



شبیه‌سازی جوشش استخری روی یک صفحه عمودی دارای شیار مثلثی و دایره‌ای

شهرام طالبی*، نازیلا ماکولاتی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰
بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۱۰
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۱۰/۱۲

کلمات کلیدی:

جوشش استخری
صفحه عمودی
شیار مثلثی
شیار دایره‌ای
روش حجم سیال

خلاصه: امروزه از انتقال حرارت جوشش استخری در بسیاری از تجهیزات صنعتی استفاده می‌شود. انتقال حرارت جوشش استخری در مقایسه با انتقال حرارت تکفازی، به دلیل استفاده از ظرفیت گرمایی نهان تبخیر، ظرفیت انتقال حرارت بیشتری دارند. در این مقاله به بررسی انتقال حرارت جوشش استخری روی صفحه عمودی صاف و شیاردار مثلثی و دایره‌ای با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی پرداخته شده است. در مطالعات انجام شده اثر افزودن دو نوع شیار مثلثی و دو نوع شیار دایره‌ای و نیز چهار دمای سطح گرمایش بررسی شده است. به منظور مدل‌سازی جریان دوفازی از روش حجم سیال استفاده و معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود حل شده است. نتایج نشان داده است که اضافه کردن شیارهای مثلثی و دایره‌ای روی سطح گرمایش منجر به افزایش متوسط شار حرارتی خواهد شد. در حالت سطح شیاردار مثلثی، مقدار شار حرارتی متوسط وارد شده به مایع آب بین ۱۲۸٪ تا ۱۷۷٪ افزایش پیدا کرده است. با ایجاد شیار دایره‌ای، در نهایت مقدار شار حرارتی متوسط به مقدار ۶۹٪ تا ۱۰۵٪ افزایش داشته است. همچنین مقدار بخار آب نیز در حالت سطح شیاردار مثلثی ۱۶۰٪ تا ۳۴۰٪ و در حالت سطح شیاردار دایره‌ای بین ۱۰۱٪ تا ۱۵۵٪ افزایش داشته است.

۱- مقدمه

فرایند جوشش یکی از مؤثرترین روشهای انتقال گرما بین یک سطح و سیال در تماس با آن است. در واقع، تبخیر در فصل مشترک جامد و مایع را جوشش می‌گویند. جوشش وقتی روی می‌دهد که دمای سطح از دمای اشباع متناظر با فشار مایع بیشتر شود. در این فرایند گرما از سطح جامد به مایع منتقل شده و فرایند جوشش، با تشکیل حباب‌های بخار که رشد می‌کنند و پشت سر هم از سطح جدا می‌شوند، مشخص می‌شود. در پدیده جوشش حضور حباب‌های بخار آب، مایع آب در حال جوشش و نیز سطح جامد حرارت دهنده، به عنوان سه فاز مختلف موجب پیچیدگی این فرایند می‌شود. این فرایند به دلیل دارا بودن ضریب انتقال حرارت بیشتر، نسبت به سایر مکانیزم‌های انتقال حرارت، از اهمیت بسیار زیادی در صنعت برخوردار است. در میان انواع جوشش، فرایند جوشش استخری به دلیل کاربردهای فراوان آن در صنعت و عدم استفاده از نیروی خارجی، توجه پژوهشگران را به شناخت روش‌های بهبود انتقال حرارت جوشش استخری جلب کرده

است. جوشش استخری در نیمه دوم قرن بیستم مورد مطالعه قرار گرفت و برای نخستین بار نوکیاما [۱] به صورت تجربی رژیم‌های مختلف جوشش استخری را تشخیص داده است.

در ادامه برخی از محققین بر روی اثر تغییر جهت‌گیری سطح بر جوشش استخری را مورد مطالعه قرار دادند. نیشیکاوا و همکاران [۲] اثرات جهت‌گیری سطح را بر روی انتقال حرارت جوششی در فرایند جوشش استخری آب در فشار اتمسفر و روی یک صفحه صاف مسی بررسی کرده‌اند. نتایج آنها به خوبی نشان داده که اثر جهت‌گیری سطح در ناحیه شار حرارتی کم قابل توجه است به نحوی که با افزایش زاویه شیب سطح، انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد. برعکس جهت قرارگیری سطح مسی هیچ اثر مشخصی در ناحیه شار حرارتی زیاد نداشته است. چانگ و یو [۳] به منظور بررسی اثرات جهت‌گیری سطح بدون پوشش و پوشش داده شده بر روی شار حرارتی بحرانی^۱ و انتقال حرارت جوششی FC-۷۲ اشباع، مطالعه آزمایشگاهی انجام داده‌اند. نتایج آنها نشان داده است که زوایای شیب زیادتر (زمانی که سطح مورد بررسی از ۰ درجه به ۹۰ درجه می‌چرخد)، انتقال حرارت بهتری را در رژیم

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: talebi_s@yazd.ac.ir

1 Critical heat flux

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



تماس سه فاز^۱ بیشترین شار حرارتی وجود داشته است و با افزایش اندازه نواحی آب‌گریز، شار حرارتی افزایش پیدا کرده است. نصیری و همکاران [۱۰] در مطالعه آزمایشگاهی به بررسی اثر استفاده از سطح شیاردار بر جوش استخری نانوسیال گاما اکسید آهن-آب تحت میدان مغناطیسی پرداخته‌اند. غلظت نانوسیال گاما اکسید آهن-آب مورد بررسی در این مطالعه ۰/۱ درصد بوده است. نتایج به دست آمده نشان داده است که ضریب انتقال حرارت آب نسبت به سطح بدون شیار در سطوح شیاردار مستطیلی و دایره‌ای افزایش و در مثلی کاهش یافته است. اما با استفاده از نانوسیال، ضریب انتقال حرارت سطح شیاردار دایره‌ای افزایش و در سطوح مثلی و مستطیلی کاهش پیدا کرده است. جامی‌الاحمدی و همکاران [۱۱] به صورت آزمایشگاهی به اندازه‌گیری شار حرارتی بحرانی نانوسیال اکسید مس روی سطح تخت مسی پرداخته‌اند. نتایج مطالعات آزمایشگاهی نشان داده شار حرارتی بحرانی با افزایش غلظت نانوسیال اکسید مس تا ۹۲٪ نسبت به آب افزایش پیدا کرده است. همچنین بررسی خواص سطوح جوش پس از انجام آزمایش‌ها نشان داده است که زبری اثر مثبت و افزایش ضخامت اثر منفی بر افزایش شار حرارتی بحرانی داشته است.

با توجه به پیچیدگی‌های پدیده جوش، مطالعات عددی کمی روی این موضوع انجام شده است. حسینی و کوهی کمالی [۱۲] اثر انواع سطوح بر دینامیک تشکیل حباب در جوش هسته‌ای سطح را به صورت عددی و دوبعدی بررسی کرده‌اند. در این مطالعه از روش بازسازی مرز مشترک برای بهبود کیفیت مرز استفاده شده است. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی نشان داده جوش بر روی سطوح آب‌گریز سبب جدایی حباب با ابعاد بزرگ‌تر و در نتیجه انتقال حرارت بیشتر شده است. همچنین نتایج نشان داده مدل مورد استفاده در این مطالعه به دلیل دقت بالاتر و عدم تولید حباب‌های اضافی، برای مدل‌سازی جوش مدل مناسب‌تری بوده است. حسینی و کوهی کمالی [۱۳] به صورت دوبعدی به شبیه‌سازی جوش هسته‌ای استخری پرداخته‌اند و مکانیزم‌های تغییر فاز در شار حرارتی کم را بررسی کرده‌اند. در این مطالعه جوش هسته‌ای میرد $R=245fa$ در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و تحت شارهای حرارتی مختلف ۱۸ تا ۲۷ کیلووات بر مترمربع انجام شده است. نویسندگان اظهار داشته‌اند نتایج عددی به دست آمده با نتایج تجربی موجود تطابق خوبی داشته است. همچنین در این پژوهش، نحوه حباب‌زایی و کنده شدن حباب از دیوار و چگونگی حرکت حباب و جریان اطراف آن در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

جوش هسته‌ای فراهم کرده است. هو و همکاران [۴] به طور تجربی تأثیر جهت‌گیری سطح را بر روی انتقال حرارت جوشی و شار حرارتی بحرانی بررسی نموده‌اند. نتایج به دست آمده توسط این پژوهشگران نشان داده است که انتقال حرارت برای سطح با جهت‌گیری بین ۰ تا ۹۰ درجه بهبود یافته اما بین زوایای ۹۰ و ۱۸۰ درجه سطح صاف، انتقال حرارت کاهش داشته است. جانگ و کیم [۵] اثرات جهت‌گیری سطح را بر شار حرارتی جوشی دیواره و پارامترهای حباب در جوش استخری مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها گزارش کرده‌اند که شار حرارتی با افزایش زاویه قرارگیری سطح گرمایش افزایش یافته است. قیطقی و همکاران [۶] اثرات سطوح افقی، با شیب ۴۵ درجه و عمودی را بر عملکرد انتقال حرارت در جوش استخری بررسی کرده‌اند. این نویسندگان اظهار نموده‌اند که سطح گرمایش عمودی زیادترین مقدار شار حرارتی بحرانی را دارد که این مقدار تا ۱۷۰٪ در مقایسه با سطح افقی افزایش داشته است. این افزایش به دلیل دینامیک حباب، ناحیه انتقال حرارت و لغزش حباب بوده است. جانگ و همکاران [۷] اثرات جهت‌گیری سطح بر انتقال حرارت جوش استخری، دینامیک حباب و شار حرارتی دیواره را به طور تجربی مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج به دست آمده از این مطالعه نشان داده است که بر اساس منحنی‌های جوش اندازه‌گیری شده در زوایای مختلف، انتقال حرارت جوش با افزایش جهت سطح گرمایش از ۰ به ۹۰ درجه، افزایش یافته است. این اثر افزایشی در ناحیه شار حرارتی کمتر آشکار بوده و در ناحیه شار حرارتی بالاتر ناچیز گزارش شده است.

محققین دیگری نیز به بررسی اثر خواص سطح گرمایش بر مشخصات جوش استخری پرداخته‌اند. لی و سون [۸] شبیه‌سازی عددی جوش هسته‌ای را روی صفحات افقی با شیار تک حفره و شیار چند حفره بررسی کرده‌اند. هندسه مورد بررسی در این مطالعه به صورت دوبعدی شبیه‌سازی شده است. نتایج این مطالعه نشان داده است پیکربندی سطح با یک شیار بیرونی پیرامون یک حفره برای افزایش انتقال حرارت جوش مناسب نیست. همچنین نتایج حل عددی نشان داده که سطح با چند حفره در مقایسه با یک شیار بیرونی پیرامون یک حفره برای بهبود انتقال حرارت جوش و نرخ رشد حباب مؤثرتر است. گانگ و همکاران [۹] شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت جوش استخری را روی سطوح صاف دارای نواحی آب‌گریز بررسی کرده‌اند. در این مطالعه نیز شبیه‌سازی‌های عددی به صورت دوبعدی انجام گرفته است. نویسندگان در این مطالعه معادلات را به صورت بی‌بعد بررسی و یک ساختار ۶۰۰ در ۶۰۰ پیکسل در نظر گرفته‌اند و از روش تغییر فاز بولتزمن استفاده نموده‌اند. نتایج نشان داده است که در منطقه خط

همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است، در هندسه مورد بررسی سطح گرمایش به طول ۴ سانتیمتر به صورت عمودی در دیواره سمت چپ محفظه قرار گرفته است. همچنین ارتفاع مایع آب در مدل شبیه‌سازی شده ۱۶ سانتی‌متر و بالای مایع آب، بخار آب خالص بوده است. به منظور بررسی اثر ایجاد شیار مثلثی روی سطح گرمایش، دو نوع شیار مثلثی و دایره‌ای با ابعاد مختلف روی آن ایجاد شده و اثر آن بر شار حرارتی بحرانی و حرکت حباب بررسی شده است. ایجاد این شیارها با الهام از مطالعه نصیری و همکاران روی سطح گرمایش در جوشش استخری ایجاد شده است [۱۰]. در شکل‌های ۲ و ۳، ابعاد شیارهای مثلثی و دایره‌ای ایجاد شده روی سطح گرمایش نمایش داده شده است.

با توجه به ابعاد سطح گرمایش و نیز ابعاد شیارهای ایجاد شده روی آن، تعداد شیارها در هر دو حالت شیار مثلثی و حالت اول شیار دایره‌ای برابر با ۱۰ عدد بوده است اما در حالت دوم شیار دایره‌ای، تعداد شیارها ۱۳ عدد بوده است.

جهت شبکه‌بندی میدان حل از ترکیب شبکه سازمان یافته (در فواصل دور از سطح گرمایش) و غیر سازمان یافته در نزدیکی سطح عمودی گرمایش شیاردار استفاده شده است. شبکه‌بندی انجام شده به نحوی بوده است که ابعاد المان‌های مورد استفاده در نزدیکی سطح گرمایش ریزتر قرار داده شده است چرا که به دلیل وجود گرادیان‌های دمایی بالا، باید وقوع پدیده جوشش، تشکیل، رشد و رهایی حباب، به خوبی در این ناحیه دیده شود. همچنین در فواصل دورتر از سطح گرمایش ابعاد المان‌ها بزرگتر در نظر گرفته شده است. در شکل شماره ۴، چگونگی شبکه‌بندی سطح عمودی شیاردار دایره‌ای نوع دوم نمایش داده شده است.

۲-۲- شرایط مرزی

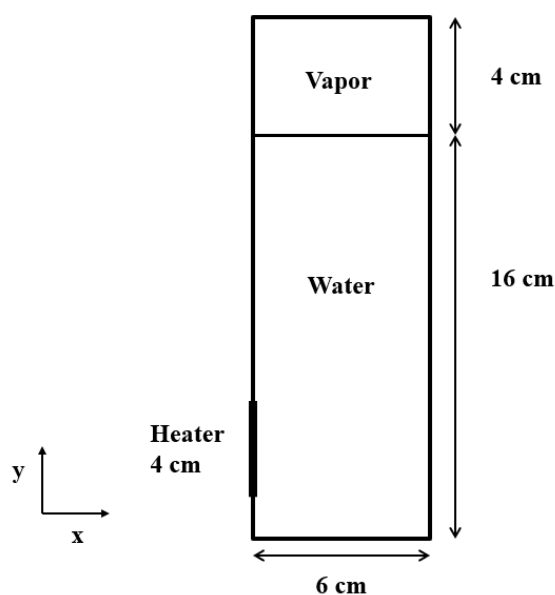
در شبیه‌سازی‌های عددی دو بعدی، هندسه مورد نظر در ابتدا پر از آب با دمای ۳۷۳/۱۵ کلوین و بدون حرکت در نظر گرفته شده است. از آنجایی که در سیستم آزمایشگاهی، بخار امکان خروج داشته است لذا در مرز بالایی هندسه، شرط مرزی خروجی فشار یک اتمسفر قرار داده شده است. در قسمت سطح گرمایش (صاف، دارای شیار مثلثی و نیز شیار دایره‌ای) نیز دیوار با دمای ثابت برابر با ۳۷۸/۱۵، ۳۸۳/۱۵، ۳۸۸/۱۵ و ۳۹۳/۱۵ کلوین در نظر گرفته شده است. همچنین شرط عدم لغزش نیز بر روی این دیواره‌ها قرار داده شده است. مرز پایین و سمت راست محفظه نیز به صورت مرز باز با فشار ثابت در نظر گرفته شده است.

در این مقاله به بررسی اثر ایجاد شیار مثلثی و دایره‌ای روی سطح عمودی گرمایش در جوشش استخری پرداخته شده است. با توجه به مطالعات قبلی می‌توان گفت تمرکز مطالعات انجام شده در این زمینه، به صورت آزمایشگاهی بوده و در این زمینه مطالعه عددی انجام نشده است و مطالعات عددی انجام شده نیز بر روی سطوح افقی بوده است. از این رو شبیه‌سازی عددی دو بعدی پدیده جوشش استخری روی سطح عمودی دارای شیارهای مختلف برای نخستین بار در این مطالعه بررسی شده است. در این راستا دو نوع شیار مثلثی و دایره‌ای با ابعاد مختلف روی سطح گرمایش ایجاد شده و اثر آن بر شار حرارتی بحرانی و رفتار حباب بررسی شده است. مطالعات عددی انجام شده بر روی آب در دمای اشباع انجام شده و دمای سطح گرمایش از ۳۷۸/۱۵ کلوین تا ۳۹۳/۱۵ کلوین بوده است.

۲- روش عددی

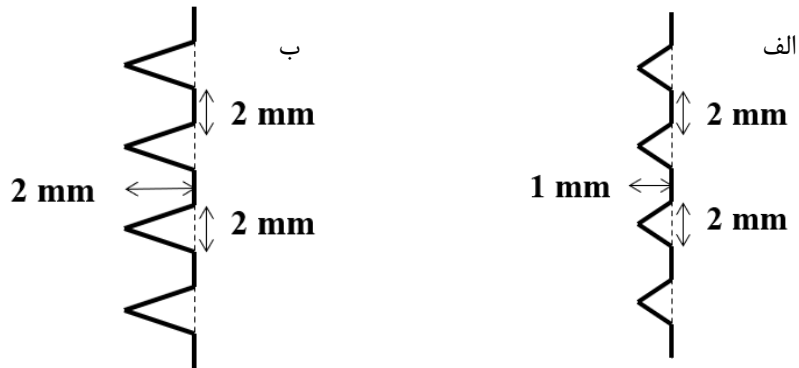
۲-۱- مدل‌سازی هندسی و شبکه‌بندی

در این مقاله به شبیه‌سازی عددی جوشش استخری صفحات عمودی شیاردار مثلثی و دایره‌ای، به صورت دوبعدی مطابق با هندسه ارائه شده در مطالعه چانگ و همکاران [۷] پرداخته شده است. هندسه این مسئله، دوبعدی و یک مستطیل با عرض ۶ سانتیمتر و ارتفاع ۲۰ سانتیمتر بوده که تصویر آن در شکل شماره ۱ نمایش داده شده است. شبیه‌سازی دوبعدی در حل جوشش استخری توسط پژوهشگران متعددی انجام شده است [۹ و ۱۲ و ۱۳].



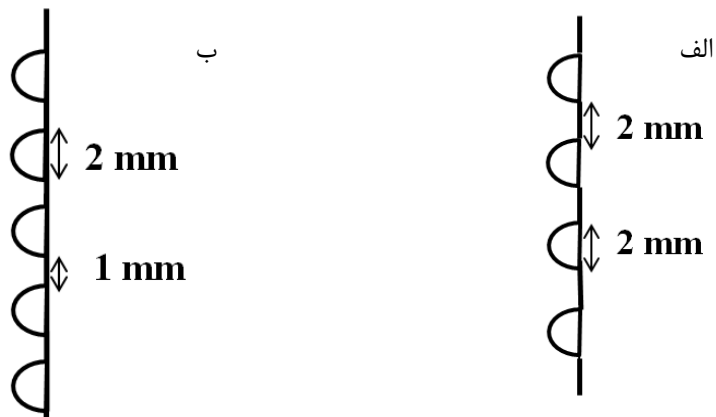
شکل ۱. هندسه مورد بررسی در این مقاله مطابق با مطالعه چانگ و همکاران [۷]

Fig. 1. The geometry investigated in this study according to the Chang et al. [7]



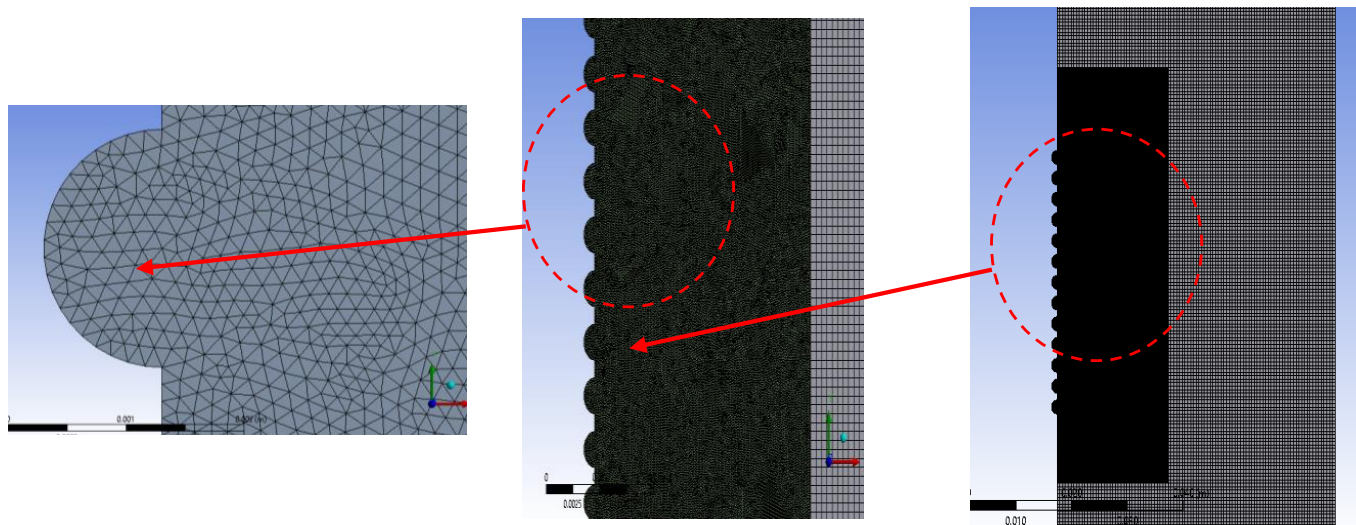
شکل ۲. ابعاد شیارهای مثلثی ایجاد شده روی سطح گرمایش، الف) نوع اول و ب) نوع دوم

Fig. 2. Triangular grooves dimensions created on the heating surface: A)Type 1, B)Type 2



شکل ۳. ابعاد شیارهای دایره‌ای ایجاد شده روی سطح گرمایش، الف) نوع اول و ب) نوع دوم

Fig. 3. Circular grooves dimensions created on the heating surface: A)Type 1, B)Type 2



شکل ۴. نحوه شبکه‌بندی هندسه دارای شیار دایره‌ای نوع دوم در مناطق مختلف میدان حل

Fig. 4. Meshing of the type 2 circular groove in different areas of the solution domain

همچنین S_f و S_g در معادلات (۱) و (۲) به ترتیب جملات چشمه جرمی فاز آب مایع و فاز بخار آب هستند که از تغییر فاز به دست آمده‌اند. در مدل حجم سیال یک معادله مومنتوم در دامنه حل شده و نتیجه به دست آمده برای میدان سرعت در فازهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. معادله مومنتوم با توجه به مقادیر چگالی و لزجت دینامیکی به کسر حجمی فازهای مختلف وابسته است. این معادله عبارت است از:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot [\mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4)$$

که در آن مقدار \vec{F} نیروی حجمی وارد شده در اثر نیروی کشش سطحی است که از رابطه ارائه شده توسط براکبیل و همکاران [۱۴] به دست می‌آید:

$$\vec{F} = \sigma \frac{\rho k \vec{n}}{\frac{1}{2}(\rho_f + \rho_g)} \quad (5)$$

که در آن σ ضریب کشش سطحی است. معادله انرژی که بین فازهای مختلف مشترک است، به صورت معادله (۶) است:

۲-۳- معادلات حاکم

مدل حجم سیال برای شبیه‌سازی جریان‌های دو فاز غیر مخلوط شونده استفاده و عموماً کاربرد آن برای شبیه‌سازی سطح اشتراک دو سیال است. به عبارتی دیگر، زمانی که هدف شبیه‌سازی، مطالعه بر روی سطح اشتراک دو سیال باشد، مدل حجم سیال کارایی خوبی خواهد داشت. در این مدل دو معادله پیوستگی برای فازهای آب مایع و بخار آب حل می‌شود. در نتیجه دو معادله پیوستگی برای فازهای آب مایع و بخار آب در معادلات (۱) و (۲) ارائه شده است [۱۲]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f) + \vec{\nabla} \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f) = S_f \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \vec{\nabla} \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) = S_g \quad (2)$$

که کسر حجمی آب مایع و بخار آب در این روابط α_f و α_g نشان داده شده است. معادله (۳) نیز به منظور ایجاد ارتباط بین کسر حجمی فازهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است:

$$\alpha_f + \alpha_g = 1 \quad (3)$$

جوششی استخری پرداخته شده است. از آنجایی که به دلیل تشکیل حباب و جدا شدن آنها از سطح، تمام کمیات در طی زمان شبیه‌سازی دارای نوساناتی بوده‌اند. دمای سطح گرمایش در شبیه‌سازی‌های عددی دمایی بیشتر از دمای جوشش مایع آب دارد و در حالات مختلف برابر با ۳۷۸/۱۵، ۳۸۳/۱۵، ۳۸۸/۱۵ و ۳۹۳/۱۵ کلوین بوده است. شتاب گرانش زمین نیز در جهت عمودی برابر با ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه در نظر گرفته شده است. در ابتدای زمان شبیه‌سازی هندسه نمایش داده شده در شکل ۱ از مایع آب و بخار آب با دمای ۳۷۳/۱۵ کلوین پر شده و فشار سیستم نیز یک اتمسفر بوده است. خواص مایع آب و بخار آب مورد استفاده در جدول ۱ ذکر شده است.

برای بررسی رفتار حرکتی حباب بخار آب در شبیه‌سازی‌های عددی از روش حجم سیال^۱ استفاده شده است. این مدل برای جریان‌های دوفازی کاربرد دارد که نیاز به تفکیک سطح تماس هر فاز باشد. جهت جوشش و انتقال جرم از مدل لی استفاده شده است [۱۱]. مطالعات انجام شده قبلی، نشان داده است که این مدل کارایی مناسبی در مدل‌سازی جوشش دارد [۱۲]. پس از انتخاب مدل حجم سیال به عنوان مدل چندفازی مورد استفاده، مایع آب به عنوان فاز مایع و بخار آب به عنوان فاز گاز در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. در نظر گرفتن کشش سطحی در حرکت بخار آب و به هم پیوستگی آنها مؤثر است و در مسیر حرکتی بخار آب از پایین مخزن به سمت بالای آن اثرگذار بوده و به همین دلیل باید در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است.

شبیه‌سازی‌ها تا زمانی ادامه پیدا کرده است که به پایداری برسد. به منظور کوپل کردن میدان‌های سرعت و فشار، از الگوریتم پیزو استفاده شده است. همچنین از روش غیرتکراری پیشرفت زمان برای کاهش هزینه محاسبات حل گذرا استفاده شده است. از این روش برای حل مسائل گذرا به منظور افزایش سرعت و کارایی محاسبات استفاده می‌شود. در شبیه‌سازی‌های عددی به منظور اطمینان از همگرایی حل، عدد کورانت برابر ۰/۵ قرار داده شده است. مقدار گام زمانی متغیر و بین 10^{-6} تا 10^{-5} ثانیه و با توجه به کنترل مقدار عدد کورانت تعیین شده است. مسلماً این گام زمانی باید به اندازه کافی کوچک باشد تا مراحل تشکیل، رشد و رهایی حباب به خوبی دیده شود. همچنین به منظور گسسته سازی معادله مومنتوم از روش مرتبه سوم موسکال^۲ و برای گسسته سازی فشار از روش وزنی نیروی حجمی می‌باشد که در مسائلی که شامل نیروی جاذبه هستند، به کار برده می‌شود. به منظور گسسته سازی معادله انرژی از روش بالادست مرتبه دوم استفاده شده است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \vec{\nabla} \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = S_e + \vec{\nabla} \cdot [k_{eff} \vec{\nabla} T] \quad (6)$$

در معادله انرژی، مقدار E انرژی واحد جرم سیال با واحد J/kg است و از رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$E = \frac{\alpha_f \rho_f E_f + \alpha_g \rho_g E_g}{\alpha_f \rho_f + \alpha_g \rho_g} \quad (7)$$

همچنین جمله S_e در معادله انرژی چشمه انرژی ناشی از تغییر فاز است و از رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$S_e = -\Gamma_v h_{fg} \quad (8)$$

که Γ_v به عنوان چشمه جرمی بخار آب تعریف می‌شود. چگالی هر سلول محاسباتی (که حاوی مقداری مایع و مقداری بخار است) در سطح تماس با استفاده از رابطه (۹) به دست می‌آید [۱۲]:

$$\rho = \alpha_g \rho_g + \alpha_f \rho_f \quad (9)$$

لزجت دینامیکی نیز مشابه با محاسبه چگالی با استفاده از رابطه (۱۰) به دست می‌آید [۱۲]:

$$\mu = \alpha_g \mu_g + \alpha_f \mu_f \quad (10)$$

ضریب هدایت حرارتی مؤثر نیز با استفاده از رابطه (۱۱) به دست می‌آید [۱۲]:

$$k_{eff} = \alpha_g k_g + \alpha_f k_f \quad (11)$$

۲-۴- تنظیمات حل عددی

در این پژوهش شبیه‌سازی جوشش استخری روی سطح عمودی صاف، شیردار مثلثی و دایره‌ای به صورت گذرا انجام شده است و در شبیه‌سازی‌های عددی به بررسی نحوه اثرگذاری این شیرها بر رفتار مایع آب در رژیم

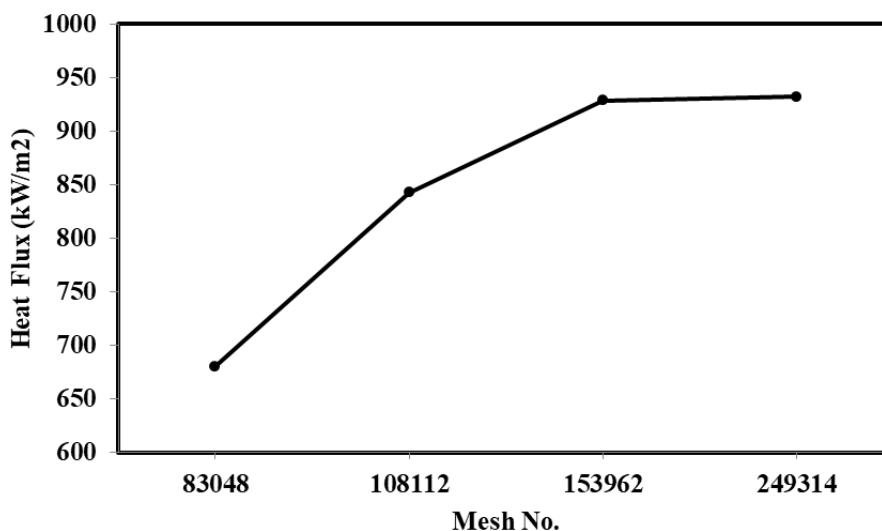
1 Volume of Fluid (VOF)

2 MUSCL

جدول ۱. خواص ترموفیزیکی مایع آب و بخار آب در دمای ۳۷۳/۱۵ کلوین و فشار اتمسفریک

Table 1. Thermophysical properties of liquid and vapor at 373.15 K and atmospheric pressure

بخار آب	مایع آب	مشخصه
۰/۵۹۷۵	۹۵۸/۴	چگالی (kg/m^3)
۲۱۳۵	۴۲۱۷	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.K)
۰/۰۲۴۵	۰/۶۷۹	ضریب هدایت حرارتی ($\text{W/m}^2.\text{K}$)
۰/۰۰۰۰۱۱۹۷	۰/۰۰۰۰۲۸۲	لزجت دینامیکی (Pa.s)
	۲۲۵۷	گرمای نهان تبخیر (kJ/kg)
	۰/۰۷	ضریب کشش سطحی (N/m)



شکل ۵. نمودار تغییرات شار حرارتی متوسط روی سطح گرمایش دارای شیار مثلثی نوع اول بر حسب شبکه با تعداد سلول‌های محاسباتی مختلف

Fig. 5. Average heat flux variation on the heating surface with type 1 triangular groove for different grids number in the mesh

گرمایش دارای شیار مثلثی نوع اول ارائه شده است. در ناحیه ریز اطراف سطح گرمایش دارای شیار مثلثی نوع اول، سلول‌های محاسباتی با ابعاد ۰/۲، ۰/۱۷۵، ۰/۱۵ و ۰/۱ میلی‌متر ایجاد شده و تعداد سلول‌های محاسباتی شبکه به ترتیب ۸۳۰۴۸، ۱۰۸۱۱۲، ۱۵۳۹۶۲ و ۲۴۹۳۱۴ بوده است. در شکل ۵ نمودار تغییرات شار حرارتی متوسط برای سطح گرمایش دارای شیار مثلثی نوع اول با دمای ۳۷۳/۱۵ کلوین در شبکه با تعداد سلول‌های محاسباتی مختلف نمایش داده شده است.

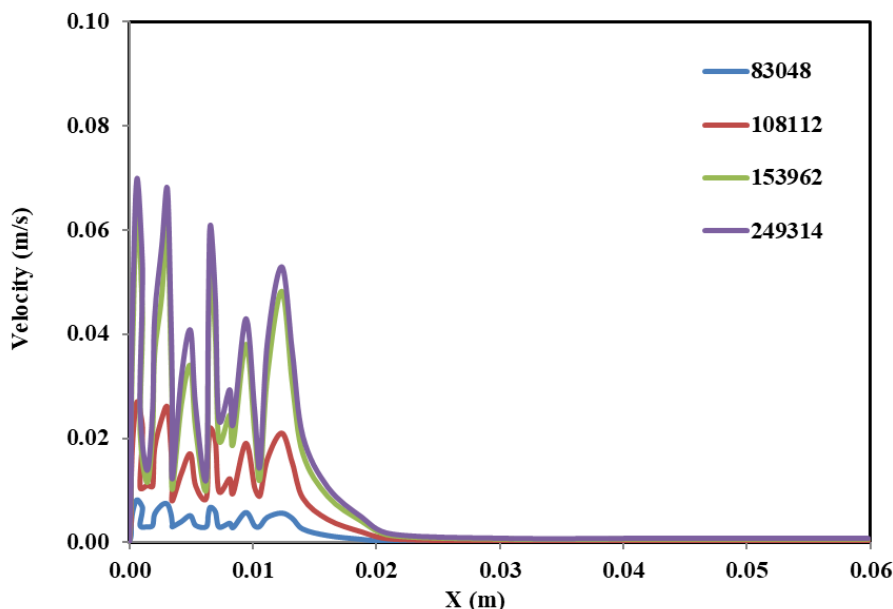
۲-۵- استقلال نتایج از شبکه محاسباتی

تعیین اندازه مناسب شبکه محاسباتی بیشترین زمان تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی را به خود اختصاص می‌دهد، چرا که کیفیت شبکه‌بندی، روند همگرایی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. حل یک مسئله دینامیک سیالات عددی باید مستقل از شبکه محاسباتی باشد یعنی تغییرات جواب‌ها به ازای ریزتر شدن شبکه کم باشد. با توجه به هندسه و وجود شیارهای مثلثی و دایره‌ای روی سطح گرمایش، نیاز است ضمن تولید شبکه، استقلال از شبکه نتایج بررسی شود. به این منظور نتایج استقلال از شبکه سطح

جدول ۲. مقدار متوسط کسر حجمی بخار روی سطح گرمایش دارای شیار مثلثی نوع اول برای شبکه با تعداد سلول‌های محاسباتی مختلف

Table 2. Type 1 triangular groove average vapor volume fraction on the heating surface for different grids number in the mesh

تعداد سلول‌های محاسباتی شبکه	مقدار متوسط کسر حجمی روی سطح گرمایش
۸۳۰۴۸	۰/۴۳
۱۰۸۱۱۲	۰/۵۴
۱۵۳۹۶۲	۰/۶۱
۲۴۹۳۱۴	۰/۶۲



شکل ۶. نمودار تغییرات سرعت عمودی روی خط افقی گذرنده از مرکز سطح گرمایش بر حسب شبکه با تعداد سلول‌های محاسباتی مختلف

Fig. 6. Vertical velocity variations on the horizontal line passing through the center of the heating surface for different grids number in the mesh

خاصی نداشته است. همچنین نمودار ارائه شده در شکل ۶ نشان می‌دهد از آنجایی که مقدار تغییرات سرعت عمودی روی خط مورد بررسی در نزدیکی مرز باز سمت راست هندسه، تغییراتی ندارد و سرعت در آن ناحیه صفر به دست آمده است، لذا ابعاد دامنه حل برای انجام شبیه‌سازی‌های عددی مناسب بوده است و مرز باز اثری بر متغیرهای حل شده، نداشته است. لازم به ذکر است بررسی استقلال از شبکه برای تمام هندسه‌های مورد بررسی به شیوه مشابه انجام شده است.

همچنین در جدول شماره ۲ نیز مقدار متوسط کسر حجمی بخار روی سطح گرمایش برای شبکه‌های مختلف ذکر شده است.

در شکل ۶ نیز تغییرات سرعت عمودی روی خط افقی گذرنده از مرکز سطح گرمایش به منظور بررسی اثر اندازه سلول‌های محاسباتی بر تغییرات موضعی حل نشان داده شده است.

همان‌طور که از نمودارهای ۵ و ۶ و نیز جدول ۲ مشخص است با ریز کردن سلول‌های محاسباتی مورد استفاده بیشتر از ۰/۱۵ میلی‌متر، نتایج تغییر

جدول ۳. مقایسه نتایج شار حرارتی متوسط آزمایشگاهی روی سطح گرمایش صاف با نتایج شبیه‌سازی‌های عددی

Table 3. Comparison of experimental average heat flux values on the flat heating surface with the numerical simulation results

خطای نسبی (%)	شار حرارتی متوسط) شبیه‌سازی (kW / m ^۲) عددی	شار حرارتی متوسط) آزمایشگاهی [۹] (kW / m ^۲)	دمای سطح گرمایش (K)
۴/۴	۱۹/۸	۲۰/۷	۳۷۸/۱۵
۴/۷	۸۸/۴	۹۲/۸	۳۸۳/۱۵
۷/۵	۱۹۵/۳	۲۱۱/۲	۳۸۸/۱۵
۴/۳	۳۶۸/۶	۳۸۵/۴	۳۹۳/۱۵

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اعتبارسنجی

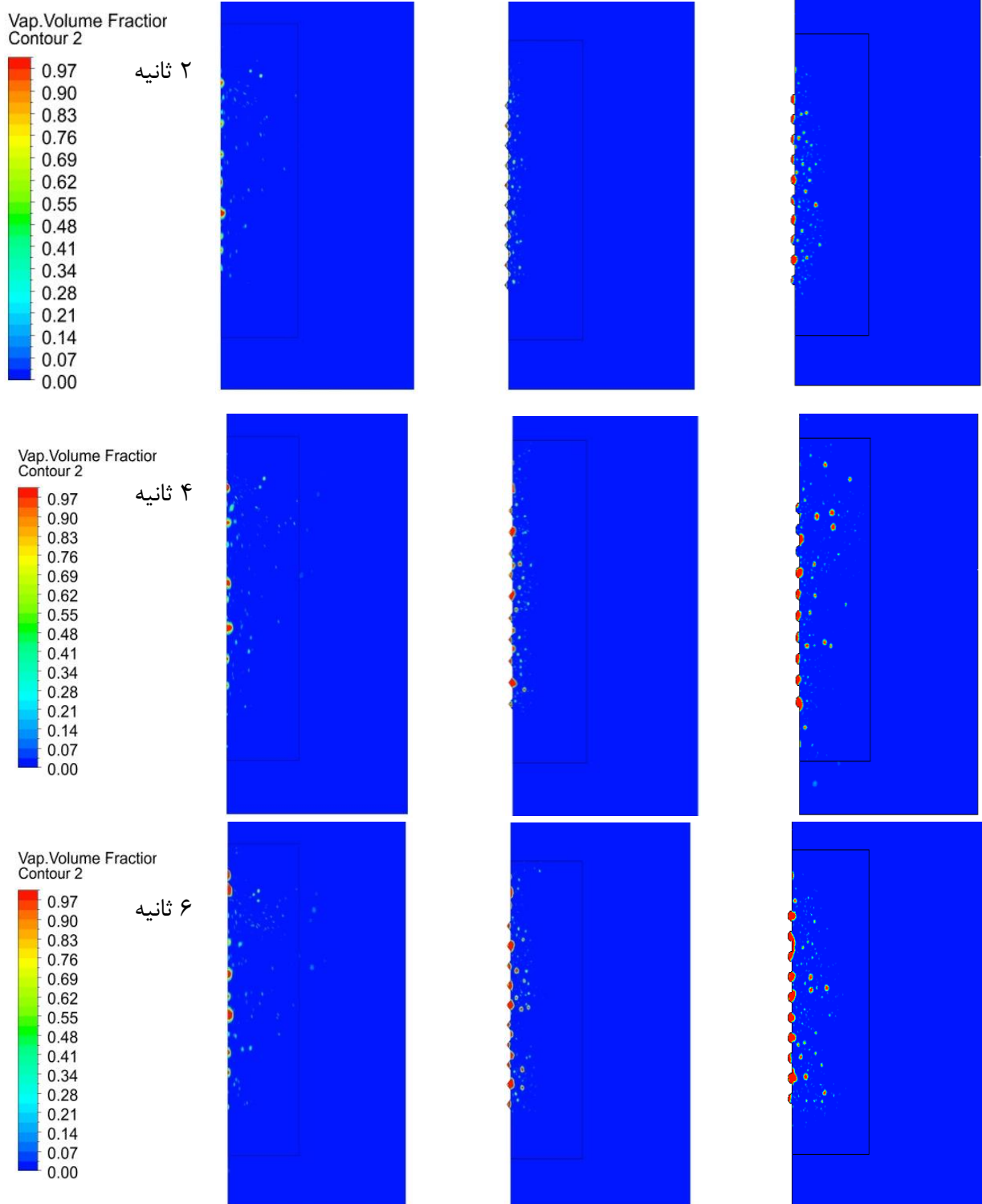
پس از بررسی استقلال از شبکه در بخش قبلی، باید دقت حل و شرایط مرزی بیان شده را مورد سنجش قرار داد. از این رو در این قسمت به مقایسه نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های اولیه با نتایج مطالعات آزمایشگاهی پرداخته شده است. در بخش دوم بیان شد که برای مشخص کردن هندسه مورد بررسی و شرایط مرزی اعمال شده در این پژوهش از مطالعه چانگ و همکاران [۷] استفاده شده است. به همین دلیل نتایج آزمایشگاهی این مطالعه برای صحت‌سنجی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. در جدول شماره ۳، مقادیر شار حرارتی متوسط آزمایشگاهی با شار حرارتی متوسط به دست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی در زمانی که سیستم به حالت پایدار رسیده است، مقایسه شده است. باید توجه داشت این نتایج برای سطح گرمایش صاف و بدون شیار و در چهار دمای مختلف سطح گرمایش به دست آمده است.

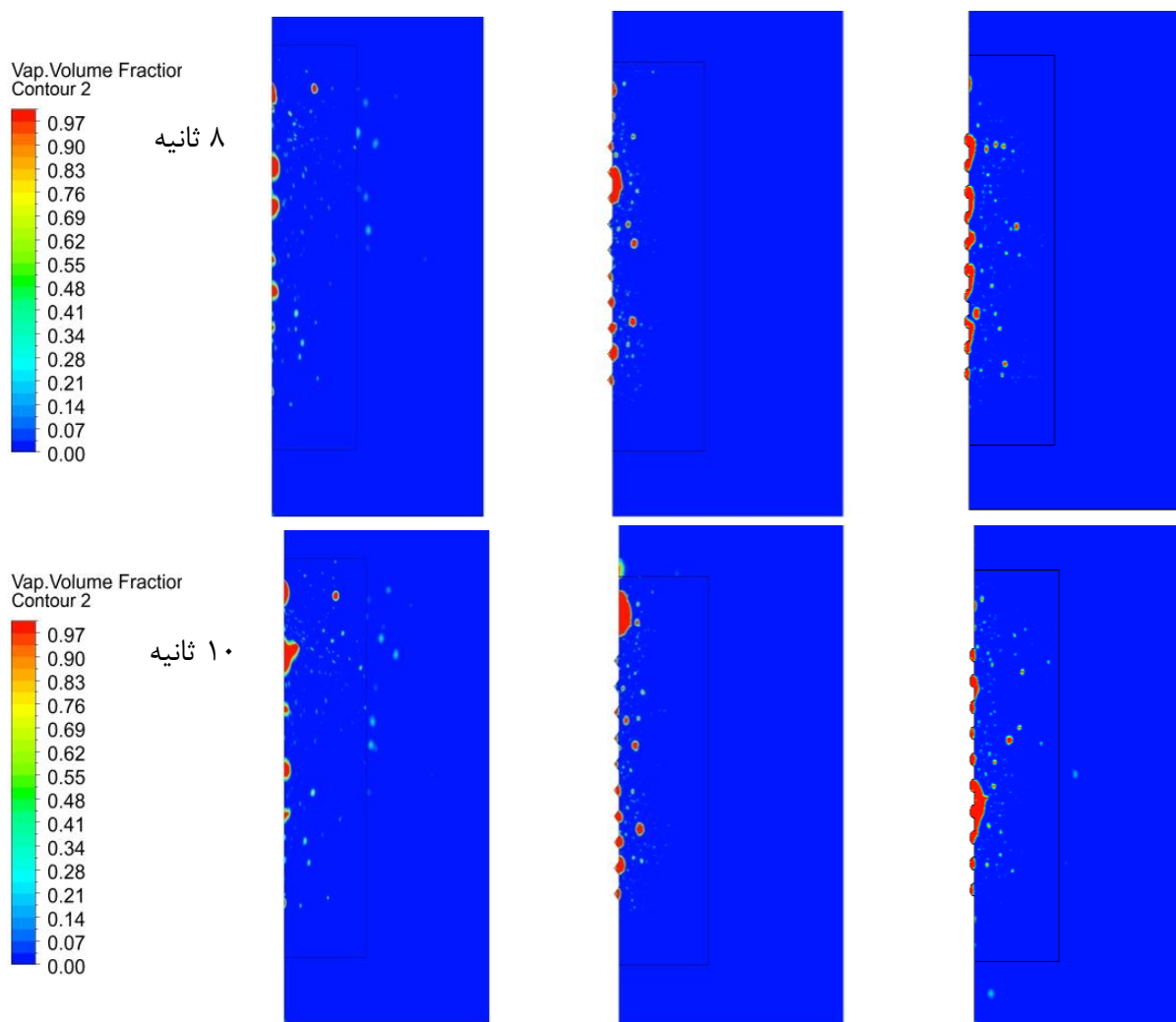
نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی در این پژوهش برای شار حرارتی متوسط سطح گرمایش صاف در جوشش استخری، تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی مطالعه چانگ و همکاران [۷] دارد و بیشترین خطا در این حالت حدود ۷/۵ درصد است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۳ می‌توان گفت نوع شبکه‌بندی، شرایط مرزی اعمال شده و مراحل ابتدایی شبیه‌سازی انجام شده از دقت مناسبی برخوردار است و تطابق خوبی میان نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد.

۳-۲- بررسی اثر ایجاد شیار مثلثی روی سطح گرمایش

در ابتدا به منظور بررسی اثر ایجاد شیار مثلثی روی سطح گرمایش، به بررسی نحوه شکل‌گیری حباب‌ها و حرکت آنها در زمان‌های مختلف روی سطح صاف و سطح دارای شیار مثلثی نوع اول پرداخته شده است. به همین جهت در شکل ۷ توزیع کسر حجمی بخار آب در هندسه مورد بررسی در زمان‌های مختلف نمایش داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، پس از حباب‌زایی در روی صفحه با دمای بیشتر از دمای اشباع مایع آب، حباب‌های بسیاری که حاوی بخار آب با دما و فشار بیشتر از مایع آب اطراف آن است تشکیل شده و نیروی شناوری باعث حرکت حباب‌ها بخار به سمت بالا شده است. تعدادی از این حباب‌های کوچک در این مرحله به هم پیوستگی پیدا کرده و منجر به ایجاد حباب‌های بزرگ‌تری می‌شود. اما میزان رشد حباب بخار آب پس از تشکیل، توسط کشش سطحی، اینرسی مایع آب و تفاوت بین فشار درون حباب و فشار محیطی یا بیرونی تعیین می‌شود. در مراحل اولیه انبساط حباب، هنگامی که نیروها تقریباً در تعادل هستند، رشد کند است تا زمانی که با افزایش اندازه حباب به دلیل کاهش کشش سطحی، رشد حباب شتاب بیشتری می‌گیرد. در این مرحله سرعت رشد حباب قابل توجه می‌شود تا زمانی که دما و در نتیجه فشار درون حباب کاهش یابد. کاهش دمای درون حباب نتیجه وجود گرمای نهان تبخیر است چرا که در حین رشد حباب، در سطح تماس بخار آب و مایع آب، از گرمای بخار درون حباب جهت تبخیر مایع آب با دمای اشباع استفاده می‌شود و ضمن کاهش دمای حباب، مقدار بخار آب و اندازه حباب بزرگ‌تر شده است.





شکل ۷. تغییرات توزیع کسر حجمی بخار آب در زمان‌های مختلف، سمت راست سطح گرمایش شیاردار دایره‌ای، وسط سطح گرمایش شیاردار مثلثی، سمت چپ سطح گرمایش صاف

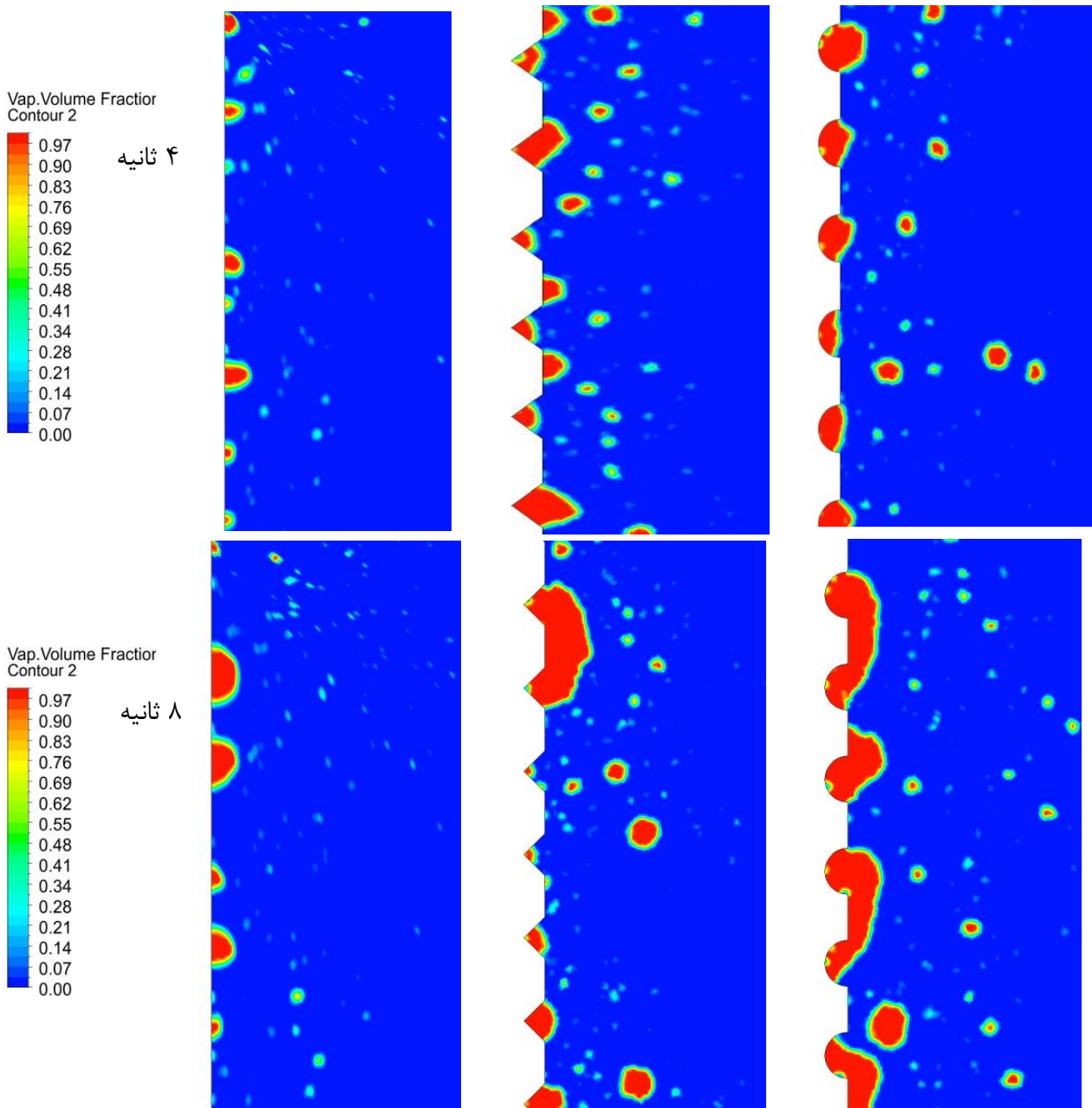
Fig. 7. Vapor volume fraction variations at different times, right heating surface with circular grooves, center heating surface with triangular grooves, left plain heating surface

شده است. این مقادیر متوسط شار حرارتی پس از پایدار شدن سیستم و ثابت شدن مقدار بخار تولید شده، محاسبه شده است.

نتایج ارائه شده در جدول ۴ نشان می‌دهد با افزایش دمای سطح، مقدار شار حرارتی متوسط وارد شده به مایع آب افزایش پیدا کرده است. این موضوع در هر سه سطح مورد بررسی مشاهده شده است. همچنین نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی نشان داده اضافه کردن شیارهای مثلثی و دایره‌ای روی سطح گرمایش منجر به افزایش متوسط شار حرارتی شده است. این موضوع به دو دلیل اتفاق افتاده است. نخست به این دلیل که ایجاد شیار منجر به افزایش سطح گرمایش در تماس با سیال و در نتیجه با توجه به شرط مرزی اعمال شده بر سطح گرمایش، باعث افزایش گرمای وارد شده به

در شکل شماره ۸ نمای نزدیک نحوه جدا شدن حباب‌ها از سطح گرمایش صاف و شیاردار در زمان‌های ۴ و ۸ ثانیه نمایش داده شده است. همانطور که در شکل‌های ۷ و ۸ مشخص است، با اضافه کردن شیار به سطح گرمایش عمودی، در زمان و مکان مشابه، فرایند تشکیل حباب‌ها با یکدیگر متفاوت بوده است. دلیل این موضوع به دو دلیل اصلی افزایش گرمای وارد شده به هندسه در اثر افزایش سطح و نیز ایجاد نقاط مستعد تشکیل حباب در اثر افزودن شیارهای مثلثی و دایره‌ای به سطح گرمایش بوده است.

در جدول شماره ۴، نتایج شار حرارتی متوسط برای سطح گرمایش صاف و دارای دو نوع شیار مثلثی و دایره‌ای برای جوشش استخری برای آب ذکر



شکل ۸. تغییرات توزیع کسر حجمی بخار آب در زمان‌های مختلف در نزدیکی سطح گرمایش، سمت راست سطح گرمایش شیاردار دایره‌ای، وسط سطح گرمایش شیاردار مثلثی، سمت چپ سطح گرمایش صاف

Fig. 8. Vapor volume fraction variations at different times near the heating surface, right heating surface with circular grooves, center heating surface with triangular grooves, left plain heating surface

جدول ۴. نتایج شار حرارتی متوسط روی سطح گرمایش صاف و دارای دو نوع شیار مثلثی و دایره‌ای

Table 4. Average heat flux values on a plain heating surface versus heating surfaces with triangular and circular grooves

شار حرارتی متوسط (kW / m ²) سطح شیاردار مثلثی نوع دوم	شار حرارتی متوسط (kW / m ²) سطح شیاردار مثلثی نوع اول	شار حرارتی متوسط (kW / m ²) سطح شیاردار دایره‌ای نوع دوم	شار حرارتی متوسط (kW / m ²) سطح شیاردار دایره‌ای نوع اول	شار حرارتی متوسط (kW / m ²) سطح صاف	دمای سطح گرمایش (K)
۴۹/۷	۴۵/۳	۳۳/۶	۳۶/۹	۱۹/۸	۳۷۸/۱۵
۲۲۳/۹	۲۰۶/۹	۱۵۳/۷	۱۷۱/۴	۸۸/۴	۳۸۳/۱۵
۴۹۵/۳	۴۶۱/۶	۳۵۲/۵	۳۸۶/۲	۱۹۵/۳	۳۸۸/۱۵
۱۰۲۱/۸	۹۲۸/۴	۶۷۸/۲	۷۵۷/۶	۳۶۸/۶	۳۹۳/۱۵

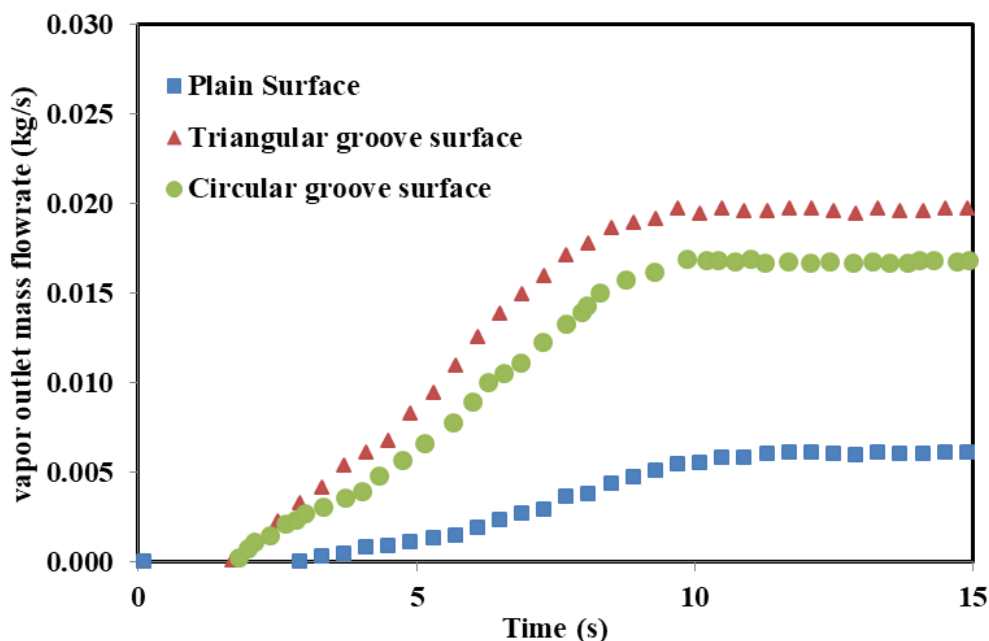
خوبی مشخص شده است. وجود این نقاط منجر به ایجاد حباب‌های ریز در شیارها شده و در ادامه این حباب‌های ریز تشکیل شده به هم پیوسته و حباب‌های بزرگ‌تری تشکیل می‌شود.

نمودار تغییرات بخار خروجی از سطح بالایی هندسه دارای سطح گرمایش صاف، دارای شیار مثلثی نوع اول و دایره‌ای نوع اول در شکل ۹ نمایش داده شده است. نمودار زیر در دمای سطح گرمایش ۳۹۳/۱۵ کلوین رسم شده است.

نتایج ارائه شده در شکل ۹ نشان می‌دهد با افزودن شیار روی سطح گرمایش، مقدار بخار آب خارج شده در زمان‌های مختلف نسبت به سطح گرمایش صاف افزایش قابل توجهی پیدا کرده است. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد و از توزیع کسر حجمی بخار آب روی سطح گرمایش صاف و دارای شیار مثلثی نیز مشخص بود، با افزودن شیار مثلثی و دایره‌ای، مقدار حرارت وارد شده به مایع آب و در نتیجه مقدار بخار آب ایجاد شده افزایش پیدا خواهد کرد. بررسی تغییرات هر حالت طی زمان نشان می‌دهد در هر دو حالت سطح گرمایش صاف و شیاردار، در ابتدا حجم بخار آب تولید شده بسیار پایین می‌باشد و با گذشت زمان و افزایش حرارت وارد شده به مایع آب، مقدار بخار آب تا جایی افزایش پیدا می‌کند که مقدار گرما با بخار آب تولید شده برابر شود و پس از آن نرخ بخار آب خارج شده ثابت خواهد شد و در نتیجه می‌توان گفت سیستم پایدار شده است. همچنین اضافه کردن شیار مثلثی و دایره‌ای منجر به کاهش زمان مورد نیاز جهت رسیدن سیستم به پایداری از ۱۰/۸ ثانیه به ۹/۳ و ۹/۹ ثانیه شده است.

آن شده است. طول اولیه سطح گرمایش زمانی که سطح صاف و بدون شیار بود برابر ۰/۰۴ متر و پس از اضافه کردن شیارهای مثلثی نوع اول با قاعده ۲ میلی‌متر، ارتفاع ۱ میلی‌متر و فاصله ۲ میلی‌متر، طول سطح گرمایش به ۰/۰۴۸۲ متر افزایش پیدا کرده است که حدود ۲۰/۷ درصد افزایش طول داشته است. با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی در حالت سطح شیاردار مثلثی نوع اول مقدار شار حرارتی بین ۱۲۸ تا ۱۴۷ درصد افزایش پیدا کرده که مقدار متوسط این افزایش برابر با ۱۳۹ درصد بوده است. با ایجاد شیار مثلثی نوع دوم و افزایش ارتفاع شیارهای مثلثی از یک میلی‌متر به دو میلی‌متر، طول سطح گرمایش از ۰/۰۴ میلی‌متر در حالت بدون شیار به ۰/۰۶۴۷ میلی‌متر افزایش پیدا کرده که منجر به افزایش حدود ۶۱/۸ درصد طول سطح گرمایش شده است. در این حالت، مقدار شار حرارتی متوسط در سطح گرمایش دارای شیار مثلثی نوع دوم نسبت به سطح گرمایش صاف ۱۵۱ تا ۱۷۷ درصد افزایش نشان داده است. با ایجاد شیار دایره‌ای نوع اول، طول سطح به ۰/۰۵۱۴ میلی‌متر افزایش پیدا کرده است و در نتیجه منجر به افزایش شار حرارتی متوسط بین ۸۶ تا ۱۰۵ درصد شده است. شیار دایره‌ای نوع دوم نیز منجر به افزایش ۳۷ درصدی سطح گرمایش و نیز افزایش ۶۹ تا ۸۳ درصدی شار حرارتی متوسط شده است.

دلیل دوم افزایش اتفاق افتاده این موضوع است که با تغییر شکل سطح گرمایش از سطح صاف به سطح شیاردار، نقاط مستعد تشکیل حباب روی سطح به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا کرده است. این موضوع در توزیع کسر حجمی در زمان‌های مختلف که در شکل ۸ نمایش داده شده است به



شکل ۹. تغییرات بخار آب خروجی از هندسه مورد بررسی در زمان‌های مختلف

Fig. 9. Outlet vapor variations of the studied geometry at different times

است اگرچه با ایجاد شیار دایره‌ای در مقایسه با شیار مثلثی نوع اول، سطح گرمایش افزایش بیشتری داشته است اما مقدار بخار آب افزایش کمتری یافته است چرا که با ایجاد شیار مثلثی نقاط مستعد ایجاد حباب افزایش بیشتری داشته‌اند.

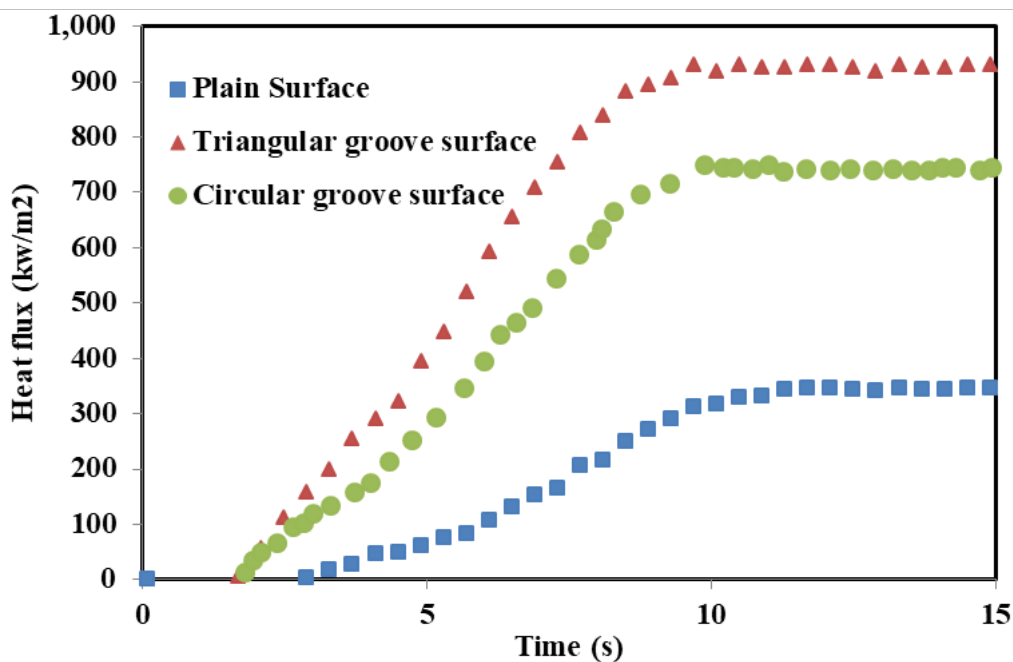
با توجه به جدول ۵ مشخص است مقدار افزایش بخار تولید شده برای سطح شیاردار مثلثی نوع اول و دوم بین ۱۶۰٪ تا ۳۴۰٪ درصد و برای سطح شیاردار دایره‌ای نوع اول و دوم بین ۱۰۱٪ تا ۱۵۵٪ درصد است. نکته حائز اهمیت که در شبیه‌سازی‌ها باید به آن توجه شود برابر بودن درصد افزایش تولید بخار با درصد افزایش حرارت کل وارد شده است که در آن اثر افزایش سطح گرمایش نیز وجود دارد. به عنوان مثال در سطح شیاردار مثلثی نوع اول، مقدار افزایش شار حرارتی نسبت به سطح صاف بدون شیار در همان دما بین ۱۲۸ تا ۱۴۷ درصد است. با در نظر گرفتن مساحت سطح شیاردار مثلثی نوع اول، مقدار افزایش حرارت کل وارد شده بین ۱۶۰ تا ۱۹۶ درصد (بین ۲/۱۸ تا ۴۴/۸ کیلووات) است. مقدار افزایش بخار تولید شده نیز که در جدول ۵ ارائه شده است نیز بین ۱۶۰ تا ۱۹۶ درصد است که نشان دهنده برابر بودن مقدار افزایش حرارت کل با مقدار بخار تولید شده است.

در شکل ۱۰ نیز تغییرات شار حرارت متوسط مکانی بر حسب زمان برای سه سطح گرمایش صاف، دارای شیار مثلثی نوع اول و دایره‌ای نوع اول نمایش داده شده است.

همانطور که در شکل ۱۰ مشخص است، روند تغییرات شار حرارتی متوسط مکانی و مقدار بخار ایجاد شده بر حسب زمان مشابه یکدیگر بوده است. دلیل این موضوع اثرگذاری مستقیم مقدار شار حرارتی متوسط بر مقدار بخار ایجاد شده بوده است. این شکل نشان داده است که با افزودن شیارهای دایره‌ای و مثلثی به سطح عمودی، مقدار شار حرارتی متوسط افزایش پیدا کرده است.

در جدول ۵، مقدار بخار آب تولید شده برای حالات مختلف پس از رسیدن به پایداری سیستم مورد بررسی ذکر شده است.

همانطور که در جدول شماره ۵ مشخص است با افزایش دمای سطح گرمایش، مقدار بخار تولید شده در هندسه مورد بررسی افزایش یافته است. همچنین در یک دمای مشخص با افزودن شیار مثلثی و دایره‌ای، مقدار بخار آب نیز افزایش پیدا کرده است. اضافه کردن شیار روی سطح گرمایش به دو دلیل افزایش سطح گرمایش و نیز افزایش نقاط ایجاد حباب ناشی از تغییر شکل سطح منجر به بهبود انتقال حرارت خواهد شد. همچنین نتایج داده



شکل ۱۰. تغییرات شار حرارتی متوسط مکانی در زمان‌های مختلف برای سه سطح صاف، شیاردار مثلثی نوع اول، شیاردار دایره‌ای نوع اول

Fig. 10. Average heat flux variations at different times for plain heating surface, type 1 triangular grooves and type 1 circular grooves

جدول ۵. مقادیر بخار آب تولید شده در هندسه دارای سطح گرمایش صاف و دارای دو نوع شیار مثلثی و دایره‌ای

Table 5. Vapor production in the geometry with a plain heating surface and in surfaces with two types of triangular and circular grooves

مقدار بخار آب (kg/s) - سطح شیاردار مثلثی نوع دوم	مقدار بخار آب (kg/s) - سطح شیاردار مثلثی نوع اول	مقدار بخار آب (kg/s) - سطح شیاردار دایره‌ای نوع دوم	مقدار بخار آب (kg/s) - سطح شیاردار دایره‌ای نوع اول	مقدار بخار آب (kg/s) - سطح صاف	دمای سطح گرمایش (K)
۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۲۸	۳۷۸/۱۵
۰/۰۰۶۱	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۱۴	۳۸۳/۱۵
۰/۰۱۳۸	۰/۰۰۹۵	۰/۰۰۸۲	۰/۰۰۸۷	۰/۰۰۳۱	۳۸۸/۱۵
۰/۰۲۸۶	۰/۰۱۹۳	۰/۰۱۶۵	۰/۰۱۶۶	۰/۰۰۶۱	۳۹۳/۱۵

در انتها به منظور اطمینان بیشتر از صحت شبیه‌سازی‌های انجام شده، با استفاده از موازنه انرژی، یک نمونه از نتایج ارائه شده در جداول ۴ و ۵ مقایسه شده است. با توجه به موازنه انرژی باید مقدار حرارت وارد شده در واحد زمان برابر با حاصل ضرب جرم بخار ایجاد شده در گرمای نهان تبخیر باشد. به عنوان مثال، در سطح گرمایش با شیار مثلثی نوع اول و دمای ۳۹۳/۱۵ کلوین، مقدار حرارت وارد شده برابر است با حاصل ضرب شار حرارتی متوسط ($928/4 \text{ kW/m}^2$) و سطح گرمایش شیاردار مثلثی نوع اول (0.0482 m^2). با تقسیم عدد حاصل بر گرمای نهان تبخیر (2257 kJ/kg)، مقدار بخار 0.0197 kg/s بر ثانیه به دست آمده است که این مقدار تقریباً برابر با مقدار گزارش شده در جدول ۵ بوده است.

در انتها به منظور اطمینان بیشتر از صحت شبیه‌سازی‌های انجام شده، با استفاده از موازنه انرژی، یک نمونه از نتایج ارائه شده در جداول ۴ و ۵ مقایسه شده است. با توجه به موازنه انرژی باید مقدار حرارت وارد شده در واحد زمان برابر با حاصل ضرب جرم بخار ایجاد شده در گرمای نهان تبخیر باشد. به عنوان مثال، در سطح گرمایش با شیار مثلثی نوع اول و دمای ۳۹۳/۱۵ کلوین، مقدار حرارت وارد شده برابر است با حاصل ضرب شار حرارتی متوسط ($928/4 \text{ kW/m}^2$) و سطح گرمایش شیاردار مثلثی نوع اول (0.0482 m^2). با تقسیم عدد حاصل بر گرمای نهان تبخیر (2257 kJ/kg)، مقدار بخار 0.0197 kg/s بر ثانیه به دست آمده است که این مقدار تقریباً برابر با مقدار گزارش شده در جدول ۵ بوده است.

۴- نتیجه گیری

با توجه به اهمیت انتقال حرارت در فرایندهای مختلف مورد استفاده در صنایع مختلف و انجام پژوهش‌های متعدد در خصوص افزایش مقدار انتقال حرارت، در این مقاله به بررسی جوشش استخری روی سطح گرمایش عمودی پرداخته شده است. هندسه و شرایط مرزی مورد مطالعه با توجه به پژوهش چانگ و همکاران انتخاب شد که در آن طول سطح گرمایش عمودی ۴ سانتیمتر بود. به منظور بررسی اثر پارامترهای مختلف بر انتقال حرارت جوشش استخری از شبیه‌سازی‌های عددی دوبعدی استفاده شد. اثر دو نوع شیار مثلثی و دایره‌ای روی سطح گرمایش در شبیه‌سازی‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین دمای سطح گرمایش در شبیه‌سازی‌های عددی، ۴ دمای ۳۷۸/۱۵، ۳۸۳/۱۵، ۳۸۸/۱۵ و ۳۹۳/۱۵ کلونین قرار داده شد. روش مورد استفاده جهت مدل‌سازی جریان دوفازی، روش حجم سیال بود و شبیه‌سازی‌ها به صورت متغیر با زمان انجام شد و تا زمانی ادامه پیدا کرد که حجم بخار خارج شده از خروجی، ثابت شود. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی نشان داد افزودن شیارهای مثلثی و دایره‌ای به سطح گرمایش منجر به افزایش کسر حجمی بخار روی آن خواهد شد. همچنین با افزودن شیار مثلثی، مقدار حرارت وارد شده به مایع آب و در نتیجه مقدار بخار آب ایجاد شده افزایش پیدا خواهد کرد و زمان مورد نیاز جهت رسیدن سیستم به پایداری نیز کاهش خواهد یافت. نتایج به دست آمده از شار حرارتی متوسط روی سطوح عمودی صاف و شیاردار نشان داد با استفاده از شیار مثلثی نوع اول، مقدار شار حرارتی متوسط وارد شده به مایع آب بین ۱۲۸٪ تا ۱۴۷٪ افزایش پیدا کرد. با ایجاد شیار مثلثی نوع دوم و افزایش ارتفاع شیارهای مثلثی از یک میلی‌متر به دو میلی‌متر، سطح گرمایش حدود ۶۱/۸٪ نسبت به سطح گرمایش صاف افزایش داشت که در نهایت منجر به افزایش ۱۵۱٪ تا ۱۷۷٪ مقدار شار حرارتی متوسط شد. از سوی دیگر اگر چه با ایجاد شیار دایره‌ای سطح گرمایش بیش از سطح دارای شیار مثلثی نوع اول بوده است اما مقدار شار حرارتی متوسط بین ۶۹٪ تا ۱۰۵٪ افزایش پیدا کرده است که کمتر از نتایج مشابه برای شیار مثلثی نوع اول بوده است. ایجاد نقاط مستعد تولید حباب با ایجاد شیار مثلثی، دلیل اصلی کمتر بودن افزایش شار حرارتی متوسط بوده است.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

A	مساحت، m^2
F	نیرو، N
k	ضریب هدایت حرارتی، W/m.k
\dot{m}	دبی جرمی، kg/s
p	فشار، Pa
Q	شار حرارتی، W/m^2
T	دما، K
v	سرعت، m/s

علائم یونانی

ρ	چگالی، kg/m^3
α	کسر حجمی فاز، %
μ	ویسکوزیته، Pa.s
σ	ضریب کشش سطحی، n/m

زیرنویس

eff	ضریب مؤثر
f	مایع
g	گاز

منابع

- [1] S. Nukiyama, The maximum and minimum values of the heat Q transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure, International Journal of Heat and Mass Transfer, 9(12) (1966) 1419-1433.
- [2] N. Kaneyasu, F. Yasunobu, U. Satoru, O. Haruhiko, Effect of surface configuration on nucleate boiling heat transfer, International Journal of Heat and Mass Transfer, 27(9) (1984) 1559-1571.
- [3] J. Chang, S. You, Heater orientation effects on pool boiling of micro-porous-enhanced surfaces in saturated FC-72, Journal of heat transfer, 118(4) (1996) 937-943.
- [4] J. Ho, K. Leong, C. Yang, Saturated pool boiling from carbon nanotube coated surfaces at different orientations, International Journal of Heat and Mass Transfer, 79 (2014) 893-904.

- on γ -Fe₂O₃/water Nanofluid Pool Boiling, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 52(6) (2018) 1577-1594, (in Persian).
- [11] A.A. Jamialahmadi, A. Nazari, M.H. Kayhani, Experimental study of CuO/Water nanofluid pool boiling on the copper flat surface and measurement of the critical heat flux, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 53(5) (2021) 3099-3114, (in Persian).
- [12] S.A. Hosseini, R. Kouhi Kamali, The Effect of Surface Types on Bubble Dynamic Formation During Nucleate Pool Boiling by Use of Lee and Tanasawa Phase Change Models, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 52(9) (2019) 2521-2536, (in Persian).
- [13] M. Hassani, R. Kouhi Kamali, Two-dimensional simulation of nucleation pool boiling and investigation of phase change mechanism at low heat fluxes, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 53(Issue 3 (Special Issue)) (2021) 1883-1896, (in Persian).
- [14] J.U. Brackbill, D.B. Kothe, C. Zemach, A continuum method for modeling surface tension, Journal of computational physics, 100(2) (1992) 335-354.
- [5] S. Jung, H. Kim, Effects of surface orientation on nucleate boiling heat transfer in a pool of water under atmospheric pressure, Nuclear Engineering and Design, 305 (2016) 347-358.
- [6] A.M. Gheitaghy, A. Samimi, H. Saffari, Surface structuring with inclined minichannels for pool boiling improvement, Applied Thermal Engineering, 126 (2017) 892-902.
- [7] T. Chuang, Y. Chang, Y. Ferng, Investigating effects of heating orientations on nucleate boiling heat transfer, bubble dynamics, and wall heat flux partition boiling model for pool boiling, Applied Thermal Engineering, 163 (2019) 1-12.
- [8] W. Lee, G. Son, Numerical simulation of boiling enhancement on a microstructured surface, International communications in heat and mass transfer, 38(2) (2011) 168-173.
- [9] S. Gong, P. Cheng, Numerical simulation of pool boiling heat transfer on smooth surfaces with mixed wettability by lattice Boltzmann method, International Journal of Heat and Mass Transfer, 80 (2015) 206-216.
- [10] s. nasiri, S. Talebi, M.R. Salimpour, The Experimental Analyses of Grooved Surface and Magnetic Field Effects

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Talebi, N. Makulati, Pool Boiling Simulation on Vertical Plate with Triangular & Circular grooves, Amirkabir J. Mech Eng., 54(11) (2023) 2645-2662.

DOI: 10.22060/mej.2023.20976.7352



