



Numerical Simulation of the Effects of Surface Roughness on Nucleation Site Density of Nanofluid Boiling

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Alimoradi H.¹ MSc,
Shams M.*¹ PhD

How to cite this article

Alimoradi H, Shams M. Numerical Simulation of the Effects of Surface Roughness on Nucleation Site Density of Nanofluid Boiling. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(7):1613-1622.

ABSTRACT

In this research, a numerical scheme for subcooled flow boiling with water based fluid in a channel with a hot spot was developed. The effect of nanoparticles was studied in the subcooled flow boiling. Alumina nanoparticles were used for the protection of nanofluid. The properties of nanofluid are assumed to be temperature independent. The mixture of nanofluid is studied by using Eluer-Eluer approach. In addition to considering the variable properties of temperature in this study, a model for the density of the nucleation site was used, which is the surface roughness and sedimentation rate of the nanoparticles. After verifying the model, the nanofluid boiling was modeled, using 4 roughnesses of 25, 50, 75, and 100 nm. Changes of bubble dynamics parameters were investigated in different heat fluxes and roughnesses. According to the results, it was found that with increasing surface roughness, the surface temperature drop and the density of the nucleation site density increased. Also, bubble departure diameter is increased and bubble detachment frequency is decreased by increasing surface roughness. Moreover, the results shows that bubble detachment diameter is increased by increasing the heat flux and bubble detachment waiting time.

Keywords Numerical Simulation; Nanofluid Subcooled Boiling; Mixture-Euler Approach

CITATION LINKS

[1] Development of a flow boiling map for subcooled and ... [2] Boiling heat transfer in small horizontal tube ... [3] Boiling heat transfer from a vertical row of horizontal ... [4] Modeling and experimental study of nucleate boiling ... [5] How accurately can we predict nucleate ... [6] Nucleate pool-boiling heat transfer, I: Review of parametric effects ... [7] Flow boiling heat transfer in vertical tubes correlated by an ... [8] Subcooled flow boiling heat transfer of water in a circular ... [9] Numerical and experimental investigation on the effects ... [10] Pool boiling characteristics of nano ... [11] Experimental investigation on boiling of nano-particle ... [12] The effect of experimental techniques on the pool boiling ... [13] Experimental investigation of pool boiling heat ... [14] Direct numerical simulations of flows with ... [15] Modeling of low-pressure subcooled boiling flow ... [16] Numerical and experimental investigation of two phase ... [17] CFD modelling of subcooled boiling - concept ... [18] Nanofluid stabilizes and enhances convective boiling heat transfer ... [19] Numerical investigation of subcooled flow boiling ... [20] Local convective boiling heat transfer and pressure ... [21] Flow-boiling heat transfer of R-134a-based ... [22] Boiling local heat transfer enhancement in ... [23] Flow boiling critical heat flux characteristics of magnetic ... [24] Numerical study of non-uniform magnetic fields ... [25] Optimization of subcooled flow boiling in a vertical pipe ... [26] The effects of nanoparticles in the subcooled boiling ... [27] Modeling subcooled flow boiling in vertical ... [28] Analysis of phase distribution in fully developed ... [29] Vapour bubbles growth rate and heat transfer intensity ... [30] A photographic study of pool boiling in the region ... [31] On the modeling of multidimensional effects ... [32] A mathematical model of the pool boiling nucleation ... [33] Nucleation site density in pool boiling of saturated ... [34] Effect of surface wettability on active ... [35] Onset of nucleate boiling and active nucleation ... [36] Active nucleation site density in boiling ... [37] Surface wettability change during pool ... [38] Semi-analytical model for pool boiling ... [39] Subcooled flow boiling of alumina/water ...

¹Mechanical Engineering Faculty, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Pardis Street, Molla-Sadra Avenue, Vanak Square, Tehran, Iran-
Phone: +98 (21) 8406 3214
Fax: +98 (21) 8867 7274
shams@kntu.ac.ir

Article History

Received: May 31, 2018

Accepted: December 14, 2018

ePublished: July 01, 2019

شبیه‌سازی عددی تأثیر زبری بر نقطه جوانه‌زنی در جریان جوششی نانوسیال

حسن علمیرادی MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

مهرزاد شمس PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

چکیده

در این پژوهش، به مدل‌سازی جریان جوششی مادون سرد نانوسیال با سیال پایه آب در کانالی با یک نقطه داغ پرداخته شده است. تأثیر افزودن نانوذرات بر جریان جوششی مادون سرد در این کانال مورد مطالعه قرار گرفت. نانوذرات به‌کارگرفته‌شده، آلومینا هستند. برای شبیه‌سازی، ابتدا خواص نانوسیال را متغیر با دما در نظر گرفته و بعد از آن با استفاده از دیدگاه اوایلر-اوایلر جوشش را بررسی می‌کند. اسم این روش اوایلر-مخلوط گذاشته شده است. علاوه بر در نظر گرفتن خواص متغیر با دما در این پژوهش، از مدلی برای چگالی نقطه جوانه‌زنی استفاده شد که تابع زبری سطح و میزان رسوب نانوذرات است. بعد از صحت‌سنجی مدل حاضر، جوشش نانوسیال با در نظر گرفتن چهار زبری ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ نانومتر مدل‌سازی شد. تغییرات پارامترهای دینامیک حباب در شارهای حرارتی و زبری‌های مختلف سطح بررسی شدند. طبق نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که با افزایش زبری سطح شاهد افت دمای سطح و افزایش چگالی نقطه جوانه‌زنی شده است. همچنین در این بازه زبری سطح، با افزایش زبری سطح قطر جدایش حباب افزایش و فرکانس جدایش کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان دادند که افزایش شار حرارتی موجب افزایش فرکانس جدایش حباب و کاهش قطر جدایش حباب و زمان انتظار حباب می‌شود.

کلیدواژه‌ها: مدل‌سازی عددی، جوشش مادون سرد نانوسیال، دیدگاه اوایلر-مخلوط

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۲۳

*نویسنده مسئول: shams@kntu.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه محققان در صنعت گرمایش و سرمایش با توجه به مساله بحران انرژی در پی روش‌های اقتصادی و پربازده هستند که سازگار با محیط زیست عمل کند. یکی از این راهکارها استفاده از پدیده جوشش است. کاربردهای این پدیده را می‌توان در صنایع تهویه مطبوع، خودروسازی، نیروگاه‌ها و بسیاری موارد دیگر مشاهده نمود، به‌طوری که انتخاب ماده تأثیر بسزایی در کنترل دمای سطح هیتر در فرآیند جوشش دارد. یکی از جدیدترین روش‌ها استفاده از نانوسیالات است.

کندیکار^[1] با به تصویرکشیدن روابط میان کیفیت، شار حرارتی، ضریب انتقال حرارت و شار جرمی برای سیال‌های گوناگون در حالت ناحیه مادون سرد، یک الگوی جدید جریان جوشش را توسعه داد. آنها دریافتند که روند ملاحظه‌شده در داده‌های تجربی و روابط برای آب و مبرد می‌تواند در به‌دست‌آوردن الگوی جریان جوشش به کار گرفته شود. گوپتا و همکاران^[2] یک مطالعه آزمایشگاهی برای به‌دست‌آوردن ضریب انتقال حرارت جریان جوشش جابه‌جایی اجباری توسعه دادند. آنها مجموعه لوله‌های افقی را در یک ستون عمودی منظم تحت سرعت‌های عمودی قرار دادند و در حالتی که آب اشباع تقطیر شده است، در فشار اتمسفر آزمایش را انجام دادند. کومار و همکاران^[3] مطالعه‌ای آزمایشگاهی برای بررسی میزان افزایش انتقال حرارت جوشش استخری را برای لوله‌های مسی تحت حرارت انجام دادند. ریباتسکی و همکاران^[4] مطالعه‌ای تجربی برای جوشش هسته‌ای روی یک آرایه‌ای عمودی انجام دادند. آنها یک رابطه کلی برای پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای ارائه دادند. رابطه بیان‌شده به‌خوبی با

داده‌های مستقل از مقاله اعتبارسنجی شد. علاوه بر این تحقیقات‌های بسزایی^[5-7] برای به‌دست‌آوردن روابط کاربردی برای انتقال حرارت جوشش اشباع در لوله‌های عمودی انجام گرفته است. یان و همکاران^[8] به‌صورت تجربی روی ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت جوشش مادون سرد تحقیق کردند. آنها تأثیر شار جرمی و شار حرارتی را در مقادیر بالا در یک لوله عمودی بررسی کردند. خلیلی‌صادقیانی و کوشر^[9] تأثیر قطر و طول یک میکرولوله افقی را روی ضریب انتقال حرارت جوشش زیر سرد به‌صورت عددی و تجربی بررسی کردند. آنها پی بردند، با افزایش قطر و طول میکرولوله به‌ترتیب ضریب انتقال حرارت، کاهش و افزایش می‌یابد. نتایج عددی و تجربی به‌دست‌آمده تطابق خوبی داشتند.

دس و همکاران^[10] برای نخستین بار جوشش نانوسیال را بررسی کردند، نانوسیالی که به‌کاربردن آب-آلومینا بوده است. آنها با استفاده از یک گرمکن دوار افقی، جوشش استخری نانوسیال را به‌صورت تجربی انجام دادند. آنها پی بردند با افزودن نانوسیال، ضریب انتقال حرارت کاهش یافته است. لی و همکاران^[11] جوشش استخری نانوسیال را با استفاده از یک هیتر مسی برای دو غلظت ۰/۰۰۵ و ۰/۲ آب-اکسید مس به‌صورت تجربی انجام دادند. آنها نیز پی بردند که انتقال حرارت با استفاده از نانوسیال نسبت به سیال پایه کاهش یافته است. آنها دلیل این اتفاق را رسوب ذرات، افزایش مقاومت حرارتی و پُرشدن حفرات اعلام کردند. احمد و حامد^[12] جوشش استخری نانوسیال را در فشار یک اتمسفر و با استفاده از یک هیتر مسی افقی و نانوسیال آب-آلومینا انجام دادند. نتایج نشان داد که نرخ انتقال حرارت برای نانوسیال با غلظت ۰/۱ بهبود یافته، همچنین برای غلظت ۰/۱ برابر با سیال پایه و برای غلظت ۰/۵ نرخ انتقال حرارت کاهش یافته است. روشی و همکاران^[13] مطالعه تجربی را با استفاده از سیال پایه آب-اتیلن‌گلیکول با غلظت‌های یکسان و نانوذرات آلومینا بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات به سیال باعث بهبود انتقال حرارت می‌شود. آنها همچنین نشان دادند یک در یک غلظت نانوسیال انتقال حرارت به بیشینه خود می‌رسد.

همچنین در حوضه عددی نیز کارهایی انجام شده است. ترینگوسن و همکاران^[14] در یک لوله مارپیچ، مدل جریان اوایلر-اوایلر را روی فرآیند جوشش بررسی کردند. شبیه‌سازی جریان در لوله عمودی انجام گرفت که نتایج حاصل تطابق خوبی با نتایج تجربی^[15] داشت. یانگ و همکاران^[16] به‌منظور شبیه‌سازی جریان جوشش از مدل vof استفاده کردند. آنها آزمایش‌هایی متناظر روی جریان جوشش R141b در یک لوله افقی مارپیچ را انجام دادند. پیش‌بینی عددی با نتایج تجربی تطابق خوبی داشت. کریپر و همکاران^[17] با استفاده از کد CFX، جوشش مادون سرد را در یک لوله عمودی شبیه‌سازی کردند. آنها میزان تولید بخار را با استفاده از دیدگاه اوایلری با توجه به تأثیر پارامترها مختلف در طول لوله انجام دادند.

برخی از محققان نیز با مطالعه روی جوشش نانوسیال در مواردی پی بردند که افزودن نانوذرات موجب افزایش ضریب انتقال حرارت در جریان جوشش می‌شود^[18-23]. اکثر مطالعات انجام‌شده در جوشش نانوسیال، به‌صورت تجربی بوده و کارهای عددی انجام بسیار اندک است^[19, 24]. عابدینی و همکاران^[19]، جوشش مادون سرد نانوسیال را مدل‌سازی کردند. آنها در این کار با در نظر گرفتن نانوسیال و به‌دست‌آوردن خواص موثر نانوسیال به‌عنوان سیال همگن از دیدگاه دوفازی مخلوط برای انجام این شبیه‌سازی بهره بردند. بودوه و همکاران^[20] با استفاده از کار تجربی به این نتیجه

جوشش را بررسی می‌کند. مدل اویلرین شامل زیرمدل‌هایی مانند مدل مخلوط و مدل ذره است. هر دو سیال در دیدگاه مخلوط به صورت سیال پیوسته در نظر گرفته می‌شوند. در این پژوهش، ابتدا سیال پایه و نانوسیال به صورت مخلوط در نظر گرفته می‌شود و در نهایت شبیه‌سازی نانوسیال همگن به صورت اویلرین صورت می‌گیرد.

به این ترتیب نانوذرات آلومینا به جریان جوشش آب تزریق می‌شوند. برای مدل‌سازی جوشش نانوسیال، برهم‌کنش آب-بخار با استفاده از دیدگاه اویلر-اویلر و حرکت نانوذرات در آب به عنوان سیال پیوسته، با استفاده از دیدگاه مخلوط بررسی شد.

۳- معادلات

۳-۱- جوشش مادون سرد سیال

در دیدگاه اویلر-اویلر، معادلات جوشش سیال خالص به صورت زیر آورده شده است. در این دیدگاه آب و بخار را به ترتیب به عنوان سیال پیوسته و سیال پراکنده در نظر می‌گیرند. معادله پیوستگی جرم برای فاز مایع [27]:

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

معادله پیوستگی جرم برای فاز بخار [27]:

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

معادله مومنتوم برای فاز مایع [27]:

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

معادله مومنتوم برای فاز بخار [27]:

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

معادله انرژی برای فاز مایع [27]:

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

معادله انرژی برای فاز بخار [27]:

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

در تمامی این معادلات، چگالی فاز مایع، چگالی فاز بخار، کسر حجمی فاز مایع، کسر حجمی فاز بخار، سرعت مایع و سرعت بخار به ترتیب $\rho_l, \alpha_l, u_l, \alpha_g, u_g$ هستند. μ_l در معادله ۳ و μ_g در معادله ۴ ویسکوزیته دینامیکی فاز مایع و فاز بخار هستند. در معادله‌های ۵ و ۶، آنتالپی مایع، آنتالپی بخار، ضریب هدایت گرمایی مایع و ضریب هدایت گرمایی بخار، H_l, H_g, k_l و k_g هستند.

در معادله ۳، F_{lg} نیروی وارد بر فاز بخار بر فاز مایع است و F_{gl}

رسیدند که شار گرمای محلی، کیفیت بخار محلی و ضریب انتقال حرارت نانوسیال با افزایش غلظت نانوسیال در جوشش افزایش می‌یابد. هندرسون و همکاران [21] جوشش جریان نانوسیال را به صورت تجربی مطالعه کردند. آنها ملاحظه کردند که اگر نانوذرات به خوبی در سیال همگن شوند، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. چهار و همکاران [22] روابطی را برای کانال‌هایی با شکل متفاوت برای محاسبه ضریب انتقال در جریان جوشش جمع‌آوری کردند. آنها همچنین در یک کار تجربی نشان دادند که در جوشش نانوسیال، غلظت نانوذرات روی ضریب انتقال حرارت محلی و شار گرمای محلی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. لی و همکاران [23]، شار گرمای بحرانی در جریان‌های جوشش نانوسیال را با افزودن نانوذرات مغناطیسی در شارهای جرمی کم، مورد مطالعه تجربی قرار دادند. نوآوری این مطالعه به کاربردن نانوسیال جدیدی به نام نانوسیال مغناطیسی بود. این نانوسیال، سوسپانسیونی از افزودن نانوذرات مغناطیسی شده در سیال پایه است. به خاطر اینکه نانوذرات مغناطیسی قابل کنترل هستند، دو نتیجه را می‌توان گرفت. یکی اینکه می‌توان نانوذرات را با اعمال میدان مغناطیسی جمع‌آوری کرد و دیگری اینکه می‌توان در طول سیال، غلظت نانوذرات را تغییر داد. امین‌فر و همکاران [24] با استفاده دیدگاه دوفازی اویلر-اویلر، جوشش جریان نانوسیال را شبیه‌سازی کردند. در این مدل‌سازی، آنها از نانوذرات مغناطیسی بهره بردند. همچنین با برقراری میدان مغناطیسی، تأثیر میدان مغناطیسی در جریان‌های جوشش مادون سرد را مورد مطالعه قرار دادند. علیمردی و شمس [25] مطالعه‌ای عددی روی جریان جوششی انجام دادند. آنها برای محدوده وسیعی از فشارها، شار حرارتی، شار جرمی و دما زیر سرد مساله را حل کردند و با استفاده از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک، نقطه بهینه انتقال حرارت را یافتند. در ادامه [26] آنها برای مقطع کانال‌های متفاوت، یک بار برای آب خالص و یک بار برای نانوسیال، جریان جوشش را مطالعه و کانال بهینه را برای جریان جوشش مشخص کردند.

در مطالعه حاضر با استفاده از نرم‌افزار Ansys CFX، جوشش نانوسیال شبیه‌سازی شده است. هنگامی که نانوذرات به سیال افزوده می‌شوند، دو اتفاق مهم می‌افتد که باعث تغییر مکانیزم انتقال حرارت می‌شود. یکی از این تغییرها عوض شدن خواص سیال پایه است. دومین تغییر، رسوب ذرات روی سطح هیتر است. رسوب ذرات باعث تغییر خواص سطح از جمله جنس و زیری می‌شود. این تغییر باعث تغییر کلی نتیجه خواهد شد. در این پژوهش برای توجیه این دو عامل، راهکاری پیشنهاد شده است. برای توجیه عوض شدن خواص نانوسیال، خواص نانوسیال متغیر با دما در نظر گرفته شد. همچنین برای توجیه تغییر خواص سطح از یک مدل که شامل پارامترهای تغییر جنس سطح، زیری سطح، کشش سطحی و نرخ رسوب نانوذرات بوده، استفاده شده است. در ادامه با استفاده از تغییرات به وجود آمده، دمای سطح هیتر و پارامترهای دینامیک حباب بررسی شدند. مطابق جست‌وجوهای انجام شده، پژوهش‌های بسیار محدود عددی روی تأثیر زیری سطح در قطر و فرکانس جدایش و زمان انتظار حباب‌ها انجام شده است. در کارهای قبلی، رسوب نانوذرات در نظر گرفته نشده است. در این پژوهش اثر رسوب‌گذاری در معادله جوشه‌زنی در نظر گرفته شده است.

۲- دیدگاه عددی

برای شبیه‌سازی جوشش نانوسیال، ابتدا خواص سیال را متغیر با دما در نظر گرفته و بعد از آن با استفاده از دیدگاه دوفاز اویلرین،

نیروی اعمال شده از فاز مایع به فاز بخار است که بین این دو نیرو رابطه قرینه برقرار است $F_{lg} = -F_{gl}$.
 Γ_{lg} در معادلات فوق، ناشی از تقطیر است که نرخ انتقال جرم بین دو فاز در مایع مادون سرد را نشان می‌دهد [27].

$$\Gamma_{lg} = \frac{ha_{if}T_{sub}}{h_{fg}} \quad (۷)$$

h در معادله ۷، ضریب انتقال حرارت بین دو فاز است. نرخ تولید بخار Γ_{gl} است که به صورت جرم کلی حباب‌های جدا شده از سطح دیوار تحت شار حرارتی در نظر گرفته می‌شود. Γ_{gl} با استفاده از رابطه ۸ محاسبه می‌شود. h_{fg} در رابطه ۸، نشان‌دهنده گرمای نهان تبخیر فاز مایع است [27].

$$\Gamma_{gl} = \frac{Q_e}{h_{fg}} \quad (۸)$$

به منظور مدل‌سازی آشفته‌گی در فاز مایع از مدل $k - \varepsilon$ بهره گرفته شد. در جریان جوشش، برهم‌کنش نیرویی بین دو فاز وجود دارد. این نیروها شامل نیروهای پسا و نیروهای غیریپسا هستند. نیروی پسا بین دو فاز از مدل ایشی زوبر استفاده می‌شود. نیروهای غیریپسا شامل نیروهای برآ، روانکاری دیواره و پراکندگی آشفته‌گی می‌شود.

طبق مرجع [17]، برای محاسبه نیروی آشفته‌گی از مدل نیروی متوسط پسا فور استفاده می‌شود.

$$F_{Disp} = -\frac{3C_D\mu_t}{4d_B\sigma_t}(u_g - u_l)\frac{\nabla\alpha_g}{1 - \alpha_g} \quad (۹)$$

که μ_t ویسکوزیته گردابی فاز مایع، C_D ضریب نیروی پسا حباب و σ_t عدد اشمیت آشفته‌گی در واحد کسر حجمی فاز پراکنده هستند. نیروی روانکاری دیواره باعث می‌شود که حباب‌ها از دیواره فاصله بگیرند. این نیرو با استفاده از رابطه آنتال [28] محاسبه می‌شود.

$$F_{wall} = -\frac{\rho_l\alpha_g}{d_B}\left(C_{w1} - C_{w2}\frac{d_B}{y}\right)U_{rel}^2n \quad (۱۰)$$

در رابطه ۱۰، U_{rel} به ترتیب بردار عمود بر دیواره کانال و سرعت نسبی بین دو فاز هستند. همچنین $C_{w1} = -0.05$ و $C_{w2} = 0.01$ هستند.

نیروی برآ با استفاده از رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود [17]:

$$F_{lift} = -C_{lift}\rho_l(u_g - u_l) \times rot u_l \quad (۱۱)$$

در رابطه ۱۱، C_{lift} ضریب برآ است که مقدار ثابت ۰/۰۵ در نظر گرفته می‌شود.

از مدل رنز- مارشال برای محاسبه انتقال گرما در فاز مایع استفاده می‌شود. در جریان جوشش مادون سرد شار گرمایی متشکل از شار گرمایی جابه‌جایی جریان مایع تک‌فاز، شار گرمای ناشی از تبخیر و شار گرمایی ناشی از هدایت گرمایی گذرا (شار گرمای جدا شدن) است.

انتقال حرارت بدون در نظر گرفتن فاز بخار را شار گرمایی جابه‌جایی آشفته می‌گویند که از رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود [17].

$$Q_c = A_{1f}\frac{\rho_L C_{pl} u_l}{T_{y+(L)}^+}(T_W - T_l) \quad (۱۲)$$

$$A_{1f} = 1 - A_{tc} \quad (۱۳)$$

$$A_{tc} = \min\left(\pi\frac{(ad_w)^2}{4}, 1\right) \quad (۱۴)$$

در رابطه ۱۲ $T_{y+(L)}^+$ دمای بی‌بعد و ضریب تأثیر حباب a بوده که مقدار برابر ۲ است.

با استفاده از رابطه ۱۵، شار گرمای ناشی از تبخیر محاسبه می‌شود [17].

$$Q_e = \dot{m}_w h_{fg} \quad (۱۵)$$

در رابطه ۱۵، $\dot{m}_w$ شار جرمی حباب‌هایی است که در نقاط جوانه‌زنی تولید می‌شوند. با معادله ۱۶، این شار جرمی محاسبه می‌شود [17].

$$\dot{m}_w = \rho_g \frac{2}{3} \frac{d_w}{a^2} A_{tc} N_a f \quad (۱۶)$$

هنگامی که از دیواره کانال حباب جدا می‌شود، فاصله بین حباب و دیوار بسیار کوچک است. سیال بین حباب و دیواره قرار می‌گیرد، اما این فاصله به اندازه‌ای کوچک است که انتقال حرارت جابه‌جایی بین دیواره و سیال صورت نمی‌گیرد، به‌خاطر اینکه عملاً فاز مایع در این ناحیه ساکن فرض می‌شود. بنابراین انتقال حرارتی که در این حالت بین این سیال و دیواره وجود دارد را هدایت گرمایی گذرا می‌نامند. با استفاده از رابطه ۱۷، این شار گرمایی محاسبه می‌شود [17].

$$Q_{tc} = \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{k_l \rho_l C_{pl} f}\right) A_{tc} (T_w - T_l) \quad (۱۷)$$

دمای توده سیال در فشار محلی در جریان جوشش مادون سرد، از دمای اشباع سیال کمتر است. هنگامی که شار حرارتی به دیواره اعمال می‌شود، در نزدیکی دیواره، دمای سیال افزایش می‌یابد و زمانی که دمای سیال به دمای اشباع می‌رسد، در دیواره کانال تبخیر اتفاق می‌افتد و حباب‌ها در محل‌هایی که مکان‌های جوانه‌زنی نام دارند، تولید می‌شوند. به این ترتیب جوشش هسته‌ای (ONB) ایجاد می‌شود. با بزرگ‌تر شدن حباب‌ها هنگامی که به اندازه ماکزیمم خود می‌رسند، از دیواره جدا می‌شوند و به‌جای آنها حباب دیگری شروع به شکل‌گیری می‌کند. در روابط فوق، N_a بیانگر چگالی نقاط جوانه‌زنی فعال و f فرکانس جدایش حباب‌ها است.

چگالی نقاط جوانه‌زنی N_a به مافوق گرم شدن دیواره، ترشوندگی سطح و زبری سطح و به عبارت دیگر به تعداد حفره‌های روی سطح وابسته است. چگالی نقاط جوانه‌زنی معمولاً با رابطه‌ای براساس دمای مافوق گرم بیان می‌شود.

$N_a \sim T_{sup}^n$
 از رابطه تولوینسکی و کوستنچوک برای محاسبه جدایش حباب استفاده می‌شود [29].

$$d_w = \min(0.6[\text{mm}] \exp\left(\frac{-\Delta T_{sub,LW}}{45K}\right), 1.4[\text{mm}]) \quad (۱۸)$$

از رابطه کول برای محاسبه فرکانس جدایش حباب استفاده می‌شود [30]:

$$f = \sqrt{\frac{4g(\rho_l - \rho_g)}{3d_w\rho_l}} \quad (۱۹)$$

مدت زمانی که یک حباب از دیواره جدا می‌شود و حباب دیگری در همان مکان جوانه بزند، زمان انتظار حباب نامیده می‌شود. از رابطه ارائه‌شده توسط کرل و پادوسکی برای محاسبه زمان انتظار حباب، بهره گرفته شده است [31].

$$t_w = \frac{0.8}{f} \quad (۲۰)$$

۳-۲- جوشش مادون سرد نانوسیال

طبق مکانیزم هسته حباب کلاسیکی بانکوف، قابلیت حفرات روی هیتر برای هسته جدایش، تأثیر زیادی روی ساختار میکروسکوپی سطح و ترشوندگی دارد. براساس این ساختار و با فرض حفره مخروطی یانگ و کیم [32] برای چگالی هسته جوانه‌زنی حباب بر مبنای ساختار میکروسکوپی سطح و تماس سیال رابطه تعریف کردند.

نشان می‌دهد. از مقایسه رابطه ۲۲ با بنجامین و بالاکریشن [33] به‌وضوح روشن است که دو ترم β^{-3} برای بهبود ترشوندگی سطح و $(\frac{Ra}{d_p})^{-0.5}$ برای توصیف تغییرات زیری سطح اضافه شده‌اند.

جدول ۱) زاویه تماس برای آب و نانوسیال روی سطح صاف و سطح زیر [37]

جریان	نانوسیال Al_2O_3	آب خالص
درصد حجمی نانو ذرات	۰/۱ ۰/۰۱ ۰/۰۰۱	۰
زاویه تماس	۷۱° ۷۳° ۸۰°	۷۹°
زاویه تماس	۴۰° ۲۳° ۱۴°	۳۶-۸°

در بیشتر کاربردهای نانوذرات در جریان‌های جوشش به‌دلیل غلظت کم نانوذرات در سیال، نانوسیال مانند یک سیال همگن عمل می‌کند. بنابراین محققان برای تحلیل عددی جوشش نانوسیال، ابتدا خواص موثر نانوسیال از جمله چگالی، ضریب هدایت گرمایی، گرمای ویژه در فشار ثابت و ویسکوزیته را محاسبه کرده، سپس نانوسیال را به‌صورت یک سیال تک‌فاز در نظر می‌گیرند و جریان جوشش نانوسیال را با استفاده از دیدگاه دوفازی مانند اوایلر-اوایلر و مخلوط حل می‌کنند. به‌دلیل کمبود داده‌های آزمایشگاهی در زمینه خواص نانوسیال‌ها، از روابط تجربی مختلفی برای محاسبه خواص موثر نانوسیال استفاده می‌شود. با خواص فیزیکی موثر مانند چگالی، ویسکوزیته و هدایت گرمایی عمل می‌کند که روابط مختلفی در مراجع متفاوت برای محاسبه این خواص آورده شده است.

$$k_{eff} = \left[\frac{k_p + (n-1)k_l - \varphi(n-1)(k_l - k_p)}{k_p + (n-1)k_l + \varphi(k_l - k_p)} \right] k_l, \quad (25)$$

for spherical nano particles $n = 3$

$$\mu_{eff} = (1 + 2.5\varphi)\mu_l \quad (26)$$

$$\rho_{eff} = \varphi\rho_p + (1 - \varphi)\rho_l \quad (27)$$

$$C_{p,eff} = \frac{\varphi\rho_p C_{p,p} + (1 - \varphi)\rho_l C_{p,l}}{\rho_{eff}} \quad (28)$$

در روابط بالا خواص آب، متغیر با دما تغییر می‌کنند که مقادیر آنها در ادامه شرح داده خواهد شد:

$$\rho_l = -0.002648T^2 + 1.288T + 847.4 \quad (29)$$

$$k_l = -5.875 * 10^{-6}T^2 + 0.00485T - 0.3134 \quad (30)$$

$$\mu_l = 2.34 * 10^{-17}T^6 - 6.894 * 10^{-14}T^5 + 8.37 * 10^{-11}T^4 - 5.3718 * 10^{-8}T^3 + 1.9213 * 10^{-5}T^2 - 0.0036367T + 0.28535 \quad (31)$$

با جای‌گذاری روابط خواص متغیر آب در روابط نانوسیال، سیال جدید با خواص متغیر با دما حاصل می‌شود. با استفاده از سیال جدید که مخلوط متغیر با دما است، از دیدگاه اوایلر-اوایلر جریان جوششی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در شکل ۱، الگوریتم حل معادلات به‌صورت کلی آورده شده است. به‌طوری که با حدس اولیه شروع و در ادامه با به‌دست‌آوردن خواص متغیر با دما اقدام به محاسبه پارامترهای دینامیک حباب می‌کند. سپس معادلات ناویر-استوکس و انرژی حل می‌شود. در انتها با مقایسه خطا اقدام به برگشت یا پایان حل می‌کند.

$$n = N \int_0^{\theta/2} f(\beta) d\beta \times \int_{r_{c,min}}^{r_{c,max}} f(r_c) dr_c \quad (21)$$

که N تعداد کل نقاط جوشانه‌زنی فعال روی یک سطح واحد هیتز، $f(r_c)$ و $f(\beta)$ توابع چگالی احتمال برای زاویه مخروط (β) و سائز دهانه حفره (r_c) به‌ترتیب هستند. مساله اصلی در هنگام استفاده از رابطه یانگ و کیم فراهم‌آوردن پارامترهای آماری برای ساختار میکروسکوپی سطح است که بستگی به جنس ماده هیتز و سطح صیقل‌داده‌شده دارد که باید به‌صورت تجربی تعیین شوند. به‌دلیل پیچیدگی و تنوع بسیار بالای سطح هیتزها، واقع‌بینانه است که یک فرمول جامع برای چگالی جوشانه‌زنی بر مبنای رابطه ۲۱ تعیین شود.

به‌عنوان نمونه، چگالی فعال جوشانه‌زنی براساس دمای فوق اشباع دیوار و پارامترهای دیگر مثل زاویه تماس سیال و زیری سطح توسط بنجامین و بالاکریشن [33]، وانگ و دهی [34] و باسو و همکاران [35] فرمول‌بندی شده است. برای جوشش هسته‌ای آب دقت بسیار بالایی برخوردارند. به هر حال اخیراً مقایسه این روابط با نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی جوشش نانوسیال تطابق خوبی نداشتند [36]. در واقع برای نانوسیال کاربردی نیستند. بنابراین باید به این واقعیت توجه داشت که آنها تجربی و محدود به آب خالص هستند. برای نانوسیال باید فرمول‌ها تحت تأثیر برخورد نانوذرات بازنویسی شوند.

عقیده بر این است که رسوب نانوذرات روی هسته حباب از دو طریق تأثیر می‌گذارد [37]. مرحله اول با تغییر ریزساختار سطح هیتز، تعداد سایت‌های جوشانه‌زنی حباب را تغییر می‌دهد. در مرحله دوم، نانوذرات رسوب‌شده تا حد زیادی ترشوندگی سطح هیتز را بهبود می‌بخشد. این عامل سبب می‌شود قسمتی از هسته چگالی جوشانه‌زنی که توسط مایع گرفته شده است و نمی‌تواند فعال شود، فعال بشود. بنابراین باید ویژگی‌های مورفولوژی و تغییرات خواص نانوسیال روی هسته جوشانه‌زنی مورد محاسبه قرار گیرد.

به‌منظور توصیف اثرات رسوب نانوذرات در هسته حباب، گاناپاتی و ساجیت [38] یک رابطه نیمه‌تحلیلی برای هسته جوشانه‌زنی براساس رابطه بنجامین و بالاکریشن [33] پیشنهاد دادند که هر دو افزایش ترشوندگی و اندازه نانوذرات، نسبت به زیری سطح در نظر گرفته شده است.

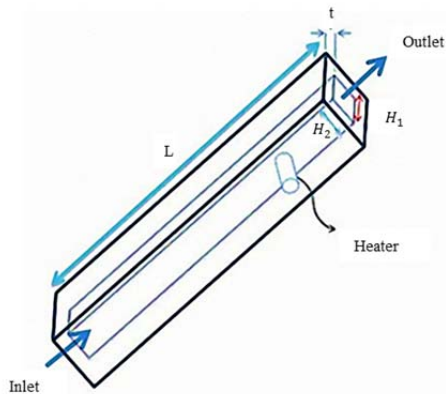
$$n = 218.8 \frac{1}{\gamma} Pr_l^{1.63} \left(\left(14.5 - 4.5 \left(\frac{RaP}{\sigma} \right) + 0.4 \left(\frac{RaP}{\sigma} \right)^2 \right) \beta^{-3} \left(\frac{Ra}{d_p} \right)^{-0.5} \right)^{-0.4} \Delta T_{sup}^3 \quad (22)$$

که P ، Ra و d_p به‌ترتیب فشار، میانگین زیری سطح و قطر نانوذرات است. γ پارامترهای دیوار-مایع تعیین‌شده توسط مواد تشکیل‌دهنده مایع و سطح و β پارامتر بهبود یافته ترشوندگی سطح است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\beta = \frac{1 - \cos \theta}{1 - \cos \theta^*} \quad (23)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{k_p \rho_p C_{p,p}}{k_l \rho_l C_{p,l}}} \quad (24)$$

که θ و θ^* به‌ترتیب زاویه تماس مایع روی در حالتی که سطح با ذرات نانو پوشیده شده و در حالتی که تمیز است را نشان می‌دهند. جدول ۱، زاویه تماس آب با سطح صاف و همراه با نانوذرات را



شکل (۲) هندسه کانال مورد تحلیل

۲-۴- استقلال حل از شبکه و شبکه‌بندی

در این قسمت به بررسی استقلال از شبکه پرداخته می‌شود. به‌منظور بررسی استقلال از شبکه، جدول ۳ برای نمایش دمای متوسط سطح نشان داده شده است. لازم به ذکر است که محاسبات با استفاده از یک کامپیوتر ۸ هسته‌ای و رم ۱۶ گیگ انجام گرفته است. برای حالت‌های مختلف، زمان حل بین ۳۰ تا ۴۰ دقیقه است.

جدول (۳) استقلال از شبکه

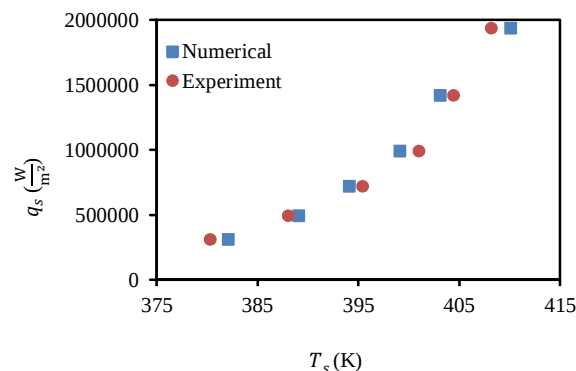
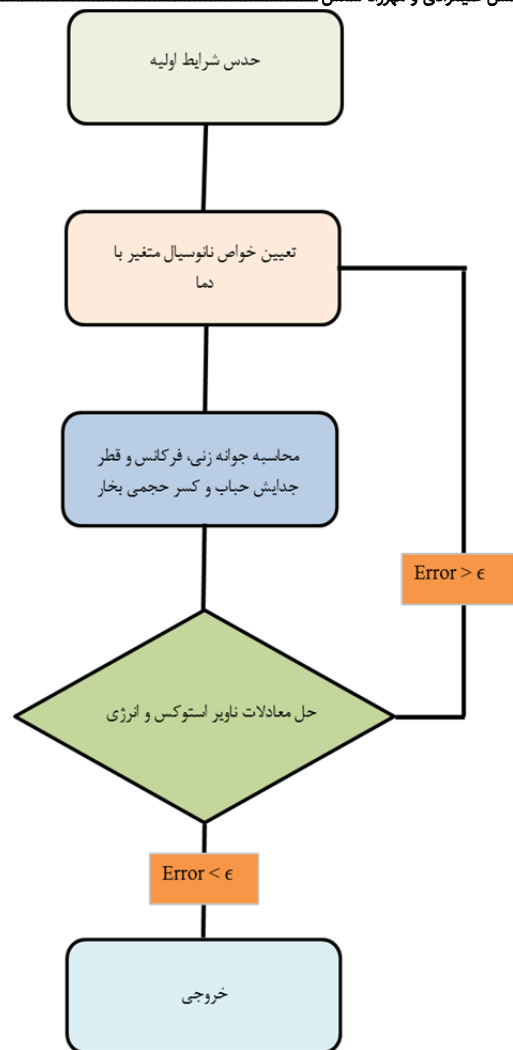
تعداد نودها	دمای سطح (کلوین)
۵۸۳۲۴	۴۱۱
۶۰۸۲۴	۴۱۰/۳
۶۱۱۴۶	۴۱۰

۳-۴- اعتبارسنجی

به‌منظور اعتبارسنجی از کار آزمایشگاهی ستوده و همکاران [39] استفاده شده است. شرایط مرزی مورد مطالعه در این آزمایش فشار ۱/۲ bar، سرعت ورودی $0.17 \frac{m}{s}$ و دمای ورودی سیال $80^\circ C$ است. همچنین زبری سطح و درصد کسر حجمی آلومینا در این آزمایش برابر 650 نانومتر و 0.25 هستند.

نمودار ۱، شار حرارتی برحسب دما را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش شار حرارتی، دمای سطح افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است بین نتایج حاصل از کار عددی و مطالعه آزمایشگاهی، تطابق نسبتاً خوبی برقرار است.

شکل ۳، کانتور دمای سطح را برای شارهای حرارتی مختلف حاصل از آزمایش نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود توزیع دما روی صفحه دایره‌ای ناهمگون است، بنابراین برای محاسبه دمای سطح باید از روی صفحه متوسط‌گیری شود که نتایج حاصل از این متوسط‌گیری در نمودار ۱ نمایش داده شده است.

نمودار (۱) تاثیر زبری سطح بر دمای سطح دیوار برای زبری 650 نانومتر 

شکل (۱) الگوریتم حل مساله

۴- مدل‌سازی جوشش نانوسیال

۴-۱- هندسه

در این قسمت جوشش مادون سرد آب در یک کانال مستطیلی شکل افقی مورد تحلیل عددی قرار خواهد گرفت. هندسه حل برگرفته از کار آزمایشگاهی ستوده و همکاران [39] است. شار حرارتی توسط یک هیتر که در ضلع پایینی کانال قرار دارد، ایجاد می‌شود. بنابراین شار حرارتی به‌صورت نقطه‌ای بر یک صفحه دایره‌ای 12 میلی‌متر وارد می‌شود. هندسه کانال در شکل ۲ آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، این کانال، کانال مستطیلی به طول H_1 ، عرض H_2 ، ارتفاع L و ضخامت t کانال است. پارامترهای هندسی هندسه مورد نظر در جدول ۲ آورده شده است.

بعد از تعیین هندسه و ابعاد آن، شرایط مرزی آن اعمال شد. در ورودی سرعت ورودی سیال، شار حرارتی روی سطح هیتر در دیواره داخلی کانال، فشار نسبی در خروجی و انتقال حرارت جابه‌جایی دیواره‌های بیرونی کانال با اطراف به‌عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته شد.

جدول (۲) پارامترهای هندسی کانال مورد تحلیل

H1 (میلی‌متر)	H2 (میلی‌متر)	L (میلی‌متر)	T (میلی‌متر)
۳۰	۲۰	۱۲۰۰	۲۰

۵- نتایج

در این قسمت، نتایج با در نظر گرفتن شرایط فشار ۱/۲bar، سرعت ورودی $0.7 \frac{m}{s}$ و دمای ورودی سیال $80^\circ C$ هستند. همچنین کسر حجمی آلومینا در همه نتایج ۰/۲۵ است.

نمودار ۲، تأثیر زیری سطح بر دمای سطح را برحسب شارهای حرارتی متفاوت نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش زیری سطح در شار حرارتی یکسان، دمای سطح کاهش یافته است. دلیل این پدیده، رسوب نانوذرات روی سطح است. با رسوب نانوذرات، ترشوندگی سطح افزایش می‌یابد و این عامل باعث خنک‌شدن سطح می‌شود. با افزایش زیری سطح، اغتشاشات در نزدیکی سطح افزایش می‌یابد و موجب کاهش دما سطح می‌شود.

نمودار ۳، تأثیر زیری سطح بر چگالی جوانه‌زنی را برای شارهای حرارتی متفاوت نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زیری سطح، چگالی جوانه‌زنی افزایش یافته است. وقتی رسوب بیشتری به موجب نانوسیال بر سطح حادث شود، موجب ایجاد حفراتی در سطح می‌شود. این حفرات با به دام انداختن مقادیر سیال موجب بخار آنها می‌شود که این عامل باعث افزایش چگالی نقطه جوانه‌زنی می‌شود.

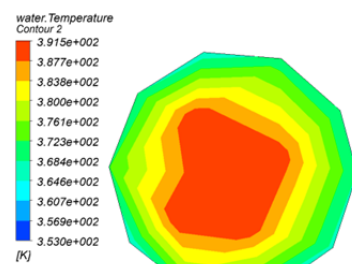
نمودار ۴، تأثیر زیری سطح بر چگالی جوانه‌زنی را برای دماهای سطح متفاوت نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زیری سطح، چگالی جوانه‌زنی افزایش می‌یابد. واضح است که هر چقدر دمای سطح دیوار افزایش یابد، تعداد هسته‌های جوانه‌زنی افزایش می‌یابد. هر چقدر که سطح دیوار داغ‌تر شود، باعث می‌شود تولید بخار در نزدیکی دیوار بیشتر شود. تولید بیشتر بخار نشان‌دهنده افزایش تعداد هسته‌های جوانه‌زنی است.

نمودار ۵، تأثیر زیری سطح بر زمان جدایش حباب را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زیری، زمان جدایش حباب افزایش یافته است. این بدین خاطر است که زیری‌های حاصل از نانوسیال در حد نانو است. بنابراین موقع شکل‌گیری حباب و رشد آن، زیری به‌طور کامل درون حباب قرار می‌گیرد. این حالت قرارگیری زیری درون حباب مانند گیره عمل می‌کند که مانع جدایش حباب از سطح می‌شود و زمان جدایش حباب را به تاخیر می‌اندازد.

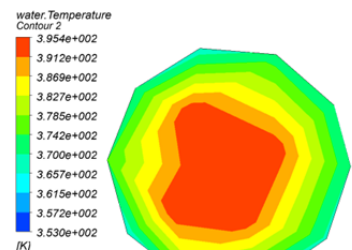
نمودار ۶، تأثیر زیری سطح بر قطر جدایش حباب را برای شارهای حرارتی یکسان نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زیری سطح در قطر جدایش حباب افزایش یافته است. وقتی زیری سطح در حباب قرار می‌گیرد، زمان جدایش حباب به تاخیر می‌افتد. این عامل باعث می‌شود که حباب، شار حرارتی بیشتری دریافت کند و قطر حباب افزایش یابد.

نمودار ۷، تأثیر زیری سطح را روی فرکانس جدایش حباب برای شارهای حرارتی یکسان نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زیری سطح، فرکانس جدایش حباب کاهش یافته است. دلیل این موضوع، افزایش زمان جدایش حباب است که باعث افزایش قطر حباب شده و این عامل باعث کاهش سرعت جدایش حباب و در نتیجه کاهش فرکانس جدایش می‌شود.

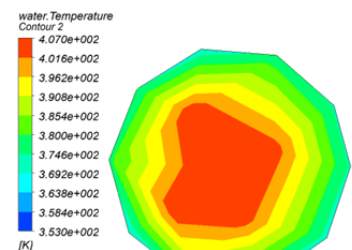
نمودار ۸، تأثیر تغییر فشار روی دمای سطح را در زیری سطح ۵۰ نانومتر و درصد کسر حجمی ۰/۲۵ آلومینا نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود در یک شار حرارتی یکسان، دمای سطح با افزایش فشار افزایش یافته است. دلیل این امر بالارفتن دمای اشباع بخار است. همچنین نقطه شروع جوشش در فشار ۲bar به تاخیر افتاده است.



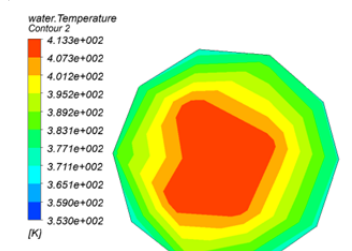
$$q_s = 0.316 \left(\frac{MW}{m^2} \right)$$



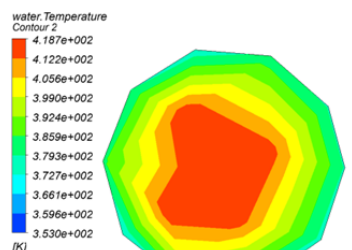
$$q_s = 0.496 \left(\frac{MW}{m^2} \right)$$



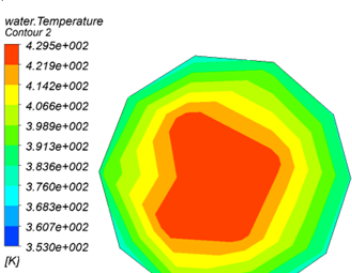
$$q_s = 0.722 \left(\frac{MW}{m^2} \right)$$



$$q_s = 0.992 \left(\frac{MW}{m^2} \right)$$

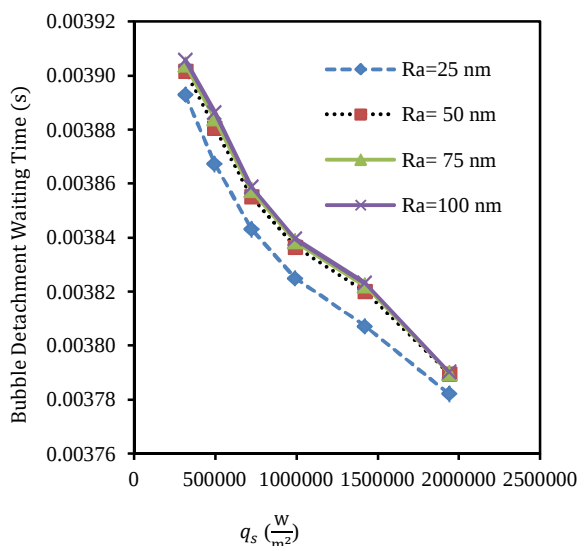


$$q_s = 1.42 \left(\frac{MW}{m^2} \right)$$

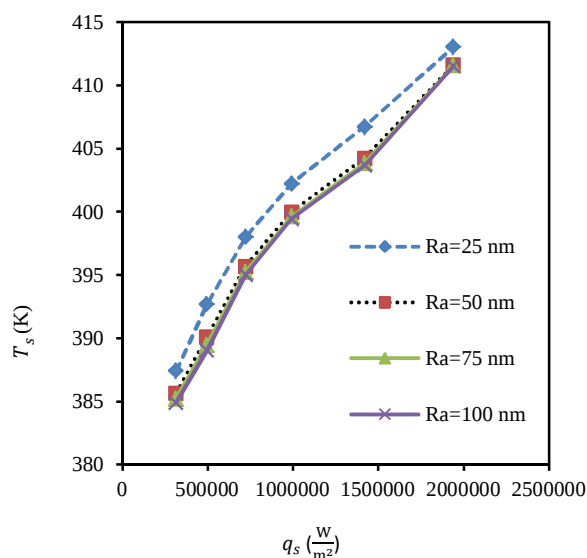


$$q_s = 1.94 \left(\frac{MW}{m^2} \right)$$

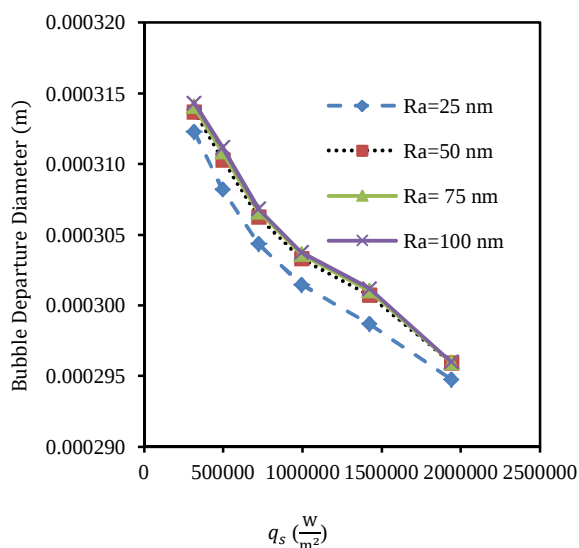
شکل ۳) کانتور دما برای شارهای حرارتی متفاوت در زیری ۵۰ نانومتر



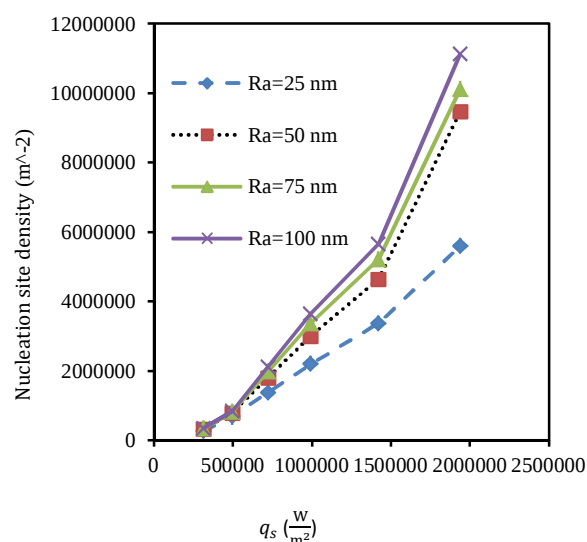
نمودار ۵) تاثیر زبری سطح روی زمان جدایش حباب برحسب شارهای حرارتی مختلف



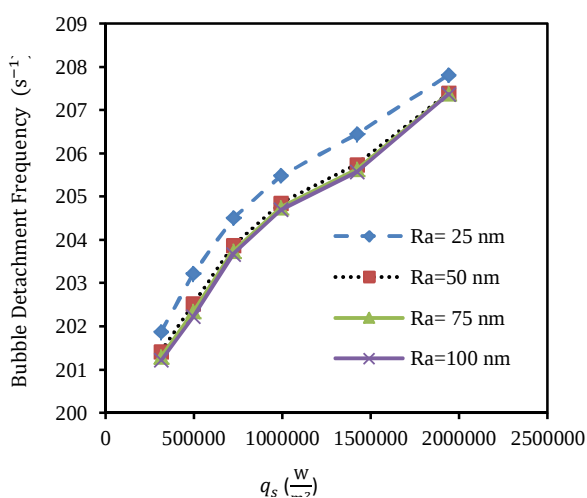
نمودار ۲) تاثیر زبری سطح روی دمای سطح برای شارهای حرارتی متفاوت



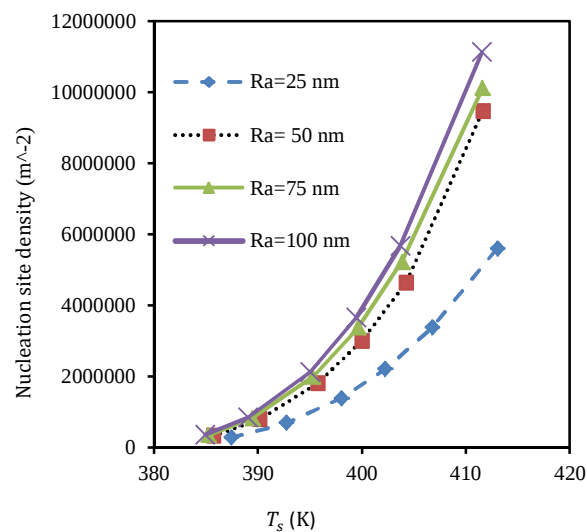
نمودار ۶) تاثیر زبری سطح روی قطر جدایش حباب برحسب شارهای حرارتی مختلف



نمودار ۳) تاثیر زبری سطح روی چگالی جَوانه‌زنی برحسب شارهای حرارتی



نمودار ۷) تاثیر زبری سطح روی فرکانس جدایش حباب برحسب شارهای حرارتی مختلف



نمودار ۴) تاثیر زبری سطح روی چگالی جَوانه‌زنی برحسب دمای‌های سطح

چگالی نقاط جوشه‌زنی فعال (m^{-2})	N_a
عدد بی‌بعد ناسلت	Nu
فشار (Nm^{-2})	P
عدد بی‌بعد پرانتل	Pr
انتقال حرارت ناشی از جابه‌جایی اجباری (Wm^{-2})	Q_c
انتقال حرارت ناشی از تبخیر (Wm^{-2})	Q_e
انتقال حرارت ناشی از هدایت گذرا (Wm^{-2})	Q_{tc}
عدد بی‌بعد رینولدز	Re
دما (کلوین)	T
دمای مادون سرد سیال $T_{sat} - T_l$ (کلوین)	T_{sub}
دمای مافوق گرم دیواره $T_w - T_{sat}$ (کلوین)	T_{sup}
دمای دیواره (کلوین)	T_w
اختلاف در دما (کلوین)	ΔT
زمان (ثانیه)	t
سرعت (ms^{-1})	u
فاصله بی‌بعد از دیواره	y^+
زبری سطح هیتر	R_a
قطر نانوذرات	d_p

علامه یونانی

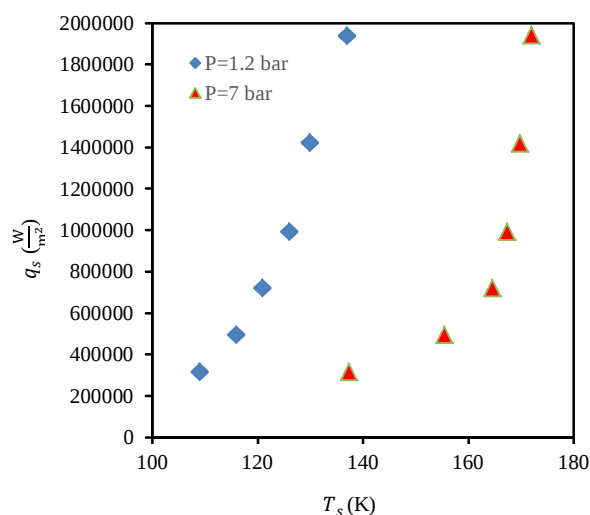
کسر حجمی بخار	α
ویسکوزیته دینامیکی (Pa.s)	μ
چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)	ρ
کشش سطحی ($\frac{N}{m}$)	σ
نرخ انتقال جرم بین دو فاز (تقطیر): ($\frac{kg}{m^2s}$)	Γ_{lg}
نرخ انتقال جرم بین دو فاز (تبخیر): ($\frac{kg}{m^2s}$)	Γ_{gl}

زیرنویس

خواص موثر	eff
فاز بخار	g
فاز مایع	l
ذره	p
میانگین	avg

منابع

- 1- Kandlikar SG. Development of a flow boiling map for subcooled and saturated flow boiling of different fluids inside circular tubes. Journal of Heat Transfer. 1991;113(1):190-200.
- 2- Gupta A, Saini JS, Varma HK. Boiling heat transfer in small horizontal tube bundles at low cross-flow velocities. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1995;38(4):599-605.
- 3- Kumar Sh, Mohanty B, Gupta SC. Boiling heat transfer from a vertical row of horizontal tubes. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2002;45(18):3857-3864.
- 4- Ribatski G, Saiz Jabardo JM, Da Silva EF. Modeling and experimental study of nucleate boiling on a vertical array of horizontal plain tubes. Experimental Thermal and Fluid Science. 2008;32(8):1530-1537.
- 5- Kolev NI. How accurately can we predict nucleate boiling?. Experimental Thermal and Fluid Science. 1995;10(3):370-378.
- 6- Pioro IL, Rohsenow W, Doerffer SS. Nucleate pool-boiling heat transfer, I: Review of parametric effects of boiling surface. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2004;47(23):5033-5044.
- 7- Steiner D, Taborek J. Flow boiling heat transfer in vertical tubes correlated by an asymptotic model. Heat Transfer Engineering. 1992;13(2):43-69.
- 8- Yan J, Bi Q, Liu Z, Zhu G, Cai L. Subcooled flow boiling heat transfer of water in a circular tube under high heat fluxes and high mass fluxes. Fusion Engineering and Design. 2015;100:406-418.



نمودار ۸) تأثیر فشار روی دمای سطح دیوار در زیری ۵۰ نانومتر

۶- نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر غلظت نانوذرات مس و زیری ناشی از رسوبات نانوذرات بر دمای سطح هیتر و دینامیک حباب است. برای این منظور، خواص نانوسیال، متغیر با دما در نظر گرفته شد. سپس سیال همگن با دیدگاه اویلر-اویلر مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. نتایج حاصل از حل عددی با نتایج آزمایش، تطابق بسیار خوبی داشتند. در ادامه، حالت‌های مختلف زیری با شارهای حرارتی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

- ۱- با افزایش زیری سطح ناشی از رسوبات نانوذرات، دمای سطح افت پیدا می‌کند.
 - ۲- با افزایش زیری، چگالی نقطه جوشه‌زنی افزایش می‌یابد.
 - ۳- با افزایش زیری، زمان انتظار حباب و قطر جدایش حباب، افزایش و فرکانس جدایش حباب کاهش یافته است.
- تشکر و قدردانی:** موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.
- تأییدیه اخلاقی:** موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.
- تعارض منافع:** موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.
- سهام نویسندگان:** حسن علیمردادی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ مهرزاد شمس (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)
- منابع مالی:** موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

۷- پی‌نوشت

نسبتی از سطح پوشیده‌شده با حباب‌ها	A_{tc}
ظرفیت گرمایی ($Jkg^{-1}K^{-1}$)	C_p
ظرفیت گرمایی دیواره ($Jkg^{-1}K^{-1}$)	C_w
قطر (متر)	d
قطر حباب در داخل سیال (متر)	d_B
قطر جدایش حباب از روی سطح (متر)	d_w
نیروی برهم کنش بخار روی مایع (نیوتن)	F_{lg}
نیروی برهم کنش مایع روی بخار (نیوتن)	F_{gl}
نیروی برهم کنش مایع روی بخار (نیوتن)	F_{gl}
فرکانس جدایش حباب (هرتز)	f
شار جرمی ($kgm^{-2}s^{-1}$)	G
شتاب گرانش (ms^{-2})	g
آنتالپی (Jkg^{-1})	H
ضریب انتقال حرارت بین دو فاز (Jkg^{-1})	h
گرمای نهان تبخیر (Jkg^{-1})	h_{fg}
ضریب هدایت گرمایی ($Wm^{-2}K^{-1}$)	k
جرم (کیلوگرم)	m

Numerical study of non-uniform magnetic fields effects on subcooled nanofluid flow boiling. *Progress in Nuclear Energy*. 2014;74:232-241.

25- Alimoradi H, Shams M. Optimization of subcooled flow boiling in a vertical pipe by using artificial neural network and multi objective genetic algorithm. *Applied Thermal Engineering*. 2017;111:1039-1051.

26- Alimoradi H, Shams M, Valizadeh Z. The effects of nanoparticles in the subcooled boiling flow in the channels with different cross-sectional area and same hydraulic diameter. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;16(12):545-554. [Persian]

27- Cheung SCP, Vahaji S, Yeoh GH, Tu JY. Modeling subcooled flow boiling in vertical channels at low pressures - part 1: Assessment of empirical correlations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014;75:736-753.

28- Antal SP, Lahey Jr RT, Flaherty JE. Analysis of phase distribution in fully developed laminar bubbly two-phase flow. *International Journal of Multiphase Flow*. 1991;17(5):635-652.

29- Tolubinsky VI, Kostanchuk DM. Vapour bubbles growth rate and heat transfer intensity at subcooled water boiling. *Proceedings of the 4th International Heat Transfer Conference*. Danbury: Begel House; 1970.

30- Cole R. A photographic study of pool boiling in the region of the critical heat flux. *AIChE Journal*. 1960;6(4):533-538.

31- Kurul N, Podowski MZ. On the modeling of multidimensional effects in boiling channels. *Proceedings of the 27th National Heat Transfer Conference*. Unknown City: Unknown Publisher; 1991. pp. 301-314.

32- Yang SR, Kim RH. A mathematical model of the pool boiling nucleation site density in terms of the surface characteristics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1988;31(6):1127-1135.

33- Benjamin RJ, Balakrishnan AR. Nucleation site density in pool boiling of saturated pure liquids: Effect of surface microroughness and surface and liquid physical properties. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1997;15(1):32-42.

34- Wang CH, Dhir VK. Effect of surface wettability on active nucleation site density during pool boiling of water on a vertical surface. *Journal of Heat Transfer*. 1993;115(3):659-669.

35- Basu N, Warriar GR, Dhir VK. Onset of nucleate boiling and active nucleation site density during subcooled flow boiling. *Journal of Heat Transfer*. 2002;124(4):717-728.

36- Hibiki T, Ishii M. Active nucleation site density in boiling systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2003;46(14):2587-2601.

37- Kim SJ, Bang IC, Buongiorno J, Hu LW. Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007;50(19-20):4105-4116.

38- Ganapathy H, Sajith V. Semi-analytical model for pool boiling of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013;57(1):32-47.

39- Setoodeh H, Keshavarz A, Ghasemian A, Nasouhi A. Subcooled flow boiling of alumina/water nanofluid in a channel with a hot spot: An experimental study. *Applied Thermal Engineering*. 2015;90:384-394.

9- Khalili Sadaghiani A, Koşar A. Numerical and experimental investigation on the effects of diameter and length on high mass flux subcooled flow boiling in horizontal microtubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016;92:824-837.

10- Das SK, Putra N, Roetzel W. Pool boiling characteristics of nano-fluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2003;46(5):851-862.

11- Li CH, Wang BX, Peng XF. Experimental investigation on boiling of nano-particle suspensions. 5th International Conference on Boiling Heat Transfer (ICBHT 2003), Montego Bay, Jamaica, May 4-8, 2003. Montego Bay: ICBHT; 2003.

12- Ahmed O, Hamed MS. The effect of experimental techniques on the pool boiling of nanofluids. 7th International Conference on Multiphase Flow (ICMF 2010), 30 May - 4 June 2010, Tampa, FL, USA, Marriott Tampa Waterside. Gainesville FL: University of Florida; 2010.

13- Raveshi MR, Keshavarz A, Salemi Mojarrad M, Amiri Sh. Experimental investigation of pool boiling heat transfer enhancement of alumina-water-ethylene glycol nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2013;44:805-814.

14- Tryggvason G, Esmaeeli A, Al-Rawahi N. Direct numerical simulations of flows with phase change. *Computers & Structures*. 2005;83(6-7):445-453.

15- Chen E, Li Y, Cheng X, Wang L. Modeling of low-pressure subcooled boiling flow of water via the homogeneous MUSIG approach. *Nuclear Engineering and Design*. 2009;239(10):1733-1743.

16- Yang Z, Peng XF, Ye P. Numerical and experimental investigation of two phase flow during boiling in a coiled tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008;51(5-6):1003-1016.

17- Krepper E, Končar B, Egorov Y. CFD modelling of subcooled boiling - concept, validation and application to fuel assembly design. *Nuclear Engineering and Design*. 2007;237(7):716-731.

18- Xu L, Xu J. Nanofluid stabilizes and enhances convective boiling heat transfer in a single microchannel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2012;55(21-22):5673-5686.

19- Abedini E, Behzadmehr A, Hosseini Sarvari SM, Mansouri SH. Numerical investigation of subcooled flow boiling of a nanofluid. *International Journal of Thermal Sciences*. 2013;64:232-239.

20- Boudouh M, Louahlia Gualous H, De Labachellerie M. Local convective boiling heat transfer and pressure drop of nanofluid in narrow rectangular channels. *Applied Thermal Engineering*. 2010;30(17-18):2619-2631.

21- Henderson K, Park YG, Liu L, Jacobi AM. Flow-boiling heat transfer of R-134a-based nanofluids in a horizontal tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010;53(5-6):944-951.

22- Chehade AA, Louahlia Gualous H, Le Masson S, Fardoun F, Besq A. Boiling local heat transfer enhancement in minichannels using nanofluids. *Nanoscale Research Letters*. 2013;8:130.

23- Lee T, Lee JH, Jeong YH. Flow boiling critical heat flux characteristics of magnetic nanofluid at atmospheric pressure and low mass flux conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013;56(1-2):101-106.

24- Aminfar H, Mohammadpourfard M, Maroofiazar R.