

بررسی بهبود انتقال حرارت در جوشش هسته ای با استفاده از سطوح پره دار مستطیلی و دوزنقه ای

چکیده: این پژوهش به بررسی کارایی انتقال حرارت در جوشش هسته ای در مخازن با استفاده از پیکربندی های مختلف سطوح، از جمله سطوح صاف، پره دار مستطیلی و دوزنقه ای پرداخته است. همچنین، تأثیر ارتفاع های مختلف پره ها نیز به منظور ارزیابی جامع تر عملکرد حرارتی این سطوح مورد بررسی قرار گرفته است. با به کارگیری روش حجم سیال (VOF)، این مطالعه به تجزیه و تحلیل فرآیندهای تولید، رشد و جدا شدن حباب ها و همچنین بهبود کلی انتقال حرارت می پردازد. نتایج نشان می دهد که سطوح پره دار، به ویژه پره های دوزنقه ای، به طور چشمگیری انتقال حرارت را نسبت به سطوح صاف افزایش می دهند. سطح دارای پره های دوزنقه ای تا ۲۱۰ درصد افزایش در شار حرارتی نسبت به سطح صاف را نشان می دهد، در حالی که سطح دارای پره های مستطیلی بسته به ارتفاع و فاصله پره ها تا ۱۵۰ درصد افزایش شار حرارتی دارند. این یافته ها به درک بهتر ویژگی های حرارتی اصلاحات مختلف سطح کمک می کند و مبنای بهینه سازی طراحی مبدل های حرارتی برای کاربردهای صنعتی قرار می گیرد.

واژه های راهنما: جوشش هسته ای استخری، هندسه پره، روش حجم سیال (VOF)، شار حرارتی، بهبود انتقال حرارت

کیهان کوزه گر غیاثی

دکتری مهندسی مکانیک

سیامک حسین پور*

استاد،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه صنعتی تبریز،
تبریز

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۱

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۸

**Keyhan
Kouzegar Ghiyasi**
Ph.D. of Mechanical
Engineering

**Siamak
Hossainpour***
Professor,
Faculty of Mechanical
Engineering, Tabriz
University of Technology,
Tabriz

Investigation of heat transfer enhancement in nucleate boiling using rectangular and trapezoidal finned surfaces

Abstract: This study investigates the heat transfer performance in nucleate boiling within tanks using various surface configurations, including plain, rectangular-finned, and trapezoidal-finned surfaces. Additionally, the impact of different fin heights is examined to provide a more comprehensive evaluation of the thermal performance of these surfaces. Using the Volume of Fluid (VOF) method, this study analyzes bubble formation, growth, detachment processes, and the overall enhancement of heat transfer. The results show that finned surfaces, particularly trapezoidal fins, significantly improve heat transfer compared to plain surfaces. The trapezoidal-finned surface demonstrates up to a 210% increase in heat flux compared to the plain surface, while the rectangular-finned surface achieves up to a 150% increase in heat flux, depending on the fin height and spacing. These findings contribute to a better understanding of the thermal characteristics of various surface modifications and serve as a basis for optimizing heat exchanger designs for industrial applications.

Keywords: Nucleate pool boiling, Fin geometries, Volume of Fluid, Heat transfer enhancement, Heat flux

۱- مقدمه

امروزه پدیده انتقال حرارت جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف دارد و تحقیقات بسیاری در جهت بهبود و کنترل آن صورت می‌پذیرد. یکی از روش‌های مؤثر استفاده از تغییر فاز در سیالات مانند جوشش است. جوشش به‌طور کلی به دو نوع جوشش استخری و جوشش اجباری طبقه‌بندی می‌شود. در جوشش استخری سیال ساکن است و حرکت آن در مجاور سطح به وسیله جابه‌جایی آزاد و اغتشاش سیال ناشی از تشکیل و جدایی حباب‌ها تشکیل می‌شود؛ اما در جوشش اجباری علاوه بر این، یک عامل خارجی نیز در حرکت سیال نقش دارد.

در میان انواع جوشش، جوشش هسته‌ای به عنوان یک حالت بسیار کارآمد برای انتقال حرارت در صنعت شناخته شده است و به دلیل کاربردهای فراوان و گسترده در سیستم‌های مختلف تبدیل انرژی و تبادل گرما، مانند تولید برق، خنک کننده الکترونیکی، نیروی محرکه، فرآیندهای شیمیایی و غیره مورد توجه قرار گرفته است [۱-۳]. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی بر روی بهینه‌سازی انتقال حرارت جوشش هسته‌ای استخری انجام شده است که به پیشرفت‌های چشمگیری منجر شده است. شی و همکاران، در مطالعه‌ای بر روی سطوح فومی مسی، تأثیر قابلیت خیس شدن سطح را بر روی انتقال حرارت جوشش بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش قابلیت خیس شدن باعث بهبود عملکرد انتقال حرارت شده و جدایش حباب‌ها را تسهیل می‌کند. علاوه بر این، پژوهشگران متوجه شدند که می‌توان با تغییر ساختار سطح، نقاط آغاز جوشش را بهبود بخشیده و از این طریق عملکرد کلی را افزایش داد [۴]. سزار و همکاران [۵] در پژوهشی از فیلم‌های هیبریدی گرافن و نقره برای بهبود انتقال حرارت جوشش هسته‌ای استفاده کردند. نتایج نشان داد که این فیلم‌ها به دلیل خواص حرارتی ویژه خود، باعث تسریع در تشکیل و جدایش حباب‌ها می‌شوند که این امر انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. این فناوری می‌تواند برای خنک‌سازی سیستم‌های انرژی مانند سلول‌های خورشیدی متمرکز بسیار مفید باشد. جیانگ و همکاران [۵] نشان دادند که استفاده از آرایه‌های استوانه‌ای در سطح منجر به بهبود انتقال حرارت جوشش شده و دمای جوشش هسته‌ای را نسبت به سطوح صاف کاهش می‌دهد. کاهش فاصله و قطر این ستون‌ها، بهبود بیشتری در عملکرد انتقال حرارت ایجاد کرد و توانست تعداد نقاط جوشش را افزایش دهد، که در نهایت باعث کارایی بیشتر سطح شد. در نهایت، کارکی و همکاران [۶] در مطالعه‌ای بر

روی سیستم‌های جابجایی طبیعی رایلی-بنارد^۱، به مقایسه بین نانوسیالات، آب و هوا در این سیستم‌ها پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که نانوسیالات به دلیل خواص حرارتی بهتر خود نسبت به آب و هوا توانستند نرخ انتقال حرارت را به شکل قابل‌توجهی افزایش دهند. این مطالعه به تحلیل انرژی و دینامیک سیالات در این فرایند نیز پرداخته و نشان داد که نانوسیالات می‌توانند بهینه‌سازی مؤثری در فرآیند جوشش ارائه دهند. در مطالعه‌ای دیگر، نارندران و همکاران [۷] با بررسی نانوسیالات مبتنی بر ونادیوم پنتا اکسید (V_2O_5) نشان دادند که استفاده از این نانوسیالات در سیستم‌های خنک‌کننده میکروکانال می‌تواند عملکرد حرارتی را به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشد. این مطالعه بر کاربرد نانوسیالات برای خنک کردن قطعات الکترونیکی متراکم متمرکز بوده و نتایج آن حاکی از این است که نانوسیالات می‌توانند حرارت تولید شده را به‌طور مؤثری مدیریت کنند و از پدیده‌های محلی جوشش جلوگیری کنند. در سال ۲۰۲۳، بیرسه دیکسی و همکاران [۸] بررسی کردند که چگونه سطوح ساختاردهی شده می‌توانند ضریب انتقال حرارت را بین ۱۵٪ تا ۴۴/۵٪ افزایش دهند. آنها دریافتند که سطح دارای ۴۰۵ حفره بیشترین بهبود را در انتقال حرارت، حدود ۴۱٪ تا ۵۶/۵٪، نسبت به سطوح صاف دارد. همچنین، مشاهده نمودند که افت دمای اضافی در این سطوح بین ۲۹٪ تا ۳۴٪ متغیر می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که فاصله بین کانال‌ها بر ضریب انتقال حرارت تأثیر دارد و شکل حباب‌ها نیز بسته به ساختار سطح تغییر می‌کند. در پژوهشی جدیدتر راهول و همکاران [۹] به بررسی سطوح مسی میکروسازه‌ای پوشش داده شده با نانوسیال هیبریدی می‌پردازند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که این سطوح به‌طور قابل‌توجهی شار حرارتی بحرانی^۲ و ضریب انتقال حرارت^۳ را افزایش می‌دهد. این دستاورد نشان‌دهنده تأثیر ترکیبی اصلاحات سطحی و نانوسیالات در بهبود تعاملات مایع-جامد، تقویت خاصیت فته‌ای مویرگی و ایجاد نقاط جوشش است، که همگی منجر به افزایش عملکرد جوشش می‌شوند. همچنین هندسه سطح و ساختاردهی سطوح به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در بهبود انتقال حرارت جوشش هسته‌ای شناخته شده‌اند. دونگ و همکاران [۱۰] در پژوهشی با استفاده از روش شبکه بولتزمن^۴ به بررسی تأثیر شیب سطح و هندسه پره‌ها بر حرکت حباب‌ها و انتقال حرارت در جوشش زیرسرد روی سطوح پره‌دار

¹ Rayleigh-Benard

² CHF

³ HTC

⁴ LBM

تأثیر ساختارهای پره‌ای مربعی روی سطوح مسی را در جوشش استخری با استفاده از سیال نووک ۱۶۴۹ بررسی کردند. نتایج نشان داد که ضریب انتقال حرارت تا ۱۰ برابر و شار حرارتی بحرانی تا ۲/۸ برابر نسبت به سطوح صاف افزایش می‌یابد. دلیل اصلی این بهبود، افزایش سطح تماس سیال با سطح گرم‌کننده به کمک پره‌ها بود. آن‌ها همچنین دریافتند که در مراحل اولیه جوشش، ضریب انتقال حرارت به شکل و اندازه پره‌ها وابسته نیست، اما در فاصله‌های بسیار کم که به اندازه مقیاس طول موینگی می‌رسد، عملکرد کاهش می‌یابد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از چنین ساختارهایی می‌تواند در سیستم‌های خنک‌کاری پیشرفته مانند خنک‌سازی تجهیزات الکترونیکی و سیستم‌های انرژی بسیار مفید باشد، هرچند نتایج این مطالعه به ترکیب خاص مس و نووک ۶۴۹ محدود شده است.

در این مطالعه، تمرکز بر بررسی جوشش هسته‌ای استخری با در نظر گرفتن تأثیر هندسه سطح و ارتفاع پره‌ها است. هدف اصلی، تحلیل رفتار جوشش و ارتباط آن با ویژگی‌های سطح می‌باشد. برای این منظور، از روش دینامیک سیالات محاسباتی^۲ و به‌طور خاص از روش حجم سیال^۳ برای شبیه‌سازی دوبعدی جوشش استفاده شده است تا تأثیر تغییرات هندسی سطح بررسی شود. نتایج نشان می‌دهد که الگوهای جوشش به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر تغییرات در هندسه سطح قرار می‌گیرند و هندسه سطح نقش مهمی در رفتار جوشش هسته‌ای دارد.

این مقاله جزئیات کاملی از دینامیک حباب‌ها و الگوهای جوشش در طول زمان ارائه می‌دهد و نتایج شبیه‌سازی را با داده‌های روش اویلری^۴ نیز مقایسه می‌کند. همچنین برای دقت بیشتر، نتایج با داده‌های تجربی اعتبارسنجی شده‌اند. استفاده از تکنیک‌های عددی پیشرفته به دلیل دقت و کارایی بالایی که در شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده دارند، در مقایسه با روش‌های تجربی که معمولاً زمان‌بر و پرهزینه هستند، ابزار قدرتمندی برای تحقیقات علمی و مهندسی به شمار می‌روند. در این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی عددی، امکان تحلیل پارامتری و بهینه‌سازی هندسه سطح برای سیستم‌های جوشش هسته‌ای به منظور بهبود ایمنی و کارایی آنها فراهم شده است.

پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش شیب سطح، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد و سطح پره‌دار مستطیلی در شیب ۶۰ درجه بهترین عملکرد را از نظر حرکت حباب‌ها و بهبود انتقال حرارت داشت. آن‌ها مشاهده کردند که شکل پره و شیب سطح به‌طور مستقیم بر رشد و جدا شدن حباب‌ها تأثیر می‌گذارد، به‌طوری که در شیب‌های بیشتر، حباب‌ها سریع‌تر از سطح جدا می‌شوند و جریان سیال بهبود پیدا می‌کند. این مطالعه نشان می‌دهد که طراحی مناسب پره‌ها و انتخاب شیب بهینه می‌تواند به افزایش انتقال حرارت و عملکرد بهتر در سیستم‌های خنک‌کننده و مبدل‌های حرارتی کمک کند. هوانگ و همکاران [۱۱] نیز در مطالعه‌ای عددی با استفاده از روش بولتزمن به بررسی انتقال حرارت جوشش استخری روی سطوح ساختاریافته پرداختند. آن‌ها هندسه‌های مختلف میکروسازه‌ای، از جمله مربع، مثلث دندانه‌دار و مثلث برجسته را بررسی کردند و دریافتند که ساختارهای مثلث برجسته بهترین عملکرد را از نظر بهبود انتقال حرارت دارند. این بهبود به دلیل رسانش حرارتی گذرا و حرکت‌های موضعی سیال اتفاق می‌افتد. همچنین آن‌ها نشان دادند که فاصله بهینه بین ساختارها (۶۶ واحد شبکه‌ای) می‌تواند با افزایش هسته‌زایی حباب‌ها و حرکت جانبی آن‌ها، انتقال حرارت را به حداکثر برساند. این فرآیند باعث خیس شدن مجدد سطح و بهبود جریان طبیعی سیال می‌شود. با وجود محدودیت‌هایی مانند فرض دمایی ثابت در مرزها، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که طراحی مناسب سطوح ساختاریافته، به‌ویژه ساختارهای مثلثی، می‌تواند در بهبود سیستم‌های خنک‌کننده حرارتی در صنایع تولید نیرو و خنک‌سازی تجهیزات الکترونیکی مؤثر باشد. پرانوتو و همکاران [۱۲] در پژوهشی تجربی، انتقال حرارت جوشش جریانی را در میکروکانال‌های پره‌دار بررسی کردند و تأثیر هندسه پره، قطر هیدرولیکی، فاصله بین پره‌ها و شار گرمی را بر عملکرد حرارتی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که پره‌های با مقطع مستطیلی عملکرد بهتری نسبت به پره‌های دوزنقه‌ای داشتند و به حداکثر ضریب انتقال حرارت ۵۰۶۶/۸۴ وات بر مترمربع کلون دست یافتند. کاهش قطر هیدرولیکی به دلیل ایجاد لایه مرزی حرارتی متراکم‌تر، ضریب انتقال حرارت را به میزان ۲۲/۵٪ برای پره‌های مستطیلی و ۱۷/۱٪ برای پره‌های دوزنقه‌ای افزایش داد. همچنین، افزایش شار گرمی و کاهش فاصله بین پره‌ها به بهبود انتقال حرارت کمک کرد، اما باعث افت فشار قابل توجهی تا ۴۸٪ شد. این مطالعه بر نقش مهم هندسه پره‌ها و ابعاد آن‌ها در بهینه‌سازی سیستم‌های انتقال حرارت تأکید می‌کند. فالستی و همکاران [۱۳] در پژوهشی

¹ Novec649

² CFD

³ VOF

⁴ Eulerian

۲- شبیه‌سازی عددی

روش حجم سیال یکی از تکنیک‌های عددی پرکاربرد در شبیه‌سازی جوشش هسته‌ای استخری است که به ارائه نمای دقیقی از فصل مشترک مایع-گاز^۱ کمک می‌کند. این روش از معادلات جابجایی برای ردیابی کسر حجمی هر فاز سیال استفاده می‌کند و امکان مطالعه جزئیات تغییر شکل و حرکت فصل مشترک را در فرایندهای جوشش فراهم می‌سازد.

برای اطمینان از اینکه روش حجم سیال رفتار صحیح فصل مشترک را به دقت مدل‌سازی می‌کند، مدل‌سازی دقیق نیروهای کشش سطحی بسیار حیاتی است. مدل‌های مختلفی مانند مدل نیروی سطح پیوسته^۲ و روش سیال شبح^۳ برای یکپارچه‌سازی اثرات کشش سطحی در چارچوب روش حجم سیال پیشنهاد شده‌اند. مدل نیروی سطح پیوسته که توسط براکبیل و همکاران معرفی شده است، کشش سطحی را به عنوان یک نیروی پیوسته که بر ناحیه فصل مشترک اثر می‌گذارد، در نظر می‌گیرد. این روش اعمال یکنواخت و پایدار نیروهای کشش سطحی را تضمین می‌کند. از سوی دیگر، روش سیال شبح نمایشی دقیقی از فصل مشترک ارائه می‌دهد و دقت میدان‌های فشار و سرعت را در سرتاسر فصل مشترک بهبود می‌بخشد [۱۴]، [۱۵]. با استفاده از این مدل‌های پیشرفته کشش سطحی، روش حجم سیال قادر است پیچیدگی‌های جوشش هسته‌ای استخری از جمله تشکیل، رشد و جدا شدن حباب‌ها را با دقت بیشتری شبیه‌سازی کند و درک بهتری از فرایندهای جوشش ارائه دهد.

در این پژوهش برای شبیه‌سازی جوشش هسته‌ای استخری از تحلیل دوبعدی استفاده شده است. انتخاب این روش به دلیل سرعت بالای حل عددی و کاهش زمان محاسباتی بوده و در عین حال دقت کافی برای بررسی مکانیزم‌های انتقال حرارت و دینامیک حباب‌ها را فراهم می‌کند. وانگ و همکاران [۱۶] در مطالعه خود نشان دادند که استفاده از روش دوبعدی شبکه بولتزمن می‌تواند ضمن کاهش زمان محاسبات، رفتارهای پیچیده رشد، حرکت و جدایش حباب‌ها را با دقت بالا شبیه‌سازی کند. علاوه بر این، احمد و همکاران [۱۷] تأکید کردند که روش دوبعدی تطابق خوبی با داده‌های تجربی دارد و می‌تواند برای تحلیل رفتارهای پیچیده حباب‌ها بسیار کارآمد باشد. راجان جاسوال [۱۸] و همکاران در پژوهشی با استفاده از تحلیل عددی دوبعدی، عملکرد سطوح پره‌دار را در جوشش

استخری بررسی کردند. نتایج نشان داد که سطوح پره‌دار با بهبود نقاط هسته‌زایی و ادغام حباب‌ها، انتقال حرارت را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهند. جاگانان و همکاران [۱۹] با استفاده از روش حجم سیال و تحلیل دوبعدی، به شبیه‌سازی دینامیک حباب در جوشش هسته‌ای پرداختند. آن‌ها قطر جدایش و سرعت نهایی حباب را شبیه‌سازی کرده و با تطابق مناسب با نتایج تئوری، دقت روش حجم سیال در مدل‌سازی تعاملات فازی را نشان دادند. با وجود محدودیت‌های ذاتی تحلیل دوبعدی، استفاده از روش‌هایی مانند مدل حجم سیال و تنظیمات مرزی دقیق در این پژوهش، توانسته است این محدودیت‌ها را کاهش دهد. این روش به‌عنوان پایه‌ای برای توسعه مدل‌های سه‌بعدی و تحلیل‌های آینده عمل کرده و در بسیاری از مطالعات مشابه، ابزاری موفق و کارا بوده است.

۱-۲- معادلات حاکم

با توجه با اینکه در این مطالعه، از روش حجم سیال برای شبیه‌سازی جوشش استخری استفاده شده است. این روش اولیری از کسر حجمی^۴ α برای ردیابی فصل مشترک سیال‌ها در یک شبکه محاسباتی ثابت بهره می‌برد. کسر حجمی بیانگر نسبت حجم فاز مشخصی به حجم کل سلول است. زمانی که مقدار α برابر ۱ باشد، نشان‌دهنده سلولی است که کاملاً با فاز مورد نظر پر شده است و هنگامی که α برابر ۰ باشد، بیانگر سلولی است که تنها فاز دیگر در آن وجود دارد. مقادیر میانی $0 < \alpha < 1$ نشان‌دهنده سلول‌های واقع در مرز فصل مشترک دو فاز هستند. شرط اصلی این است که مجموع کسرهای حجمی برای تمام فازها در هر سلول برابر با یک باشد تا شرایط فیزیکی سیستم حفظ شود [۲۰].

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \quad (1)$$

برای ردیابی فصل مشترک، باید معادله پیوستگی برای کسر حجمی فاز i ام حل شود.

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u} \alpha_i) = \frac{S_{m,i}}{\rho_i} \quad (2)$$

در اینجا ρ_i به عنوان چگالی فاز i ام و $S_{m,i}$ به عنوان ترم منبع جرمی حجمی در نظر گرفته شده است. اختصارات v و l به ترتیب نشان‌دهنده فاز بخار و مایع هستند. چگالی میانگین

¹ Liquid-gas interface² CSF - Continuum Surface Force³ GFM - Ghost Fluid Method⁴ Volume fraction

دمای مرجع T_{ref} است، در حالی که ظرفیت‌های گرمای ویژه فازهای مایع و بخار به ترتیب C_{pl} و C_{pv} می‌باشند.

$$S_g = S_m \cdot h_{fg} \quad (10)$$

۲-۲- مدل تغییر فاز

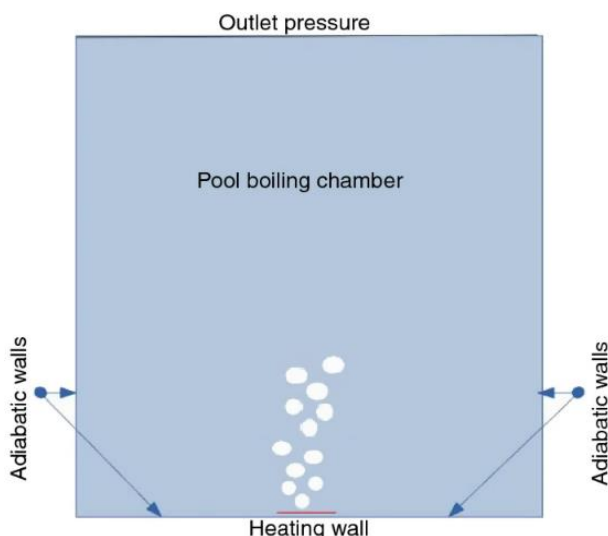
یکی از مدل‌های رایج برای بررسی دینامیک انتقال فاز در سیستم‌های مختلف، مدل لی است. این مدل پایه‌ای جامع برای توضیح تعامل پیچیده فازهای بخار و مایع در طول رویدادهای تغییر فاز ارائه می‌دهد. در مدل لی، اختلاف بین دمای سلول‌های سطح مشترک و دمای اشباع منجر به تولید عبارت منبع جرمی حجمی می‌شود [۲۱].

$$S_{m,v} = -S_{m,l} = -L\alpha_v\rho_v \frac{T_{sat} - T}{T_{sat}} \quad (11)$$

در اینجا L ضریب آرامش با ابعاد s^{-1} است و T_{sat} دمای اشباع می‌باشد. برای این مطالعه، ضریب آرامش L برابر با ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود. این مقدار با نتایج تحقیقات قبلی همخوانی دارد و به عنوان یک تقریب رایج در این حوزه مورد استفاده قرار می‌گیرد که نمایش معقولی از رفتار آرامش در بسیاری از سیستم‌ها ارائه می‌دهد [۲۲]، [۲۳]، [۲۴].

۳- دامنه محاسباتی

در این پژوهش دامنه محاسباتی محفظه‌ای مستطیل شکل می‌باشد که به صورت دوبعدی طراحی شده است (شکل ۱).



شکل ۱ دامنه محاسباتی

حجمی همان چگالی است که در هر سلول فصل مشترک یافت می‌شود.

$$\rho = \rho_v\alpha_v + \rho_l(1 - \alpha_v) \quad (3)$$

در این رویکرد، علاوه بر پارامترهایی همچون چگالی، سایر ویژگی‌های فیزیکی نظیر ویسکوزیته μ و رسانایی حرارتی k نیز در ناحیه فصل مشترک سیالات محاسبه می‌شوند. میدان‌های سرعت و دما که از حل یک معادله مومنتوم و یک معادله انرژی به دست می‌آیند، بین فازها در روش کسر حجمی به اشتراک گذاشته می‌شوند. در اینجا معادلات مومنتوم و انرژی آورده شده است:

$$\frac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{u}\vec{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot \left[\left(\mu (\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T) \right) \right] + \vec{F}_{csf} + \rho\vec{g} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u}\rho E) = \nabla \cdot (k\nabla T) + S_g \quad (5)$$

در اینجا g شتاب گرانشی و P فشار است. S_g ترم منبع انرژی و نیروی کشش سطحی که توسط مدل نیروی سطح پیوسته (CSF) تعیین می‌شود، با \vec{F}_{csf} نمایش داده می‌شود [۱۱].

$$F_{csf} = \sigma \frac{\alpha_l\rho_l k_l \nabla\alpha_v + \alpha_v\rho_v k_v \nabla\alpha_l}{0.5(\rho_l + \rho_v)} \quad (6)$$

در اینجا σ ضریب کشش سطحی است. K انحناى سطح مشترک است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$k = \nabla \cdot \frac{\nabla\alpha}{|\nabla\alpha|} \quad (7)$$

انرژی مخلوط E را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$E = \sigma \frac{\alpha_l\rho_l E_l + \alpha_v\rho_v E_v}{\alpha_l\rho_l + \alpha_v\rho_v} \quad (8)$$

و انرژی هر فاز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E_l = C_{pl}(T - T_{ref}), E_v = C_{pv}(T - T_{ref}) \quad (9)$$

انتقال حرارت کلی در طی جوشش هسته‌ای استخری می‌شود. تمامی دیوارهای محفظه به جز سطح آزمایش آدیباتیک هستند و بنابراین شار حرارتی صفر خواهند داشت.

$$q = -k_w \frac{dT}{dx} = 0 \quad (12)$$

فرض بر این است که سطح بالایی محفظه جوشش در فشار اتمسفری قرار دارد؛ بنابراین $P = P_{atm}$ در نظر گرفته می‌شود.

برای آغاز فرآیند جوشش هسته‌ای استخری، دمای اولیه آب مایع به دمای اشباع خود یعنی ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد (در فشار ۱ اتمسفر) تنظیم می‌شود. فرض بر این است که مایع در ابتدای فرآیند در حالت اشباع قرار دارد. با پیشروی شبیه‌سازی، مایع اطراف سطح گرم‌کننده به دلیل تبادل حرارت با سطح، بیش از حد گرم می‌شود. همچنین، سرعت اولیه آب در حالت صفر نگه داشته می‌شود تا در شروع شبیه‌سازی، حالت سکون مایع به‌طور دقیق شبیه‌سازی گردد. جدول (۱) ویژگی‌های آب مایع و بخار آب را در دمای اشباع ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، نمایش می‌دهد [۲۵].

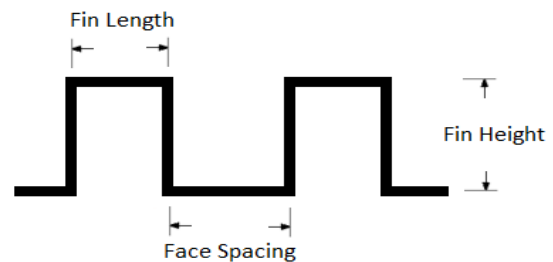
جدول ۱ خواص گرمایی مواد مورد استفاده در ذخیره گرمای محسوس

ردیف	مشخصات	آب - مایع	آب - بخار
۱	چگالی Kg/m^3	۹۵۸/۳۵	۰/۵۹۸۱۷
۲	گرمای ویژه K. J/Kg	۴۲۱۵/۷	۲۰۸۰
۳	هدایت حرارتی K. W/m	۰/۶۷۹۰۹	۰/۰۲۵۰۹
۴	ویسکوزیته دینامیکی Pa-s	۰/۰۰۰۲۸۱	۰/۰۰۰۰۱۲۲
۵	کشش سطحی N/m	۰/۰۵۸۹	-

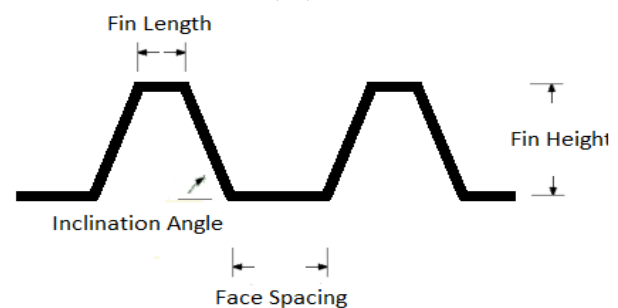
۲-۲- روش حل

در این پژوهش، شبکه ناحیه محاسباتی با استفاده از نرم‌افزار انسیس مش ۱۲۰۲۲ تولید شده است. روش حجم محدود برای حل معادلات جریان و انرژی با استفاده از همان نرم‌افزار به کار گرفته شده است. ابزار محاسباتی انسیس فلونت ۲ معادلات را با شرایط داده شده و بر اساس روش حجم محدود حل می‌کند. برای شناسایی سطح مشترک بخار-مایع از تکنیک حجم سیال

ابعاد محفظه جوشش استخری ۱۵۰×۲۵۰ میلی‌متر بوده و ناحیه گرمایش به طول ۱۹ میلی‌متر در مرکز بخش پایینی محفظه قرار دارد. این ساختار هندسی مشابه محفظه جوششی است که در آزمایش‌های استفاده شده است. فازهای بخار و مایع با استفاده از کسر حجمی بخار توصیف شده‌اند، به‌گونه‌ای که رنگ آبی نشان‌دهنده مایع با کسر حجمی صفر و رنگ سفید نشان‌دهنده بخار با کسر حجمی یک است. سه نوع هندسه سطح گرمایشی مورد بررسی قرار گرفت: سطح صاف، سطح دارای پره‌های مستطیلی و سطح دارای پره‌های دوزنقه‌ای. تمامی سطوح از مس ساخته شده و به‌صورت افقی در مرکز پایین محفظه نصب شده‌اند. شکل (۲) این هندسه‌های سطح گرمایشی را نمایش می‌دهد. محفظه دارای بالای باز و دیواره‌های آدیباتیک است و سطح گرمایشی در مرکز آن قرار دارد [۱۸].



(الف)



(ب)

شکل ۲ پارامترهای هندسی پره‌ها؛

الف- پره‌های مستطیلی، ب- پره‌های دوزنقه‌ای

۳-۱- شرایط مرزی و اولیه

معادلات حاکم در این شبیه‌سازی تحت شرایط مرزی زیر قرار دارند: دمای سطح گرم‌کننده در چهار مقدار ثابت ۱۱۰°C ، $۱۱۲/۵^\circ\text{C}$ ، ۱۱۵°C و $۱۱۷/۵^\circ\text{C}$ نگه داشته می‌شود. این کار به منظور بررسی تأثیر دمای سطح بر ویژگی‌های جوشش هسته‌ای استخری انجام شده است. این تغییرات در دمای سوپرهیت به‌طور قابل توجهی بر جوانه‌زنی حباب‌ها، رشد و جدا شدن آن‌ها تأثیر می‌گذارد که در نهایت باعث تغییر فرآیند

¹ ANSYS MESH 2022 R1

² ANSYS FLUENT

روی نتایج ندارد. در این پژوهش، رویکرد مش‌بندی غیر-یکنواخت برای بهینه‌سازی بهره‌وری محاسباتی در عین حفظ دقت نتایج در شبیه‌سازی‌های جوشش استخری اتخاذ شده است. ناحیه محاسباتی با استفاده از اندازه پایه مش‌بندی شده است که تعادلی میان ثبت رفتار کلی جریان و کاهش منابع محاسباتی برقرار می‌کند. برای سطح گرم‌کن، مش‌بندی بسیار ریزتری نسبت به ناحیه اصلی استفاده شده است. این مش‌بندی دقیق، تضمین می‌کند که ناحیه بحرانی انتقال حرارت، جایی که جوشش آغاز می‌شود و انتقال حرارت قابل توجهی رخ می‌دهد، به خوبی تفکیک شده است. مش ریزتر در نزدیکی سطح گرم‌کن، گرادیان‌های حرارتی پیچیده و دینامیک حباب‌ها را با دقت بیشتری ثبت می‌کند. مطالعه استقلال شبکه به منظور تعیین وضوح مش مناسب برای شبیه‌سازی‌های جوشش استخری انجام می‌شود. مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌ها با استفاده از مش‌های به تدریج ریزتر انجام گرفت و تمرکز اصلی بر تأثیر چگالی شبکه بر شار q'' حرارتی بود. نتایج در جدول (۲) خلاصه شده‌اند.

جدول ۲ تأثیر اندازه شبکه بر شار حرارتی در سوپرهیت 10°C

شماره	سایز سلول mm	سایز سلول mm	تعداد سلول	انتقال حرارت Kw/m^2
۱	۰/۰۸	۰/۵	۱۵۲۹۷۷	۷۲/۶۴
۲	۰/۰۶	۰/۵	۱۵۳۶۵۳	۸۳/۹۲
۳	۰/۰۴	۰/۵	۱۵۴۴۱۰	۹۹/۴۷
۴	۰/۰۳۵	۰/۵	۱۵۶۲۶۵	۱۱۱/۶۳۵
۵	۰/۰۳۵	۰/۴۵	۱۹۰۴۶۱	۱۱۵/۸۶۶
۶	۰/۰۳۵	۰/۴	۲۳۹۶۳۱	۱۱۷/۶۲۹

استفاده شده است. طرح ثبت سطح مشترک با وضوح بالا^۱ برای گسسته‌سازی مکانی کسر حجمی به کار رفته و جفت‌سازی فشار-سرعت با استفاده از الگوریتم کوپل^۲ انجام شده است. برای گسسته‌سازی جملات همرفتی معادلات انرژی و مومنتم از طرح بالادست مرتبه دوم و برای گسسته‌سازی عبارت فشار از طرح پله‌ای فشار^۳ بهره گرفته شده است. روش کم‌ترین مربعات سلولی برای گسسته‌سازی گرادیان مورد استفاده قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی جریان آشفته، از مدل توربولانسی کا-اِپسِلین^۴ با بهبود پیشرفته بهره‌برداری شده است. مدل کا-اِپسِلین با شبیه‌سازی دقیق جریان‌های آشفته و تعاملات پیچیده بین حباب‌ها و مایع، پیش‌بینی بهتر انتقال حرارت را امکان‌پذیر می‌سازد و به دلیل تعادل میان دقت، هزینه محاسباتی و اعتبارسنجی در مطالعات تجربی، انتخابی کاربردی و مؤثر برای شبیه‌سازی‌های جوشش هسته‌ای محسوب می‌شود [۲۶-۲۹]. همچنین در این پژوهش، از روش بهبود رفتار دیواره^۵ برای مدل‌سازی جریان در نزدیکی دیواره استفاده شده است. این روش با ترکیب مدل‌سازی نواحی لزجت تحت سلطه زیرلایه لزج و نواحی آشفته، توانایی شبیه‌سازی دقیق‌تر جریان در محدوده‌های نزدیک دیواره را ارائه می‌دهد. در این پژوهش از گام‌های زمانی افزایشی تطبیقی^۶ با مقدار اولیه $0/005$ ثانیه برای شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. این روش با رعایت شرط پایداری عددی و تطبیق با تغییرات جریان، دقت شبیه‌سازی رفتار حباب‌ها و انتقال حرارت را تضمین کرده و تعادلی بین دقت و کارایی محاسباتی برقرار کرده است. این ترکیب، روشی قوی و دقیق برای ثبت رفتار جریان عمده و همچنین ناحیه‌های بحرانی نزدیک به دیوار را ارائه می‌دهد. برای ساده‌سازی تحلیل، خصوصیات ترموفیزیکی هر دو فاز به صورت ثابت فرض شده‌اند.

۳-۳- استقلال از شبکه

۳-۴- اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی

برای ارزیابی دقت مدل عددی، نتایج پیش‌بینی شده با داده‌های تجربی معتبر در مورد جوشش حوضچه‌ای مقایسه می‌شود. در پژوهش آن‌ها از محفظه‌ای با ابعاد هندسی و پیکربندی سطح گرم‌کننده مشابه با مطالعه حاضر استفاده گردیده است. همچنین، ویژگی‌های سیال کاری و شرایط عملیاتی به‌طور نزدیکی با مسئله شبیه‌سازی شده مطابقت دارند. شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایش مرجع، هر دو از یک شرط مرزی دمایی ثابت در سطح گرم‌کننده برای نشان‌دادن فرآیند

مطالعه استقلال از شبکه یکی از مراحل اساسی در شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی است که دقت و قابلیت اطمینان نتایج را تضمین می‌کند. این مطالعه بررسی می‌کند که چگالی شبکه (تعداد سلول‌ها) تأثیر قابل توجهی بر

¹ HRIC (High Resolution Interface Capturing)

² COUPLED

⁵ PRESTO (Pressure Staggering Option)

⁶ K-ε

⁷ Enhanced wall treatment

⁸ Adaptive incremental time steps

ب) تغییرات خواص ترموفیزیکی: خواص ترموفیزیکی آب ممکن است به صورت جزئی به دما وابسته باشند. فرض ثابت بودن این خواص در شبیه‌سازی‌ها می‌تواند به اختلافات جزئی در دماهای بالاتر منجر شود، جایی که این تغییرات بیشتر نمود پیدا می‌کنند [۳۰].

ج) محدودیت‌های مدل: هر مدل عددی دارای محدودیت‌های ذاتی است. مدل آشفتگی انتخابی یا روابط انتقال حرارت جوشش ممکن است نتوانند تمامی پیچیدگی‌های مربوط به جوشش استخری در دماهای بالا را به‌طور کامل در بر گیرند [۳۱]. با وجود این عوامل احتمالی، تطابق کلی بین شبیه‌سازی‌ها و داده‌های تجربی قابل توجه است. حداکثر خطای مشاهده‌شده در شار حرارتی پیش‌بینی‌شده در مقایسه با داده‌های تجربی تقریباً ۲۱ درصد و در دمای سوپرهیت ۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد روی سطح گرم‌کننده گزارش می‌شود.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- تأثیر هندسه پره بر انتقال حرارت جوشش

نقش هندسه پره‌ها در بهبود عملکرد انتقال حرارت جوشش به خوبی شناخته می‌شود. پره‌ها چندین مزیت کلیدی را که شامل افزایش سطح تماس برای انتقال حرارت، افزایش تحریک مایع که منجر به بهبود تماس بین مایع و دیوار داغ می‌شود، هدایت جریان سیال به گونه‌ای که ترشوندگی سطح گرم را تسهیل کند و شکستن لایه بخار عایق برای بهبود انتقال حرارت و جدایش حباب‌ها ارائه می‌دهند. این تأثیرات مربوط به پره‌ها می‌تواند به بهبود قابل توجهی در ضریب انتقال حرارت جوشش منجر شود.

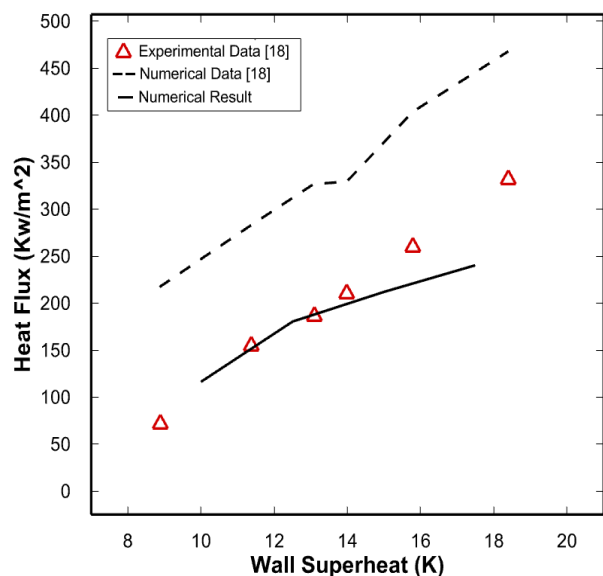
این پژوهش به بررسی تأثیر هندسه پره بر عملکرد انتقال حرارت در جوشش هسته‌ای می‌پردازد. برای این منظور از دو شکل متفاوت پره استفاده شده است تا تأثیر ویژگی‌های هندسی بر دینامیک حباب‌ها، فرآیندهای هسته‌زایی و کارایی کلی انتقال حرارت مورد بررسی قرار گیرد.

۴-۲- هندسه پره‌ها

شکل (۴) پیکربندی هندسی پره‌های مورد بررسی را نمایش می‌دهد.

انتقال حرارت بهره می‌بردند. این هماهنگی امکان مقایسه مستقیم نتایج را فراهم می‌کند. مقایسه بین پیش‌بینی‌های عددی و داده‌های تجربی برای شار حرارتی، نشان‌دهنده توافق بسیار خوبی می‌باشد. این توافق در تمام چهار دمای سوپرهیت سطح گرم‌کننده مورد بررسی (10°C ، $12/5^{\circ}\text{C}$ ، 15°C و $17/5^{\circ}\text{C}$) مشاهده می‌شود. این تطابق نزدیک، نشان‌دهنده کارایی مدل عددی انتخاب شده در توصیف دقیق فیزیک جوشش حوضچه‌ای در شرایط دمایی مختلف سطح است. مدل به‌خوبی رابطه بین شار حرارتی اعمال‌شده و انتقال حرارت حاصل از سطح گرم‌کننده را پیش‌بینی می‌کند. مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و تجربی شار حرارتی در شکل (۳) نشان داده شده است.

این نمودار به‌طور کلی توافق خوبی بین دو مجموعه داده در دماهای سطح گرم‌کننده مورد بررسی نشان می‌دهد [۱۸].

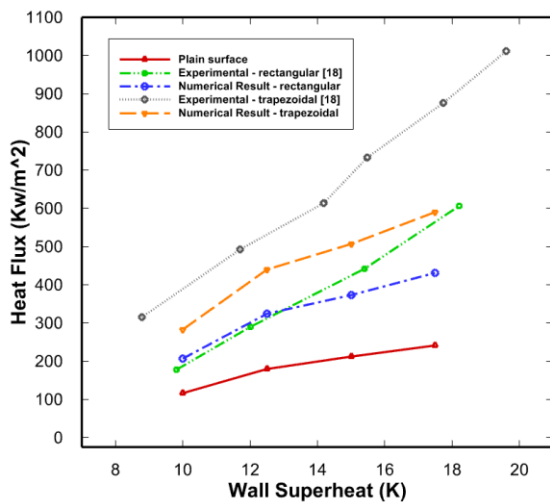


شکل ۳ اعتبارسنجی برای سطح صاف

با این حال، بررسی دقیق‌تر حاکی از افزایش جزئی اختلاف بین پیش‌بینی‌های عددی و داده‌های تجربی در دماهای بالاتر است. این روند می‌تواند به چندین عامل احتمالی نسبت داده شود: الف) افزایش پیچیدگی در دماهای بالا: در دماهای بالاتر، فرآیند جوشش استخری به دلیل پدیده‌هایی مانند افزایش تعاملات حباب‌ها، تشکیل فیلم بخار بیشتر و احتمال ورود به نواحی جوشش انتقالی^۱ پیچیده‌تر می‌شود. مدل‌سازی دقیق این تعاملات پیچیده، در مدل‌های عددی می‌تواند پیچیده باشد [۱].

^۱ Transition boiling

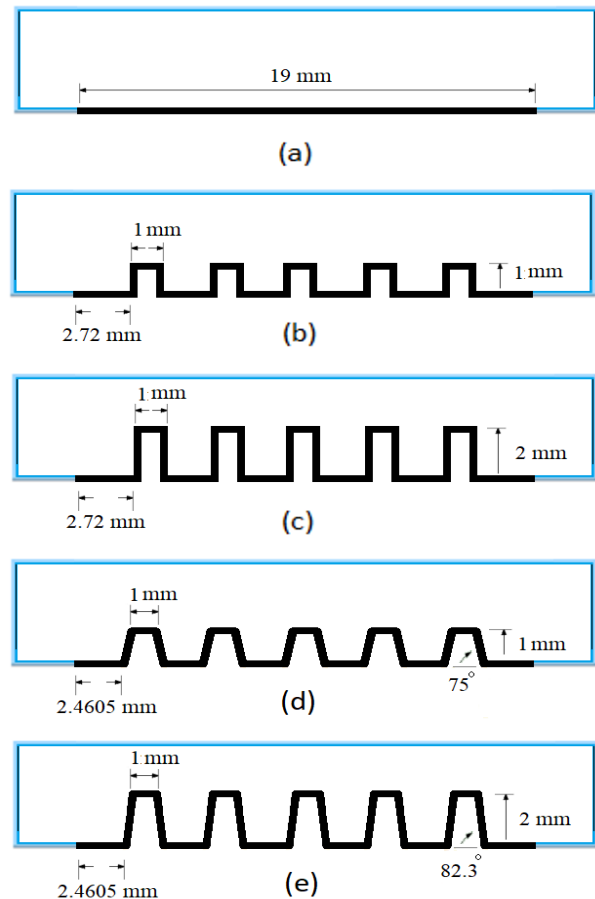
برای روشن‌سازی تعامل بین هندسه پره و انتقال حرارت جوشش، نمودارهایی ارائه می‌شود که رابطه بین شار حرارتی و دمای مازاد دیوار را نشان می‌دهند. این نمودارها با داده‌های شبیه‌سازی جوشش هسته‌ای موجود و نتایج شبیه‌سازی‌های خودمان مقایسه خواهند شد تا ارزیابی جامعی از تأثیر هندسه‌های پیشنهادی پره بر بهبود انتقال حرارت انجام شود. شکل (۵) مقایسه نتایج عددی این مطالعه با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۱۸] را برای سطوح پره‌دار مستطیلی و دوزنقه‌ای و همچنین سطح صاف نشان می‌دهد.



شکل ۵ تاثیر پره‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای بر جوشش هسته‌ای و مقایسه نتایج عددی این مطالعه با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۱۸]

این نمودار رابطه بین شار حرارتی و دمای سوپرهیت دیوار را برای هندسه‌های مختلف بررسی می‌کند. داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که با افزایش دمای سوپرهیت دیوار، شار حرارتی به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. نتایج عددی این مطالعه روند مشابهی را ثبت کرده و در مقادیر دمای مازاد پایین تطابق بسیار خوبی با داده‌های تجربی دارند. بیشترین میزان خطای نسبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی برای پره‌های مستطیلی حدود ۲۲ درصد و برای پره‌های دوزنقه‌ای در حدود ۳۰ درصد برآورد شده است. این میزان خطا نشان‌دهنده دقت مناسب روش عددی در مدل‌سازی رفتار جوشش هسته‌ای است.

در مقایسه با سطح صاف، هر دو هندسه پره‌دار بهبود قابل‌توجهی در انتقال حرارت نشان می‌دهند. سطوح دارای پره‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای به دلیل افزایش سطح مؤثر انتقال حرارت و ایجاد نقاط هسته‌زایی بیشتر منجر به افزایش شار حرارتی می‌شوند. با این حال، هندسه پره‌های دوزنقه‌ای بهبود بیشتری ارائه می‌دهد. این پره‌ها علاوه بر ایجاد نقاط



شکل ۴ نمایش هندسه سطوح پره‌دار شامل پره‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای همراه با ابعاد و فاصله آن‌ها

در این مطالعه، دو نوع هندسه پره‌دار شامل پره‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای بر روی سطح هیتز در نظر گرفته می‌شود. مشخصات هندسی پره‌ها مانند ارتفاع، فاصله بین پره‌ها و تعداد پره‌ها با دقت طراحی شده‌اند تا تأثیر این ویژگی‌ها بر هسته‌زایی حباب‌ها، دینامیک حباب‌ها و عملکرد انتقال حرارت در فرآیند جوشش هسته‌ای بررسی شود. در شکل (۲) سطح صاف به‌عنوان پایه مقایسه و سایر هندسه‌ها به‌منظور تحلیل عملکرد پره‌های تقویت‌کننده انتقال حرارت ارائه شده است. جدول (۳) ویژگی‌های کلیدی هندسه‌ی پره‌های مورد بررسی را خلاصه‌سازی می‌کند.

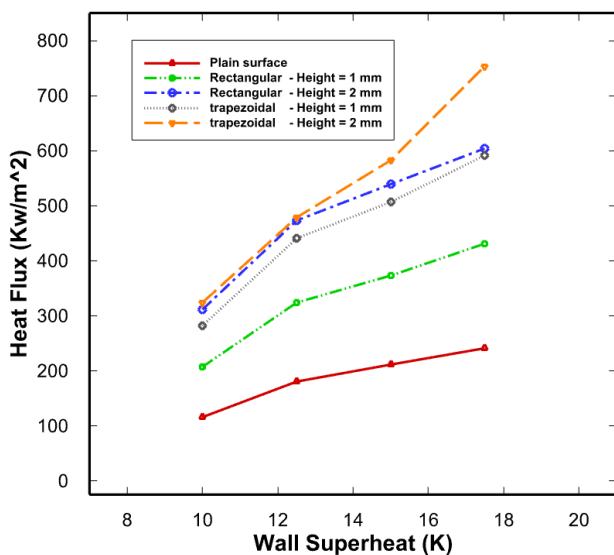
جدول ۳ مشخصات هندسی پره‌ها

دوزنقه‌ای	مستطیلی		Blade shape		شکل پره
	۱	۲	۱	۲	
۲	۱	۲	۱	۱	ارتفاع پره Fin height
۱	۱	۱	۱	۱	عرض پره Fin length
۱/۶	۱/۶	۲/۱۴	۲/۱۴	۲/۱۴	گام پره Fin spacing
۸۲/۳	۷۵	۹۰	۹۰	۹۰	زاویه انحراف Inclination angle

به‌طور کلی نتایج شبیه‌سازی این مطالعه نشان می‌دهد که مدل عددی حاضر توانسته است رابطه شار حرارتی و دمای سوپرهیت را با دقت بالا پیش‌بینی کند و در مقایسه با داده‌های عددی مرجع، به نتایج تجربی نزدیک‌تر باشد. این تطابق بهتر، به‌ویژه در مقادیر دمای مازاد پایین، نشان‌دهنده صحت و کارایی مدل‌سازی عددی ارائه‌شده در این پژوهش است.

۴-۳- تأثیر ارتفاع پره‌ها بر جوشش هسته‌ای استخری

شکل (۷) مقایسه‌ای از شار حرارتی برای یک سطح صاف و دو سطح دارای پره‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای را با ارتفاع‌های ۱ میلی‌متر و ۲ میلی‌متر در دماهای مختلف سوپرهیت دیواره نشان می‌دهد. در زمینه جوشش هسته‌ای استخری، تأثیر هندسه و ارتفاع پره بر عملکرد انتقال حرارت از اهمیت بالایی برخوردار است.



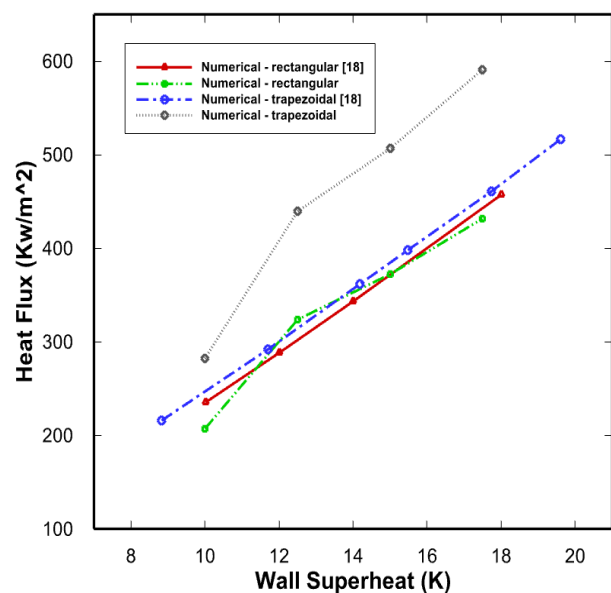
شکل ۷ تأثیر ارتفاع پره بر انتقال حرارت جوشش در سطح

برای سطح صاف، شار حرارتی به تدریج با افزایش دمای دیواره افزایش می‌یابد و در دمای سوپرهیت ۱۷/۵ درجه به حداکثر ۲۰۰ کیلووات بر متر مربع می‌رسد. در مقابل، سطوح با پره‌های مستطیلی ۱ میلی‌متری بهبود چشمگیری نشان می‌دهند؛ به طوری که شار حرارتی از حدود ۲۰۷ کیلووات بر متر مربع در دمای سوپرهیت ۱۰ درجه شروع شده و در دمای سوپرهیت ۱۷/۵ درجه به حدود ۴۳۱ کیلووات بر متر مربع می‌رسد. این بهبود به افزایش سطح مؤثر و ایجاد نقاط هسته‌زایی بیشتر توسط پره‌ها نسبت داده می‌شود که شکل‌گیری حباب‌ها و انتقال حرارت را تسهیل می‌کند.

هسته‌زایی بیشتر، موجب جوشش سریع‌تر و تکرار بیشتر شده و انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد. همچنین، این هندسه با ایجاد کانال‌هایی به بهبود دینامیک حباب‌ها کمک می‌کند. این کانال‌ها با به دام انداختن، تحریک و جداسازی مؤثرتر حباب‌ها، باعث افزایش سطح تماس مایع با سطح می‌شوند و لایه بخار عایق را از بین می‌برند. این ویژگی موجب افزایش عملکرد انتقال حرارت در مقایسه با پره‌های مستطیلی می‌شود.

در مجموع، پره‌های دوزنقه‌ای عملکرد بهتری را در مقایسه با پره‌های مستطیلی نشان می‌دهند، به‌ویژه در دماهای سوپرهیت بالاتر که به دلیل بهبود قابل توجه دینامیک حباب‌ها و افزایش تماس مؤثر مایع با سطح رخ می‌دهد. با این حال، تأثیر دقیق هندسه پره‌ها بر رفتار پیچیده حباب‌ها و پدیده‌های جوشش، همچنان موضوع پژوهش‌های در حال انجام است و نیازمند بررسی‌های عمیق‌تری خواهد بود.

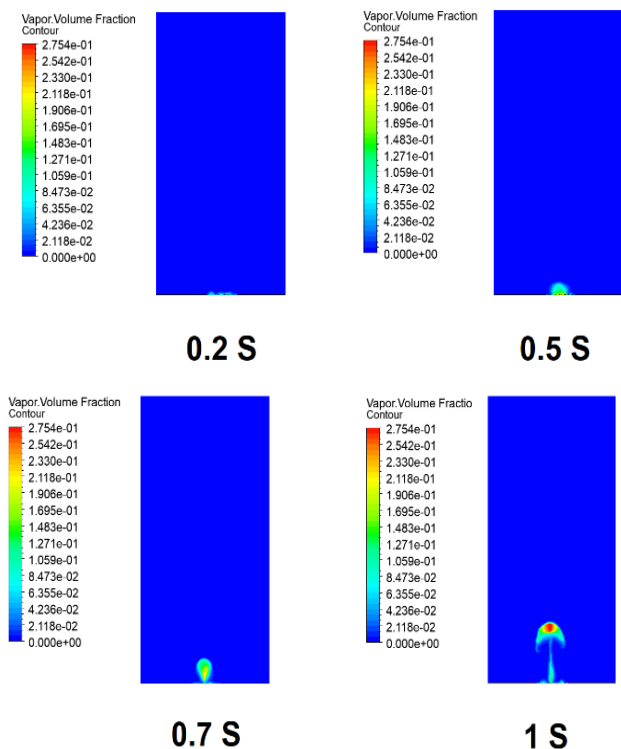
شکل (۶) مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی این مطالعه را با داده‌های عددی مرجع [۱۸] برای سطوح پره‌دار مستطیلی و دوزنقه‌ای نشان می‌دهد. نتایج هر دو مجموعه روند مشابهی از افزایش شار حرارتی با افزایش دمای سوپرهیت دیواره را ثبت کرده‌اند، اما نتایج عددی مطالعه حاضر در مقایسه با داده‌های عددی مرجع به داده‌های تجربی نزدیک‌تر هستند که نشان‌دهنده دقت بالای شبیه‌سازی حاضر است. برای سطوح پره‌دار مستطیلی، نتایج شبیه‌سازی مطالعه حاضر تطابق نسبتاً خوبی با نتایج عددی مرجع دارند، بیشترین میزان اختلاف حدوداً ۱۰ درصد مشاهده می‌شود همچنین در سطوح پره‌دار دوزنقه‌ای، بیشترین میزان اختلاف تقریباً ۲۷/۸ درصد است.



شکل ۶ مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج عددی مرجع [۱۸]

۴-۵- سطح صاف

شکل (۸) مجموعه‌ای از کانتورهای بخار را در یک بازه زمانی مشخص طی فرآیند جوشش هسته‌ای در مخزن و در شرایط دمایی ثابت گرم‌کننده (۱۱۰ درجه سانتی‌گراد) نشان می‌دهد. شدت رنگ در این کانتورها نشان دهنده تراکم یا غلظت بخار است؛ به طوری که نواحی تیره‌تر نمایانگر مناطق با تراکم بخار بالاتر هستند.



شکل ۸ کانتورهای کسر حجمی بخار برای سطح صاف

در مطالعه دینامیک سیالات و رفتار ستون بخار، بررسی خطوط هم‌تراز بخار در بازه‌های زمانی مختلف، بینش‌های مهمی درباره تکامل زمانی و ویژگی‌های پخش بخار ارائه می‌دهد. مجموعه تصاویر ارائه شده، توسعه خطوط هم‌تراز بخار را بر روی یک سطح صاف در چهار زمان مختلف: ۰/۲، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ ثانیه به نمایش می‌گذارد. در زمان ۰/۲ ثانیه، پراکندگی بخار حداقل می‌باشد که نشان‌دهنده مرحله اولیه آزادسازی بخار با شدت کم و پخش محدود است. در زمان ۰/۵ ثانیه، خطوط هم‌تراز بخار به طور جزئی گسترش یافته و حضور آن بارزتر شده و نشان از آغاز فاز پخش فعال‌تر دارد. با پیشروی زمان به ۰/۷ ثانیه، ستون بخار به طور چشمگیری برجسته‌تر می‌شود، به ارتفاع بیشتری می‌رسد و شدت بیشتری از خود نشان می‌دهد که گویای تسریع در آزادسازی بخار و حرکت

این روند در پره‌های مستطیلی ۲ میلی‌متری حتی برجسته‌تر است، به طوری که شار حرارتی از حدود ۳۱۰ کیلووات بر متر-مربع در دمای سوپرهیت ۱۰ درجه شروع شده و به حدود ۶۰۴ کیلووات بر متر مربع در دمای سوپرهیت ۱۷/۵ درجه می‌رسد. عملکرد بهتر پره‌های ۲ میلی‌متری نشان‌دهنده مزایای سطح بیشتر و تراکم بالاتر نقاط هسته‌زایی است که موجب جوشش بهتر و بهبود مکانیسم‌های انتقال حرارت می‌شود.

برای پره‌های دوزنقه‌ای، الگوی مشابهی از بهبود مشاهده می‌شود. سطوح با پره‌های دوزنقه‌ای ۱ میلی‌متری در دمای سوپرهیت ۱۰ درجه شار حرارتی بهبود یافته‌ای در حدود ۲۸۵ کیلووات بر متر مربع نشان می‌دهند و در دمای سوپرهیت ۱۷/۵ درجه به حدود ۵۹۰ کیلووات بر متر مربع می‌رسد. پره‌های دوزنقه‌ای ۲ میلی‌متری بیشترین بهبود را نشان می‌دهند؛ به طوری که شار حرارتی از حدود ۳۲۵ کیلووات بر متر مربع در دمای سوپرهیت ۱۰ درجه شروع شده و به حدود ۷۵۱ کیلووات بر متر مربع در دمای سوپرهیت ۱۷/۵ درجه می‌رسد.

عملکرد برتر پره‌های دوزنقه‌ای به هندسه بهینه آن‌ها نسبت داده می‌شود که نه تنها سطح بیشتری را فراهم می‌کند؛ بلکه توزیع نقاط هسته‌زایی را بهبود می‌بخشد و منجر به انتقال حرارت بهتر در هنگام جوشش می‌شود. این یافته‌ها بر نقش حیاتی ارتفاع و هندسه پره در بهینه‌سازی شار حرارتی در جوشش هسته‌ای تأکید می‌کنند و بینش‌های ارزشمندی برای طراحی سیستم‌های پیشرفته مدیریت حرارتی ارائه می‌دهند. داده‌ها نشان می‌دهند که هر دو نوع پره‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای عملکرد جوشش را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشند؛ به طوری که پره‌های ۲ میلی‌متری همواره از پره‌های ۱ میلی‌متری عملکرد بهتری دارند.

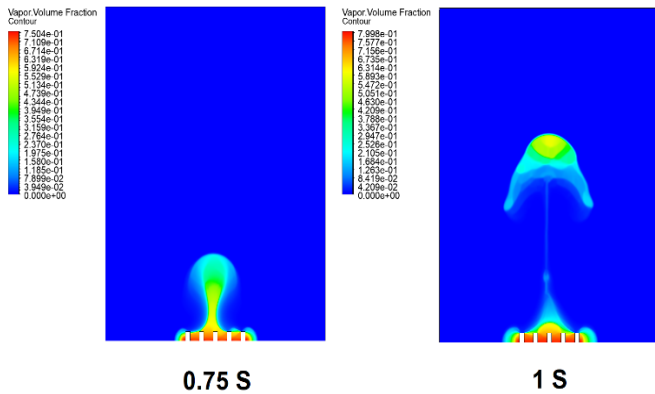
۴-۴- دینامیک حباب و کسر بخار

علاوه بر منحنی‌های جوشش ارائه شده در شکل‌های (۳) تا (۶)، با تحلیل تکامل زمانی-مکانی کسر بخار و دینامیک حباب‌ها بر روی سطح گرم‌شده می‌توان به درک عمیق‌تری از مکانیسم‌های انتقال حرارت دست یافت. این بخش به بررسی دقیق این مسئله برای سطوح صاف و سطوح دارای پره می‌پردازد. تجزیه و تحلیل توزیع کسر بخار می‌تواند بینش‌هایی ارزشمندی در خصوص مناطق فعال جوشش و میزان سطح اشغال شده توسط حباب‌های بخار ارائه دهد. همچنین، بررسی فرآیندهای هسته‌زایی، رشد، جدا شدن و تعامل حباب‌ها می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره تأثیر هندسه پره‌ها بر فرآیند جوشش فراهم آورد.

صعودی آن است. در نهایت، در زمان ۱ ثانیه، خطوط هم‌تراز بخار نشان‌دهنده یک ستون بخار کاملاً تعریف شده و مرتفع با هسته‌ای متمرکز است که رفتار دینامیکی بخار و الگوی پخش پایدار را نشان می‌دهد. این تحلیل زمانی خطوط هم‌تراز بخار بر ماهیت پیشرونده پراکندگی بخار روی سطح صاف تأکید کرده و مراحل حیاتی در توسعه ستون‌های بخار را برجسته می‌کند.

۴-۶- سطوح پره‌دار

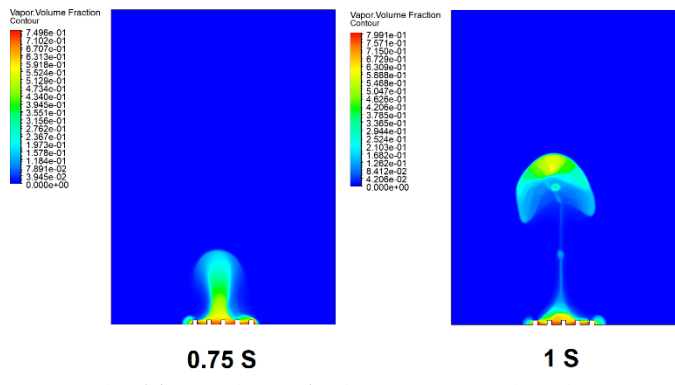
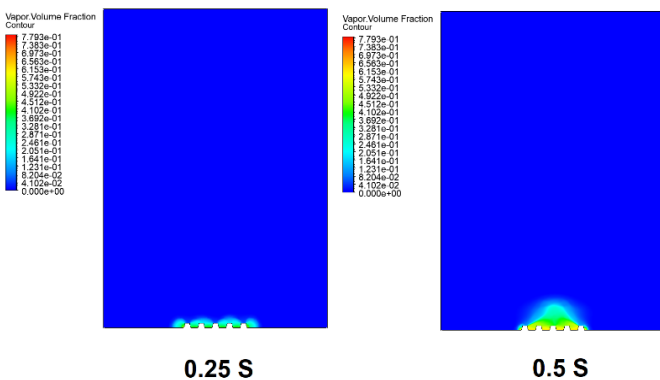
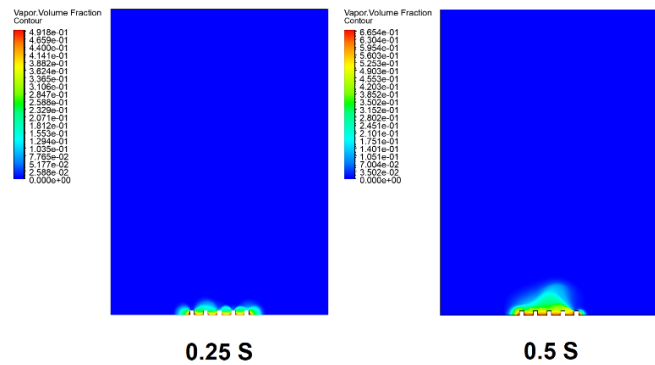
این مطالعه به بررسی تأثیر هندسه پرها به‌ویژه اشکال مستطیلی و دوزنقه‌ای بر کسری بخار و دینامیک حباب‌ها در جوشش استخری هسته‌ای در دمای ثابت ۱۱۰ درجه سانتی-گراد می‌پردازد.



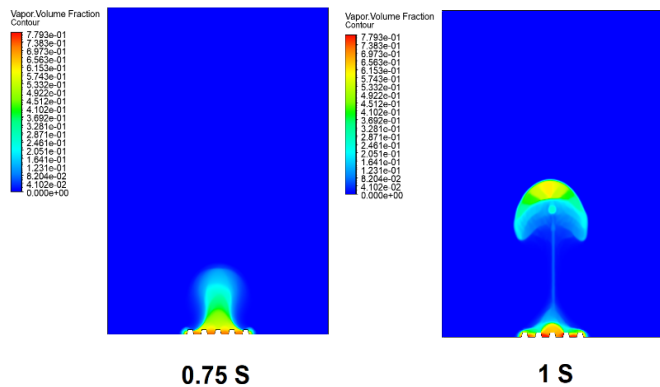
شکل ۱۰ کانتورهای کسر حجمی بخار برای پره‌های مستطیلی با ارتفاع ۲ میلی‌متر در بازه‌های زمانی مختلف

شکل‌های (۹) الی (۱۲) به ترتیب نتایج مربوط به پره‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای با ارتفاع‌های مختلف را در دمای ثابت ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد ارائه می‌دهند. ارتفاع پره نقش بسیار مهمی در تشکیل و رشد حباب‌های بخار دارد.

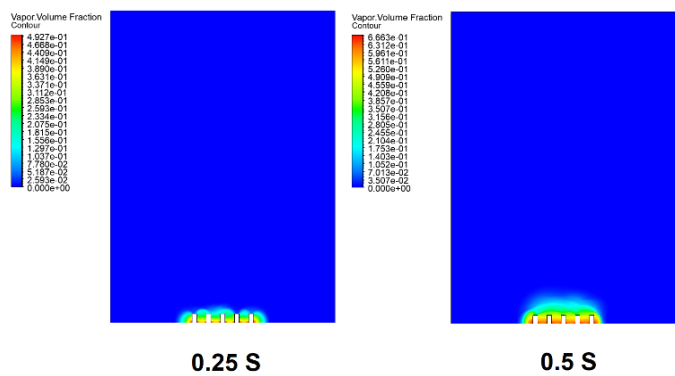
پره‌های بلندتر (شکل‌های (۱۰) و (۱۲)) سطح بیشتری برای جوانه‌زنی حباب‌ها فراهم می‌کنند که منجر به افزایش کسری بخار کلی در مقایسه با پره‌های کوتاه‌تر (شکل‌های (۹) و (۱۱)) می‌شود. این افزایش سطح تماس موجب ایجاد سایت‌های فعال‌تر برای جوانه‌زنی شده و تولید و رهاسازی تعداد بیشتری از حباب‌های بخار را تسهیل می‌کند.



شکل ۹ کانتورهای کسر حجمی بخار برای پره‌های مستطیلی با ارتفاع ۱ میلی‌متر در بازه‌های زمانی مختلف



شکل ۱۱ کانتورهای کسر حجمی بخار برای پره‌های دوزنقه‌ای با ارتفاع ۱ میلی‌متر در بازه‌های زمانی مختلف



می‌کند. انتقال حرارت بهبود یافته ناشی از استفاده از پره‌های دوزنقه‌ای می‌تواند به طراحی مبدل‌های حرارتی کارآمدتر و کوچکتری منجر شود که در نتیجه هزینه‌های عملیاتی را کاهش و قابلیت اطمینان سیستم را افزایش می‌دهد. یافته‌های کلیدی عبارتند از:

- نتایج عددی به‌دست‌آمده با استفاده از روش VOF با داده‌های تجربی موجود تطابق خوبی داشتند و دقت و قابلیت پیش‌بینی مدل محاسباتی را تأیید کردند. انحراف بین شار حرارتی عددی و تجربی نشان‌دهنده قابلیت اطمینان روش عددی در ثبت پدیده‌های پیچیده جوشش است.

- سطوح پره‌دار، مستطیلی و دوزنقه‌ای، به‌طور قابل توجهی در مقایسه با سطح صاف، بهبود قابل ملاحظه‌ای در انتقال حرارت نشان می‌دهند. سطح دارای پره‌های دوزنقه‌ای بهترین عملکرد را دارد و افزایش شار حرارتی تا ۲۱۰ درصد نسبت به سطح صاف را به نمایش می‌گذارد.

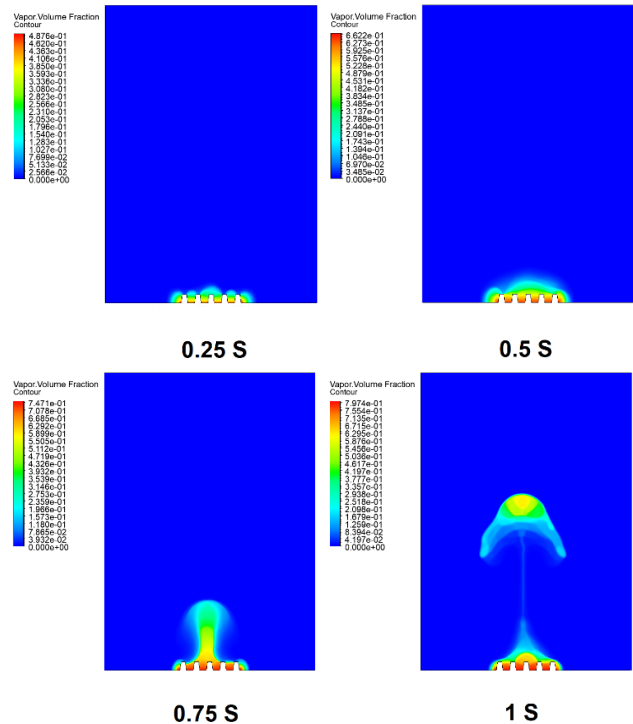
- برای سطح دارای پره‌های مستطیلی، افزایش ارتفاع پره از ۱ میلی‌متر به ۲ میلی‌متر منجر به افزایش ۴۲ درصدی شار حرارتی می‌شود.

- برای سطح دارای پره‌های دوزنقه‌ای، افزایش ارتفاع پره از ۱ میلی‌متر به ۲ میلی‌متر منجر به افزایش ۲۸ درصدی شار حرارتی شد.

- روش حجم سیال بینش‌های ارزشمندی در مورد دینامیک حباب‌ها، از جمله تولید، گسترش و جدا شدن حباب‌ها فراهم می‌کند که برای درک و بهینه‌سازی انتقال حرارت جوشش هسته‌ای حائز اهمیت است.

- نتایج نشان می‌دهد که روش حجم سیال در پیش‌بینی دینامیک تشکیل و جدا شدن حباب‌ها با استفاده از پارامترهای مشخص، به‌خوبی با داده‌های تجربی مطابقت دارد. این به این معنی است که قابلیت‌های ردیابی برتر فصل مشترک دو فاز در روش حجم سیال برای شبیه‌سازی پدیده‌های جوشش در مخازن حیاتی است.

تحقیقات آینده باید به بررسی تعامل اصلاحات هندسی بیشتر و خواص سیال بپردازد تا سطوح انتقال حرارت را بیشتر بهینه‌سازی کند. بررسی تأثیر پوشش‌های سطحی، نانو ساختارها و مواد پیشرفته می‌تواند بینش‌های بیشتری در راستای حداکثر کردن نرخ‌های انتقال حرارت ارائه دهد. علاوه بر این، گسترش مطالعه به شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی و اعتبارسنجی تجربی، درک پدیده‌های جوشش هسته‌ای را تقویت کرده و راهنمایی برای توسعه فناوری‌های انتقال حرارت نسل آینده فراهم خواهد کرد.



شکل ۱۲ کانتورهای کسر حجمی بخار برای پره‌های دوزنقه‌ای با ارتفاع ۲ میلی‌متر در بازه‌های زمانی مختلف

همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، حباب‌ها پس از جوانه‌زنی روی سطح گرم‌کننده رشد کرده و به تدریج با نزدیک شدن به یکدیگر ترکیب شده و یک حباب بزرگ‌تر تشکیل می‌دهند. حباب غالب پس از جدایش از سطح به سمت بالای میدان حرکت می‌کند که نشان‌دهنده روند تدریجی رشد، ترکیب و جدایش طبیعی در فرآیند جوشش هسته‌ای است.

۵- نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان داده است که هندسه سطح نقش مهمی در بهبود انتقال حرارت جوشش هسته‌ای در مخازن ایفا می‌کند. از طریق تحلیل مقایسه‌ای سطوح صاف، سطوح دارای پره‌های مستطیلی و سطوح دارای پره‌های دوزنقه‌ای، مشاهده می‌شود که سطوح پره‌دار به‌ویژه دوزنقه‌ای، به‌طور قابل توجهی کارایی انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. پره‌های دوزنقه‌ای در مقایسه با پره‌های مستطیلی در فرآیند تشکیل، رشد و جدا شدن حباب‌ها عملکرد بهتری دارند که منجر به یک فرآیند دفع حرارت کارآمدتر می‌شود.

این یافته‌ها پتانسیل بهینه‌سازی هندسه‌های سطح و انتخاب روش‌های عددی مناسب را برای بهبود عملکرد حرارتی در کاربردهای صنعتی مختلف، از جمله تولید برق، سیستم‌های خنک‌کننده و مدیریت حرارت دستگاه‌های الکترونیکی تأکید

۶- فهرست علائم و اختصارات

- International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 146, p. 118726, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118726>.
- [5] H. Jiang, N. Xu, D. Wang, X. Yu, and H. Chu, "Experimental investigation of the effect of cylindrical array structure on heat transfer performance during nucleate boiling," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 174, p. 121319, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121319>.
- [6] P. Karki, D. A. Perumal, and A. K. Yadav, "Comparative studies on air, water and nanofluids based Rayleigh–Benard natural convection using lattice Boltzmann method: CFD and exergy analysis," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 147, no. 2, pp. 1487-1503, 2022, <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10496-2>.
- [7] G. Narendran, N. Gnanasekaran, D. A. Perumal, M. Sreejesh, and H. Nagaraja, "Integrated microchannel cooling for densely packed electronic components using vanadium pentoxide (V₂O₅)-xerogel nanoplatelets-based nanofluids," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 148, no. 6, pp. 2547-2565, 2023, <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11925-0>.
- [8] B. Dikici and B. Q. Al-Sukaini, "Comparisons of Structured Surface Floors for Pool Boiling Enhancement at Low Heat Fluxes: Hands-On Learning Setup for Heat Transfer Classroom," *World Journal of Engineering and Technology*, vol. 11, no. 2, pp. 303-318, 2023, <https://doi.org/10.4236/wjet.2023.112022>.
- [9] N. Rahul, S. Kalita, P. Sen, B. Shil, and D. Sen, "Enhanced pool boiling heat transfer characteristics on microstructured copper surfaces coated with hybrid nanofluid," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, pp. 1-13, 2024, <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13033-7>.
- [10] B. Dong, Y. Zhang, X. Zhou, C. Chen, and W. Li, "Numerical simulation of bubble dynamics in subcooled boiling along inclined structured surface," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, vol. 35, no. 1, pp. 16-27, 2021, <https://doi.org/10.2514/1.T5906>.
- [11] Y. Huang, Y. Tian, W. Ye, W. Li, J. Lei, and Y. Zhang, "Enhancing Pool Boiling Heat Transfer by Structured Surfaces—A Lattice Boltzmann Study," *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 15, no. 1, pp. 139-151, 2021, <https://doi.org/10.47176/jafm.15.01.32731>.
- علائم انگلیسی
- C_p گرمای ویژه (kJ/kg.K)
- E انرژی مخصوص (J/kg)
- F_{csf} نیروی کشش سطحی (N)
- g شتاب گرانشی (m/s^2)
- h_{fg} گرمای نهان (J/kg)
- h ضریب انتقال حرارت ($W/m^2 \cdot K$)
- k رسانش گرمایی ($W/m \cdot K$)
- L ضریب آسایش در مدل لی (s^{-1})
- P فشار (Pa)
- S_e ترم منبع انرژی حجمی ($J/m^3 \cdot s$)
- S_m ترم منبع جرمی حجمی ($kg/m^3 \cdot s$)
- t زمان (s)
- T دما (K)
- u سرعت (m/s)
- علائم یونانی
- α کسر حجمی
- μ ویسکوزیته (Pa·s)
- ρ چگالی (kg/m^3)
- σ ضریب کشش سطحی (N/m)
- ∇ گرادیان
- ∂ مشتق جزئی
- زیرنویس‌ها
- l مایع
- sat اشباع
- v بخار
- w دیواره
- ۷- مراجع
- [1] V. Dhir, "Boiling heat transfer," *Annual review of fluid mechanics*, vol. 30, no. 1, pp. 365-401, 1998, <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.30.1.365>.
- [2] H. Jo, H. S. Park, and M. H. Kim, "Single bubble dynamics on hydrophobic–hydrophilic mixed surfaces," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 93, pp. 554-565, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.031>.
- [3] V. K. Dhir, G. R. Warrier, and E. Aktinol, "Numerical simulation of pool boiling: a review," *Journal of Heat Transfer*, vol. 135, no. 6, p. 061502, 2013, <https://doi.org/10.1115/1.4023576>.
- [4] J. Shi, X. Jia, D. Feng, Z. Chen, and C. Dang, "Wettability effect on pool boiling heat transfer using a multiscale copper foam surface,"

- [21] W. H. Lee, "A pressure iteration scheme for two-phase flow modeling," *Multiphase transport fundamentals, reactor safety, applications*, vol. 1, pp. 407-431, 1980, <https://codethatflows.wordpress.com/wp-content/uploads/2021/08/406441216-lee-model-pdf-1.pdf>.
- [22] A. Alizadehdakhel, M. Rahimi, and A. A. Alsairafi, "CFD modeling of flow and heat transfer in a thermosyphon," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 37, no. 3, pp. 312-318, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.09.002>.
- [23] S. C. De Schepper, G. J. Heynderickx, and G. B. Marin, "Modeling the evaporation of a hydrocarbon feedstock in the convection section of a steam cracker," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 33, no. 1, pp. 122-132, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2008.07.013>.
- [24] H. Wu, X. Peng, P. Ye, and Y. E. Gong, "Simulation of refrigerant flow boiling in serpentine tubes," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 50, no. 5-6, pp. 1186-1195, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.10.013>.
- [25] H. Alimoradi, S. Zaboli, and M. Shams, "Numerical simulation of surface vibration effects on improvement of pool boiling heat transfer characteristics of nanofluid," *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 39, no. 1, pp. 69-85, 2022, <https://doi.org/10.1007/s11814-021-0895-0>.
- [26] V. P. Carey, *Liquid-vapor phase-change phenomena: an introduction to the thermophysics of vaporization and condensation processes in heat transfer equipment*. CRC Press, 2020, <https://doi.org/10.1201/9780429082221>.
- [27] W. Rohsenow, J. Hartnett, and T. Cho, "Handbook of Heat Transfer McGraw Hill," *New York*, 1973.
- [28] M. Colombo and M. Fairweather, "Multiphase turbulence in bubbly flows: RANS simulations," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 77, pp. 222-243, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.09.003>.
- [29] S. Ramezani and S. Talebi, "Numerical Simulation of Pool Boiling on a Horizontal Grooved Surface," *Scientific Journal of the Iranian Society of Mechanical Engineers*, vol. 24, no. 2, pp. 77-91, 2022 [in persian], <https://doi.org/10.30506/ijmep.2022.543011.1835>.
- [12] I. Pranoto, M. A. Rahman, C. D. Wicaksana, A. E. Wibisono, Fauzun, and A. Widyatama, "Flow Boiling Heat Transfer Performance and Boiling Phenomena on Various Straight Fin Configurations," *Fluids*, vol. 8, no. 3, p. 102, 2023, <https://doi.org/10.3390/fluids8030102>.
- [13] C. Falsetti, J. Chetwynd-Chatwin, and E. J. Walsh, "Performance of pin-fin structures on pool boiling heat transfer," *International Journal of Thermofluids*, vol. 23, p. 100784, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100784>.
- [14] J. U. Brackbill, D. B. Kothe, and C. Zemach, "A continuum method for modeling surface tension," *Journal of computational physics*, vol. 100, no. 2, pp. 335-354, 1992, [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(92\)90240-Y](https://doi.org/10.1016/0021-9991(92)90240-Y).
- [15] R. P. Fedkiw, T. Aslam, B. Merriman, and S. Osher, "A non-oscillatory Eulerian approach to interfaces in multimaterial flows (the ghost fluid method)," *Journal of computational physics*, vol. 152, no. 2, pp. 457-492, 1999, <https://doi.org/10.1006/jcph.1999.6236>.
- [16] H. Wang, Q. Lou, H. Liang, and L. Li, "Numerical simulation of bubble dynamics and heat transfer in the 2D saturated pool boiling from a circular surface," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 170, p. 107098, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107098>.
- [17] Z. A. Khan, N. Ahmad, M. Sattar, M. A. Haq, I. Khan, and A. H. Ganie, "Cell alternation algorithm for simulating bubble growth in boiling flows through volume of fluid (VOF) method in fluent," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 12, pp. 13051-13066, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.06.059>.
- [18] R. Jaswal, A. Sathyabhama, K. Singh, and A. P. Yandapalli, "Experimental and numerical investigation of pool boiling heat transfer from finned surfaces," *Applied Thermal Engineering*, vol. 233, p. 121167, (2023), <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121167>.
- [19] K. Jagannath, A. Kotian, S. Sharma, A. Kini, and P. Prabhu, "Investigation of Bubble Growth during Nucleate Boiling Using CFD," *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, vol. 9, no. 6, pp. 988-992, 2015, <https://doi.org/10.5281/zenodo.1107353>.
- [20] A. Fluent, "Ansys fluent theory guide," *Ansys Inc., USA*, vol. 15317, pp. 724-746, 2011.

[31] G. H. Yeoh and J. Tu, "Computational techniques for multiphase flows," 2019, <https://doi.org/10.1016/C2017-0-01655-5>.

[30] G. S. Kell, "Density, thermal expansivity, and compressibility of liquid water from 0.deg. to 150.deg.. Correlations and tables for atmospheric pressure and saturation reviewed and expressed on 1968 temperature scale," *Journal of Chemical & Engineering Data*, vol. 20, no. 1, pp. 97-105, 2002, <https://doi.org/10.1021/jc60064a005>.