بررسی تجربی و عددی ضریب انتقال حرارت و افت فشار جریان جوشش مادون سرد نانوسیال در لوله افقی

سهیل شریفی1، محمد­رضا علی گودرز2\*

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

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

\* تهران، صندوق پستی 1678815811، maligoodarz@sru.ac.ir

چکیده

امروزه پدیده­ی جوشش و همچنین افزودن ذرات نانو به سیال خالص، به دلیل افزایش قابل توجهی که در ضریب انتقال حرارت جریان ایجاد می­کند، اهمیت زیادی نزد محققان در حوزه­های مختلف از­جمله صنایع نفت، پتروشیمی و نیروگاهی پیدا کرده است. در این پژوهش ابتدا به صورت تجربی به بررسی ضریب انتقال حرارت و افت فشار سیال خالص و نانوسیال در جریان جوشش مادون سرد پرداخته شد. بدین منظور یک دستگاه آزمایش طراحی و ساخته شد. سپس با شبیه سازی هندسه­ی مقطع آزمایش، به کمک دینامیک سیالات محاسباتی، آزمایش­ها برای سیال خالص و نانوسیال شبیه سازی شد. در این تحقیق از سیال خالص آب و نانوسیال اکسید آلومینیوم بر پایه­ی آب استفاده شد. نتایج آزمایش­های تجربی نشان داد که افزودن ذرات نانو به سیال پایه باعث افزایش ضریب انتقال حرارت و در عین حال افزایش افت فشار می­شود. همچنین با افزایش شار حرارتی ثابت وارد بر جداره­ی لوله، مقدار ضریب انتقال حرارت افزایش قابل توجهی پیدا کرد. افزایش عدد رینولدز نیز، به مقدار اندکی باعث افزایش ضریب انتقال حرارت سیال خالص و نانوسیال شد. در شبیه سازی عددی برای تحلیل میدان جریان از معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای هر فاز، در دیدگاه اویلرین- اویلرین برای شرایط جوشش استفاده شده است. نتایج شبیه سازی عددی تطابق خوبی با نتایج تجربی داشتند.

**کلی**د‌واژگ**ان**

ضریب انتقال حرارت، جوشش، نانوسیال، شار حرارتی ثابت، دینامیک سیالات محاسباتی

Experimental and numerical investigation of heat transfer coefficient and pressure drop of subcooled boiling flow of nanofluid in the horizontal tube

Soheyl Sharifi1, Mohamadreza Aligoodarz2\*

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

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

\* P.O.B. 1678815811 Tehran, Iran, [maligoodarz@sru.ac.ir](mailto:maligoodarz@sru.ac.ir)

Abstract

Nowadays boiling phenomenon, as well as, the addition of nanoparticles to pure fluid has been an important issue in various fields such as petroleum industries and nuclear power plants due to enhancement of the total heat transfer coefficient. In this study, firstly, experimentally the heat transfer coefficient and pressure drop of pure fluid and nanofluid during subcooled boiling were investigated. A test setup was designed and built for this purpose. Then, by modeling the geometry of the test section, the experiments were simulated for pure fluid and nanofluid using computational fluid dynamics (CFD). In this study, water pure and water based aluminum oxide nanofluid were used. Experimental results showed that adding nanoparticles to the base fluid increases the heat transfer coefficient and at the same time increases the pressure drop. Also, by increasing the constant heat flux on the tube wall, the amount of heat transfer coefficient increased significantly. Increasing Reynolds number also slightly increased the heat transfer coefficient of pure fluid and nanofluid. In the numerical simulation for the flow field analysis the equations of continuity, momentum and energy for each phase are used in the Eulerian-Eulerian perspective for the boiling conditions. The numerical simulation results were in good agreement with the experimental results.

Keywords

Heat Transfer Coefficient, Boiling, Nanofluid, Constant Heat Flux, CFD

1. مقدمه

امروزه در صنایعی مانند نفت، پتروشیمی و نیروگاه­ها که ضرایب انتقال حرارت بالا در مبدل­های حرارتی مورد نیاز است، رخ دادن پدیده­ی جوشش مادون سرد به واسطه­ی افزایش قابل ملاحظه­ای که در ضرایب انتقال حرارت اعمال می­کند، امری مطلوب به حساب می­آید. با این وجود محققان با انجام آزمایش­های مختلف به این نتیجه رسیده­اند که حضور ذرات معلق با ابعاد نانو در سیال پایه با غلظت­های مشخص می­تواند باعث بهبود ضرایب انتقال حرارت شود.

در این تحقیق به صورت آزمایشگاهی و عددی اثر افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم با غلظت مشخص به سیال پایه­ی آب مورد بررسی قرار داده شده و تاثیر آن در انتقال حرارت همراه با جوشش مورد تحلیل قرار گرفته است. در ادامه به فعالیت­های انجام شده در این زمینه اشاره می­شود.

کندیکار [1] یک الگوی جدید جریان جوشش را با به تصویر کشیدن روابط میان ضریب انتقال گرما، کیفیت، شار گرمایی و شار جرمی برای سیال های مختلف در حالت ناحیه­های زیر سرد و جریان جوشش توسعه داد. مشخص شد که روند مشاهده شده در داده­های آزمایشگاهی و روابط برای آب و مبرد می­تواند در استخراج الگوی جریان جوشش استفاده شود. گوپتا و همکاران [2] یک مطالعه تجربی برای تعیین ضریب انتقال گرمای جریان جوشش همرفت اجباری انجام دادند. آن­ها بسته لوله­های افقی را در یک ستون عمودی منظم در یک کانال بزرگ تحت سرعت­های عمودی کم قرار دادند و در فشار اتمسفر در حالتی که آب اشباع تقطیر شده آزمایش انجام دادند.

کومار و همکاران [3] مطالعه­ای تجربی روی افزایش مقدار انتقال گرمای جوشش استخری هسته­ای تحت گرمای لوله­های مسی انجام دادند. ریباتسکی و همکاران [4] یک مطالعه تجربی انجام دادند. آن­ها جوشش هسته­ای را روی یک آرایه­ی عمودی از لوله­های افقی بررسی کردند. همچنین یک رابطه­ی کلی برای پیش­بینی ضریب انتقال گرمای جوشش هسته­ای در حالت بیان شده پیشنهاد دادند. رابطه­ی جدید به خوبی با داده­های مستقل از مقاله مقایسه شد. صادقیانی و کوثر [5] یک مطالعه­ی تجربی و عددی انجام دادند. آن­ها تاثیر قطر و طول روی ضریب انتقال گرمای جوشش زیر سرد را در یک میکرو­لوله افقی بررسی کردند. آن­ها پی بردند، با افزایش قطر میکرو­لوله ضریب انتقال گرما کاهش و با افزایش طول آن، ضریب انتقال گرما افزایش می­یابد. همچنین نتایج عددی بدست آمده با نتایج تجربی تطابق خوبی داشتند.

بعلاوه در زمینه­ی عددی نیز کارهای بسیاری انجام شده است. ترایگوسن و همکاران [6] مدل جریان چند فاز اویلر روی فرآیند جوشش در یک لوله­ی مارپیچ اعمال کردند. شبیه سازی جریان در لوله­ی عمودی در کد cfx5 انجام شد. نتایج بدست آمده مشابهت بسیار خوبی با نتایج تجربی [7] داشتند. کرپر و همکارانش [8] قابلیت کدهای دینامیک سیالات محاسباتی را به منظور مدل کردن جریان دو فازی نشان دادند. آن­ها جریان جوشش مادون سرد را در یک کانال مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که مدل سهم­بندی شار حرارتی اعمالی به دیواره در کنار سایر معادلات میدانی قابلیت محاسبه کردن مقدار متوسط حجم بخار را در درون کانال داشته و تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی در این کار دیده می­شود. در این تحقیق با تحلیل توزیع دما در مناطق مختلف، موقعیت­های احتمالی که پدیده­ی خشک شدگی سطح انتقال حرارت را به دنبال خواهد داشت، شناسایی و مورد ارزیابی قرار دادند.

در کنار فعالیت­های انجام شده در زمینه­ی شبیه­سازی میدان جریان همراه با جوشش، فعالیت­های متنوعی نیز در زمینه­ی خصوصیات ترموهیدرولیکی نانوسیال و تاثیر آن در جریان تک فاز و در سال­های اخیر میدان جریان دو­فازی همراه با جوشش انجام شده است. امین فر و همکاران [9] جوشش جریانی نانوسیال را با استفاده از دیدگاه دو­فازی اویلرین -اویلرین مدل­سازی کردند. آن­ها در این مدل­سازی از نانوذرات مغناطیسی استفاده کردند. همچنین با اعمال میدان مغناطیسی تاثیر میدان مغناطیسی در جریان­های جوشش مادون سرد را مورد بررسی قرار دادند. بودوه و همکاران [10] با استفاده از کار آزمایشگاهی به این نتیجه رسیدند که شار گرمای محلی، کیفیت بخار محلی و ضریب انتقال گرمای نانوسیال با افزایش غلظت نانوسیال در جوشش افزایش می­یابد. هندرسون و همکاران [11] جوشش جریان نانوسیالی با سیال پایه مبردی را به طور آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آن­ها مشاهده کردند که اگر نانوذرات به خوبی در سیال پراکنده شوند، ضریب انتقال حرارت را افزایش می­دهند. برخی از محققان نیز با مطالعه بر روی جوشش نانوسیال به این نتیجه رسیدند که تزریق نانوذرات در مواردی موجب افزایش ضریب انتقال گرما در جریان جوشش می­شود [15-10]. چهاد و همکاران [14] روابط مختلفی را برای به­دست آوردن ضریب انتقال حرارت در جریان جوشش و در کانال­هایی با شکل متفاوت جمع­آوری کردند. آن­ها همچنین در یک کار آزمایشگاهی بیان کردند که در جوشش نانوسیال، ضریب انتقال حرارت محلی و شار حرارتی محلی تحت تاثیر غلظت نانوذرات قرار می­گیرند.

2- بخش تجربی

2-1- تهیه نانوسیال

دو روش برای تولید نانوسیالات بکار گرفته می­شود، روش تک مرحله­ای و روش دو مرحله­ای. روش دو مرحله­ای برای اکسید نانوذرات بهتر عمل کرده، در حالی که برای نانوذرات فلزی نامناسب­تر می­باشد [16]. در روش دو مرحله­ای نانوذرات ابتدا تولید و سپس در سیال پایه پخش می­شوند. عموما برای کاهش انباشتگی نانوذرات و برای توزیع بهتر و منظم­تر آن­ها در سیال پایه از تجهیزات فراصوتی استفاده می­شود. برای جلوگیری از تغییر خواص حرارتی نانوسیال، هیچگونه ماده­ی اضافی یا پایدار­کننده به سیال اضافه نشده است. نانوذرات استفاده شده در این کار اکسید آلومینیوم است که مشخصات آن در جدول آورده شده است. همچنین از سیال پایه آب برای این کار استفاده شده است.

نانوسیال مورد نظر از دانشگاه صنعتی شریف خریداری شده و در آزمایشگاه همان دانشگاه تولید و خواص آن اندازه­گیری شده است. قطر نانوذرات اکسید آلومینیوم 20 نانومتر و درصد حجمی 0.05 درصد است. در جدول 1 خصوصیات نانوسیال استفاده شده در آزمایش آورده شده است.

2-2- دستگاه آزمایش

در شکل 1 شماتیک و در شکل 2 تصویر سیستم آزمایشگاهی ساخته شده به منظور بررسی افت فشار و ضریب انتقال حرارت جریان اجباری جوشش نانوسیال اکسید آلومینیوم بر پایه­ی آب در حال جریان از طریق لوله مدور افقی تحت شرایط مرزی شار حرارتی ثابت دیواره در رژیم جریان آشفته نشان داده شده است.

این دستگاه شامل بخش آزمایش، پمپ، مخزن سیال، دیمر حرارتی، سیستم چگالنده، آمپر­سنج، روتامتر (دبی سنج )، فشار­سنج، ترمومتر و شیر بای پس است. بخش آزمایش از یک لوله مسی صاف به قطر داخلی 26 میلی­متر، قطر خارجی 27 میلی­متر و طول 800 میلی­متر ساخته شده است. تمام طول بخش آزمایش با استفاده از المنت حرارتی متصل به دیمر حرارتی با قابلیت ایجاد توان 5000 وات به منظور تولید شار حرارتی ثابت پوشش داده شده است. همچنین به منظور حداقل کردن افت حرارت از لوله به محیط، تمامی بخش آزمایش بوسیله عایق پشم شیشه پوشیده شده است. به منظور اندازه­گیری دماهای دیواره خارجی لوله آزمایش، پنج سنسور دمایی از نوع k کالیبره شده به فاصله مساوی از یکدیگر و در مکان­های 30، 40، 50، 60 و 70 سانتی­متری از ورودی لوله نصب شده­اند. فشار و دماهای ورودی و خروجی سیال به بخش آزمایش نیز به کمک دو فشار­سنج و دو ترمومتر نصب شده در ورودی و خروجی لوله آزمایش اندازه­گیری می­شود.

**جدول 1** خواص ترموفیزیکی نانوسیال

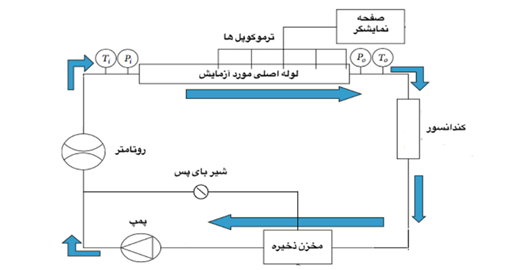
**Table 1** Thermophysical properties of nanofluid

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| ویسکوزیته | چگالی | ظرفیت گرمایی ویژه | رسانایی گرمایی |  |
| (kg / m s) | (kg / | (J / kg k) | (w / m k) |  |
| 0.0005928 | 1117.02 | 4024.85 | 0.7635 | نانوسیال |
|  |  |  |  |  |

از پمپ گریز از مرکز برای به حرکت در­آوردن نانوسیال در سیکل استفاده شده است. ابتدا نانوسیال موجود در مخزن توسط پمپ به گردش درآمده و با تنظیم شیر تعبیه شده در مسیر روتامتر دبی حجمی مورد­نظر ایجاد می­شود و با عبور از فشار­سنج و ترمومتر، فشار و دمای ورودی به لوله آزمایش ثبت می­شود.

با روشن کردن دیمر و تنظیم جریان عبوری از آن، شار حرارتی ثابت مورد­نظر به دیواره لوله آزمایش اعمال می­شود. دماهای دیواره لوله از طریق سنسور دما به صفحه نماشگر دما منتقل شده و ثبت می­شوند. با خروج نانوسیال از لوله و ثبت فشار و دمای خروجی، وارد بخش چگالنده شده و با کاهش دما، بخار تبدیل به مایع شده و دوباره وارد مخزن سیال می­شود. مدت زمان رسیدن

دما­ها و فشار­ها به حالت پایدار برای هر آزمایش حدود بیست دقیقه بود. همچنین بعد از هر آزمایش با استفاده از محلول اسید سولفوریک و آب مقطر تمامی مجاری را تمیز کرده تا هر­گونه اﮐﺴﯿﺪاﺳﯿﻮن و ﻫر­ﮔﻮﻧﻪ زاﺋﺪه ﺧﺎرج شود. این عمل در دمای 90 درجه سانتی­گراد و فشار 1 اتمسفر انجام می­گیرد.



**Fig. 1** schematic of testing setup

**شکل 1** شماتیک دستگاه آزمایش



**Fig. 2** Photograph of test setup

**شکل 2** تصویر دستگاه آزمایش

3- بخش عددی

معادلات جوشش سیال خالص در دیدگاه اویلرین- اویلرین[[1]](#footnote-1) در زیر آورده شده است. در این دیدگاه آب سیال پیوسته و بخار سیال پراکنده در نظر گرفته می­شود.

معادله پیوستگی جرم برای فاز مایع [17]

معادله پیوستگی جرم برای فاز بخار [17]

معادله مومنتوم برای فاز مایع [17]

معادله مومنتوم برای فاز بخار [17]

معادله انرژی برای فاز مایع [17]

معادله انرژی برای فاز بخار [17]

در تمامی این معادلات، ، ، ، ، و به ترتیب چگالی فاز مایع، چگالی فاز بخار، کسر حجمی فاز مایع، کسر حجمی فاز بخار، سرعت مایع و سرعت بخار هستند. در معادله و در معادله لزجت دینامیکی فاز مایع و فاز بخار می­باشند. ، ، و در معادله و معادله آنتالپی مایع، آنتالپی بخار، رسانایی گرمایی مایع و رسانایی گرمایی بخار هستند.

در معادله ، نیرویی است که فاز بخار بر فاز مایع وارد می­کند و نیروی اعمال شده از فاز مایع به فاز بخار به صورت نشان داده می­شود و بین این دو نیرو رابطه­ی مقابل برقرار است - =

*در معادلات فوق، ، آهنگ انتقال جرم بین دو فاز در مایع مادون سرد می­باشد که ناشی از تقطیر است* [17].

در معادله ، h و به ترتیب ضریب انتقال گرما بین دو فاز و سطح مشترک دو فاز بر واحد حجم می­باشند. آهنگ تولید بخار است که به صورت جرم کلی حباب­های جدا شده از سطح دیوار تحت شار گرمایی در نظر گرفته می­شود و به صورت معادله محاسبه می­شود. در معادله ، نشان­دهنده­ی گرمای نهان تبخیر فاز مایع است [17].

در جریان­های چند فازی هر فاز بر فاز دیگر تاثیر می­گذارد و این بر­همکنش نیرو­هایی بین دو فاز ایجاد می­کند. این نیرو­ها شامل نیرو­های پسا و نیرو­های غیر­پسا می­شود. برای محاسبه­ی نیروی پسا بین دو فاز از مدل ایشی زوبر استفاده شد. نیرو­های غیر­پسا شامل نیرو­های برآ[[2]](#footnote-2)، روانکاری دیواره[[3]](#footnote-3) و پراکندگی آشفتگی[[4]](#footnote-4) می­باشد.

برای محاسبه­ی نیروی آشفتگی طبق مرجع [8]، مدل نیروی متوسط پسای فیور[[5]](#footnote-5) انتخاب شد.

در معادله ، ضریب نیروی پسا حباب، لزجت گردابی فاز مایع و عدد اشمیت آشفتگی در واحد کسر حجمی فاز پراکنده است.

*نیروی روانکاری دیواره تمایل دارد که حباب­ها را از دیواره دور کند. این نیرو در کار حاضر با استفاده از رابطه آنتال* [18] *محاسبه شده است.*

*در رابطه ، n بردار عمود بر دیواره کانال و سرعت نسبی بین دو فاز می­باشد. و به ترتیب 0.05 – و 0.01 است.*

نیروی برآ به طور کلی با استفاده از رابطه بیان می­شود [8].

در مدل­سازی حاضر، که ضریب برآ می­باشد به صورت مقدار ثابت 0.05 در­نظر گرفته شده است. انتقال گرما در فاز مایع با استفاده از مدل رنز- مارشال[[6]](#footnote-6) محاسبه شد. شار گرمایی در جریان جوشش مادون سرد را متشکل از شار گرمایی جابجایی جریان مایع تک­فاز، شار گرمای ناشی از تبخیر و شار گرمای ناشی از رسانش گرمایی گذرا ( شار گرمای جدا شدن) در­نظر می­گیرند.

انتقال گرما در جریان تک­فاز بدون در­نظر گرفتن فاز بخار را شار گرمایی جابجایی آشفته می­نامند که با استفاده از رابطه محاسبه می­شود [8].

در رابطه ، دمای بی­بعد و a در رابطه ضریب تاثیر حباب می­باشد که مقدار 2 برای آن در­نظر گرفته شده است.

شار گرمای ناشی از تبخیر با استفاده از رابطه محاسبه می­شود [8].

در این رابطه، شار جرمی حباب­هایی است که در نقاط جوانه­زنی شکل می­گیرند. رابطه­ی این شار در معادله آورده شده است [8].

زمانی­که حباب از دیواره لوله جدا می­شود و فاصله­ی کمی با دیواره دارد، سیال بین حباب و دیواره قرار می­گیرد، اما این فاصله به اندازه­ای کم می­باشد که نمی­توان گفت که بین دیواره و سیال انتقال گرمای جابجایی وجود دارد، چون عملا می­توان فاز مایع یا همان سیال را در این ناحیه ساکن فرض کرد. انتقال گرمایی که در این حالت بین این سیال و دیواره می­باشد را رسانش گرمایی گذرا می­نامند. این شار گرمایی با استفاده از رابطه بیان می­شود [8].

در جریان جوشش مادون سرد سیال، دمای توده سیال از دمای اشباع سیال در فشار محلی، کمتر می­باشد. با اعمال شار گرمایی به دیواره، دمای سیال در نزدیکی دیواره افزایش می­یابد و هنگامی­که دمای سیال به دمای اشباع می­رسد، تبخیر اتفاق افتاده و حباب­ها در محل­هایی در دیواره لوله که مکان­های جوانه­زنی نامیده می­شوند، شروع به شکل­گیری می­کنند؛ به این ترتیب جوشش هسته­ای آغاز می­شود. با افزایش میزان تبخیر، حباب­ها بزرگ­تر شده و هنگامی­که به اندازه بیشینه خود می­رسند از دیواره جدا شده و به­جای آن­ها حباب دیگری شروع به شکل­گیری می­کند. در روابط فوق بیانگر چگالی نقاط جوانه­زنی فعال و *f* فرکانس جدایش حباب­ها می­باشد.

چگالی نقاط جوانه­زنی به زبری سطح و یا به عبارت دیگر به تعداد حفره­های روی سطح، ترشوندگی سطح و مافوق گرم شدن دیواره بستگی دارد. برای محاسبه چگالی نقاط جوانه­زنی از رابطه­ی تجربی لیمارت و چاولا استفاده شده است [19].

قطر جدایش حباب طبق رابطه­ای از تولوبینسکی و کوستنچوک محاسبه می­شود [20].

این رابطه برای جوشش آب استخراج شده است و بالاترین حد آن ( 1.4 mm= ( است. فرکانس جدایش حباب با استفاده از رابطه­ی کول به­صورت رابطه می­باشد [21].

مدت زمانی که طول می­کشد تا اینکه یک حباب از دیواره جدا شود و حباب دیگری در همان مکان ظاهر شود، زمان انتظار حباب نامیده می­شود که با استفاده از رابطه­ی کرل و پادوسکی به­صورت رابطه می­باشد [22].

1-3- روابط مربوط به نانوسیال

برای شبیه­سازی اثرات نانو­ذرات در سیال، فرض بر این است که ذرات به­طور یکنواخت در کل سیال مخلوط شده­اند و به­صورت یک فاز همگن در­نظر گرفته می­شود. خواص نانوسیال را می­توان با متوسط­گیری از خواص سیال پایه و نانوذره، به­صورت معادلات تا به­دست آورد که در آن­ها غلظت حجمی نانوذرات است [23].

جدول­ 2 خصوصیات ترموفیزیکی نانوذره­ی اکسید آلومینیوم و سیال پایه مورد استفاده در این تحقیق را در فشار 1 اتمسفر و دمای 360 کلوین نشان می­دهد.

**جدول 2** خواص ترموفیزیکی آب و نانوذره

**Table 2** Thermophysical properties of water and nanoparticle

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| ویسکوزیته | چگالی | ظرفیت گرمایی ویژه | رسانایی گرمایی |  |
| (kg / m s) | (kg | (J / kg k) | (w / m k) |  |
| - | 3880 | 773 | 36 | اکسید آلومینیوم |
| 0.00032 | 967 | 4205 | 0.6655 |  |
|  |  |  |  | آب |

**4- نتایج**

**1-4- نتایج تجربی**

فرآیند انتقال حرارت جوششی شامل مجموعه ای از فرآیند­های انتقال حرارتی، شامل هدایت حرارتی در لایه مایع مجاور سطح جوشش، رشد و جا­به­جایی حباب­ها و سیال می­باشد، لذا ضریب انتقال حرارت جوششی به عوامل مختلفی چون خواص ترموفیزیکی نانوسیال، خواص سطح جوشش و واکنش بین سطح و سیال بستگی دارد.

از آنجا که ضریب هدایت گرمایی سیال در تبخیر میکرولایه زیر حباب و تشکیل لایه مرزی دمایی اطراف محل تشکیل حباب نقش بسیار مهمی را در انتقال حرارت جوششی ایفا می­کند، می­تواند موجب بهبود انتقال حرارت جوششی شود، از طرفی وجود نانوذرات انتقال حرارت جابه­جایی را در سیال کنار دیواره از طریق افزایش جابه­جایی حباب­ها، جابه­جایی خود این ذرات و توربولانس سیال، افزایش می­دهد. ولی این ذرات حین جوشش روی سطح می­نشینند، این ذرات به دام افتاده، خصوصیات سطح را تغییر داده و نقاط فعال هسته­زایی را کاهش می­دهند. بنابراین هدایت حرارتی توسط نانوذرات را تحت­ الشعاع قرار می­دهند. پس می­توان گفت که جوشش نانوسیالات رقابتی بین دو پدیده­ی افزایش انتقال حرارت ناشی از افزایش هدایت گرمایی، لزجت، جابه­جایی و توربولانس سیال، و کاهش انتقال حرارت ناشی از پر شدن منافذ سطح به وسیله نانوذرات و کم شدن تعداد نقاط فعال هسته­زایی است. نتایج نشان داده است که در برخی از آزمایش­ها، عامل افزایشی بر عامل کاهشی غلبه کرده و در بعضی برعکس این موضوع اتفاق افتاده است.

ضریب انتقال حرارت، *h*، با توجه به قانون سرمایش نیوتن به صورت رابطه محاسبه می­شود.

که شار حرارتی از حاصل­ضرب جریان الکتریکی و ولتاژ (*V \* I*) به­دست می­آید. دمای سطح لوله، ، از میانگین دمای سنسور­های دما، و دمای بالک سیال، ، با استفاده از موازنه انرژی به­دست می­آید.

شکل 3 نمودار ضریب انتقال حرارت بر حسب شار حرارتی را برای آب خالص و نانوسیال اکسید آلومینیوم بر پایه آب در رینولدز 17500 نشان می­دهد. مشاهده می­شود با افزودن ذرات نانو به آب، ضریب انتقال حرارت افزایش یافته و این افزایش در شار­های حرارتی بالا­تر بیش­تر به چشم می­خورد. همچنین نتایج نشان می­دهد هم برای نانوسیال و هم برای آب خالص، با افزایش شار حرارتی، ضریب انتقال حرارت افزایش می­یابد.

شکل 4 نمودار ضریب انتقال حرارت بر حسب عدد رینولدز را برای آب خالص و نانوسیال اکسید آلومینیوم بر پایه آب در شار حرارتی 55 kw/ نشان می­دهد. همان­طور که از نمودار پیداست، ضریب انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه افزایش پیدا کرده است. همچنین با افزایش عدد رینولدز، ضریب انتقال حرارت به مقدار ناچیزی افزایش یافته است.

شکل 5 نمودار افت فشار بر حسب شار حرارتی را برای آب و نانوسیال در رینولدز 17500 نشان می­دهد. مشاهده می­شود که افزودن ذرات نانو به آب، موجب افزایش افت فشار می­شود. همچنین هم برای آب خالص و هم برای نانوسیال، افزایش شار حرارتی موجب کاهش افت فشار می­شود.



**Fig. 3** Variation of heat transfer coefficient of water and nanofluid with heat flux

**شکل 3** تغییرات ضریب انتقال حرارت با شار حرارتی برای آب و نانوسیال



**Fig. 4** Variation of heat transfer coefficient of water and nanofluid with Reynolds number

**شکل 4** تغییرات ضریب انتقال حرارت با عدد رینولدز برای آب و نانوسیال

شکل 6 نمودار افت فشار بر حسب عدد رینولدز را برای آب و نانوسیال در شار حرارتی نشان می­دهد. در این حالت نیز، افزودن ذرات نانو موجب افزایش افت فشار شده است. همچنین با افزایش عدد رینولدز، افت فشار افزایش یافته است.



Fig. 5 Variation of pressure drop of water and nanofluid with heat flux

شکل 5 تغییرات افت فشار با شار حرارتی برای آب و نانوسیال



Fig. 6 Variation of pressure drop of water and pressure drop with Reynolds number

شکل 6 تغییرات افت فشار با عدد رینولدز برای آب و نانوسیال

2-4- نتایج عددی

در بخش عددی، هندسه بخش آزمایش که یک لوله از جنس مس با طول 800 میلی­متر و قطر داخلی 26 میلی­متر و قطر خارجی 27 میلی­متر است، با استفاده از نرم افزار گمبیت رسم و مش­بندی شد و سپس در نرم افزار فلوئنت شبیه سازی انجام شد. سیال کاری آب و نانوسیال است که در دمای 87 درجه سانتی­گراد، محدوده عدد رینولدز 25000-12500 و محدوده شار حرارتی وارد لوله می­شود.

لازم به ذکر است در تمام محاسبات صورت گرفته سعی شده با تنظیم شبکه در نزدیکی دیواره با در نظر گرفتن میزان در محدوده­ی 75 تا 150 و همچنین با انجام تنظیمات مناسب به ویژه در مجزا­سازی ترم­های مختلف اعم از جابه­جایی و پخش در معادلات میدانی، در کنار انتخاب مناسب مدل­های انتقال حرارت، جرم و سایت­های تشکیل هسته، حداکثر میزان خطا برای متغیر­های میدان جریان دو فازی شامل جوشش از مرتبه باشد.

شکل 7 نمودار ضریب انتقال حرارت بر حسب شار حرارتی را برای آب خالص و نانوسیال اکسید آلومینیوم بر پایه آب در رینولدز 17500 نشان می­دهد. مشاهده می­شود با افزودن ذرات نانو به آب، ضریب انتقال حرارت افزایش یافته است. همچنین نتایج نشان می­دهد هم برای نانوسیال و هم برای آب خالص، با افزایش شار حرارتی، ضریب انتقال حرارت افزایش می­یابد.

شکل 8 نمودار ضریب انتقال حرارت بر حسب عدد رینولدز را برای آب خالص و نانوسیال اکسید آلومینیوم بر پایه آب در شار حرارتی 55 kw/ نشان می­دهد. همان­طور که از نمودار پیداست، ضریب انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه افزایش پیدا کرده است. همچنین با افزایش عدد رینولدز، ضریب انتقال حرارت در بعضی حالات ثابت و در بعضی حالات به مقدار ناچیزی افزایش یافته است.

شکل 9 نمودار افت فشار بر حسب شار حرارتی را برای آب و نانوسیال در رینولدز 17500 نشان می­دهد. مشاهده می­شود که افزودن ذرات نانو به آب، موجب افزایش افت فشار می­شود. همچنین هم برای آب خالص و هم برای نانوسیال، افزایش شار حرارتی موجب کاهش افت فشار می­شود.



**Fig. 7** Variation of heat transfer coefficient of water and nanofluid with heat flux

**شکل 7** تغییرات ضریب انتقال حرارت با شار حرارتی برای آب و نانوسیال



**Fig. 8** Variation of heat transfer coefficient of water and nanofluid with Reynolds number

**شکل 8** تغییرات ضریب انتقال حرارت با عدد رینولدز برای آب و نانوسیال



Fig. 9 Variation of pressure drop of water and nanofluid with heat flux

**شکل 9** تغییرات افت فشار با شار حرارتی برای آب و نانوسیال

شکل 10 نمودار افت فشار بر حسب عدد رینولدز را برای آب و نانوسیال در شار حرارتی نشان می­دهد. در این حالت نیز، افزودن ذرات نانو موجب افزایش افت فشار شده است. همچنین با افزایش عدد رینولدز، افت فشار افزایش یافته است.

5- نتیجه­گیری

هدف از این تحقیق مقایسه ضریب انتقال حرارت و افت فشار آب خالص و نانوسیال اکسید آلومینیوم بر پایه آب، با قطر ذرات 20 نانومتر و درصد حجمی 0.05 درصد در جریان جوشش جریانی مادون سرد، به صورت تجربی و عددی بود. بدین منظور یک سیستم آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد که بتواند نیاز­های آزمایش را برآورده کند.

آزمایش­ها در فشار اتمسفر و دمای مادون سرد ورودی 87 درجه سانتی­گراد و در اعداد رینولدز و شار­های حرارتی مختلف انجام شد.

سپس با شبیه­سازی هندسه و شرایط آزمایش به کمک دینامیک سیالات محاسباتی و مدل­سازی میدان جریان از معادلات متوسط­گیری شده ناویر استوکس در دیدگاه اویلرین برای هر فاز به­صورت جداگانه در کنار روابط مورد نیاز جهت توصیف پدیده جوشش، نتایج به­دست آمده با نتایج حاصل از کار تجربی صحت سنجی شد.

نتایج به­دست آمده به­صورت زیر خلاصه شده است.

* در کار تجربی، با افزودن ذرات نانو به سیال پایه، ضریب انتقال حرارت تا 13 درصد افزایش یافت.
* در کار تجربی، افزودن ذرات نانو به سیال پایه موجب افزایش افت فشار به میزان حداکثر 8 درصد شد.
* در شبیه سازی عددی، ضریب انتقال حرارت نانوسیال 12 درصد نسبت به سیال پایه افزایش یافت.
* در شبیه سازی عددی، افت فشار نانوسیال نسبت به سیال پایه با افزایش 5 درصدی مواجه شد.



Fig. 10 Variation of pressure drop of water and nanofluid with Reynolds number

شکل 10 تغییرات افت فشار با عدد رینولدز برای آب و نانوسیال

* با مقایسه نتایج به­دست آمده از کار تجربی و شبیه سازی عددی، مشخص شد که تطابق خوبی بین نتایج به­دست آمده وجود دارد و اختلاف بین نتایج تجربی و عددی بین 2 تا 7 درصد به­دست آمد.

6- فهرست علایم

|  |  |
| --- | --- |
|  | نسبتی از سطح که با حباب­ها پوشیده می­شود |
|  | سطح مشترک دو فاز بر واحد حجم |
|  | ظرفیت گرمایی، |
|  | ظرفیت گرمایی دیواره، |
|  | قطر، |
|  | قطر حباب در داخل سیال، |
|  | قطر جدایش حباب از روی سطح، |
|  | نیروی بر هم کنش بخار بر روی مایع، |
|  | نیروی بر هم کنش مایع بر روی بخار |
|  | فرکانس جدایش حباب |
|  | شتاب گرانش |
|  | آنتالپی |
|  | ضریب انتقال گرمای بین دو فاز |
|  | گرمای نهان تبخیر |
|  | رسانایی گرمایی |
|  | جرم |
|  | چگالی نقاط جوانه­زنی |
|  | فشار |
|  | انتقال گرمای جابجایی اجباری در واحد سطح |
|  | انتقال گرمای ناشی از تبخیر در واحد سطح |
|  | انتقال گرمای رسانش گذرا در واحد سطح |
|  | شار حرارتی |
|  | عدد بی بعد رینولدز |
|  | دمای مادون سرد سیال |
|  | دما (K) |
|  | دمای مافوق گرم دیواره |
|  | دمای دیواره |
|  | دمای بالک سیال |
|  | زمان |
|  | سرعت |
|  | فاصله بی بعد از دیواره |
| **علایم یونانی** | |
|  | لزجت دینامیکی |
|  | کسر حجمی بخار |
|  | چگالی |
|  | کشش سطحی |
|  | آهنگ انتقال جرم بین دو فاز (تقطیر) |
|  | آهنگ انتقال جرم بین دو فاز (تبخیر) |
| **زیرنویس­ها** | |
|  | خواص موثر |
|  | فاز بخار |
|  | فاز مایع |
|  | میانگین |
|  | نانوسیال |

7- مراجع

[1] S. G.Kandlikar, Development of a flow boiling map for subcooled and saturated flow boiling of different fluids inside circular tubes, Journal of Heat Transfer, Vol. 113, No.1, pp. 190-200, 1991.

[2] A.Gupta, J. S. Saini, H. K. Varma, Boiling heat transfer in small horizontal tube bundles at low cross-flow velocities, International Journal of Heat And Mass Transfer, Vol. 38 , No. 4 , pp. 599-605, 1995.

[3] S. Kumar, B. Mohanty, S. C. Gupta, Boiling heat transfer from a vertical row of horizontal tubes, International Journal of Heat And Mass Transfer ,Vol. 45 , No. 18, pp. 3857-3864, 2002.

[4] G. Ribatski, M. José, J. Saiz, E. Fockink, D. Silva, Modeling and experimental study of nucleate boiling on a vertical array of horizontal plain tubes, Experimental Thermal and Fluid Science , Vol. 32 ,No. 8, pp.1530-1537, 2008.

[5] A.K. Sadaghiani, A. Koşar, Numerical and experimental investigation on the effects of diameter and length on high mass flux subcooled flow boiling in horizontal microtube, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 92, No. 1, pp. 824-37, 2016.

[6] G. Tryggvason, A. Esmaeeli, N. Al-Rawahi, Direct numerical simulations of flows with phase change, Computers & structures, Vol. 83, No. 6 , pp.445-453, 2005.

[7] E. Chen, Y. Li, X. Cheng, L. Wang, Modeling of low-pressure subcooled boiling flow of water via the homogeneous MUSIG approach, Nuclear Engineering and Design , Vol. 239, No. 10 , pp. 1733-1743, 2009.

[8] E. Krepper, B. Končar, Y. Egorov, CFD modelling of subcooled boiling—concept, validation and application to fuel assembly design, Nuclear Engineering and Design, Vol. 237, No. 7, pp. 716-731, 2007.

[9] H. Aminfar, M. Mohammadpourfard, R. Maroofiazar, Numerical study of non – uniform magnetic fields effects on subcooled nanofluid flow boiling, Progress in Nuclear Energy, Vol. 74, pp. 232 – 241, 2014.

[10] M. Boudouh, H. Louhalia Gualous, M. De Labacheleria, Local convective boiling heat transfer and pressure drop of nanofluid in narrow rectangular channels, Applied Thermal Engineering Vol. 30, pp. 2619 – 2631, 2010.

[11] K. Henderson, Y. G. Park, L. Liu, A. M. Jacobi, Flow-boiling heat transfer of R-134a – based nanofluids in a horizontal tube, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 53, pp. 944 – 951, 2010.

[12] L. Xu, J. Xu, Nanofluid stabilizes and enhances convective boiling heat transfer in a single microchannel, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 55, pp. 5673-5686, 2012.

[13] E. Abedini, A. Behzadmehr, S. M. H. Sarvari, S. H. Mansouri, Numerical investigation of subcooled flow boiling of a nanofluid, International Journal of Thermal Science, Vol. 64, pp. 232 – 239, 2013.

[14] A. A. Chehade, H. L. Gualous, S. L. Masson, F. Fardoun, A. Besq, Boiling local heat transfer enhancement in minichannels using nanofluids, Springer open Journal, Nanoscale Research Letters, pp. 8-130, 2013.

[15] T. Lee, J. H. Lee, Y. H. Jeong, Flow boiling critical heat flux characteristics of magnetic nanofluid at atmospheric pressure and low mass flux conditions, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 56, No. 1, pp. 101-106, 2013.

[16] Wamg, X.Q. and A.S. Mujumdar, Heat transfer characteristics of nanofluids; a review. International Journal of Thermal Sciences, pp. 1-19, 2007.

[17] S.C.P. Cheung, S. Vahaji, G.H. Yeoh, J.Y. Tu, Modeling subcooled flow boiling in vertical channels at low pressures–Part 1: Assessment of empirical correlations, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 75, pp. 736-753, 2014.

[18] S. P. Antal, R. T. Lahey JR, J. E. Flaherty, Analysis of phase distribution in fully developed laminar bubbly two – phase flow, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 17, No. 5, pp. 635652, 1991.

[19] M. Lemmert, J. M. Chawla, Influence of flow velocity on surface boiling heat transfer coefficient, Heat Transfer in Boiling, pp.237- 247, 1977.

[20] V. I. Tolubinsky, D. M. Kostanchuk, Vapour bubbles growth rate and heat transfer intensity at subcooled water boiling, Proceedings of the 4th international heat transfer conference, Vol. 5. 1970.

[21] Cole, Robert, A photographic study of pool boiling in the region of the critical heat flux, AIChE Journal, Vol. 6, No. 4, pp. 533-538, 1960.

[22] N. Kurul, M. Z. Podowski, On the modeling of multidimensionalffects in boiling channels, Proceedings of the 27th national heat transfer conference, pp. 301-314 1991.

[23] M. Akbari, N. Galanis, A. Behzadmehr, Comparative assessment of single and two-phase models for numerical studies of nanofluid turbulent forced convection, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 37, pp. 136- 146, 2012.

1. Eulerian [↑](#footnote-ref-1)
2. Lift force [↑](#footnote-ref-2)
3. Wall lubrication force [↑](#footnote-ref-3)
4. Turbulent dispersion force [↑](#footnote-ref-4)
5. Favre averaged drag force [↑](#footnote-ref-5)
6. Ranz- marshal [↑](#footnote-ref-6)