

شبیه‌سازی عددی جوشش استخری فیلمی نانو سیالات پایه اتانول

علی هدایتی^۱، مرتضی خیاط^{۲*}، محمد حسن نوبختی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- ahedayati7558@gmail.com

۲- mkhayat@srbiau.ac.ir

۳- m.nobakhti@srbiau.ac.ir

چکیده

در این تحقیق ابتدا فرایند جوشش استخری فیلمی اتانول خالص به صورت عددی شبیه‌سازی شده و سپس جوشش استخری فیلمی نانو سیالات شامل دو نوع دو نوع نانوذره SiO_2 و Al_2O_3 سیال پایه اتانول با دو غلظت حجمی 0.1% و 0.3% شبیه‌سازی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند در جوشش فیلمی، حضور نانوذرات در سیال پایه، مقدار ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی را افزایش داده است. بیشترین مقدار این ضریب برای نانوسیالات آلومینا و سیلیکا با غلظت حجمی 0.3% ، به ترتیب 0.322 ($kW/m^2 \cdot ^\circ C$) و 0.3 ($kW/m^2 \cdot ^\circ C$) بدست آمده است. علاوه بر این حضور نانو ذرات در فرایند جوشش، شار حرارتی مینیمم را به طور محسوس افزایش داده است. طبق نتایج شبیه‌سازی عددی، مقدار شار حرارتی مینیمم در جوشش اتانول خالص $28/99$ (kW/m^2)، در جوشش نانوسیال آلومینا- اتانول با غلظت های حجمی 0.1% و 0.3% ، به ترتیب $37/11$ (kW/m^2) و $38/84$ (kW/m^2) و در جوشش نانوسیال سیلیکا - اتانول با غلظت های حجمی 0.1% و 0.3% ، به ترتیب $35/81$ (kW/m^2) و $38/31$ (kW/m^2) بدست آمده است. با مقایسه این مقادیر با نتایج تجربی، سازگاری خوبی بین نتایج برقرار می باشد.

واژگان کلیدی

جوشش فیلمی، شار حرارتی مینیمم، نانوسیال، ضریب انتقال حرارت

* نویسنده مخاطب

Numerical simulation of film pool boiling of ethanol based nanofluids

Ali hedayati¹, Morteza Khayat², Mohammad hassan Nobakhti³

¹ Master of Science, Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

² Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

ahedayati7558@gmail.com

mkhayat@srbiau.ac.ir

m.nobakhti @srbiau.ac.ir

Abstract

In recent decades, considerable efforts have been made by thermalfluid specialists to investigate the boiling heat transfer process. Pool boiling of pure liquids and nanofluids has been widely studied in the last decade, but the existing knowledge on modeling of nanofluids pool boiling process is still limited. The boiling of fluids containing tinny solid particles is very complicated due to the interaction between the existing phases, their interface and the heating surface. Some new research shows that many factors are effective on pool boiling of nanofluids. Among these factors, we can mention particle size, concentration, structure of boiling surface and dynamics of bubbles. In this research, the film pool boiling process of pure ethanol was numerically simulated. Then, the film pool boiling of nanofluids including two types of nanoparticles Al_2O_3 , SiO_2 and ethanol base fluid with two volumetric concentrations of 0.1% and 0.3% have been simulated. The results show that in film boiling, the presence of nanoparticles in the base fluid has increased the heat transfer coefficient. The highest value coefficient for alumina and silica nanofluids with volumetric concentration of 0.3% was obtained, respectively 0.32 ($kW/m^2\text{ }^\circ C$) and 0.3 ($kW/m^2\text{ }^\circ C$). In addition, the presence of nanoparticles in the boiling process has significantly increased the minimum heat flux. According to the results of numerical simulation, the minimum heat flux value in boiling of pure ethanol is 28.99 (kW/m^2), in boiling of alumina-ethanol nanofluid with volumetric concentrations of 0.1% and 0.3%, is 37.11 (kW/m^2) and 38.84 (kW/m^2), respectively and in boiling of silica-ethanol nanofluid with volumetric concentrations of 0.1% and 0.3%, is 35.81 (kW/m^2) and 38.31 (kW/m^2), respectively. The highest heat transfer coefficient is achieved by alumina nanofluid with 0.3% concentration, while the highest minimum heat flux is achieved by silica nanofluid with 0.3% concentration. The numerical results are in good agreement with the experimental results. By comparing these values with the experimental results, there is a good consistency between the results.

Keywords

Film boiling, Minimum heat flux, Nanofluid, Heat transfer coefficient

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، تلاش‌های قابل‌توجهی توسط متخصصان ترموسیال و انتقال حرارت برای بررسی فرایند انتقال حرارت جوشی صورت گرفته است. جوشش استخری مایعات و نانو سیالات خالص به طور گسترده در دهه گذشته مورد توجه قرار گرفته است، اما دانش موجود در مورد مدل‌سازی فرایند جوشش استخری نانو سیالات کماکان محدود است. جوشش سیالات حاوی ذرات جامد ریز به دلیل برهم‌کنش بین فازهای موجود، فصل مشترک آن‌ها و سطح گرمایش بسیار پیچیده است [۱]. برخی از تحقیقات جدید نشان می‌دهند که عوامل بسیاری بر جوشش استخری نانو سیالات موثر می‌باشند. از جمله این عوامل می‌توان به اندازه ذرات، غلظت، ساختار سطح جوشش و دینامیک حباب‌ها اشاره نمود. از این رو، مطالعه چنین مکانیسم‌ها و پارامترهایی از منظر تئوری نیازمند بررسی‌های بیشتر برای ایجاد یک مدل دقیق جهت پیش‌بینی رفتار سیالاتی و حرارتی آن‌ها می‌باشد [۲-۴].

هو و همکاران [۵] از نانو سیال سیلیکا پایه آب برای بررسی ویژگی‌های انتقال حرارت جوشش استخری با غلظت‌های جرمی مختلف استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که ضریب انتقال حرارت جوشش استخری با افزایش غلظت نانوذرات در مقایسه با آب خالص کاهش می‌یابد. رستمیان و اعتصامی [۶] نانو سیال سیلیکا پایه آب را بر روی سطح جوشش مسطح دایروی آزمایش نمودند تا تغییرات سطح جوشش و ویژگی‌های جوشش استخری نانو سیال را در زمان‌های مختلف بررسی نمایند. نتایج نشان داد که با افزایش زمان جوشش، رفتار جوشش نانو سیال با جوشش آب خالص متفاوت است. نتایج مربوط به زبری سطح جوشش در زمان‌های مختلف نشان داد که زبری سطح با گذشت زمان جوشش افزایش می‌یابد. عزیزت و همکاران [۷] یک تحقیق تجربی بر روی عملکرد انتقال حرارت جوشش استخری نانو سیالات پایه آب Al_2O_3 و SiO_2 و نانو سیالات هیبریدی آن‌ها انجام دادند. آن‌ها از غلظت‌های حجمی مختلف و همچنین نسبت‌های مختلف اختلاط نانو سیال‌ها استفاده نمودند تا تأثیر نانو سیال‌های هیبریدی بر فرایند جوشش را بررسی نمایند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش یا کاهش ضریب انتقال حرارت به پارامترهایی مانند غلظت، نوع و زمان جوشش نانو سیال بستگی دارد.

اکبری و همکاران [۸] انتقال حرارت جوشش استخری نانو سیالات گرافن را بر روی یک سطح جوشش صاف تحت فشار جوشش

اشباع و اتمسفر بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب انتقال حرارت جوشش استخری از طریق افزایش غلظت صفحات گرافن به طور قابل توجهی افزایش یافته است. سرافراز و همکاران [۹] عملکرد جوشش استخری نانو سیال اکسید آهن پایه آب را در حضور میدان مغناطیسی ثابت مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که ضریب انتقال حرارت جوشش استخری می‌تواند در حضور میدان مغناطیسی افزایش یابد در حالی که با افزایش غلظت نانوذرات کاهش می‌یابد. مودی و همکاران [۱۰] به طور تجربی عملکرد جوشش استخری نانو سیال آلومینا را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب انتقال حرارت جوشش استخری با افزایش غلظت نانوذرات و همچنین برای سطوح رسوب گذاری شده توسط نانوذرات افزایش می‌یابد. گل‌کار و همکاران [۱۱] عملکرد جوش هسته‌ای و فیلمی نانو سیالات پایه اتانول را روی صفحه تخت افقی به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در مطالعه خود از نانوذرات Al_2O_3 و SiO_2 استفاده نمودند. هدف اصلی این مطالعه به دست آوردن مشخصه‌های انتقال حرارت جوشش هسته‌ای و فیلمی نانو سیالات بوده است. برای این منظور، نانو سیالات Al_2O_3 و SiO_2 پایه اتانول با سه غلظت حجمی ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد تهیه شدند. نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات به سیال پایه، ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای و جوشش فیلمی را بهبود بخشیده است. همچنین شار حرارتی بحرانی نانو سیال‌های پایه اتانول به طور قابل توجهی بیشتر از اتانول خالص بود. در بین غلظت‌های مورد بررسی، غلظت حجمی ۰/۵ درصد بهترین عملکرد را برای هر دو نانو سیال داشت، به طوری که حداقل شار حرارتی نانو سیال‌های پایه اتانول Al_2O_3 و SiO_2 به ترتیب ۴۵/۹۶٪ و ۴۵/۶۷٪ نسبت به اتانول خالص افزایش یافت.

گوپتا و همکاران [۱۲] یک بررسی عددی در یک دامنه هندسی دو بعدی برای محاسبه ضریب انتقال حرارت در فشارهای اتمسفریک و خلاء انجام دادند. در مطالعه آن‌ها شار گرماهای ثابت مختلف بر روی سطح جوشش اعمال گردید. آن‌ها از یک مدل چندفازی با رویکرد اولبری که شامل یک مدل جوشش نیز بود، استفاده نمودند. در مدل مورد استفاده آن‌ها از مدل‌های فرعی مختلف از جمله مدل‌های درگ، لیفت، گرما و انتقال جرم استفاده شده بود. نتایج آن‌ها برای ضریب انتقال حرارت با نتایج تجربی مقایسه و صحت‌سنجی گردید. گوبینات و همکاران [۱۳] مشخصه

شد. نتایج نشان داد که استفاده از نانوسیال سیلیکا بر روی سطح جوشش می‌تواند انتقال حرارت را بهبود بخشد. همچنین آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در شارهای حرارتی بالا، وابستگی به غلظت نانوذرات افزایش می‌یابد.

مجدی و همکاران [۱۸] دو نوع نانو ذره Al_2O_3 و CuO در سیال پایه آب را برای بررسی عملکرد جوشش استخری مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها از اشکال مختلف پره‌ها برای افزایش سطح جوشش استفاده کردند. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت نانو ذرات، سرعت بخار افزایش یافته و این موضوع بر فشار و سرعت حرکت حباب در طی فرایند جوشش تأثیر می‌گذارد.

کامل و همکاران [۱۹] طی پژوهشی عددی به تصحیح ضریب زمان انتظار حباب^۱ در مدل RPI پرداختند و سپس این ضریب را به دمای فوق گرم ارتباط دادند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی آن‌ها برای منحنی جوشش استخری و ضریب انتقال حرارت جوششی تطابق بسیار خوبی با داده‌های تجربی ارائه شده در پژوهش‌های دیگر داشت.

به‌طور کلی مطالعات تجربی فرایند جوشش بسیار پر هزینه هستند و لذا شبیه‌سازی عددی این فرایند می‌تواند به‌عنوان جایگزینی مناسب مطرح گردد. در عین حال اکثر پژوهش‌های عددی صورت گرفته در خصوص جوشش استخری هسته‌ای آب یا نانو سیالات پایه آب بوده و مطالعات بسیار اندکی در خصوص جوشش استخری فیلمی صورت پذیرفته است. در تحقیق حاضر شبیه‌سازی عددی جوشش استخری فیلمی اتانول خالص و نانو سیالات آلومینا و سیلیکا پایه اتانول با غلظت‌های حجمی ۰/۱٪ و ۰/۳٪ روی سطح جوشش دایروی مسی ساده به قطر ۲۵ میلی‌متر با استفاده از نرم‌افزار انسیس - فلوننت انجام شده است. مدل‌سازی در فشار ۸۶ کیلوپاسکال و دمای ۲۳ °C صورت پذیرفته است و نتایج حاصل با داده‌های تجربی مشابه مقایسه شده‌اند.

۲- شبیه‌سازی عددی

۲-۱- معادلات حاکم

یکی از مهم‌ترین نکته‌های مورد توجه در شبیه‌سازی فرایندهای چند فازی، انتخاب دیدگاه صحیح برای بررسی سیستم می‌باشد. در رویکرد اویلری - اویلری هر دو فاز به‌صورت پیوسته در نظر گرفته شده و درصد حجمی فازها به‌صورت توابع پیوسته در فضا و

های انتقال حرارت نانوسیال آب- آلومینا در جوشش استخری در حالت مادون سرد را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها همچنین یک بررسی تجربی از جوشش استخری نانوسیال آلومینا بر روی یک لوله افقی با دماهای مختلف مادون سرد برای اعتبارسنجی مدل خود انجام دادند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی نشان داد که تطابق بسیار خوبی بین مقادیر دمای اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل عددی وجود دارند. مائو و همکاران [۱۴] انتقال حرارت جوشش استخری سیال R134a روی سطح افقی تحت فشار اتمسفر را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. مدل چند فازی اویلری- اویلری به همراه زیر مدل جوشش هسته‌ای RPI مورد استفاده قرار گرفت. آن‌ها از شارهای حرارتی مختلف و مکان‌های مختلف برای گرم‌کن در داخل محفظه جوشش استخری استفاده نمودند. پس از استفاده از رابطه اصلاح شده چگالی محل هسته‌زایی انتقال حرارت جوشش استخری، نتایج به دست آمده تطابق خوبی با داده‌های تجربی نشان داد. کامل و همکاران [۱۵] ویژگی‌های جوشش استخری آب خالص و نانوسیال اکسید سیلیسیم پایه آب را در داخل یک محفظه جوشش مستطیلی شکل بررسی نمودند. آن‌ها از یک مدل اویلری- اویلری دو فازی برای تعیین منحنی جوشش و برهم‌کنش بین دو فاز استفاده کردند. آن‌ها در شبیه‌سازی خود پارامترهایی چون زبری و ترشوندگی سطح را نیز در نظر گرفتند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که اثر کسر حجمی بخار در آب خالص نسبت به نانوسیال در دمای فوق گرم معین از اهمیت بیشتری برخوردار است. این پدیده به دلیل رسوب نانوذرات روی سطح جوشش اتفاق افتاد. علیمرادی و همکاران [۱۶] مطالعه‌ای عددی در مورد تأثیر ارتعاش بر روی جوشش استخری انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش ارتعاش منجر به بهبود ضریب انتقال حرارت می‌شود. بنابراین، آن‌های یک طرح عددی برای اعمال اثرات ارتعاش بر انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیال توسعه دادند. زابلی و همکاران [۱۷] اثرات شار حرارتی و غلظت نانوسیال را بر روی مشخصه‌های انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیال مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش، از رویکرد اویلری- اویلری برای شبیه‌سازی عددی استفاده شد، به‌طوری که سیال آب مایع به عنوان فاز پیوسته و بخار آب به عنوان فاز پراکنده در نظر گرفته

^۱ Coefficient of the bubble waiting time

$$f = \frac{C_D Re}{24} \quad (6)$$

که در این رابطه C_D از رابطه (۷) به دست می‌آید.

$$C_D = \begin{cases} 24(1+0.15Re^{0.687})/Re & Re \leq 1000 \\ 0.44 & Re > 1000 \end{cases} \quad (7)$$

در این رابطه عدد رینولدز ظاهر شده، رینولدز نسبی است که برای فاز اصلی q طبق رابطه (۸) تعریف می‌گردد.

$$Re = \frac{\rho_q |\vec{V}_p - \vec{V}_q| d_p}{\mu_p} \quad (8)$$

در جریان‌های دوفازی، نرم‌افزار فلونت اثر فاز اصلی بر فاز ثانویه را که ناشی از وجود گرادیان سرعت بین فازهای مختلف است، در قالب نیروی برآ محاسبه می‌نماید. طبق رابطه درو^۱ مقدار نیروی برآ وارد بر فاز q از رابطه (۹) قابل محاسبه است.

$$\vec{F}_{lift} = -C_l \rho_q \alpha_p (\vec{V}_q - \vec{V}_p) \times (\nabla \times \vec{V}_q) \quad (9)$$

در جریان‌های دوفازی مایع - گاز نیرویی تمایل به دور کردن فاز دوم از دیواره دارد. در مدل اوپلری نرم‌افزار فلونت این نیرو با نام نیروی روان کاری دیواره از رابطه (۱۰) به دست می‌آید.

$$\vec{F}_{lift} = -C_l \rho_q \alpha_p (\vec{V}_q - \vec{V}_p) \times (\nabla \times \vec{V}_q) \quad (10)$$

معادله بقای انرژی برای فاز q طبق رابطه (۱۱) بیان می‌گردد.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q h_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{u}_q h_q) = \\ -\alpha_q \frac{\partial p_q}{\partial t} + \vec{\tau}_q : \nabla \vec{u}_q - \nabla \cdot \vec{q}_q + S_q \\ + \sum_{p=1}^n (Q_{pq} + \dot{m}_{pq} h_{pq} - \dot{m}_{qp} h_{qp}) \end{aligned} \quad (11)$$

مدل‌های مختلفی جهت تعیین ضریب انتقال حرارت بین فازها وجود دارد. در روش چن-ماینگر^۲ عدد ناسلت طبق رابطه (۱۲) محاسبه می‌گردد [۲۱].

$$Nu_p = 0.185 Re_p^{7/10} Pr^{1/2} \quad (12)$$

که در آن Re_p عدد رینولدز نسبی بر اساس قطر فاز p و سرعت نسبی $|\vec{U}_p - \vec{U}_q|$ می‌باشد.

زمان تعریف می‌شود. قانون پایستگی فازها با ساختاری مشابه لحاظ گشته و بر اساس روابط تئوری یا آزمایشگاهی ارتباط بین آن‌ها برقرار می‌گردد. باتوجه به پیوسته بودن فاز بخار در فرایند جوشش فیلمی، روش مورد استفاده در شبیه‌سازی این پدیده در نرم‌افزار فلونت استفاده از روش اوپلری - اوپلری می‌باشد. معادلات بقای جرم و مومنتم به ترتیب مطابق روابط (۱) و (۲) بیان می‌گردند [۲۰].

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{V}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_q \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \vec{V}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{V}_q \vec{V}_q) \\ = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} + \sum_{p=1}^n (K_{pq} (\vec{V}_p - \vec{V}_q) + \dot{m}_{pq} \vec{V}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{V}_{qp}) \\ + (F_{q,drag} + F_{q,lift} + F_{q,wl} + F_{q,vm} + F_{q,td}) \end{aligned}$$

که روابط (۱) و (۲) برای فاز q می‌باشد و برای فاز p هم همین روابط برقرار است.

که در رابطه (۲)، $\vec{\tau}_q$ تانسور تنش-کرنش فاز q بوده و از رابطه (۳) بدست می‌آید.

$$\vec{\tau}_q = \alpha_q \mu_q (\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^T) + \alpha_q \left(\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q \right) \nabla \cdot \vec{v}_q \vec{I} \quad (3)$$

هنگام تحلیل فرایندهای دو و چند فازی نیروهای مختلفی در تبادل بین فازها ظاهر می‌شوند که می‌بایست در شبیه‌سازی پدیده جوشش مورد توجه ویژه قرار گیرند. برای جریان‌های مایع - گاز ضریب تبادل فازها از رابطه (۴) محاسبه می‌گردد.

$$K_{pq} = \frac{\rho_p f}{6 \tau_p} d_p A_i \quad (4)$$

که در این رابطه τ_p زمان ماند ذرات می‌باشد و از رابطه (۵) محاسبه می‌گردد.

$$\tau_p = \frac{\rho_d d_p^2}{18 \mu_q} \quad (5)$$

تقریباً تمام مدل‌های محاسبه f شامل ضریب پسای C_D می‌باشند که وابسته به عدد رینولدز نسبی بین فازها می‌باشد. در مدل شیلر نیومن، f از رابطه (۶) محاسبه می‌گردد.

¹ Drew

² Chen and Mayinger

طبق پیش فرض نرم افزار، مقدار C_{ke} برابر ۰/۷۵ و مقدار C_{td} برابر ۰/۴۵ در نظر گرفته می شوند. طبق این مدل برای فاز پراکنده لزجت سینماتیک آشفته با فرض $v_p = v_q$ محاسبه می گردد. در نرم افزار فلونت، مدل های جوشش دیواره با سه شرط مرزی متفاوت دما ثابت، شار حرارتی مشخص و ضریب انتقال حرارتی ویژه (در شرط مرزی دیواره کوپل شده) بیان می شوند. یکی از مدل های کارآمد مورد استفاده توسط نرم افزار فلونت، جداسازی شار حرارتی دیواره است که به طور مخفف RPI نامیده می شود. در این روش حرارت منتقل شده از دیواره به سه بخش شار حرارتی جابه جایی^۲ q_c ، شار حرارتی دفع شده^۳ q_Q و شار حرارتی تبخیری^۴ q_E ، تقسیم می گردد. بر این اساس شار حرارتی منتقل شده از دیواره داغ به سیال که با q_w ، نمایش داده می شود طبق رابطه (۲۰) قابل محاسبه است.

$$q_w'' = q_c'' + q_Q'' + q_E'' \quad (17)$$

هنگام استفاده از مدل پایه RPI دمای بخار محاسبه نمی شود و دمای اشباع برای آن منظور می شود. در مدل غیر تعادلی^۵، دمای بخار در فرایند حل لحاظ می گردد که در شبیه سازی حاضر از این مدل استفاده شده است. در استفاده از این مدل، معادله (۲۰) به معادله (۲۱) تبدیل می گردد.

$$q_w'' = (q_c'' + q_Q'' + q_E'')f(\alpha_l) + (1 - f(\alpha_l))q_v'' + q_G'' \quad (18)$$

که در آن q_v'' بیانگر شار حرارتی جابجایی فاز بخار، q_G'' نشان دهنده شار حرارتی سایر فازهای گازی و $f(\alpha_l)$ کسر حجمی مایع می باشد.

۲-۲- خواص ترموفیزیکی نانو سیالات

طبق تئوری اختلاط، هر یک از اجزای مخلوط به میزان کسر حجمی بخش مورد نظر، در خواص مخلوط نقش دارند. براین اساس دانسیته، ظرفیت حرارتی، ضریب هدایت حرارتی و لزجت نانو سیالات به ترتیب طبق روابط (۲۲) تا (۲۵) محاسبه می گردند [۲۲، ۲۳].

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_{np} \quad (19)$$

در خلال فرایند جوشش به دلیل ناپایداری هیدرودینامیکی حاصل از رشد و حرکت حباب، آشفستگی داخل سیال ایجاد شده و جریان سیال متلاطم خواهد شد که در تحقیق حاضر از مدل $k - \varepsilon$ (Realizable) جهت شبیه سازی جریان مغشوش استفاده شده است [۱۹].

در این تحقیق برای شبیه سازی اغتشاش در محاسبات مربوط به جریانات دوفازی به روش اولیری، از روش فاز پراکنده استفاده شده است. معادلات انتقال در فاز پیوسته و بدون در نظر گرفتن نیروهای شناوری، انبساط و نیروهای تعریف شده توسط کاربر، مطابق روابط (۱۶) و (۱۷) خواهند بود. برای یافتن مقادیر انرژی جنبشی و اتلاف فاز پراکنده از معادلات انتقال استفاده نمی شود و مقیاس های زمان و طول جهت ارزیابی ضرایب پراکندگی، روابط و معادلات انرژی جنبشی هر فاز مورد استفاده قرار می گیرند.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q k_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{U}_q k_q) = \nabla \cdot \left(\alpha_q \left(\mu_q + \frac{\mu_{t,q}}{\sigma_k} \right) \nabla k_q \right) + \alpha_q G_{k,q} - \alpha_q \rho_q \epsilon_q + \alpha_q \rho_q \Pi_{kq} \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \epsilon_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{U}_q \epsilon_q) = \nabla \cdot \left(\alpha_q \left(\mu_q + \frac{\mu_{t,q}}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon_q \right) + \alpha_q \frac{\epsilon_q}{k_q} (C_{1\epsilon} G_{k,q} - C_{2\epsilon} \rho_q \epsilon_q) + \alpha_q \rho_q \Pi_{\epsilon q} \quad (14)$$

در تحقیق حاضر جهت بررسی انتقال آشفستگی بین فازها، از مدل تروشکو-حسن^۱ استفاده شده است که در آن عبارات Π_{kq} و $\Pi_{\epsilon q}$ که نشان دهنده تاثیر فاز پراکنده روی فاز پیوسته Q می باشند، به ترتیب طبق روابط (۱۸) و (۱۹) محاسبه می شوند.

$$\Pi_{kq} = C_{ke} \sum_{p=1}^M \frac{K_{pq}}{\alpha_q \rho_q} |\vec{U}_p - \vec{U}_q|^2 \quad (15)$$

$$\Pi_{\epsilon q} = C_{td} \frac{1}{\tau_p} \Pi_{kq} \quad (16)$$

⁴ Evaporative heat flux

⁵ Non-equilibrium model

¹ Troschko-Hassan

² Convective heat flux

³ Quenching heat flux

می‌گردد. باتوجه به این موضوع که روابط موجود برای محاسبه چگالی مراکز هسته‌زایی و قطر جدایش حباب از زاویه تماس به‌عنوان معیار ترشوندگی سطح بهره می‌برند، جهت به‌دست‌آوردن پارامترهای جوشش، نیاز به مشخص نمودن زاویه تماس وجود دارد. برای محاسبه زاویه قطره نانوسیال از رابطه چینام و همکاران استفاده شده است [۲۷، ۲۸]. آنها با بررسی آزمایشگاهی نانوذرات مختلف با ابعاد ۱۵ تا ۵۰ نانومتر، در درصدهای حجمی صفر تا شش درصد و در دماهای متفاوت رابطه (۲۶) را برای محاسبه تغییرات زاویه تماس ارائه نمودند.

$$\frac{\theta_{nf}}{\theta_f} = a_1 \phi^2 + a_2 \phi + b_1 \left(\frac{T}{T_0} \right) + c_1 \left(\frac{d_p}{d_f} \right) \quad (23)$$

+D که در این رابطه d_p قطر نانوذرات بوده و d_f نیز مطابق رابطه (۲۷) محاسبه می‌شود.

جدول ۲: مقادیر ثوابت در رابطه چینام و همکاران

مقدار	ثابت
۱۰/۵۱۹۴	a_1
-۴/۱۷۹۱۲	a_2
-۰/۰۰۲۵۲۳۸۸	b_1
-۰/۰۰۰۶۷۴۰۶۳	c_1
۰/۹۸۹۳۴۵	D

$$d_f = 0.1 \left(\frac{6M}{N\pi\rho} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (27)$$

ثابت‌های موجود در رابطه (۲۶) در جدول (۲) ارائه شده است. در شبیه‌سازی حاضر مقدار θ_f برابر $71/6^\circ$ در نظر گرفته شده است [۱۱]. d_f برابر $0/39$ نانومتر و بنابراین θ_{nf} برابر $58/39^\circ$ خواهد شد که نشانگر زاویه تماس نانوسیال روی سطح صیقلی مسی می‌باشد. برای محاسبه چگالی مراکز هسته‌زایی در جوشش نانو سیالات، با توجه به رسوب ذرات روی سطح نیاز به دانستن زاویه تماس نانوسیال روی سطح رسوب کرده وجود دارد. با توجه به عدم موجود بودن زاویه تماس قطره نانوسیال روی سطح دارای رسوب و با در نظر گرفتن نتایج محققان دیگر از جمله ژانگ و ژاکوبی [۲۹]، زاویه تماس برای پیش‌بینی رفتار جوشش نانوسیال برابر $17/5^\circ$ در نظر گرفته شده است.

$$C_{p,nf} = \frac{\phi \rho_{np} C_{p,np} + (1-\phi) \rho_f C_{p,f}}{\rho_{nf}} \quad (20)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_{np} + (n-1)k_f - (n-1)\phi(k_f - k_{np})}{k_{np} + (n-1)k_f + \phi(k_f - k_{np})} \quad (21)$$

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \frac{1}{(1-\phi)^{-2.5}} \quad (22)$$

در رابطه (۲۴)، n ضریب شکل بوده و به صورت $n = \frac{3}{\psi}$ تعریف می‌شود و ψ ضریب کرویت بوده و در ذرات کاملاً کروی برابر ۱ می‌باشد. رابطه (۲۵) نیز توسط برینکمن^۱ [۲۴] ارائه شده است. خواص ترموفیزیکی اتانول خالص و نانو سیالات سیلیکا و آلومینا پایه اتانول با غلظت‌های حجمی مختلف در دمای اشباع $72/82^\circ C$ در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱: خواص ترموفیزیکی مواد استفاده شده در تحقیق حاضر [۲۵، ۲۶]

نوع ماده	دانسیتته (kg/m ³)	ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)	ظرفیت حرارتی (J/kg.K)	لزجت دینامیکی (Pa.s)
اتانول خالص	۷۴۱/۸	۰/۱۵۴	۲۸۷۵	۰/۰۰۱۲
نانوسیال آلومینا ۰/۱٪	۷۴۵/۰۲	۰/۱۵۴	۲۸۶۳/۸	۰/۰۰۱۱
نانوسیال آلومینا ۰/۳٪	۷۵۱/۴۸	۰/۱۵۵	۲۸۴۱/۵	۰/۰۰۱۱
نانوسیال سیلیکا ۰/۱٪	۷۴۳/۳۲	۰/۱۵۴	۲۸۶۸/۵	۰/۰۰۱۲
نانوسیال سیلیکا ۰/۳٪	۷۴۶/۳۸	۰/۱۵۵	۲۸۵۵/۵	۰/۰۰۱۱

۲-۳- جوشش نانو سیالات

عامل بسیار مهمی که در تحلیل پدیده جوشش تأثیرگذار است، مکانیزم تشکیل و رشد حباب می‌باشد. روابط پیش‌فرض نرم‌افزار فلوئنت، چگالی مراکز هسته‌زایی را فراتر از واقعیت پیش‌بینی نموده و لذا مناسب تحلیل جوشش نانو سیالات نمی‌باشند و نیاز به تعریف پارامترهای جوشش بر اساس روابط تجربی احساس

¹ Brinkman

جدول ۳: ابعاد هندسی تحقیق حاضر

نام پارامتر	مقدار (mm)
V7	۱۲/۵
V9	۲۵
V10	۷۵
H8	۳۰

شرایط مرزی برای دیواره‌های مختلف با در نظر گرفتن آزمایش‌های تجربی مرجع [۱۱] مطابق جدول (۴) در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۴: شرایط مرزی استفاده شده در شبیه‌سازی تحقیق حاضر

شرط مرزی	نوع مرز
دما ثابت	سطح جوشش
فشار ثابت	سطح آزاد
آدیاباتیک	دیواره‌های کناری و تحتانی
تقارن محوری	محور تقارن

به‌طور کلی فهرست تنظیمات استفاده شده در نرم‌افزار فلونت برای جوشش استخری فیلمی اتانول خالص و نانو سیالات آلومینا و سیلیکا پایه اتانول در جداول (۵) و (۶) ارائه شده‌اند.

جدول ۵: روابط استفاده شده جهت محاسبه تبادل بین فازها

نام رابطه استفاده شده	نوع تبادل بین فاز
Schiller-Naumann	نیروی پسا [۳۰]
Tomiya	نیروی برآ [۳۱، ۳۲]
Antal et al.	نیروی روان کاری دیواره [۳۳]
Lopez-de-bertodano	پراکندگی آشفستگی [۳۴]
Chen	ضریب انتقال حرارت [۲۱]

جدول ۶: روابط استفاده شده جهت محاسبه مشخصات جوشش

مشخصه جوشش	نام رابطه استفاده شده
قطر حباب هنگام ترک دیواره [۳۵]	Kocamustafaogullari Ishii
فرکانس جدایی حباب از دیواره [۳۶]	Cole
دانسیته سایت هسته-زایی [۳۷، ۳۸]	Lemmert-Chawla (برای اتانول) Li et al. (برای نانوسیال)
ضریب نفوذ سطح [۳۹]	Delvalla-Kenning

۲-۵- شبکه‌بندی و بررسی استقلال از شبکه

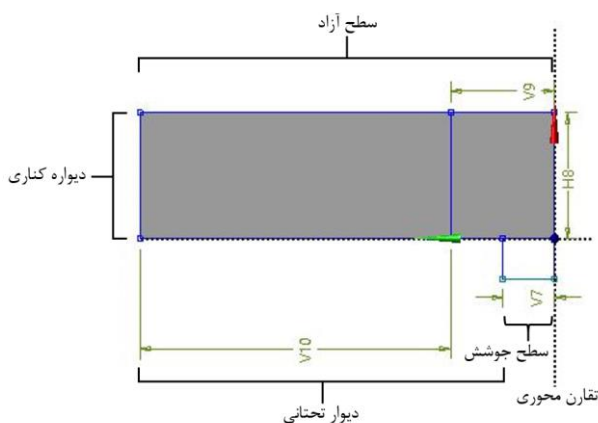
پس از ترسیم هندسه، شبکه‌بندی توسط نرم‌افزار انسیس مشینگ انجام شده است. شبکه‌بندی به روش ساختاریافته غیریکنواخت

۲-۴- هندسه مسئله، شرایط مرزی و روش حل

در تحقیق حاضر انتقال حرارت جوشش استخری فیلمی برای اتانول خالص و نانو سیالات آلومینا و سیلیکا پایه اتانول درون یک محفظه استوانه‌ای به قطر ۲۰۰ میلی‌متر روی سطح جوشش دایروی مسی به قطر ۲۵ میلی‌متر بررسی شده است. باتوجه به روش انجام آزمایش تجربی که در آن محفظه با یک لیتر سیال پر شده است؛ لذا ارتفاع سیال درون محفظه استوانه‌ای برابر ۳۰ میلی‌متر محاسبه و در شبیه‌سازی استفاده شده است. مدل‌سازی در فشار ۸۶ کیلوپاسکال و دمای $23^{\circ}C$ صورت پذیرفته است. شماتیک هندسه مسئله در شکل (۱) و ابعاد آن در جدول (۳) نشان داده شده‌اند.

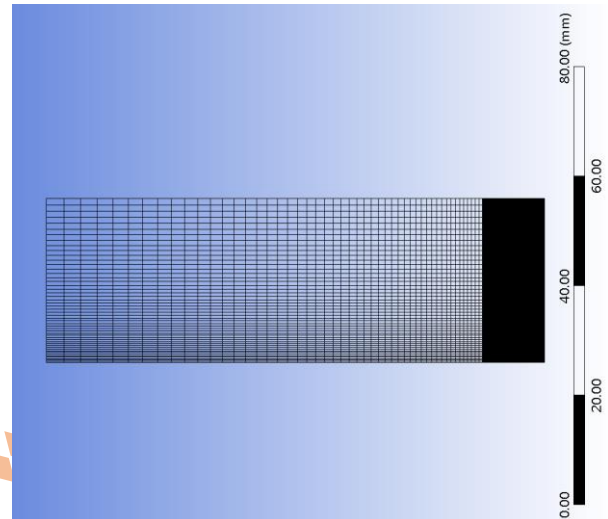
جهت امکان مقایسه تأثیر استفاده از نانو سیالات آلومینا و سیلیکا پایه اتانول نسبت به اتانول خالص، ابتدا جوشش استخری فیلمی اتانول خالص با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت شبیه‌سازی شده و جهت صحت‌سنجی مدل عددی، نتایج حاصل با مقادیر حاصل از آزمایش‌های تجربی مرجع [۱۱] و رابطه برنسون مقایسه شده‌اند. سپس شبیه‌سازی با ایجاد تغییر در چگالی مراکز هسته‌زایی فعال و مشخصات سیال جهت پیش‌بینی جوشش نانو سیالات تحقیق حاضر تکرار شده است.

این شبیه‌سازی عددی به روش دوفازی اویلری حجم محدود، غیر پایا و بر پایه فشار انجام شده است. برای حل معادلات فشار، معادلات پیوستگی و مومنتم با الگوریتم کوپل حل شده‌اند. گسسته‌سازی میدان فشار با استفاده از روش نیروی جسمی وزن‌دار و گسسته‌سازی معادلات مومنتم و اغتشاش با روش بالادست مرتبه دو انجام شده است. گام‌های زمانی مسئله ۰/۰۰۱ ثانیه بوده و در هر گام زمانی، محاسبات ۱۰۰ مرتبه تکرار شده تا همگرایی جواب بادقت ۰/۰۰۰۱ حاصل گردد.



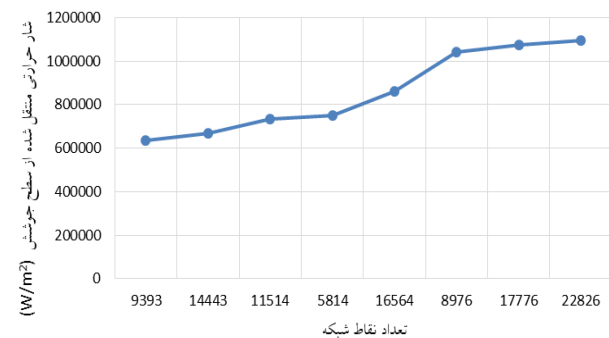
شکل ۱: شماتیک هندسه مسئله تحقیق حاضر

مستطیلی انجام شده به نحوی که در نزدیکی سطح جوشش شبکه بندی ریزتر از نواحی دورتر از سطح حاصل گردد؛ لذا در امتداد سطح جوشش شبکه هم اندازه بوده؛ ولی در راستای عمودی با دور شدن از سطح جوشش، ابعاد شبکه بزرگتر انتخاب شده است. شکل (۲) تصویری از شبکه بندی هندسه را نشان می دهد.



شکل ۲: تصویری از شبکه بندی تحقیق حاضر

به منظور بررسی استقلال از شبکه و انتخاب سایز مناسب شبکه، مقادیر شار حرارتی در هشت شبکه بندی مختلف برای اختلاف دمای سوپر هیت دیواره 22°C محاسبه شده و مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به ساختار یافته بودن شبکه بندی، امکان تغییر تعداد تقسیمات روی سه سطح مختلف شامل سطح جوشش، امتداد سطح جوشش تا دیواره و امتداد عمود بر سطح جوشش تا سطح آزاد به صورت مستقل وجود دارد. تقسیم بندی سطح جوشش بر حسب اندازه المان و روی دو سطح دیگر بر حسب تعداد تقسیمات صورت گرفته است. شکل (۳) تغییرات شار حرارتی دیواره بر حسب تعداد گره های شبکه را که با مرتب کردن شار حرارتی دیواره به صورت صعودی به دست آمده است، نشان می دهد.



شکل ۳: شار حرارتی بر حسب تعداد نقاط شبکه

دقت محاسبات به اندازه المان روی سطح افقی جوشش بستگی دارد زیرا اندازه المان بر انتقال حرارت، دقت و پایداری حل عددی تأثیر می گذارد. فرآیند جوشش شامل تغییر فاز سریع و انتقال حرارت بین سیال و سطح جامد است که به وضوح خوب سطح مشترک و گرادیان دما در نزدیکی دیوار نیاز دارد همچنین در فرآیند جوشش ناحیه لایه مرزی حرارتی روی سطح جوشش دارای اهمیت می باشد. بنابراین بین نتایج شبیه سازی برای ۸۹۷۶ گره تنها ۵٪ اختلاف با پاسخ به دست آمده برای ۲۲۸۲۶ گره وجود دارد، لذا تعداد ۸۹۷۶ گره به عنوان شبکه بهینه انتخاب شده است. نتایج حاصله در جدول (۷) ارائه شده است.

جدول ۷: نتایج شبیه سازی به ازای شبکه بندی های مختلف

شار حرارتی دیواره (W/m²)	تعداد نقاط شبکه	اندازه المان روی سطح جوشش (mm)	ردیف
۱۰۹۶۶۴۹	۲۲۸۲۶	۰,۱	۱
۱۰۴۲۷۹۵	۸۹۷۶	۰,۱	۲
۱۰۷۳۴۴۶	۱۷۷۷۶	۰,۱	۳
۶۳۴۴۶۶	۹۳۹۳	۰,۳	۴
۷۵۱۷۵۰	۵۸۱۴	۰,۲	۵
۷۳۵۷۰۱	۱۱۵۱۴	۰,۲	۶
۸۶۰۴۱۲	۱۶۵۶۴	۰,۲	۷
۶۶۹۰۶۶	۱۴۴۴۳	۰,۳	۸

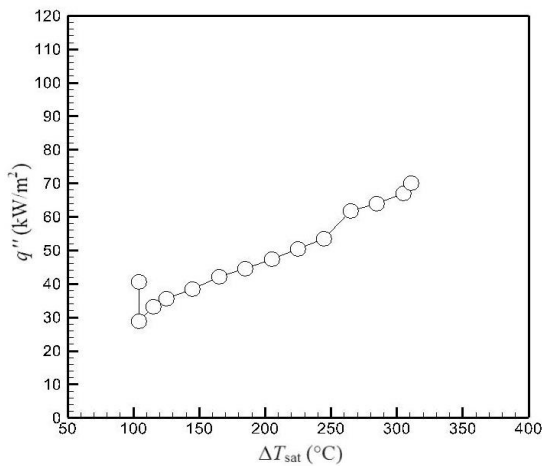
۳- نتایج و ارزیابی

۳-۱- جوشش استخری فیلمی اتانول خالص

پس از ورود مشخصات ترموفیزیکی اتانول خالص و بخار اتانول به عنوان فازهای اولیه و ثانویه و انجام تنظیمات نرم افزار، دما در بازه 10.4°C تا 32.0°C تغییر داده شد و مقادیر شار حرارتی منتقل شده از سطح جوشش استخراج گردید.

در شکل (۴) توزیع کسر حجمی یک ثانیه نخست شبیه سازی عددی نشان داده شده است. لایه ای از بخار پایدار روی سطح را پوشانده و جوشش فیلمی واقع شده است. پس از حباب زایی در روی صفحه با دمای بیشتر از دمای اشباع مایع اتانول، حباب های بسیاری که حاوی بخار اتانول با دما و فشار بیشتر از مایع اتانول اطراف آن است، تشکیل شده و نیروی شناوری باعث حرکت فیلم بخار به سمت بالا می گردد. در ناحیه جوشش فیلمی لایه ای از بخار پایدار بر روی سطح گرم ایجاد می شود، لذا مانع رسیدن مایع به سطح گرم می گردد. در این ناحیه با افزایش درجه حرارت سطح،

انتقال حرارت تشعشی از سطح به لایه بخار و مایع اهمیت پیدا می‌کند و با افزایش درجه حرارت، شار حرارتی افزایش می‌یابد.

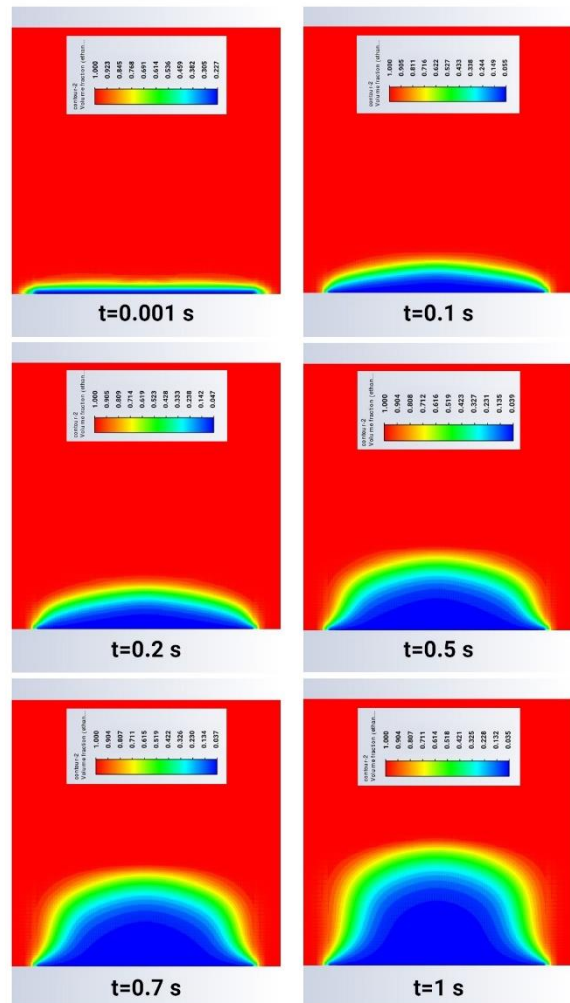


شکل ۵: نمودار شار حرارتی جوشش فیلمی اتانول خالص روی سطح مسی صیقلی بر حسب اختلاف دمای سوپرهیت دیواره

۲-۲- اعتبار سنجی نتایج

جهت اعتبار سنجی نتایج تحقیق حاضر، داده‌های عددی با نتایج آزمایش‌های تجربی گل‌کار و همکاران [۱۱] مقایسه گردیده است. شکل (۶) نمودار ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی اتانول خالص روی سطح دایروی صیقلی مسی را که با نتایج تجربی مرجع [۱۱] مقایسه شده، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، خطای نسبی ایجاد شده ۸٪ می‌باشد. مقدار اختلاف درجه حرارت سوپرهیت شروع جوشش فیلمی برای اتانول خالص با استفاده از روابط برنسون و بدون در نظر گرفتن اثرات جنس سطح $85/64^{\circ}\text{C}$ و با استفاده از رابطه هنری و در نظر گرفتن خواص ترموفیزیکی مس $106/65^{\circ}\text{C}$ به دست آمده است. در مرجع [۱۱] مقدار اختلاف درجه حرارت سوپرهیت دیواره $114/06^{\circ}\text{C}$ و در شبیه‌سازی عددی حاضر، مقدار اختلاف درجه حرارت سوپرهیت دیواره $104/5^{\circ}\text{C}$ می‌باشد.

شکل (۷) نمودار شار حرارتی جوشش فیلمی اتانول خالص روی سطح دایروی صیقلی مسی را که با نتایج تجربی مرجع [۱۱] مقایسه شده، نشان می‌دهد. کمینه نمودار شار حرارتی که نشانگر نقطه MHF^1 می‌باشد، در دمای سوپرهیت $104/5^{\circ}\text{C}$ حاصل شده و مقدار شار حرارتی معادل این دما برابر $28/99 (kW/m^2)$ محاسبه شده است. مقدار این شار در نتایج مرجع [۱۱]،

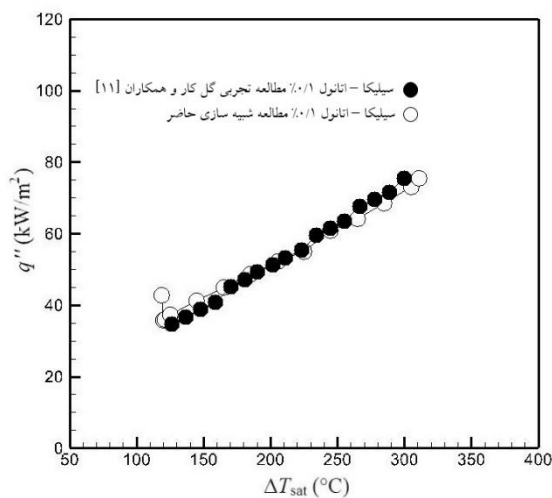


شکل ۴: کانتور بخش حجمی بخار در دمای سطح سوپرهیت 311°C پس از گذشت ۱ ثانیه از آغاز جوشش

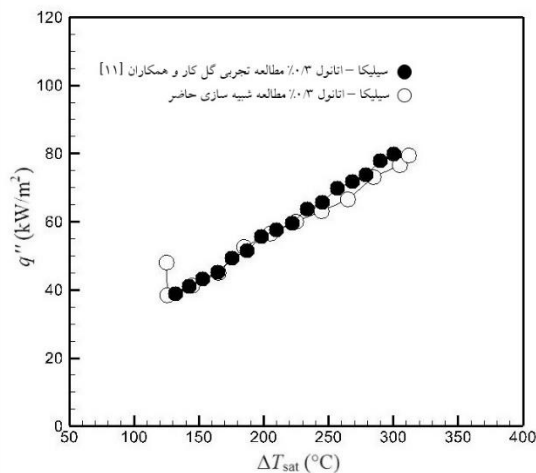
با استخراج میزان حرارت منتقل شده در دماهای مختلف و ترسیم نمودار شار حرارتی بر حسب اختلاف دمای سوپرهیت سطح جوشش برای اتانول خالص، امکان تحلیل رفتار سیال در خلال فرایند جوشش فیلمی میسر می‌گردد. این نمودار در شکل (۵) نشان داده شده است. با کاهش دمای سوپرهیت سطح جوشش، میزان شار حرارتی منتقل شده از دیواره کاهش می‌یابد و این کاهش تا حد کمینه ادامه یافته و پس از آن دچار افزایش می‌گردد و در این حالت نمودار وارد منطقه جوشش گذرا شده است.

¹ Minimum heat flux

را به ترتیب برای نانوسیال سیلیکا پایه اتانول با غلظت‌های حجمی ۰/۱٪ و ۰/۳٪ و مقایسه آن‌ها با نتایج تجربی را نشان می‌دهد.



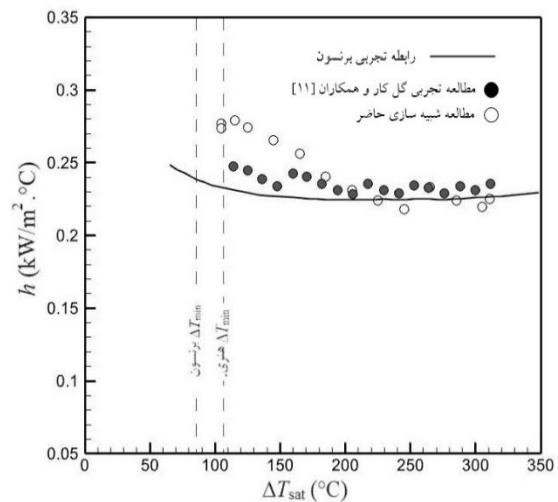
شکل ۸: مقایسه منحنی شبیه‌سازی شار حرارتی جوشش فیلمی نانوسیال سیلیکا پایه اتانول با غلظت حجمی ۰/۱٪ با نتایج تجربی مرجع [۱۱]



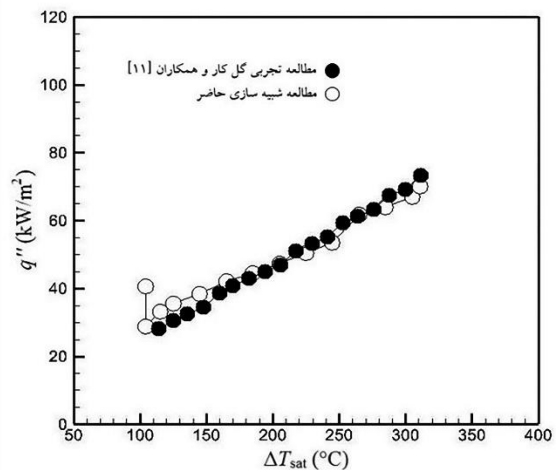
شکل ۹: مقایسه منحنی شبیه‌سازی شار حرارتی جوشش فیلمی نانوسیال سیلیکا پایه اتانول با غلظت حجمی ۰/۳٪ با نتایج تجربی مرجع [۱۱]

همان‌طور که در شکل ۸ مشخص می‌باشد، کمینه نمودار شار حرارتی در دمای سوپرهیت 120°C حاصل شده و مقدار شار حرارتی معادل این دما برابر $35/81 \text{ (kW/m}^2\text{)}$ محاسبه شده است. همچنین مقدار شار حرارتی کمینه در نتایج آزمایش‌های تجربی مرجع [۱۱] در دمای سوپرهیت $126/25^{\circ}\text{C}$ بوده و مقدار شار حرارتی معادل این دما $34/64 \text{ (kW/m}^2\text{)}$ می‌باشد. باتوجه به مقادیر گزارش شده در نتایج آزمایش تجربی مرجع [۱۱]، خطای نسبی شار حرارتی ۳/۵۵٪ است. طبق شکل ۹ کمینه نمودار شار حرارتی در دمای سوپرهیت $126/35^{\circ}\text{C}$ حاصل شده و مقدار

$28/2 \text{ (kW/m}^2\text{)}$ می‌باشد و بنابراین خطای نسبی ۵/۶۴٪ بین نتایج عددی و تجربی وجود دارد.



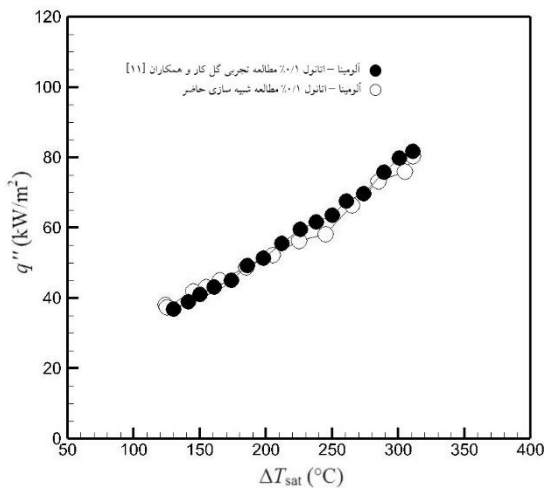
شکل ۶: مقایسه نمودار ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی اتانول خالص در شبیه‌سازی حاضر با نتایج تجربی مرجع [۱۱] و رابطه برنسون



شکل ۷: مقایسه نمودار شار حرارتی جوشش فیلمی اتانول خالص در شبیه‌سازی حاضر با نتایج تجربی مرجع [۱۱]

۳-۳- جوشش استخری فیلمی نانو سیالات

باتوجه به پیش‌بینی صحیح مدل استفاده شده جهت شبیه‌سازی عددی سیال خالص، تغییرات لازم شامل ورود اطلاعات نانو سیالات آلومینا و سیلیکا پایه اتانول با درصدهای حجمی ۰/۱٪ و ۰/۳٪ و همچنین ورود تابع تعریف شده توسط کاربر جهت شبیه‌سازی جوشش نانو سیالات انجام گردید و مشخصات انتقال حرارت جوششی فیلمی مجدداً استخراج گردید. شکل‌های (۸) و (۹) تغییرات شار حرارتی بر حسب اختلاف دمای سوپرهیت دیواره



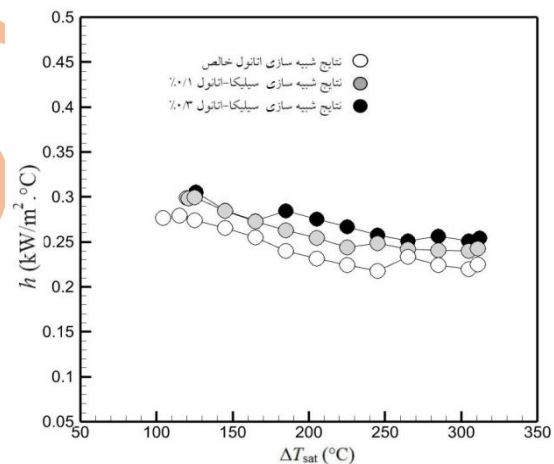
شکل ۱۱: مقایسه منحنی شبیه‌سازی شار حرارتی جوشش فیلمی نانوسیال آلومینا پایه اتانول با غلظت حجمی ۰/۱٪ با نتایج تجربی مرجع [۱۱]

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشخص می‌باشد، کمینه نمودار شار حرارتی در دمای سوپرهیت $124/9^{\circ}\text{C}$ حاصل شده و مقدار شار حرارتی معادل این دما برابر $37/11 \text{ (kW/m}^2\text{)}$ محاسبه شده است. همچنین مقدار شار حرارتی کمینه در نتایج آزمایش‌های تجربی مرجع [۱۱] در دمای سوپرهیت $130/13^{\circ}\text{C}$ بوده و مقدار شار حرارتی معادل این دما $36/79 \text{ (kW/m}^2\text{)}$ می‌باشد. با توجه به مقادیر گزارش شده در نتایج آزمایش تجربی مرجع [۱۱]، خطای نسبی شار حرارتی ۳/۴۴٪ است.

همان‌طور که در شکل ۱۲ مشخص می‌باشد، کمینه نمودار شار حرارتی در دمای سوپرهیت $120/8^{\circ}\text{C}$ حاصل شده و مقدار شار حرارتی معادل این دما برابر $38/84 \text{ (kW/m}^2\text{)}$ محاسبه شده است. همچنین مقدار شار حرارتی کمینه در نتایج آزمایشات تجربی مرجع [۱۱] در دمای سوپرهیت $126/9^{\circ}\text{C}$ بوده و مقدار شار حرارتی معادل این دما $38/97 \text{ (kW/m}^2\text{)}$ می‌باشد. با توجه به مقادیر گزارش شده در نتایج آزمایش تجربی مرجع [۱۱]، خطای نسبی شار حرارتی ۴/۸۱٪ است.

در شکل (۱۳) منحنی ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی بر حسب اختلاف دمای سوپرهیت دیواره برای نانوسیال آلومینا پایه اتانول با دو غلظت حجمی ۰/۱٪، ۰/۳٪ و اتانول خالص روی سطح صیقلی مسی نشان داده شده است.

شار حرارتی معادل این دما برابر $38/31 \text{ (kW/m}^2\text{)}$ محاسبه شده است. همچنین مقدار شار حرارتی کمینه در نتایج آزمایش تجربی مرجع [۱۱] در دمای سوپرهیت $132/3^{\circ}\text{C}$ است و مقدار شار حرارتی معادل این دما $38/94 \text{ (kW/m}^2\text{)}$ می‌باشد. با توجه به مقادیر گزارش شده در نتایج آزمایش تجربی مرجع [۱۱]، خطای نسبی شار حرارتی ۲/۷۱٪ است. در شکل (۱۰) منحنی ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی بر حسب اختلاف دمای سوپرهیت دیواره برای نانوسیال سیلیکا پایه اتانول با دو غلظت حجمی ۰/۱٪ و ۰/۳٪ و اتانول خالص روی سطح صیقلی مسی نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، حضور نانوذرات سیلیکا در سیال پایه اتانول باعث بهبود ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی در مقایسه با اتانول خالص شده است. در جوشش روی سطح صیقلی مسی، بیشترین مقدار ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی برای نانوسیال سیلیکا پایه اتانول با غلظت‌های حجمی ۰/۱٪ و ۰/۳٪ به ترتیب $0/29 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{\circ}\text{C}$ و $0/3 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{\circ}\text{C}$ به دست آمده است.



شکل ۱۰: منحنی ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی بر حسب اختلاف دمای سوپرهیت دیواره برای نانوسیال سیلیکا پایه اتانول با غلظت‌های حجمی مختلف روی سطح صیقلی مسی

شکل‌های (۱۱) و (۱۲) تغییرات شار حرارتی بر حسب اختلاف دمای سوپرهیت دیواره را به ترتیب برای نانوسیال آلومینا پایه اتانول با غلظت‌های حجمی ۰/۱٪ و ۰/۳٪ و مقایسه آن‌ها با نتایج تجربی را نشان می‌دهد.

انتقال حرارت جوشش فیلمی برای نانو سیالات آلومینا و سیلیکا با پایه اتانول روی سطح صیقلی، نسبت به حالت پایه در ارائه شده است.

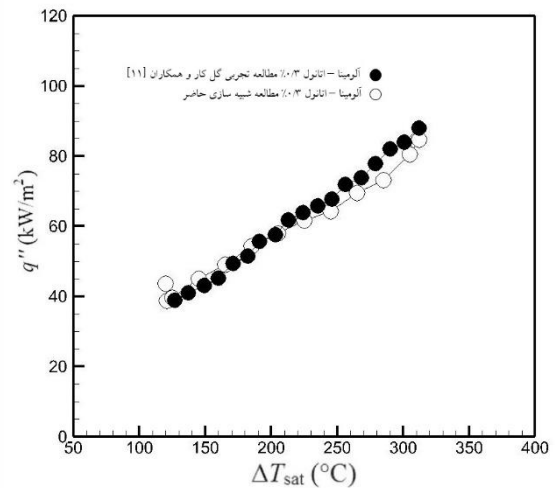
جدول ۸: میزان بهبود مشخصه‌های جوشش فیلمی برای نانو سیالات آلومینا، سیلیکا و اکسید تیتانیوم با پایه اتانول نسبت به حالت پایه

سیال کاری	میزان افزایش شار حرارتی مینیمم	میزان افزایش ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی
اتانول خالص	حالت پایه	حالت پایه
نانوسیال سیلیکا - اتانول با غلظت ۰/۱٪	۲۳/۵۲٪+	۸/۱۲٪+
نانوسیال سیلیکا - اتانول با غلظت ۰/۳٪	۳۲/۱۴٪+	۹/۹۵٪+
نانوسیال آلومینا - اتانول با غلظت ۰/۱٪	۲۷/۹۷٪+	۷/۶۲٪+
نانوسیال آلومینا - اتانول با غلظت ۰/۳٪	۳۳/۹۷٪+	۱۶/۴۹٪+

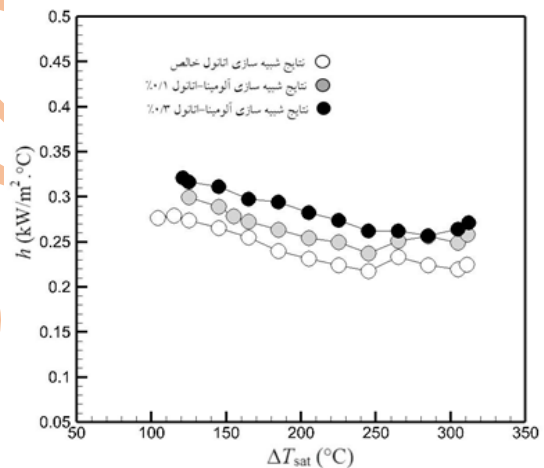
۴- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق جوشش فیلمی اتانول خالص با کمک نرم‌افزار انسیس فلونت شبیه‌سازی گردید و شار حرارتی در دماهای مختلف این ناحیه استخراج گردید. با مقایسه انجام شده با نتایج آزمایش‌های تجربی مشابه مرجع [۱۱]، تطابق قابل‌قبولی بین نتایج مشاهده گردید. پس از آن با تغییر مشخصات سیال و تغییر چگالی سایت‌های هسته‌زایی با فرض زاویه قطره نانوسیال روی سطح نشست یافته برابر $17/5^\circ$ ، رفتار نانو سیالات سیلیکا و آلومینا پایه اتانول با غلظت‌های حجمی ۰/۱٪ و ۰/۳٪ شبیه‌سازی گشته و ویژگی‌های انتقال حرارت در ناحیه جوشش فیلمی پیش‌بینی گردید.

نتایج تحقیق حاضر نشان داد که از منظر شار حرارتی مینیمم، حضور نانو سیالات، میزان شار حرارتی مینیمم را افزایش داده است. همچنین در جوشش فیلمی نانو سیالات، با آب‌دوست‌تر شدن سطح، اختلاف دمای سوپرهیت مینیمم جوشش فیلمی نانو سیالات نسبت به سیال پایه افزایش یافته و شار حرارتی مینیمم در دماهای سوپرهیت بالاتری واقع شده است. در واقع، به‌تعمیق‌افتادن وقوع جوشش فیلمی در جوشش نانو سیالات، باعث شده که مقدار



شکل ۱۲: مقایسه منحنی شبیه‌سازی شار حرارتی جوشش فیلمی نانوسیال آلومینا پایه اتانول با غلظت حجمی ۰/۳٪ با نتایج تجربی مرجع [۱۱]



شکل ۱۳: منحنی ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی بر حسب اختلاف دمای سوپرهیت دیواره برای نانوسیال آلومینا پایه اتانول با غلظت‌های حجمی مختلف روی سطح صیقلی مسی

همان گونه که در این شکل مشخص است، حضور نانوذرات آلومینا در سیال پایه اتانول باعث بهبود ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی در مقایسه با اتانول خالص شده است. در جوشش روی سطح صیقلی مسی، بیشترین مقدار ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی برای نانوسیال آلومینا پایه اتانول با غلظت‌های حجمی ۰/۱٪ و ۰/۳٪ به ترتیب $(0.29 \text{ kW/m}^2\text{C})$ و $(0.32 \text{ kW/m}^2\text{C})$ به دست آمده است.

همان‌طور که در جدول (۸) مشخص است، با حضور نانو سیالات مقدار ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی نسبت به حالت پایه افزایش یافته است. میزان افزایش شار حرارتی مینیمم و ضریب

ضریب ثابت	c_1
ضریب روان کاری	C_{wl}
ضریب شکل	n
ضریب هدایت حرارتی	k
ظرفیت حرارتی	C_p
عدد آووگادرو	N
عدد رینولدز	Re
عدد ناسلت	Nu
فشار	P
قطر حباب	d_p
منبع ایجاد حرارت یا آنتالپی	S_q
نیرو	F

علائم یونانی

پارامتر تأثیر فاز پراکنده روی فاز پیوسته	Π_{kq}
پارامتر تأثیر فاز پراکنده روی فاز پیوسته	$\Pi_{\varepsilon q}$
تانسور تنش کرنش	τ
دانسیته	ρ
درصد حجمی ذرات	φ
زاویه قطره	θ
زمان ماند ذرات	τ_p
لزجت برشی	λ
لزجت دینامیکی	μ
متوسط جزء گازی	α

زیر نویس ها

دیوار	w
روان کاری دیوار	wl
سیال	f
فاز	q
فاز / نانو ذره	p
نانوذرات	np
نانوسیال	nf

۶- مراجع

- [1] Salehi, H., and Hormozi, F., 2018. Numerical study of silica-water based nanofluid nucleate pool boiling by two-phase Eulerian scheme, *Heat and Mass Transfer*, vol. 54, pp. 773-784. doi.org/10.1007/s00231-017-2146-9
- [2] Li, X., Li, K., Tu, J. and Buongiorno, J., 2014. On two-fluid modeling of nucleate boiling of dilute nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 69, pp.443-450.
- [3] Li, X., Yuan, Y. and Tu, J., 2015. A theoretical model for nucleate boiling of nanofluids considering the nanoparticle Brownian motion in liquid microlayer.

شار حرارتی مینیمم نسبت به سیال پایه افزایش یابد. قابلیت حرکت براونی نانوذرات در سیال و اتصال زنجیرهای نانوذرات معلق در سیال از سطح جوشش تا سطح آزاد سیال در جوشش فیلمی یکی از دلایل مهم افزایش نرخ انتقال حرارت است.

از منظر ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی، حضور نانو سیالات میزان این ضریب را افزایش داده است. وقوع جوشش فیلمی در درجه حرارت های بالا باعث شده که یک لایه بخار پایدار روی سطح جوشش تشکیل شود و تماسی بین مایع و سطح جامد وجود نداشته باشد. در واقع، عدم تماس مستقیم جامد - مایع در جوشش فیلمی، باعث می شود که سایت های هسته زایی توسط قطرات مایع پر و غیرفعال نشوند. به همین دلیل در جوشش فیلمی، آب دوست تر شدن سطح اثرات مخرب قابل توجهی روی فرایند حباب سازی ندارد. در نتیجه، عامل بهبود خواص حرارتی نانو سیالات می تواند بر عامل مخرب غیرفعال شدن سایت های هسته - زایی غلبه کند، به طوری که برای نانو سیالات آلومینا و سیلیکا پایه اتانول در هر دو غلظت مورد بررسی، ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی در مقایسه با اتانول خالص افزایش یافته است.

۵- فهرست علائم

آنتالپی	h
تابع پسا	f
ترم چشمه	S
جرم مولی آب	M
چگالی مراکز هسته زایی	N_w
حرارت مبادله شده بین فازها	Q_{pq}
دبی جرمی	\dot{m}
دمای اشباع	T_{sat}
دمای پایه برابر ۲۷۳ کلوین	T_0
دمای سوپرهیت	T_{sup}
دمای سیال	T
زمان	t
سرعت	V
سرعت	u
سطح تماس دوفاز	A_i
شتاب گرانشی	g
ضریب انتقال حرارت جابه جایی	h
ضریب برآ	C_1
ضریب پسا	C_D
ضریب تبادل فازها	K_{pq}
ضریب ثابت	a_1
ضریب ثابت	a_2
ضریب ثابت	b_1

- doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.02.025
- [14] Mao, S.-F., Ji, W.-T., Chong, G.-H., Zhao, C.-Y., Zhang, H. and Tao, W.-Q., 2019. Numerical investigation on the nucleate pool boiling heat transfer of R134a outside the plain tube. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 76(11), pp.889-908.
doi.org/10.1080/02626667.2018.1560449
- [15] Kamel, M.S., Al-agma, M.S., Lezsovits, F. and Mahian, O., 2020. Simulation of pool boiling of nanofluids by using Eulerian multiphase model. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 142, pp.493-505.
[10.1007/s10973-019-09180-x](https://doi.org/10.1007/s10973-019-09180-x).
- [16] Alimoradi, H., Zaboli, S. and Shams, M., 2022. Numerical simulation of surface vibration effects on improvement of pool boiling heat transfer characteristics of nanofluid. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 39(1), pp.69-85.
[10.1007/s11814-021-0895-0](https://doi.org/10.1007/s11814-021-0895-0).
- [17] Zaboli, S., Alimoradi, H. and Shams, M., 2022. Numerical investigation on improvement in pool boiling heat transfer characteristics using different nanofluid concentrations. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(19), pp.10659-10676.
doi.org/10.1007/s10973-022-11272-0
- [18] Majidi, H.S., Hussein, H.M.A., Habeeb, L.J. and Zivkovic, D., 2022. Pool boiling simulation of two nanofluids at multi concentrations in enclosure with different shapes of fins. *Materials Today: Proceedings*, 60, pp.2043-2063.
- [19] Kamel, M.S., Albdoor, A.K., Nghaimesh, S.J. and Houshi, M.N., 2022. Numerical Study on Pool Boiling of Hybrid Nanofluids Using RPI Model. *Fluids*, 7(6), p.187.
doi.org/10.3390/fluids7060187.
- [20] Braz Filho, F.A., Fortes, M.A. and Ribeiro, G.B., 2023. Comparison of interfacial heat transfer correlations for high-pressure subcooled boiling flows via CFD two-fluid model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 166, p.121051.
- [21] Chen, Y.M. and Mayinger, F., 1992. Measurement of heat transfer at the phase interface of condensing bubbles. *International Journal of Multiphase Flow*, 18(6), pp.877-89
[doi.org/10.1016/0301-9322\(92\)90007-7](https://doi.org/10.1016/0301-9322(92)90007-7)
- [22] Mortezaazadeh, R., Aminfar, H. and Mohammadpourfard, M., 2017. Eulerian-Eulerian simulation of non-uniform magnetic field effects on the ferrofluid nucleate pool boiling. *Journal of Engineering Thermophysics*, 26, pp.580-597.
doi.org/10.1134/S1810232817040129.
- [23] Hamilton, R.L. and Crosser, O.K., 1962. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1, pp.187-191.
- International Journal of Heat and Mass Transfer, 91, pp.467-476.
- Li, X., Yuan, Y. and Tu, J., 2015. A parametric study of the heat flux partitioning model for nucleate boiling of nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 98, pp.42-50.
- [5] Hu, Y., Liu, Z. and He, Y., 2018. Effects of SiO₂ nanoparticles on pool boiling heat transfer characteristics of water based nanofluids in a cylindrical vessel. *Powder Technology*, 327, pp.79-88.
- [6] Rostamian, F. and Etesami, N., 2018. Pool boiling characteristics of silica/water nanofluid and variation of heater surface roughness in domain of time. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 95, pp.98-105.
- [7] Aizzat, M., Sulaiman, M., Enoki, K. and Okawa, T., 2019. Heat transfer coefficient of nucleate boiling in low concentration level of single and hybrid Al₂O₃-SiO₂ water-based nanofluids. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 469(1), p.012109. IOP Publishing.
doi.org/10.1088/1757-899X/469/1/012109
- [8] Akbari, A., Alavi Fazel, S.A., Maghsoodi, S. and Kootenaeei, A.S., 2019. Pool boiling heat transfer characteristics of graphene-based aqueous nanofluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 135(1), pp.697-711.
doi.org/10.1007/s10973-018-7182-2
- [9] Sarafraz, M., Pourmehran, O., Yang, B., Arjomandi, M. and Ellahi, R., 2020. Pool boiling heat transfer characteristics of iron oxide nano-suspension under constant magnetic field. *International Journal of Thermal Sciences*, 147, p.106131.
[10.1016/j.ijthermalsci.2019.11.030](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.11.030).
- [10] Modi, M., Kangude, P. and Srivastava, A., 2020. Performance evaluation of alumina nanofluids and nanoparticles-deposited surface on nucleate pool boiling phenomena. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 146, p.118833.
[10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118833](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118833).
- [11] Golkar, S.H., Khayat, M. and Zareh, M., 2021. Nucleate and film boiling performance of ethanol-based nanofluids on horizontal flat plate: an experimental investigation. *International Journal of Thermophysics*, 42(4), pp.1-28.
[10.1007/s10765-021-02805-0](https://doi.org/10.1007/s10765-021-02805-0).
- [12] Gupta, R.R., Bhambi, S. and Agarwal, V., 2019. CFD modeling for nucleate pool boiling of nanofluids. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 75(6), pp.402-412.
[10.1080/10407782.2019.1591863](https://doi.org/10.1080/10407782.2019.1591863)
- [13] Gobinath, N., Venugopal, T., Palani, K. and Samuel, A.A., 2018. Numerical modelling of thermophoresis in water-alumina nanofluid under pool boiling conditions. *International Journal of Thermal Sciences*, 129, pp.1-13.

- [36] Cole, R. (1960) 'A photographic study of pool boiling in the region of the critical heat flux', *AIChE Journal*, 6(4), pp. 533-53. doi.org/10.1002/aic.690060409
- [37] Lemmert, M. and Chawla, J. (1977) 'Influence of flow velocity on surface boiling heat transfer coefficient', *Heat Transfer in Boiling*, 237-247.
- [38] Li, X., Li, K., Tu, J. and Buongiorno, J. (2014) 'On two-fluid modeling of nucleate boiling of dilute nanofluids', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 69, pp. 443-450. doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.10.038
- [39] Del Valle, V.H. and Kenning, D. (1985) 'Subcooled flow boiling at high heat flux', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 28(10), pp. 1907-1920. [doi.org/10.1016/0017-9310\(85\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0017-9310(85)90003-9)
- [24] Brinkman, H.C., 1952. The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *The Journal of Chemical Physics*, 20(4), p.571. doi.org/10.1063/1.1700493
- [25] Sobamowo, M. G., Alozie, S. I., Yinusa, A. A., Adedibu, A. O., Salami, M. O., & Kehinde, O. (2019). Numerical Investigations of Effects of Lorentz Force and Hydrodynamic Slip on the Flow Characteristics of an Upper-Convected Maxwell Viscoelastic Nanofluid in a Permeable Channel Embedded in a Porous Medium. *International Journal of Thermal Energy and Applications*, 1(2), 28-41.
- [26] Haynes, W. M. (Ed.). (2014). *CRC handbook of chemistry and physics*. CRC press.
- [27] Chinnam, J., Das, D., Vajjha, R. and Satti, J., 2015. Measurements of the contact angle of nanofluids and development of a new correlation. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 62, pp.1-12. doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.02.001
- [28] Ham, J. and Cho, H., 2016. Theoretical analysis of pool boiling characteristics of Al₂O₃ nanofluid according to volume concentration and nanoparticle size. *Applied Thermal Engineering*, 108, pp.158-171. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.032
- [29] Zhang, F. and Jacobi, A.M., 2016. Aluminum surface wettability changes by pool boiling of nanofluids. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 506, pp.438-444
- [30] Schiller, L. and Naumann, Z.Z., 1935. *Ver. Deutsch. Ing.*, 77, pp.318-321.
- [31] Tomiyama, A., 1998. *Struggle with computational bubble dynamics*. In: *Third International Conference on Multiphase Flow*, 8-12 June 1998, Lyon, France.
- [32] Frank, Th., Shi, J.M. and Burns, A.D. (2004) 'Validation of Eulerian Multiphase Flow Models for Nuclear Safety Applications', *Third International Symposium on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation*, Pisa, Italy, September 22-24.
- [33] Antal, S.P., Lahey, R.T. and Flaherty, J.E. (1991) 'Analysis of phase distribution in fully developed laminar bubbly two-phase flow', *International Journal of Multiphase Flow*, 17, pp. 635-652. [doi.org/10.1016/0301-9322\(91\)90039-4](https://doi.org/10.1016/0301-9322(91)90039-4)
- [34] Lopez de Bertodano, M. (1991) *Turbulent Bubbly Flow in a Triangular Duct*. Ph.D. Thesis. Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York.
- [35] Kocamustafaogullari, G., Huang, W. and Razi, J. (1994) 'Measurement and modeling of average void fraction, bubble size and interfacial area', *Nuclear Engineering and Design*, 148, pp. 437-453. [doi.org/10.1016/0029-5493\(94\)90012-4](https://doi.org/10.1016/0029-5493(94)90012-4)