



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

سهیل شریفی¹، محمدرضا علی گودرز^{2*}

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

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، 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 از جمله 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، مومنوم 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.

کلیدواژگان

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, Mohamadrezza Aligoodarz^{2*}

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

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

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.

کندیگار [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

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.



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 [10-15]. 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

1-2- 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. عموماً 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 ماده‌ای 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 اشفته نشان داده شده است.

این دستگاه شامل بخش آزمایش، پمپ، مخزن سیال، دیمر حرارتی، سیستم چگالنده، آمپرسنج، روماتر (دبی سنج)، فشارسنج، ترمومتر و شیر بای پس است. بخش آزمایش از یک لوله مسی صاف به قطر داخلی 26 میلی-متر، قطر خارجی 27 میلی-متر و طول 800 میلی-متر 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 کالبره 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

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. تراگوسن 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



Fig. 2 Photograph of test setup

شکل 2 تصویر دستگاه آزمایش

3- بخش عددی

معادلات جوشش سیال خالص در دیدگاه اویلرین- اویلرین¹ در زیر آورده شده است. در این دیدگاه آب سیال پیوسته و بخار سیال پراکنده در نظر گرفته می شود.

معادله پیوستگی جرم برای فاز مایع [17]

$$\frac{\partial \rho_l \alpha_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l \alpha_l u_l) = \Gamma_l \quad (1)$$

معادله پیوستگی جرم برای فاز بخار [17]

$$\frac{\partial \rho_g \alpha_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \alpha_g u_g) = -\Gamma_l \quad (2)$$

معادله مومنتوم برای فاز مایع [17]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_l \alpha_l u_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l \alpha_l u_l u_l) \\ = -\alpha_l \nabla P + \alpha_l \rho_l g \\ + \nabla [\alpha_l \mu_l^e (\nabla u_l + (\nabla u_l)^T)] \\ + (\Gamma_l u_g - \Gamma_l u_l) + F_{gl} \end{aligned} \quad (3)$$

معادله مومنتوم برای فاز بخار [17]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_g \alpha_g u_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \alpha_g u_g u_g) \\ = -\alpha_g \nabla P + \alpha_g \rho_g g \\ + \nabla [\alpha_g \mu_g^e (\nabla u_g + (\nabla u_g)^T)] \\ + (\Gamma_l u_g - \Gamma_l u_l) + F_{gl} \end{aligned} \quad (4)$$

معادله انرژی برای فاز مایع [17]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_l \alpha_l H_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l \alpha_l u_l H_l) \\ = \nabla [\alpha_l k_l^e (\nabla T_l)] + (\Gamma_l H_l - \Gamma_l H_g) \end{aligned} \quad (5)$$

معادله انرژی برای فاز بخار [17]

سیال به بخش آزمایش نیز به کمک دو فشارسنج و دو ترمومتر نصب شده در ورودی و خروجی لوله آزمایش اندازه گیری می شود.

جدول 1 خواص ترموفیزیکی نانوسیال

Table 1 Thermophysical properties of nanofluid

| ویسکوزیته | چگالی | ظرفیت گرمایی ویژه | رسانایی گرمایی |
|------------|------------------------|-------------------|----------------|
| (kg / m s) | (kg / m ³) | (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 روماتر دبی حجمی موردنظر ایجاد می شود و با عبور از فشارسنج و ترمومتر، فشار و دمای ورودی به لوله آزمایش ثبت می شود.

با روشن کردن دیمر و تنظیم جریان عبوری از آن، شار حرارتی ثابت مورد- نظر به دیواره لوله آزمایش اعمال می شود. دماهای دیواره لوله از طریق سنسور دما به صفحه نمایشگر دما منتقل شده و ثبت می شوند. 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 می شود. 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 هر گونه اکسیداسیون و هر گونه زائده خارج شود. این عمل در دمای 90 درجه سانتی گراد و فشار 1 اتمسفر انجام می گیرد.

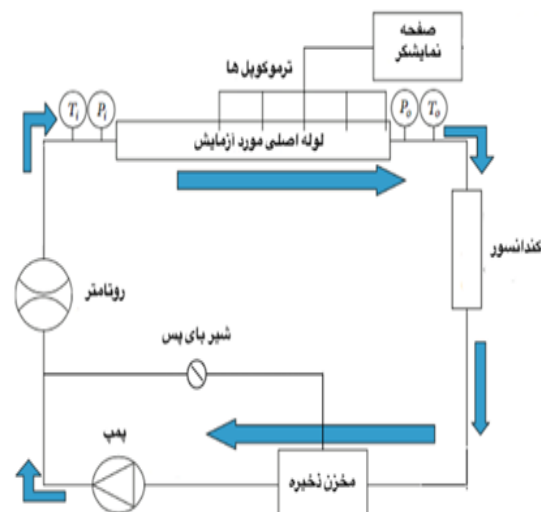


Fig. 1 schematic of testing setup

شکل 1 شماتیک دستگاه آزمایش

¹ Eulerian



نیروی برآ به طور کلی با استفاده از رابطه (11) بیان می‌شود [8].

$$F_{\text{lift}} = -C_{\text{lift}} \rho_l (u_g - u_l) \times \text{rot } u_l \quad (11)$$

در مدل‌سازی حاضر، C_{lift} که ضریب برآ می‌باشد به صورت مقدار ثابت 0.05 در نظر گرفته شده است. انتقال گرما در فاز مایع با استفاده از مدل رنز-مارشال⁵ 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) در نظر می‌گیرند. انتقال گرما در جریان تک‌فاز بدون در نظر گرفتن فاز بخار را شار گرمایی جابجایی آشفته می‌نامند که با استفاده از رابطه (12) محاسبه می‌شود [8].

$$Q_c = A_{1f} \frac{\rho_l C_{pl} u_l}{T_{y^+(L)}} (T_w - T_l) \quad (12)$$

$$A_{1f} = 1 - A_{tc} \quad (13)$$

$$A_{tc} = \min \left(\pi \frac{(ad_w)^2}{4}, 1 \right) \quad (14)$$

در رابطه (12)، $T_{y^+(L)}$ دمای بی‌بعد و a در رابطه (14) ضریب تاثیر حباب می‌باشد که مقدار 2 برای آن در نظر گرفته شده است.

شار گرمای ناشی از تبخیر با استفاده از رابطه (15) محاسبه می‌شود [8].

$$Q_e = \dot{m}_w h_{fg} \quad (15)$$

در این رابطه، \dot{m}_w شار جرمی حباب‌هایی است که در نقاط جوانه‌زنی شکل می‌گیرند. رابطه‌ی این شار در معادله (16) آورده شده است [8].

$$\dot{m}_w = \rho_g \frac{2}{3} \frac{d_w}{a^2} A_{tc} N_a f \quad (16)$$

زمانی که 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 عملاً 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 (17) بیان می‌شود [8].

$$Q_{tc} = \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{k_l \rho_l C_{pl} f} \right) A_{tc} (T_w - T_l) \quad (17)$$

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 هنگامی که 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 هنگامی که به اندازه بیشینه خود می‌رسند از دیواره جدا شده و به جای آن‌ها حباب دیگری شروع به شکل‌گیری می‌کند. در روابط فوق N_a بیانگر چگالی نقاط جوانه‌زنی فعال و f فرکانس جدایش حباب‌ها می‌باشد.

$$\frac{\partial \rho_g \alpha_g H_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \alpha_g u_g H_g) = \nabla [\alpha_g k_g^e (\nabla T_g)] + (\Gamma_g H_l - \Gamma_{gl} H_g) \quad (6)$$

در تمامی این معادلات، $\rho_l, \rho_g, \alpha_l, \alpha_g, u_l, u_g$ به ترتیب چگالی فاز مایع، چگالی فاز بخار، کسر حجمی فاز مایع، کسر حجمی فاز بخار، سرعت مایع و سرعت بخار هستند. μ_l در معادله (3) و μ_g در معادله (4) لزجت دینامیکی فاز مایع و فاز بخار می‌باشند. H_l, H_g, k_l, k_g در معادله (5) و معادله (6) آنتالپی مایع، آنتالپی بخار، رسانایی گرمایی مایع و رسانایی گرمایی بخار هستند.

در معادله (3)، F_{lg} نیرویی است که فاز بخار بر فاز مایع وارد می‌کند و نیروی اعمال شده از فاز مایع به فاز بخار به صورت F_{gl} نشان داده می‌شود و بین این دو نیرو رابطه‌ی مقابل برقرار است $F_{lg} = -F_{gl}$. آهنگ انتقال جرم بین دو فاز در مایع مادون سرد در معادلات فوق، Γ_g ، آهنگ انتقال جرم بین دو فاز در مایع مادون سرد می‌باشد که ناشی از تقطیر است [17].

$$\Gamma_g = \frac{h_{aif} T_{sub}}{h_{fg}} \quad (7)$$

در معادله (7)، h و a_{if} به ترتیب ضریب انتقال گرما بین دو فاز و سطح مشترک دو فاز بر واحد حجم می‌باشند. Γ_{gl} 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 (8) محاسبه می‌شود. در معادله (8)، h_{fg} نشان‌دهنده‌ی گرمای نهان تبخیر فاز مایع است [17].

$$\Gamma_{gl} = \frac{Q_e}{h_{fg}} \quad (8)$$

در جریان‌های چندفازی هر فاز بر فاز دیگر تاثیر می‌گذارد و این برهمکنش نیروهای 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 برآ¹، روانکاری دیواره² و پراکندگی آشفته‌گی³ می‌باشد.

برای محاسبه‌ی نیروی آشفته‌گی طبق مرجع [8]، مدل نیروی متوسط پسای فیور⁴ انتخاب شد.

$$F_{\text{Disp}} = -\frac{3C_D \mu_t}{4d_B \sigma_t} (u_g - u_l) \frac{\nabla \alpha_g}{1 - \alpha_g} \quad (9)$$

در معادله (9)، C_D ضریب نیروی پسا حباب، μ_t لزجت گردابی فاز مایع و σ_t عدد اشمیت آشفته‌گی 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.

$$F_{\text{Wall}} = -\frac{\rho_l \alpha_g}{d_B} \left(C_{W1} - C_{W1} \frac{d_B}{y} \right) U_{\text{rel}}^2 n \quad (10)$$

در رابطه (10)، n بردار عمود بر دیواره کانال و U_{rel} سرعت نسبی بین دو فاز می‌باشد. C_{W1} و C_{W2} به ترتیب 0.05 - و 0.01 است.

⁴ Favre averaged drag force

⁵ Ranz- marshal

¹ Lift force

² Wall lubrication force

³ Turbulent dispersion force



4- نتایج

4-1- نتایج تجربی

فرآیند انتقال حرارت جوششی شامل مجموعه ای از فرآیندهای انتقال حرارتی، شامل هدایت حرارتی در لایه مایع مجاور سطح جوشش، رشد و جابه جایی حباب ها و سیال می باشد، 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 میکرو لایه زیر حباب و تشکیل لایه مرزی دمایی اطراف محل تشکیل حباب نقش بسیار مهمی را در انتقال حرارت جوششی ایفا می کند، می تواند موجب بهبود انتقال حرارت جوششی شود، از طرفی وجود نانوذرات انتقال حرارت جابه جایی را در سیال کنار دیواره از طریق افزایش جابه جایی حباب ها، جابه جایی خود این ذرات و توربولانس سیال، افزایش می دهد. ولی این ذرات حین جوشش روی سطح می نشینند، این ذرات به دام افتاده، خصوصیات سطح را تغییر داده و نقاط فعال هسته زایی را کاهش می دهند. بنابراین هدایت حرارتی توسط نانوذرات را تحت الشعاع قرار می دهند. پس می توان گفت که جوشش نانوسیالات رقابتی بین دو پدیده ی افزایش انتقال حرارت ناشی از افزایش هدایت گرمایی، لزجت، جابه جایی و توربولانس سیال، و کاهش انتقال حرارت ناشی از پر شدن منافذ سطح به وسیله نانوذرات و کم شدن تعداد نقاط فعال هسته زایی است. نتایج نشان داده است که در برخی از آزمایش ها، 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 (26) محاسبه می شود.

$$h = \frac{q''}{T_w - T_b} \quad (26)$$

که شار حرارتی q'' از حاصل ضرب جریان الکتریکی و ولتاژ ($V \cdot I$) به دست می آید. دمای سطح لوله، T_w ، از میانگین دمای سنسورهای دما، و دمای بالک سیال، T_b ، با استفاده از موازنه انرژی به دست می آید.

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 می دهد. مشاهده می شود با افزودن ذرات نانو به آب، ضریب انتقال حرارت افزایش یافته و این افزایش در شارهای حرارتی بالاتر بیش تر به چشم می خورد. همچنین نتایج نشان می دهد هم برای نانوسیال و هم برای آب خالص، با افزایش شار حرارتی، ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد.

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/m^2 نشان می دهد. همان طور 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 می دهد. مشاهده می شود که افزودن ذرات نانو به آب، موجب افزایش افت فشار می شود. همچنین هم برای آب خالص و هم برای نانوسیال، افزایش شار حرارتی موجب کاهش افت فشار می شود.

چگالی نقاط جوانه زنی به زبری سطح و یا به عبارت دیگر به تعداد حفره های روی سطح، ترشوندگی سطح و مافوق گرم شدن دیواره بستگی دارد. برای محاسبه چگالی نقاط جوانه زنی از رابطه ی تجربی لیمارت و چاولا استفاده شده است [19].

$$N_a [m^{-2}] = (185 \Delta T_{sup} [K])^{1.805} \quad (18)$$

قطر جدایش حباب طبق رابطه ای از تولوبینسکی و کوستنچوک محاسبه می شود [20].

$$d_w = \min \left(0.6 [\text{mm}] \exp \left(\frac{-\Delta T_{sub, lw}}{45K} \right), 1.4 [\text{mm}] \right) \quad (19)$$

این رابطه برای جوشش آب استخراج شده است و بالاترین حد آن (1.4 mm) $d_{BW} = \text{mm}$ است. فرکانس جدایش حباب با استفاده از رابطه ی کول به صورت رابطه (20) می باشد [21].

$$f = \sqrt{\frac{4g(\rho_l - \rho_g)}{3d_w \rho_l}} \quad (20)$$

مدت زمانی که طول می کشد تا اینکه یک حباب از دیواره جدا شود و حباب دیگری در همان مکان ظاهر شود، زمان انتظار حباب نامیده می شود که با استفاده از رابطه ی کرل و پادوسکی به صورت رابطه (21) می باشد [22].

$$t_w = \frac{0.8}{f} \quad (21)$$

3-1- روابط مربوط به نانوسیال

برای شبیه سازی اثرات نانوذرات در سیال، فرض بر این است که ذرات به طور یکنواخت در کل سیال مخلوط شده اند و به صورت یک فاز همگن در نظر گرفته می شود. خواص نانوسیال را می توان با متوسط گیری از خواص سیال پایه و نانوذره، به صورت معادلات (22) تا (25) به دست آورد که در آن ها ϕ غلظت حجمی نانوذرات است [23].

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_f + \phi \rho_p \quad (22)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_p \quad (23)$$

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 123\phi^2 + 7.3\phi + 1 \quad (24)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 4.97\phi^2 + 2.72\phi + 1 \quad (25)$$

جدول 2 خصوصیات ترموفیزیکی نانوذره ی اکسید آلومینیوم و سیال پایه مورد استفاده در این تحقیق را در فشار 1 اتمسفر و دمای 360 کلوین نشان می دهد.

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 |
| 0.00032 | 967 | 4205 | 0.6655 |
| آب | | | |

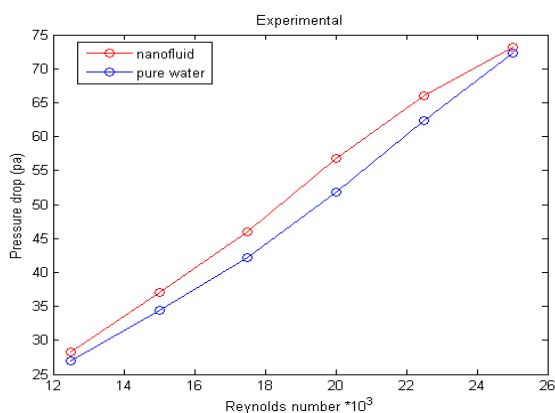


Fig. 6 Variation of pressure drop of water and pressure drop with Reynolds number

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 سانتی-گراد، محدوده عدد رینولدز 12500-25000 و محدوده شار حرارتی - 50 kw/m^2 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 y^+ در محدوده 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 متغیر-های میدان جریان دو فازی شامل جوشش از مرتبه 10^{-4} 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/m^2 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.

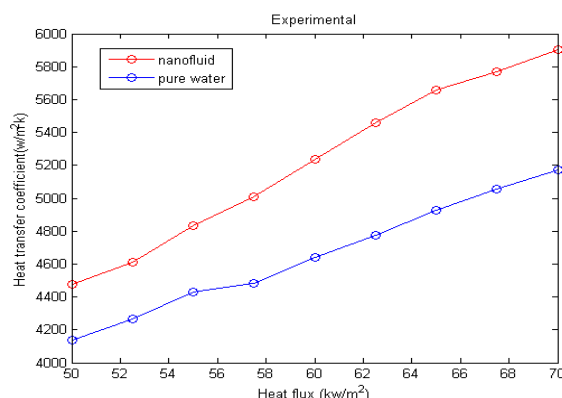


Fig. 3 Variation of heat transfer coefficient of water and nanofluid with heat flux

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

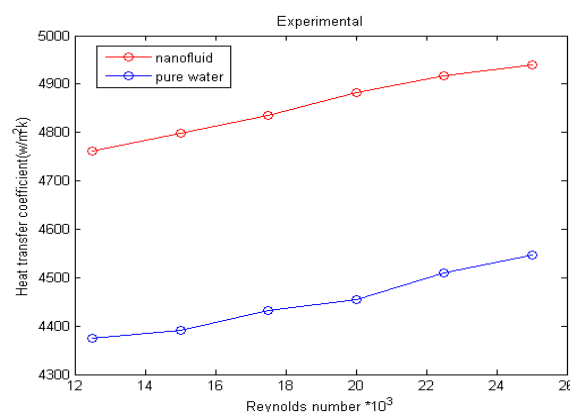


Fig. 4 Variation of heat transfer coefficient of water and nanofluid with Reynolds number

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 55 kw/m^2 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.

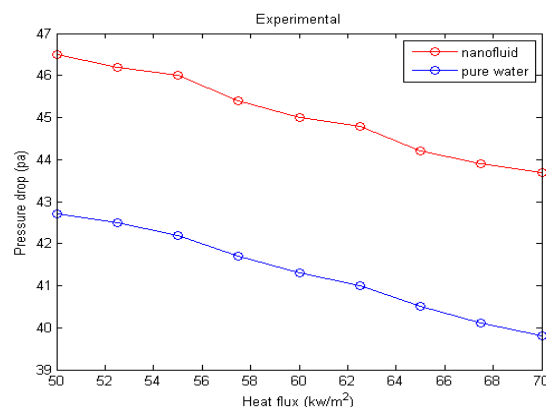


Fig. 5 Variation of pressure drop of water and nanofluid with heat flux

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

شکل 10 نمودار افت فشار بر حسب عدد رینولدز را برای آب و نانوسیال در شار حرارتی 55 kw/m^2 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.

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

نتایج به دست آمده به صورت 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 شبیه‌سازی عددی، ضریب انتقال حرارت نانوسیال 12 درصد نسبت به سیال پایه افزایش یافت.
- در شبیه‌سازی عددی، افت فشار نانوسیال نسبت به سیال پایه با افزایش 5 درصدی مواجه شد.

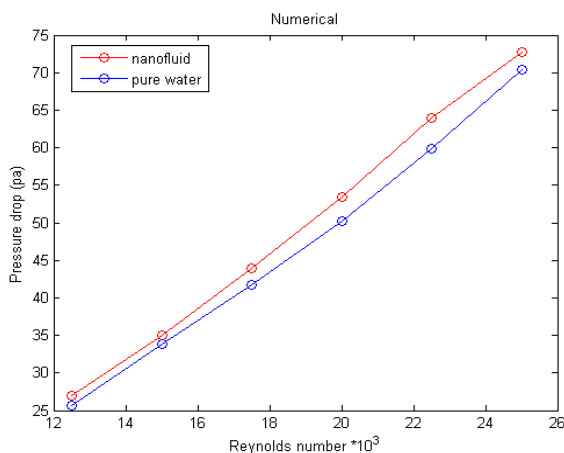


Fig. 10 Variation of pressure drop of water and nanofluid with Reynolds number

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

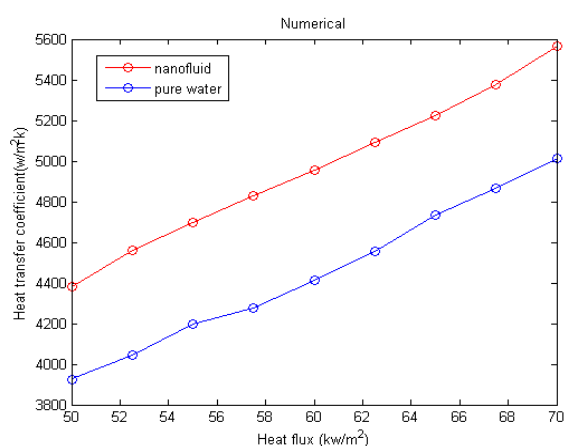


Fig. 7 Variation of heat transfer coefficient of water and nanofluid with heat flux

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

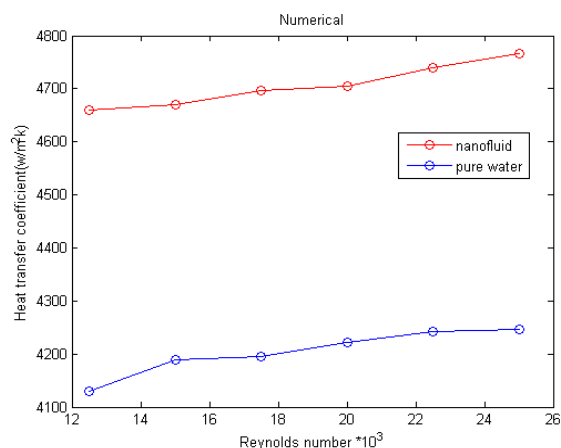


Fig. 8 Variation of heat transfer coefficient of water and nanofluid with Reynolds number

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

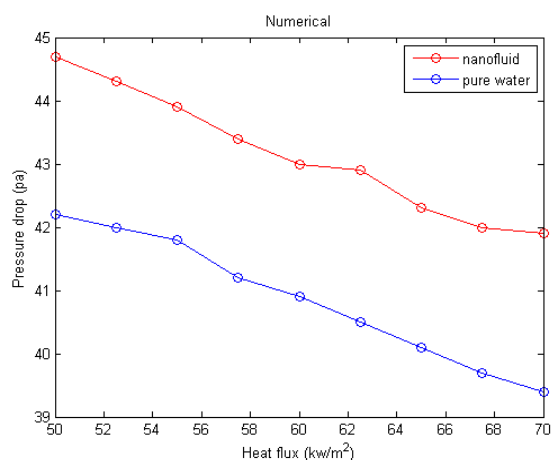


Fig. 9 Variation of pressure drop of water and nanofluid with heat flux

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



| | |
|---------------|--|
| ρ | چگالی ($\frac{kg}{m^3}$) |
| σ | کشش سطحی ($\frac{N}{m}$) |
| Γ_{lg} | آهنگ انتقال جرم بین دو فاز (تقطیر) ($\frac{kg}{m^2s}$) |
| Γ_{gl} | آهنگ انتقال جرم بین دو فاز (تبخیر) ($\frac{kg}{m^2s}$) |

زیر نویس‌ها

| | |
|-----|-----------|
| eff | خواص موثر |
| g | فاز بخار |
| l | فاز مایع |
| avg | میانگین |
| nf | 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. Kosar, 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. Louhaila 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.

- 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 علائم

| | |
|-----------|---|
| A_{tc} | نسبتی از سطح که با حباب‌ها پوشیده می‌شود |
| A_{if} | سطح مشترک دو فاز بر واحد حجم ($\frac{1}{m}$) |
| C_p | ظرفیت گرمایی، ($\frac{J}{kgK}$) |
| C_w | ظرفیت گرمایی دیواره، ($\frac{J}{kgK}$) |
| d | قطر، (m) |
| d_B | قطر حباب در داخل سیال، (m) |
| d_w | قطر جدایش حباب از روی سطح، (m) |
| F_{lg} | نیروی بر هم کنش بخار بر روی مایع، (N) |
| F_{gl} | نیروی بر هم کنش مایع بر روی بخار (N) |
| f | فرکانس جدایش حباب (Hz) |
| g | شتاب گرانش ($\frac{m}{s^2}$) |
| H | آنتالپی ($\frac{J}{kg}$) |
| h | ضریب انتقال گرمایی بین دو فاز ($\frac{W}{m^2K}$) |
| h_{fg} | گرمای نهان تبخیر ($\frac{J}{kg}$) |
| k | رسانایی گرمایی ($\frac{W}{mK}$) |
| m | جرم (kg) |
| N_a | چگالی نقاط جوانه‌زنی (m^{-2}) |
| P | فشار ($\frac{N}{m^2}$) |
| Q_c | انتقال گرمای جابجایی اجباری در واحد سطح ($\frac{W}{m^2}$) |
| Q_e | انتقال گرمای ناشی از تبخیر در واحد سطح ($\frac{W}{m^2}$) |
| Q_{tc} | انتقال گرمای رسانش گذرا در واحد سطح ($\frac{W}{m^2}$) |
| q'' | شار حرارتی ($\frac{W}{m^2}$) |
| Re | عدد بی بعد رینولدز |
| T_{sub} | دمای مادون سرد سیال $T_{sat} - T_l$ (K) |
| T | دما (K) |
| T_{sup} | دمای مافوق گرم دیواره $T_w - T_{sat}$ (K) |
| T_w | دمای دیواره (K) |
| T_b | دمای بالک سیال (K) |
| t | زمان (s) |
| u | سرعت ($\frac{m}{s}$) |
| y^+ | فاصله بی بعد از دیواره |

علائم یونانی

| | |
|----------|----------------------|
| μ | لزجت دینامیکی (Pa.s) |
| α | کسر حجمی بخار |



- [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] Wang, 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. 635-652, 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 multidimensional effects 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.