



مطالعه عددی شار حرارتی بحرانی در جوشش هسته‌ای نانوسیالات هیبریدی

علیرضا خلیلی¹، مرتضی خیاط^{2*}، محمد حسن نوبختی³

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

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

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

*تهران، صندوق پستی 14515-775، mkhayat@srbiau.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 21 اردیبهشت 1400

پذیرش: 31 مرداد 1400

ارائه در سایت: 16 آبان 1400

چکیده

با توجه به نیاز روزافزون صنایع به بهبود روش‌های انتقال حرارت، ناحیه جوشش هسته ای مورد توجه ویژه محققان قرار دارد چراکه جوشش سیالات امکان دستیابی به شارهای حرارتی بالاتری را نسبت به فرآیندهایی که تنها مبتنی بر انتقال حرارت جابه‌جایی غیر جوششی هستند در دسترس قرار می‌دهد. در این بین، تغییر سیال عامل در سیستم‌های انتقال حرارت جوششی از سیال خالص به نانوسیال موجب بهبود مشخصه‌های انتقال حرارت شده و در نتیجه امکان انتقال شار حرارتی بالاتر در دماهای پایین‌تر را میسر می‌نماید. در نقطه شار حرارتی بحرانی که شار حرارتی ماکزیمم است، بحث امنیت سطح جوشش و محافظت از آن در برابر ازدیاد بیش از حد دما مهم می باشد. هدف از این تحقیق شبیه‌سازی عددی جوشش استخری نانوسیال هیبریدی پایه آب شامل 30% نانولوله کربنی چندجداره و 70% اکسید تیتانیوم با غلظت حجمی 0/5%، روی سطح دایروی مسی صیقلی و بررسی مشخصه‌های انتقال حرارتی و به طور ویژه نقطه شار حرارتی بحرانی می‌باشد. به این منظور ابتدا فرآیند جوشش آب دیونیزه خالص توسط نرم‌افزار انسیس فلوئنت شبیه‌سازی گشته و نتایج با داده‌های تجربی مقایسه شده اند. با توجه به تطابق قابل قبول مشاهده شده، نانوسیال هیبریدی پایه آب مذکور به عنوان سیال عامل تحت جوشش، با تغییر چگالی سایت‌های هسته‌زایی به صورت عددی شبیه‌سازی گردیده و مشخصات انتقال حرارت و شار حرارتی آن به دست آمده اند. نتایج نشان می دهند، شار حرارتی بحرانی برای آب دیونیزه خالص در دمای 24/4 °C اتفاق افتاده و میزان آن در حدود 1/1 مگاوات بر متر مربع بوده در حالی که شار حرارتی بحرانی برای نانوسیال هیبریدی در دمای حدودی 13 °C بوده و مقدار آن در حدود 1/1 مگاوات بر متر مربع می باشد.

کلیدواژگان

جوشش استخری

شار حرارتی بحرانی

نانوسیال هیبریدی

سایت هسته‌زایی

Numerical study of the critical heat flux in the nucleate boiling of hybrid nanofluids

Alireza Khalili¹, Morteza Khayat^{2*}, Mohammad Hassan Nobakhti³

1- Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, **Islamic Azad University**, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, **Islamic Azad University**, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, **Islamic Azad University**, Tehran, Iran

*P.O.B. 14515-775 Tehran, Iran, mkhayat@srbiau.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received 11 May 2021

Accepted 22 August 2021

Available Online 7 November

2021

Keywords

Pool boiling

Critical heat flux

ABSTRACT

Due to the growing need of industries to improve heat transfer methods, the nucleate boiling region is of special interest to researchers because fluid boiling makes it possible to achieve higher heat fluxes than processes that are based only on non-boiling convection heat transfer. In addition, the change of working fluid in boiling heat transfer systems from pure fluid to nanofluid improves the heat transfer characteristics and thus allows the transfer of higher heat flux at lower temperatures. At the critical heat flux point, where the heat flux is maximum, it is important to secure the boiling surface and protect it from overheating. The purpose of this study

Please cite this article using:

Alireza Khalili, Morteza Khayat Numerical study of the critical heat flux in the nucleate boiling of hybrid nanofluids, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 12, No. 3, pp. 19-30, 2021 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Hybrid Nano fluid
Nucleation site

is to numerically simulate the pool boiling of a water-based hybrid nanofluid containing 30% multi-walled carbon nanotubes and 70% titanium oxide with a volumetric concentration of 0.5% on a polished copper circular surface and to investigate the heat transfer characteristics, especially the critical heat flux point. For this purpose, the boiling process of pure deionized water was first simulated by ANSYS-Fluent software and the results were compared with experimental data. According to the observed acceptable agreement, the mentioned water-based hybrid nanofluid, as boiling working fluid is numerically simulated by changing the density of nucleation sites and its heat transfer and heat flux characteristics are obtained. The results show that the critical heat flux for pure deionized water was occurred at 24.4 °C and is about 1.1 MW per square meter, while the critical heat flux for the hybrid nanofluid was occurred at 13 °C and is about 1 MW per square meter.

صورت تجربی و عددی بررسی نمودند. نتیجه شبیه‌سازی عددی، دما و عدد ناسلت را با خطای بسیار کم در حد 2 الی 3 درصد، نسبت به آزمایش تجربی پیش‌بینی نمود. بررسی صورت گرفته افزایش 37 درصدی در صورت استفاده از نانو سیال به جای آب خالص را گزارش نمود. ونگ و همکاران [4] جهت بررسی تاثیر تغییرات سطح جوشش با استفاده مدل چند فازی اویلر، جوشش آب را در 3 هندسه مختلف شامل صفحه تخت، 36 نیمکره برآمده و 36 نیمکره تورفته بررسی نمودند. نتایج نشان داد در بین دو سطح تغییر یافته، کره‌های فرورفته شار حرارتی بحرانی کم‌تری را تولید می‌کنند. کیم و همکاران [5] جوشش نانو سیال آب و Al_2O_3 را روی سطح جوشش عمودی به صورت عددی بررسی نمودند. نتایج نشان داد مشخصات انتقال حرارت جوشش در حضور و با افزایش درصد حجمی نانوذرات بهبود یافته است.

گاپتا و همکاران [6] با مدل‌سازی دو بعدی، تغییرات مشخصات انتقال حرارت در جوشش نانو سیال آب-آلومینا را در مقایسه با آب خالص در فشار اتمسفر و زیر اتمسفر مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد در فشار ثابت با افزایش شار حرارتی و در شار حرارتی ثابت با افزایش فشار، مقدار ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. همچنین در فشار و شار حرارتی ثابت، ضریب انتقال حرارت با افزایش درصد نانوذرات نسبت مستقیم دارد. مهدوی و همکاران [7] با توجه ویژه به اهمیت رسوب‌گذاری نانوذرات روی سطح جوشش و در نتیجه تغییر تعداد مراکز هسته‌زایی و قطر حباب‌ها، جوشش استخری نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم را روی یک و چهار لوله به قطر 20 میلی‌متر با چینش‌های مختلف به صورت عددی مطالعه کردند. نتایج نشان داد که رسوب‌گذاری ارتباط مستقیم با درصد حجمی و شار حرارتی دارد. چیفتچی و سوزن [8] به صورت تجربی و عددی بهبود مشخصات انتقال حرارت در جوشش استخری نانو سیال پایه دی کلرو متان 1 با نانو ذرات h-BN و SiO_2 را مورد بررسی قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی عددی منطبق بر آزمایش تجربی و

1- مقدمه

در خلال دهه‌های اخیر و با توسعه روزافزون صنایع، انتقال حرارت به طور ویژه‌ای مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است، چرا که انتقال حرارت درگستره وسیعی از صنایع، از ادوات الکترونیکی با قابلیت محاسباتی بسیار بالا تا نیروگاه‌های تولید برق که نیاز روزافزون جهان به انرژی الکتریکی را تامین می‌کنند، نقشی کلیدی ایفا می‌کند. در این بین استفاده از مکانیزم جوشش سیالات، امکان دستیابی به ضریب انتقال حرارت جابجایی بالاتر را جهت خنک کاری بهتر، فراهم می‌آورد. نقطه شار حرارتی بحرانی که در آن ماکزیمم شار حرارتی وجود دارد، در انتهای ناحیه جوشش هسته ای اتفاق می‌افتد و برای افزایش آن از دو روش فعال و غیرفعال استفاده می‌گردد. در طول چند دهه اخیر تمرکز اصلی تحقیقات، در راستای توسعه روش‌های غیرفعال بوده است که افزودن ذرات نانو به سیال پایه و ایجاد تغییراتی در سطح جوشش دو مورد از پرکاربردترین شیوه‌های این روش می‌باشند. از مهم‌ترین تاثیرات افزودن نانوذرات به سیال پایه تغییر مشخصات جوشش شامل دانسیته مراکز هسته‌زایی فعال و قطر و فرکانس جدایش حباب می‌باشد [1].

تا کنون تحقیقات تجربی زیاد و عددی محدودتر در خصوص پدیده جوشش انجام پذیرفته است. یانگ و همکاران [2] به بررسی استفاده از نانوسیال نقره- آب در دو میکروکانال ساده و پره‌دار پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که استفاده از نانو سیال نقره- آب انتقال حرارت بهتری نسبت به آب داشته و این برتری با افزایش درصد حجمی و عدد رینولدز در ارتباط مستقیم است. همچنین میکروکانال پره‌دار عملکرد بهتری در خصوص افزایش انتقال حرارت و همچنین ایجاد دمای یکنواخت داشته است. بایومی و ساقیر [3] با استفاده از نانو ذرات آلومینا در درصدهای حجمی 0/1% و 0/6% مشخصات انتقال حرارت نانوسیال را با آب خالص جهت خنک کاری سی‌پی یو Core i7 روی سطح متخلخل آلومینیومی و همچنین سطح دارای کانال صاف به

1 Dichloromethane

لوله عمودی در فشار کمتر از اتمسفر را به صورت عددی شبیه‌سازی نمودند. طبق یافته‌های این تحقیق میزان شار حرارتی مورد نیاز جهت آغاز جوشش هسته‌ای و همچنین دمای سوپرهیت دیواره جهت آغاز جوشش هسته‌ای در لوله عمودی بالاتر از مقدار آن روی صفحه تخت افقی می‌باشد. کواک و همکاران [16] به صورت تجربی و عددی به بررسی پدیده جوشش هسته‌ای روی سطحی شامل میکروکانال‌های طولی پرداختند. نتایج نشان داد استفاده از کانال‌هایی با نسبت ارتفاع به پهنای بیشتر بهبود شار حرارتی بحرانی و ضریب انتقال حرارت را در پی خواهد داشت. محبی و خیاط [17] به صورت تجربی جوشش استخری نانو سیال هیبریدی شامل 70% اکسید تیتانیوم و 30% نانو لوله کربنی چند جداره اصلاح شده با پایه OH را در دو غلظت حجمی 0/1% و 0/5% روی سطحی دارای میکروکانال‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای مورد آزمایش قرار دادند. طبق یافته‌های این تحقیق میکروکانال‌های دوزنقه‌ای به علت افزایش سطح موثر انتقال حرارت، عملکرد بهتری نسبت به میکروکانال‌های مستطیلی دارد.

به صورت کلی با توجه به وابسته بودن روشهای تجربی به هندسه و نوع سیال جوششی به کار رفته، در صورت ایجاد هرگونه تغییری در هر یک از مشخصات مساله، نیاز به ایجاد تغییر در دستگاه مورد استفاده و یا تعویض سیال عامل وجود دارد که بسیار هزینه‌بر است. لذا در تحقیق حاضر تغییرات شار حرارتی بحرانی با تغییر سیال عامل از آب دیونیزه خالص به نانوسیال هیبریدی پایه آب، شامل 70% اکسید تیتانیوم و 30% نانو لوله کربنی چند جداره اصلاح شده پایه OH با غلظت حجمی 0/5%، به روش عددی با صرف زمانی کوتاه و با هزینه‌ای بسیار کمتر از آزمایشات تجربی و با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت به روش حجم محدود و با استفاده از دیدگاه اویلری پیش‌بینی شده و مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. شبیه‌سازی عددی در حالت غیرپایا، در دمای محیط برابر 23°C و فشار 86 کیلو پاسکال انجام شده است. دمای جوشش آب در این شرایط 93°C در نظر گرفته شده است. همچنین سطح جوشش از جنس مس صیقلی و به صورت دایره‌ای با قطر 25 میلی‌متر و نانوسیال به صورت همگن در نظر گرفته شده‌اند.

2- شبیه‌سازی عددی

2-1- معادلات حاکم

مهم‌ترین نکته در شبیه‌سازی فرآیندهای چندفازی، انتخاب دیدگاه صحیح برای بررسی سیستم می‌باشد. نرم‌افزار فلونت

نشانه‌گر بهبود ضریب انتقال حرارت در حضور نانو ذرات بوده است.

صالحی و هرمزی [9] به روش عددی جوشش هسته‌ای نانوسیال آب-سیلیکا با درصد حجمی 0/1% را با روش اویلری دوفاز مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج به دست آمده، ضریب انتقال حرارت نانوسیال در مقایسه با آب خالص مقدار بیشتری را داراست. نوری رحیم آبادی و همکاران [10] جوشش استخری حول دو لوله موازی را در حضور سیالات آب، الکل اتانل و FC-72^1 مورد بررسی قرار دادند. بر اساس این شبیه‌سازی آب بیشترین و سیال FC-72 کمترین میزان ضریب انتقال حرارتی را ایجاد می‌نمایند. همچنین مشاهده گردید که با افزایش زاویه لوله‌ها شدت انتقال حرارت در ناحیه جوشش هسته‌ای کاهش می‌یابد. مرتضی‌زاده و همکاران [11] به صورت عددی جوشش هسته‌ای فروسیال 2 را با و بدون حضور میدان مغناطیسی غیر همسان 3 مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از این موضوع بود که رسوب‌گذاری نانوذرات روی سطح جوشش موجب بهبود ترشوندگی سطح، کاهش هسته‌زایی و نهایتاً کاهش ضریب انتقال حرارت می‌گردد. چیفتچی و سوزن [12] تاثیر افزودن 1% حجمی نانوذره نیتريد بور شش وجهی 4 به سیال پایه دی‌کلرو متان 5 بر روی مشخصات انتقال حرارت جوشش را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده نشانگر بهبود مشخصات انتقال حرارت بود. کامل و لزوویتس [13] جوشش استخری حول یک لوله داغ غوطه‌ور در آب را به صورت عددی و با استفاده از مدل RPI بررسی نمودند. نمودار جوشش حاصل دارای تطابق قابل قبولی با یافته‌های تجربی بود. کسر حجمی بخار در شبیه‌سازی نیز با عکس‌های گرفته شده از تستهای تجربی مطابقت داشت. مائو و همکاران [14] جوشش استخری مبرد R134 حول یک لوله داغ را در دو دمای اشباع متفاوت، به صورت عددی با استفاده از مدل اویلری به صورت کوپل شده با مدل RPI شبیه‌سازی نمودند. طبق یافته‌های شبیه‌سازی، ناحیه بین 90° و 130° به دلیل سرعت بالاتر سیال و آشفتگی بیشتر دارای بهترین عملکرد انتقال حرارتی می‌باشند ولی بیشینه دما در بالاترین نقطه لوله که دارای کمترین میزان سرعت و آشفتگی است، حاصل می‌گردد. رن و ژو [15] جوشش هسته‌ای حول یک

- 1 Fluorinert
- 2 Ferrofluid
- 3 Non-uniform magnetic field
- 4 Doping hexagonal boron nitride
- 5 Dichloromethane

نرم‌افزار فلونت در جریان‌های دوفازی اثر فاز اصلی بر فاز ثانویه (مانند حباب) را که ناشی از وجود گرادیان سرعت بین فازهای مختلف است، در قالب $F_{q,lift}$ از رابطه (8) محاسبه می‌نماید.

$$\vec{F}_{lift} = -C_l \rho_q \alpha_p (\vec{V}_q - \vec{V}_p) \times (\nabla \times \vec{V}_q) \quad (8)$$

در جریانات دوفازی مایع-گاز نیرویی تمایل به دور کردن فاز دوم از دیواره دارد. در مدل اویلری نرم افزار فلونت این نیرو با نام نیروی روان کاری دیواره از رابطه (9) بدست می‌آید.

$$\vec{F}_{wl} = C_{wl} \rho_q \alpha_p |(\vec{V}_q - \vec{V}_p)_\parallel|^2 \vec{n}_w \quad (9)$$

معادله بقای انرژی برای فاز q طبق رابطه (10) بیان می‌گردد.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q h_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{u}_q h_q) \\ = -\alpha_q \frac{\partial p_q}{\partial t} + \vec{\tau}_q : \nabla \vec{u}_q - \nabla \cdot \vec{q}_q \\ + S_q \\ + \sum_{p=1}^n (Q_{pq} + \dot{m}_{pq} h_{pq} \\ - \dot{m}_{qp} h_{qp}) \end{aligned} \quad (10)$$

در خلال فرآیند جوشش به دلیل ناپایداری هیدرودینامیکی حاصل از رشد و حرکت حباب، آشفتگی 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. در این مدل معادلات لزجت آشفتگی، انرژی جنبشی مغشوش و نرخ اضمحلال انرژی جنبشی مغشوش به ترتیب طبق روابط (11) الی (13) بیان می‌شوند.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \\ + S_k \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \\ + \rho C_{1\varepsilon} S_\varepsilon + \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v\varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (C_{3\varepsilon} G_b) \end{aligned} \quad (13)$$

برای شبیه‌سازی جوشش روی دیواره از دیدگاه دوفازی اویلری بهره گرفته و معادلات بقاء شامل پیوستگی، مومنتوم و انرژی به صورت مجزا برای هر فاز در نظر گرفته می‌شوند. معادلات بقای جرم و ممنتوم برای فاز q به ترتیب مطابق روابط (1) و (2) بیان می‌گردند.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{V}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_q \quad (1) \\ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \vec{V}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{V}_q \vec{V}_q) \\ = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} \\ + \sum_{p=1}^n (K_{pq} (\vec{V}_p - \vec{V}_q) + \dot{m}_{pq} \vec{V}_{pq} \\ - \dot{m}_{qp} \vec{V}_{qp}) + (F_{q,drag} + F_{q,lift} \\ + F_{q,wl} + F_{q,vm} + F_{q,td}) \end{aligned} \quad (2)$$

که در رابطه (2)، $\vec{\tau}$ تانسور تنش کرنش فاز q بوده و از رابطه (3) بدست می‌آید.

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

هنگام تحلیل فرآیندهای دو و چندفازی نیروهای مختلفی در تبادل بین فازها ظاهر می‌شوند که می‌بایست در شبیه‌سازی پدیده جوشش مورد توجه ویژه قرار گیرند. برای جریانات مایع-گاز ضریب تبادل فازها از رابطه (4) 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 (5) محاسبه می‌گردد.

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

تقریباً تمام مدل‌های محاسبه f شامل ضریب پسای C_D می‌باشند که وابسته به عدد رینولدز نسبی بین فازها می‌باشد. در مدل شیلر و نائومان، f از رابطه (6) محاسبه می‌گردد.

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

که در این رابطه C_D از رابطه (7) به دست می‌آید.

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

پراکنده لزجت سینماتیک آشفته با فرض $v_p = v_q$ محاسبه می‌گردد.

یکی از مدل‌های کارآمد مورد استفاده توسط نرم‌افزار فلوئنت، جداسازی شار حرارتی دیواره است که به طور مخفف RPI نامیده می‌شود و در شبیه‌سازی حاضر از این روش استفاده شده است. در این روش حرارت منتقل شده از دیواره به سه بخش شار حرارتی جابه‌جایی¹ q_c'' ، شار حرارتی دفع شده² q_q'' و شار حرارتی تبخیری³ q_e'' تقسیم می‌گردد. بر این اساس شار حرارتی منتقل شده از دیواره داغ به سیال که با q_w'' نمایش داده می‌شود طبق رابطه (17) قابل محاسبه است. در شکل 1 تقسیم‌بندی شار حرارتی منتقل شده به صورت شماتیک نمایش داده شده است.

$$q_w'' = q_c'' + q_q'' + q_e'' \quad (17)$$



شکل 1 شماتیک حرارت منتقل شده به دیواره طبق روش RPI

2-2- خواص ترموفیزیکی نانوسیالات هیبریدی

در غیاب نتایج آزمایشات تجربی جهت محاسبه خواص ترموفیزیکی نانو سیالات هیبریدی، می‌توان این نوع نانوسیالات را به مانند مخلوطی از دو یا چند نانوسیال فرض کرد و سپس با استفاده از روابط موجود خواص مخلوط را محاسبه نمود. به عنوان مثال نانوسیال هیبریدی موضوع این تحقیق که شامل 70% اکسید تیتانیوم و 30% نانو لوله کربنی با غلظت حجمی 5/0% می‌باشد را می‌توان به صورت مخلوطی از مقدار برابر از دو نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم و آب-نانولوله کربن به ترتیب با درصدهای حجمی 35/0% و 15/0% فرض نمود. مشخصات ترموفیزیکی نانوسیال هیبریدی تحقیق حاضر شامل دانسیته، ظرفیت حرارتی، لزجت و ضریب هدایت حرارتی به ترتیب طبق روابط (18) تا (21) بدست آمده‌اند.

- 1 Convective heat flux
- 2 Quenching heat flux
- 3 Evaporative heat flux

$+S_\varepsilon$

که در رابطه (11)، C_μ تابعی از نرخ های دوران و کرنش متوسط و سرعت زاویه‌ای سیستم‌های دورانی میدان آشفستگی k و ε می باشد. در معادلات فوق $C_{1\varepsilon} = 1/44$ ، $C_2 = 1/9$ ، $C_3 = 1/0$ ، $\sigma_k = 1/2$ و $\sigma_\varepsilon = 1/2$ می‌باشند.

همچنین در این تحقیق برای شبیه‌سازی اغتشاش در محاسبات مربوط به جریانات دوفازی به روش اولیبری، 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 (14) خواهد بود. برای یافتن مقادیر انرژی جنبشی و اتلاف فاز پراکنده از معادلات انتقال استفاده نمی‌شود و مقیاس‌های زمان و طول جهت ارزیابی ضرایب پراکندگی، روابط و معادلات انرژی جنبشی هر فاز مورد استفاده قرار می‌گیرند.

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

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

در تحقیق حاضر جهت بررسی انتقال آشفستگی بین فازها، از مدل Troshko-Hassan استفاده شده است، که در آن عبارات Π_{kq} و $\Pi_{\varepsilon q}$ که نشان دهنده تاثیر فاز پراکنده روی فاز پیوسته q می باشند، به ترتیب طبق روابط (15) و (16) محاسبه می‌شوند.

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

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

طبق پیش‌فرض نرم افزار، مقدار C_{ke} برابر 0/75 و مقدار $C_{\varepsilon d}$ برابر 0/45 در نظر گرفته می‌شوند. طبق این مدل برای فاز

710	3000	2/1	نانو لوله کربنی چند جداره MW-CNT
686/2	48	4/26	اکسید تیتانیوم TiO ₂

جدول 2 مشخصات ترموفیزیکی نانوسیال هیبریدی شامل 70% اکسید تیتانیوم و 30% نانو لوله کربنی با غلظت حجمی 0/5%

لزجت دینامیکی (Pa.s)	دانسیته (kg/m ³)	ظرفیت حرارتی (J/kg.K)	ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)
3/086 × 10 ⁻⁴	975/24	4148/84	0/704

2-3- جوشش نانوسیالات

عامل بسیار مهمی که در تحلیل پدیده جوشش تاثیرگذار است، مکانیزم تشکیل و رشد حباب می‌باشد. روابط پیش‌فرض نرم‌افزار فلوننت، چگالی مراکز هسته‌زایی را فراتر از واقعیت پیش‌بینی نموده و لذا مناسب تحلیل جوشش نانوسیالات نمی‌باشند و نیاز به تعریف پارامترهای جوشش بر اساس روابط تجربی احساس می‌گردد [19]. با توجه به این موضوع که روابط موجود برای محاسبه چگالی مراکز هسته‌زایی و قطر جدایش حباب از زاویه قطره به عنوان معیار ترشوندگی سطح بهره می‌برند [20]، جهت به دست آوردن پارامترهای جوشش، نیاز به مشخص شدن زاویه قطره وجود دارد. برای محاسبه زاویه قطره نانوسیال از رابطه چینام و همکاران [1] استفاده شده است. آنها با بررسی آزمایشگاهی 4 نانوذره مختلف با ابعاد 15 تا 50 نانومتر، در درصد‌های حجمی صفر تا شش درصد و در دماهای متفاوت رابطه (23) را برای محاسبه تغییرات زاویه قطره ارائه نمودند.

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

که در این رابطه مقدار d_p برابر 25 نانومتر در نظر گرفته شده و d_f نیز مطابق رابطه (24) محاسبه می‌شود.

$$d_f = 0.1 \left(\frac{6M}{N\pi\rho}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (24)$$

ثابت‌های موجود در رابطه (23) مطابق مقادیر مرجع [21] در نظر گرفته می‌شوند. در شبیه‌سازی حاضر مقدار θ_f برابر 77/9° در نظر گرفته شده است و بنابراین θ_{nf}

$$\rho_{hnf} = \rho_f (1 - \varphi_2) \left[(1 - \varphi_1) + \varphi_1 \left(\frac{\rho_{np1}}{\rho_f}\right) \right] + \varphi_2 \rho_{np2} \quad (18)$$

$$(\rho C_p)_{hnf} = (\rho C_p)_f (1 - \varphi_2) \left[(1 - \varphi_1) + \varphi_1 \frac{(\rho C_p)_{np1}}{(\rho C_p)_f} \right] + \varphi_2 (\rho C_p)_{np2} \quad (19)$$

$$\mu_{hnf} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi_1)^{2.5} (1 - \varphi_2)^{2.5}} \quad (20)$$

$$\frac{k_{hnf}}{k_{bf}} = \frac{k_{np2} + (n_2 - 1)k_{bf} - (n_2 - 1)\varphi_2(k_{bf} - k_{np2})}{k_{np2} + (n_2 - 1)k_{bf} + \varphi_2(k_{bf} - k_{np2})} \quad (21)$$

که در رابطه (21) k_{bf} از رابطه (22) بدست می‌آید.

$$\frac{k_{bf}}{k_f} = \frac{k_{np1} + (n_1 - 1)k_f - (n_1 - 1)\varphi_1(k_f - k_{np1})}{k_{np1} + (n_1 - 1)k_f + \varphi_1(k_f - k_{np1})} \quad (22)$$

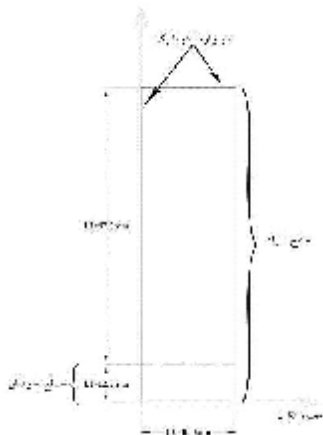
مشخصات سیال پایه و نانوذرات استفاده شده در تحقیق حاضر مطابق جدول 1 می‌باشند. لزجت دینامیکی آب در دمای 93 °C نیز برابر 3/048 × 10⁻⁴ (Pa.s) در نظر گرفته شده است.

بر اساس روابط (18) تا (22) و مقادیر جدول 1، مشخصات ترموفیزیکی نانوسیال هیبریدی به کار رفته در این تحقیق محاسبه و در جدول 2 ارائه گردیده است.

جدول 1 مشخصات مواد استفاده شده در تحقیق حاضر [17] و [18]

نوع ماده	دانسیته (gr/cm ³)	ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)	ظرفیت حرارتی (J/kg.K)
آب	0/962	0/6862	4179

0/001 ثانیه بوده و در هر پله محاسبات 100 مرتبه تکرار شده تا همگرایی جواب با دقت 0/0001 حاصل گردد.



شکل 2 شماتیک هندسه مساله

جدول 3 شرایط مرزی استفاده شده در شبیه‌سازی تحقیق حاضر

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

به طور کلی تنظیمات استفاده شده در نرم افزار فلونت که مطابق با روابط اشاره شده در بخشهای قبلی می‌باشد، در جداول 4 و 5 ارائه شده‌اند.

جدول 4 روابط استفاده شده جهت محاسبه تبادل بین فازها

نام رابطه استفاده شده	نوع تبادل بین فازی
Schiller-Naumann	نیروی پسا
Tomiya	نیروی برآ
Antal et al.	نیروی روان کاری دیواره
Lopez-de-bertodano	پراکندگی آشفتگی
Ranz-Marshall	ضریب انتقال حرارت

جدول 5 روابط استفاده شده جهت محاسبه مشخصات جوشش

مشخصه جوشش	نام رابطه استفاده شده
قطر حباب هنگام ترک دیواره	-Kocamustafaogullari
فرکانس جدایی حباب از دیواره	Cole
دانسیته سایت هسته زایی	Lemmert- (برای آب)
ضریب نفوذ سطح	Delvalla-Kenning

5-2- شبکه بندی و بررسی استقلال از شبکه

برابر $71/80^\circ$ خواهد شد که نشانگر زاویه قطره نانوسیال روی سطح صاف مسی می‌باشد. برای محاسبه چگالی مراکز هسته‌زایی در جوشش نانوسیالات، با توجه به رسوب ذرات روی سطح نیاز به دانستن زاویه قطره نانوسیال روی سطح رسوب کرده وجود دارد. با توجه به عدم موجود بودن زاویه تماس قطره نانوسیال هیبریدی روی سطح دارای رسوب و با در نظر گرفتن نتایج محققان دیگر از جمله ژانگ و ژاکوبی [22] زاویه قطره برای پیش‌بینی رفتار جوشش نانوسیال هیبریدی برابر 25° در نظر گرفته شده است. جهت محاسبه چگالی مراکز هسته‌زایی در جوشش نانوسیال هیبریدی از رابطه (25) استفاده شده است [19].

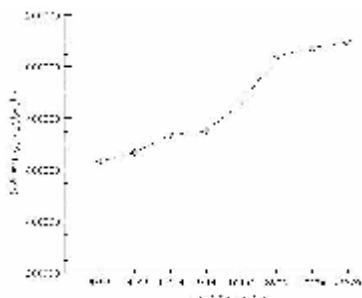
$$N_w = 0.206 \times 10^4 (1 - \cos \theta) \Delta T_{sup}^{2.06} \quad (25)$$

4-2- هندسه مساله، شرایط مرزی و روش حل

در تحقیق حاضر انتقال حرارت در جوشش استخری برای آب دیونیزه خالص و نانو سیال هیبریدی درون یک محفظه استوانه‌ای به قطر 200 میلی‌متر و قطر سطح جوشش دایروی برابر 25 میلی‌متر بررسی شده است. با توجه به روش انجام آزمایش تجربی [17]، محفظه با یک لیتر سیال پر شده است لذا ارتفاع سیال و در نتیجه ارتفاع محفظه استوانه‌ای برابر $31/8$ میلی‌متر محاسبه و در شبیه‌سازی استفاده شده است. مدل‌سازی در فشار 86 کیلوپاسکال و دمای 23°C صورت پذیرفته است. در شکل 2 شماتیکی از هندسه مساله نشان داده شده است.

جهت امکان مقایسه تاثیر استفاده از نانوسیال هیبریدی نسبت به آب، ابتدا جوشش استخری آب دی‌یونیزه خالص با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت شبیه‌سازی شده و جهت صحت‌سنجی مدل عددی، نتایج حاصل با مقادیر حاصل از آزمایشات تجربی [17] و رابطه روزنو [23] مقایسه شده‌اند. سپس شبیه‌سازی با ایجاد تغییر در چگالی مراکز هسته‌زایی فعال و مشخصات سیال جهت پیش‌بینی جوشش نانوسیال هیبریدی تکرار شده است. شرایط مرزی برای دیواره‌های مختلف با در نظر گرفتن تستهای تجربی مرجع [17] مطابق جدول 3 در نظر گرفته شده‌اند.

این شبیه‌سازی عددی به روش دوفازی اوپلری حجم محدود، غیرپایا و بر پایه فشار انجام شده است. برای حل معادلات فشار، معادلات پیوستگی و ممنتیم با الگوریتم کوپل حل شده‌اند. گسسته‌سازی میدان فشار با استفاده از روش نیروی جسمی وزن‌دار و گسسته‌سازی معادلات ممنتیم و اغتشاش با روش آپویند مرتبه 2 انجام شده است. پله‌های زمانی حل مساله



شکل 4 شار حرارتی بر حسب تعداد تقسیمات شبکه

3- نتایج و ارزیابی

2-3-1- جوشش استخری آب دیونیزه خالص

پس از ورود مشخصات ترموفیزیکی آب دیونیزه خالص و بخار آب به عنوان فازهای اولیه و ثانویه و انجام تنظیمات نرم‌افزار، دما در بازه 17°C تا 25°C تغییر داده شد و مقادیر شار حرارتی منتقل شده از سطح جوشش استخراج گردید. جهت مشاهده شکل‌گیری حباب‌ها یک شبیه‌سازی در دمای شروع جوشش هسته‌ای (ONB) نیز انجام گردید که تصویری از کانطور درصد حجمی بخار در این دما در شکل 5 نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌گردد تشکیل بخار به صورت منفک روی سطح انجام شده و حباب‌ها پس از رشد و به هم پیوستن شروع به صعود به سمت سطح آزاد می‌کنند.



شکل 5 کانطور بخش حجمی بخار در نقطه ONB

شکل 6 تغییرات شار حرارتی روی سطح جوشش نسبت به فاصله از مرکز را در اختلاف دمای سوپر هیت 5°C نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشخص است انتقال حرارت در نقاط مختلف سطح مقادیر متفاوتی داشته و از نظم خاصی پیروی نمی‌کند. دلیل این موضوع پراکندگی سایت‌های هسته‌زایی روی سطح و عدم تشابه نقاط مختلف سطح از لحاظ مکانیزم انتقال حرارت می‌باشد.

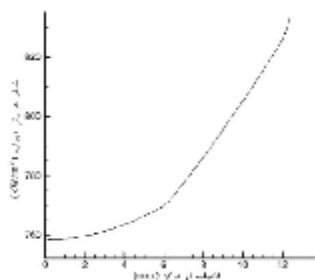
در اختلاف دماهای سوپر هیت بالاتر، ایجاد و به هم پیوستن فاز بخار بیشتر شده و بخار به صورت ستون پیوسته و با رشد قارچی شکل تا سطح آزاد امتداد می‌یابد. در شکل 7 کانطور بخش حجمی فاز بخار در اختلاف دمای سوپر هیت 20°C پس از گذشت $0/2$ ثانیه نمایش داده شده است. برای ملاحظه رشد و

پس از ترسیم هندسه، شبکه‌بندی توسط نرم‌افزار انسیس مشینگ¹ انجام شده است. شبکه‌بندی به روش ساختاریافته غیریکنواخت مستطیلی انجام شده به نحوی که در نزدیکی سطح جوشش شبکه‌بندی ریزتر از نواحی دورتر از سطح حاصل گردد. لذا در امتداد سطح جوشش شبکه هم‌اندازه بوده ولی در راستای عمودی با دور شدن از سطح جوشش، ابعاد شبکه بزرگ‌تر انتخاب شده است. شکل 3 تصویری از شبکه‌بندی هندسه را نشان می‌دهد.

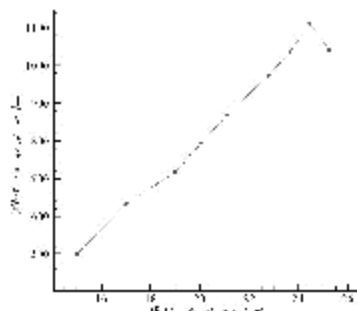


شکل 3 تصویری از شبکه بندی تحقیق حاضر

به منظور بررسی استقلال از شبکه و انتخاب سایز مناسب شبکه، مقادیر شار حرارتی در هشت شبکه‌بندی مختلف برای اختلاف دمای سوپر هیت دیواره 22°C محاسبه شده و مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به ساختار یافته بودن شبکه‌بندی، 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. تقسیم‌بندی سطح جوشش بر حسب اندازه المان و روی دو سطح دیگر بر حسب تعداد تقسیمات صورت گرفته است. شکل 4 تغییرات شار حرارتی دیواره بر حسب تعداد گره‌های شبکه را که با مرتب کردن شار حرارتی دیواره به صورت صعودی بدست آمده است، نشان می‌دهد. دقت محاسبات بیش از همه به تعداد تقسیمات عرضی سطح جوشش بستگی دارد. جهت انتخاب شبکه بهینه با در نظر گرفتن همزمان کاهش هزینه محاسباتی و دقت کافی جواب، مشاهده می‌گردد بین نتایج شبیه‌سازی برای 8976 گره تنها 5% اختلاف با پاسخ به دست آمده برای 22826 گره وجود دارد، لذا تعداد 8976 گره به عنوان شبکه بهینه انتخاب شده است.

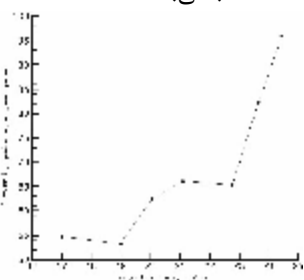


شکل 8 میزان شار حرارتی منتقل شده از سطح به نسبت فاصله از مرکز در اختلاف دمای سوپر هیت 20°C



شکل 9 تغییرات شار حرارتی منتقل شده از سطح جوشش با اختلاف دمای سوپر هیت دیواره

شکل 10 تغییرات ضریب انتقال حرارت جوششی نسبت به اختلاف دمای سوپر هیت دیواره را نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشخص است مقدار ضریب انتقال حرارت با افزایش اختلاف دمای سوپر هیت در نقطه شار حرارتی بحرانی به مقدار بیشینه $95/92 \text{ (kW/m}^2\cdot\text{K)}$ رسیده است که بسیار فراتر از ضریب انتقال حرارت آب در حالت غیر جوششی (حدود $1000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) می‌باشد.

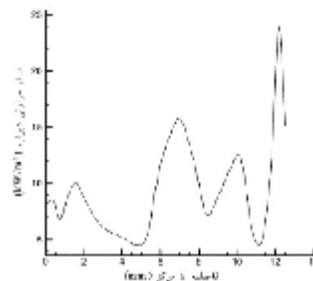


شکل 10 تغییرات ضریب انتقال حرارت جوششی آب دی‌یونیزه خالص با اختلاف دمای سوپر هیت دیواره

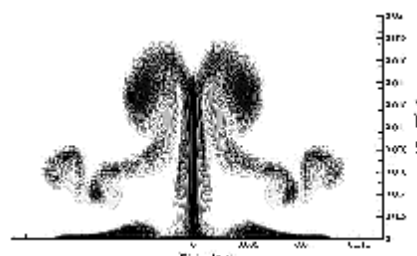
3-2- صحت سنجی نتایج

جهت صحت سنجی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی جوشش استخری آب دی‌یونیزه خالص تحقیق حاضر با داده‌های

گسترش فاز مایع، دمای سیال برابر دمای اشباع در نظر گرفته شده است تا از چگالش بخار در سیال سردتر جلوگیری به عمل آید.



شکل 6 میزان شار حرارتی منتقل شده از سطح به نسبت فاصله از مرکز در اختلاف دمای سوپر هیت 5°C



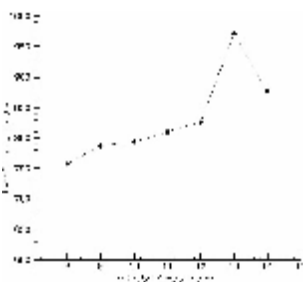
شکل 7 کانتور بخش حجمی بخار در اختلاف دمای سوپر هیت 20°C پس از گذشت 0/2 ثانیه از آغاز جوشش

تغییرات شار حرارتی به نسبت فاصله از مرکز سطح جوشش برای اختلاف دمای سوپر هیت 20°C در شکل 8 نشان داده شده است. با مقایسه شکل‌های 6 و 8 مشاهده می‌گردد که در اختلاف دمای سوپر هیت 20°C تغییرات شار حرارتی در طول سطح جوشش به صورت پیوسته و بدون نوسانات شدید انجام می‌پذیرد که دلیل آن را می‌توان به پیوستگی فاز بخار روی سطح جوشش نسبت داد.

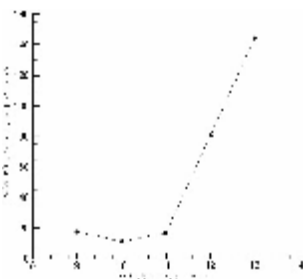
به صورت کلی تغییرات شار حرارتی با اختلاف دمای سوپر هیت دیواره مطابق شکل 9 می‌باشد. همانطور که در این شکل مشخص است با افزایش اختلاف دمای سوپر هیت سطح جوشش، میزان شار حرارتی منتقل شده از دیواره افزایش می‌یابد و این افزایش تا حد بیشینه ادامه یافته و پس از آن دچار کاهش می‌گردد. بیشینه نمودار شار حرارتی که نشان‌گر نقطه شار حرارتی بحرانی می‌باشد، در اختلاف دمای سوپر هیت $24/4^{\circ}\text{C}$ حاصل شده و مقدار شار حرارتی معادل این دما برابر $1111/83 \text{ (kW/m}^2\text{)}$ محاسبه شده است.

بحرانی در دمای 13°C ادامه خواهد داشت که تفاوت چشم‌گیری با اختلاف دمای سوپرهیت دیواره مربوط به شار حرارتی بحرانی در جوشش استخری آب دیونیزه خالص دارد. مقدار شار حرارتی بحرانی در جوشش نانوسیال هیبریدی $970/93 \text{ (kW/m}^2\text{)}$ پیش‌بینی شده است که $2/5$ برابر شار منتقل شده در جوشش آب دیونیزه خالص در همان اختلاف دمای سوپرهیت می‌باشد. برای دسترسی به چنین شار حرارتی در جوشش آب خالص اختلاف دمای سوپرهیتی نزدیک به 12°C مورد نیاز است.

شکل 14 تغییرات ضریب انتقال حرارت جوششی نسبت به اختلاف دمای سوپرهیت دیواره را برای نانوسیال هیبریدی نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مشهود است، ضریب انتقال حرارت دارای بیشینه‌ای برابر با $144/39 \text{ (kW/m}^2\text{.K)}$ می‌باشد که نسبت به جوشش آب دیونیزه خالص 50% افزایش را نشان می‌دهد.



شکل 13 تغییرات شار حرارتی منتقل شده از سطح جوشش با اختلاف دمای سوپرهیت دیواره در نانوسیال هیبریدی

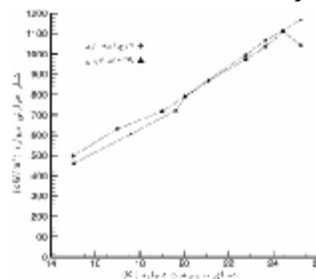


شکل 14 تغییرات ضریب انتقال حرارت جوششی نانوسیال هیبریدی با اختلاف دمای سوپرهیت دیواره

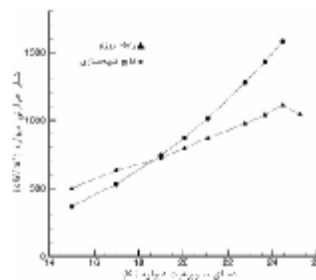
در شکل‌های 15 و 16 مقایسه شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت جوششی آب دیونیزه خالص با نانوسیال هیبریدی نشان داده شده است.

آزمایشگاهی [17] مقایسه گردیده و در شکل 11 نشان داده شده است. خطای شبیه سازی در مقایسه با نتایج آزمایشات تجربی به طور متوسط برابر $4/4\%$ محاسبه شد که در محدوده قابل پذیرش قرار دارد.

همچنین نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی با رابطه تجربی روزنو [23] مقایسه شده و در شکل 12 نشان داده شده است. همانطور که از شکل مشخص است تطابق قابل قبولی بین داده ها وجود دارد.



شکل 11 مقایسه شبیه‌سازی عددی شار حرارتی منتقل شده از سطح با نتایج آزمایشات تجربی [17]



شکل 12 مقایسه شبیه‌سازی عددی شار حرارتی منتقل شده از سطح با رابطه تجربی روزنو [23]

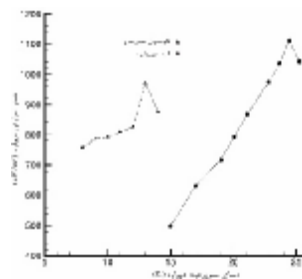
3-3- جوشش استخری نانوسیال هیبریدی

با توجه به پیش‌بینی صحیح مدل استفاده شده جهت شبیه‌سازی عددی سیال خالص، تغییرات لازم شامل ورود اطلاعات نانوسیال هیبریدی پایه آب شامل 70% اکسید تیتانیوم و 30% نانو لوله کربنی چند جداره اصلاح شده پایه OH با غلظت حجمی $0/5\%$ و همچنین ورود تابع تعریف شده توسط کاربر جهت شبیه‌سازی جوشش نانوسیال هیبریدی انجام گردید و مشخصات انتقال حرارت جوششی مجدداً استخراج گردید. شکل 13 تغییرات شار حرارتی با اختلاف دمای سوپرهیت دیواره را نشان می‌دهد. همان طور که از شکل مشخص است، شار حرارتی مشابه جوشش آب دیونیزه خالص با افزایش اختلاف دمای سوپرهیت دیواره افزایش یافته و این افزایش تا نقطه شار حرارتی

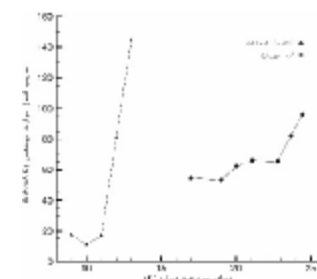
می‌باشد. همچنین بیشینه ضریب انتقال حرارت جوششی برای نانوسیال هیبریدی در مقایسه با آب خالص 50% افزایش یافته است.

5- فهرست علائم

دبی جرمی	\dot{m}
دانسیته	ρ
متوسط جزء گازی	α
سرعت	V
ترم چشمه	S
زمان	t
فشار	p
تانسور تنش کرنش	$\bar{\tau}$
شتاب گرانشی	g
ضریب تبادل فازها	K
نیرو	F
لزجت برشی	μ
لزجت برشی	λ
تابع پسا	f
زمان ماند ذرات	τ_p
قطر حباب	d_p
سطح تماس دو فاز	A_i
عدد رینولدز	Re
ضریب پسا	C_D
ضریب برآ	C_l
ضریب روان کاری	C_{wt}
آنتالپی	h
سرعت	u
منبع ایجاد حرارت یا آنتالپی	S_q
حرارت مبادله شده بین فازها	Q_{pq}
پارامتر تاثیر فاز پراکنده روی فاز پیوسته	Π_{kq}
پارامتر تاثیر فاز پراکنده روی فاز پیوسته	$\Pi_{\epsilon q}$
درصد حجمی ذرات	φ
ضریب شکل	n
ظرفیت حرارتی	C_p
ضریب هدایت حرارتی	k
زاویه قطره	θ
دمای سیال	T
دمای پایه برابر 273 کلوین	T_0
ضریب ثابت	a_1
ضریب ثابت	a_2
ضریب ثابت	b_1
ضریب ثابت	c_1
جرم مولی آب	M
عدد آووگادرو	N
چگالی مراکز هسته‌زایی	N_w



شکل 15 شار حرارتی منتقل شده در جوشش آب دیونیزه و نانوسیال هیبریدی بر حسب اختلاف دمای سوپر هیت دیواره



شکل 16 ضریب انتقال حرارت جوششی آب دیونیزه و نانوسیال هیبریدی بر حسب اختلاف دمای سوپر هیت دیواره

4- نتیجه گیری و جمع بندی

در تحقیق حاضر ابتدا پدیده جوشش استخری آب دیونیزه خالص با کمک نرم‌افزار انسیس فلوئنت شبیه‌سازی گردید و داده‌های شار حرارتی در اختلاف دماهای مختلف سوپر هیت دیواره استخراج گردید. با مقایسه بین داده‌های شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشات تجربی انجام شده، تطابق قابل قبولی 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 25° ، رفتار نانوسیال هیبریدی پایه آب، شامل 70% اکسید تیتانیوم و 30% نانو لوله کربنی چند جدار اصلاح شده با پایه OH با غلظت حجمی 0/5%، شبیه‌سازی گشته و ویژگی‌های انتقال حرارت در ناحیه جوشش هسته‌ای پیش‌بینی گردید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهند، شار حرارتی بحرانی برای آب دیونیزه خالص در دمای سوپر هیت $24/4^\circ\text{C}$ اتفاق افتاده و مقدار شار حرارتی معادل این دما برابر $1111/83 \text{ (kW/m}^2\text{)}$ می‌باشد. درصد خطای محاسبه دما و شار حرارتی بحرانی در جوشش استخری آب دیونیزه خالص به ترتیب برابر 5/2% و 7/3% می‌باشند. شار حرارتی بحرانی در جوشش استخری نانوسیال هیبریدی در دمای سوپر هیت 13°C اتفاق افتاده و مقدار آن $970/93 \text{ (kW/m}^2\text{)}$

[11] R. Morteza zadeh, H. Aminfar and M. Mohammadpourfard, Eulerian–Eulerian simulation of non-uniform magnetic field effects on the ferrofluid nucleate pool boiling, *Journal of Engineering Thermophysics*, 26(4) (2017) 580–597.

[12] E. Çiftçi and A. Sözen, A numerical study on performance improvement in boiling heat transfer via dichloromethane-based nanofluid utilization, *Journal of polytechnic*, 23 (2020) 849-857.

[13] M.S. Kamel and F. Lezsovits, Predicting of pool boiling heat transfer from a horizontal heated tube using two fluids multiphase model, *Journal of advanced research in fluid mechanics and thermal sciences*, 71(2), (2020), 38–55.

[14] S.F. Mao, W.T. Ji, G.H. Chong, C.Y. Zhao, H. Zhang and W.Q. Tao, Numerical investigation on the nucleate pool boiling heat transfer of R134a outside the plain tube, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 76(11) (2019) 889–908.

[15] S. Ren and W. Zhou, Numerical investigation of nucleate pool boiling outside a vertical tube under sub-atmospheric pressures, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 116 (2020) 104662.

[16] H.J. Kwak, J.H. Kim, B.S. Myung, M.H. Kim and D.E. Kim, Behavior of pool boiling heat transfer and critical heat flux on high aspect-ratio microchannels, *International Journal of Thermal Sciences*, 125 (2018) 111–120.

[17] M. Mohebbi and M. Khayat, Experimental study of the effect of hybrid nanofluids deposition on microchannels with different sections in pool boiling, *Modares mechanical engineering*, 19(11) (2019) 2653-2666.

[18] S.S. Ghadikolaie, M. Yassari, H. Sadeghi, Kh. Hosseinzadeh, and D.D. Ganji, Investigation on thermophysical properties of TiO₂-Cu/H₂O hybrid nanofluid transport dependent on shape factor in MHD stagnation point flow, *Powder Technology*, 322 (2017) 428–438.

[19] X. Li, K. Li, J. Tu, and J. Buongiorno, On two-fluid modeling of nucleate boiling of dilute nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 69 (2014) 443–450.

[20] J.G. Collier and J.R. Thome, Convective Boiling and Condensation, 3rd edition, *Clarendon press, Oxford*, (1994).

[21] J. Ham and H. Cho, Theoretical analysis of pool boiling characteristics of Al₂O₃ nanofluid according to volume concentration and nanoparticle size, *Applied Thermal Engineering*, 108 (2016) 158–171.

[22] F. Zhang and A.M. Jacobi, Aluminum surface wettability changes by pool boiling of nanofluids, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 506 (2016) 438–444.

[23] T.L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera and D.P. DeWitt, Fundamentals of heat and mass transfer, 7th edition, *John Wiley & Sons*, (2011).

زیر نویس‌ها

فاز / نانو ذره	p
فاز	q
روان کاری دیوار	wl
دیوار	w
نانوسیال هیبریدی	hnf
نانوذرات	np
سیال پایه	bf
سیال	f
سوپرهیت	sup

6- مراجع

[1] J. Chinnam, D. Das, R. Vajjha and J. Satti, Measurements of the contact angle of nanofluids and development of a new correlation, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 62 (2015) 1–12.

[2] L. Yang, J. Huang, M. Mao and W. Ji, Numerical assessment of Ag-water nano-fluid flow in two new microchannel heatsinks: Thermal performance and thermodynamic considerations, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 110 (2020) 104415.

[3] A.M. Bayomy and M.Z. Saghir, Experimental study of using γ -Al₂O₃-water nanofluid flow through aluminum foam heat sink: comparison with numerical approach, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 107 (2017) 181–203.

[4] J. Wang, M. Diao and X. Liu, Numerical simulation of pool boiling with special heated surfaces, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 130 (2019) 460–468.

[5] H.G. Kim, I.J. Hwang and S.M. Kim, Numerical study on the pool boiling heat transfer of water-based nanofluids on a vertical surface, *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 17(11) (2017) 8404–8410.

[6] R.R. Gupta, S. Bhambi and V.K. Agarwal, CFD modeling for nucleate pool boiling of nanofluids, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 75(6) (2019) 402-412.

[7] M. Mahdavi, M. Sharifpur and J.P. Meyer, Exploration of nanofluid pool boiling and deposition on a horizontal cylinder in Eulerian and Lagrangian frames, *Int J Heat Mass Transfer*, 71 (2018) 959-971.

[8] E. Çiftçi and A. Sözen, Heat transfer enhancement in pool boiling and condensation using h-BN/DCM and SiO₂/DCM nanofluids: experimental and numerical comparison, *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 31(1) (2020) 26–52.

[9] H. Salehi and F. Hormozi, Numerical study of silica-water based nanofluid nucleate pool boiling by two-phase Eulerian scheme, *Heat and Mass Transfer*, 54(3) (2017) 773–784.

[10] S.M.A. Noori Rahim Abadi, A. Ahmadpour and J.P. Meyer, Numerical simulation of pool boiling on smooth, vertically aligned tandem tubes, *International Journal of Thermal Sciences*, 132 (2018) 628–644.