

شبیه‌سازی عددی جوشش استخری روی یک سطح افقی شیاردار

سامان

رمضانی^۱

دانشجوی دکترا

شهرام طالبی^۲

دانشیار

به علت مقدار زیاد شار حرارتی در پدیده جوشش، از این پدیده در فرایندهای با شدت انتقال حرارت بزرگ استفاده می‌شود. ایجاد شیاردار روی سطح می‌تواند پدیده تشکیل حباب را بهبود داده و باعث افزایش انتقال حرارت جوشش شود. در این مقاله از روش اویلری-اویلری، پدیده جوشش استخری روی یک سطح افقی شبیه‌سازی عددی شده است. چهار سطح صاف، سطح با شیاردار مستطیلی، سطح با شیاردار مثلثی و سطح با شیاردار دایره‌ای بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی موجود مقایسه شده‌اند. نتایج نشان داده است که سطح با شیاردار مستطیلی و دایره‌ای به ترتیب حدود ۵۰ و ۹۰ درصد شار حرارتی بیشتری نسبت به سطح صاف دارد. همچنین نتایج نشان داده است که سطح با شیاردار مثلثی حدود ۳۷ درصد شار حرارتی کمتری نسبت به سطح صاف داشته است.

واژه‌های راهنما: جوشش استخری، سطح شیاردار، انتقال حرارت، روش اویلری-اویلری

۱- مقدمه

به علت مقدار زیاد شار حرارتی در پدیده جوشش، از این پدیده در فرایندهای با شدت انتقال حرارت بزرگ استفاده می‌شود. در نیروگاه‌ها، صنایع وابسته به نفت و وسایل سرمایشی از پدیده جوشش استفاده زیادی می‌شود. در جوشش استخری کل حجم مایع ساکن است، ولی به علت رشد و جدایی حباب‌های بخار از سطح و حرکت این حباب‌ها در حجم مایع، جریان‌های موضعی ضعیفی در حجم مایع ایجاد می‌شود. هر چه اختلاف دمای سطح داغ با دمای اشباع مایع بیشتر باشد، شدت جوشش بیشتر خواهد بود. جوشش هسته‌ای به حالتی گفته می‌شود که حباب‌های بخار به‌طور جداگانه از روی سطح داغ ایجاد شده و سپس به علت نیروی شناوری در حجم مایع رو به بالا حرکت می‌کند. اگر دمای سطح داغ زیاد باشد، حالت شار حرارتی بحرانی و جوشش لایه‌ای (فیلمی) رخ می‌دهد. در اکثر کاربردها سعی می‌شود که پدیده جوشش در ناحیه هسته‌ای باشد. یکی از اساسی‌ترین هندسه‌ها در جوشش استخری، جوشش روی یک سطح افقی است. برای افزایش انتقال حرارت جوشش، می‌توان روی سطح تغییراتی را ایجاد کرد. Das و همکاران [۱] به‌طور آزمایشگاهی با ایجاد شیارداری روی سطح، به بررسی جوشش روی یک سطح افقی پرداخته‌اند.

^۱ دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، تبدیل انرژی، دانشگاه یزد، یزد saman.ramezani.14@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، دانشیار، مهندسی مکانیک، تبدیل انرژی، دانشگاه یزد، یزد talebi_s@yazd.ac.ir

آن‌ها از شیارهای مستطیلی و دایره‌ای استفاده کرده‌اند. جهت شیارها نیز به‌صورت موازی و متقاطع طراحی شده است. نتایج آن‌ها نشان داده که شیار دایره‌ای بهترین عملکرد را داشته است. Zhong و همکاران [۲] به بررسی آزمایشگاهی جوشش روی سطح شیب‌دار پرداخته‌اند. آن‌ها دریافته‌اند که با افزایش زاویه شیب صفحه، شار حرارتی بحرانی افزایش می‌یابد. Gerardi و همکاران [۳] جوشش استخری روی یک صفحه افقی را به‌طور آزمایشی بررسی کرده‌اند. آن‌ها از سیال آب خالص و نانوسیال استفاده کرده‌اند. نتایج آن‌ها شامل داده‌های معتبر زیادی از پدیده جوشش است. Liang و Mudawar [۴] مروری بر روش‌های مختلف بهبود انتقال حرارت جوشش روی سطح انجام داده‌اند. ایجاد شیار، گذاشتن پره و ایجاد حفره روی سطح، نمونه‌هایی از روش‌های بهبود سطح جوشش است. Nasiri و همکاران [۵] اثر وجود شیار روی جوشش در یک سطح افقی را به‌طور آزمایشی بررسی کرده‌اند. شیارهایی به شکل مستطیل، دایره و مثلث روی سطح ایجاد شده و سیال آب و فروسیال بوده است. نتایج آن‌ها نشان داده است که شیارهای مستطیلی و دایره‌ای نقش به‌سزایی در افزایش جوشش دارند، ولی شیار مثلثی انتقال حرارت جوشش را کاهش داده است. امروزه با پیشرفت روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی، شبیه‌سازی عددی جوشش مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. مزیت استفاده از شبیه‌سازی عددی جوشش آن است که می‌توان اثر تغییرات هندسی یا فیزیکی را در زمان کوتاه‌تری بررسی کرد. بخصوص در بررسی جوشش که روش‌های آزمایشگاهی آن بسیار پرهزینه و وقت‌گیر و همراه با محدودیت‌های فراوان است، شبیه‌سازی عددی می‌تواند بسیار مفید باشد. Tu و Yeoh [۶] در کتاب خود انواع روش‌های محاسباتی در جریان‌های دو فازی را شرح داده‌اند. Aminfar و همکاران [۷] جوشش استخری روی یک صفحه افقی را با استفاده از مدل مخلوط برای آب و نانوسیال به‌طور عددی بررسی کرده‌اند. شبیه‌سازی عددی آن‌ها به‌صورت دوبعدی بوده و نتایج خود را با داده‌های آزمایشگاهی مرسوم مقایسه کرده‌اند. Ma و Cheng [۸] جوشش هسته‌ای و لایه‌ای روی یک سطح صاف افقی را با روش شبکه بولتزن بررسی کرده‌اند. آن‌ها اثر زاویه تماس بر روی گذار از جوشش هسته‌ای به لایه‌ای را مورد توجه قرار داده‌اند. Cheng و Gong [۹] اثر وجود حفره روی یک سطح افقی را با روش شبکه بولتزن بررسی کرده‌اند. آن‌ها اثر عمق و فاصله حفره‌ها را بر شدت جوشش و همچنین گذار از جوشش هسته‌ای به لایه‌ای را مطالعه کرده‌اند. Jiansheng و همکاران [۱۰] اثر وجود برآمدگی کروی روی سطح افقی را با استفاده از مدل اویلری-اویلری بررسی کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داده است که وجود برآمدگی روی سطح می‌تواند انتقال حرارت را افزایش و شار حرارتی بحرانی را کاهش دهد. Kamel و همکاران [۱۱] جوشش روی یک سطح صاف افقی برای آب و نانوسیال را با استفاده از مدل اویلری-اویلری بررسی کرده‌اند. آن‌ها رشد و رهایی حباب از سطح را مورد توجه قرار داده‌اند. با توجه به اینکه استفاده از شیار روی سطح می‌تواند تأثیر مناسبی بر انتقال حرارت جوشش داشته باشد و شبیه‌سازی عددی در این زمینه انجام نشده است، هدف این مقاله بررسی عددی اثر شکل و ابعاد شیار بر مقدار انتقال حرارت در جوشش روی یک سطح افقی است. برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی، از نتایج آزمایشگاهی Nasiri و همکاران [۵] استفاده شده است. بنابر این هندسه و ابعاد مورد بررسی در این مقاله، مطابق با [۵] در نظر گرفته شده است.

۲- معادلات حاکم

در این مقاله از روش اویلری-اویلری برای بررسی جریان دوفازی استفاده شده است.

در این روش معادلات بقایی (جرم، مومنتم، انرژی) و معادلات مربوط به مدل‌سازی آشفتگی، برای هر فاز جداگانه در نظر گرفته می‌شود. اثر متقابل فازها در فصل مشترک، به صورت چشمه (چاه)، نیروها و منابع گرمایی در معادلات اعمال می‌شود. با توجه به اینکه موضوع مورد بررسی در این مقاله جوشش آب خالص است، فقط دو فاز مایع و بخار وجود دارد. کسر حجمی هر فاز به صورت نسبت حجم اشغال شده آن فاز به کل حجم است. کسر حجمی بخار با α نشان داده شده است. بنابراین، کسر حجمی مایع $(1-\alpha)$ خواهد بود. در روش اویلری-اویلری، متغیرهای جریان برای هر فاز جداگانه بیان می‌شود. از زیرنویس ϑ برای بخار و از زیرنویس l برای مایع استفاده شده است. معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی حرارتی برای فاز بخار مطابق روابط (۱) تا (۳) است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho_{\vartheta}) + \vec{\nabla} \cdot (\alpha\rho_{\vartheta}\vec{V}_{\vartheta}) = \Gamma \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho_{\vartheta}\vec{V}_{\vartheta}) + \vec{\nabla} \cdot (\alpha\rho_{\vartheta}\vec{V}_{\vartheta} \otimes \vec{V}_{\vartheta}) = -\alpha\vec{\nabla}P + \alpha\rho_{\vartheta}\vec{g} + \alpha\vec{\nabla} \cdot \vec{\tau}_{\vartheta} + \vec{S}_V^l \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha\rho_{\vartheta}h_{\vartheta}) + \vec{\nabla} \cdot (\alpha\rho_{\vartheta}h_{\vartheta}\vec{V}_{\vartheta}) = \alpha\frac{\partial P}{\partial t} + \alpha\vec{\tau}_{\vartheta} : \nabla\vec{V}_{\vartheta} - \vec{\nabla} \cdot \vec{q}_{\vartheta} + S_h^l \quad (3)$$

در این روابط، Γ شدت جرم بخار تولید شده (در واحد حجم)، \vec{g} شتاب ثقل زمین و \vec{S}_V^l و S_h^l نشان‌دهنده اندرکنش‌های بین‌فازی در سطح مشترک هستند. تنش برشی با فرض سیال نیوتنی و مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ ، معادله ۴، محاسبه می‌شود.

$$\vec{\tau}_{\vartheta} = (\mu_{\vartheta} + \mu_{\vartheta}^t)(\nabla\vec{V}_{\vartheta} + \nabla\vec{V}_{\vartheta}^T) - \frac{2}{3}(\rho_{\vartheta}k_{\vartheta} + (\mu_{\vartheta} + \mu_{\vartheta}^t)\vec{\nabla} \cdot \vec{V}_{\vartheta})\vec{I}_{\vartheta} \quad (4)$$

و همچنین شار حرارتی از معادله ۵:

$$\vec{q}_{\vartheta} = -(\lambda_{\vartheta} + \lambda_{\vartheta}^t)\vec{\nabla}T_{\vartheta} \quad (5)$$

که μ لزجت مولکولی، μ^t لزجت آشفتگی، λ رسانش مولکولی و λ^t رسانش آشفتگی هستند. اندرکنش بین‌فازی در معادله مومنتم، \vec{S}_V^l ، شامل مومنتم منتقل شده توسط انتقال جرم، نیروهای درگ و لیفت، اثر دیوار، پراکندگی آشفتگی و جرم مجازی است (معادله ۶):

$$\vec{S}_V^I = \Gamma \vec{V}^I + \vec{F}_D + \vec{F}_L + \vec{F}_{wall} + \vec{F}_{TD} + \vec{F}_{VM} \quad (۶)$$

نیروها در رابطه (۶) به سرعت، چگالی، لزجت، دما و کسر حجمی دو فاز مایع و بخار بستگی دارد [۶ و ۱۲]. اندرکنش بین‌فازی در معادله انرژی حرارتی، S_h^I شامل گرمای منتقل شده در تغییر فاز و جابه‌جایی است (معادله ۷):

$$S_h^I = \Gamma h^I + Q_{\theta l} \quad (۷)$$

در روابط (۶) و (۷)، h^I آنتالپی سطح مشترک و \vec{V}^I سرعت سطح مشترک است. برای فاز مایع، معادلاتی شبیه روابط (۱) تا (۵) نوشته می‌شود فقط به‌جای زیرنویس θ از زیرنویس l استفاده شده و α به $(1 - \alpha)$ تبدیل می‌شود. اندرکنش‌های بین‌فازی Γ و \vec{S}_V^I و S_h^I که برای بخار محاسبه شده‌اند، با علامت منفی برای فاز مایع به کار می‌روند. برای سرعت و آنتالپی سطح مشترک، h^I و \vec{V}^I ، پیشنهادهای مختلفی وجود دارد [۶]: استفاده از مقادیر متوسط مایع و بخار، در جهت تغییر فاز، اختلاف دو فاز. در این مقاله از حالت "در جهت تغییر دو فاز" استفاده شده است. یعنی چون جوشش وجود دارد (انتقال جرم از فاز مایع به بخار) مقادیر سطح مشترک با مقادیر مربوط به فاز مایع مساوی قرار داده شده است. برای مدل‌سازی آشفتگی از مدل $k-\varepsilon$ استفاده شده است. برای فاز بخار معادلات حاکم بر k و ε مطابق روابط (۸) و (۹) است.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho_{\theta} k_{\theta}) + \vec{\nabla} \cdot (\alpha \rho_{\theta} k_{\theta} \vec{V}_{\theta}) = \vec{\nabla} \cdot \left[\alpha \left(\mu_{\theta} + \frac{\mu_{\theta}^t}{\sigma_k} \right) \vec{\nabla} k_{\theta} \right] + \alpha (G_{\theta} - \rho_{\theta} \varepsilon_{\theta}) + S_k^I \quad (۸)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho_{\theta} \varepsilon_{\theta}) + \vec{\nabla} \cdot (\alpha \rho_{\theta} \varepsilon_{\theta} \vec{V}_{\theta}) \\ & = \vec{\nabla} \cdot \left[\alpha \left(\mu_{\theta} + \frac{\mu_{\theta}^t}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \vec{\nabla} \varepsilon_{\theta} \right] + \alpha \frac{\varepsilon_{\theta}}{k_{\theta}} (C_{1\varepsilon} G_{\theta} - C_{2\varepsilon} \rho_{\theta} \varepsilon_{\theta}) + S_{\varepsilon}^I \end{aligned} \quad (۹)$$

که G تولید انرژی جنبشی آشفته است. در روابط (۸) و (۹) S_k^I و S_{ε}^I اندرکنش‌های بین‌فازی را نشان می‌دهند. هر چند بعضی پژوهشگران معتقدند این مقادیر تأثیر زیادی بر آشفتگی ندارد، ولی در این مقاله از مدل [۱۳] استفاده شده است. برای محاسبه انتقال حرارت از سطح دیوار، از مدل RPI [۱۴] استفاده شده است. در این مدل، مقدار شار حرارتی روی سطح از سه قسمت جابه‌جایی، تبخیر و کوینج تشکیل شده است (معادله ۱۰).

$$q = q_c + q_Q + q_E \quad (۱۰)$$

¹ Rensselaer Polytechnic Institute model

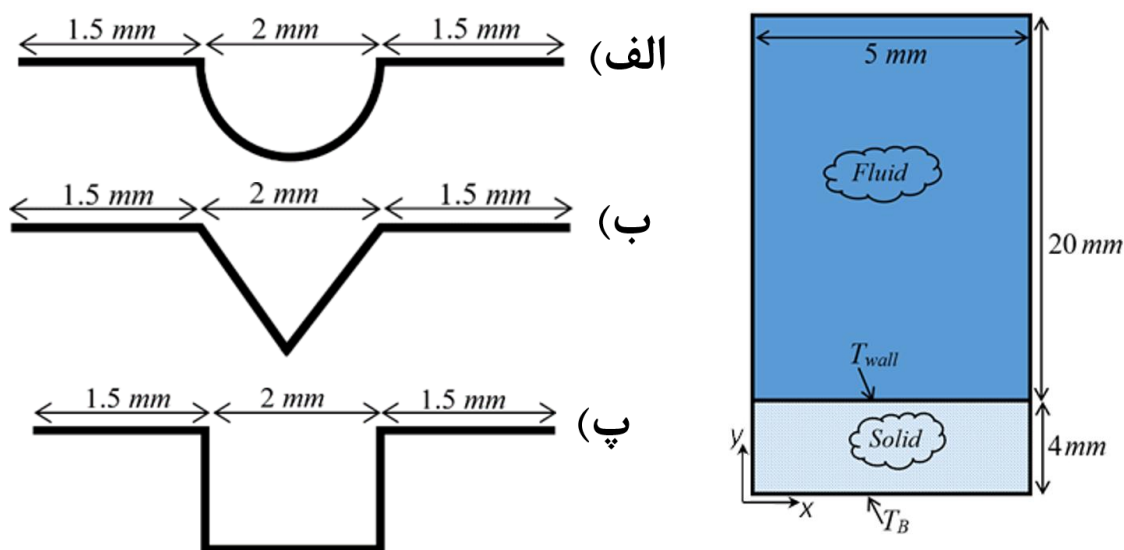
سهم جابه‌جایی (q_c) ناشی از حرکت مایع روی سطح دیوار است. سهم تبخیر (q_Q) ناشی از تغییر فاز و تشکیل حباب است. کوینچ (q_E) مربوط به حالت نوسانی تشکیل حباب و رها شدن آن از سطح دیوار است. این مقادیر به سرعت و دمای مایع و بخار در نزدیک سطح، دمای دیوار و خواص مایع و بخار و فرکانس تشکیل حباب و تراکم مکانهای هسته‌زا وابسته هستند [۱۲].

۳- هندسه مورد بررسی

در این مقاله، جوشش استخری روی یک صفحه افقی بررسی شده است. محیطی که سیال در آن قرار دارد، مستطیلی به پهنا ۵ و ارتفاع ۲۰ میلی‌متر است. سطح دیوار که جوشش روی آن رخ می‌دهد در پایین قرار دارد (شکل (۱)). چون با وجود شیار، دمای سطح دیوار عملاً یکنواخت نخواهد بود، برای نزدیک شدن به واقعیت، یک جسم در زیر سطح جوشش در نظر گرفته شده است. شیارها روی این جسم جامد ایجاد شده است. دمای سطح پایینی این جسم جامد به‌عنوان شرط مرزی اعمال شده است. ارتفاع این جسم جامد ۴ میلی‌متر انتخاب شده است. در این مقاله سه نوع شیار مستطیلی، دایره‌ای و مثلثی بررسی شده است. در شکل (۲) ابعاد این شیارها نشان داده شده است. پهناهای همه شیارها ۲ میلی‌متر و عمق آن‌ها ۱ میلی‌متر انتخاب شده‌اند. ابعاد شیارها در این مقاله مطابق با [۵] انتخاب شده است تا بتوان نتایج عددی این مقاله را با نتایج آزمایشگاهی آن به‌درستی مقایسه نمود. سیال مورد بررسی در این مقاله، آب خالص است. دمای اشباع آب ۹۴/۶ درجه سلسیوس و جنس جسم جامد مس است.

۴- شبیه‌سازی عددی

فرضیات عددی به کار رفته عبارت‌اند از: جریان آشفته، غیردایم، تراکم ناپذیر و دوبعدی. با توجه به اینکه هندسه مورد بررسی در عمق (عمود بر صفحه) یکنواخت است، دو بعدی فرض کردن جریان تأثیر زیادی بر نتایج نداشته است.



شکل ۲- شیارهای استفاده شده در سطح جوشش
الف- مثلثی ب- مستطیلی پ- دایره‌ای

شکل ۱- نمایی از مسئله

مراجع زیادی نیز مسئله جوشش استخری را دو بعدی حل کرده‌اند [۷, ۹, ۱۱, ۱۵, ۱۶, ۱۷]. از الگوریتم فشار مینا سیمپل برای حل عددی استفاده شده است. تحلیل جریان دوفازی از روش اویلری-اویلری و برای آشفتگی از مدل $k-\varepsilon$ استاندارد استفاده شده است. برای تعیین تمام مشتقات موجود در معادلات حاکم از روش رو به باد مرتبه یکم استفاده شده است. برای رفتار غیردایمی روش ضمنی با گام زمانی 10^{-4} ثانیه به کار رفته است. گام زمانی به گونه‌ای انتخاب شده تا فرایندهای تشکیل، رشد و رها شدن حباب از روی سطح به درستی ارزیابی شود. فرایند حل تا وقتی ادامه می‌یابد که کمیت‌های مهم مثل شار حرارتی دیوار و جرم بخار تشکیل شده، مقادیری ثابت شده و موازنه بین آنها برقرار شده باشد (کل انتقال حرارت = جرم بخار تولیدی × گرمای نهان). از نرم‌افزار انسیس-فلوئنت، نسخه ۱۵، استفاده شده است. اجراها روی یک کامپیوتر شخصی با حافظه ۴ گیگا بایت و پردازشگر i7 انجام شده و به طور متوسط برای هر اجرا حدود ۲۰ ساعت زمان صرف شده است. دامنه حل مانند شکل (۱) است. برای شرایط مرزی، مرز پایین (سطح زیرین جسم) دمای سطح T_b معلوم، مرز بالا فشار معلوم (یک اتمسفر) و مرزهای چپ و راست به صورت متناوب در نظر گرفته شده‌اند. برای شرط اولیه، همه جا سرعت صفر و دمای اشباع فرض شده است.

۵- اعتبارسنجی

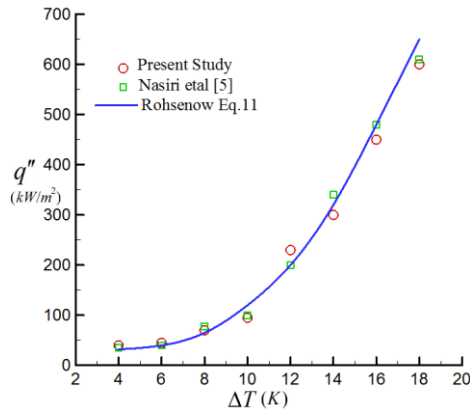
جوشش استخری روی یک صفحه تخت افقی توسط محققان مختلفی بررسی شده و نتایج قابل اعتمادی برای آن در دسترس است. برای جوشش استخری روی سطح تخت افقی، رابطه روزنو [۱۸] معادله (۱۱) معتبرترین رابطه در این مورد است.

$$T_w - T_{sat} = \frac{h_{fg} \times C_{sf}}{C_{pl}} \left[\frac{q''}{\mu_l h_{fg}} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

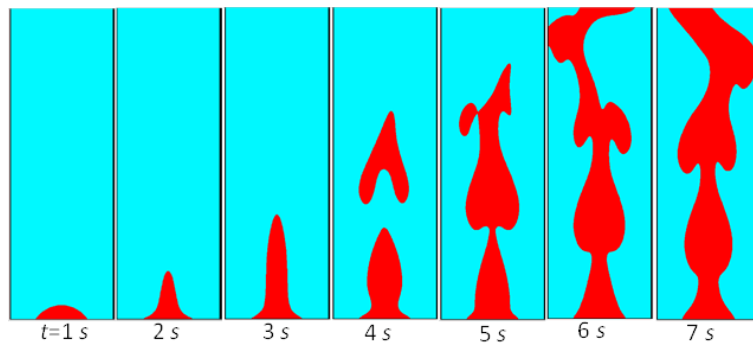
در رابطه (۱۱) همه خواص در دمای اشباع سیال است. همچنین در [۵] جوشش روی سطح تخت افقی نیز به طور آزمایشگاهی بررسی شده است. برای نمایش انتقال حرارت جوششی، مرسوم است که شار حرارتی سطح بر حسب اختلاف دمای دیوار و دمای اشباع (که به دمای مازاد یا فوق گرم معروف است) $\Delta T = T_{wall} - T_{sat}$ بیان شود. در شکل (۳) نتایج جوشش استخری روی سطح تخت افقی نشان داده شده است. با افزایش دمای سطح، شار حرارتی افزایش یافته است. این افزایش مطابق رابطه روزنو، رابطه (۱۱)، تقریباً با توان سوم دمای مازاد ارتباط دارد. همان طور که در شکل (۳) دیده می‌شود، اختلاف نتایج شبیه‌سازی عددی در مقاله حاضر با رابطه روزنو و نتایج آزمایشگاهی [۵] کمتر از ۱۰٪ بوده و حکایت از اعتبار قابل قبول برای فرایند شبیه‌سازی عددی است.

در شکل (۴)، توزیع کسر حجمی در هفت ثانیه نخست شبیه‌سازی نشان داده شده است. تشکیل حباب، صعود ستون حباب و جدا شدن آن در شکل (۴) نشان داده شده است. در شکل (۵) خطوط جریان در زمان ۳ ثانیه نشان داده شده است. بیشترین مقدار سرعت در وسط ستون حباب است. در شکل (۶) تغییرات مکانی کسر

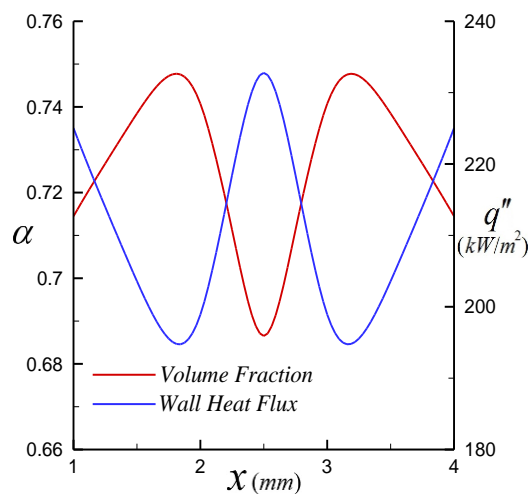
حجمی و شار حرارتی روی سطح دیوار در زمان ۳ ثانیه نشان داده شده است. تغییرات کسر حجمی و شار حرارتی برعکس هم هستند. جایی که مایع بیشتری با سطح در تماس باشد، انتقال حرارت بیشتر (شار حرارتی بزرگ‌تر) خواهد بود. زیرا مایع تمایل به تغییر فاز دارد و گرمای زیادی را می‌تواند از سطح بگیرد.



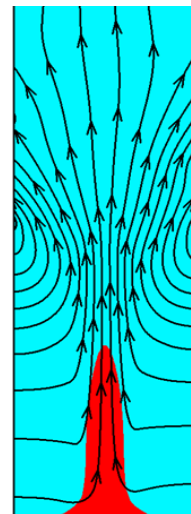
شکل ۳- نتایج شبیه‌سازی عددی در مقاله حاضر با رابطه روزنو [۱۸] و نتایج آزمایشگاهی [۵]



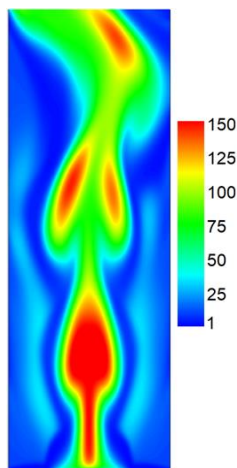
شکل ۴- توزیع کسر حجمی در هفت ثانیه نخست شبیه‌سازی



شکل ۶- تغییرات مکانی کسر حجمی و شار حرارتی روی سطح دیوار در زمان ۳ ثانیه



شکل ۵- خطوط جریان در زمان ۳ ثانیه



شکل ۷- توزیع نسبت لزجت آشفته به لزجت مولکولی در زمان ۷ ثانیه

در شکل (۷) توزیع نسبت لزجت آشفته به لزجت مولکولی در زمان ۷ ثانیه نشان داده شده است. با گذشت زمان و حرکت درهم حباب‌ها، آشفتگی جریان بیشتر شده است. بیشترین مقدار آشفتگی در میان ستون حباب‌ها است.

۶- بررسی شبکه محاسباتی

برای اطمینان از مناسب بودن شبکه محاسباتی انتخاب شده، لازم است تا در حساس‌ترین شرایط، این شبکه بررسی گردد. در این مقاله، بیشترین دمای مازاد مورد مطالعه ۱۸ کلوین است. وجود گوشه تیز در شیار مثلثی باعث می‌شود که این نوع شیار نسبت به شبکه محاسباتی حساس‌تر دانسته شود. شبکه محاسباتی از نوع با سازمان در نظر گرفته شده و سعی شده در نقاط حساس، تراکم سلول‌های محاسباتی بیشتر باشد. با کوچک‌تر شدن اندازه سلول‌های محاسباتی و افزایش تعداد آن‌ها، دقت نتایج افزایش یافته و زمان محاسبات نیز بیشتر می‌شود. بهترین شبکه آن است که تغییر محسوسی در نتایج، نسبت به شبکه کوچک‌تر دیده نشود. در جدول (۱) نتایج مربوط به چهار نوع شبکه نوشته شده است. شار حرارتی روی سطح به‌عنوان کمیت مهم مورد نظر انتخاب شده است.

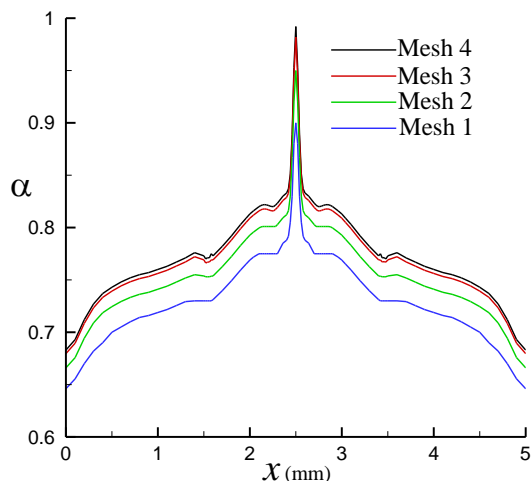
۷- جوشش روی سطح شیاردار

سه سطح شیاردار، با شیارهای نشان داده شده در شکل (۲) بررسی شده است. در شکل (۹) تغییرات شار حرارتی بر حسب دمای مازاد برای هر سه نوع سطح شیاردار نشان داده شده است.

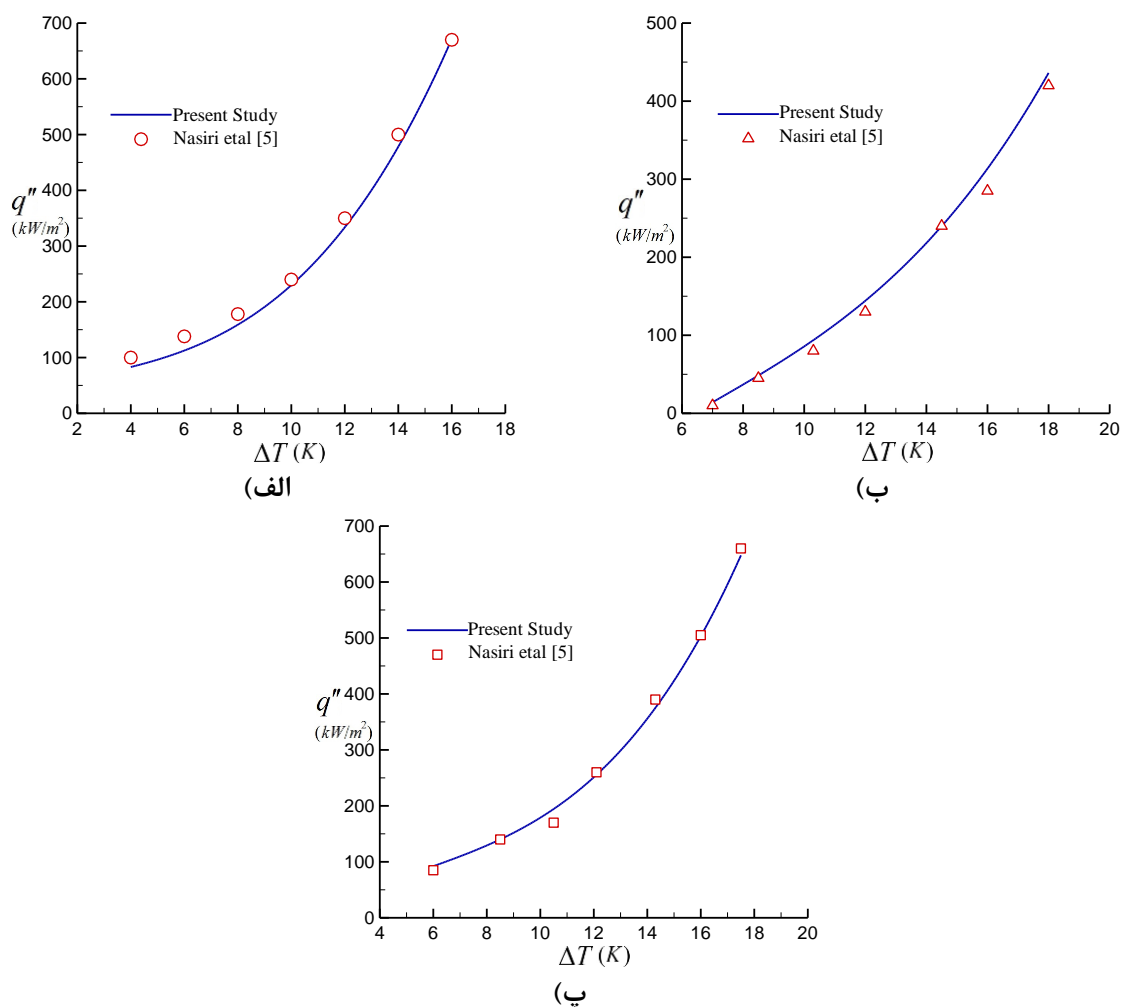
جدول ۱- تأثیر اندازه شبکه محاسباتی بر شار حرارتی برای شیار مثلثی $\Delta T = 18 K$

ردیف	کمترین اندازه سلول (mm)	تعداد کل سلول‌ها	شار حرارتی سطح (kW/m^2)
۱	۰/۱	۳۲۰۰	۴۹۰
۲	۰/۰۸	۸۵۸۰	۴۵۷
۳	۰/۰۶	۱۴۴۰۰	۴۴۰
۴	۰/۰۴	۲۱۳۴۰	۴۴۰

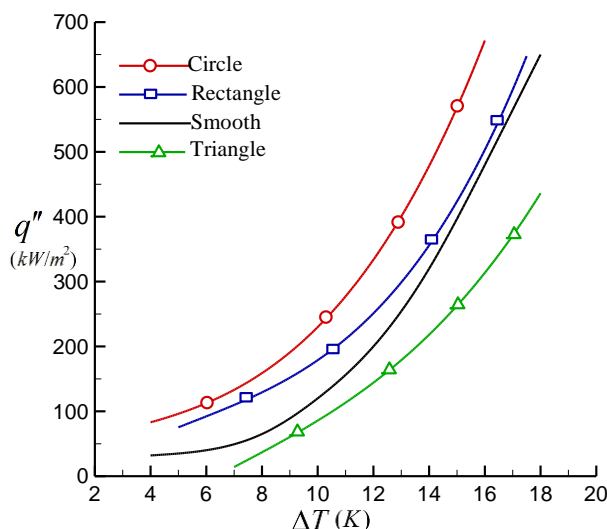
همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج کار حاضر برای هر سه نوع شیار مورد بررسی تطابق خوبی داده‌های آزمایشگاهی در [۵] دارد. در شکل (۱۰) مقایسه‌ای بین تغییرات شار حرارتی و دمایی مازاد برای سطح صاف و سه سطح شیاردار نشان داده شده است.



شکل ۸- تغییرات کسر حجمی بخار روی سطح برای چهار اندازه شبکه



شکل ۹- تغییرات شار حرارتی بر حسب دمایی مازاد برای هر سه نوع سطح شیاردار الف-دایره ای ب-مثلثی پ- مستطیلی

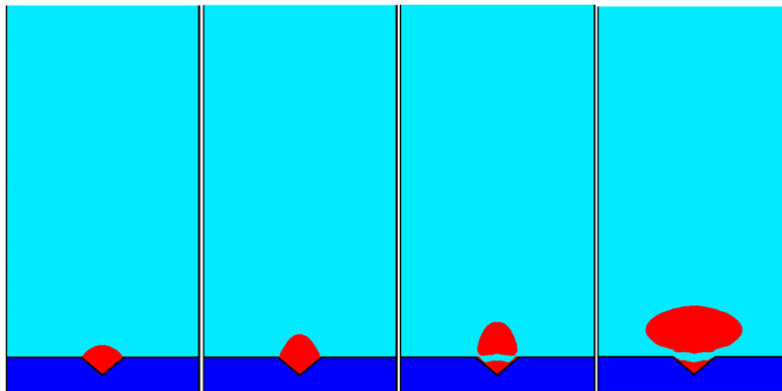


شکل ۱۰- مقایسه‌ای بین تغییرات شار حرارتی و دمای مازاد برای سطح صاف و سه سطح شیاردار

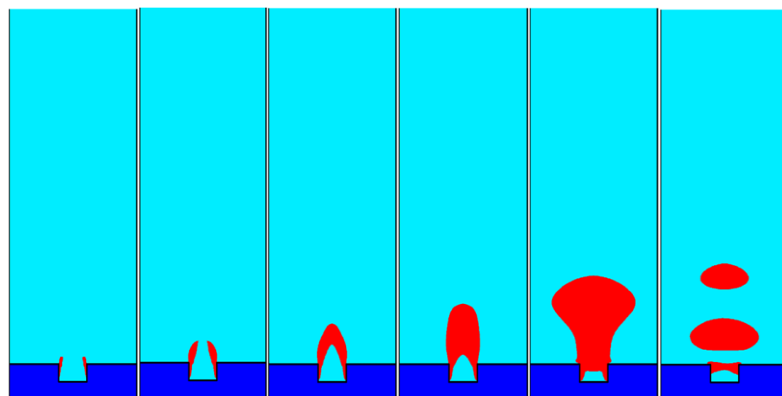
در مقدار ΔT یکسان، سطح با شیار دایره‌ای و مستطیلی شار حرارتی بیشتری نسبت به سطح صاف داشته است. در مقادیر ΔT کم، در سطح صاف تغییرات شار حرارتی آهسته‌تر است ولی برای سطوح شیاردار، تغییرات شار حرارتی شدیدتر است. برای ΔT های بزرگ، اختلاف شار حرارتی برای سطح صاف و سطح شیاردار مستطیلی کمتر می‌شود. این موضوع برای سطح شیاردار مثلثی برعکس است. در شکل (۱۱)، شکل‌گیری حباب در سطح شیاردار مثلثی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، لایه‌ای از بخار روی قسمت پایین شیار وجود دارد. با توجه به اینکه ضریب رسانش بخار آب کمتر از مایع آب است، وجود این لایه بخار مانند یک مقاومت گرمایی عمل کرده و انتقال حرارت از سطح شیار به مایع آب را کمتر می‌کند. در شکل (۱۲)، شکل‌گیری حباب در سطح شیاردار مستطیلی نشان داده شده است. لایه بخار از دیواره‌های عمودی شیار مستطیلی، شکل گرفته و پس از به هم پیوستن این دو لایه بخار، حباب شکل ایجاد شده است. به نظر می‌رسد که دیواره افقی شیار مستطیلی نقش کمتری در ایجاد بخار دارد. در شکل (۱۳) شکل‌گیری حباب در سطح شیاردار دایره‌ای نشان داده است.

در این حالت نیز لایه بخار از لبه شیار دایره‌ای ایجاد شده و پس از به هم پیوستن، حباب کامل ایجاد شده است. حرکت ریز حباب‌ها روی سطح منحنی شیار دایره‌ای راحت‌تر از شیار مستطیلی است. به همین علت شار حرارتی سطح شیاردار دایره‌ای بیشتر از سطح شیاردار مستطیلی است. در حقیقت حرکت ریز حباب‌ها روی کل سطح شیار دایره‌ای رخ داده است در صورتی که برای سطح شیاردار مستطیلی، فقط دیواره‌های عمومی شیار در ایجاد ریز حباب‌ها نقش دارد. اندازه کل شیار دایره‌ای ۳/۴۱ میلی‌متر و برای شیار مستطیلی اندازه دو دیواره عمودی ۲ میلی‌متر است. بزرگ‌تر بودن سطح مؤثر (سطح ایجادکننده ریز حباب‌ها) در شیار دایره‌ای نسبت به شیار مستطیلی نیز می‌تواند علتی بر افزایش انتقال حرارت در سطح شیار دایره‌ای نسبت به مستطیلی باشد. در اکثر پژوهش‌های انجام گرفته در مورد جوشش، شار حرارتی بر حسب اختلاف دمای مازاد گزارش شده است (شبهه شکل (۱۰)). اگر شار حرارتی روی سطح، عامل تنظیم‌کننده خارجی باشد، از شکل (۱۰) نتیجه‌گیری می‌شود که سطح با شیار دایره‌ای دمای سطح کمتری دارد. اگر دمای سطح، عامل تنظیم‌کننده خارجی باشد، سطح با شیار مثلثی کمترین شار حرارتی را ایجاد کرده است. با توجه به ابعاد

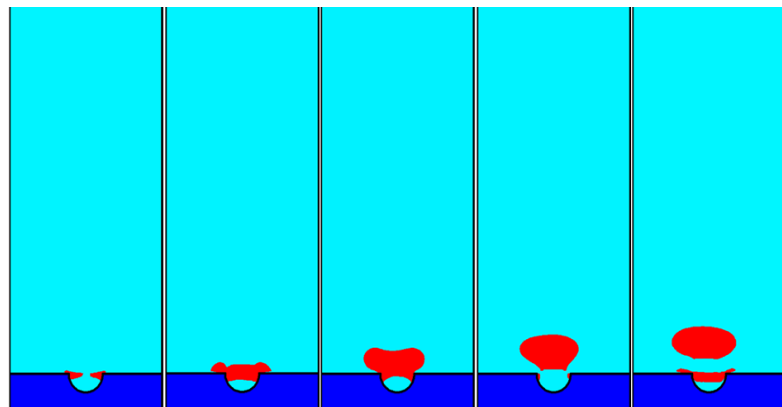
شیارها، سطوح شیاردار مساحت بیشتری نسبت به سطوح صاف دارد. این افزایش سطح برای شیار مستطیلی ۴۰ درصد، شیار دایره‌ای ۲۳ درصد و شیار مثلثی ۱۷ درصد است (با توجه به ابعاد نشان داده شده در شکل (۲)). با توجه به شکل (۱۰)، سطح با شیار مثلثی به‌طور میانگین حدود ۳۷ درصد شار حرارتی کمتری نسبت به سطح صاف دارد. میانگین افزایش شار حرارتی با شیار مستطیلی حدود ۵۰ درصد و سطح با شیار دایره‌ای حدود ۹۰ درصد، نسبت به سطح صاف است. اگر کل انتقال حرارت ارزیابی شود (کل انتقال حرارت = شار حرارتی \times مساحت سطح)، برای شیار مثلثی حدود ۲۰ درصد کاهش، شیار مستطیلی ۹۰ درصد افزایش و شیار دایره‌ای حدود ۱۱۰ درصد افزایش نسبت به سطح صاف داشته است.



شکل ۱۱- شکل‌گیری حباب در سطح شیاردار مثلثی



شکل ۱۲- شکل‌گیری حباب در سطح شیاردار مستطیلی



شکل ۱۳- شکل‌گیری حباب در سطح شیاردار دایره‌ای

۸- نتیجه گیری

در این مقاله جوشش استخری روی یک سطح افقی، شبیه‌سازی عددی شده است. ساختار هندسی سطح به صورت صاف، با شیار مستطیلی، شیار مثلثی و شیار دایره‌ای در نظر گرفته شده است. مهم‌ترین نتایج این پژوهش عبارت‌اند از:

- با استفاده از روش اویلری-اویلری برای شبیه‌سازی جریان دوفازی جوشش، می‌تواند نتایج با دقت قابل قبولی داشته باشد.
- به علت تجمع بخار در پایین شیار مثلثی، سطح با شیار مثلثی شار حرارتی کمتر داشته است. به طور میانگین، سطح با شیار مثلثی حدود ۳۷ درصد شار حرارتی کمتری نسبت به سطح صاف دارد.
- شیار مستطیلی و دایره‌ای، شار حرارتی بیشتری نسبت به سطح صاف داشته‌اند. به طور میانگین، برای سطح با شیار مستطیلی حدود ۵۰ درصد و برای سطح با شیار دایره‌ای حدود ۹۰ درصد شار حرارتی بیشتر از سطح صاف است.
- از نظر کل انتقال حرارت، سطح با شیار مثلثی حدود ۱۸ درصد کمتر، و سطح با شیار مستطیلی حدود ۹۰ درصد بیشتر و سطح با شیار دایره‌ای حدود ۱۱۰ درصد بیشتر از سطح صاف است.

مراجع

- [1] Das, A., Das, P., and Saha, P., "Some Investigations on the Enhancement of Boiling Heat Transfer from Planer Surface Embedded with Continuous Open Tunnels", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 8, pp. 1422-1431, (2010).
- [2] Zhong, D., Meng, J., Li, Z., and Guo, Z., "Experimental Study of Saturated Pool Boiling from Downward Facing Surfaces with Artificial Cavities", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 68, pp. 442-451, (2015).
- [3] Gerardi, C., Buongiorno, J., Hu, L., and McKrell, T., "Infrared Thermometry Study of Nanofluid Pool Boiling Phenomena", *Journal of Nano Scale Research Letter*, Vol. 6, pp. 232-49, (2011).
- [4] Liang, G., and Mudawar, I., "Review of Pool Boiling Enhancement with Additives and Nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 124, pp. 423-453, (2018).
- [5] Nasiri, S., Talebi, S., and Salimpour, M., "The Effect of Grooved Surfaces on Pool Boiling Heat Transfer of Water and Water Nanofluid", *Mechanical Engineering Modares*, Vol. 5, pp. 490-500, (2018).
- [6] Yeoh, G.H., and Tu, J., "*Computational Techniques for Multiphase Flows*", 2nd Edition Elsevier, Oxford, (2019).
- [7] Aminfar, H., Mohammadpourfard, M., and Sahraro, M., "Numerical Simulation of Nucleate Pool Boiling on the Horizontal Surface for Nanofluid using Wall Heat Flux Partitioning Method", *Computers and Fluids*, Vol. 66, pp. 29-38, (2012).

- [8] Ma, X., and Cheng, P., “3D Simulations of Pool Boiling above Smooth Horizontal Heated Surfaces by a Phase Change Lattice Boltzmann Method”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 131, pp. 1095–1108, (2019).
- [9] Gong, S., and Cheng, P., “Two Dimensional Mesoscale Simulations of Saturated Pool Boiling from Rough Surfaces Part II: Bubble Interactions above Multicavities”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 100, pp. 938-948, (2016).
- [10] Jiansheng, W., Mengzhen, D., and Xueling, L., “Numerical Simulation of Pool Boiling with Special Heated Surfaces”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 130, pp. 460–468, (2019).
- [11] Kamel, M., Alagha, M., Lezsovits, F., and Mahian, O., “Simulation of Pool Boiling of Nanofluids by using Eulerian Multiphase Model”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 142, pp. 493–505, (2020).
- [12] *ANSYS Fluent Theory Guide*, Release 15.0, ANSYS Inc., Canonsburg, (2013).
- [13] Troshko, A., and Hassan, Y., “A Two-equation Turbulence Model of Turbulent Bubbly Flow”, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 22, No. 11, pp. 1965–2000, (2001).
- [14] Kurul, N., and Podowski, M.Z., “Multidimensional Effects in Forced Convection Subcooled Boiling, Proceedings of the 9th International Heat Transfer Conference”, August 21-26, Jerusalem, Israel, (1990).
- [15] Mohammadpourfard, M., Aminfar, H., and Sahraro, M., “Numerical Simulation of Nucleate Pool Boiling on the Horizontal Surface for Ferrofluid under the Effect of Nonuniform Magnetic Field”, *Heat Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 1167–1176, (2014).
- [16] Cheng, P., Zhang, C., and Gong, S., “Lattice Boltzmann Simulations of Macro/Microscale Effects on Saturated Pool Boiling Curves for Heated Horizontal Surfaces”, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 139, No. 11, pp. 110801, (2017).
- [17] Chang, X., Huang, H., Cheng, Y., and Lu, X., “Lattice Boltzmann Study of Pool Boiling Heat Transfer Enhancement on Structured Surfaces”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 139, pp. 588–599, (2019).
- [18] Rohsenow, W.M., “A Method of Correlating Heat Transfer Data for Surface Boiling of Liquids”, *Transaction ASME*, Vol. 74, pp. 969-976, (1952).

فهرست نمادهای انگلیسی

C_p : گرمای ویژه $J/kg.K$

F_D : نیروی درگ N

F_L : نیروی لیفت N

F_{TD} : نیروی پراکندگی آشفته N

F_{VM} : نیروی جرم مجازی N

F_{wall} : نیروی دیوار N

g : شتاب ثقل زمین $= 9.81 \text{ m/s}^2$

h : انتالپی kJ/kg

h_{fg} : گرمای نهان kJ/kg

P : فشار kPa

q'' : شار حرارتی W/m^2

T : دما K

V : سرعت m/s

نمادهای یونانی

α : کسر حجمی بخار

Γ : شدت جرم بخار تولیدی در سطح مشترک $kg/s.m^2$

λ : ضریب هدایت حرارتی $W/m.K$

μ : لزجت $N.s/m^2$

ρ : چگالی kg/m^3

σ : ضریب کشش سطحی N/m

$\bar{\tau}$: تنش برشی kPa

زیرنویس ها

l : مربوط به فاز مایع

ϑ : مربوط به فاز بخار

بالانویس ها

I : مربوط به سطح مشترک مایع-بخار

t : مربوط به آشفتگی

Abstract

Boiling is used in processes with high heat transfer rate given the large amount of heat flux involved in the phenomenon. Devising a groove on the surface can improve the bubble formation and increase the heat transfer of the boiling. Accordingly, the pool boiling phenomenon on a horizontal surface is numerically simulated using the Eulerian-Eulerian method in this study. Four surfaces: smooth, with rectangular groove, with triangular groove, and with circular groove are examined to this end. Numerical simulation results are compared with available experimental data. The results indicate that the surfaces with rectangular and circular grooves render approximately 50 and 90% more heat flux than the smooth surface, respectively. However, the surface with a triangular groove rendered approximately 37% less heat flux than the smooth surface.