



## Experimental Investigation of Metal Foam Effect on Subcooled Flow Boiling Heat Transfer between Two Vertical Annulus Tube

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Yarahmadi M.<sup>1</sup> *MSc*,  
Shahmardan M.M.\*<sup>1</sup> *PhD*,  
Nazari M.<sup>1</sup> *PhD*

#### How to cite this article

Yarahmadi M, Shahmardan M.M, Nazari M. Experimental Investigation of Metal Foam Effect on Subcooled Flow Boiling Heat Transfer between Two Vertical Annulus Tube. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(9):2245-2253.

### ABSTRACT

The subcooled flow boiling happens when the bulk flow temperature and the interface temperature are lower and higher, respectively than the saturated temperature corresponding to the flow pressure. One way to increase the heat transfer mechanism is to use high porosity metal foams in the ducts, which have a high surface area to volume ratio that increases the heat transfer surface area and the heat transfer coefficient of the duct. In the current study, an experimental apparatus was constructed, and subcooled flow boiling in an annulus tube was investigated. The annulus tube is in the vertical direction, and the internal and external diameters are 50.7 and 70.6mm, respectively. The operating pressure was 1atm, and the working fluid was water. The metal foam used is nickel with 10ppi and a porosity of 95%. In this investigation, heat flux and mass flow rate effectiveness on the heat transfer coefficient are considered. The experiments were performed in the mass flow rate range of 0.012kg/s to 0.0286kg/s in which the flow consists of both forced convection and flow boiling. The mass flow reduction causes the heat transfer coefficient increment to 30% in subcooled boiling regions. The use of porous media also increases the subcooled flow boiling heat transfer coefficient up to 30%.

**Keywords** Heat Transfer; Subcooled Flow Boiling; Annulus Tube; Metal Foam

<sup>1</sup>Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

#### \*Correspondence

Address: Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.  
Phone: +98 (23) 3230025  
Fax: +98 (23) 3230025  
mmshahmardan@shahroodut.ac.ir

#### Article History

Received: February 05, 2020  
Accepted: June 27, 2020  
ePublished: September 20, 2020

### CITATION LINKS

[1] Convective boiling and condensation [2] Subcooled flow boiling and microbubble emission boiling phenomena in a partially heated microchannel [3] Critical heat flux for subcooled flow boiling in micro-channel heat sinks [4] A general correlation for flow boiling in tubes and annuli [5] Simplified general correlation for saturated flow boiling and comparison of correlation with data [6] A general correlation for heat transfer during saturated boiling with flow across tube bundles [7] Improved general correlation for subcooled boiling heat transfer during flow across tubes and tube bundles [8] A general correlation for saturated two-phase flow boiling heat transfer inside horizontal and vertical tubes [9] An extension of the flow boiling correlation to transition, laminar, and deep laminar flows in minichannels and microchannels [10] An investigation on heat transfer characteristics of different pressure steam-water in vertical upward tube [11] Flow boiling of refrigerant in horizontal metal-foam filled tubes: Part 1-Two-phase flow pattern visualization [12] Flow boiling heat transfer in horizontal metalfoam tubes [13] Experimental study on the two-phase pressure drop in copper foams [14] Experimental and numerical study of single and two-phase flow and heat transfer in aluminum foams [15] Experimental analysis of upward flow boiling heat transfer in a channel provided with copper metallic foam [16] Influence of oil on nucleate pool boiling heat transfer of refrigerant on metal foam covers [17] Influence of metal foam on heat transfer characteristics of refrigerant-oil mixture flow boiling inside circular tubes [18] Flow boiling visualization and heat transfer in metal-foam-filled mini tubes-Part I: Flow pattern map and experimental data [19] Flow boiling visualization and heat transfer in metal-foam-filled mini tubes-Part II: Developing predictive methods for heat transfer coefficient and pressure drop [20] Experimental investigation and visualization of flow boiling heat transfer in a vertical tube containing metal porous medium [21] New correlation for heat transfer during subcooled boiling in plain channels and annuli [22] Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes

## بررسی تجربی تأثیر ماده متخلخل فلزی بر انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد در بین دو لوله هم‌مرکز عمودی

مسعود یاراحمدی MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

محمد محسن شاه‌مردان\* PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

محسن نظری PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

### چکیده

جوشش جریان مادون سرد زمانی رخ می‌دهد که دمای توده سیال کمتر و دمای سطح تماس بیشتر از دمای اشباع متناظر با فشار سیال باشد. یکی از راه‌های افزایش مکانیسم انتقال حرارت استفاده از فوم‌های فلزی با تخلخل بالا در کانال‌ها است که دارای نسبت مساحت سطح به حجم بالا است که باعث افزایش سطح انتقال حرارت و همچنین افزایش ضریب انتقال حرارت کانال می‌شود. در مطالعه حاضر، با ساخت بستر آزمایشگاهی به بررسی تجربی تأثیر ماده متخلخل بر انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد بین دو لوله هم‌مرکز عمودی (لوله انلیوس) با قطر داخلی و خارجی به ترتیب ۵۰/۷ و ۷۰/۶ میلی‌متر در فشار اتمسفریک و سیال کاری آب پرداخته شده است. فوم فلزی به کاررفته از جنس نیکل با ۱۰ppi و تخلخل ۹۵٪ است و اثر پارامترهایی مانند شار حرارتی و دبی جرمی بر ضریب انتقال حرارت بررسی شده است. نتایج به دست آمده از این پژوهش که محدوده دبی جرمی ۰/۱۲ تا ۰/۲۸۱ kg/s است، نشان می‌دهد که در طول تمام مراحل آزمایش انتقال حرارت از دو مکانیسم جابه‌جایی اجباری و جوشش جریان تشکیل می‌شود که اثر هر یک از پارامترهای فوق بر این دو مکانیسم انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با کاهش دبی جرمی در محدوده ذکر شده در ناحیه جوشش مادون سرد، ضریب انتقال حرارت تا ۳۰٪ افزایش می‌یابد؛ همچنین استفاده از محیط متخلخل، ضریب انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد را تا حدود ۳۰٪ افزایش می‌دهد.

**کلیدواژه‌ها:** انتقال حرارت، جریان جوشش مادون سرد، دو لوله هم‌مرکز، فوم فلزی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۰۷

\*نویسنده مسئول: mmshahmardan@shahroodut.ac.ir

### مقدمه

کاربرد وسیع انتقال حرارت در صنایع گوناگون سبب شده است که افزایش راندمان دستگاه‌های حرارتی در اولویت طراحان صنعتی قرار گیرد. محققین همیشه به دنبال راهی برای بهبود انتقال حرارت و در نهایت افزایش راندمان حرارتی بوده‌اند. موضوع جوشش در کانال‌های افقی و عمودی تحت شرایط طبیعی یا اجباری مساله بسیار مهمی است. طراحی بویلرها، وسایل تبرید، راکتورهای هسته‌ای، خنک‌کاری وسایل الکترونیکی، اوپراتورها و بسیاری از تجهیزات اصلی دیگر در نیروگاه‌ها و صنایع الکترونیکی و شیمیایی وابسته به علم مکانیک سیالات و روندهای انتقال حرارت که در جریان جوشش اتفاق می‌افتد، از کاربردهای این علم است. جوشش جریانی شامل جوشش جریانی اشباع و جوشش جریانی مادون سرد است. 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<sup>[1]</sup>. انتقال حرارت جوشش جریانی مادون سرد سیال به علت استفاده وسیع در صنایع مختلف به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. به طور تجربی تایید شده است که بازده انتقال حرارت و شار حرارتی بحرانی جوشش جریانی مادون سرد نسبت به جوشش جریانی اشباع عملکرد بهتری دارد<sup>[2, 3]</sup>. در خصوص اهمیت انتقال حرارت جوشش جریانی و عوامل تأثیرگذار بر آن در این بخش به مروری گذرا بر کارهای محققین در گذشته پرداخته شده است:

نخستین پژوهش‌ها در زمینه انتقال حرارت جوشش جابجایی، توسط افرادی چون گانگر و وینترتون<sup>[4, 5]</sup>، شاه<sup>[6, 7]</sup> و کانلیکار<sup>[8]</sup> با انجام آزمایش‌های گوناگون و به دست آوردن تعداد زیادی از داده‌های آزمایشگاهی انجام پذیرفت. همچنین این دانشمندان پیشرو با ارایه روابطی که به کمک آنها بتوان با خطای معقولی رفتار آزمایشگاهی داده‌های مورد بررسی را تقریب زد، نقش و سهم به سزایی در بنیان‌گذاری علم انتقال حرارت جریان دوفازی داشته‌اند. گانگر و وینترتون<sup>[4]</sup> با استفاده از ۴۳۰۰ داده برای سیالاتی نظیر آب، مبردها و اتیلن گلیکول از ۲۸ محقق مختلف، رابطه‌ای تجربی برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جوشش جریانی در لوله‌های افقی و قائم ارایه کردند. نتایج نشان داد که رابطه تجربی به دست آمده مطابقت خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشته و انحراف میانگین ضریب انتقال حرارت جوشش جریانی محاسبه شده توسط رابطه آنها با مقادیر آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده برابر با ۲۱/۴٪ برای جوشش جریانی اشباع و ۲۵٪ برای جوشش جریانی مادون سرد به دست آمد. ژرو و همکاران<sup>[10]</sup> برای دستیابی به خصوصیات جریان دوفازی آب-بخار در محدوده نسبتاً وسیعی از شار حرارتی، شار جرمی و فشار ورودی سیال عامل، آزمایش‌های مختلفی را برای جریان سیال بالارونده در لوله قائم انجام دادند. مطابق نتایج مشخص شد که در نواحی مادون فشار بحرانی، مکانیزم اصلی انتقال حرارت، الگوی جریان خشک بوده و در نواحی نزدیک به فشارهای بحرانی، مکانیزم اصلی، انحراف از جوشش هسته‌ای است. همچنین رابطه‌ای به منظور محاسبه عدد نوسلت جابجایی اجباری در نواحی فشارهای فوق بحرانی ارایه شد که می‌تواند ضریب انتقال حرارت را در جریان سیال بالارونده با خطای کمی، پیش‌بینی کند.

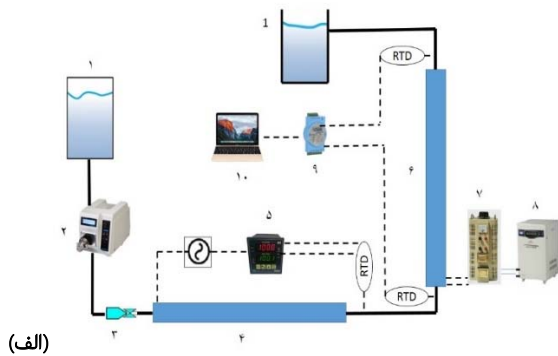
با پیشرفت تکنولوژی محققان همواره به دنبال ایده‌هایی جدید برای بهبود ضریب انتقال حرارت جوششی بوده‌اند، یکی از راه‌های افزایش مکانیسم انتقال حرارت استفاده از فوم‌های فلزی با تخلخل بالا در کانال‌هاست، که دارای نسبت مساحت سطح بالا به حجم که باعث افزایش سایت‌های جوشش به منظور ارتقاء انتقال حرارت می‌شود<sup>[11]</sup>. لو و ژو<sup>[12]</sup> به بررسی آزمایشگاهی انتقال حرارت جوشش در لوله‌های پر شده از فوم مسی در حالت افقی پرداختند. در این کار از فوم‌های مسی با تراکم حفره ۲۰ و ۴۰ppi استفاده شد، و نتایج نشان می‌داد که با کاهش اندازه حفره‌ها،

بر متر مربع ثانیه و شار حرارتی ۲۳ الی ۳۶ کیلووات بر متر مربع، فوم فلزی توپر باعث بهبود ۱/۵ تا ۱/۸۲ برابری ضریب انتقال حرارت نسبت به لوله خالی می‌شود. همچنین مشخص شد با وجود استفاده از فوم فلزی الگوی جریان همچنان اسلاگ باقی می‌ماند.

انگیزش اصلی این مطالعه، به وسیله اهمیت کاربرد فوم فلزی در بهبود مکانیسم انتقال حرارت جریان جوشش ایجاد شد و هدف اصلی این مطالعه بررسی تاثیر استفاده از فوم فلزی بر انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد آب در بین دو لوله هم‌مرکز عمودی در دبی‌های جرمی پایین و محدوده جریان آرام بوده و اثر پارامترهایی مانند شار حرارتی و دبی جرمی بر ضریب انتقال حرارت بررسی شده است. و نیز به منظور آشکارسازی جریان جوشش مادون سرد از لوله خارجی شفاف استفاده شده است. همچنین به منظور صحت‌سنجی نتایج آزمایش‌ها، نتایج با رابطه شاه<sup>[21]</sup> برای جوشش جریان مادون سرد داخل دو لوله هم‌مرکز اعتبارسنجی شده است.

### بستر آزمایشگاهی

در این تحقیق به صورت تجربی با ساخت بستر آزمایشگاهی اثر استفاده از فوم فلزی بر جوشش جریان مادون سرد در بین دو لوله هم‌مرکز عمودی در شارها و دبی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور دستگاه مورد آزمایش شامل: منبع آب یونیزه شده، پمپ، پیش‌گرمکن، بخش آزمون و وسایل لازم برای اندازه‌گیری و کنترل است. طرح شماتیک و نمای کلی دستگاه آزمایش در شکل ۱ آمده است.



(الف)

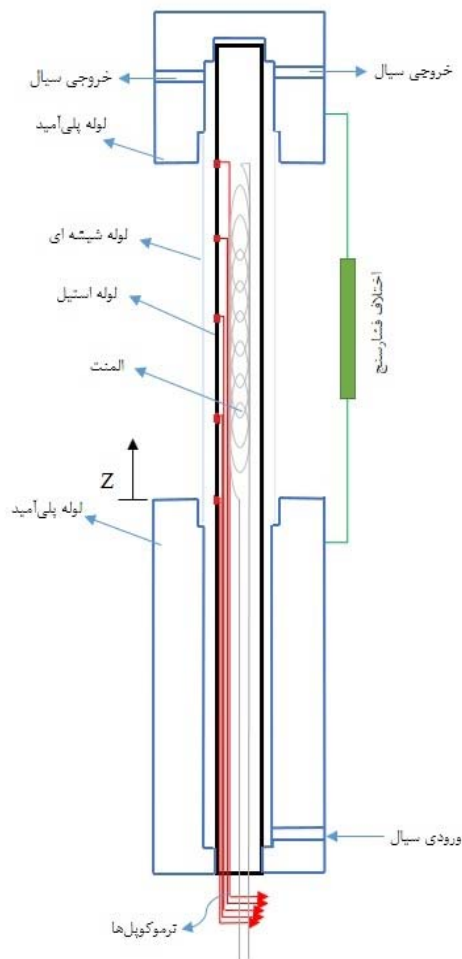


(ب)

**شکل ۱** طرح شماتیک دستگاه آزمایش (الف؛ ۱- مخزن آب، ۲- پمپ، ۳- دبی‌سنج، ۴- پری‌هیتر، ۵- واپاشگر دمای سه‌زمانه، ۶- بخش آزمون، ۷- تنظیم‌کننده ولتاژ، ۸- تثبیت‌کننده ولتاژ، ۹- دستگاه ثبت داده، ۱۰- کامپیوتر به‌منظور نمایش اطلاعات)، نمای کلی دستگاه آزمایش (ب)

مساحت سطح و ترکیب جریان قوی‌تر برای حفره‌های کوچک‌تر اتفاق می‌افتاده است. ضریب انتقال حرارت هر چند کم اما افزایش می‌یابد. جی و جین لیانگ<sup>[13]</sup> به‌صورت آزمایشگاهی به بررسی اُفت فشار دو فاز در فوم‌های مسی پرداخته‌اند. در این کار از کانال مستطیلی و آب یونیزه شده به‌عنوان سیال استفاده شده است و دمای ورودی آب از ۴۰-۸۰ درجه سانتی‌گراد تغییر کرده است. در این کار از فوم مسی با تخلخل ۸۸٪ و تراکم حفره‌ها ۳۰ و ۶۰ و ۹۰ ppi استفاده شد. در این کار جریان مایع تک فاز، جریان جوشش دو فاز و تاثیر دبی‌های جرمی، کیفیت بخار و میانگین قطر حفره فوم‌های فلزی بر این جریان‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. برای جریان جوشش دو فاز با افزایش کیفیت بخار خروجی، دبی جرمی و مقدار ppi اُفت فشار دو فاز افزایش می‌یابد. لی و لئوگ<sup>[14]</sup> خصوصیات جریان جوشش آب و FC72 در فوم‌های آلومینیومی بررسی کرده‌اند. در این آزمایش‌ها، فرآیند انتقال حرارت بر جوشش هسته‌ای مقدم انگاشته شده و شروع جوشش هسته‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. شبیه‌سازی عددی بر پایه آب انجام و با داده‌های آزمایش‌ها مقایسه شده‌اند. مدنی و همکاران<sup>[15]</sup> به بررسی انتقال حرارت جریان جوشش بالارونده در داخل کانال پر شده از فوم فلزی پرداخته‌اند. نمونه‌های فوم فلزی آزمایش‌شده از جنس مس با ۳۶ ppi و n-pentane به‌عنوان سیال استفاده شده است. نتایج گرمایی با نتایج شاه و وینترتون مقایسه شده‌اند. مقایسه با رابطه وینترتون نشان می‌دهد که به کاربردن فوم فلزی باعث افزایش ضریب انتقال حرارت برای کیفیت‌های پایین می‌شود. پروفیل دما و ضریب انتقال حرارت با نتایج لوله‌های صاف آنالیز و مقایسه شده‌اند. هو و ژو<sup>[16-17]</sup> در مطالعاتشان به بررسی اثر استفاده از فوم فلزی و همچنین تاثیر قطر لوله روی اُفت فشار و خصوصیات انتقال حرارت جریان جوشش ترکیب Refrigerante-Oil در لوله‌های پر شده از فوم فلزی پرداختند. بامروت عبادی و همکاران<sup>[18]</sup> در بخش اول کار خود به آشکارسازی جریان جوشش و انتقال حرارت درون لوله‌های مینی پر شده از فوم فلزی پرداخته‌اند. الگوهای جریان، ضریب انتقال حرارت و اُفت فشار برای کیفیت بخار متوسط ۰/۱-۰/۷ را بررسی کردند. این آزمایش‌ها بدون فوم نیز انجام شد و نتایج نشان داد که وجود فوم باعث افزایش ضریب انتقال حرارت تا ۳/۲ برابر می‌شود. بامروت عبادی و همکاران<sup>[19]</sup> در بخش دوم کار خود به مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با روابط توسعه داده شده اخیر برای لوله‌های پر شده با فوم فلزی پرداختند. کاشی و همکاران<sup>[20]</sup> به بررسی آزمایشگاهی انتقال حرارت جوشش در یک لوله عمودی مسی با قطر داخلی ۱۶ میلی‌متر تحت شرایط شار حرارتی ثابت و در فشار اتمسفریک با سیال کاری آب پرداختند. آزمایش‌ها ابتدا در لوله عمودی خالی و سپس در لوله عمودی حاوی فوم فلزی انجام شد. آنها تاثیر ماده متخلخل، شار حرارتی و شار جرمی بر پارامترهای انتقال حرارت را بررسی کردند. در نهایت مشخص شد در کیفیت‌های پایین و در محدوده شار جرمی ۳۸ الی ۵۳ کیلوگرم

داخلی لوله به منظور انتقال شار حرارتی یکنواخت با اکسید منیزیم پر شده است.



شکل ۲) طرح شماتیک بخش آزمون

ماده متخلخل به کاررفته از نوع سلول باز و در شکل ۳ نمایش داده شده است. در این نوع ماده متخلخل، حفره‌ها به صورت پیوسته به یکدیگر متصل می‌شوند و دارای قابلیت عبور سیال از میان حفره‌های خود هستند. فوم فلزی به کاررفته از جنس نیکل با  $10\text{ppi}$  و تخلخل  $95\%$  با قطر داخلی  $7/6$  و ضخامت  $6$  میلی‌متر است. برای اندازه‌گیری دمای سطح داخلی لوله داخلی بخش آزمون از ۱۵ عدد ترموکوپل نوع  $k$  با محدوده اندازه‌گیری  $100$  تا  $1100$  درجه سانتی‌گراد استفاده شده است. به منظور اندازه‌گیری دما در ۵ مقطع و در هر مقطع ۳ ترموکوپل نوع  $k$  با زوایای  $120$  درجه استفاده شده که با میانگین‌گیری می‌توان دمای متوسط سطح داخلی لوله فولادی در هر مقطع را به دست آورد. به منظور ثبت داده‌های دمای ترموکوپل‌های نوع  $k$  از ۲ عدد دستگاه ثبت داده آدام  $6018$  استفاده شده است که هر کدام از آنها دارای ۸ کانال است. داده‌ها توسط این دستگاه‌ها در طول زمان آزمایش روی کامپیوتر ذخیره شده است.

برای رساندن دمای آب به حد مطلوب قبل از ورود به بخش آزمون از پیش‌گرمکن استفاده شده است، به منظور ثابت نگه‌داشتن دمای سیال ورودی به قسمت آزمایش و همچنین جلوگیری از تغییر دما برای تکرار آزمایش‌ها (در قسمت ورودی به بخش آزمون) از یک عدد واپایشگر دمای سه‌زمانه با مدل امرن  $e5cc$  استفاده شده است. در قسمت ورودی و خروجی جریان آب به بخش آزمون از دو عدد حسگر پی تی  $100$  به منظور اندازه‌گیری دمای سیال استفاده شده است. حسگر دمای ورودی از نوع دوپل بوده که قابلیت اتصال همزمان به دستگاه ثبت داده و واپایشگر را دارد. به منظور اندازه‌گیری فشار سیال در هنگام ورود و خروج از قسمت آزمایش از دو عدد فرستنده فشار ویکا از سری  $a10$  با رنج کاری  $0$  تا  $10$  بار استفاده شده است. با توجه به رنج محدودیت دمایی حسگرهای فشار (تا  $80$  درجه سانتی‌گراد) در قسمت خروجی بخش آزمون از یک عدد عنصر خنک‌کننده ویکا با مدل  $910,24$  برای کاهش دمای سیال ورودی به فرستنده فشار استفاده شده است: که دارای ۵ پره جهت خنک‌سازی سیال ورودی به حسگر بوده و با استفاده از این قطعه می‌توان دمای سیال ورودی به فرستنده فشار را تا  $200$  درجه سانتی‌گراد بالا برد. به منظور ثبت داده‌های دمایی حسگرهای پی تی  $100$  از یک عدد دستگاه ثبت داده آدام  $6015$  استفاده شده است که دارای ۷ کانال ایزوله سه سیم است. داده‌ها توسط این دستگاه روی کامپیوتر ذخیره شده و برای ثبت داده‌های دریافتی از حسگرهای فشار از یک عدد دستگاه ثبت داده آدام  $4018+$  استفاده شده است. همچنین از یک عدد پمپ چرخ دنده از برند لانگر پمپ مدل  $WT3000-1FB$  با سرعت  $300$  تا  $3000$  دور بر دقیقه که توانایی پمپاژ سیال با دبی  $171$  تا  $1714$  میلی‌لیتر بر دقیقه را داراست، به جهت حصول اطمینان از دبی یکنواخت و دقیق در طول انجام آزمایش، استفاده شده است.

### بخش آزمون

بخش آزمون و موقعیت حسگرها در شکل ۲ نمایش داده شده است. بخش آزمون از دو لوله هم‌مرکز عمودی که لوله داخلی از جنس فولادی نسوز با قطر خارجی  $50/7$  میلی‌متر و ضخامت  $1$  میلی‌متر و طول  $1/5$  متر است. لوله خارجی از سه قطعه تشکیل شده است، در قسمت میانی لوله خارجی به منظور آشکارسازی جریان جوش از لوله شفاف پیرکس به طول  $60$  سانتی‌متر با قطر داخلی  $70/6$  میلی‌متر استفاده شده است. قسمت ورودی بخش آزمون به منظور توسعه یافتگی هیدرودینامیکی جریان سیال به طول  $50$  سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. قسمت انتهایی بخش آزمون به طول  $30$  سانتی‌متر است و برای جلوگیری از اختلاط سیال و تاثیر بر داده‌های آزمایش در انتهای بخش آزمون در نظر گرفته شده است. جنس لوله خارجی قسمت ورودی و انتهایی بخش آزمون، پلی‌آمید است و برای جلوگیری از اتلاف حرارتی با محیط، عایق کاری شده است. به منظور تامین شار حرارتی یکنواخت و ثابت بخش آزمایش، داخل قسمت میانی لوله فولادی به طول  $60$  سانتی‌متر المنت کار گذاشته شده و فضای بین المنت و سطح

طبق تعریف ذکر شده، عدم قطعیت نسبی شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت از فرمول‌های زیر محاسبه می‌شوند:

$$\frac{\partial \dot{q}}{\dot{q}} = \left[ \left( \frac{\partial V}{V} \right)^2 + \left( \frac{\partial l}{l} \right)^2 + \left( \frac{\partial D_o}{D_o} \right)^2 + \left( \frac{\partial L}{L} \right)^2 \right] \quad (7)$$

$$\frac{\partial h}{h} = \left[ \left( \frac{\partial \dot{q}}{\dot{q}} \right)^2 + \left( \frac{\partial T_w}{T_w - T_b} \right)^2 + \left( \frac{\partial T_b}{T_w - T_b} \right)^2 \right] \quad (8)$$

مقادیر بیشینه عدم قطعیت مولفه‌های مختلف آزمایش به‌طور خلاصه در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱) مقادیر عدم قطعیت مولفه‌های تاثیرگذار مساله

مقدار عدم قطعیت	مولفه
±۰/۱	قطر لوله استیل (mm)
±۱	طول لوله استیل (mm)
±۰/۰۵	قطر لوله شیشه‌ای (mm)
%±۰/۱	شار جرمی
±۰/۱	دما (°C)
%۰/۱	ولتاژ
%۰/۱	آمپر
%۵	شار حرارتی
%۷	ضریب انتقال حرارت محلی

## نتایج و بحث

### اعتبارسنجی

به‌منظور صحت‌سنجی آزمایش‌ها، نتایج تجربی برای جوشش جریانی مادون سرد در شارهای حرارتی و دبی جرمی مختلف در فضای بین دو لوله هم‌مرکز با رابطه شاه مقایسه شده است. رابطه شاه<sup>[21]</sup> برای انتقال حرارت جوشش مادون سرد به‌صورت زیر است:

$$q = h_1(T_w - T_B) + h_1(\phi_0 - 1)(T_w - T_{SAT}) \quad (9)$$

عبارت  $h_1(T_w - T_B)$  در معادله (۹) به انتقال حرارت جابه جایی و عبارت  $h_1(\phi_0 - 1)(T_w - T_{SAT})$  مربوط به انتقال حرارت جوشش هسته‌ای است.  $h_1$  ضریب انتقال حرارت حالت تک فاز است که از معادله سایدر و تیت<sup>[22]</sup> محاسبه می‌شود. پارامتر  $\phi_0$  نیز با توجه به مقدار عدد جوشش به‌صورت زیر تعریف می‌شود<sup>[21]</sup>:

$$\phi_0 = 230BO^{0.5} \quad BO > 0.3 \times 10^{-4} \quad (10)$$

$$\phi_0 = 1 + 46BO^{0.5} \quad BO < 0.3 \times 10^{-4} \quad (11)$$

در این معادلات BO معرف عدد جوشش است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$BO = \frac{\dot{q}}{gh_{fg}} \quad (12)$$

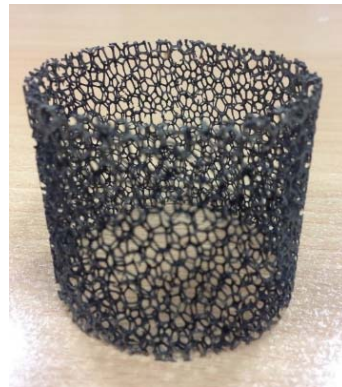
که  $\dot{q}$  شار حرارتی گرفته‌شده سیال، G شار جرمی و  $h_{fg}$  آنتالپی تبخیر است.

$$G = \rho u \quad (13)$$

ضریب انتقال حرارت تک فاز در معادله شاه ( $h_1$ ) در جریان آرام از معادله سایدر و تیت<sup>[22]</sup> محاسبه می‌شود. رابطه سایدر و تیت برای جریان آرام و تک فاز به شرح زیر است:

$$NU_1 = 1.87 \left( Re Pr \frac{D}{L} \right)^{0.33} (\mu_b / \mu_w)^{0.14} \quad (14)$$

$\mu_w, \mu_b$  به‌ترتیب لزجت سیال در دمای بالک و لزجت سیال در دمای دیواره است.



شکل ۳) فوم فلزی به‌کاررفته از جنس نیکل با ۱۰ppi و تخلخل ۹۰%

برای کنترل شار حرارتی اعمال‌شده از یک عدد تنظیم‌کننده ولتاژ با توانایی کنترل ولتاژ به‌صورت دستی از ۰ تا ۳۰۰ ولت، به همراه یک عدد تثبیت‌کننده برای ثابت نگه‌داشتن ولتاژ ورودی به تنظیم‌کننده ولتاژ استفاده شده است. جریان خروجی کاملاً سینوسی تنظیم‌کننده ولتاژ، توان موثر پایدار ایجاد می‌نماید؛ لذا برای محاسبه توان حرارتی اعمالی می‌توان به توان موثر آن اطمینان نمود. شار حرارتی اعمال‌شده طبق فرمول ۱ محاسبه می‌شود:

$$Q_w = \frac{VI}{\pi D_o L} \quad (1)$$

I و V به‌ترتیب اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت درون لوله و جریان الکتریکی را نشان می‌دهند.  $D_o$  قطر خارجی و L طول گرم شده لوله داخلی است.

### محاسبات

ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی،  $h$ ، از فرمول محاسبه می‌شود:

$$h(z) = \frac{\dot{q}}{T_{w,o} - T_b} \quad (2)$$

که در آن z فاصله محوری از ورودی بخش آزمون است،  $\dot{q}$  شار حرارتی داده‌شده به سیال است،  $T_{w,o}$  دمای سطح خارجی لوله فولادی است و از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$T_{w,o} = T_{w,i} - \frac{qD_i}{2K} \left[ \ln \frac{D_o}{D_i} \right] \quad (3)$$

$T_b$  دمای توده‌ای سیال است و از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$T_b = T_{in} + \frac{\dot{q}\pi D_o z}{\dot{m}C_p} \quad (4)$$

$T_{in}$  دمای سیال ورودی به بخش آزمون است.

شار حرارتی گرفته‌شده سیال از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{q} = \frac{\dot{m}C_p}{\pi D_o L} (T_{out} - T_{in}) \quad (5)$$

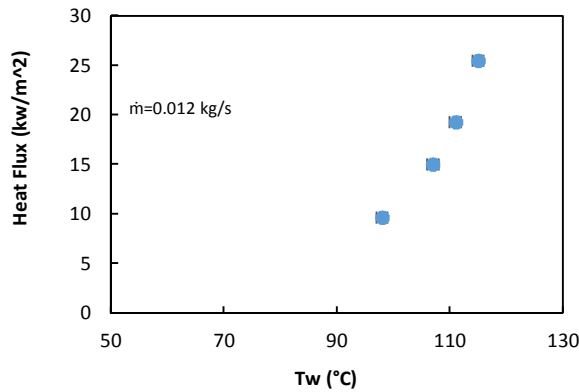
که  $\dot{m}$  معرف دبی جرمی و  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه است.

### آنالیز عدم قطعیت

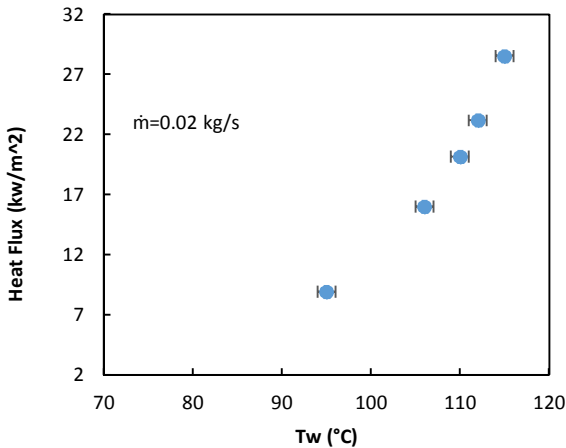
آنالیز عدم قطعیت روی نتایج آزمایش‌ها انجام شده است. عدم قطعیت یک پارامتر که تابعی از چند متغیر است و وابسته به عدم قطعیت آن متغیرها است. عدم قطعیت کلی نتایج اندازه‌گیری شده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (6)$$

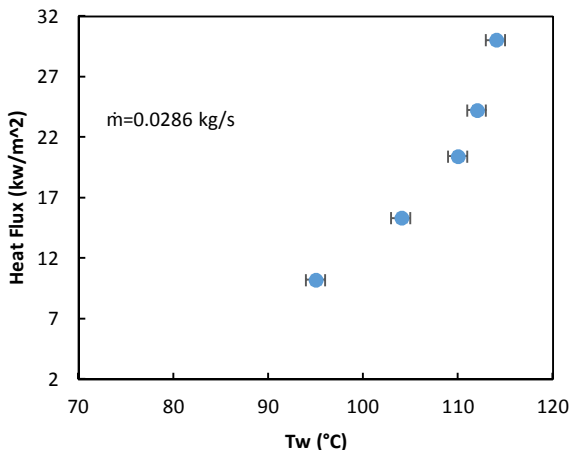
حال تولید حباب‌ها باعث افزایش انتقال حرارت از سطح گرم‌شده می‌شود، همان‌طور که در نمودار ۲ دیده می‌شود شیب منحنی ضریب انتقال حرارت در نقطه‌ای که مکانیسم انتقال حرارت تغییر می‌کند، به شدت افزایش می‌یابد. اثر شار حرارتی روی ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری کوچک است در حالی که در ناحیه جوشش دارای اثری غیرقابل صرف‌نظر است.



(الف)



(ب)



(ج)

**نمودار ۱** منحنی‌های جوشش برای دمای مادون سرد ورودی ۵۰°C بین دو لوله هم‌مرکز عمودی برای دبی‌های جرمی الف) ۰/۰۱۲ kg/s، ب) ۰/۰۲ kg/s، ج) ۰/۰۲۸۶ kg/s در مکان محوری ثابت z=۴۵cm

اعداد بدون بعد رینولدز (Re) و پرانتل (Pr) نیز به صورت تعریف می‌شوند:

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (۱۵)$$

$$Pr = \frac{\rho c_p \mu}{\alpha} \quad (۱۶)$$

که  $\rho$ ،  $\mu$  و  $u$  به ترتیب بیانگر چگالی، لزجت و سرعت سیال و همچنین  $\nu$  لزجت سینماتیکی و  $\alpha$  نیز ضریب نفوذ گرمایی است. در جدول ۲ نتایج حاصل از داده‌های آزمایش در مقایسه با رابطه شاه در شارهای حرارتی و دبی جرمی مختلف برای ضریب انتقال حرارت جوشش مادون سرد با درصد خطای آن آورده شده است.

**جدول ۲** مقایسه نتایج آزمایش‌ها با معادله شاه برای انتقال حرارت جوشش جریان مادون سرد<sup>[۲۱]</sup>

m	Re	q̇ (kw/m <sup>2</sup> )	درصد خطا <sup>[۲۱]</sup>
۰/۰۱۲	۳۱۳	۱۴	۱۴
۰/۰۲	۴۷۶	۲۸	۲۳
۰/۰۲۸۶	۶۶۲	۳۰	۱۷

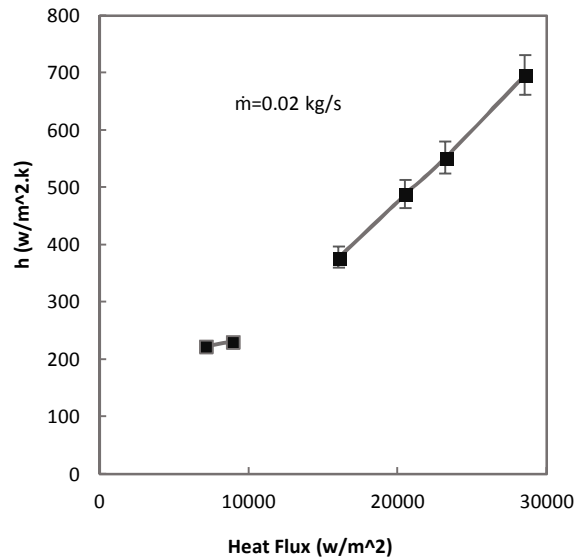
### جریان جوشش مادون سرد در بین دو لوله هم‌مرکز عمودی

در نمودار ۱، منحنی‌های جوشش، شار حرارتی در برابر دمای دیواره گرم‌شده را نشان می‌دهد. منحنی‌های جوشش برای دبی‌های جرمی ۰/۰۱۲، ۰/۰۲، و ۰/۰۲۸۶ kg/s در مکان محوری ثابت z=۴۵cm در دمای مادون سرد ورودی ۵۰°C را نشان می‌دهند. در آغاز با افزایش شار حرارتی تحت شرایط سیال مادون سرد، انتقال حرارت جابجایی اجباری تک فاز اتفاق می‌افتد. سپس سیال نزدیک به دیواره لوله داخلی، فوق گرم می‌شود در حالی که جریان در هسته لوله مادون سرد است. افزایش بیشتر شار حرارتی باعث افزایش فوق گرم دیواره می‌شود،  $\Delta T_{sat}$  و باعث فعال‌سازی هسته‌های بخار می‌شود. هنگامی که شار حرارتی بالاتر از نقطه شروع جوشش هسته‌ای می‌رود، بیشتر مکان‌های بخار فعال می‌شوند و افزایش کوچکی در دمای دیواره دیده می‌شود. لازم به ذکر است که در طی آزمایش‌ها وقوع ONB با مشاهده بصری تشخیص داده شده است.

نمودار ۲، تغییرات ضریب انتقال حرارت جریان برای دبی جرمی ۰/۰۲ kg/s در مکان محوری ثابت z=۴۵cm را تحت شارهای حرارتی مختلف در دمای مادون سرد ورودی ۵۰°C را نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت به شدت تابعی از شار حرارتی است. در واقع با زیاد شدن شار حرارتی، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. همچنین باید توجه کرد که در شارهای حرارتی پایین‌تر، انتقال حرارت جابجایی اجباری تک‌فاز مشاهده می‌شود و بعد از مقداری افزایش در شار حرارتی، حباب‌های بسیار کوچک روی سطح انتقال حرارت تولید و به دلیل پایین بودن دمای اطراف به طور ناگهانی محو می‌شوند. یک نقطه در مکانیسم انتقال حرارت وجود دارد که از جابجایی اجباری به جوشش جریانی تغییر می‌کند. تعیین دقیق این نقطه با مشاهدات معمولی آسان نیست. به هر

دو لوله هم‌مرکز عمودی تعداد مکان‌های فعال تشکیل بخار افزایش می‌یابد که ناشی از افزایش سطح در معرض سیال است. دهانه‌های کوچک بین حفره‌ها به سیال اجازه می‌دهد که همه حفره‌ها را پر کند که به نوبه خود منجر به افزایش تعداد مکان‌های فعال تشکیل بخار می‌شود. استفاده از فوم فلزی به‌طور قابل توجهی عملکرد جوشش مادون سرد در لوله را بهبود می‌بخشد و ضریب انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد را حدود ۳۰٪ افزایش می‌دهد.

اثر استفاده از فوم فلزی نیکل بر رفتار تولید حباب روی سطح در جوشش مادون سرد در دبی جرمی  $0.02 \text{ kg/s}$  نشان می‌دهد که استفاده از فوم فلزی منجر به افزایش تعداد مکان‌های فعال تشکیل بخار می‌شود که ناشی از افزایش سطح در معرض سیال است (شکل ۵).



نمودار ۲) تغییرات ضریب انتقال حرارت جریان دبی جرمی  $0.02 \text{ kg/s}$  در مکان محوری ثابت  $Z=4.0 \text{ cm}$  را تحت شارهای حرارتی مختلف



شکل ۴) اثر افزایش شار حرارتی بر رفتار حباب روی سطح در جوشش مادون سرد در دبی جرمی  $0.02 \text{ kg/s}$  و دمای مادون سرد ورودی  $50^\circ\text{C}$

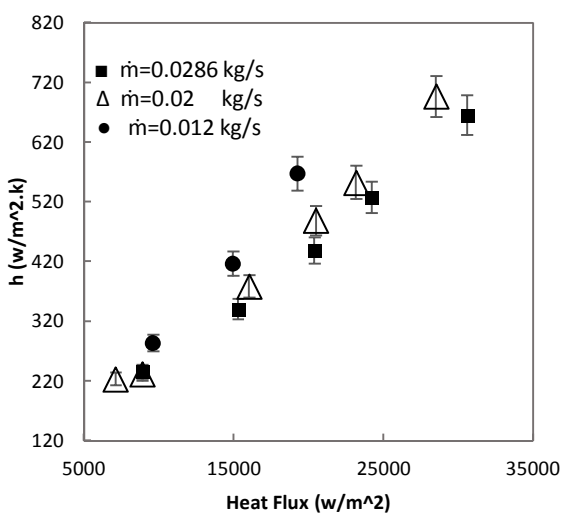
اثر افزایش شار حرارتی بر میزان تولید حباب روی سطح در جوشش مادون سرد در دبی جرمی  $0.02 \text{ kg/s}$  نشان می‌دهد که با افزایش شار حرارتی تعداد و اندازه حباب‌ها افزایش می‌یابد (شکل ۴).

نمودار ۳ وابستگی ضریب انتقال حرارت به دبی جرمی در بین دو لوله هم‌مرکز عمودی در مکان محوری ثابت  $Z=4.0 \text{ cm}$  در دمای مادون سرد ورودی  $50^\circ\text{C}$  را نشان می‌دهد. با کاهش دبی جرمی در محدوده  $0.012 \text{ kg/s}$  تا  $0.0286 \text{ kg/s}$  در ناحیه جوشش مادون سرد، ضریب انتقال حرارت تا ۳۰٪ افزایش می‌یابد. همان‌طور که دیده می‌شود، ضریب انتقال حرارت تابعی از دبی جرمی برای یک مقدار معین شار حرارتی است. در ناحیه انتقال حرارت جوشش مادون سرد، دمای دیواره تقریباً ثابت می‌ماند و افزایش کمی در دمای دیواره اتفاق می‌افتد؛ بنابراین، چنانچه دبی جرمی در این ناحیه کاهش یابد، دمای بالک سیال افزایش می‌یابد در حالی که دمای دیواره تقریباً ثابت می‌ماند؛ بنابراین طبق تعریف ضریب انتقال حرارت، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

#### تاثیر ماده متخلخل بر انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد در بین دو لوله هم‌مرکز عمودی

نمودار ۴ تاثیر استفاده از فوم فلزی نیکل بر منحنی‌های جوشش برای دبی‌های جرمی  $0.02 \text{ kg/s}$  و  $0.0286 \text{ kg/s}$  در مکان محوری ثابت  $Z=4.5 \text{ cm}$  در دمای مادون سرد ورودی  $50^\circ\text{C}$  را نشان می‌دهند. همان‌طور که دیده می‌شود که استفاده از فوم فلزی متخلخل عملکرد جوشش سطح صاف را به میزان قابل توجهی افزایش داده است.

نمودار ۵ اثر استفاده از فوم فلزی بر ضریب انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد در دبی جرمی  $0.0286 \text{ kg/s}$  برای دمای مادون سرد ورودی  $50^\circ\text{C}$  نشان می‌دهد. با قراردادن فوم فلزی در بین



نمودار ۳) تغییرات ضریب انتقال حرارت برای دبی‌های جرمی  $0.012 \text{ kg/s}$ ،  $0.02 \text{ kg/s}$  و  $0.0286 \text{ kg/s}$  تحت شارهای حرارتی مختلف بین دو لوله هم‌مرکز عمودی در مکان محوری ثابت  $Z=4.5 \text{ cm}$

### نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی تجربی تاثیر ماده متخلخل بر انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد در بین دو لوله هم‌مرکز عمودی با فضای حلقوی ماکرو در فشار اتمسفریک و سیال کاری آب پرداخته شده و اثر پارامترهایی مانند شار حرارتی و دبی جرمی بر ضریب انتقال حرارت بررسی شده است. نتایج این پژوهش که محدوده دبی جرمی ۰/۰۱۲ تا ۰/۰۲۸۶ kg/s را شامل می‌شود، نشان می‌دهد که در طول تمام مراحل آزمایش انتقال حرارت از دو مکانیسم جابجایی اجباری و جوشش جریان تشکیل می‌یابد. ضریب انتقال حرارت به شدت تابعی از شار حرارتی است. در واقع با زیاد شدن شار حرارتی، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش دبی جرمی در محدوده ذکر شده در ناحیه جوشش مادون سرد، ضریب انتقال حرارت تا ۳۰٪ افزایش می‌یابد. همچنین استفاده از محیط متخلخل در محدوده ذکر شده، ضریب انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد را حدود ۳۰٪ افزایش می‌دهد. در کارهای آینده اثرات مواد گوناگون با تخلخل‌های مختلف بررسی خواهد شد.

**تشکر و قدردانی:** از مسئولین دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود که امکانات را برای انجام این پژوهش فراهم نمودند، تشکر می‌شود.

**تأییدیه اخلاقی:** محتویات علمی مقاله، حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج برعهده نویسندگان است.

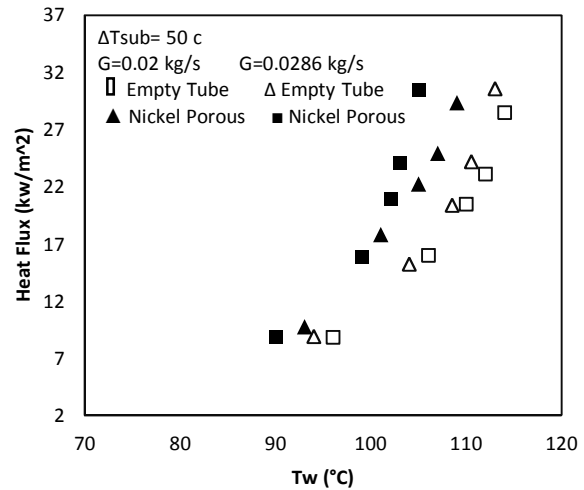
**تعارض منافع:** مولفین مقاله، هیچ گونه تعارض منافی با فرد یا گروه دیگر ندارند.

**سهم نویسندگان:** مسعود یاراحمدی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی (۳۴٪)؛ محمدمحسن شاه‌مردان (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۳۳٪)؛ محسن نظری (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۳٪)

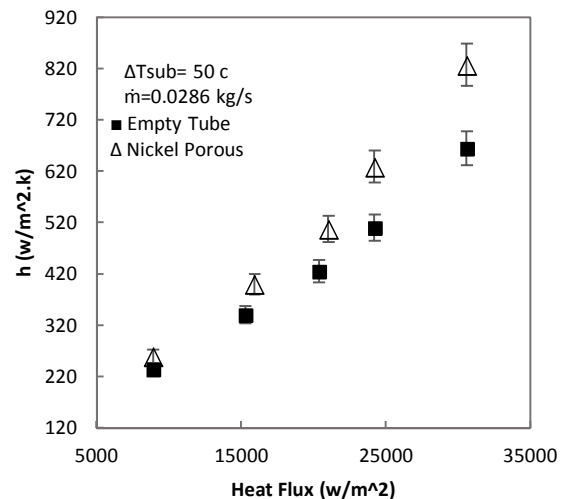
**منابع مالی:** منابع مالی خاصی برای انجام این تحقیق استفاده نشده است.

### فهرست علائم

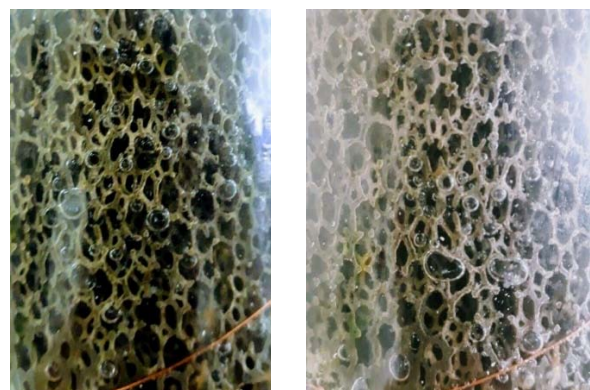
V	ولتاژ،
I	آمپر، A
D	قطر لوله، m
Dh	قطر هیدرولیکی، m
L	طول، m
$\dot{q}$	شار حرارتی، $\frac{kw}{m^2}$
Z	فاصله محوری، m
G	شار جرمی، $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$
$\dot{m}$	دبی جرم، $kg\ s^{-1}$
h	ضریب انتقال حرارت $W\ m^{-2}\ k^{-1}$
u	سرعت $m\ s^{-1}$
BO	عدد جوشش
Pr	عدد پرانتل



**نمودار ۴)** تاثیر استفاده از فوم فلزی نیکل بر منحنی‌های جوشش برای دمای مادون سرد ورودی ۵۰°C در بین دو لوله هم‌مرکز عمودی برای دبی‌های جرمی ۰/۰۲۸۶ kg/s، ۰/۰۲ kg/s در مکان محوری ثابت z=۴۵cm



**نمودار ۵)** تاثیر استفاده از فوم فلزی نیکل بر ضریب انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد برای دمای مادون سرد ورودی ۵۰°C در بین دو لوله هم‌مرکز عمودی برای دبی ۰/۰۲۸۶ kg/s در مکان محوری ثابت z=۴۵cm



**شکل ۵)** اثر استفاده از فوم فلزی بر رفتار حباب روی سطح در جوشش مادون سرد در دبی جرمی ۰/۰۲۸۶ kg/s و دمای مادون سرد ورودی ۵۰°C



Transfer Engineering. 2004;25(3):86-93.

10- Zhu X, Bi Q, Yang D, Chen T. An investigation on heat transfer characteristics of different pressure steam-water in vertical upward tube. Nuclear Engineering and Design. 2009;239(2):381-388.

11- Zhu Y, Hu H, Sun S, Ding G. Flow boiling of refrigerant in horizontal metal-foam filled tubes: Part 1-Two-phase flow pattern visualization. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015;91:446-453.

12- Zhao CY, Lu W, Tassou SA. Flow boiling heat transfer in horizontal metalfoam tubes. Journal of Heat Transfer. 2009;131(12):121002-1.

13- Ji X, Xu J. Experimental study on the two-phase pressure drop in copper foams. Heat and Mass Trans. 2012;48:153-164.

14- Li HY, Leong KC. Experimental and numerical study of single and two-phase flow and heat transfer in aluminum foams. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2011;54(23-24):4904-4912.

15- Madani B, Tadrist L, Topin F. Experimental analysis of upward flow boiling heat transfer in a channel provided with copper metallic foam. Applied Thermal Engineering. 2013;52(2):336-344.

16- Zhu Y, Hu HT, Ding GL, Peng H, Huang XC, Zhuang DW, Yu J. Influence of oil on nucleate pool boiling heat transfer of refrigerant on metal foam covers. International Journal of Refrigeration. 2011;34(2):509-517.

17- Zhu Y, Hu H, Ding G, Sun S, Jing Y. Influence of metal foam on heat transfer characteristics of refrigerant-oil mixture flow boiling inside circular tubes. Applied Thermal Engineering. 2013;50(1):1246-1256.

18- Abadi GB, Moon C, Kim KC. Flow boiling visualization and heat transfer in metal-foam-filled mini tubes-Part I: Flow pattern map and experimental data. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016;98:857-867.

19- Abadi GB, Moon C, Kim KC. Flow boiling visualization and heat transfer in metal-foam-filled mini tubes-Part II: Developing predictive methods for heat transfer coefficient and pressure drop. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016;98:868-878.

20- Kashi M, Ramezani A, Nazari M, Shahmardan MM. Experimental investigation and visualization of flow boiling heat transfer in a vertical tube containing metal porous medium. Amirkabir Journal of Mechanical Engineering. 2018;52(6):131-140. [Persian]

21- Shah MM. New correlation for heat transfer during subcooled boiling in plain channels and annuli. International Journal of Thermal Sciences. 2017;112:358-370.

22- Sieder EN, Tate GE. Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes. Industrial & Engineering Chemistry. 1936;28(12):1429-1435.

عدد ناسلت	Nu
آنتالپی تبخیر $\text{kg}^{-1}$	$h_{fg}$
ضریب نفوذ گرمایی $\text{m}^2\text{s}^{-1}$	$\alpha$
لزجت سینماتیکی	$\nu \text{m}^2\text{s}^{-1}$
لزجت $\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$	$\mu$
چگالی $\text{kg m}^{-3}$	$\rho$
<b>زیرنویس</b>	
بالک	b
داخلی	i
خارجی	o
ورودی	in
خروجی	out
دیواره	w

### منابع

1- Collier JG, Thome JR. Convective boiling and condensation. 3<sup>rd</sup> Edition. Cambridge: Clarendon Press; 1994.

2- Wang G, Cheng P. Subcooled flow boiling and microbubble emission boiling phenomena in a partially heated microchannel. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2009;52(1-2):79-91.

3- Lee J, Mudawar I. Critical heat flux for subcooled flow boiling in micro-channel heat sinks. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2009;52(13-14):3341-3352.

4- Gungor KE, Winterton RHS. A general correlation for flow boiling in tubes and annuli. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1986;29(3):351-358.

5- Gungor KF, Winterton RHS. Simplified general correlation for saturated flow boiling and comparison of correlation with data. Chemical Engineering Research & Design: Transactions of the Institution of Chemical Engineers. 1987;65(2):148-156. [Korean]

6- Shah MM. A general correlation for heat transfer during saturated boiling with flow across tube bundles. HVAC & R Research. 2007;13(5):749-768.

7- Shah MM. Improved general correlation for subcooled boiling heat transfer during flow across tubes and tube bundles. HVAC & R Research. 2005;11(2):285-303.

8- Kandlikar SG. A general correlation for saturated two-phase flow boiling heat transfer inside horizontal and vertical tubes. Journal of Heat Transfer. 1990;112(1):219-228.

9- Kandlikar S G, Balasubramanian P. An extension of the flow boiling correlation to transition, laminar, and deep laminar flows in minichannels and microchannels. Heat