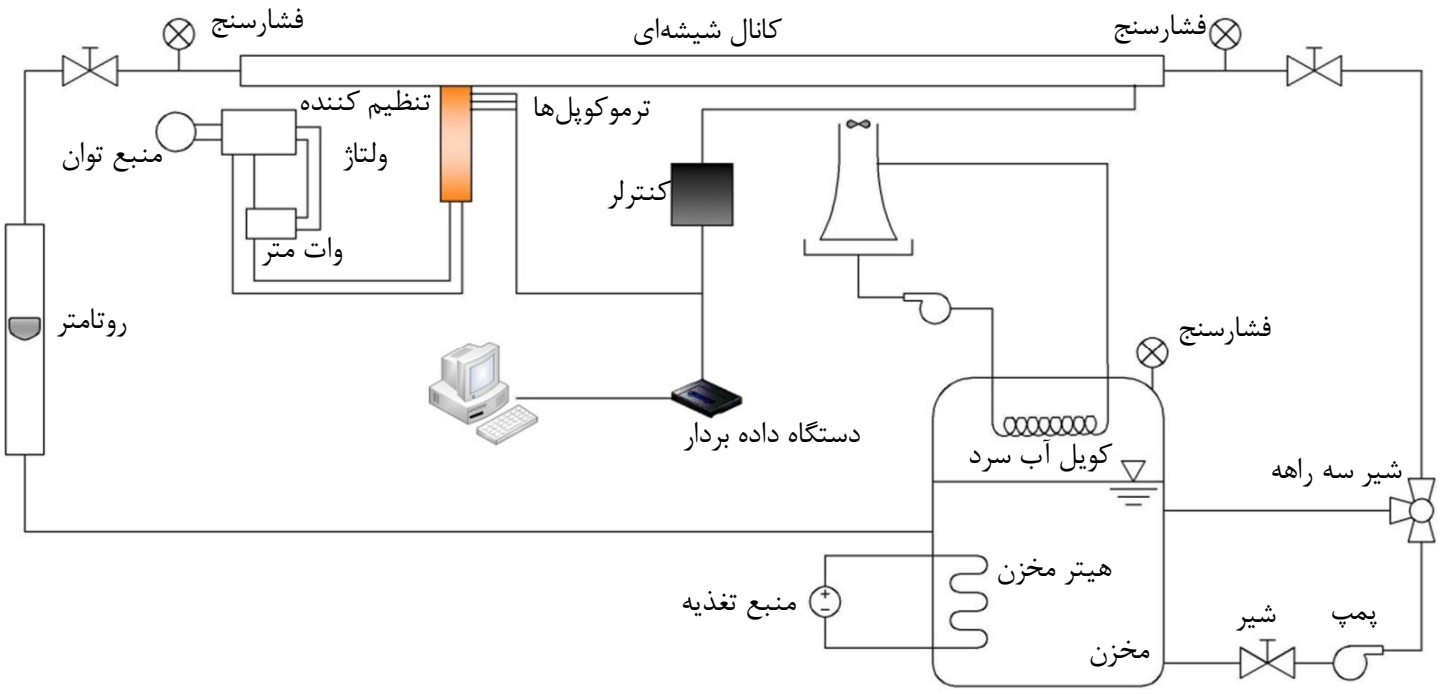
در این مقاله به بررسی اثر زبری سطح و سرعت جریان روی جوشش جریانی مادون سرد نقطه‌ای برای یک هیتر مسی پرداخته‌شده است.

## 2- دستگاه آزمایش

نمای شماتیک دستگاه آزمایش مورد استفاده در بررسی جوشش جریانی مادون سرد نقطه‌ای آب خالص در شکل 1 نمایش داده شده است.

این دستگاه شامل یک مخزن، پمپ، یک کانال شیشه‌ای عایق، روتامتر، سه عدد فشارسنج، دو عدد هیتر، بلوک مسی، کنترلر، قطعه آزمایش مسی، تعدادی ترموکوپل و رئوستا است. مدل تجهیزات مورد استفاده در جدول 1 ارایه شده است.

سطح جوشش مسی مورد استفاده در آزمایش به شکل دایره با قطر 12 میلی‌متر می‌باشد که در کف کانال شیشه‌ای تعبیه شده است. یک بلوک مسی به قطر 4 سانتی‌متر و طول 10 سانتی‌متر وظیفه انتقال حرارت تولید شده از یک هیتر 1000 واتی به سطح جوشش را برعهده دارد. ولتاژ ورودی به هیتر توسط یک رئوستا که به آن وصل شده است کنترل می‌شود. برای اندازه‌گیری دمای سطح جوشش و شار حرارتی سه عدد ترموکوپل نوع k با دقت 0/1 درجه سانتی‌گراد مانند شکل 2 در بدنه قطعه‌ی آزمایش جاسازی‌شده است. تا




**شکل 1** شماتیک دستگاه آزمایش جوشش جریانی مادون سرد نقطه‌ای

هم از یک بعدی بودن انتقال حرارت و هم سالم بودن ترموکوپل‌ها اطمینان حاصل شود. محل قرار گیری ترموکوپل‌ها در شکل 3 نشان داده شده است.

برای کمینه کردن اتلاف حرارت بین بلوک مسی و قطعه آزمایش از یک روغن انتقال حرارت بر پایه مس با ضریب هدایت بالا استفاده شده است. طول و ابعاد سطح مقطع کانال شیشه‌ای به ترتیب برابر با 120 سانتی‌متر و 2×3 سانتی‌متر می‌باشد. برای ایجاد جریان کاملاً توسعه یافته، قطعه مورد آزمایش در فاصله 90 سانتی‌متری از ابتدای کانال تعبیه شده است. سطح جوشش در شکل 4 نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری افت فشار، دقت مورد نیاز 0/02 بار می‌باشد که بدین منظور دو عدد فشارسنج با دقت 0/02 بار در ورودی و خروجی کانال نصب شده‌اند.

برای تأمین آب در دمای 80 درجه سانتی‌گراد از یک مخزن عایق 50 لیتری استفاده شده است و برای ثابت ماندن فشار درون آن و تقطیر بخار ایجاد شده ناشی از تبخیر آب، از یک لوله مارپیچ مسی متصل به آب سرد استفاده شده است.

حجم سیال در گردش در سیستم و کانال 11 لیتر است. برای اطمینان از تک فاز بودن مایع وارد شونده به پمپ 25 لیتر مایع مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به تجهیزات موجود در بازار، مخزن 50 لیتری مورد استفاه قرار گرفت تا بتوان کندانسور را درون مخزن تعبیه کرد. از مخازن با حجم بیشتر نیز می‌توان استفاده کرد ولی استفاده از مخزن‌هایی با حجم بیشتر، به مدت زمان بیشتری برای گرم شدن سیال درون مخزن نیاز دارد، که این کار باعث زمان بر شدن آزمایش می‌شد.

برای اندازه‌گیری دبی سیال از یک روتامتر با دقت 0/1 لیتر بر دقیقه استفاده شده است. این روتامتر برای دمای 25 درجه سانتی‌گراد و آب خالص کالیبره شده است لذا می‌بایست برای دیگر شرایط کالیبره شود. برای تغییر کالیبراسیون آن از رابطه [16] (1) استفاده شده است:

$$Q_2 = Q_1 \sqrt{\frac{\rho_1(\rho_f - \rho_2)}{\rho_2(\rho_f - \rho_1)}} \quad (1)$$

در این رابطه، $Q_1$ دبی سیال در کالیبراسیون اولیه، $Q_2$ دبی در شرایط ثانویه، $\rho_f$ چگالی گوی روتامتر، $\rho_1$ و $\rho_2$ چگالی سیال در شرایط اولیه و ثانویه هستند.

برای به گردش درآوردن سیال، از یک پمپ گراندفوس با هد و دبی به ترتیب 5 فوت و 7/5 جی‌پی‌ام استفاده شده است.

برای ایجاد شرایطی نزدیک به شرایط سیال در سیستم خنک‌کاری موتورهای احتراق داخلی، دمای مادون سردی سیال و فشار روی سطح جوشش به ترتیب 80 درجه سانتی‌گراد و 1/2 بار در نظر گرفته شده‌اند. زبری سطح مورد آزمایش از طریق سمباده‌هایی به شماره 600 - 15 گریت ایجاد و توسط زبری سنج اندازه‌گیری شده است.

برای اندازه‌گیری و ثبت دما نیز از دستگاه ثبت دما استفاده شده است.

برای بررسی اثر زبری سطح روی انتقال حرارت جوشش جریانی سه زبری 0/65، 2/5 و 4/4 میکرومتر در سرعت‌های 0/5، 0/7 و 0/9 متر بر ثانیه مورد آزمایش قرارگرفته‌اند. محدوده سرعت برای سیستم‌های خنک‌کاری موتورهای احتراق داخلی با توجه به مقالات [5،17] مشخص می‌شد. لذا 3 سرعت به گونه‌ای انتخاب شدند که در محدوده کاربردی بوده و فاصله یکسانی از هم داشته باشند تا اثرات سرعت به خوبی قابل مشاهده باشد.

با هر بار افزایش شار حرارتی، دمای ترموکوپل‌ها افزایش می‌یابد تا اینکه به یک مقدار خاص می‌رسد. هر 15 دقیقه یک بار دماها بررسی می‌شد تا اینکه نوسانات دمایی به ±0/1 درجه سانتی‌گراد برسد، که در این حالت شرایط پایا است و به صورت تجربی مشاهده شد که هر بار تغییر شار حرارتی تقریباً 80 دقیقه زمان نیاز دارد. بنابراین با استفاده از 3 ترموکوپل از یک بعدی و پایا بودن مسأله اطمینان حاصل می‌شود.

## 3- محاسبات

حال با فرض انتقال حرارت یک بعدی و پایا در قطعه مورد آزمایش، شار حرارتی سطح جوشش با استفاده از رابطه (2) به دست می‌آید:

**جدول 1** مدل تجهیزات.

| تجهیزات | مدل تجهیزات |
|---|---|
| پمپ | گراندفوس یوپی‌اس 55-32 |
| فشارسنج | تی‌جی |
| روتامتر | جک الیوت |
| سمباده | امری توسا |
| زبری سنج | تی‌آر 200 |
| داده بردار | ادم 500/ تی‌سی‌پی |

$$q'' = k\frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} \quad (2)$$

در این رابطه، $x$ و $T$ به ترتیب نشان‌دهنده موقعیت ترموکوپل‌ها و دما در قطعه مورد آزمایش می‌باشند. اگر دمای سطح از دمای اشباع کمتر باشد ضریب انتقال حرارت از رابطه (3) و در غیر این صورت از رابطه (4) محاسبه می‌شود.

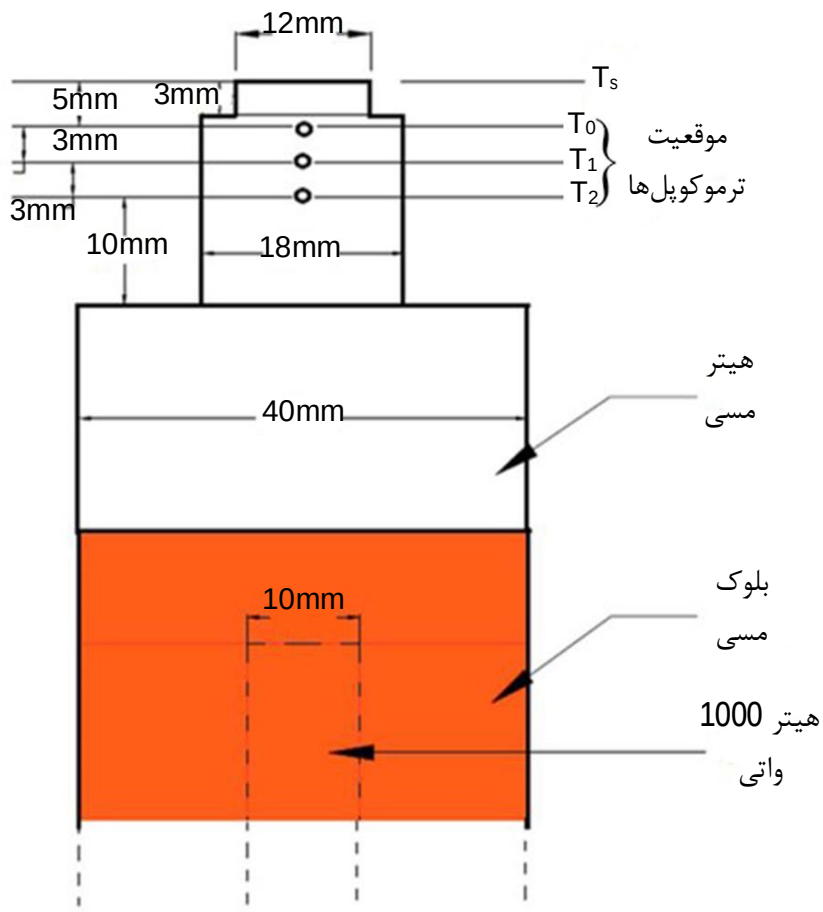
$$h_{\mathrm{conv}} = \frac{q''}{T_{\mathrm{s}} - T_{\infty}} \quad (3)$$

$$h_{\mathrm{b}} = \frac{q''}{T_{\mathrm{s}} - T_{\mathrm{sat}}} \quad (4)$$

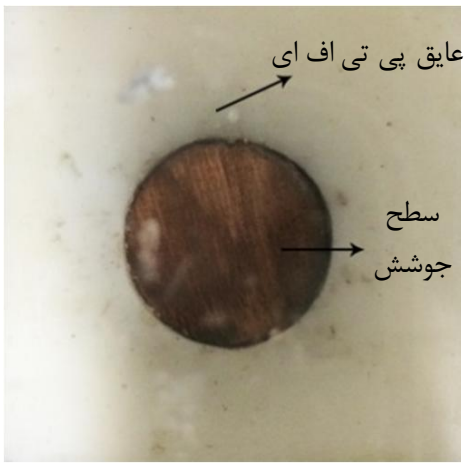
در روابط فوق، $T_s$ دمای سطح جوشش و $T_{\mathrm{sat}}$ دمای اشباع سیال مورد آزمایش در فشار کارکردی است که توسط رابطه (5) محاسبه می‌شود:

$$T_{\mathrm{s}} = T_1 + \left(\frac{x_{\mathrm{s}} - x_1}{x_1 - x_2}\right)(T_1 - T_2) \quad (5)$$

**شکل 2** نمای بلوک مسی و قطعه مورد آزمایش




**شکل 3** شماتیک قطعه مورد آزمایش به همراه بلوک مسی




**شکل 4** سطح جوشش

## 4- عدم قطعیت

ازآنجا که در تحقیق حاضر پارامترهای زیادی توسط ابزارهای آزمایشگاهی با دقت‌های متفاوت اندازه‌گیری شده‌اند، بنابراین خطاهای اندازه‌گیری در نتایج تأثیرگذار بوده و می‌بایست میزان تأثیر هر یک از پارامترهای اندازه‌گیری شده را بر نتایج آزمایش به دست آورد. مطابق تئوری پخش خطاها به روش سری تیلور [18] برای محاسبه عدم قطعیت نتایج حاصل از اندازه‌گیری چند متغیره با درصد اطمینان 95% از رابطه (6) استفاده می‌شود:

$$U_{95} = \left[\sum_{\mathrm{i}=1}^{J}\left(\frac{\partial r}{\partial X_{\mathrm{i}}}\right)^2 U_{\mathrm{i}}^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

که با جایگذاری معادله (2) در معادله (6) رابطه (7) بدست می‌آید:

$$\frac{U_{\mathrm{q}''}}{q''} = \sqrt{\left(\frac{U_{T_2-T_1}}{T_2 - T_1}\right)^2 + \left(\frac{U_{\Delta x}}{\Delta x}\right)^2} \quad (7)$$

بر مبنای دقت دستگاه‌های اندازه‌گیری و روش فوق حداکثر خطا در محاسبه شار حرارتی و سرعت سیال به ترتیب برابر با % 7/46 و٪2/02 است. فاصله کم ترموکوپل‌ها از هم و اختلاف کم دماها، سبب کوچکتر شدن مخرج ترم‌های سمت راست معادله 7 و در نتیجه بیشتر شدن عدم قطعیت می‌شود که این امر سبب افزایش عدم قطعیت در ناحیه جابجایی اجباری شده است. در شارهای بالاتر که وارد ناحیه جوشش جریانی می‌شود، اختلاف دماها افزایش می‌یابد و در نتیجه درصد عدم قطعیت کاهش می‌یابد. که این مقدار در شارهای حرارتی بالا (محدوده جوشش) به % 1/59 می‌رسد.

## 5- مدل‌های تجربی ارائه شده برای جوشش جریانی

برای اولین بار در سال 1963 چن [19] با ارائه رابطه (8) پیشنهاد نمود که جوشش جریانی اشباع به صورت مجموع جوشش استخری و جابجایی اجباری، مطابق معادله (8) در نظر گرفته شود:

$$q''_{\mathrm{fb}} = h_{\mathrm{fc}}(T_{\mathrm{s}} - T_{\infty}) + h_{\mathrm{nb}}(T_{\mathrm{s}} - T_{\mathrm{sat}}) \quad (8)$$

پس از ایشان کُلیر [20] پیشنهاد نمود که رابطه فوق با در نظر گرفتن یک ضریب S به نام ضریب سرکوب برای جوشش جریانی مادون سرد به صورت زیر بکار گرفته شود:

$$q''_{\mathrm{fb}} = h_{\mathrm{fc}}(T_{\mathrm{s}} - T_{\infty}) + S \times h_{\mathrm{nb}}(T_{\mathrm{s}} - T_{\mathrm{sat}}) \quad (9)$$

### 5-1- عبارت جابجایی اجباری

برای یک جریان توسعه یافته آشفته داخلی در یک داکت صاف، $h_{fc}$ از رابطه گنیلینسکی [21] با در نظر گرفتن پارامتر ضریب اصطکاک به‌صورت (10) محاسبه شود:

$$\mathrm{Nu}_{\mathrm{Gnielinski}} = \frac{h_{\mathrm{fc}} D_{\mathrm{h}}}{k} = \frac{\mathrm{Pr}(\mathrm{Re}_{\mathrm{D}} - 1000)(\frac{f}{8})}{1.07 + 12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}}(\mathrm{Pr}^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad (10)$$

برای داکت‌های زبر، ضریب اصطکاک $f$ می‌تواند از دیاگرام مودی [22] برحسب عدد رینولدز و زبری نسبی به دست آید. متناوباً روابط زیادی برای محاسبه ضریب اصطکاک ارائه شده که یکی از پرکاربردترین آن‌ها به‌صورت زیر است [22]:

$$f = \frac{0.25}{(\log\frac{\varepsilon}{3.7D_{\mathrm{h}}} + \frac{5.74}{\mathrm{Re}^{0.9}})^2} \quad (11)$$

### 5-2- عبارت جوشش هسته‌ای

جوشش به دلیل مشکلاتی از قبیل؛ میکرو ساختارها و جنس سطح داغ شونده، ناهمگنی محیط انتقال حرارت و پیچیدگی‌های ناشی از رخ دادن همزمان انتقال جرم و حرارت، بین بخار داخل حباب و سطح مشترک مایع-بخار، تاکنون به‌صورت تحلیلی بررسی نشده است. بنابراین محققان زیادی این مقوله را به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده و مدل‌هایی را معرفی کرده‌اند که در اینجا برای اطمینان از صحت کارکرد دستگاه، نتایج حاصل از آزمایش با سه مدل پرکاربرد تجربی ارائه شده توسط روزنو [23] گرنفلو [24] و کوپر [25] مطابق روابط (12)، (13) و (17) مقایسه شده و در شکل 4 نشان داده شده است.

$$h_{\mathrm{nb,Rohsenow}} = \left[\left(\frac{C_{\mathrm{pf}}}{C_{\mathrm{sf}}}\right)\left(\frac{T_{\mathrm{s}} - T_{\mathrm{sat}}}{h_{\mathrm{fg}}}\right)\left(\frac{k_{\mathrm{f}}}{\mu. C_{\mathrm{pf}}}\right)^{m+1}\right]^{\frac{1}{n}} \left(\frac{\mu_{\mathrm{f}} h_{\mathrm{fg}}}{T_{\mathrm{s}} - T_{\mathrm{sat}}}\sqrt{\frac{g(\rho_{\mathrm{f}} - \rho_{\mathrm{v}})}{\sigma}}\right) \quad (12)$$

که برای آب $m$=0 و $n$=0/33 و مقدار $C_{sf}$ بستگی به ترکیب سطح جامد- سیال دارد که برای آب و مس برابر با 0/0128 می‌باشد

$$h_{\mathrm{nb,Gorenflo}} = \left[\frac{q_0^{"n_2}}{h_0 F_{\mathrm{PR}}\left(\frac{R_{\mathrm{p}}}{R_{\mathrm{p0}}}\right)^{0.133}(T_{\mathrm{s}} - T_{\mathrm{sat}})^{n_2}}\right]^{\frac{1}{n_2 - 1}} \quad (13)$$

پارامتر $h_0$ بستگی به سیال مورد استفاده دارد که برای آب 5600 است. $q_0^{"}$ =20000 وات بر مترمربع، $R_{p0}$ زبری مبنا، برابر با 0/4 میکرومتر و پارامتر $R_p$ با استفاده از معادله (14) محاسبه می‌شود:

$$R_{\mathrm{a}} = 0.4R_{\mathrm{P}} \quad (14)$$

ضریب تصحیح فشار($F_{\mathrm{PR}}$) و پارامتر $n_2$ برای آب از معادلات (15) و (16) به دست می‌آید:

$$F_{\mathrm{PR}} = 1.733\left(\frac{P}{P_{\mathrm{cr}}}\right)^{0.27} + \left(6.1 + \frac{0.68}{1 - (P/P_{\mathrm{cr}})}\right)\left(\frac{P}{P_{\mathrm{cr}}}\right)^2 \quad (15)$$

$$n = 0.9 - 0.3\left(\frac{P}{P_{\mathrm{cr}}}\right)^{0.15} \quad (16)$$

$$h_{\mathrm{nb,Cooper}} = (T_{\mathrm{s}} - T_{\mathrm{sat}})^2 \times \left[55.0\left(\frac{P}{P_{\mathrm{cr}}}\right)^{n_1}\left(-\log\frac{P}{P_{\mathrm{cr}}}\right)^{-0.55}(M)^{-0.5}\right]^3 \quad (17)$$

و پارامتر $n_1$ از معادله (18) گرفته شده از کتاب قیاسیان [24] محاسبه می‌شود:

$$n_1 = 0.12 - 0.2\log R_{\mathrm{p}} \quad (18)$$

همان‌گونه که اشاره شد برای مدل کردن جوشش جریانی مادون سرد با استفاده از مجموع جابجایی اجباری و جوشش استخری، ضریب سرکوب S که مقداری بین 0 و 1 دارد، بکار می‌رود. برای اولین بار چن [19] یک رابطه گرافیکی برای این ضریب ارائه نمود. و پس از آن کلیر [20] این گراف را به‌صورت معادله (19) تخمین زد:

$$S = \frac{1}{1 + 2.53 \times 10^{-6}(\mathrm{Re})^{1.17}} \quad (19)$$

همان‌طور که از شکل 5 مشاهده می‌شود نتایج حاصل از آزمایش با مدل‌های موجود مطابقت خوبی دارند. مدل‌های ارایه شده به صورت تجربی بوده‌اند، و هر کدام در شرایط و با رویکرد خاصی بدست آمده‌اند، طبیعی است که با هم اختلاف داشته باشند. رزنو پارامتر زبری نداشته و بیشتر، جنس سطح جوشش را بررسی کرده است. کوپر اثر پارامتر فشار روی جوشش را بررسی کرده است، درحالیکه گرنفلو اثر پارامتر زبری روی جوشش را بررسی کرده‌است. شباهت شرایط آزمایشگاهی مقاله ارایه شده با مدل گرنفلو که پارامتر زبری را در نظر گرفته، نسبت به مدل کوپر و رزنو بیشتر است که با توجه به شکل 5 نیز مشاهده می‌شود که کار حاضر به مدل گرنفلو نزدیک‌تر می‌باشد. میزان خطای نتایج آزمایش در ناحیه تک فاز (دمای کمتر از 104/7 درجه سانتی‌گراد) با مدل گرنفلو 8/49% و درناحیه دوفاز (دمای بیشتر از 104/7 درجه سانتی‌گراد) 20/06% می‌باشد. مدل‌های ارائه شده جوشش جریانی، زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند که امکان تشکیل حباب در تمام سطح داخلی کانال وجود داشته باشد درحالی‌که آزمایش‌ها برای جوشش جریانی نقطه‌ای انجام شدند. همچنین مدل‌های ارائه شده با استفاده از اصل جمع آثار به دست آمده و اثر جریان روی تولید حباب را به خوبی نشان نمی‌دهند. که این دو علت باعث اختلاف نتایج آزمایش با مدل‌های موجود است.

مقایسه نتایج آزمایش با مدل‌ها جهت اطمینان از صحت کارکرد دستگاه آزمایش بود، که با توجه به شکل 5 این امر صورت گرفت.

## 6- نتایج

نمودار شار حرارتی برحسب دمای سطح جوشش جریانی برای سه سرعت سیال 0/5، 0/7 و 0/9 متر بر ثانیه در سه زبری سطح 0/65، 2/5 و 4/4 میکرومتر در شکل‌های 5 تا 11 نشان داده شده است. دمای مادون سردی سیال و فشار روی سطح جوشش به ترتیب 80 درجه سانتی‌گراد و 1/2 بار در نظر گرفته شده‌اند.

در ابتدا انتقال حرارت به سیال توسط مکانیزم جابجایی اجباری در حالت تک فاز صورت می‌گیرد. این حالت ادامه دارد تا اینکه دمای سطح داغ به دمای اشباع سیال در فشار 1/2 بار برسد. با افزایش شار حرارتی حباب‌ها شروع به شکل گرفتن می‌کنند، این حباب‌ها گرمای نهان تغییر فاز را از سطح، به مایع تک فاز اطراف حباب‌ها انتقال داده و باعث می‌شوند در قیاس با انتقال حرارت تک فاز، گرمای بیشتری از سطح گرفته شود. از طرف دیگر این حباب‌ها روی سطح باعث ایجاد آشفتگی سیال اطراف سطح شده و در نتیجه ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

همان‌طور که از شکل‌های 6 تا 8 مشخص است، افزایش سرعت ابتدا افزایش انتقال حرارت و سپس کاهش آن را در پی دارد، که مقدار این افزایش و کاهش به ترتیب 59/88% و 48/2% می‌باشد. در دماهای سطح جوشش پایین (دماهای کمتر از 104/7 درجه سانتی‌گراد) که انتقال حرارت با مکانیسم جابجایی اجباری صورت می‌گیرد منطقی است که با افزایش سرعت،

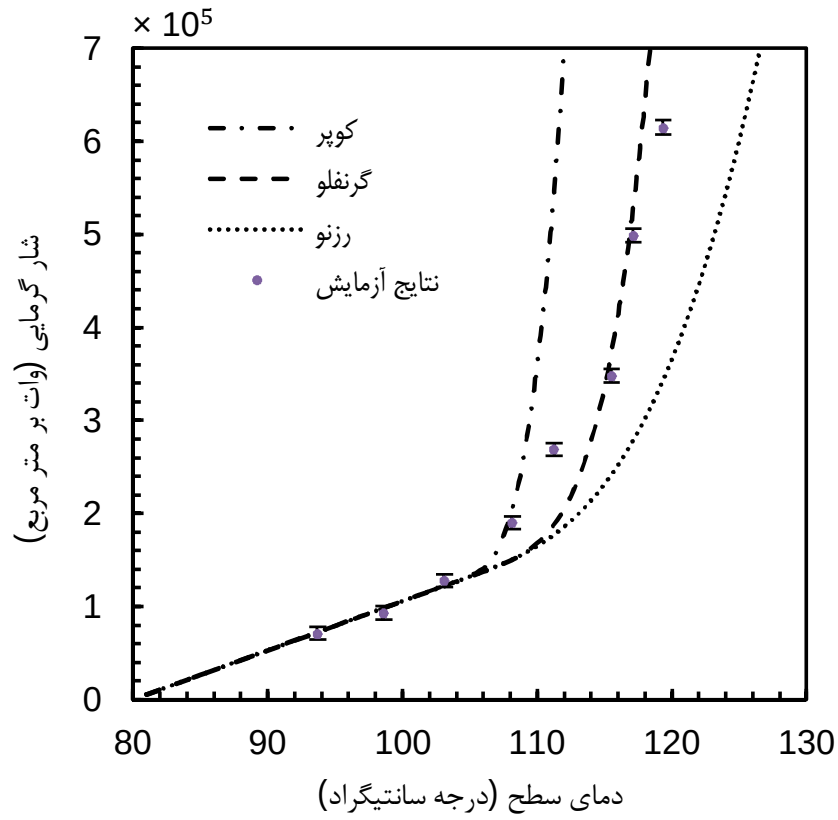
انتقال حرارت افزایش پیدا کند.

در دماهای سطح جوشش بالا، هر چند با افزایش سرعت انتقال حرارت جابجایی که جزئی از جوشش جریانی است، افزایش می‌یابد ولی انتقال حرارت جوششی کاهش پیدا می‌کند و درنهایت انتقال حرارت جوشش جریانی کاهش می‌یابد.

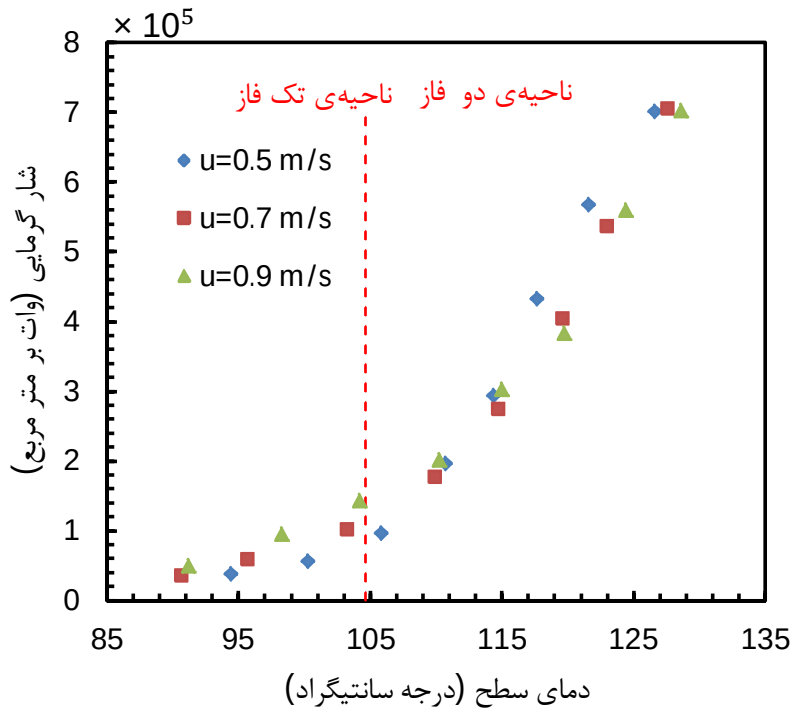
رشد حباب تابع پارامترهای زیادی از قبیل فشار، سرعت، زبری و جنس سیال می‌باشد. طبق نتایج ارایه شده در مقالات از جمله مقاله کاندلیکار و اسپیسمن [4] حفره‌های فعال در جوشش و رشد حباب نسبت به زبری متوسط نقش مهم‌تری دارند. در هنگام بررسی اثر سرعت به دلیل ثابت بودن زبری و تعداد حفره‌های فعال، تعداد حباب‌ها یا به عبارتی چگالی مکان‌های هسته‌زایی ثابت است، تنها پارامتر باقی‌مانده اندازه حباب‌ها است که با افزایش سرعت، مقدار مومنتم سیال افزایش پیدا کرده و اندازه حباب‌ها کوچکتر می‌شود، حباب‌های کوچکتر نسبت به حباب‌های بزرگتر مقدار حرارت کمتری را از سطح می‌گیرند، که این سبب کاهش ضریب انتقال حرارت با افزایش سرعت در دماهای سطح جوشش بالا می‌شود.

در دماهای سطح جوشش بالاتر، که نرخ رشد حباب و اندازه‌ی آن بیشتر بوده، اثر تغییرات سرعت بیشتر مشاهده شده است. همچنین در شکل 9 اثر افزایش سرعت جریان با استفاده از مدل‌های ارائه شده، بررسی‌شده و مشاهده می‌شود که افزایش سرعت ابتدا افزایش و سپس کاهش انتقال حرارت را در پی دارد.

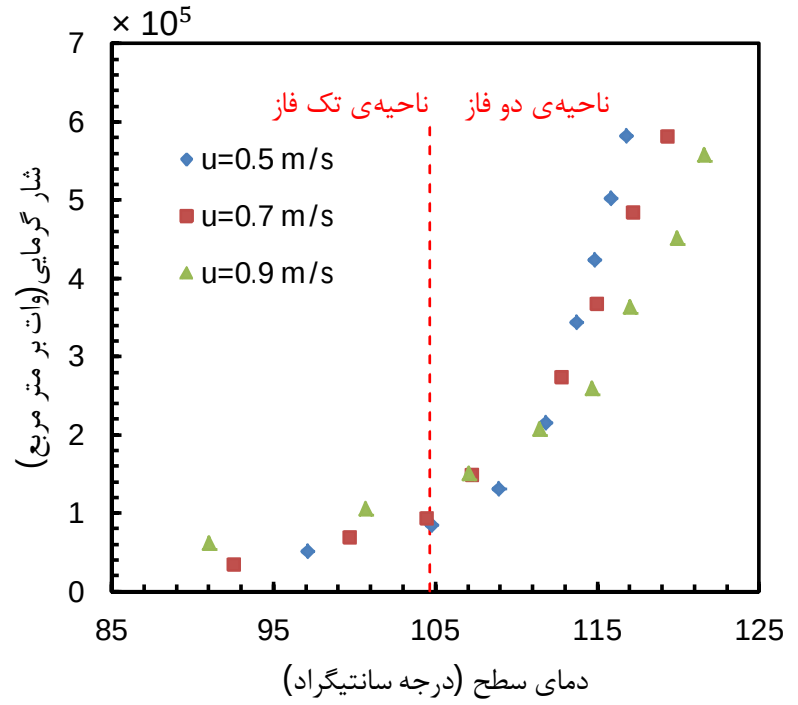
همان‌طور که از شکل‌های 10 تا 12 مشخص است با افزایش زبری سطح نمودار جوشش به سمت چپ منتقل‌شده و به عبارت دیگر با زبر کردن سطح، انتقال حرارت افزایش پیداکرده است. مقدار این افزایش برای ناحیه‌ی تک فاز و ناحیه‌ی دو فاز به ترتیب % 42/5 و % 56/53 می‌باشد. چگالی مکان هسته‌زایی در سطوح زبر اساساً بیشتر از چگالی آن در سطوح صاف است. همچنین سطح زبر حفره‌های متعددی دارد که بخار را گیر انداخته و امکان رشد حباب‌های بزرگتر و بیشتری را فراهم می‌کند. دلیل این امر، این است که سطح زبر حفره‌های فعال بیشتری را نسبت به سطح صاف دارد و حفره‌های فعال بیشتر، هوای بیشتری را در خود به دام می‌اندازند که در



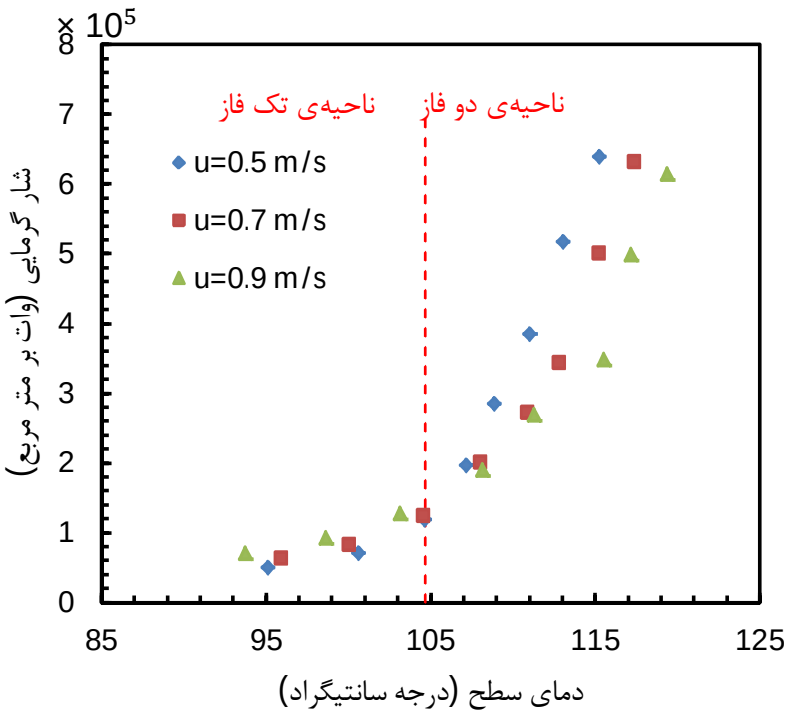

**شکل 5** مقایسه نتایج حاصل از آزمایش با مدل‌های کوپر، گرنفلو و رزنو در زبری 4/4 میکرومتر، سرعت 0/9 متر بر ثانیه و فشار 1/2 بار



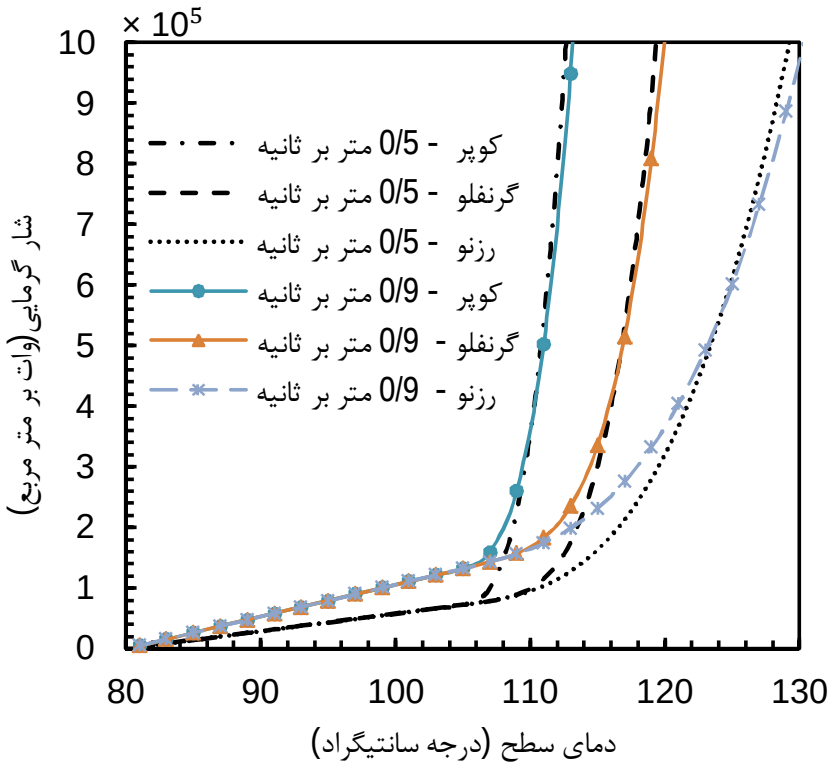

**شکل 6** نتایج تجربی جوشش جریانی مادون سرد آب خالص برای سه سرعت 0/5، 0/7 و 0/9 متر بر ثانیه در زبری 0/65 میکرومتر



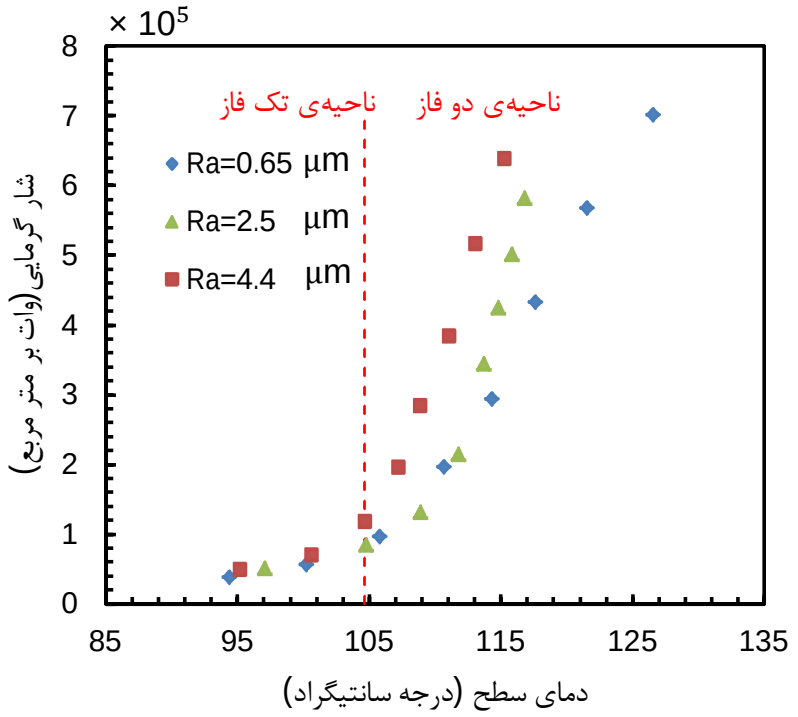

**شکل 7** نتایج تجربی جوشش جریانی مادون سرد آب خالص برای سه سرعت 0/5، 0/7 و 0/9 متر بر ثانیه در زبری 2/5 میکرومتر




**شکل 8** نتایج تجربی جوشش جریانی مادون سرد آب خالص برای سه سرعت 0/5، 0/7 و 0/9 متر بر ثانیه در زبری 4/4 میکرومتر




**شکل 9** بررسی اثر سرعت با استفاده از مدل‌های ارائه‌شده




**شکل 10** نتایج تجربی جوشش جریانی مادون سرد آب خالص برای سه زبری 0/65، 2/5 و 4/4 میکرومتر در سرعت 0/5 متر بر ثانیه

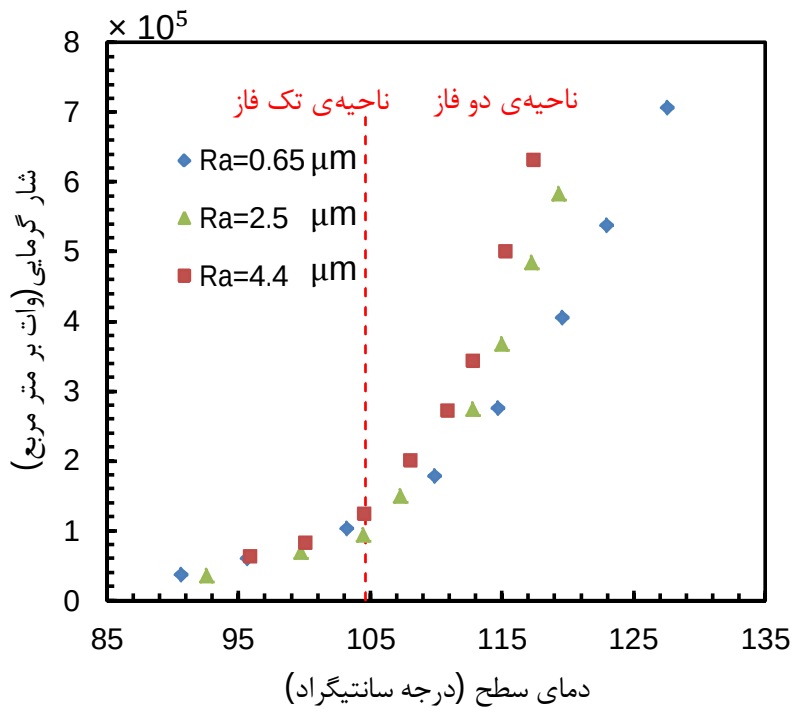
ناحیه دوفاز با به هم خوردن بالانس فشاری بین این هوا و سیال مجاور، حباب شکل می‌گیرد و هر چقدر مقدار هوای محبوس شده بیشتر باشد، حباب شکل گرفته نیز بزرگتر [24] است. حباب‌های بزرگتر نسبت به حباب‌های کوچکتر، حرارت بیشتری را از سطح جوشش می‌گیرند که این سبب افزایش ضریب انتقال حرارت با افزایش زبری سطح می‌شود.

## 7- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

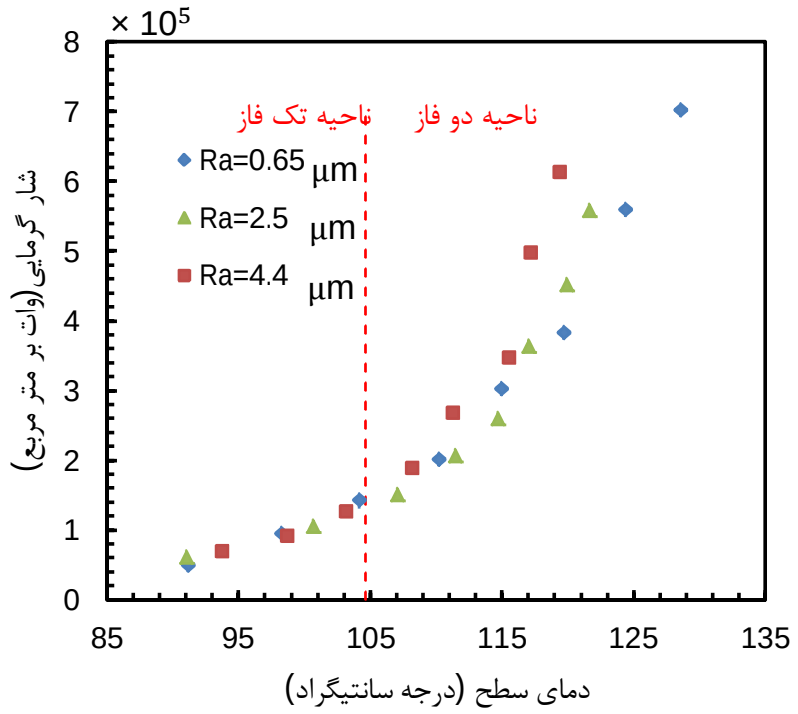
هدف از این تحقیق آزمایشگاهی، بررسی جوشش جریانی مادون سرد نقطه‌ای در یک کانال است. به همین منظور یک دستگاه آزمایش طراحی و ساخته شد. سه زبری سطح 0/65، 2/5 و 4/4 میکرومتر در سه سرعت 0/5، 0/7 و 0/9 متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. تمام آزمایش‌ها در فشار مطلق 1/2 بار، دمای مادون سردی سیال 80 درجه سانتی‌گراد انجام شده است.

بررسی تأثیر زبری سطح روی انتقال حرارت جوشش جریانی مادون سرد آب خالص نشان داد که با افزایش زبری سطح، ضریب انتقال حرارت جوشش جریانی افزایش می‌یابد.

با افزایش سرعت جریان، در دماهای سطح جوشش کمتر از دمای اشباع، انتقال حرارت افزایش، و در دماهای سطح جوشش بیشتر از دمای اشباع انتقال حرارت کاهش می‌یابد. نتیجه بدست آمده برای اثر سرعت در دماهای سطح جوشش بالا، تاکنون به صورت آزمایشگاهی ارایه نشده بود.




**شکل 11** نتایج تجربی جوشش جریانی مادون سرد آب خالص برای سه زبری 0/65، 2/5 و 4/4 میکرومتر در سرعت 0/7 متر بر ثانیه




**شکل 12** نتایج تجربی جوشش جریانی مادون سرد آب خالص برای سه زبری 0/65، 2/5 و 4/4 میکرومتر در سرعت 0/9 متر بر ثانیه

## 8- فهرست علایم

| | |
|---|---|
| $C_P$ | ظرفیت گرمایی ویژه فشارثابت ($Jkg^{-1}$) |
| $C_{sf}$ | ثابت معادله رزنو |
| $D_h$ | قطر هیدرولیک (m) |
| $f$ | ضریب اصطکاک |
| $g$ | شتاب گرانش ($ms^{-2}$) |
| $h$ | ضریب انتقال حرارت ($Wm^{-2}K^{-1}$) |
| $k$ | رسانندگی گرمایی ($Wm^{-1}K^{-1}$) |
| $p$ | فشار (bar) |
| Pr | عدد پرانتل |

| | |
|---|---|
| $q''$ | شار حرارتی ($Wm^{-2}$) |
| Re | عدد رینولدز |
| $R_a$ | زبری میانگین حسابی (µm) |
| $R_P$ | پارامتر زبری معادله گرنفلو (µm) |
| $S$ | ضریب سرکوب |
| T | دما (K) |
| $u$ | سرعت سیال ($ms^{-1}$) |

**علایم یونانی**

| | |
|---|---|
| $\varepsilon$ | زبری سطح (m) |
| $\mu$ | ویسکوزیته سیال ($kgm^{-1}s^{-1}$) |
| $\rho$ | چگالی ($kgm^{-3}$) |
| $\sigma$ | کشش سطحی ($Nm^{-1}$) |

**زیرنویس‌ها**

| | |
|---|---|
| S | سطح |
| ∞ | بالک |
| Fb | جوشش جریانی |
| Nb | جوشش هسته‌ای |
| Fc | جابجایی اجباری |
| Sat | اشباع |

## 9- مراجع

[1] H. C. Harrison, *Evaporative Cooling,* SAE Technical Paper, 1926.
[2] M. Jakob, and W. Fritz, Versuche über den Verdampfungsvorgang, *Forschung im Ingenieurwesen,* Vol. 2, No. 12, pp. 435-447, 1931.
[3] P. Berenson, Experiments on pool-boiling heat transfer, *International Journal of Heat and Mass Transfer,* Vol. 5, No. 10, pp. 985-999, 1962.
[4] S. G. Kandlikar, and P. H. Spiesman, Effect of surface finish on flow boiling heat transfer, *ASME Heat Transfer Div Publ HTD,* Vol. 361, pp. 157-163, 1998.
[5] N. Campbell, J. Hawley, M. Leathard, R. Horrocks, and L. Wong, Nucleate boiling investigations and the effects of surface roughness, *SAE Technical Paper,* 1999.
[6] M.-G. Kang, Effect of surface roughness on pool boiling heat transfer, *International journal of heat and mass transfer,* Vol. 43, No. 22, pp. 4073-4085, 2000.
[7] H. Yu, R. Sheikholeslami, and W. O. Doherty, Flow boiling heat transfer of water and sugar solutions in an annulus, *AIChE journal,* Vol. 50, No. 6, pp. 1119-1128, 2004.
[8] S. S. Bertsch, E. A. Groll, and S. V. Garimella, Effects of heat flux, mass flux, vapor quality, and saturation temperature on flow boiling heat transfer in microchannels, *International Journal of Multiphase Flow,* Vol. 35, No. 2, pp. 142-154, 2009.
[9] J. M. S. Jabardo, G. Ribatski, and E. Stelute, Roughness and surface material effects on nucleate boiling heat transfer from cylindrical surfaces to refrigerants R-134a and R-123, *Experimental Thermal and Fluid Science,* Vol. 33, No. 4, pp. 579-590, 2009.
[10] B. J. Jones, and S. V. Garimella, Surface roughness effects on flow boiling in microchannels, *Journal of Thermal Science and Engineering Applications,* Vol. 1, No. 4, pp. 041007, 2009.
[11] R. Hosseini, A. Gholaminejad, and H. Jahandar, Roughness Effects on Nucleate Pool Boiling of R-113 on Horizontal Circular Copper Surfaces, *World Academy of Science, Engineering and Technology,* Vol. 55, pp. 679-684, 2011.
[12] M. Sarafraz, and S. Peyghambarzadeh, Experimental study on subcooled flow boiling heat transfer to water–diethylene glycol mixtures as a coolant inside a vertical annulus, *Experimental Thermal and Fluid Science,* Vol. 50, pp. 154-162, 2013.
[13] T. Alam, P. S. Lee, and L.-W. Jin, Surface Roughness Effect on Microgap Channel, *Flow Boiling in Microgap Channels,* pp. 41-49: Springer, 2014.
[14] D. Deng, R. Chen, H. He, J. Feng, Y. Tang, and W. Zhou, Effects of heat flux, mass flux and channel size on flow boiling performance of reentrant porous microchannels, *Experimental Thermal and Fluid Science,* Vol. 64, pp. 13-22, 2015.
[15] M. Paz, M. Conde, E. Suárez, and M. Concheiro, On the effect of surface roughness and material on the subcooled flow boiling of water: Experimental study and global correlation, *Experimental Thermal and Fluid Science,* Vol. 64, pp. 114-124, 2015.
[16] M. S. Mojarrad, A. Keshavarz, M. Ziabasharhagh, and M. M. Raznahan, Experimental investigation on heat transfer enhancement of alumina/water and alumina/water–ethylene glycol nanofluids in thermally developing laminar flow, *Experimental Thermal and Fluid Science,* Vol. 53, pp. 111-118, 2014.
[17] K. Robinson, IC engine coolant heat transfer studies, University of Bath, 2001.
[18] H. W. Coleman, and W. G. Steele, Experimentation, validation, and uncertainty analysis for engineers: *John Wiley & Sons,* 2009.
[19] J. C. Chen, Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow, *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development,* Vol. 5, No. 3, pp. 322-329, 1966.
[20] J. G. Collier, and J. R. Thome, *Convective boiling and condensation: Oxford university press,* 1994.
[21] T. Bergman, A. Lavine, F. Incropera, and D. DeWitt, Fundamentals of heat and mass transfer, *USA: John Wiley & Sons. ISBN,* Vol. 13, pp. 978-0470,2011.
[22] R. W. Fox, A. T. McDonald, and P. J. Pritchard, *Introduction to fluid mechanics*: John Wiley & Sons New York, 1985.
[23] W. M. Rohsenow, *A method of correlating heat transfer data for surface boiling of liquids,* Cambridge, Mass.: MIT Division of Industrial Cooporation, 1951.
[24] S. M. Ghiaasiaan, *Two-phase flow, boiling, and condensation: in conventional and miniature systems*: Cambridge University Press, 2007.
[25] M. Cooper, Saturation nucleate pool boiling—a simple correlation. pp. 785-793,1984.