

# **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

#### 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 saturrated 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] nfluence 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 [11] Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

<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

# بررسی تجربی تاثیر 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 محمدمحسن شاهمردان<sup>•</sup> PhD دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران محسن نظری PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

#### چکیدہ

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. 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 تاثیر ماده متخلخل بر انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد بین دو لوله هممرکز عمودی (لوله انلیوس) با قطر داخلی و خارجی بهترتیب ۵۰/۷ و ۲۰/۶میلیمتر در فشار اتمسفریک و سیالکاری آب پرداخته شده است. فوم فلزی بهکاررفته 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 بهدستآمده از این پژوهش که محدوده دبی جرمی ۱۲ ۰/۰۱۲ تا ۰/۰۲۸٦kg/s/ است، نشان میدهد که در طول تمام مراحل آزمایش انتقال حرارت از دو مکانیسم جابهجایی اجباری و جوشش جریانی 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 ذکرشده در ناحیه جوشش مادون سرد، ضریب انتقال حرارت تا ۳۰% افزایش می یابد؛ 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 هم مرکز، فوم فلزی

> تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۶ تاریخ پذیرش: ۲۰٬۹۹٬۰۴/۰ . 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 بوشش 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 بهعلت استفاده وسیع در صنایع مختلف بهطور گستردهای مورد مطالعه قرار گرفته است. بهطور تجربی تایید شده است که بازده انتقال حرارت و شار حرارتی بحرانی جوشش جریان مادون سرد نسبت به جوشش جریان اشباع عملکرد بهتری دارد<sup>[3, 2]</sup>. در خصوص اهمیت انتقال حرارت جوشش جریانی و عوامل تاثیرگذار برآن 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>[7, 7]</sup> و *کاندلیکار*<sup>[8]</sup> <sup>9</sup> با انجام آزمایشهای گوناگون و بهدستآوردن 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 ٤٣٠٠ 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 بهدست آمده مطابقت خوبی با دادههای آزمایشگاهی داشته و انحراف میانگین ضریب انتقال حرارت جوشش جریانی محاسبهشده توسط رابطه آنها با مقادیر آزمایشگاهی اندازه گیری شده برابر با ۲۱/٤% برای جوشش جریانی اشباع و ۲۵% برای جوشش جریانی مادون سرد بهدست آمد. *ژو* 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 بهمنظور 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 بهدنبال 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 بهمنظور ارتقاء انتقال حرارت میشود<sup>[11]</sup>. *لو و ژائو<sup>[12]</sup>* به بررسی آزمایشگاهی انتقال حرارت میشود<sup>[11]</sup>. *لو و ژائو<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،

مساحت سطح و ترکیب جریان قویتر برای حفرہھای 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 فازی در فومهای مسی پرداختهاند. در این کار از کانال مستطیلی و آب یونیزه شده بهعنوان سیال استفاده شده است و دمای ورودی آب از ۴۰-۸۰درجه سانتیگراد تغییر کرده است. در این کار از فوم مسی با تخلخل ۸۸/۰ و تراکم حفرهها ۳۰ و ۶۰ و ۹۰ppi استفاده شد. در این کار جریان مایع تک فاز، جریان جوشش دو فازی و تاثیر دبیهای جرمی، کیفیت بخار و میانگین قطر حفره فومهای فلزی بر این جریانها مورد مطالعه قرار گرفته است. برای جریان جوشش دو فازی با افزایش کیفیت بخار خروجی، دبی جرمی و مقدار ppi اُفت فشار دو فازی افزایش مییابد. *لی و لئونگ*<sup>[14]</sup> خصوصیات جریان جوشش آب و FC72 در فومهای آلومینیومی بررسی کردهاند. در این آزمایشها، فرآیند انتقال حرارت بر جوشش هستهای مقدم انگاشتهشده 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 پرشده از فوم فلزی پرداختهاند. نمونههای فوم فلزی آزمایش شده از جنس مس با ۳۶ppi و n-pentane بهعنوان سیال استفادهشده است. نتایج گرمایی با نتایج *شاه و وینترتون* مقایسه شدهاند. مقایسه با رابطه وینترتون نشان میدهد که به كاربردن فوم فلزى باعث افزايش ضريب انتقال حرارت براى 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 پرشده 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 پرشده از فوم فلزی پرداختهاند. الگوهای جریان، ضریب انتقال حرارت و اُفت فشار برای کیفیت بخار متوسط ۰/۱- ۷/۰ 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 پرشده با فوم فلزی پرداختند. *کاشی* و همکاران<sup>[20]</sup> به بررسی آزمایشگاهی انتقال حرارت جوشش در یک لوله عمودی مسی با قطر داخلی ۱۶میلیمتر تحت شرایط شار حرارتی ثابت و در فشار اتمسفریک با سیالکاری 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 ۵۳کیلوگرم

بر متر مربع ثانیه و شار حرارتی ۲۳ الی ۳۶کیلووات 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 همرکز عمودی در دبیهای جرمی پایین و محدوده جریان آرام بوده و اثر پارامترهایی مانند شار حرارتی و دبی جرمی بر ضریب انتقال حرارت پارامترهایی مانند شار حرارتی و دبی جرمی بر ضریب انتقال حرارت مادون سرد از لوله خارجی شفاف استفاده شده است. همچنین بهمنظور صحتسنجی نتایج آزمایشها، نتایج با رابطه *شاه*<sup>[12]</sup> 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.



**شکل ۱)** طرح شماتیک دستگاه آزمایش (الف؛ ۱- مخزن آب، ۲- پمپ، ۳-دبیسنج، ۴- پریهیتر، ۵- واپایشگر 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)

## ۲۲۴۸ مسعود یاراحمدی و همکاران .

برای رساندن دمای آب به حد مطلوب قبل از ورود به بخش آزمون از پیشگرمکن استفاده شده است، بهمنظور 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 وایایشگر دمای سه-زمانه با مدل امرن e5cc استفاده شده است. در قسمت ورودی و خروجی جریان آب به بخش آزمون از دو عدد حسگر پی تی ۱۰۰ بهمنظور اندازهگیری دمای سیال استفاده شده است. حسگر دمای ورودی از نوع دوبل بوده که قابلیت اتصال همزمان به دستگاه ثبت داده و واپایشگر را دارد. بهمنظور اندازهگیری فشار سیال در هنگام ورود و خروج از قسمت آزمایش از دو عدد فرستنده فشار ویکا از سری a10 با رنج کاری • تا ۱۰ بار استفاده شده است. با توجه به رنج محدودیت دمایی حسگرهای فشار (۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد) در قسمت خروجی بخش آزمون از یک عدد عنصر خنککننده ویکا با مدل ۹۱۰،۲۴ 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 ۲۰۰درجه سانتیگراد بالا برد. بهمنظور ثبت دادههای دمای حسگرهای پی تی ۱۰۰ از یک عدد دستگاه ثبت داده آدام ۶۰۱۵ 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 +۴۰۱۸ استفاده شده است. همچنین از یک عدد پمپ چرخ دنده از برند لانگر پمپ مدل WT3000-1FB با سرعت ۳۰۰ تا ۳۰۰۰دور بر دقیقه که توانایی پمپاژ سیال با دبی ۱۷۱ تا ۱۷۱۴میلیلیتر 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 خارجی۷/۵۰میلی متر و ضخامت ۱میلی متر و طول ۱/۵متر است. لوله خارجی از سه قطعه تشکیل شده است، در قسمت میانی لوله خارجی بهمنظور آشکارسازی جریان جوشش از لوله شفاف پیرکس به طول ۶۰سانتیمتر با قطر داخلی ۷۰/۶میلیمتر استفاده شده است. قسمت ورودی بخش آزمون بهمنظور توسعه یافتگی هیدرودینامیکی جریان سیال به طول ۵۰سانتیمتر در نظر گرفته شده است. قسمت انتهایی بخش آزمون به طول ۳۰سانتیمتر 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، عايقكارى شده است. بهمنظور تامين شار حرارتى يكنواخت و ثابت بخش آزمایش، داخل قسمت میانی لوله فولادی به طول ۶۰سانتیمتر المنت کار گذاشتهشده و فضای بین المنت و سطح

داخلی لوله بهمنظور انتقال شار حرارتی یکنواخت با اکسید منیزیم یر 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 بهصورت پیوسته به یکدیگر متصل میشوند و دارای قابلیت عبور سیال از میان حفرههای خود هستند. فوم فلزی به کاررفته از جنس نیکل با ۱۰ppi و تخلخل ۹۵% با قطر داخلی ۷۰/۶ و ضخامت ۶میلیمتر است. برای اندازه گیری دمای سطح داخلی لوله داخلی بخش آزمون از ۱۵ عدد ترموکوپل نوع k با محدوده اندازه گیری ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۱درجه سانتی گراد استفاده شده است. به منظور اندازه گیری دما در ۵ مقطع و در هر مقطع ۳ ترموکوپل نوع k با زوایای ۱۰۶درجه استفاده شده که با میانگین گیری میتوان دمای متوسط سطح داخلی لوله فولادی در هر مقطع را به دست آورد. به منظور ثبت داده های دمای ترموکوپل های نوع k از ۲ عدد دستگاه ثبت داده دادمهای دمای ترموکوپل های نوع k از ۲ عدد دستگاه ثبت داده داده مای دمای ترموکوپل های نوع k از ۲ عدد دستگاه ثبت داده دادم ۶۰۱۸ استفاده شده است که هر کدام از آنها دارای ۸ کانال



**شکل ۳)** فوم فلزی به کاررفته از جنس نیکل با ۱۰ppi و تخلخل ۹۵%

برای کنترل شار حرارتی اعمالشده از یک عدد تنظیمکننده ولتاژ با توانایی کنترل ولتاژ به صورت دستی از ۰ تا ۳۰۰ ولت، به همراه یک عدد تثبیتکننده برای ثابت نگهداشتن ولتاژ ورودی به تنظيم كننده ولتاژ استفاده شده است. جريان خروجى كاملا سینوسی تنظیمکننده ولتاژ، توان موثر پایداری ایجاد مینماید؛ لذا برای محاسبه توان حرارتی اعمالی میتوان به توان موثر آن اطمینان نمود. شار حرارتی اعمالشده طبق فرمول ۱ محاسبه مىشود:

$$Q_{\rm w} = \frac{VI}{\pi D_o L} \tag{1}$$

V و I بهترتیب اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت درون لوله و جریان الکتریکی را نشان میدهند. D<sub>o</sub> قطر خارجی و L طول گرم شده لوله داخلی است.

## محاسبات

ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی، h، از فرمول محاسبه مىشود:

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

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

$$T_{\rm w,o} = T_{\rm w,i} - \frac{qD_i}{2K} [ln \frac{D_o}{D_i}]$$
(\varepsilon)

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

$$T_{\rm b} = T_{\rm in} + \frac{\ddot{q}\pi D_0}{\dot{m}C_{\rm n}} Z \tag{(F)}$$

T<sub>in</sub> دمای سیال ورودی به بخش آزمون است.

شار حرارتی درفته شده سیال از فرمول زیر محاسبه می شود:  
$$\ddot{q} = \frac{\dot{m}C_p}{\pi D_o L} (T_{out} - T_{in})$$
 (۵)

ىود:

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

# آناليز عدم قطعيت

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 اندازه گیریشده از فرمول زیر محاسبه میشود:

$$u_{\mathcal{Y}}^2 = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) \tag{8}$$

Volume 20, Issue 9, September 2020

$$\frac{\partial \ddot{q}}{\ddot{q}} = \left[\left(\frac{\partial V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\partial D_o}{D_o}\right)^2 + \left(\frac{\partial L}{L}\right)^2\right] \tag{Y}$$

$$\frac{\partial h}{h} = \left[\left(\frac{\partial \ddot{q}}{L}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_W}{T \cdot T}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_b}{T \cdot T}\right)^2\right] \tag{A}$$

$$h$$
  $(T_{q}, T_{w}, T_{b}, T_{w}, T_{b}, T_{w}, T_{b})$ مقادیر بیشینه عدم قطعیت مولفههای مختلف آزمایش بهطور

خلاصه در جدول ۱ آورده شده است.

# جدول ۱) مقادیر عدم قطعیت مولفههای تاثیرگذار مساله

عدم قطعيت	مولفه
±∘/∘\	قطر لوله استیل (mm)
±١	طول لوله استیل (mm)
±°/°Q	قطر لوله شیشهای (mm)
%±•/\	شار جرمی
±°//	دما (°C)
%•/\	ولتاژ
%•/\	آمپر
%Δ	شار حرارتی
%Υ	ضريب انتقال حرارت محلى

# نتايج و بحث

# اعتبارسنجى

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:  $q = h_{\rm l}(T_{\rm w} - T_{\rm B}) + h_{\rm l}(\varphi_0 - 1)(T_{\rm w} - T_{\rm SAT})$ (٩) عبارت  $h_l(T_w - T_B)$  در معادله (۹) به انتقال حرارت جابه جایی و عبارت  $h_{\rm l}(\varphi_0-1)(T_{\rm w}-T_{\rm SAT})$  مربوط به انتقال حرارت جوشش هستهای است.  $h_l$  ضریب انتقال حرارت حالت تک فاز  $arphi_0$  است که از معادله *سایدر و تیت* $^{[22]}$  محاسبه می شود. پارامتر نیز با توجه به مقدار عدد جوشش بهصورت زیر تعریف می شود <sup>[21]</sup>:  $\varphi_0 = 230B0^{0.5}$  B0 > 0.3 × 10<sup>-4</sup> (10)  $\varphi_0 = 1 + 46 \mathrm{BO^{0.5}} \qquad \mathrm{BO} < 0.3 \times 10^{-4}$ (11)در این معادلات BO معرف عدد جوشش است که بهصورت زیر تعريف می شود:

$$BO = \frac{\ddot{q}}{Gh_{\rm fg}} \tag{1Y}$$

که  $\ddot{q}$  شار حرارتی گرفته شده سیال،  $\mathrm{G}$  شار جرمی و  $h_{\mathrm{fg}}$  آنتالپی  $\ddot{q}$ تبخير است.

$$G = \rho u$$
 (11°)

ضریب انتقال حرارت تک فاز در معادله *شاه*  $(h_{
m l})$  در جریان آرام از معادله *سایدر و تیت*<sup>[22]</sup> محاسبه می شود. رابطه سایدر و تیت برای جریان آرام و تک فاز به شرح زیر است:

$$NU_{\rm l} = 1.87 \left( Re Pr \frac{D}{L} \right)^{0.33} (\mu_{\rm b}/\mu_{\rm w})^{0.14} \tag{14}$$

بهترتیب لزجت سیال در دمای بالک و لزجت سیال در  $\mu_{
m w}$  ,  $\mu_{
m b}$ دمای دیواره است.

**Modares Mechanical Engineering** 

#### ۲۲۵۰ مسعود یاراحمدی و همکاران .

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

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \tag{10}$$

$$Pr = \frac{\vartheta}{\alpha}$$
(15)

که μ ρ، و u بهترتیب بیانگر چگالی، لزجت و سرعت سیال و همچنین θ لزجت سینماتیکی و α 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 جریانی مادون سرد<sup>[21]</sup>

ṁ	Re	$\ddot{\mathbf{q}} \left(\frac{\mathbf{kw}}{\mathbf{m}^2}\right)$	درصد خطا <sup>[21]</sup>
۰/۰۱۲	۳۱۳	١٢	۱۴
o/oY	KN8	77	۲۳
۰/۰۲۸۶	554	٣٠	١٧

#### 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 ۲۰/۰۰، ۲۰/۰ و ۲۸۶kg/s در مکان محوری ثابت z=۴۵cm 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، میتر شار حرارتی باعث مستههای 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 شروع دو شاه در طی آزمایشها وقوع ONB با مشاهده بصری تشخیص داده شده است.

نمودار ۲، تغییرات ضریب انتقال حرارت جریان برای دبی جرمی vorkg/s/ه در مکان محوری ثابت z=۴۵cm را تحت شارهای حرارتی مختلف در دمای مادون سرد ورودی C°۵۰ را نشان میدهد که ضریب انتقال حرارت به شدت تابعی از شار حرارتی است. در 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 بهدلیل پایینبودن دمای اطراف بهطور 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

ماهنامه علمی- پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس

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.



(ج)

**نمودار ۱)** منحنیهای جوشش برای دمای مادون سرد ورودی C°۵۰ بین دو لوله هممرکز عمودی برای دبیهای جرمی الف) ۱۲kg/s/۰۰، ب) ۲kg/s۰۰۰، ج) z=۴۵cm در مکان محوری ثابت z=۴۵cm



**نمودار ۲)** تغییرات ضریب انتقال حرارت جریان برای دبی جرمی kg/s%۰۰ در مکان محوری ثابت z=٤٥cm را تحت شارهای حرارتی مختلف

اثر افزایش شار حرارتی بر میزان تولید حباب روی سطح در جوشش مادون سرد در دبی جرمی ۲kg/s منشان 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=٤٥cm در دمای مادون سرد ورودی ۵°۵۰ را نشان میدهد. با کاهش دبی جرمی در محدوده ٥/٥١٢kg/s -٥/٥٢٦kg/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 تقریبا 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 تقریبا 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 ۲۰/۰ و ۲۸۶kg/s در مکان محوری ثابت z=۴۵cm در دمای مادون سرد ورودی ۵۰۵ 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 ۲۸۶kg/s مره برای دمای مادون سرد ورودی ۵۰۵۵ نشان میدهد. با قراردادن فوم فلزی در در بین

بررسی تجربی تاثیر ماده متخلخل فلزی بر انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد در بین دو لوله هممرکز عمودی ۲۲۵۱

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%

اثر استفاده از فوم فلزی نیکل بر رفتار تولید حباب روی سطح در جوشش مادون سرد در دبی جرمی ۲kg/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).



**شکل ۴)** اثر افزایش شار حرارتی بر رفتار حباب روی سطح در جوشش مادون سرد در دبی جرمی ۲kg/s%۰۰ و دمای مادون سرد ورودی ۵۰۵°



**نمودار ۳)** تغییرات ضریب انتقال حرارت برای دبیهای جرمی ۱۲kg/s، ۰/۰۲kg/s، ۰/۰۲kg/s، تحت شارهای حرارتی مختلف بین دو لوله هممرکز عمودی در مکان محوری ثابت z=۴۵cm

۲۲۵۲ مسعود یاراحمدی و همکاران .



**نمودار ؛)** تاثیر استفاده از فوم فلزی نیکل بر منحنیهای جوشش برای دمای مادون سرد ورودی C°۵۰ در بین دو لوله هممرکز عمودی برای دبیهای جرمی v/۲kg/s،۰/۰۲kg/s ۰/۰۲kg/s در مکان محوری ثابت z=۴۵cm



**نمودار 0)** تاثیر استفاده از فوم فلزی نیکل بر ضریب انتقال حرارت جریان جوشش مادون سرد برای دمای مادون سرد ورودی C°۵۰ در بین دو لوله هممرکز عمودی برای دبی ۲۸۶kg/s% در مکان محوری ثابت z=۴۵cm



# نتيجهگيرى

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 سیالکاری 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 ۰/۰۲۸٦kg/s را شامل می شود، نشان می دهد که در طول تمام مراحل آزمایش انتقال حرارت از دو مکانیسم جابجایی اجباری و جوشش جریانی تشکیل مییابد. ضریب انتقال حرارت به شدت تابعی از شار حرارتی است. در واقع با زیادشدن شار حرارتی، ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد. همچنین با کاهش دبی جرمی در محدوده ذکرشده در ناحیه جوشش مادون سرد، ضریب انتقال حرارت تا ۳۰% افزایش مییابد. همچنین استفاده از محیط متخلخل در محدوده ذکرشده، 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، تشکرمی شود.

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

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

**سهم نویسندگان:** مسعود یاراحمدی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/ پژوهشگر اصلی (۳۲%)؛ 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 قطرلوله، m
- Dh قطر هیدرولیکی، m
  - L طول، m
  - <del>kw</del> شار حرارتی، q
- Z فاصله محوری، m
- kg m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> شار جرمی، G
  - kg s<sup>-1</sup> دبی جرم، أ
- $W m^{-2}k^{-1}$  ضريب انتقال حرارت h
  - سرعت m s<sup>-1</sup> سرعت
  - BO عدد جوشش
  - Pr عدد پرانتل

10- Zhu X, Bi Q, Yang D, Chen T. An investigation on heat transfer characteristics of different pressure steamwater 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  j kg <sup>-1</sup>	$h_{fg}$
ضریب نفوذ گرمایی m²s <sup>-1</sup>	α
لزجت سينماتيكى $artheta$ n	$n^2 s^{-1}$
لزجت kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	μ
چگالی kg m <sup>-3</sup>	ρ
υ	زيرنويس
بالک	b
i داخلی	
خارجى	0
ورودی	in
خروجى	out
ديواره	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 twophase 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