



تأثیر افروندن نانوذرات به جریان جوشش مادون سرد در کانال‌هایی با سطح مقطع متفاوت و با قطر هیدرولیکی یکسان

حسن علیم‌رادی¹، مهرزاد شمس^{2*}، زیبا ولی‌زاده¹

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستی 19395-1999، shams@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 18 مرداد 1395

پذیرش: 06 آبان 1395

ارائه در سایت: 05 دی 1395

کلید واژگان:

مدل‌سازی عددی

کانال‌های مختلف

جوشش مادون سرد نانوسیال

چکیده

در این پژوهش، به مدل‌سازی جریان جوشش مادون سرد آب و نانوسیال با سیال پایه آب در کانال‌هایی با سطح مقطع متفاوت با قطر هیدرولیکی یکسان پرداخته شده است. در ابتدا جوشش مادون سرد سیال خالص در کانال‌ها با استفاده از دیدگاه اوپلر - اوپلر بررسی شد. نتایج حاصل از این قسمت با داده‌های آزمایشگاهی تطابق بسیار خوبی داشتند. در ادامه تأثیر نانوذرات بر جریان جوشش مادون سرد در این کانال‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. نانوذرات اکسید مس با قطر 40 نانومتر در ورودی به این جریان تزریق شد. جوشش نانوسیال با در نظر گرفتن سه فاز مایع، بخار و نانوذرات جامد مدل‌سازی شد. برهم کنش فاز مایع و بخار با استفاده از دیدگاه اوپلر - اوپلر مورد مطالعه قرار گرفت. برای بررسی حرکت نانوذرات در سیال پیوسته از دیدگاه اوپلر - لاگرانژ استفاده شد. آب، بخار و نانوذرات به ترتیب سیال پیوسته، سیال پراکنده و جامد پراکنده در نظر گرفته شدند. بعد از اعتبارسنجی مدل حاضر، جوشش نانوسیال در کانال‌های مختلف مدل‌سازی شد. تغییرات کسر حجمی و دما به عنوان دو پارامتر مهم در طول کانال‌ها به دست آمد. طبق نتایج به دست آمده مشخص شد، در غلظت‌های کم نانوذرات (0.001 kg/s) کانالی با مقطع مستطیلی دارای بیش‌ترین تغییرات کسر حجمی بخار نسبت به جوشش سیال خالص و در غلظت‌های بیش‌تر (0.005 kg/s) کانالی با مقطع مربعی شکل بیش‌ترین تغییرات را از آن خود کرده‌اند.

The effects of nanoparticles in the subcooled boiling flow in the channels with different cross-sectional area and same hydraulic diameter

Hasan Alimoradi, Mehrzad Shams*, Ziba Valizadeh

Department of Mechanical Engineering, K. N. T University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 19395-1999, Tehran, Iran, shams@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 08 August 2016
Accepted 27 October 2016
Available Online 25 December 2016

Keywords:
Numerical simulation
Different channels
Nanofluid subcooled boiling

ABSTRACT

In this research, subcooled flow boiling of water and water-based nanofluid in the different channels cross sections with the same hydraulic diameter is simulated. The subcooled flow boiling of water in the channels is studied by Euler - Euler model. The results of this part matched the experimental data very well. To study the effects of nanoparticles in the subcooled boiling flow, copper oxide nanoparticles 40 nm in diameter were injected to the flow at the inlet. The nanofluid subcooled boiling is simulated by considering three phases, liquid, vapor and nanoparticles. The water and vapor interaction is simulated by Euler-Euler approach; and the motion of nanoparticles in the continuous fluid is modeled by Euler - Lagrange model. Water, vapor and nanoparticles were considered continuous fluid, dispersed fluid and dispersed solid, respectively. After model validation, boiling of nanofluids was modeling in different channels. Volume fraction and temperature variations are obtained along the channels. The results showed that, at low concentrations of nanoparticles (0.001 kg/s) rectangular channels and at higher concentrations (0.005 kg/s) square channels have the greatest changes in vapor volume fraction compared to pure water boiling.

1-مقدمه

تحقیقاتی در این زمینه توسط محققان انجام شده است که در ادامه به آن پرداخته 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 سیال‌های 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

امروزه با پیشرفت صنایع، شار گرمایی که می‌بایست از سیستم‌ها خارج شود افزایش یافته است. برای افزایش بازده و طول عمر سیستم‌ها، این شار گرمایی باید به خوبی از آن‌ها خارج شود. در واقع باید به دنبال روش‌های مناسبی برای افزایش انتقال گرما بود. یکی از این روش‌ها استفاده از جریان جوشش زیر سرد می‌باشد. جریان جوشش در مینی کانال‌ها کاربرد فراوانی دارد. برای این منظور بررسی این جریان در مینی کانال‌ها اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند.

Please cite this article using:

H. Alimoradi, M. Shams, Z. Valizadeh, The effects of nanoparticles in the subcooled boiling flow in the channels with different cross-sectional area and same hydraulic diameter, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 545-554, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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 گرما 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 رابطه کلی برای پیش‌بینی ضریب انتقال گرمای جوشش هسته‌ای در حالت بیان شده پیشنهاد دادند. رابطه جدید به خوبی با داده‌های مستقل از مقاله مقایسه شد. علاوه بر این محققان مطالعه‌های بسیاری [5-7] بر روی روابط کاربردی برای انتقال گرمای جوشش اشباع در لوله‌های عمودی به صورت نظام‌مند انجام دادند. یان و همکاران [8] به صورت تجربی تأثیر شار گرمایی و شار جرمی را در محدوده‌های بالا بر روی ضریب انتقال گرما و عدد ناسلت جوشش مادون سرد در یک لوله عمودی بررسی کردند. صادقیانی و کوثر [9] یک مطالعه تجربی و عددی انجام دادند. آن‌ها تأثیر قطر و طول روی ضریب انتقال گرمای جوشش زیر سرد را در یک میکرو لوله 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 حوضه عددی نیز کارهای بسیاری انجام شده است. ترایگوسن و همکاران [10] مدل جریان چند فاز اوایل روی فرآیند جوشش در یک لوله مارپیچ اعمال کردند. شبیه‌سازی جریان در لوله عمودی در کد cfx5 انجام شد. نتایج بدست آمده مشابهت بسیار خوبی با نتایج تجربی [11] داشتند. یانگ و همکاران [12] یک حل عددی انجام دادند، به منظور شبیه‌سازی از مدل vof استفاده کردند، همچنین آزمایش‌های متناظر جریان جوشش R141b در یک لوله افقی مارپیچ را مورد مطالعه قرار دادند. پیش‌بینی عددی تطابق خوبی با نتایج تجربی داشت. کریپر و همکاران [13] جوشش مادون سرد در یک لوله‌ی عمودی را با استفاده از کد CFX مدل‌سازی کردند. آن‌ها با استفاده از دیدگاه اوپلری به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر میزان تولید بخار در طول لوله پرداختند.

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 [14-19]. بیشتر مطالعاتی که در این زمینه انجام شده است، به صورت آزمایشگاهی است و کارهای عددی انجام شده در زمینه جوشش نانوسیال‌ها اندک می‌باشد [15، 20]. عابدینی و همکاران [15] به مدل‌سازی جوشش مادون سرد نانوسیال در لوله پرداختند. آن‌ها در این کار با در نظر گرفتن نانوسیال به عنوان سیال همگن و به دست آوردن خواص موثر نانوسیال از دیدگاه دو فاز مخلوط برای انجام این مدل‌سازی استفاده کردند. بودوه و همکاران [16] 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 [17] 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 را افزایش می‌دهند. چهاد و همکاران [18] روابط مختلفی را برای به‌دست آوردن ضریب انتقال 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 گرمای محلی و شار گرمای محلی تحت تأثیر غلظت نانوذرات قرار می‌گیرند. لی و همکاران [19]، شار گرمای بحرانی در جریان‌های جوشش نانو سیال‌هایی با نانوذرات مغناطیسی شده و در شارهای جرمی کم، را مورد مطالعه‌ی آزمایشگاهی قرار دادند. مشخصه‌ی اصلی این پژوهش استفاده از نانوسیال جدیدی به نام نانوسیال مغناطیسی بود. این نانوسیال سوسپانسیونی از نانوذرات مغناطیسی شده در سیال خالص است. نانوذرات مغناطیسی قابل کنترل هستند، و این امر دو نتیجه مهم به دنبال دارد: 1- با اعمال میدان مغناطیسی می‌توان نانوذرات را جمع‌آوری کرد. 2- غلظت نانوذرات را می‌توان در طول سیال تغییر داد. امین‌فر و همکاران [20] جوشش جریانی نانوسیال را با استفاده دیدگاه دوفازی اوایل-اوایلر مدل‌سازی کردند. آن‌ها در این مدل‌سازی از نانوذرات مغناطیسی استفاده کردند. همچنین با اعمال میدان مغناطیسی تأثیر میدان مغناطیسی در جریان‌های جوشش مادون سرد را مورد بررسی قرار دادند

در کارهای عددی انجام شده در زمینه جوشش نانوسیال‌ها، به دلیل کم بودن غلظت نانوذرات، نانوسیال به صورت سیال همگن در نظر گرفته شده است و از دیدگاه دو فاز اوایلر-اوایلر برای حل جریان جوشش نانوسیال استفاده شده است. اما این دیدگاه تا زمانی می‌تواند پاسخ‌های قابل قبولی را ارائه دهد که غلظت نانوذرات کم باشد. از طرفی دیگر استفاده از دیدگاه دوفازی برای جوشش نانوسیال موجب می‌شود که تأثیر نانوذرات بر روی مومنوم فاز پیوسته و خواص سطح در نظر گرفته نشود.

در کارهای آزمایشگاهی و عددی که برای جوشش نانوسیال انجام شده است، معمولاً هندسه کانال به صورت لوله در نظر گرفته شده است و برای کانال‌هایی با اشکال مختلف و به صورت عددی پژوهشی انجام نشده است.

در پژوهش حاضر، چند هدف دنبال می‌شود: مدل‌سازی جوشش نانوسیال با در نظر گرفتن سه فاز، فاز مایع، بخار و نانوذرات. به این ترتیب می‌توان درک بهتری از رفتار نانوذرات در جریان جوشش نانوسیال به دست آورد. در این مدل‌سازی، میدان جریان آب و بخار با استفاده از دیدگاه اوایلر-اوایلر و حرکت نانوذرات در سیال پیوسته، که در این کار آب می‌باشد، با استفاده از دیدگاه اوایلر - لاگرانژ حل می‌شود.

این مدل‌سازی در ابتدا در لوله انجام می‌گیرد و بعد از صحت‌سنجی مدل حاضر، کانال‌هایی با مقاطع متفاوت در حالی که قطر هیدرولیکی آن‌ها یکسان است، در نظر گرفته شده و مدل‌سازی بر آن‌ها انجام می‌گیرد. از آنجایی که دما و کسر حجمی بخار پارامتر مهمی در جریان‌های جوشش می‌باشند، تغییرات آن‌ها در طول لوله بررسی خواهد شد.

2- دیدگاه عددی

برای مدل‌سازی جریان جوشش مادون سرد سیال آب در کانال‌هایی با مقاطع مختلف، از مدل دوفاز اوپلری¹ استفاده شد. مدل اوپلری شامل زیر مدل‌هایی مانند مدل مخلوط² و مدل ذره³ می‌باشد. در دیدگاه مخلوط هر دو سیال به صورت سیال پیوسته در نظر گرفته می‌شوند، ولی در دیدگاه ذره، یک فاز به عنوان فاز پیوسته و فاز دیگر به صورت فاز پراکنده مدل‌سازی می‌شود. در پژوهش حاضر از مدل ذره استفاده شده است.

¹ Eulerian multi-phase scheme

² Mixture model

³ Particle model

$$\Gamma_{lg} = \frac{ha_{if}T_{sub}}{h_{fg}} \quad (7)$$

در معادله (7)، h و a_{if} به ترتیب ضریب انتقال گرما بین دو فاز و سطح مشترک دوفاز 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. Γ_{gl} به صورت معادله (8) محاسبه می‌شود. در معادله (8)، h_{fg} نشان‌دهنده‌ی گرمای نهان تبخیر فاز مایع است [21].

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

در مطالعه حاضر برای مدل‌سازی آشفتگی در فاز مایع از مدل SST استفاده شد. در جریان‌های چند فازی هر فاز بر فاز دیگر تأثیر 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 زویر استفاده شد. نیروهای غیرپسا شامل نیروهای برآ⁵، روانکاری دیواره⁶ و پراکندگی آشفتگی⁷ می‌باشد.

برای محاسبه‌ی نیروی آشفتگی طبق مرجع [13]، مدل نیروی متوسط پسای فیور⁸ انتخاب شد.

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

در معادله (9)، C_D ضریب نیروی پسا حباب، μ_t لزجت گردابی فاز مایع و σ_t عدد اشمیت 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 [22] محاسبه شده است.

$$F_{wall} = -\frac{\rho_l\alpha_g}{d_B}\left(C_{w1} - C_{w2}\frac{d_B}{y}\right)U_{rel}^2n \quad (10)$$

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.

نیروی برآ به طور کلی با استفاده از رابطه زیر بیان می‌شود [13]:

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

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 رن-مارشال 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 گرمایی ناشی از رسانش گرمایی گذرا (شار گرمای جداسدن)⁹ در نظر می‌گیرند.

انتقال گرما در جریان تک‌فاز بدون در نظر گرفتن فاز بخار را شار گرمایی جابجایی آشفته¹⁰ می‌نامند، که با استفاده از رابطه (12) محاسبه می‌شود [13].

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

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

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

به این ترتیب آب به عنوان سیال پیوسته¹ و بخار، سیال پراکنده² در نظر گرفته می‌شوند. بعد از صحت‌سنجی³ مدل حاضر برای جوشش مادون سرد آب در کانالی با مقطع دایروی، نانوذرات اکسید مس به جریان جوشش آب تزریق شدند. برای مدل‌سازی جوشش نانوسیال، برهم‌کنش آب - بخار با استفاده از دیدگاه اوایلر-اوایلر و حرکت نانوذرات در آب به عنوان سیال پیوسته، با استفاده از دیدگاه اوایلر-لاگرانژ بررسی شد. در دیدگاه اوایلر - لاگرانژ آب به عنوان فاز پیوسته و نانوذرات به عنوان فاز جامد پراکنده⁴ در نظر گرفته شدند.

3- معادلات

3-1- جوشش مادون سرد سیال

معادلات جوشش سیال خالص در دیدگاه اوایلر - اوایلر در ذیل آورده شده است. در این دیدگاه آب سیال پیوسته و بخار سیال پراکنده در نظر گرفته می‌شود.

معادله پیوستگی جرم برای فاز مایع [21]

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

معادله پیوستگی جرم برای فاز بخار [21]

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

معادله مومنتوم برای فاز مایع [21]

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

معادله مومنتوم برای فاز بخار [21]

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

معادله انرژی برای فاز مایع [21]

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

معادله انرژی برای فاز بخار [21]

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

در تمامی این معادلات، ρ_l ، ρ_g ، α_l ، α_g و u_l و 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 و k_l و k_g در معادله (5) و معادله (6)، آنتالپی مایع، آنتالپی بخار، رسانایی گرمایی مایع و رسانایی گرمایی بخار هستند.

F_{lg} در معادله (3) 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 $F_{lg} = -F_{gl}$.

Γ_{lg} در معادلات فوق، آهنگ انتقال جرم بین دو فاز در مایع مادون سرد می‌باشد که ناشی از تقطیر است [21].

⁵ Lift force

⁶ Wall lubrication force

⁷ Turbulent dispersion force

⁸ Favre averaged drag force

⁹ Transient conduction (quenching heat flux)

¹⁰ Turbulent convection

¹ Continuous fluid

² Dispersed fluid

³ Validation

⁴ Dispersed solid

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. در کار حاضر برای محاسبه‌ی زمان انتظار حباب، از رابطه‌ی ارائه شده توسط کرل و پادوسکی بهره گرفته شده است [26].

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

3-2- جوشش مادون سرد نانوسیال

در قسمت 1-3 معادلات ریاضی برای جریان جوشش مادون سرد سیال خالص در دیدگاه اویلر - اویلر آورده شد. برای حل معادلات جریان جوشش مادون سرد نانوسیال از هر دو دیدگاه اویلر-اویلر و اویلر - لاگرانژ استفاده می‌شود. به این صورت که دیدگاه اویلر-اویلر برای حل میدان جریان فاز مایع و بخار و دیدگاه اویلر-لاگرانژ برای بررسی حرکت نانوذرات در سیال به کار برده می‌شود. به دلیل آنکه در قسمت 1-3 دیدگاه اویلر-اویلر توضیح داده شد، در اینجا به آن اشاره‌ای نمی‌شود و در ادامه به توضیح مدل اویلر-لاگرانژ پرداخته خواهد شد. لازم به ذکر است که در اینجا آب به عنوان سیال پیوسته و نانوذرات فاز جامد پراکنده در نظر گرفته شده‌اند. معادلات این قسمت از مرجع [27] گرفته شده است.

معادلات پیوستگی برای فاز مایع به صورت زیر نوشته می‌شود:

پیوستگی جرم [27]:

$$\nabla \cdot (\rho_{\text{eff}} u_1) = 0 \quad (22)$$

در معادله‌ی (22)، ρ_{eff} چگالی موثر نانوسیال و u_1 بردار سرعت مایع می‌باشد.

معادله‌ی مومنتم [27]:

$$\nabla \cdot (\rho_1 u_1 u_1) = \nabla P + \nabla (\mu_1 \nabla u_1) + S_{p,m} \quad (23)$$

ρ_1 و μ_1 به ترتیب چگالی فاز مایع و لزجت دینامیکی فاز مایع می‌باشد. ∇P گرادیان فشار در جریان است. تأثیر نانوذرات بر روی مومنتم فاز پیوسته که همان فاز مایع می‌باشد، به صورت یک جمله منبع در معادله‌ی مومنتم در نظر گرفته می‌شود که با استفاده از قانون دوم حرکت نیوتن توضیح داده می‌شود. تغییرات مومنتم نانوذرات از طریق حرکت آن‌ها در سیال محاسبه می‌شود [27].

$$S_{p,m} = \sum m_p F \Delta t \quad (24)$$

در معادله (24)، m_p جرم نانوذرات و F نیروی کل در واحد جرم نانوذره است که بر نانوذره وارد می‌شود. تغییر مومنتم نانوذرات ناشی از وارد شدن نیروها بر آن‌هاست [27].

$$F = \frac{du_p}{dt} \quad (25)$$

در معادله 25، u_p سرعت نانوذرات و F نیروی کل است که شامل نیروهای حجمی و هیدرودینامیکی می‌شود. نیروهای هیدرودینامیکی از نیروهای پسا، برآ سافمن، نیروی جرم افزوده و نیروی برآونی تشکیل می‌شود [27].

$$F = F_G + F_D + F_L + F_V + F_B \quad (26)$$

نیروی گرانش به عنوان نیروی حجمی است که از رابطه (27) به دست می‌آید [27].

$$F_G = \frac{(\rho_p - \rho_l)g}{\rho_p} \quad (27)$$

در رابطه (27) ρ_p چگالی نانوذرات و g ثابت گرانش است.

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

شار گرمای ناشی از تبخیر با استفاده از رابطه (15) محاسبه می‌شود [13].

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

در این رابطه $\dot{m}_w$ شار جرمی حباب‌هایی است که در نقاط جوانه‌زنی شکل می‌گیرند. رابطه‌ی این شار در معادله‌ی (16) آورده شده است [13].

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

زمانی که حباب از دیواره کانال 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 [13].

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

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 کانال که مکان‌های جوانه‌زنی¹ نامیده می‌شوند، شروع به شکل‌گیری می‌کنند؛ به این ترتیب جوشش هسته‌ای² 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.

چگالی نقاط جوانه‌زنی N_a به زبری سطح و یا به عبارت دیگر به تعداد حفره‌های روی سطح، ترشوندگی سطح و مافوق گرم شدن دیواره بستگی دارد. چگالی نقاط جوانه‌زنی معمولاً بر اساس رابطه‌ای بر اساس دمای مافوق-گرم بیان می‌شود.

$$N_a \sim T_{\text{sup}}^n$$

برای محاسبه‌ی چگالی نقاط جوانه‌زنی رابطه‌ای تجربی از لیمارت و چاولا استفاده شده است [23]:

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

قطر جدایش حباب طبق رابطه‌ای از رابطه‌ی تولوبینسکی و کوستنچوک محاسبه می‌شود [24].

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

این رابطه برای جوشش آب استخراج شده است و بالاترین حد آن $(d_{BW} = 1.4 \text{ mm})$ است.

فرکانس جدایش حباب با استفاده از رابطه‌ی کول به صورت زیر می‌باشد [25]:

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

¹ Nucleation site

² Onset of nucleate boiling (ONB)

ثابت سیال و در خروجی لوله، شرط مرزی فشار نسبی در نظر گرفته شده است. در جدار داخلی لوله شرط عدم لغزش برای سیال و در جدار بیرونی شار گرمایی یکنواخت به دیواره اعمال شده است. علاوه بر این به منظور اعتبارسنجی از کار آزمایشگاهی ایجن و همکاران [29] استفاده شد. در این آزمایش آن‌ها از یک مقطع مستطیلی استفاده کردند. ابعاد مقطع $0.261\text{cm} \times 2.54\text{cm}$ می‌باشد. شرایط آزمایش‌های نام برده در جدول 1 آورده شده است.

به منظور بررسی استقلال از شبکه آزمایش بارتولومج و همکاران [28] چهار شبکه‌بندی در نظر گرفته شد. شکل 1 کسر حجمی متوسط بخار در طول لوله را برای این چهار شبکه‌بندی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود اختلاف بین نمودارها بسیار ناچیز است. بنابراین شبکه با سایز المان 0.002 انتخاب شد.

برای حل میدان جریان دو فاز آب-بخار از دیدگاه اوایلر - اوایلر بهره گرفته شد. برای مدل‌سازی آشفته‌گی در جریان مایع از روش اس اس تی¹، برای به دست آوردن نیروی پسا بین دو فاز از روش ایشی زوبر و برای محاسبه انتقال گرمای فاز مایع از مدل رنز-مارشال استفاده شد.

شکل 2 اعتبارسنجی 1 براساس نتایج حاصل از آزمایش بارتولومج [28] می‌باشد. در این شکل دمای متوسط آب و کسر حجمی متوسط بخار و دمای دیوار در طول لوله نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دمای متوسط آب و همچنین کسر حجمی بخار در طول لوله افزایش می‌یابند. نتایج حاصل از کار عددی حاضر و داده‌های آزمایشگاهی بسیار به هم نزدیک می‌باشند.

جدول 1 شرایط آزمایشگاهی هندسه‌ی مورد تحلیل

Table 1 Geometry analyzed under experimental conditions

نمونه مورد نظر	دبی جرمی ($\text{kg/m}^2\text{s}$)	فشار (MPa)	شار گرمایی (kW/m^2)	دمای مادون سرد (K)
اعتبارسنجی 1 [28]	900	4.5	570	58.2
اعتبارسنجی 2 [29]	906	5.512	496.5	12.5
اعتبارسنجی 3 [29]	877.5	6.89	496.5	12.1

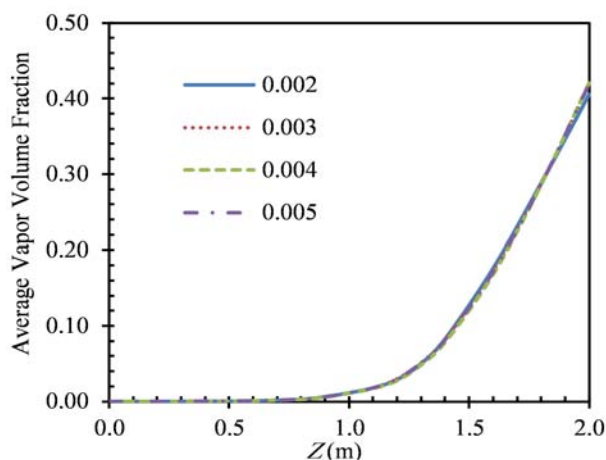


Fig. 1 The average vapor volume fraction for four grid

شکل 1 کسر حجمی متوسط بخار در طول لوله برای چهار شبکه‌بندی

نیروی پسا با استفاده از قانون پسای استوکس و به صورت معادله (28) محاسبه می‌شود. در رابطه (28)، d_p قطر نانوذرات و C_c فاکتور تصحیح کانینگهام برای قانون پسای استوکس می‌باشد [27].

$$F_D = \frac{18\mu_l}{d_p^2 \rho_p C_c} (u_l - u_p) \quad (28)$$

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} (1.257 + 0.4e^{-\frac{1.1d_p}{2\lambda}}) \quad (29)$$

λ در رابطه (29)، مسیر آزاد بین مولکولی است. فرض می‌کنیم که نانوذرات با سرعت ثابتی در جریان حرکت می‌کنند در حالی که به دلیل لزجت بالا در جریان و یا در مکان‌هایی مانند نزدیک دیواره، گردادیان سرعت وجود داشته باشد؛ این اختلاف سرعت در جریان موجب اختلاف فشاری بر روی ذره می‌شود و نیروی برآ را ایجاد می‌کند [27].

$$F_L = \frac{2Kv^{\frac{1}{2}}\rho_l d_{ij}}{\rho_p d_p (d_{ij} d_{ij})^{\frac{1}{4}}} (u_l - u_p) \quad (30)$$

در رابطه 30، $K=2.495$ و d_{ij} تانسور تغییر شکل و v لزجت استاتیکی سیال است. نیروی جرم افزوده با استفاده از رابطه‌ی (31) به دست می‌آید [27].

$$F_V = \frac{\rho_l}{2\rho_p} (\dot{u}_l - \dot{u}_p) \quad (31)$$

معادله پیوستگی انرژی:

$$\nabla \cdot (\rho_l c_{p,l} u_l T_l) = \nabla \cdot (k_l \nabla T_l) + S_{p,e} \quad (32)$$

در رابطه (32)، $C_{p,l}$ ظرفیت گرمایی ویژه فاز مایع در فشار ثابت و k_l رسانایی گرمایی فاز مایع است. T_l دمای فاز مایع و $S_{p,e}$ ترم منبع ناشی از انتقال گرما بین ذرات و سیال می‌باشد. این جمله، با محاسبه تغییرات انرژی ذره زمانی که در سیال حرکت می‌کند، به دست می‌آید [27].

$$S_{p,e} = \sum \dot{Q} \Delta t \quad (33)$$

$\dot{Q}$ شار گرمای کلی ناشی از انتقال گرما جابجایی است که از رابطه (34) برای به دست آوردن آن استفاده می‌شود [27].

$$\dot{Q} = Nu \pi d_p k_l (T_p - T_l) \quad (34)$$

در رابطه (34)، Nu با استفاده از معادله‌ی رنز-مارشال محاسبه می‌شود [27].

$$Nu = 2.0 + 0.6 Re_d^{1/2} Pr^{1/3} \quad (35)$$

با در نظر گرفتن تعادل انرژی بر روی ذره، انتقال گرمای جابجایی باید با نرخ انرژی پیرامون ذره برابر باشد [27].

$$m_p C_{p,p} \frac{dT_p}{dt} = \dot{Q} \quad (36)$$

در معادله (36) $C_{p,p}$ و T_p به ترتیب گرمای ویژه نانوذرات در فشار ثابت و دمای نانوذرات می‌باشد.

4- مدل‌سازی جوشش سیال خالص

4-1- اعتبارسنجی

برای بررسی اعتبار روابط عددی در نظر گرفته شده برای جریان جوشش مادون سرد، از کار آزمایشگاهی بارتولومج و همکاران [28] استفاده شده است. هندسه مورد نظر، یک لوله‌ی عمودی است که سیال آب در آن در جهت رو به بالا در حال حرکت است. قطر لوله 15.4 میلی‌متر و طول آن 2m می‌باشد. شرایط مرزی اعمال شده در این مدل‌سازی، در ورودی لوله، دبی جرمی

¹SST

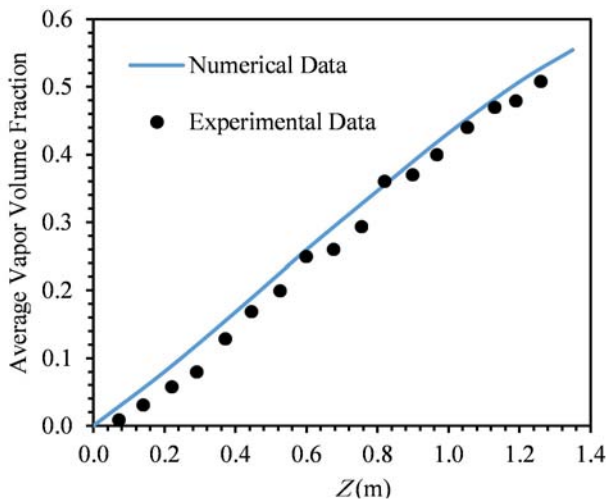


Fig. 4 The average vapor volume fraction along the rectangular channel for validation case 3

شکل 4 کسر حجمی متوسط بخار در طول کانال مستطیلی داده‌های مربوط به اعتبارسنجی 3

جدول 2 مشخصات مقاطع مختلف

Table 2 Properties different sections

نام	تعداد گره	طول اضلاع
دایره	783302	$D_h = 15.4 \text{ mm}$
مربع	54684	$a = 15.4 \text{ mm}$
مستطیل	76769	$a = 20 \text{ mm}$ $b = 12.52 \text{ mm}$
مثلث متساوی الاضلاع	9781	$a = 26.67 \text{ mm}$

سرد سیال آب در آن‌ها مدل‌سازی شد و به بررسی برخی تفاوت‌ها در جوشش مادون سرد در این هندسه‌ها، مانند تغییرات دما و کسر حجمی پرداخته شد. در شکل 5 تغییرات کسر حجمی بخار در راستای محور کانال‌هایی با مقاطع مختلف نشان داده شده است. کسر حجمی محوری بخار در کانالی با مقطع مثلثی شکل بیشتر از مقاطع دیگر و برای کانالی با مقطع دایره‌ای شکل از دیگر مقاطع کمتر می‌باشد.

شکل 6 تغییرات کسر حجمی بخار در دیواره کانال‌هایی با مقاطع متفاوت را نشان می‌دهد. در ابتدای طول کانال ($Z < 1 \text{ m}$)، کسر حجمی بخار در دیواره کانالی با مقطع مستطیل بیشتر از مقاطع دیگر می‌باشد؛ اما بعد از آن کسر حجمی بخار در دیواره کانالی با مقطع مثلثی شکل بیشتر از دیگر مقاطع می‌شود. کسر حجمی بخار برای مقطع دایروی در سراسر طول کانال کمترین مقدار را نسبت به بقیه مقاطع دارا است.

تغییرات کسر حجمی متوسط بخار در طول کانال با مقاطع مختلف در شکل 7 به نمایش در آمده است. تا طول 0.5m در راستای طول کانال‌ها، کسر حجمی متوسط بخار برای همه‌ی کانال‌ها یکسان است. تغییرات کسر حجمی متوسط بخار در مقطع مثلث متساوی الاضلاع بیشتر از دیگر مقاطع و برای مقطع دایروی شکل کمتر از دیگر مقاطع می‌باشد. در طول کانال تغییرات کسر حجمی متوسط بخار در دو مقطع مستطیل و مربع به همدیگر نزدیک می‌باشد.

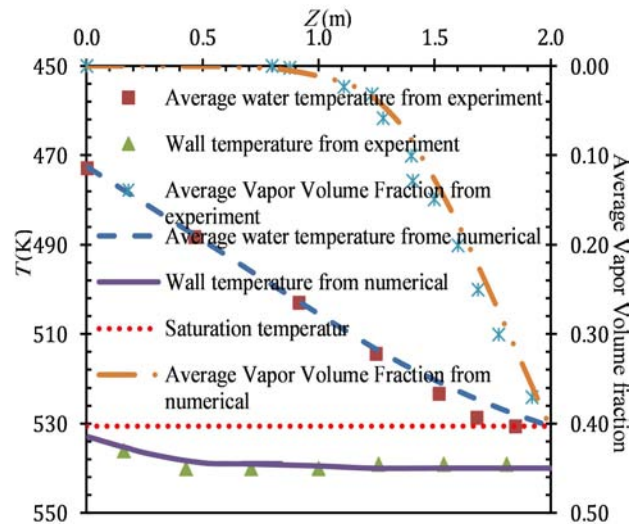


Fig. 2 The wall temperature, the average water temperature and the average vapor volume fraction along the pipe for validation case 1

شکل 2 دمای دیواره، دمای متوسط آب و کسر حجمی متوسط بخار در طول لوله داده‌های مربوط به اعتبارسنجی 1

شکل 3 و شکل 4 اعتبارسنجی 2 و 3 براساس آزمایش ایجن [29] می‌باشد. در این شکل‌ها کسر حجمی متوسط بخار در طول یک کانال مستطیلی نشان داده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از کار عددی با نتایج حاصل از آزمایش مطابقت بسیار خوبی داشته‌اند.

در ادامه به مدل‌سازی جوشش مادون سرد آب در کانال‌هایی با سطح مقطع مختلف ولی با قطر هیدرولیکی یکسان پرداخته شده است. برای به دست آوردن اضلاع هندسه‌های مختلف از رابطه قطر هیدرولیکی، رابطه (37) استفاده شده است.

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (37)$$

در رابطه (37)، D_h ، A و P به ترتیب قطر هیدرولیکی مقطع، سطح مقطع و محیط سطح تر شده است. مشخصات مقاطع مختلف همراه با تعداد گره زده شده در جدول 2 آمده است. قطر هیدرولیکی مقاطع 15.4 mm و شرایط مرزی مشابه شرایط مرزی اعتبارسنجی 1 می‌باشد. در ابتدا جوشش مادون

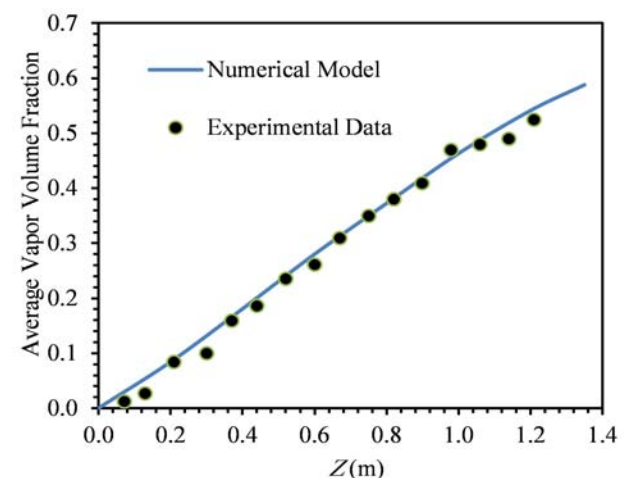


Fig. 3 The average vapor volume fraction along the rectangular channel for validation case 2

شکل 3 کسر حجمی متوسط بخار در طول کانال مستطیلی داده‌های مربوط به اعتبارسنجی 2

در شکل 8 تغییرات دمای متوسط آب در طول کانال‌هایی با مقطع مختلف دیده می‌شود. دمای متوسط در طول کانال با شکل دایروی از دیگر مقاطع کمتر و برای مقطع مثلثی شکل بیشتر از دیگر مقاطع است. مقطع مربع و مستطیل در طول کانال دمای متوسط با اختلاف کمی دارند.

5- مدل سازی جوشش نانوسیال

در بخش 4 به بررسی جریان جوشش مادون سرد سیال آب در کانال‌هایی با مقاطع مختلف و قطر هیدرولیکی 15.4mm پرداخته شد، در این قسمت به مدل سازی جوشش نانوسیال در این مقاطع پرداخته می‌شود.

در واقع، هدف اصلی در این قسمت، مطالعه‌ی تأثیر تزریق نانوذرات به جریان جوشش مادون سرد در این مقاطع است. برای مدل سازی جریان جوشش نانوسیال در هر کانال، از دیدگاه سه فازی استفاده شد، دیدگاه‌های اوپلر-اوپلر و اوپلر-لاگرانژ هر دو با هم حل گردیدند. در این مدل‌ها، فاز مایع به عنوان فاز پیوسته، فاز بخار به عنوان سیال پراکنده¹ و نانوذرات به صورت فاز جامد پراکنده² در نظر گرفته شدند.

5-1- صحت سنجی مدل برای جریان جوشش مادون سرد نانوسیال

برای بررسی صحت روابط در نظر گرفته برای مدل سازی جوشش مادون سرد نانوسیال، از کار آزمایشگاهی کیم و همکاران [30] استفاده شده است. نتایج حاصل از کار عددی حاضر و داده‌های آزمایشگاهی در شکل 9 آورده شده است. البته این نتایج برای مقطع دایره‌ای شکل به دست آمده‌اند. کار آزمایشگاهی در یک لوله‌ی عمودی با طول 0.1m و قطر داخلی 5.94mm که حاوی جریان رو به بالای نانوسیال آب و آلومینا با قطر 30 nm می‌باشد، انجام شده است. شرایط آزمایشگاهی در جدول 3 آورده شده است.

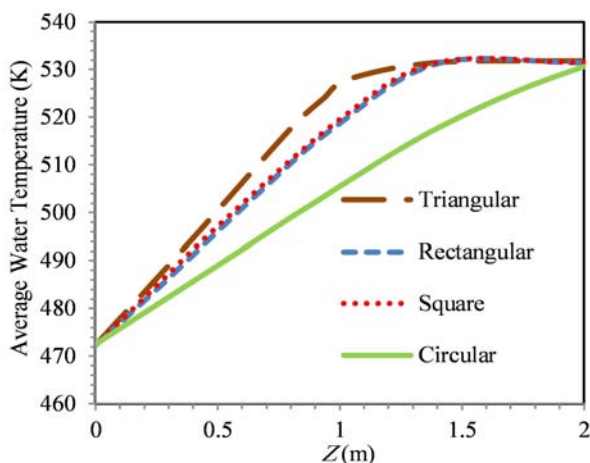


Fig. 8 Variation of average water temperature along the channel with different sections

شکل 8 تغییرات دمای متوسط آب در طول کانال‌هایی با مقاطع مختلف

جدول 3 شرایط آزمایشگاهی نمونه مورد نظر برای جوشش نانوسیال

Table 3 Experimental conditions for boiling of nanofluids

نمونه	دمای مادون سرد ورودی (°C)	فشار (atm)	شار گرمایی (kW/m ²)	شار جرمی (kg/m ² s)
نمونه آزمایشگاهی [30]	80-77	1	700-4000	2500

¹ Dispersed fluid

² Dispersed solid

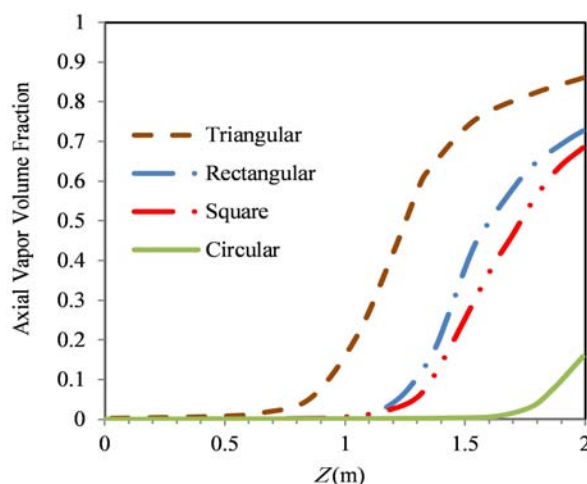


Fig. 5 Variation of axial vapor volume fraction along the channel with different sections

شکل 5 تغییرات کسر حجمی محوری بخار در طول کانال‌هایی با مقاطع مختلف

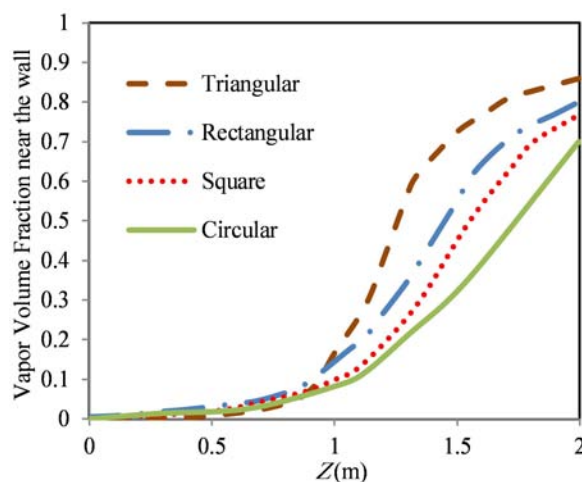


Fig. 6 Variation of vapor volume fraction near the wall along the channel with different sections

شکل 6 تغییرات کسر حجمی بخار در مجاورت دیواره در طول کانال‌هایی با مقاطع مختلف

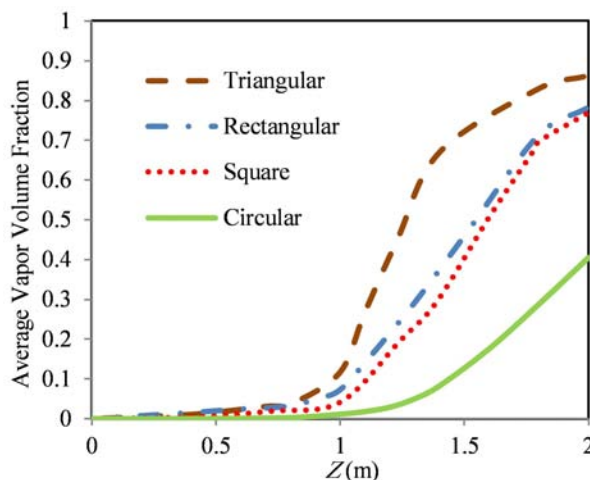


Fig. 7 Variation of average vapor volume fraction along the channel with different section

شکل 7 تغییرات کسر حجمی متوسط بخار در طول کانال‌هایی با مقاطع متفاوت

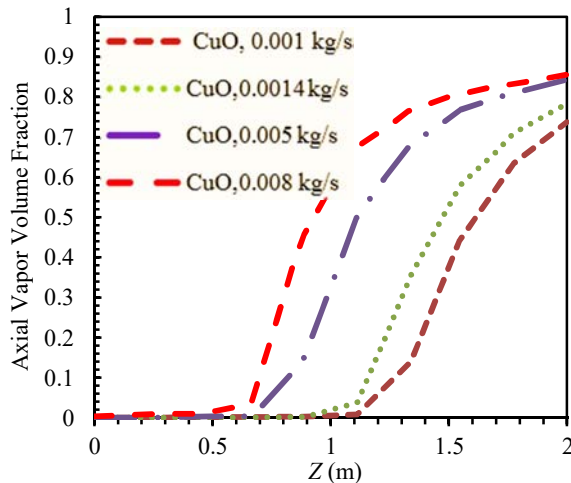


Fig. 10 Variation of axial vapor volume fraction along the rectangular channel for different concentrations of nanoparticles

شکل 10 تغییرات کسر حجمی بخار در طول کانال مستطیلی به ازای غلظت‌های متفاوت نانوذرات

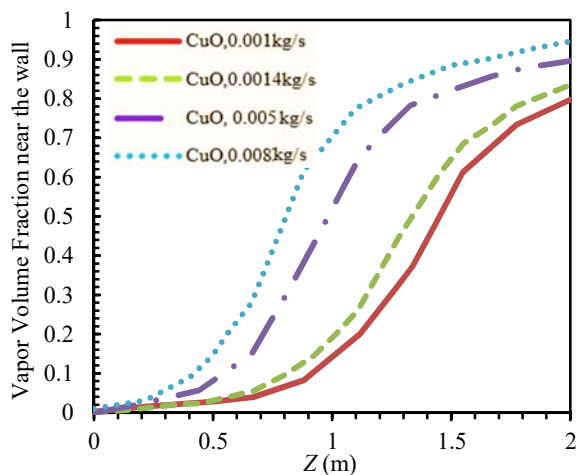


Fig. 11 Variation of vapor volume fraction along the rectangular channel for different concentrations of nanoparticles

شکل 11 تغییرات کسر حجمی بخار در راستای دیواره کانال مستطیلی در طول کانال به ازای غلظت‌های متفاوت نانوذرات

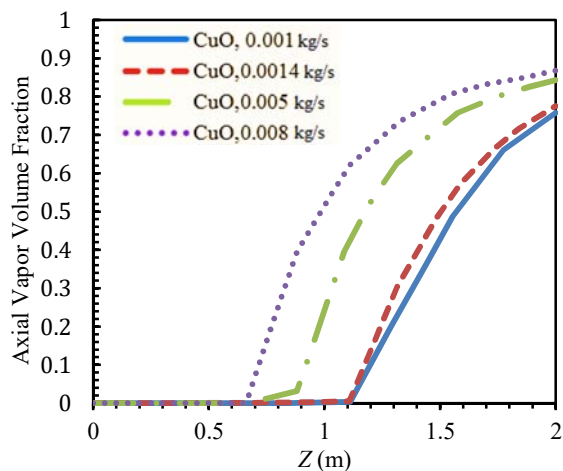


Fig. 12 Variation of axial vapor volume fraction along the square channel for different concentrations of nanoparticles

شکل 12 تغییرات کسر حجمی بخار در محور کانال مربعی در راستای طول کانال به ازای غلظت‌های مختلف نانوذرات

در شکل 9 دمای خروجی نانوسیال از لوله در شارهای گرمایی متفاوت وارد بر دیواره لوله نشان داده شده است. دمای خروجی نانوسیال با افزایش شار گرمایی، افزایش می‌یابد. بعلاوه نتایج حاصل از مدل سه فاز برای جوشش نانوسیال و داده‌های آزمایشگاهی به هم دیگر نزدیک هستند.

لازم به ذکر است که نمونه آزمایشگاهی بیان شده در جدول 3 برای صحت‌سنجی روابط مورد نظر به کار برده شد و نتایج قسمت 2-5 بر روی مقاطع قسمت 4 با قطر هیدرولیکی 15.4mm و شرایط مرزی مشابه شرایط مرزی اعتبارسنجی 1 به دست آمده‌اند.

2-5 بحث و نتیجه‌گیری

تغییرات کسر حجمی محوری در طول کانال مستطیلی به ازای غلظت‌های مختلف نانوذرات در شکل 10 نشان داده شده است. کسر حجمی محوری بخار با افزایش غلظت نانوذرات افزایش می‌یابد. تفاوت بین کسر حجمی بخار در غلظت‌های مختلف نانوذرات در ورودی لوله زیاد نیست ولی در طول لوله اختلاف بین کسر حجمی‌ها افزایش می‌یابد و دوباره در انتهای لوله اختلاف کاهش می‌یابد. شیب تغییرات کسر حجمی با افزایش غلظت نانوذرات افزایش می‌یابد. تغییرات کسر حجمی در دیواره کانال مستطیلی، در طول لوله به ازای غلظت‌های مختلف نانوذرات در شکل 11 نشان داده شده است. در این شکل هم افزایش غلظت نانوذرات باعث افزایش کسر حجمی بخار در مجاورت دیواره می‌شود.

تغییرات کسر حجمی بخار در محور کانال مربعی شکل در شکل 12 نشان داده شده است. با افزایش غلظت نانوذرات کسر حجمی محوری بخار افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش غلظت نانوذرات، شیب تغییرات کسر حجمی بخار افزایش می‌یابد. اختلاف بین کسر حجمی‌ها در غلظت‌های مختلف نانوذرات، در ابتدای کانال کم است، و در راستای طولی افزایش می‌یابد و دوباره در انتهای کانال اختلاف کاهش می‌یابد.

در شکل 13 تغییرات کسر حجمی در مجاورت دیواره در راستای کانال مربعی شکل به ازای غلظت‌های مختلف نانوذرات نشان داده شده است، با افزایش غلظت نانوذرات کسر حجمی بخار افزایش می‌یابد.

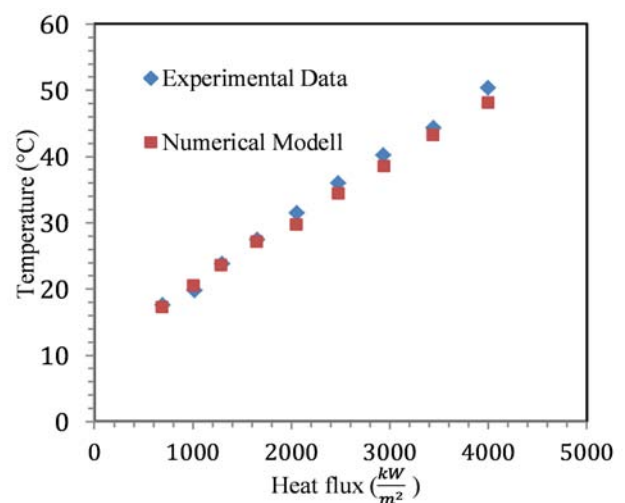


Fig. 9 Variation of outlet temperature for different heat flux on the wall for experimental data [30]

شکل 9 تغییرات دمای خروجی از لوله به ازای شار گرمایی متفاوت بر روی دیواره برای داده‌های آزمایش [30]

- همانند جوشش در سیال خالص، در جوشش مادون سرد نانوسیال به ازای غلظت‌های مختلف نانوذرات، کسر حجمی محوری بخار در کانال مثلثی شکل، بیشترین مقدار و مقطع دایروی کمترین میزان را به خود اختصاص می‌دهد.
- به ازای غلظت 0.001 kg/s نانوذرات اکسید مس: در این غلظت، با توجه به شکل‌ها مشاهده می‌شود که کسر حجمی محوری بخار در کانال دایروی شکل نسبت به حالت جوشش مادون سرد سیال دارای بیشترین تغییرات بوده‌است؛ و کسر حجمی بخار در مستطیل کمترین تغییر را نسبت به جوشش مادون سرد سیال داشته است.
- به ازای غلظت 0.005 kg/s اکسید مس: کسر حجمی بخار در کانال مربعی شکل بیش‌ترین تغییر را نسبت به جوشش سیال خالص و کانال نشان می‌دهد.
- مقایسه بین غلظت 0.001 kg/s و 0.005 kg/s: با افزایش غلظت نانوذرات، کسر حجمی محوری کانال در کانال مستطیل بیشتر از همه است.

7- فهرست علائم

A_{tc}	نسبتی از سطح که با حباب‌ها پوشیده می‌شود
a_{if}	سطح مشترک دوفاز بر واحد حجم 1/m
C_p	ظرفیت گرمایی، (J/kgK)
C_w	ظرفیت گرمایی دیواره، (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 برهم کنش بخار بر روی مایع، (N)
F_{gl}	نیروی برهم کنش مایع بر روی بخار، (N)
F_{gl}	نیروی برهم کنش مایع بر روی بخار، (N)
f	فرکانس جدایش حباب، (Hz)
G	شار جرمی، (kg/m ² s)
g	شتاب گرانش، (m/s ²)
H	آنتالپی، (J/kg)
h	ضریب انتقال گرمای بین دو فاز، (W/m ² K)
h_{fg}	گرمای نهان تبخیر، (J/kg)
k	رسانایی گرمایی، (W/mK)
m	جرم، (kg)
ρ	چگالی، (kg/m ³)
N_a	چگالی نقاط جوانه‌زنی فعال، (m ⁻²)
Nu	عدد بی‌بعد ناسلت
P	فشار، (N/m ²)
Pr	عدد بی‌بعد پرانتل
Q_c	انتقال گرما ناشی از جابجایی اجباری در واحد سطح، (W/m ²)
Q_e	انتقال گرمای ناشی از تبخیر در واحد سطح، (W/m ²)
Q_{tc}	انتقال گرمای ناشی از رسانش گذرا در واحد سطح، (W/m ²)
Re	عدد بی‌بعد رینولدز
T	دما، (K)
T_{sub}	دمای مادون سرد سیال، $T_{sat} - T_1$ (K)
T_{sup}	دمای مافوق گرم دیواره، $T_w - T_{sat}$ (K)

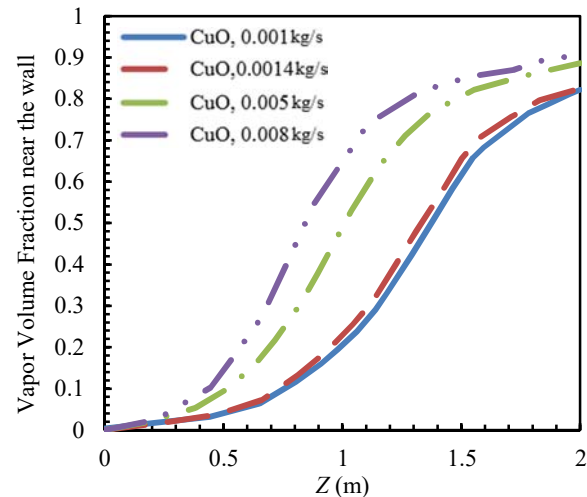


Fig. 13 Variation of vapor volume fraction near the wall along the square channel for different concentrations of nanoparticles

شکل 13 تغییرات کسر حجمی بخار در مجاورت دیواره در راستای طول کانال مربعی به ازای غلظت‌های مختلف نانوذرات

تغییرات کسر حجمی بخار در محور و همچنین در مجاورت دیواره کانال در شکل 14 مشاهده می‌شود. برای کانال مثلثی شکل، کسر حجمی بخار در محور و در مجاورت دیواره‌ی مثلث یکسان می‌باشد. کسر حجمی بخار در راستای طول کانال و با افزایش غلظت نانوذرات افزایش می‌یابد.

6- نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر غلظت نانوذرات مس بر روی میزان تولید بخار در مقاطع مختلف با قطر هیدرولیکی یکسان می‌باشد. برای این منظور ابتدا جوشش سیال خالص در مقاطع مختلف در دیدگاه اویلر-اویلر مورد مطالعه قرار گرفت. در ادامه با افزودن نانوذره با غلظت بین 0.0005 (kg/s) – 0.008 با استفاده از دیدگاه اویلر-لاگرانژ مدل سازی سه فاز انجام شد. از مدل سازی کنونی نتایج زیر به دست می‌آید.

- مدل سه‌فازی مدل مناسبی برای مدل سازی جریان جوشش نانوسیال است.

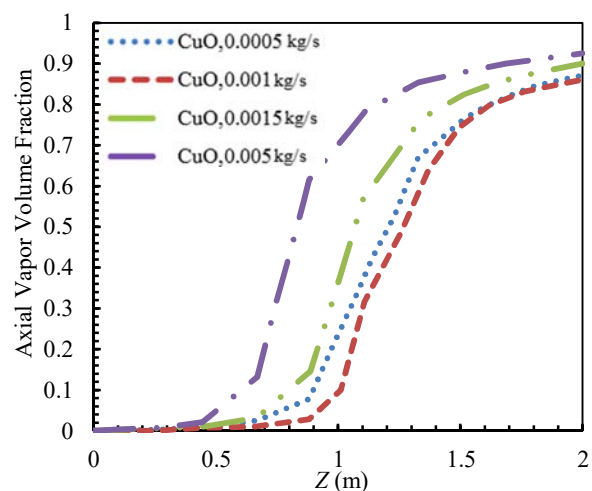


Fig. 14 Variation of axial vapor volume fraction along the triangular channel for different concentrations of nanoparticles

شکل 14 تغییرات کسر حجمی بخار در محور و دیواره کانال مثلثی شکل در طول کانال به ازای غلظت‌های مختلف نانوذرات

- [12] Z. Yang, X.F. Peng, P. Ye, Numerical and experimental investigation of two phase flow during boiling in a coiled tube, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, No.5, pp. 1003-1016, 2008.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] S.C.P. Cheung, S. Vahaji, G.H. Yeoh, J.Y. Tu, Modeling subcooled flow boiling in vertical channels at low pressures—Part I: Assessment of empirical correlations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 75, pp. 736-753, 2014.
- [22] 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.
- [23] M. Lemmert, J. M. Chawla, Influence of flow velocity on surface boiling heat transfer coefficient, *Heat Transfer in Boiling*, pp.237-247, 1977.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] I. Vasefi, M. Alizadeh, A numerical investigation of CuO- Water nanofluid in different geometries by Two – phase Euler – Lagrange method, *World Applied Science Journal*, Vol. 26, pp. 1323-1329, 2013.
- [28] G. G. Bartolomei, et al, An experimental investigation of true volumetric vapor content with subcooled boiling in tubes, *Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 3, pp. 132-135, 1982.
- [29] R. A. Egen, D. A. Dingee, J. W. Chastain, Vapour formation and behaviour in boiling heat transfer. Battelle Memorial Inst. No. BMI-1163, 1957.
- [30] S. J. Kim, T. McKrell, J. Buongiorno, L. Hu, Subcooled flow boiling heat transfer of dilute alumina, zinc oxide, and diamond nanofluids at atmospheric pressure, *Nuclear Engineering Design*, Vol. 240, pp. 1186-1194, 2010.

T_w	دمای دیواره، (K)
ΔT	اختلاف در دما، (K)
t	زمان، (s)
u	سرعت، (m/s)
y^+	فاصله بی بعد از دیواره
علائم یونانی	
α	کسر حجمی بخار
μ	لزجت دینامیکی، (Pa.s)
ρ	چگالی، (kg/m^3)
σ	کشش سطحی، (N/m)
Γ_{lg}	آهنگ انتقال جرم بین دو فاز (تقطیر)، ($\text{kg/m}^3.\text{s}$)
Γ_{gl}	آهنگ انتقال جرم بین دو فاز (تبخیر)، ($\text{kg/m}^3.\text{s}$)
زیرنویس	
eff	خواص موثر
g	فاز بخار
l	فاز مایع
avg	میانگین

8 - 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] N. I. Kolev, How accurately can we predict nucleate boiling?, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 10, No. 3, pp. 370-378, 1995.
- [6] I.L. Pioro, W. Rohsenow, S. S. Doerffer, Nucleate pool-boiling heat transfer. I: review of parametric effects of boiling surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, No. 23, pp. 5033-5044, 2004.
- [7] D. Steiner, Jerry Taborek, Flow boiling heat transfer in vertical tubes correlated by an asymptotic model, *Heat transfer engineering*, Vol. 13, No.2 , pp. 43-69, 1992.
- [8] J. Yan, Q. Bi, Z. Liu, G. Zhu, L. Cai, Subcooled flow boiling heat transfer of water in a circular tube under high heat fluxes and high mass fluxes, *Fusion Engineering and Design*, Vol.100, No. 1, pp. 406-418, 2015.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.