

شبیه‌سازی عددی جوشش استخری فیلمی نانوسیالات پایه اتانول

علی هدایتی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مرتضی خیاط* (استادیار)

محمدحسن نوبختی (استادیار)

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

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۴۰۳)
دوره ۴۰، شماره ۲، صص. ۲۵-۳۷، پژوهشی

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 نانوذره SiO_2 و Al_2O_3 سیال پایه اتانول با دو غلظت حجمی ۰/۱٪ و ۰/۳٪ شبیه‌سازی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند در جوشش فیلمی، حضور نانوذرات در سیال پایه، مقدار ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی را افزایش داده‌است. بیشترین مقدار این ضریب برای نانوسیالات آلومینا و سیلیکا با غلظت حجمی ۰/۳٪، به ترتیب $(kW / m^2 \cdot ^\circ C)$ و $(kW / m^2 \cdot ^\circ C)$ به دست آمده است. علاوه بر این، حضور نانو ذرات در فرایند جوشش، شار حرارتی مینیمم را به طور محسوس افزایش داده‌است. طبق نتایج شبیه‌سازی عددی، مقدار شار حرارتی مینیمم در جوشش اتانول خالص (kW / m^2) ۲۸/۹۹، در جوشش نانوسیالات آلومینا- اتانول با غلظت های حجمی ۰/۱٪ و ۰/۳٪ به ترتیب (kW / m^2) ۳۷/۱۱ و (kW / m^2) ۳۸/۸۴ و در جوشش نانوسیالات سیلیکا - اتانول با غلظت های حجمی ۰/۱٪ و ۰/۳٪، به ترتیب (kW / m^2) ۳۵/۸۱ و (kW / m^2) ۳۸/۳۱ حاصل شده است. با مقایسه مقادیر حاصل و نتایج تجربی، سازگاری خوبی بین نتایج برقرار می‌باشد.

ahedayati7558@gmail.com
mkhayat@srbiau.ac.ir
m.nobakhti@srbiau.ac.ir

واژگان کلیدی: جوشش فیلمی، شار حرارتی مینیمم، نانوسیالات، ضریب انتقال حرارت.

۱. مقدمه

هو و همکاران^[۵] از نانوسیالات 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] نانوسیالات سیلیکا پایه آب را بر روی سطح جوشش مسطح دایروی آزمایش نمودند تا تغییرات سطح جوشش و ویژگی‌های جوشش استخری نانوسیالات را در زمان‌های مختلف بررسی نمایند. نتایج نشان داد که با افزایش زمان جوشش، رفتار جوشش نانوسیالات 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. عیزت و همکاران^[۷] یک تحقیق تجربی بر روی عملکرد انتقال حرارت جوشش استخری نانو سیالات پایه آب SiO_2 و Al_2O_3 و نانو سیالات هیبریدی آن‌ها انجام دادند. آن‌ها از غلظت‌های حجمی مختلف و همچنین نسبت‌های مختلف اختلاط نانوسیالات

در دهه‌های اخیر، تلاش‌های قابل توجهی توسط متخصصان ترموسیالات و انتقال حرارت برای بررسی فرایند انتقال حرارت جوششی 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 برهم کنش 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 نانوسیالات 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].

*نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۳، تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۲/۰۸/۲۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰.

استناد به این مقاله:

هدایتی، علی، خیاط، مرتضی، و نوبختی، محمدحسن، ۱۴۰۳. شبیه‌سازی عددی جوشش استخری فیلمی نانو سیالات پایه اتانول. مهندسی مکانیک شریف،

DOI: 10.24200/J40.2023.63108.1696 . صص. ۲۵-۳۷، (۲)۴۰

سطح افقی تحت فشار اتمسفر را به‌صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. مدل چند فازی اوپلری- اوپلری به‌همراه 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 به‌دست 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 اوپلری- اوپلری 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 فوق‌گرم معین از اهمیت بیشتری برخوردار است. این پدیده به‌دلیل رسوب نانوذرات روی سطح جوشش اتفاق افتاد. علیمزادی و همکاران^[۱۶] مطالعه‌ای عددی در مورد تاثیر ارتعاش بر روی جوشش استخری انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش ارتعاش منجر به بهبود ضریب انتقال حرارت می‌شود. بنابراین، آن‌ها یک طرح عددی برای اعمال اثرات ارتعاش بر انتقال حرارت جوشش استخری نانوسیال توسعه دادند.

زایی 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 اوپلری- اوپلری برای شبیه‌سازی عددی استفاده شده است، به‌طوری‌که سیال آب مایع به‌عنوان فاز پیوسته و بخار آب به‌عنوان فاز پراکنده در نظر گرفته‌شد. نتایج نشان داد که استفاده از نانوسیال سیلیکا بر روی سطح جوشش می‌تواند انتقال حرارت را بهبود بخشد. همچنین آن‌ها به‌این نتیجه رسیدند که در شارهای حرارتی بالا، وابستگی به غلظت نانوذرات افزایش می‌یابد.

مجدی و همکاران^[۱۸] دونوع 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 فوق‌گرم 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 لذا شبیه‌سازی عددی این فرایند می‌تواند به‌عنوان جایگزینی مناسب مطرح گردد. درعین‌حال، اکثر پژوهش‌های عددی صورت‌گرفته در خصوص جوشش استخری هسته‌ای آب یا نانو سیالات پایه آب بوده و مطالعات بسیار اندکی در خصوص جوشش استخری فیلمی صورت‌پذیرفته است. در تحقیق حاضر، شبیه‌سازی عددی جوشش استخری فیلمی اتانول خالص و نانو سیالات آلومینا

استفاده نمودند تا تأثیر نانوسیال‌های 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 نانوسیال 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 به‌طور قابل توجهی افزایش یافته‌است. سرافراز و همکاران^[۹] عملکرد جوشش استخری نانوسیال 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] به‌طور تجربی عملکرد جوشش استخری نانوسیال آلومینا را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب انتقال حرارت جوشش استخری با افزایش غلظت نانوذرات و همچنین برای سطوح رسوب‌گذاری شده توسط نانوذرات افزایش می‌یابد. گل‌کار و همکاران^[۱۱] عملکرد جوش هسته‌ای و فیلمی نانو سیالات پایه اتانول را روی صفحه تخت افقی به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در مطالعه خود از نانوذرات SiO_2 و Al_2O_3 استفاده نمودند. هدف اصلی این مطالعه به‌دست آوردن مشخصه‌های انتقال حرارت جوشش هسته‌ای و فیلمی نانو سیالات بوده است. برای این منظور، نانو سیالات SiO_2 و Al_2O_3 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 نانوسیال‌های پایه اتانول به‌طور قابل توجهی بیشتر از اتانول خالص بود. در بین غلظت‌های مورد بررسی، غلظت حجمی ۰/۵ درصد بهترین عملکرد را برای هر دو نانوسیال داشت، به‌طوری‌که حداقل شار حرارتی نانوسیال‌های پایه اتانول SiO_2 و Al_2O_3 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 اوپلری 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 شده‌بود. نتایج آن‌ها برای ضریب انتقال حرارت با نتایج تجربی مقایسه و صحت‌سنجی گردید. گوپینتا و همکاران^[۱۳] مشخصه‌های انتقال حرارت نانوسیال آب-آلومینا در جوشش استخری در حالت مادون سرد را به‌صورت 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 پیش‌بینی‌شده توسط مدل عددی پیشنهاد شده وجود دارند.

مائو و همکاران^[۱۴] انتقال حرارت جوشش استخری سیال R_{134a} روی

^۱ Coefficient of the bubble waiting time

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

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) قابل محاسبه است:

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

به طوری که C_D از رابطه (۷) به دست می‌آید:

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

عدد رینولدز استفاده شده در رابطه (۷)، رینولدز نسبی است که برای فاز اصلی q طبق رابطه (۸) تعریف می‌شود:

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

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 می‌شود:

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

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

و سیلیکا پایه اتانول با غلظت‌های حجمی ۱/۰٪ و ۳/۰٪ روی سطح جوشش دایروی مسی ساده به قطر ۲۵ میلی‌متر با استفاده از نرم‌افزار انسیس - فلونت 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

۱.۲. معادلات حاکم

یکی از مهم‌ترین نکته‌های موردتوجه در شبیه‌سازی فرایندهای چند فازی، انتخاب دیدگاه صحیح برای بررسی سیستم می‌باشد. در رویکرد اوپلری - اوپلری هر دوفاز به صورت پیوسته در نظر گرفته شده و درصد حجمی فازها به صورت توابع پیوسته در فضا و زمان تعریف می‌شود. قانون پایستگی فازها با ساختاری مشابه لحاظ گشته و بر اساس روابط تئوری یا آزمایشگاهی ارتباط بین آن‌ها برقرار می‌گردد. با توجه 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]:

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

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

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

به طوری که روابط (۱) و (۲) برای فاز q می‌باشد و برای فاز p هم همین روابط برقرار است. در رابطه (۲)، $\vec{\tau}$ تانسور تنش-کرنش فاز q بوده و از رابطه (۳) به دست 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 موردتوجه ویژه قرار گیرند. برای جریان‌های مایع - گاز ضریب تبادل فازها از رابطه (۴) قابل محاسبه است:

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

که در این رابطه τ_p زمان ماند ذرات می‌باشد و از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

^۲ Chen and Mayinger

^۱ Drew

طبق پیش‌فرض نرم‌افزار، مقدار C_{ke} برابر ۰/۷۵ و مقدار C_{td} برابر ۰/۴۵ در نظر گرفته می‌شوند. طبق این مدل برای فاز پراکنده لزجت سینماتیک آشفته با فرض $V_p = V_q$ محاسبه می‌گردد.

در نرم‌افزار فلوئنت، مدل‌های جوشش دیواره با سه شرط مرزی متفاوت دما ثابت، شار حرارتی مشخص و ضریب انتقال حرارتی ویژه (در شرط مرزی دیواره کوپل شده) بیان می‌شوند. یکی از مدل‌های کارآمد مورد استفاده توسط نرم‌افزار فلوئنت، جداسازی شار حرارتی دیواره است که به‌طور مخفف RPI نامیده می‌شود. در این روش حرارت منتقل شده از دیواره به سه بخش شار حرارتی جابه‌جایی^۲ q_c ، شار حرارتی دفع شده^۳ q_Q و شار حرارتی تبخیری^۴ q_E ، تقسیم می‌گردد. براین اساس شار حرارتی منتقل شده از دیواره داغ به سیال که با q_W نمایش داده می‌شود 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 نمی‌شود و دمای اشباع برای آن منظور می‌شود. در مدل غیرتعادلی^۵، دمای بخار در فرایند حل لحاظ می‌گردد که در شبیه‌سازی حاضر از این مدل استفاده شده است. در استفاده از این مدل، معادله (۲۰) به معادله (۲۱) تبدیل می‌گردد.

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

که در آن q_V'' بیانگر شار حرارتی جابه‌جایی فاز بخار، q_G'' نشان دهنده شار حرارتی سایر فازهای گازی و $f(\alpha_l)$ کسر حجمی مایع می‌باشد.

۲.۲. خواص ترموفیزیکی نانو سیالات

طبق تئوری اختلاط، هر یک از اجزای مخلوط به‌میزان کسر حجمی بخش موردنظر، در خواص مخلوط نقش دارند. براین اساس دانسیته، ظرفیت حرارتی، ضریب هدایت حرارتی و لزجت نانو سیالات به‌ترتیب طبق روابط (۲۲) تا (۲۵) محاسبه می‌شود^[۲۲,۲۳].

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

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

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

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

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

در خلال فرایند جوشش به‌دلیل 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 شبیه‌سازی جریان مغشوش استفاده شده است^[۱۹].

در این تحقیق، برای شبیه‌سازی اغتشاش در محاسبات مربوط به جریانات دوفازی به‌روش اویلری، 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 نمی‌شود و مقیاس‌های زمان و طول جهت ارزیابی ضرایب پراکندگی، روابط و معادلات انرژی جنبشی هر فاز مورد استفاده قرار می‌گیرند.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q k_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{U}_q k_q) \quad (13)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \epsilon_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{U}_q \epsilon_q) = \quad (14)$$

$$\nabla \cdot \left(\alpha_q \left(\mu_q + \frac{\mu_{t,q}}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon_q \right)$$

$$+ \alpha_q \frac{\epsilon_q}{k_q} (C_{1\epsilon} G_{k,q} - C_{2\epsilon} \rho_q \epsilon_q) + \alpha_q \rho_q \Pi_{\epsilon q}$$

در این پژوهش، جهت بررسی انتقال آشفستگی بین فازها، از مدل تروشکو-حسن^۱ استفاده شده است که در آن عبارات $\Pi_{\epsilon q}$ و Π_{kq} که نشان دهنده تاثیر فاز پراکنده روی فاز پیوسته q می‌باشند، به‌ترتیب طبق روابط (۱۸) و (۱۹) محاسبه می‌شوند:

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

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

^۴ Evaporative heat flux

^۵ Non-equilibrium model

^۱ Trosko-Hassan

^۲ Convective heat flux

^۳ Quenching heat flux

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

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

ثابت‌های موجود در رابطه (۲۶) در جدول (۲) ارائه شده است. در شبیه‌سازی حاضر، مقدار θ_f برابر $60/71^\circ$ در نظر گرفته شده است [۱۱]. d_f برابر $0.39 \mu\text{m}$ نانومتر و بنابراین θ_{nf} برابر $39/58^\circ$ 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 $50/17^\circ$ در نظر گرفته شده است.

۴.۲. 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 200 میلی‌متر روی سطح جوشش دایروی مسی به قطر 25 میلی‌متر بررسی شده است. با توجه به روش انجام آزمایش تجربی که در آن محفظه با یک لیتر سیال پر شده است؛ لذا ارتفاع سیال درون محفظه استوانه‌ای برابر 30 میلی‌متر محاسبه و در شبیه‌سازی استفاده شده است. مدل‌سازی در فشار 86 کیلوپاسکال و دمای 23°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 شیب‌سازی 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 اوپلری حجم محدود، غیر پایا و بر پایه

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

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

به طوری که در رابطه (۲۴)، n ضریب شکل بوده و معادل $\frac{3}{\psi}$ تعریف می‌شود، ψ ضریب کرویت بوده و در ذرات کاملاً کروی برابر ۱ می‌باشد. رابطه (۲۵) نیز توسط برینکنم [۲۴] ارائه شده است.

خواص ترموفیزیکی اتانول خالص و نانو سیالات سیلیکا و آلومینا پایه اتانول با غلظت‌های حجمی مختلف در دمای اشباع $72/82^\circ\text{C}$ در جدول (۱) نشان داده شده است.

۳.۲. جوشش نانو سیالات

عامل بسیار مهمی که در تحلیل پدیده جوشش تأثیرگذار است، مکانیزم تشکیل و رشد حباب می‌باشد. روابط پیش‌فرض نرم‌افزار فلونت، چگالی مراکز هسته‌زایی را فراتر از واقعیت پیش‌بینی نموده و لذا مناسب تحلیل جوشش نانو سیالات نمی‌باشند و نیاز به تعریف پارامترهای جوشش براساس روابط تجربی احساس می‌گردد. با توجه 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 15 تا 50 نانومتر، در درصدهای حجمی صفر تا شش درصد و در دماهای متفاوت رابطه (۲۶) را برای محاسبه تغییرات زاویه تماس ارائه نمودند:

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

جدول ۱. خواص ترموفیزیکی مواد استفاده شده در تحقیق حاضر [۲۶ و ۲۵].

نوع ماده	دانسیته (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

^۱ Brinkman

جدول ۴. شرایط مرزی استفاده شده در شبیه‌سازی تحقیق حاضر.

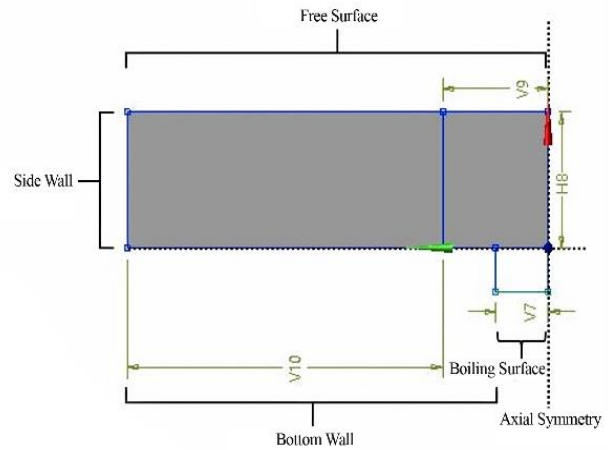
شرط مرزی	نوع مرز
دما ثابت	سطح جوشش
فشار ثابت	سطح آزاد
آدیاباتیک	دیواره‌های کناری و تحتانی
تقارن محوری	محور تقارن

جدول ۵. روابط استفاده شده جهت محاسبه تبادل بین فازها.

نام رابطه استفاده شده	نوع تبادل بین فازی
Schiller-Naumann	نیروی پسا [۳۰]
Tomiya	نیروی بر [۳۱, ۳۲]
Antal et al.	نیروی روان کاری دیواره [۳۳]
Lopez-de-bertodano	پراکندگی آشفتنگی [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	-Kocamustafaogullari
دیواره [۳۵]	Ishii
فرکانس جدایی حباب از دیواره [۳۶]	Cole
دانسیته سایت هسته-زایی [۳۷, ۳۸]	Lemmert-Chawla (برای اتانول)
ضریب نفوذ سطح [۳۹]	Li et al. (برای نانوسیال)
	Delvalla-Kenning



شکل ۱. شماتیک هندسه هندسه تحقیق حاضر.

جدول ۳. ابعاد هندسی تحقیق حاضر.

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

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 وزن دار 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 با دقت ۰/۰۰۰۱ حاصل گردد.

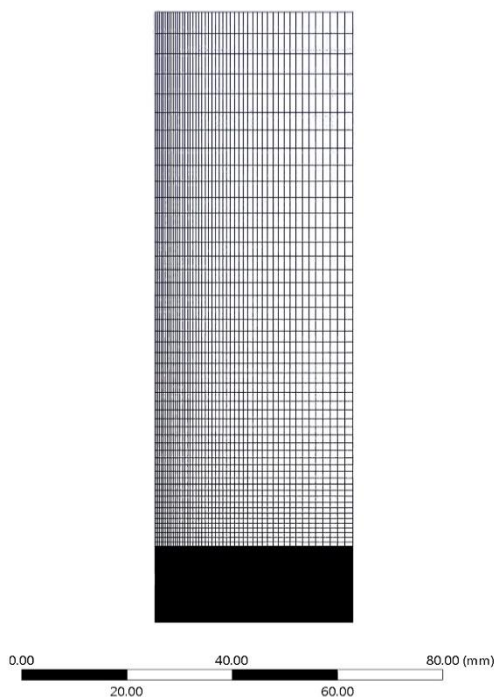
شرایط مرزی برای دیواره‌های مختلف با در نظر گرفتن آزمایش‌های تجربی مرجع [۱۱] مطابق جدول (۴) در نظر گرفته شده‌اند.

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.

۵.۲. شبکه‌بندی و بررسی استقلال از شبکه

پس از ترسیم هندسه، شبکه‌بندی توسط نرم‌افزار انسیس مشینگ انجام شده است. شبکه‌بندی به‌روش ساختاریافته غیریکنواخت مستطیلی انجام شده به‌نحوی که در نزدیکی سطح جوشش شبکه‌بندی ریزتر از نواحی دورتر از سطح حاصل شود، لذا در امتداد سطح جوشش شبکه هم‌اندازه ولی در راستای عمودی با دور شدن از سطح جوشش، ابعاد شبکه بزرگ‌تر انتخاب شده است. شکل (۲) تصویری از شبکه‌بندی هندسه را نشان می‌دهد.

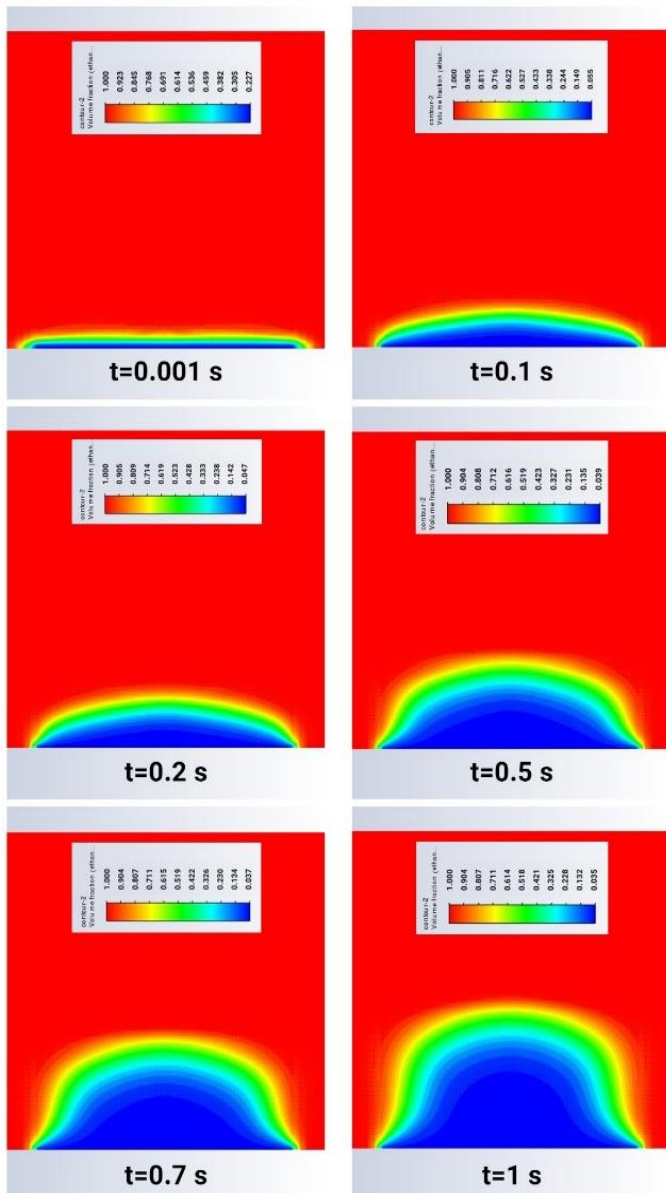
به‌منظور بررسی استقلال از شبکه و انتخاب سایز مناسب شبکه، مقادیر شار حرارتی در هشت شبکه‌بندی مختلف برای اختلاف دمای سوپرهیت دیواره ۲۲°C محاسبه شده و مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به ساختاریافته بودن شبکه‌بندی، امکان تغییر تعداد تقسیمات روی سه سطح مختلف شامل سطح جوشش، امتداد سطح جوشش تا دیواره و امتداد عمود بر سطح جوشش



شکل ۲. تصویری از شبکه‌بندی تحقیق حاضر.

جدول ۷. نتایج شبیه‌سازی به‌ازای شبکه‌بندی‌های مختلف.

شار حرارتی دیواره (W/m^2)	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



شکل ۴. کانتور بخش حجمی بخار در دمای سطح سوپرهیت $311^{\circ}C$ پس از گذشت ۱ ثانیه از آغاز جوشش.

تا سطح آزاد به‌صورت مستقل وجود دارد. تقسیم‌بندی سطح جوشش برحسب اندازه المان و روی دو سطح دیگر برحسب تعداد تقسیمات صورت گرفته است. شکل (۳) تغییرات شار حرارتی دیواره برحسب تعداد گره‌های شبکه را که با مرتب‌کردن شار حرارتی دیواره به‌صورت صعودی به‌دست آمده است، نشان می‌دهد.

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

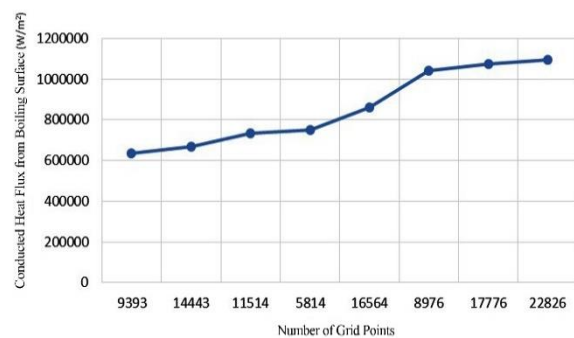
۳. نتایج و ارزیابی

۱.۳. جوشش استخری فیلمی اتانول خالص

پس از ورود مشخصات ترموفیزیکی اتانول خالص و بخار اتانول به‌عنوان فازهای اولیه و ثانویه و انجام تنظیمات نرم‌افزار، دما در بازه $104^{\circ}C$ تا $320^{\circ}C$ تغییر داده شد و مقادیر شار حرارتی منتقل شده از سطح جوشش استخراج گردید.

در شکل (۴) توزیع کسر حجمی یک ثانیه نخست شبیه‌سازی عددی نشان داده شده است. لایه‌ای از بخار پایدار روی سطح را پوشانده و جوشش فیلمی واقع شده است. پس از حباب‌زایی در روی صفحه با دمای بیشتر از دمای اشباع مایع اتانول، حباب‌های 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 می‌گردد. در ناحیه جوشش فیلمی لایه‌ای از بخار پایدار بر روی سطح گرم ایجاد می‌شود، لذا، مانع رسیدن مایع به سطح گرم می‌گردد. در این ناحیه با افزایش درجه حرارت سطح، انتقال حرارت تشعشعی از سطح به لایه بخار و مایع اهمیت پیدا می‌کند و با افزایش درجه حرارت، شار حرارتی افزایش می‌یابد.

با استخراج میزان حرارت منتقل شده در دماهای مختلف و ترسیم نمودار شار حرارتی برحسب اختلاف دمای سوپرهیت سطح جوشش برای اتانول خالص،

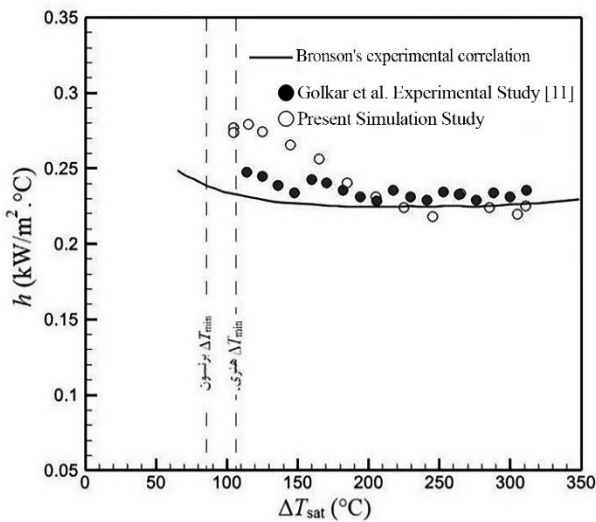


شکل ۳. شار حرارتی بر حسب تعداد نقاط شبکه.

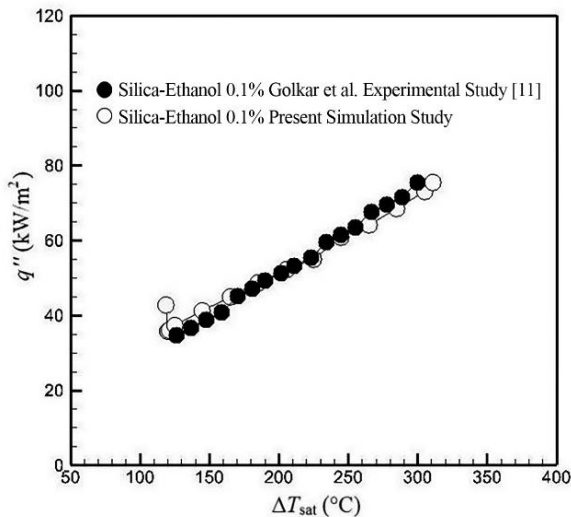
اتانول با درصدهای حجمی ۰/۱٪ و ۰/۳٪ و همچنین ورود تابع تعریف شده توسط کاربر جهت شبیه‌سازی جوشش نانو سیالات انجام گردید و مشخصات انتقال حرارت جوششی فیلمی مجدداً استخراج گردید. شکل‌های (۸) و (۹) تغییرات شار حرارتی بر حسب اختلاف دمای سوپرهیت دیواره را

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

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 $(35/81 \text{ kW/m}^2)$ 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 $(34/64 \text{ kW/m}^2)$ می‌باشد. با توجه به مقادیر گزارش شده در نتایج آزمایش تجربی مرجع [۱۱]، خطای نسبی شار حرارتی ۳/۵۵٪ است. طبق شکل ۹ کمینه نمودار شار حرارتی



شکل ۶. مقایسه نمودار ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی اتانول خالص



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

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.

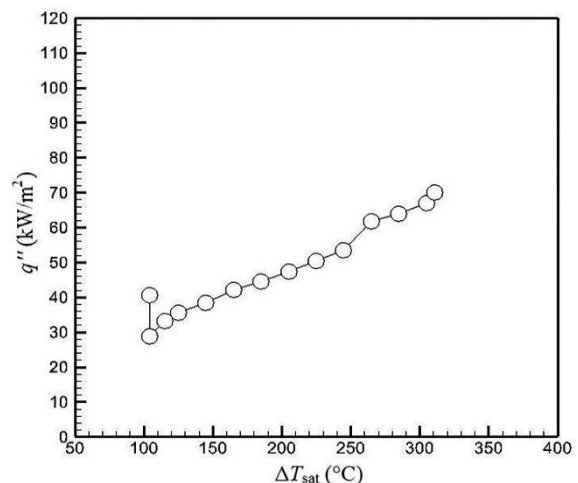
۲.۳. اعتبار سنجی نتایج

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 ۰/۸٪ 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^۱ می‌باشد، در دمای سوپرهیت $104/5^{\circ}\text{C}$ حاصل شده و مقدار شار حرارتی معادل این دما برابر $(28/99 \text{ kW/m}^2)$ محاسبه شده است. مقدار این شار در نتایج مرجع [۱۱]، $(28/2 \text{ kW/m}^2)$ می‌باشد و بنابراین خطای نسبی ۵/۶۴٪ بین نتایج عددی و تجربی وجود دارد.

۳.۳. جوشش استخری فیلمی نانو سیالات

با توجه به پیش‌بینی صحیح مدل استفاده شده جهت شبیه‌سازی عددی سیال خالص، تغییرات لازم شامل ورود اطلاعات نانو سیالات آلومینا و سیلیکا پایه

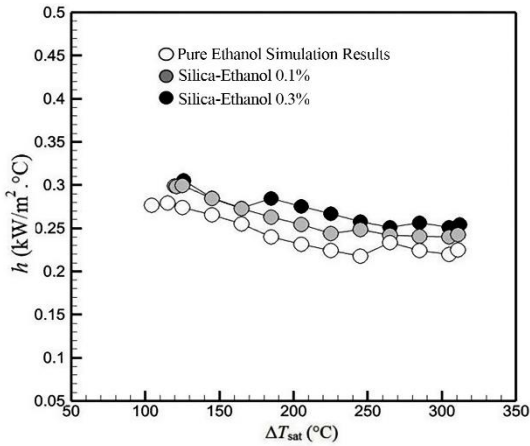


شکل ۵. نمودار شار حرارتی جوشش فیلمی اتانول خالص روی سطح مسی صیقلی بر حسب اختلاف دمای سوپرهیت دیواره.

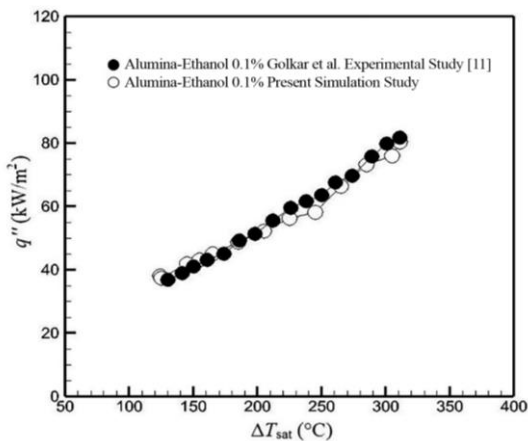
^۱ Minimum heat flux

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

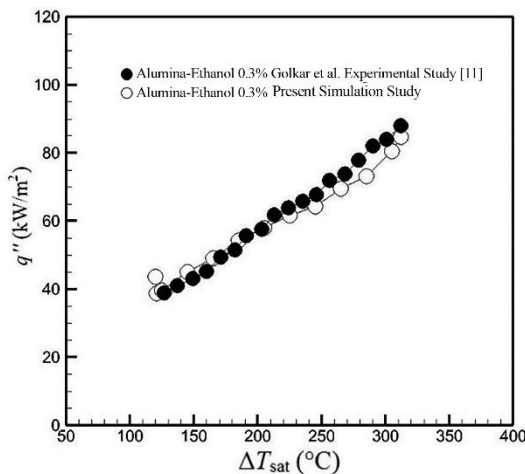
سوپرهیت $37/11 \text{ (kW/m}^2\text{)}$ محاسبه شده است. همچنین، مقدار شار حرارتی کمینه در نتایج آزمایش‌های تجربی مرجع 111 در دمای سوپرهیت $130/13^{\circ}\text{C}$ بوده و مقدار شار حرارتی معادل این دما $38/94 \text{ (kW/m}^2\text{)}$ است و مقدار شار حرارتی معادل این دما برابر



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



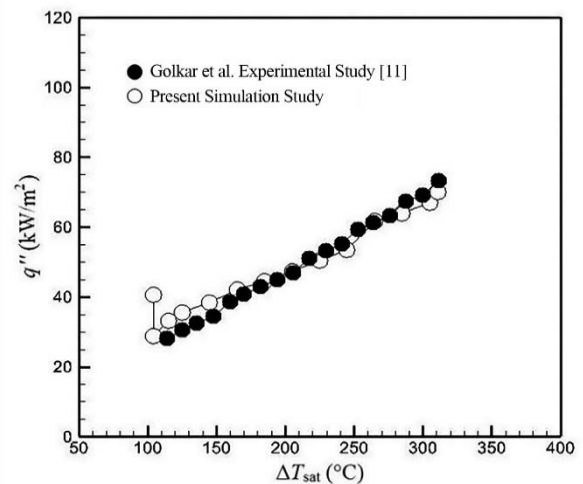
شکل ۱۱. مقایسه منحنی شبیه‌سازی شار حرارتی جوشش فیلمی نانوسیال آلومینا پایه اتانول با غلظت حجمی ۰/۱٪ با نتایج تجربی مرجع 111 .



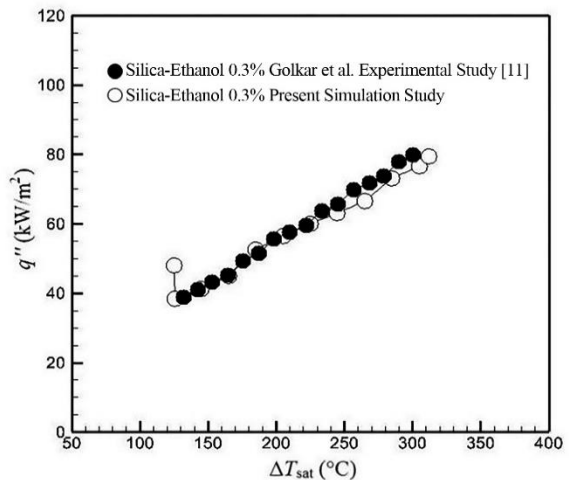
شکل ۱۲. مقایسه منحنی شبیه‌سازی شار حرارتی جوشش فیلمی نانوسیال آلومینا پایه اتانول با غلظت حجمی ۰/۳٪ با نتایج تجربی مرجع 111 .

در دمای سوپرهیت $126/35^{\circ}\text{C}$ حاصل شده و مقدار 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 111 در دمای سوپرهیت $38/94 \text{ (kW/m}^2\text{)}$ 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 111 ، خطای نسبی شار حرارتی $2/71\%$ 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 $0/1\%$ و $0/3\%$ 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 $0/1\%$ و $0/3\%$ 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.

شکل‌های (۱۱) و (۱۲) تغییرات شار حرارتی بر حسب اختلاف دمای سوپرهیت دیواره را به ترتیب برای نانوسیال آلومینا پایه اتانول با غلظت‌های حجمی $0/1\%$ و $0/3\%$ و مقایسه آن‌ها با نتایج تجربی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. مقایسه منحنی شبیه‌سازی شار حرارتی جوشش فیلمی نانوسیال سیلیکا پایه اتانول با غلظت حجمی ۰/۱٪ با نتایج تجربی مرجع 111 .



شکل ۱۴. مقایسه منحنی شبیه‌سازی شار حرارتی جوشش فیلمی نانوسیال سیلیکا پایه اتانول با غلظت حجمی ۰/۳٪ با نتایج تجربی مرجع 111 .

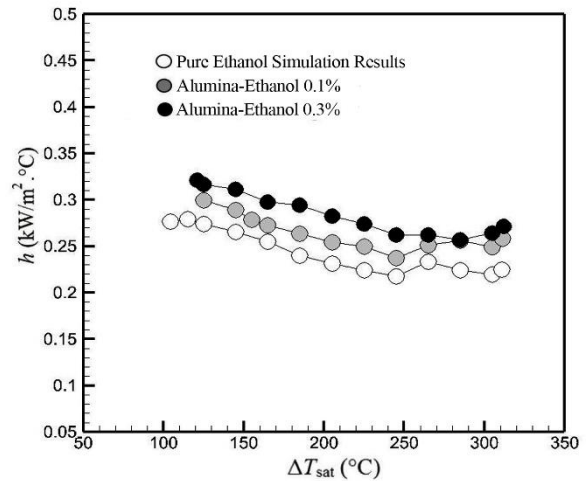
جدول ۸. میزان بهبود مشخصه‌های جوشش فیلمی برای نانو سیالات آلومینا، سیلیکا و اکسید تیتانیوم با پایه اتانول نسبت به حالت پایه.

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٪	+۵۲ / +۰/۲۳	+۱۲ / +۰/۵۸
نانوسیال سیلیکا - اتانول با غلظت ۰/۳٪	+۱۴ / +۰/۳۲	+۹۵ / +۰/۹
نانوسیال آلومینا - اتانول با غلظت ۰/۱٪	+۹۷ / +۰/۲۷	+۶۲ / +۰/۷
نانوسیال آلومینا - اتانول با غلظت ۰/۳٪	+۹۷ / +۰/۳۳	+۴۹ / +۰/۱۶

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، به تعویق افتادن وقوع جوشش فیلمی در جوشش نانو سیالات، باعث شده که مقدار شار حرارتی مینیمم نسبت به سیال پایه افزایش یابد. قابلیت حرکت براونی نانوذرات در سیال و اتصال زنجیره‌های 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 حرارت‌های بالا باعث شده که یک‌لایه 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 می‌شود که سایت‌های هسته‌زایی توسط قطرات مایع پر و غیرفعال نشوند. به همین دلیل در جوشش فیلمی، آب‌دوست‌تر شدن سطح اثرات مخرب قابل‌توجهی روی فرایند حباب‌سازی ندارد. در نتیجه، عامل بهبود خواص حرارتی نانو سیالات می‌تواند بر عامل مخرب غیرفعال‌شدن سایت‌های هسته‌زایی غلبه کند، به طوری‌که 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.



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.

۳۶/۷۹ 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 $(38/84 \text{ kW} / \text{m}^2)$ 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

$(38/97 \text{ kW} / \text{m}^2)$ 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.

همان‌گونه 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 $(0/29 \text{ kW} / \text{m}^2\text{C})$ و $(0/129 \text{ kW} / \text{m}^2\text{C})$ 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 انتقال حرارت جوشش فیلمی برای نانو سیالات آلومینا و سیلیکا با پایه اتانول روی سطح صیقلی، نسبت به حالت پایه ارائه شده است.

۴. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق، جوشش فیلمی اتانول خالص با کمک نرم‌افزار انسیس فلوئنت شبیه‌سازی شد و شار حرارتی در دماهای مختلف این ناحیه استخراج گردید.

۵. فهرست علائم

ظرفیت حرارتی	C_p	آنتالپی	h
عدد آوگادرو	N	تابع پسا	f
عدد رینولدز	Re	ترم چشمه	S
عدد ناسلت	Nu	جرم مولی آب	M
فشار	P	چگالی مراکز هسته زایی	N_w
قطر حباب	d_p	حرارت مبادله شده بین فازها	Q_{pq}
منبع ایجاد حرارت یا آنتالپی	S_q	دبی جرمی	\dot{m}
نیرو	F	دمای اشباع	T_{sat}
	علائم یونانی	دمای پایه برابر ۲۷۳ کلوین	T_0
		دمای سوپرهیت	T_{sup}
پارامتر تأثیر فاز پراکنده روی فاز پیوسته	Π_{kq}	دمای سیال	T
پارامتر تأثیر فاز پراکنده روی فاز پیوسته	Π_{eq}	زمان	t
تانسور تنش کرنش	$\bar{\tau}$	سرعت	V
دانسیته	ρ	سرعت	u
درصد حجمی ذرات	Φ	سطح تماس دوفاز	A_i
زاویه قطره	θ	شتاب گرانشی	g
زمان ماند ذرات	τ_p	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی	h
لزجت برشی	λ	ضریب برآ	C_l
لزجت دینامیکی	μ	ضریب پسا	C_D
متوسط جزء گازی	α	ضریب تبادل فازها	K_{pq}
	زیرنویس‌ها	ضریب ثابت	a_1
دیوار	w	ضریب ثابت	a_2
روان‌کاری دیوار	wl	ضریب ثابت	b_1
سیال	f	ضریب ثابت	c_1
فاز	q	ضریب روان‌کاری	C_{wl}
فاز / نانوذره	p	ضریب شکل	n
نانوذرات	np	ضریب هدایت حرارتی	k
نانوسیال	nf		

References - منابع

- 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*, 54, pp. 773-784. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2146-9>
- 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.
- Li, X., Yuan, Y. and Tu, J., 2015. A theoretical model for nucleate boiling of nanofluids considering the nanoparticle Brownian motion in liquid microlayer. *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.
- 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.
- 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.
- 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.
<https://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. <https://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. <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. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118833>
 11. Golkar, S.H., Khayat, 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. <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. [Online]. <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. <https://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. <https://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. <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. <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. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11272-0>
 18. Majdi, 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. <https://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. [https://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. <https://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. <https://doi.org/10.1021/i160003a005>
 24. Brinkman, H.C., 1952. The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *The Journal of Chemical Physics*, 20(4), p.571. <https://doi.org/10.1063/1.1700493>
 25. Sobamowo, M. G., Alozie, S. I., Yinusa, A. A., Adedibu, A. O., Salami, M. O. and 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. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.02.01>

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. <https://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. [https://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. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(94\)90012-4](https://doi.org/10.1016/0029-5493(94)90012-4)
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. [Online]. <https://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*, pp. 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. [Online]. <https://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. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(85\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0017-9310(85)90003-9).