



بررسی آزمایشگاهی اثر الکترونشست ذرات مس بر سطح آلومینیوم در دبی های مختلف بر ضریب انتقال حرارت جوششی آب مقطر

پویا آزادی میلانی¹، میراعلم مهدی^{2*}

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

* تهران، صندوق پستی 1678815811، M.mahdi@sru.ac.ir

چکیده

در این پژوهش تاثیر ویژگی های سطح بر انتقال حرارت جوششی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور دستگاهی با توانایی ثبت خودکار دماهای ورودی و خروجی به منطقه تست، محاسبه ضریب انتقال حرارت جوششی و شار حرارتی ساخته شده است. از ویژگی های مهم این دستگاه پایداری دمایی خودکار سیال کاری و بررسی تاثیر سطوح با ویژگی های متفاوت (از لحاظ جنس و ساختار سطح) بر پارامترهای موثر بر انتقال حرارت جوششی می باشد. محفظه تست دستگاه به صورت استوانه ای با قطر داخلی 26 میلی متر، قطر خارجی 85 میلی متر و طول 110 میلی متر ساخته شده و هیترها به صورت دوار در بدنه محفظه آزمایش قرار گرفته اند. آزمایشات در دبی های 0.4، 0.6، 0.8، 1 و 1.2 متر مکعب بر ساعت و برای آب مقطر صورت گرفته است. صحت عملکرد دستگاه با رابطه چن اصلاح شده مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج مناسبی را ارائه داده است. پوشش دهی ذرات مس بر سطح محفظه تست علاوه بر بهبود اندک ضریب انتقال حرارت در ناحیه قبل جوشش باعث افزایش حدود 80 درصدی ضریب انتقال حرارت جوششی در دماهای یکسان در مقایسه با سطح بدون پوشش گردیده است.

کلیدواژگان

جوشش، انتقال حرارت، کیفیت سطح، پوشش دهی

Experimental investigation of the effect of copper electrodeposition on the aluminum surface in variable flow-rate on boiling heat transfer coefficient of distilled water

Pouya Azadi Milani¹, Miralam Mahdi^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

* P.O.B. 1678815811 Tehran, Iran, M.mahdi@sru.ac.ir

Abstract

In this research, the effect of surface characteristics on boiling heat transfer has been investigated experimentally. For this purpose, a device with the ability to automatically record the liquid temperature of the inlet and outlet of the test area, calculate the coefficient of boiling heat transfer, and heat flux has been developed. The automatic temperature stability of the working fluid and the ability to investigate the effect of surfaces with different characteristics (in terms of material and surface structure) on the boiling heat transfer parameters are the most important features of this device. Test section is designed in a form of cylinder with 26mm inner diameter, 85mm outer diameter, and 110mm length and the heaters are located in a circular pattern in the body of the test chamber. The experiments were performed at flow rates of 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.2 m^3/h for distilled water. The performance of the experimental setup was evaluated by the modified "Chen" equation and the device was able to provide acceptable results. Coating of the test chamber surface with copper particles causes an 80% increase in the boiling heat transfer coefficient, in addition to a slight improvement in the pre-boiling HTC compared to the uncoated surface at the same temperatures.

Keywords

boiling, heat transfer, surface characteristics, coating

1- مقدمه

پدیده انتقال حرارت دوفاز در انتقال انرژی، ذخیره، افزایش بازدهی و مدیریت حرارتی به طور گسترده ای استفاده می گردد. انتقال حرارت با تغییر فاز، مکانیزم مهمی در انتقال گرما می باشد به طوری که تغییرات زیاد آنتالپی، آنترپوی و حجم حین تغییر فاز و قابلیت انتقال مقدار زیادی انرژی در اختلاف دمای کم، مکانیزم موثری در انتقال انرژی را فراهم می آورد. فرایند تغییر فاز از مایع به بخار می تواند در غالب جوشش و تبخیر رخ دهد. در فرایند جوششی، تغییر فاز موضعی مایع به بخار در داخل سیال یا بر روی سطح مشترک دیواره و سیال به دلیل گرمایش رخ می دهد. در صورت تماس مایع با سطحی که دمای آن بالاتر از دمای اشباع مایع باشد، پدیده جوشش اتفاق می افتد. فرایند جوشش به عنوان روشی موثر در انتقال گرما از یک سطح با دمای زیاد به

سیالی با دمای کمتر در تماس با سطح به کار می رود. این دیواره گرم می تواند یک چپ الکترونیکی، بویلر، فلز گداخته، سوخت هسته ای و غیره باشد.

خصوصیات سطح جامد تاثیر مهمی روی انتقال حرارت جوشش جریان دارد. بلیس و همکارانش [1] الکترونشست لایه های نازک از عناصر مس، نیکل، قلع، کادمیوم و کروم روی لوله به قطر 1 اینچ را برای بهبود جوشش هسته ای آب آزمایش کردند. نشست لایه 127 میکرومتری از مس، کروم و کادمیوم تا سه برابر انتقال حرارت جوشش هسته ای آب را بالا برد. چون و کانگ [2] با بررسی بر روی صفحه های مختلف در مدت جوشش هسته ای لوله های افقی دریافتند که جنس صفحات تاثیر بسزایی بر روی ضریب انتقال حرارت در جوشش هسته ای آب در لوله ها می گذارد. این تاثیر می تواند هم به صورت کاهش و هم به صورت افزایش



وسيله نانو ذرات اکسید سیلیکون توانستند ضریب انتقال حرارت جوششی را 56 درصد ارتقا دهند. سوئی و همکاران [12] با استفاده از روش الکترونشست دو مرحله‌ای اقدام به ایجاد ساختار متخلخل بر سطح مس نمودند این ساختار متخلخل گل کلم نشان داد که می‌تواند در جوشش جریان بهتری عمل کند و باعث افزایش انتقال حرارت شود. هاس و همکاران [13] با استفاده از میکرو ساختار زیرکونیوم روی سطح لوله افزایش شار حرارتی بحرانی بیشتری نسبت به سایر سطوح متخلخل را مشاهده نمودند. ماو و همکاران [14] با استفاده از نانو پوشش گرافن روی سطح مس توانستند باعث افزایش 78 درصدی در شار حرارتی بحرانی و افزایش 41 درصدی ضریب انتقال حرارت جوشش استخري در مقایسه با سطح بدون بدون پوشش شده‌اند.

بررسی های مختلف نشان دهنده تاثیرات متفاوت کیفیت سطح بر شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت جوششی است. کیفیت سطح می‌تواند حتی تحت تاثیر نوع سیال استفاده شده قرار گیرد به نحوی که به مرور زمان باعث از بین رفتن پوشش یا پر شدن سایت‌های هسته زایی شود (یا بالعکس). در بررسی پیش رو تاثیر کیفیت سطح بر ضریب انتقال حرارت جوشش مورد ارزیابی قرار گرفته و ذرات پوشش از جنسی هستند که به بهبود پارامترهای موثر در جوشش کمک کنند. در این پژوهش تاثیر الکترونشست ذرات مس به آب مقطر بررسی شده‌است.

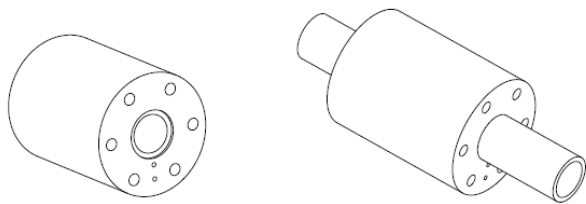
2- دستگاه آزمایش

برای بررسی تاثیر کیفیت سطح بر ضریب انتقال حرارت جوششی از الکترونشست ذرات مس بر سطح آلومینیوم در شرایط آزمایشگاهی استفاده شده‌است (که در این مقاله با عنوان محفظه دوم از آن نام برده خواهد شد). آب مقطر در این بررسی به عنوان سیال کاری در نظر گرفته شده‌است. در این دستگاه سیال توسط یک پمپ به گردش درآمده و بعد از عبور از فلومتر به منطقه تست می‌رسد. در ادامه با عبور از مجموعه تعدیل کننده دما، دمای سیال کاری متعادل شده و مجدد وارد پمپ می‌شود. یک مسیر برای خروج سیال و دو راهگاه برای ورود سیال در نظر گرفته شده است. در شکل 1 اجزا و نمای دستگاه مشخص شده است.

محفظه آزمایش به صورت استوانه‌ای با قطر داخلی 26 میلی‌متر، قطر خارجی 85 میلی‌متر و طول 110 میلی‌متر طراحی شده‌است. جنس محفظه آلومینیوم بوده و فرایند پرداخت داخلی به روش داخل تراش انجام شده‌است. درون بلوک استوانه شش سوراخ به صورت دوار و منتظم با طول 100 میلی‌متر و قطر 8 میلی‌متر به منظور قرارگیری هیترها و دو سوراخ به طول 60 میلی‌متر و قطر 3 میلی‌متر برای قرارگیری سنسورهای دما در امتداد هم مطابق شکل 2 تعبیه شده‌است. برای به حداقل رساندن اتلاف حرارتی محفظه توسط ورق نسوز و نوار چسب آلومینیومی از خارج عایق شده است. از طرفی به منظور وجود حداقلی هوا درون حفره‌های هیتر و سنسور آنها را با خمیر سیلیکونی با ضریب انتقال حرارت هدایتی 5/5 وات بر متر بر کلوین پرکرده و سپس نسبت به جایگذاری آنها اقدام شده‌است. توان هیترهای محفظه تست 400 وات بوده و توسط یک دیمر قابل کنترل است. دمای سطح با فرض

باشد. وموري و همکاران [3] نیز از پوشش نانو ساختار آلومینیومی و سیال FC-72 در آزمایش خود استفاده نمودند. نتایج آنها نشان دهنده افزایش انتقال حرارت در شار پایین و بی تاثیر شدن پوشش، در تغییر ضریب انتقال حرارت در شارهای بالا بود. جعفرآبادی و همکاران [4] برای اصلاح راهگاه آب اطراف افشانه و راهگاه دود و هوا در موتور دیزل از 12 استوانه با توان 1000 کیلو وات از چهار هندسه متفاوت با فرض جوشش استفاده کردند. آنها از شبیه سازی BDL برای شبیه سازی جوشش استفاده کردند که نتایج توزیع دما نشان داد در طرح چهارم، ضریب انتقال حرارت جوششی در سمت راهگاه آب محفظه احتراق نسبت به سایر طرح‌ها بزرگتر است. همچنین دمای دیوار سمت محفظه احتراق نسبت به سایر طرح‌ها خنکتر خواهد بود. لی و همکاران [5] با استفاده از اندایز سطح آلومینیوم به پوشش‌های با ساختار نانو دست پیدا کردند و انتقال حرارت را روی سطح ایجاد شده مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان دهنده افزایش انتقال حرارت نسبت به سطح بدون پوشش در شارهای پایین بود. به طوری که برای شار بیشتر از 60 کیلووات بر مترمربع افزایشی در میزان انتقال حرارت مشاهده نمی‌شد. فارست و همکاران [6] با استفاده از یک پوشش لایه به لایه، سطح فولاد زنگ نزن را اصلاح کردند و روند افزایشی در شار حرارتی بحرانی را گزارش نمودند. وایت [7] به بررسی آزمایشگاهی اثر نشت ذرات نانو اکسید روی بر روی سطح جوشش و تاثیرات آن بر روی ضریب انتقال حرارت در جوشش استخري پرداخت. در این تحقیق به بررسی نقش اضافه شدن نانوذرات در زاویه تماس سطح و متعاقباً چگالی مکان‌های هسته‌های تولید بخار پرداخته شده است. لازم به ذکر است که بدون شکل‌گیری لایه ذرات نانو بر روی سطح، ضریب انتقال حرارت میدان جریان حدود 25 درصد نسبت به سیال پایه افزایش نشان داده است. کروسه و همکاران [8] با استفاده از FLSP طی سلسله مراتبی سطح یک نمونه فولاد ضد زنگ را دارای حفره‌هایی به ابعاد میکرو- نانو نمود. این ساختار شامل ساختار تپه مانندیست که با لایه‌های متراکم نانویی پوشیده شده‌اند در نتیجه مساحت کلی سطح و مراکز هسته‌زایی افزوده شدند. این کار ضریب انتقال حرارت را نزدیک به 5/7 مرتبه افزایش داد. یو و همکاران [9] انتقال حرارت جوششی آب بر روی سطح میله‌ای از جنس مس را تحت شرایط کاری (3/3-8/1 کیلو پاسکال و 4000-10000 وات بر مترمربع) به صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند و دریافتند که در فشار زیر اتمسفر و در شار حرارتی ثابت ضریب انتقال حرارت جوششی آب با افزایش فشار افزایش می‌یابد. (این آزمایش در فشار اتمسفر و بالاتر از آن صادق است). وقتی فشار پایین است افزایش ضریب انتقال حرارت جوششی با افزایش فشار نسبت به حالتی که فشار بالاتر است کم‌تر می‌باشد. جون و همکاران [10] نشان دادند که در انتقال حرارت جوشش استخري وقتی ضخامت پوشش روی سطح مس از نقطه خاصی بیشتر می‌شود ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای به شدت کاهش می‌یابد در حالی که شار حرارتی بحرانی با افزایش نسبی در محدوده تست مواجه می‌شود. و وقتی قطر ذرات پوشش دهنده زیاد می‌شود ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای و شار حرارتی بحرانی هردو در تست زیاد می‌شوند. داس و همکاران [11] با پوشش سطح به

در رابطه r_{T3} و r_{T4} شعاع محل قرارگیری
سنسورهای بدنه محفظه تست می‌باشند.



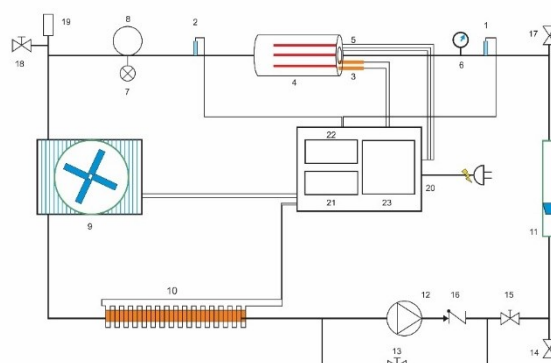
شکل 2- نمای محفظه و حفره‌های مربوط

دمای سیال کاری توسط دو سنسور، قبل و بعد محفظه
تست پایش شده و اطلاعات آن توسط واحد پردازش
ثبت و توسط صفحه نمایش لمسی (شکل 3) نشان داده
می‌شود. همچنین یک دماسنج عقربه‌ای قبل از ورود سیال
به محفظه تست وظیفه نمایش دما را بر عهده دارد. یک
فشارسنج عقربه‌ای کنار محفظه تست فشار چرخه را
نشان می‌دهد و یک منبع انبساط به پایداری فشار کمک
خواهد کرد. از طرفی یک ایرونت در بالاترین نقطه
دستگاه جهت خروج هوا از چرخه تعبیه شده‌است.
افزایش دمای سیال تا نقطه مورد نظر توسط یک هیتر
تاییده شده دور لوله با توان 1 کیلووات صورت می‌گیرد.
یک مبدل گرمایی همراه با فن وظیفه کاهش دمای سیال
را بر عهده دارد. کنترل دمای سیال و ثابت نگه داشتن آن
در طول آزمایش بوسیله واحد پردازش انحصاری که
برای دستگاه طراحی و ساخته شده به صورت خودکار
در دمای کاری صورت می‌گیرد. در مواقع اضطراری فن
مبدل (در 2 سرعت) و هیتر می‌توانند به صورت دستی
توسط کاربر کنترل شوند (شکل 3). گنجایش سیال
در حال گردش برای دستگاه به 5/5 لیتر می‌رسد. سیال
توسط یک پمپ سیرکولاتور سه سرعت به گردش در
آمده و دبی‌های مختلف در حالت‌های متفاوت پمپ
توسط یک فلومتر شیشه‌ای (با دقت 2/0 متر مکعب بر
ساعت) که توانایی کار تا دمای 60 درجه سانتیگراد را
دارد اندازه گرفته می‌شود. از طرفی یک شیر فلکه‌ای
به منظور اعمال تغییرات کوچک دبی قبل از پمپ در
نظر گرفته شده‌است. برای بررسی تاثیر کیفیت سطح
بر روی ضریب انتقال حرارت جوششی از
الکترونشست ذرات مس روی آلومینیوم در شرایط
آزمایشگاهی استفاده شده‌است. دبی‌های مورد
آزمایش به ترتیب 4/0، 6/0، 8/0 و 1 و 2/1 متر مکعب
بر ساعت، دمای سیال کاری 56 درجه سانتیگراد و
فشار سیستم 2/1 بار در نظر گرفته شده‌است.

یک بعدی بودن انتقال حرارت از طریق رابطه 1 قابل
برونپایی خواهد بود.



الف



ب

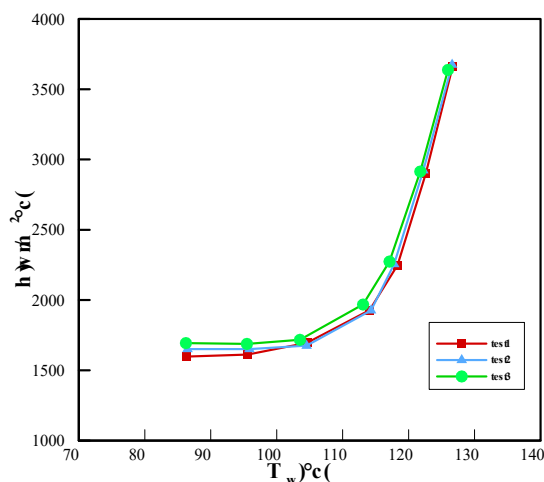
شکل 1-الف نمای دستگاه

شکل 1-ب شماتیک دستگاه: 1. سنسور دمای ورودی 2.
سنسور دمای خروجی 3. سنسورهای سنجش دمای محفظه
آزمایش 4. محفظه آزمایش 5. گرمکن‌های محفظه آزمایش 6.
دماسنج عقربه‌ای 7. فشارسنج عقربه‌ای 8. منبع انبساط 9.
مجموع خنک کننده (شامل مبدل حرارتی و فن) 10. گرمکن‌های
میله‌ای سیال 11. فلومتر شیشه‌ای 12. پمپ سیرکولاتور 13.
شیر مسیر بای‌پس 14. شیر خروجی سیال دستگاه 15. شیر
تنظیم دبی 16. شیر یک‌طرفه 17. شیر ورودی سمت راست
18. شیر ورودی سمت چپ 19. ایرونت 20. جعبه برق 21.
دستگاه کنترل ولتاژ گرمکن 22. منبع تغذیه 23. واحد پردازش
به همراه نمایشگر

$$\begin{cases} r_{T3}=31.3\text{ mm} \\ r_{T4}=21.3\text{ mm} \end{cases} \rightarrow T_{ex}=1.8T_4-0.8T \quad (1)$$

در این روابط k ضریب انتقال حرارت هدایت محفظه آزمایش بوده و مقدار آن $220 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ می باشد. T_{ex} دمای سطح محفظه است و از رابطه 1 به دست می آید. T_1 دمای سیال ورودی به محفظه، ΔT_{3-4} اختلاف دمای دو نقطه هم راستا در بدنه محفظه آزمایش و r_1 و r_2 محل قرار گیری سنسورهای مربوط به این نقاط می باشد.

برای اطمینان از صحت عملکرد دستگاه و عدم تاثیر شرایط محیطی بر روند نتایج، آزمایش ها در سه بازه زمانی متفاوت انجام شده اند. در شکل 4 نتایج سه آزمایش در بازه زمانی متفاوت برای دبی $6/0 \text{ m}^3/\text{h}$ ، دمای ورودی 56 درجه سانتیگراد و برای محفظه اول انجام شده است. همانطور از نمودار مشخص است نتایج تفاوت زیادی با هم نداشته و می توان از تاثیرات محیطی بر آزمایش چشم پوشی نمود.



شکل 4- اثر تکرار پذیری آزمایش برای دبی $6/0 \text{ m}^3/\text{h}$ ، دمای ورودی 56 درجه سانتیگراد و فشار $2/1$ بار در محفظه اول

4- تحلیل خطا

خطا در این پژوهش شامل خطا در اعلام دماها، فشار، دبی، اعلام ضریب انتقال حرارت هدایت جسم جامد و خطا در ثبت برخی داده ها توسط کاربر دستگاه می باشد. خطای عدم قطعیت سنسورهای دما در سیال $\pm 1^\circ\text{C}$ و خطای عدم قطعیت سنسورهای دما در جسم جامد $\pm 5^\circ\text{C}/1$ می باشد. خطای عدم قطعیت نمایشگر فشار $\pm 5/0 \text{ bar}$ ، خطای عدم قطعیت دبی سنج و ثبت توسط کاربر در مجموع $\pm 05/0 \text{ m}^3/\text{h}$ و خطای عدم قطعیت در اعلام ضریب انتقال حرارت هدایت محفظه آزمایش $\pm 5 \text{ W/mk}$ می باشد.

5- مقایسه نتیجه آزمایش با روابط پیشنهادی

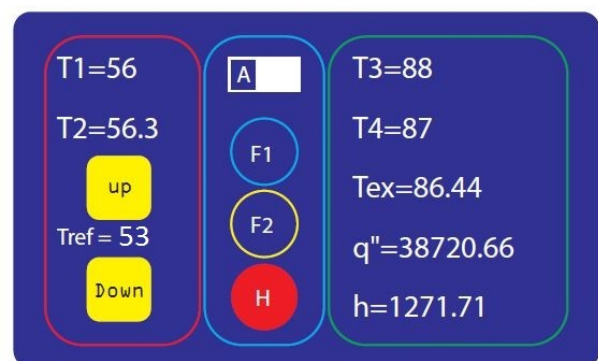
$$h = \frac{2\pi kl \Delta T_{3-4}}{\pi D l (T_{ex} - T_1) \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2)$$

$$q = h (T_{ex} - T_{fb}) \quad (3)$$

$$q_{fb} = h_{fc} (T_{fb} - T_{ex}) \quad (4)$$

$$q_{fb} = h_{fc} (T_{fb} - T_{ex}) \quad (5)$$

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



شکل 3- صفحه نمایش لمسی انحصاری دستگاه

3- محاسبات

پس از خوانش دمای سطح محفظه تست توسط دستگاه با داشتن دمای سطح محفظه و دمای ورودی با فرض انتقال حرارت یک بعدی و پایا در محفظه آزمایش، ضریب انتقال حرارت جابجایی و شار حرارتی با استفاده از رابطه 2 و 3 توسط واحد پردازش به صورت خودکار محاسبه شده و به دست می آید.

ساعت و سیال کاری آب مقطر می‌باشد. در این تست دمای ورودی ثابت نگه داشته شده و با افزایش دمای سطح مورد آزمایش ضرایب انتقال حرارت ثبت شده‌اند. همانطور که در تصویر مشهود است نتایج دستگاه در مقایسه با نتیجه رابطه کلیز از انطباق خوبی برخوردار می‌باشد. مقایسه مدل گرنفلو با نتایج دستگاه به منظور اطمینان از صحت عملکرد دستگاه ساخته شده است که این مورد در شکل 5 نشان داده شده است.

6- آزمایش تجربی

6-1- آزمایش تجربی برای محفظه اول

شکل 6 نمایش دهنده تاثیر تغییرات دبی در دماهای یکسان محفظه آزمایش بر ضریب انتقال حرارت می‌باشد. محور افقی، دمای سطح محفظه آزمایش بر حسب درجه سانتیگراد و محور عمودی، ضریب انتقال حرارت را بر حسب وات بر متر مربع درجه سانتیگراد نشان می‌دهد. دبی از 4/0 تا 2/1 متر مکعب بر ساعت تغییر می‌کند. با تغییرات دبی قبل از جوشش ضریب انتقال حرارت برای هر دبی تغییر زیادی نمی‌کند و مستقل از دمای سطح است. اما پس از شروع جوشش این ضریب به صورت ناگهانی شروع به افزایش می‌کند. با افزایش دبی ضریب انتقال حرارت زیاد می‌شود. برای آب مقطر در دبی $6/0 \text{ m}^3/\text{h}$ ضریب انتقال حرارت $1651 \text{ w/m}^2\text{C}$ و در دبی $1 \text{ m}^3/\text{h}$ ضریب انتقال حرارت $2654 \text{ w/m}^2\text{C}$ است. با توجه به نتایج افزایش دبی در سیال باعث می‌شود که شروع پدیده جوشش دیرتر اتفاق بیفتد زیرا حباب‌های بخار که در نزدیکی سطح به وجود آمده‌اند از سطح جدا شده و به ناحیه توده جریان وارد شده و در آن چگالیده خواهند شد. پس از شروع جوشش جریان ضریب انتقال حرارت مستقل از دبی شده و با توجه به دمای سطح تغییر می‌کند به گونه‌ای که تغییر اندک دمای سطح منجر به تغییراتی بزرگ در ضریب انتقال حرارت می‌شود. برای مثال تغییر دما از 105 به 120 درجه سانتیگراد در دبی $6/0 \text{ m}^3/\text{h}$ باعث افزایش ضریب انتقال حرارت از $1690 \text{ w/m}^2\text{C}$ به $2576 \text{ w/m}^2\text{C}$ و در دبی $1 \text{ m}^3/\text{h}$ باعث افزایش ضریب انتقال حرارت از $2640 \text{ w/m}^2\text{C}$ به $3083 \text{ w/m}^2\text{C}$ شده است.

چن [15] با ارایه رابطه‌ای پیشنهاد نمود که جوشش جریان به صورت مجموع جوشش استخری و جابجایی

$$h_{nb, Gorenflo} = \dot{q}$$

(9)

اجباری مطابق رابطه (4) در نظر گرفته شود. پس از چن، کلیز [16] پیشنهاد داد که رابطه فوق با در نظر گرفتن ضریبی به نام ضریب سرکوب (s) برای جوشش جریان مادون سرد به صورت زیر بکار گرفته شود:

برای جریان توسعه یافته آشفته داخلی، h_{fc} از رابطه گنیلینسکی [17] با در نظر گرفتن پارامتر ضریب اصطکاک به صورت زیر محاسبه می‌شود:

جوشش به دلیل پیچیدگی‌های مدل‌سازی ریاضی تا کنون

$$F_{RP} = 1.733 \left(\frac{p}{p_{cr}} \right)^{0.27} \quad (10)$$

$$+ \left(6.1 + \frac{0.68}{1 - \left(\frac{p}{p_{cr}} \right)} \right) \left(\frac{p}{p_{cr}} \right)^2$$

$$n = 0.9 - 0.3 \left(\frac{p}{p_{cr}} \right)^{0.15} \quad (11)$$

به صورت تحلیلی بررسی نشده است. این پیچیدگی‌ها شامل ناهمگنی محیط انتقال حرارت و رخ دادن همزمان انتقال جرم و حرارت بین دو فاز در میکروساختارهای سطح داغ شونده می‌باشد. بنابراین برای اطمینان از

$$Nu_{Gnielinski} = \frac{h_{fc} D_h}{k} = \frac{Pr (Re_D - 1)}{1.07 + 12.7 \left(\frac{f}{8} \right)} \quad (7)$$

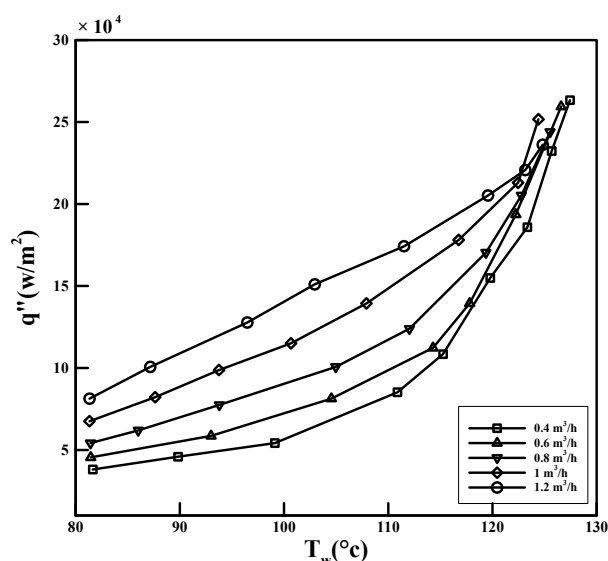
$$f = [0.79 \ln Re_D - 1.64]^{-2}; Re_D \geq 3000 \quad (8)$$

صحت کارکرد دستگاه از مدل گرنفلو [18] که وی نیز این پدیده را به صورت آزمایشگاهی مدل کرده استفاده می‌کنیم.

پارامتر h_0 برای آب 5600 می‌باشد. $\dot{q}_{sub} \{0\} = 2000 \text{ w/m}^2$ وات بر مترمربع، R_{p0} زبری مینا برابر 4/0 میکرومتر و R_p برای این سطح برابر 29/0 میکرومتر می‌باشد. ضریب تصحیح فشار (F_{RP}) و پارامتر n از معادلات 10 و 11 به دست می‌آید

در شکل 5 نتایج حاصل از دستگاه در مقایسه با رابطه کلیز آورده شده است این نتایج برای دمای ورودی 56 درجه سانتیگراد، فشار 2/1 بار، دبی 4/0 مترمکعب بر

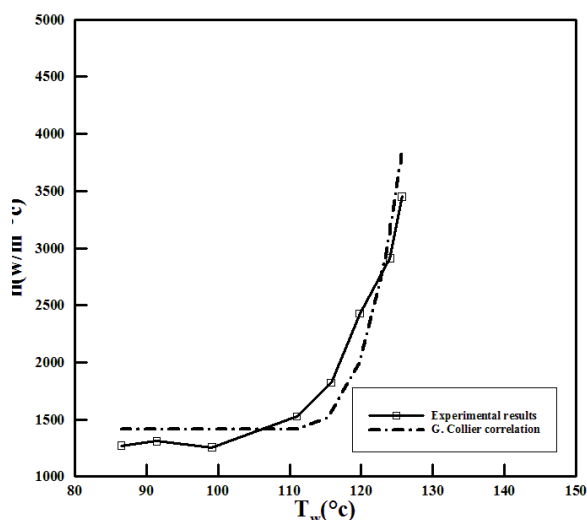
مثال تغییر شار حرارتی از w/m^2 به $57150 w/m^2$ به $75456 w/m^2$ دمای سطح را از 91 به 101 درجه سانتیگراد می‌رساند یعنی افزایش شار حرارتی به میزان w/m^2 18306 موجب افزایش دمای 10 درجه ای شده‌است در حالی که برای همین دبی در ناحیه جوشش جریانی تغییر شار حرارتی از w/m^2 98501 به w/m^2 119205 دمای سطح را از 110 به 115 درجه سانتیگراد می‌رساند یعنی افزایش شار حرارتی به میزان w/m^2 20704 موجب افزایش دمای 5 درجه ای شده‌است. یعنی در ناحیه جوشش جریانی اعمال مقدار مشخص شار حرارتی منجر به افزایش حدود دو برابری دمای سطح شده‌است.



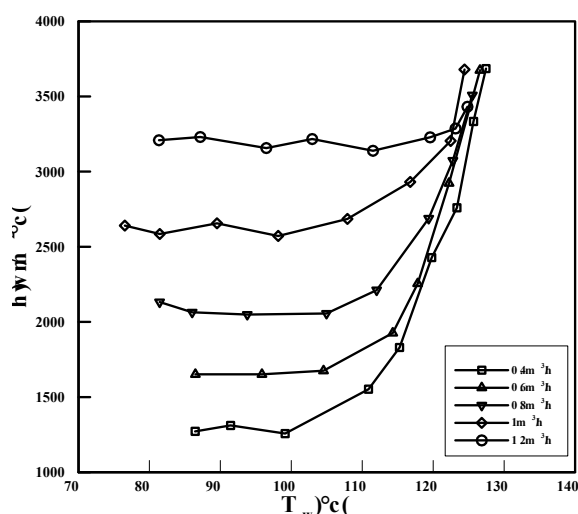
شکل 7- منحنی تغییرات شار حرارتی در دبی‌های مختلف آب مقطر بر حسب دمای سطح در دمای ورودی 56 درجه سانتیگراد و فشار 2/1 بار

6-1- آزمایش تجربی برای محفظه دوم
شکل 8 نمای تصویری برداری شده سطح داخلی محفظه دوم که با استفاده از الکترونشست ذرات مس پوشش داده شده‌است را نشان می‌دهد. ابعاد محفظه اول و دوم کاملاً با هم برابر می‌باشند. شرایط آزمایش برای این محفظه مانند دمای ورودی، فشار و سیال کاری کاملاً مانند شرایط اعمال شده برای محفظه اول می‌باشد.

شکل 9 نمایش‌دهنده تاثیر تغییرات دبی در دماهای یکسان محفظه آزمایش بر ضریب انتقال حرارت می‌باشد. محور افقی دمای سطح محفظه آزمایش بر حسب درجه سانتیگراد و محور عمودی ضریب انتقال حرارت را بر حسب وات بر متر مربع درجه سانتیگراد نشان می‌دهد و در آن دبی از 2/1 تا 4/0 متر مکعب بر ساعت تغییر می‌کند. رفتار سیال کاری در محفظه دوم مانند محفظه اول می‌باشد یعنی ضریب انتقال حرارت قبل از شروع جوشش در هر دبی تقریباً ثابت بوده و با افزایش دبی در دمای یکسان این ضریب افزایش می‌یابد از طرفی پس از شروع جوشش وابستگی ضریب انتقال حرارت به دبی کم شده و متغیری از دمای سطح می‌شود به گونه ای که با تغییرات اندک دمای سطح شاهد افزایشی زیاد در این

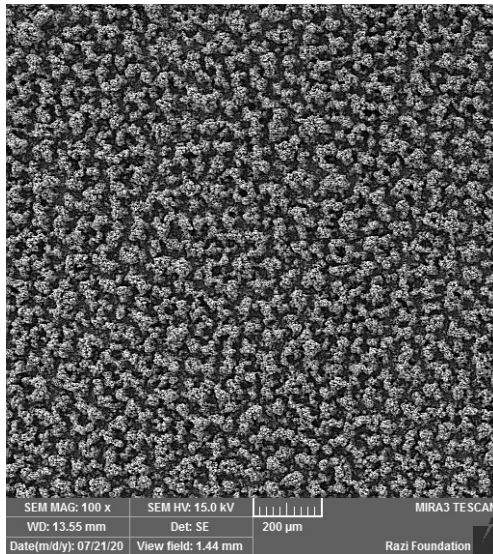


شکل 5- مقایسه نتایج دستگاه و رابطه کلیر برای سیال ورودی با دمای 56 درجه سانتیگراد، فشار 2/1 بار و دبی 4/0 مترمکعب بر ساعت

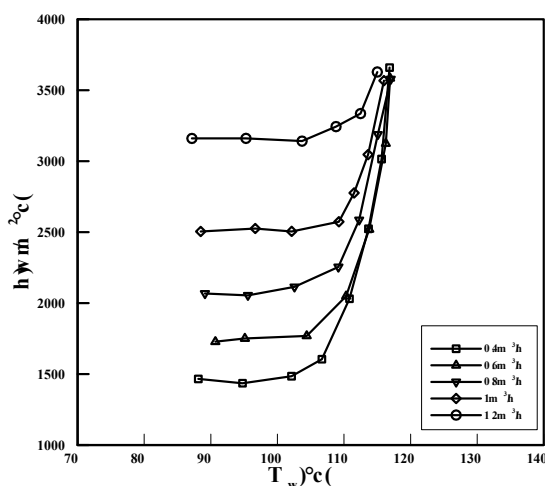


شکل 6- منحنی تاثیر تغییر دبی آب مقطر بر ضریب انتقال حرارت در دمای ورودی 56 درجه سانتیگراد و فشار 2/1 بار

نمودار شار حرارتی بر حسب دمای سطح جوشش محفظه آزمایش در دبی‌های مختلف در شکل 7 نشان داده شده‌است. همانطور که از شکل مشخص است قبل از شروع جوشش می‌توان یک معادله خطی برای نمودار در نظر گرفت که به محض شروع جوشش و با افزایش دمای سطح به صورت منحنی درمی‌آید. برای رسیدن به دمای سطح یکسان با افزایش دبی نیازمند اعمال شار حرارتی بیشتری هستیم. در آب مقطر در دبی m^3/h 6/0، برای رسیدن به دمای سطح 92 درجه سانتیگراد به اعمال شار حرارتی w/m^2 57150 و در دبی m^3/h 1، برای رسیدن به همین دما به اعمال شار حرارتی w/m^2 93328 نیاز است. در ناحیه جوشش اختلاف دمای اندک سطح منجر به افزایش شار حرارتی زیاد می‌شود. برای



شکل 8- تصویر سطح پوشش داده شده با استفاده از الکترونشست ذرات مس. الف. X100. ب. X500



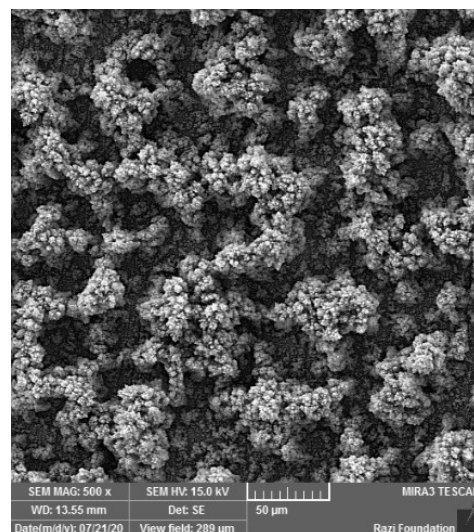
شکل 9- منحنی تاثیر تغییر دبی آب مقطر بر ضریب انتقال حرارت در دمای ورودی 56 درجه سانتیگراد و فشار 2/1 بار برای سطح پوشش داده شده با ذرات مس

7- نتیجه گیری

در این پژوهش با ساخت یک دستگاه آزمایشگاهی اقدام به بررسی تاثیر کیفیت سطح در جوشش جریان نمودیم. بدین منظور سیال آب مقطر را برای دو محفظه یکی بدون پوشش و دیگری با پوشش ذرات مس به وسیله الکترونشست را مورد بررسی قرار دادیم. با مشاهده و مقایسه نمودارها به این نتیجه می‌رسیم که با افزایش دبی در دمای ثابت ضریب انتقال حرارت و نیز شار حرارتی در دمای سطح یکسان افزایش پیدا می‌کند. ضریب انتقال حرارت در ناحیه قبل از شروع جوشش تابع دبی و بعد از آن تابعی از دمای سطح می‌شود. از طرفی الکترونشست ذرات مس باعث افزایش شیب در ناحیه جوشش شده و این امر بهبود ضریب انتقال حرارت جوشش را به دنبال داشته و علت آن افزایش حفره‌های فعال بوده که توانسته ضریب انتقال حرارت

ضریب هستیم. اما با مقایسه شکل 6 و 9 به مورد جالب توجهی می‌رسیم. شیب نمودار پس از جوشش در محفظه دوم نسبت به محفظه اول با سرعت بیشتری افزایش پیدا می‌کند و بدین معناست که در محفظه دوم در دبی ثابت ضریب انتقال حرارت جوششی نسبت به محفظه اول افزایش پیدا کرده است. در محفظه اول در دبی $6/0 \text{ m}^3/\text{h}$ و دمای سطح 116 درجه سانتیگراد ضریب انتقال حرارت $2117 \text{ W/m}^2\text{°C}$ اما در محفظه دوم برای همین دبی و همین دمای سطح ضریب انتقال حرارت $3453 \text{ W/m}^2\text{°C}$ می‌باشد و علت این امر افزایش مراکز هسته‌زایی به واسطه پوشش ذرات مس در محفظه دوم است.

با توجه به شکل‌های 7 و 10 در می‌یابیم که در محفظه دوم نمودار به سمت چپ منتقل شده یعنی در دمای سطح کمتر امکان انتقال شار حرارتی بیشتری به سیال فراهم شده است. در محفظه اول در دبی $6/0 \text{ m}^3/\text{h}$ دمای سطح 115 درجه سانتیگراد مقدار شار حرارتی منتقل شده به سیال 117735 W/m^2 ولی در محفظه دوم 168285 W/m^2 بوده است. پوشش دهی باعث افزایش حفره‌های فعال شده و هوای بیشتری در این حفره‌ها به دام می‌افتند با به هم خوردن توازن فشار این هوا و سیال مجاور حباب شکل می‌گیرد هرچه حبابها در این حفره‌ها بزرگ‌تر شوند، حرارت بیشتری از سطح می‌گیرند و به جریان سیال منتقل می‌کنند.



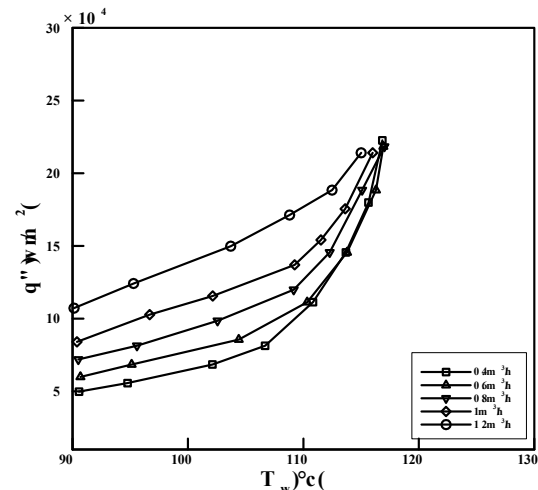
الف



9- مراجع

- [1] Bliss Jr, F., S. Hsu, and M. Crawford, *An investigation into the effects of various platings on the film coefficient during nucleate boiling from horizontal tubes*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1969. **12**(9): p. 1061-1072.
- [2] Chun, M.-H. and M.-G. Kang, *Effects of heat exchanger tube parameters on nucleate pool boiling heat transfer*. 1998.
- [3] Vemuri, S. and K.J. Kim, *Pool boiling of saturated FC-72 on nano-porous surface*. International communications in heat and mass transfer, 2005. **32**(1-2): p. 27-31.
- [4] Jafarabadi, M., H. Chamani, and S.A. Jazayeri. *Improvement of a diesel engine water cooling performance through implementation of different cooling designs*. in *Internal combustion engine division fall technical conference*. 2013. American Society of Mechanical Engineers.
- [5] Lee, C.Y., M.M.H. Bhuiya, and K.J. Kim, *Pool boiling heat transfer with nano-porous surface*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010. **53**(19-20): p. 4274-4279.
- [6] Forrest, E., et al., *Augmentation of nucleate boiling heat transfer and critical heat flux using nanoparticle thin-film coatings*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010. **53**(1-3): p. 58-67.
- [7] White, S.B., *Enhancement of Boiling Surfaces Using Nanofluid Particle Deposition*. 2010.
- [8] Kruse, C.M., et al. *Enhanced pool-boiling heat transfer and critical heat flux using femtosecond laser surface processing*. in *Fourteenth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*. 2014. IEEE.
- [9] Yu, L.-H., et al., *Experimental research on water boiling heat transfer on horizontal copper rod surface at sub-atmospheric pressure*. Energies, 2015. **8**(9): p. 10141-10152.
- [10] Jun, S., et al., *Enhancement of pool boiling heat transfer in water using sintered copper microporous coatings*. Nuclear Engineering and Technology, 2016. **48**(4): p. 932-940.
- [11] Das, S., D. Kumar, and S. Bhaumik, *Experimental study of nucleate pool boiling heat transfer of water on silicon oxide nanoparticle coated copper heating surface*. Applied Thermal Engineering, 2016. **96**: p. 555-567.
- [12] Cui, W., et al., *Subcooled flow boiling on a two-step electrodeposited copper porous surface*. Journal of Enhanced Heat Transfer, 2016. **23**(2).

جوششی را 50 تا 80 درصد ارتقا دهد. همینطور باعث شده تا در دماهای پایین تر سطح شاهد انتقال شار حرارت بیشتری از سطح باشیم که یکی از اهداف بهبود عملکرد انتقال حرارت جوششی می باشد.



شکل 10- منحنی تغییرات شار حرارتی در دبی های مختلف آب مقطر بر حسب دمای سطح در دمای ورودی 56 درجه سانتیگراد و فشار 2/1 بار برای سطح پوشش داده شده با ذرات مس

8- فهرست علائم

شیاع محل قرار گیری سنسورها از مبدا محور استوانه ای شکل محفظه (m)	r_{T3}
دمای سطح داخلی محفظه (°C)	T_{ex}
ضریب انتقال حرارت ($W/m^2°C$)	h
رسانندگی گرمای ($W/m°C$)	k
طول محفظه تست (m)	l
شار حرارتی (W/m^2)	q
ضریب سرکوب کلیر	S
عدد رینولدز	Re
عدد ناسلت	Nu
قطر هیدرولیک (m)	D_h
عدد پرانتل	Pr
ضریب اصطکاک	f
ضریب تصحیح فشار	F_{RP}
زبری میانگین حسابی (μm)	R_p
پارامتر زبری معادگه گرنفلو (μm)	R_{p0}
فشار (bar)	p
زیر نویسها	
سطح	s
بالک	∞
جوشش جریانی	fb
جایجایی اجباری	fc
جوشش هسته ای	nb
اشباع	sat



- [13] Haas, C., et al., *Critical heat flux for flow boiling of water on micro-structured Zircaloy tube surfaces*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018. **120**: p. 793-806.
- [14] Mao, L., et al., *Pool boiling performance and bubble dynamics on graphene oxide nanocoating surface*. International Journal of Thermal Sciences, 2020. **147**: p. 106154.
- [15] Chen, J.C., *Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow*. Industrial & engineering chemistry process design and development, 1966. **5**(3): p. 322-329.
- [16] Collier, J.G. and J.R. Thome, *Convective boiling and condensation*. 1994: Clarendon Press.
- [17] Bergman, T.L., et al., *Fundamentals of heat and mass transfer*. 2011: John Wiley & Sons.
- [18] Ghiaasiaan, S.M., *Two-phase flow, boiling, and condensation: in conventional and miniature systems*. 2007: Cambridge University Press.