

شبیه‌سازی دو بعدی فرآیند جوشش فیلمی روی هندسه‌های پیچیده به روش ردیابی جبهه

امیر صداقت کیش، سعید مرتضوی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۰ مرداد ۱۳۹۶
بازنگری: ۲۴ مهر ۱۳۹۶
پذیرش: ۸ آبان ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۱۲ آبان ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

جوشش فیلمی
روش ردیابی جبهه
هندسه‌های پیچیده
انتقال حرارت

چکیده: جوشش فیلمی کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف از جمله در مبدل‌های حرارتی دارد. شبیه‌سازی این پدیده جهت مطالعه انتقال حرارت مخصوصاً روی هندسه‌های پیچیده برای پیش‌بینی رشد و حرکت حباب‌های بخار حاصل از آن اهمیت بسیاری در صنایع دارد. برای ردگیری مرز مشترک فازهای مایع و بخار از روش ردیابی جبهه استفاده شده است. در این روش با در نظر گرفتن تعدادی نقاط و المان‌های متصل به هم، مرز مشترک دو فاز مایع و بخار ساخته می‌شود. توسط این روش، جوشش فیلمی روی دو یا چندین استوانه شبیه‌سازی شده است. همچنین تأثیرات فاصله، زاویه و قطر برای دو استوانه مطالعه شده است. برای تعداد زیادی استوانه، تأثیرات آرایش‌های هندسی ساده و جابه‌جا شده و تعداد ردیف‌ها بررسی شده است و عدد ناسلت روی هر یک از استوانه‌ها به دست آمده است. فاصله بین دو استوانه تأثیر چندانی روی عدد ناسلت برای استوانه بالایی ندارد. در حالی که زاویه و قطر برای دو استوانه تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی عدد ناسلت برای استوانه بالایی دارد. در آرایش ساده برای چند استوانه، عدد ناسلت برای استوانه‌های بالایی تقریباً یکنواخت است و بیشتر از استوانه‌های پایینی است. در آرایش جابه‌جا شده، عدد ناسلت در استوانه‌های بالایی متفاوت بوده و یکنواخت نیست و مقدار آن نسبت به آرایش ساده بیشتر است.

۱- مقدمه

امروزه پیشرفت‌های زیادی در بهبود انتقال گرما در صنایع شیمیایی، صنایع نفتی و نیروگاه‌های تولید قدرت صورت گرفته است. محققان همچنان در تلاش هستند که ضریب انتقال حرارت را به بیشترین مقدار برسانند. این کار باعث افزایش راندمان، کاهش مصرف انرژی، کاهش مقدار مواد ساختی استفاده شده، کاهش هزینه سوخت و بهینه‌سازی فضای مورد استفاده برای ساخت مبدل‌های حرارتی می‌شود. جوشش فیلمی در بسیاری از صنایع مخصوصاً در نیروگاه‌ها در قسمت مبدل‌های حرارتی مثل بویلرها یا در بسیاری از سیکل‌های تبرید در قسمت اواپراتورها رخ می‌دهد. به طور کلی در هر جایی که انتقال حرارت رخ دهد و میزان انتقال حرارت در حدی باشد که یکی از سیال‌ها در دمایی بالاتر از دمای اشباع در فشار سیستم قرار گیرد بسته به میزان اختلاف دمای سطح در تماس با سیال با دمای اشباع سیال، جوشش فیلمی می‌تواند وجود داشته باشد.

جریان سیال در یک فاز در جابه‌جایی طبیعی دارای ضریب انتقال حرارت (با واحد) از مرتبه $10-50 \text{ W/m}^2\text{K}$ برای گازها و از مرتبه $200-1000 \text{ W/m}^2\text{K}$ برای مایعات است. در جابه‌جایی اجباری ضریب انتقال حرارت از مرتبه $100-150 \text{ W/m}^2\text{K}$ برای گازها و برای مایعات از مرتبه $1000-10000 \text{ W/m}^2\text{K}$ است؛ اما برای جریان‌های چند فازی مثل جوشش و میعان ضریب انتقال حرارت در برخی از موارد به $5000-40000 \text{ W/m}^2\text{K}$ هم می‌رسد؛ بنابراین این مقدار زیاد ضریب انتقال حرارت در فرآیند جوشش می‌تواند راه

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a.sedaghat@me.iut.ac.ir

حلی برای طراحان مبدل‌های حرارتی پیشنهاد کند [۱].

میونگ جی کنگ [۲] در سال ۲۰۰۵ به بررسی جوشش استخوری در بیرون و داخل یک لوله به قطر ۵۱mm پرداخت. او آزمایش را در فشار یک اتمسفر انجام داد و از سیال آب برای جوشش استفاده کرد. در قسمت بیرونی لوله ماکزیمم و مینیمم ضریب انتقال حرارت به ترتیب در زاویه $\theta=45^\circ$ و $\theta=180^\circ$ نسبت به امتداد افق مشاهده شد. مکانیزم اصلی جوشش در بیرون سطح لوله آشفته‌گی مایع و خیزش و به هم پیوستگی حباب‌ها بود که باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شد. هرچه شار حرارتی لوله بیشتر می‌شد این اثر هم افزایش می‌یافت. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با افزایش θ تا 45° درجه افزایش می‌یابد اما بعد از آن با افزایش θ تا 180° درجه کاهش پیدا می‌کند.

ژن لئو و یو هاو [۳] در یک بررسی تأثیر جنس سیال، جنس سطح و فاصله لوله‌ها در یک مجموعه لوله را بررسی کردند. آن‌ها همچنین تأثیر استفاده از تعداد زیادی از لوله‌ها را به جای استفاده از یک لوله مورد بررسی قرار دادند آن‌ها دیدند که ضریب انتقال حرارت در این حالت بهتر می‌شود. لوله‌های با سطح نورد شده بهترین ضریب انتقال حرارت را در شارهای متوسط در مقایسه با سایر سطوح از جمله لوله‌های با سطح صاف داشتند؛ زیرا سطوح نورد شده دارای تعداد زیادی حفره‌های کوچک روی بدنه هستند که در تشکیل نقاط هسته‌زا در جوشش هسته‌ای کمک می‌کنند. در این بررسی تأثیر جنس سیال هم بر ضریب انتقال حرارت در نظر گرفته شده است. آن‌ها نتیجه گرفتند که غلظت نمک تأثیر چندانی بر ضریب انتقال حرارت

به ویژگی‌های سیال و خواصی مربوط می‌شوند که در تعریف خود این اعداد بی‌بعد آمده است. آن‌ها با استفاده از توزیع نقاط به دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی و با منحنی عبوری از آن‌ها، این روابط را با خطاهایی که سعی شده کمینه باشند، بدست آوردند. در ادامه به چند نمونه از این روابط در جوشش فیلمی روی استوانه و صفحه تخت می‌پردازیم.

برنسون [۶] از جمله افرادی بود که با فرض ناپایداری هیدرودینامیکی و آزاد شدن حباب‌ها بر اثر آن و در نظر گرفتن فاصله بین حباب‌ها به بررسی جوشش فیلمی پرداخت. او با منظور کردن بیشترین طول موج ناپایداری، در جوشش فیلمی روی صفحه تخت، عدد ناسلت روی صفحه تخت را بر حسب پارامترهای بی‌بعد عدد جاکوب، گراشف و پراتل محاسبه نمود.

کلمینکو [۷] رابطه‌ای را برای هر دو رژیم جریان آرام و مغشوش در نظر گرفت. او عدد ناسلت را در نزدیکی صفحه تخت با رابطه‌ای بر حسب اعداد بی‌بعد گراشف، جاکوب و پراتل تخمین زد که البته آن رابطه دارای خطای نسبی ۲۰ درصد نسبت به نتایج آزمایشگاهی است.

برای جوشش فیلمی روی سطح یک استوانه نیز بروملی [۸] و برین و وست واتر [۹] و ساکورایی [۱۰ و ۱۱] نیز فرمول‌هایی را بر حسب پارامترهای بی‌بعد برای عدد ناسلت در سطح استوانه به دست آوردند که در قسمت نتایج برای صحت سنجی نتایج حل عددی از آن‌ها استفاده می‌شود.

از جمله کارهای عددی که می‌توان به آن در زمینه شبیه‌سازی عددی جوشش فیلمی روی استوانه اشاره کرد، شبیه‌سازی سه بعدی جوشش فیلمی بر روی یک استوانه است که توسط سان و دیر [۱۲] انجام شده است. آن‌ها با استفاده از روش لول ست^۱ و گسسته سازی اختلاف محدود معادلات مومنوم و انرژی به ردیابی مرز مشترک بخار و مایع پرداختند. آن‌ها تاثیرات گرانش و قطر استوانه را بر انتقال حرارت در اطراف استوانه بررسی کردند. علاوه بر این یوان و همکاران [۱۳] به شبیه‌سازی جوشش فیلمی بر روی یک استوانه به روش حجم سیال^۲ بر اساس ساختار مرزی خطی-تکه‌ای^۳ پرداختند. آن‌ها روش‌های خاصی را برای بهبود میدان سرعت ناپیوسته ناشی از تغییر فاز در نزدیکی مرز مشترک به کار بردند. بدین منظور از یک شبکه جابه‌جا شده دوتایی همراه با الگوریتم سیمپل^۴ برای حل میدان جریان استفاده کردند و در نهایت نتایج را با نتایج تجربی و تحلیلی مقایسه نمودند.

در این مقاله روش ردیابی جبهه به صورت مستقل جهت اعتبار سنجی برای شبیه‌سازی جوشش فیلمی روی هندسه ساده یعنی روی یک استوانه به صورت دو بعدی استفاده می‌شود. این روش توسط کد محاسباتی نوشته شده به زبان فرترن مورد استفاده قرار می‌گیرد. در واقع کارایی این روش برای پیش بینی عدد ناسلت روی سطح استوانه و شبیه‌سازی حرکت و خیزش حباب‌های بخار از اهداف اصلی این مقاله به شمار می‌آید. اکثر مطالعات عددی پیرامون این پدیده روی هندسه‌های ساده مانند یک استوانه یا روی

جابه‌جایی ندارد. همچنین مقایسه‌ای بین ضریب انتقال حرارت بین مجموعه لوله‌های نورد شده دارای سطح صاف با تک لوله‌های نورد شده دارای سطح صاف انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در شارهای حرارتی کمتر از 100 kW/m^2 ضریب انتقال حرارت برای مجموعه لوله‌های نورد شده بیشتر است.

در تحقیقی که توسط ژن لئو و یوهاو [۴] صورت گرفته است تأثیر فاصله بین لوله‌ها، فشار کاری آزمایش و همچنین موقعیت یا آرایش قرارگیری لوله‌ها را بر ضریب انتقال حرارت مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار داده است. همچنین بررسی‌ها نشان داده‌اند که یک فاصله بهینه وجود دارد که ضریب انتقال حرارت در آن بیشینه است. آن‌ها نتیجه گرفتند که هرگاه فاصله بین سطح تا سطح لوله‌ها بزرگتر یا مساوی 0.3 mm و انتقال حرارت مربوط به ناحیه جوشش هسته‌ای باشد، با افزایش فاصله مقدار ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد. آن‌ها تأثیر فاصله بین لوله‌ها را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند وقتی که فاصله بین لوله‌ها 0.3 mm است، نوع قرارگیری لوله‌ها تأثیری بر مقدار ضریب انتقال حرارت ندارد؛ اما اگر فاصله بین لوله‌ها 1 mm باشد، مقدار ضریب انتقال حرارت روی لوله بالایی بیشتر از لوله پایینی است که علت آن خیزش حباب‌ها از لوله‌های پایینی و برخوردشان به لوله‌های بالایی است. هرچه ارتفاع لوله‌ها از لوله‌های پایینی بیشتر باشد، به هم آمیختگی سیال که ناشی از حرکت و برخورد حباب‌های پایینی است، بیشتر شده و مقدار ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

همچنین تأثیر فشار آزمایش بر مقدار ضریب انتقال حرارت بررسی شد. آن‌ها نشان دادند، وقتی که فاصله بین لوله‌ها 0.3 mm است، تغییر فشار تأثیر چندانی بر مقدار ضریب انتقال حرارت ندارد؛ اما اگر فاصله بین لوله‌ها 1 mm باشد مشاهده می‌شود که با افزایش فشار مقدار ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

از جدیدترین کارهای صورت گرفته می‌توان بررسی میونگ جی کنگ [۵] را نام برد. او در آزمایش خود به بررسی تأثیر فاصله دو لوله و شار حرارتی هر یک از لوله‌ها بر مقدار ضریب انتقال حرارت پرداخته است. تأثیر واضح دو لوله بر مقدار ضریب انتقال حرارت هنگامی مشهود است که شار حرارتی لوله پایینی بیشتر از لوله بالایی و شار حرارتی لوله بالایی کمتر از 60 kW/m^2 باشد. از حباب‌هایی که در حالت‌های مختلف از روی سطوح لوله‌ها برمی‌خیزند، عکس‌برداری شد. وقتی که شارهای حرارتی کم باشند حباب‌های بزرگتر روی لوله بالایی مشاهده می‌شود. آن‌ها دریافتند که هرچقدر شارهای حرارتی بیشتر می‌شوند حباب‌ها بزرگتر می‌شوند.

پژوهش‌هایی که تاکنون ارائه گردید، در همه آن‌ها سیال مورد استفاده برای جوشش، آب بوده است و همه آزمایش‌ها در فشار یک بار یا فشار محیط انجام شده‌اند. دسته دیگری از تحقیق‌های انجام شده به صورت نیمه تجربی هستند. در این مطالعات از روابط تحلیلی تواما با نتایج آزمایشگاهی روابطی برای عدد ناسلت بر حسب اعداد بی‌بعد گراشف، جاکوب و پراتل ارائه می‌شود. در واقع مقدار انتقال حرارت با استفاده از این پارامترهای بی‌بعد فقط

- 1 Level-set
- 2 Volume of fluid
- 3 Piecewise linear interface construction (PLIC)
- 4 SIMPLE

و انرژی به صورت زیر است:

$$\rho_l(\mathbf{u}_l - \mathbf{u}_f) \cdot \mathbf{n} = \rho_v(\mathbf{u}_v - \mathbf{u}_f) \cdot \mathbf{n} = \dot{m} \quad (۴)$$

$$\dot{m}(\mathbf{u}_v - \mathbf{u}_l) = (\tau_v - \tau_l) \cdot \mathbf{n} - (P_v - P_l)I \cdot \mathbf{n} + \sigma \kappa \mathbf{n} \quad (۵)$$

$$\dot{m}h_{fg} = \dot{q} = k_v \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_v - k_l \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_e \quad (۶)$$

در این معادلات \mathbf{u}_v و \mathbf{u}_l سرعت سیال به ترتیب در فاز مایع و بخار است و \mathbf{u}_f سرعت مرز مشترک و \dot{m} نرخ تبخیر در مرز مشترک است. در به دست آوردن معادله (۶) فرض شده است که دمای مرز مشترک T_f با دمای اشباع در فشار داده شده برابر است؛ یعنی $T_f = T_{sat}(P_{sys})$.

به طور کلی هر کدام از معادلات (۱) تا (۳) باید در هر کدام از فازها و معادلات (۴) تا (۶) باید در مرز مشترک حل شوند. با در نظر گرفتن شرایط جهش در فصل مشترک، معادلات مومنتوم و انرژی به صورت زیر در می‌آیند:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} = -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) + \sigma \int \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_f) \kappa_f \mathbf{n}_f dA_f \quad (۷)$$

$$\frac{\partial \rho c T}{\partial t} + \nabla \cdot \rho c \mathbf{u} T = \nabla \cdot k \nabla T - \left[1 - (c_v - c_l) \frac{T_{sat}}{h_{fg}} \right] \int \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_f) \dot{q}_f dA_f \quad (۸)$$

در اینجا δ تابع دلتای دو بعدی یا سه بعدی است که از ضرب متوالی تابع دلتای یک بعدی به دست می‌آید. \mathbf{x} نقطه‌ای دلخواه در دامنه حل و \mathbf{x}_f نقطه‌ای دلخواه بر روی مرز مشترک است. (همه متغیرها با اندیس f مربوط به مرز مشترک اند)

در گذشته با استفاده از روش تصویرسازی مرتبه دوم این معادلات بدون در نظر گرفتن تغییر فاز حل می‌شد. اگر هیچ گونه تغییر فازی وجود نداشته باشد، معادله (۱) به $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$ تبدیل می‌شود که مخصوص جریان‌های غیرقابل تراکم است. در این جا تراکم ناپذیری در هر کدام از فازها باید اعمال شود، اما در مرز مشترک به دلیل تغییر فاز تراکم پذیری وجود دارد، اگرچه هنوز امکان پذیر است که معادله (۹) را به شکلی بنویسیم که سازگار با روش تصویرسازی باشد، اما میدان سرعت را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_v I + \mathbf{u}_l (1 - I) \quad (۹)$$

در این جا I تابع اندیکاتوری است که دارای مقدار یک در فاز بخار و مقدار صفر در فاز مایع است. گرادیان تابع اندیکاتوری در همه جا صفر است به جز در مرز مشترک؛ بنابراین می‌توان این گرادیان را به صورت تابعی از موقعیت مرز مشترک نوشت:

$$\nabla I = \int \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_f) \mathbf{n}_f dA_f \quad (۱۰)$$

صفحه تخت به صورت دو بعدی یا سه بعدی انجام گرفته است. بررسی تأثیر جوشش فیلمی روی هندسه‌های پیچیده‌تر تنها به مطالعات تحلیلی یا آزمایشگاهی محدود می‌شود. مطالعات تحلیلی دارای فرض‌های ساده‌سازی زیادی هستند و همچنین بررسی‌های آزمایشگاهی نیز هزینه‌های بسیاری را ایجاد می‌کنند. این تحقیق برای اولین بار به صورت عددی و با استفاده از روش ردیابی جبهه، توسط کد محاسباتی نوشته شده به زبان فرترن اقدام به شبیه‌سازی جوشش فیلمی روی تعداد زیادی استوانه یا لوله (هندسه‌های پیچیده) به صورت دو بعدی کرده است و به بررسی تأثیرات انتقال حرارت در رژیم جوشش فیلمی و همچنین مطالعه‌ای روی اندرکنش رفتار مرزهای مشترک پرداخته است. در واقع پیشرفت و توسعه کد محاسباتی به کار گرفته شده، سبب شده است که این روش به عنوان روشی جامع برای برای شبیه‌سازی جوشش فیلمی حتی در هندسه‌های پیچیده تبدیل شود.

۲- فرمول بندی ریاضی و روش حل عددی

روش حل عددی حاکم بر این پروژه روش ردیابی جبهه^۱ است. در این روش سطح مشترک به وسیله یک سری نقاط معین معلوم می‌گردد. در طول حل، این نقاط به روش لاگرانژی دنبال می‌شود. در این روش معمولاً سلول‌های محاسباتی برای حل میدان سرعت و فشار از یک شبکه ثابت سازمان یافته ساده مربعی استفاده می‌شود و به صورت اویلری در نظر گرفته می‌شوند. در واقع این روش هر دو خصوصیات روش‌های اویلری و لاگرانژی را دارد. حسن روش ردیابی جبهه آن است که انحنای به مراتب کوچکتر از دقت سلول‌های محاسباتی را می‌تواند مدل نماید.

در این قسمت تمامی معادلات از جمله معادله انرژی و جمله‌هایی که مخصوص پدیده جوشش فیلمی هستند و در معادلات بقای جرم و مومنتوم و انرژی به کار می‌روند، در نظر گرفته می‌شوند. همچنین نحوه ایجاد جسم جامد و برهم کنش جریان با مرزهای جامد مساله به صورت کامل توضیح داده خواهد شد. به طور کلی معادلات بقا شامل بقای جرم، مومنتوم و بقای انرژی در جریان‌های جوششی به صورت زیر نوشته می‌شوند [۱۴].

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} = -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) + \mathbf{f}_m \quad (۲)$$

$$\frac{\partial \rho c T}{\partial t} + \nabla \cdot \rho c \mathbf{u} T = \nabla \cdot k \nabla T + f_e \quad (۳)$$

در اینجا از جمله اتلاف ویسکوز در معادله انرژی به دلیل کوچک بودن مشتق سرعت نسبت به مکان صرف نظر می‌شود. معادلات فوق در هر کدام از فازها معتبراند، اما شرط پرش در مرز مشترک برای معادله جرم و مومنتوم

ترتیب میان‌یابی می‌شوند. این میان‌یابی در فاصله‌ای از Δ در فازهای مایع و بخار صورت می‌گیرد. مطالعات عددی نشان می‌دهند که نتایج حل عددی به مقدار Δ وقتی که $h \leq \Delta \leq 2h$ حساس نیستند [۱۴]. در این جا h اندازه شبکه محاسباتی است. پس از یافتن \dot{q}_f در آخرین جمله معادله (۸) این مقدار توسط تابع توزیع پس‌کین روی نقاط شبکه ثابت توزیع می‌شود.

برای یافتن موقعیت مرز مشترک باید از معادله زیر نسبت به زمان انتگرال بگیریم:

$$\frac{dx_f}{dt} = u_n n_f \quad (17)$$

که در آن مؤلفه عمودی سرعت مرز مشترک توسط معادله (۴) و (۶) به دست می‌آید:

که در آن $u_n = u_f \cdot n$ است. مؤلفه عمودی سرعت مرز مشترک توسط معادله (۴) و (۶) به دست می‌آید:

$$u_n = \frac{1}{2}(u_v + u_l) \cdot n - \frac{\dot{q}_f}{2h_{fg}} \left(\frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_l} \right) \quad (18)$$

همانطور که از معادله (۱۸) مشخص است، مؤلفه عمودی سرعت مرز مشترک از دو قسمت تشکیل شده است. قسمت اول مربوط به جابه‌جایی است و قسمت دوم مربوط به تغییر فاز است؛ بنابراین با داشتن سمت راست معادله (۱۷) و یک انتگرال‌گیری از آن به سادگی موقعیت مرز مشترک در گام زمانی بعدی به دست می‌آید.

$$x_f^{n+1} = x_f^n + \Delta t u_n n_f \quad (19)$$

با داشتن موقعیت مرز مشترک در گام زمانی جدید، تابع اندیکاتوری I^{n+1} مشخص می‌شود و بر اساس آن خصوصیات سیال از جمله ρ^{n+1} ، μ^{n+1} ، k^{n+1} و c^{n+1} نیز در گام زمانی بعدی مشخص می‌شوند. همچنین با داشتن موقعیت مرز مشترک در ابتدای هر گام زمانی، جمله کشش سطحی نیز از معادله (۷) پیدا می‌شود. در معادله (۷) تابع انحنا κ وابسته به شکل مرز مشترک است. بعد از یافتن خواص در گام زمانی بعدی، فرم نیمه گسسته معادله انرژی به این صورت است:

$$\rho^n c^n \left(\frac{T^{n+1} - T^n}{\Delta t} \right) = A^n \quad (20)$$

در این جا A سمت راست معادله (۱۶) را نشان می‌دهد که دارای جمله جابه‌جایی، نفوذ و جمله چشمه \dot{q}_f است. در این معادله دما در گام زمانی بعدی به صورت \hat{T}^{n+1} نوشته شده است؛ بنابراین T^{n+1} باید داخل و روی مرز محدوده جامد اصلاح شود تا بتوان به درستی شرط مرزی دما روی سطح را اعمال نمود. بدین منظور برای مرز جامد تابع اندیکاتوری دیگری به نام S تعریف می‌شود که دارای مقدار صفر داخل مرز جامد و مقدار یک خارج از محدوده جامد است [۱۶]؛ بنابراین:

$$T^{n+1} = T_w (1-S) + \hat{T}^{n+1} S \quad (21)$$

با دیورژانس گرفتن از معادله (۹) و استفاده از معادله (۱۰) و با در نظر داشتن این نکته که:

$$\nabla \cdot u_v = \nabla \cdot u_l = 0 \quad (11)$$

خواهیم داشت:

$$\nabla \bar{u} = \int \delta(\bar{x} - \bar{x}_f) (\bar{u}_v - \bar{u}_l) \cdot \bar{n}_f dA_f \quad (12)$$

اختلاف سرعت فاز مایع و بخار را می‌توان با حذف کردن u_f از معادله (۴) به صورت تابعی از نرخ تبخیر نوشت. با در نظر داشتن این که $\dot{m} = \dot{q}_f / h_{fg}$ داریم:

$$(u_v - u_l) \cdot n = \frac{\dot{q}_f}{h_{fg}} \left(\frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_l} \right) \quad (13)$$

با جایگزینی این معادله در معادله (۱۲) معادله بقای جرم به این صورت در خواهد آمد:

$$\nabla \cdot u = \frac{1}{h_{fg}} \left(\frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_l} \right) \int \delta(x - x_f) \dot{q}_f dA_f \quad (14)$$

به طور کلی می‌توان گفت معادلاتی که باید حل شوند معادلات (۷) و (۸) و (۱۴) هستند. این معادلات توسط یک روش مرتبه دوم زمانی و مکانی روی یک شبکه جابه‌جا شده حل می‌شوند که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

شبیه‌سازی در مقاله حاضر به صورت دو بعدی صورت می‌گیرد. مرز مشترک توسط تعدادی از نقاط به المان‌های کوچکتری تقسیم می‌شود. در شروع هر گام زمانی باید تابع اندیکاتوری I مشخص باشد که I وابسته به x_f است. برای حل کردن معادله (۱۰) و به دست آوردن I با دیورژانس گرفتن معادله پواسون به شکل زیر به دست می‌آید:

$$\nabla^2 I = \nabla \cdot \int \delta(x - x_f) n_f dA_f \quad (15)$$

سمت راست این معادله با یافتن $n_f dA_f$ برای هر کدام از المان‌ها و توزیع آن‌ها روی شبکه ثابت توسط تابع توزیع پس‌کین، به دست می‌آید. این معادله توسط یک حلگر پواسون سریع حل می‌شود [۱۵]. خواص سیال از جمله چگالی، چسپندگی، ضریب هدایت گرمایی و ظرفیت گرمایی با استفاده از تابع اندیکاتوری محاسبه می‌شوند؛ به عبارت دیگر $\phi^n = \phi_v I^n + \phi_l (1 - I^n)$ که در آن ϕ هر کدام از خواص ترموفیزیکی یا انتقالی سیال هستند. جمله منبع حرارتی \dot{q}_f توسط معادله (۶) و با گسسته سازی مرتبه اول به صورت زیر تقریب زده می‌شود:

$$\dot{q}_f = \frac{1}{\Delta} [k_v (T_v - T_{sat}) - k_l (T_{sat} - T_l)] \quad (16)$$

که در آن T_v و T_l دمای مایع و بخار در نزدیکی مرز مشترک در طرف فاز مایع و فاز بخار هستند. T_{sat} دمای داده شده مرز مشترک است که دمای اشباع مایع در نظر گرفته می‌شود. T_v و T_l در $x_f = x_f + \Delta n_f$ و $x_f = x_f - \Delta n_f$ به

λ_c طول موج^۲ و λ_e طول موج بحرانی^۳ هستند و طبق معادله زیر به دست می‌آید:

$$\lambda_c = 2\pi \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_l - \rho_v)g}} \quad (28)$$

در طول موجی کمتر از λ_c هیچ‌گونه ناپایداری یا رشد حبابی وجود ندارد. برنسون [۶] توسط یک آنالیز خطی پایداری نشان داد که بیشترین حالت ناپایداری در طول موج λ_d اتفاق می‌افتد:

$$\lambda_d = \sqrt{3}\lambda_c \quad (29)$$

که λ_d خطرناک‌ترین طول موج ناپایداری^۴ است؛ بنابراین برای این که ناپایداری رایلی-تیلور یا رشد حباب‌ها به بیشترین حالت ممکن خود برسد، لازم است اندازه دامنه محاسباتی بزرگ‌تر از طول موج λ_d باشد.

اما برای جوشش فیلمی روی استوانه با توجه به تحقیقی که لینارد و ونگ [۱۹] انجام دادند، خطرناک‌ترین طول موج ناپایداری روی استوانه، λ_{cd} عبارت است از:

$$\lambda_{dc} = \frac{\lambda_d}{\sqrt{1 + \frac{2}{D^2}}} \quad (30)$$

$$\bar{D} = \frac{D}{L} \quad (31)$$

$$L = \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_l - \rho_v)g}} \quad (32)$$

در این رابطه D ، قطر استوانه و L ، طول مرجع به کار رفته برای بی‌بعدسازی است؛ بنابراین برای استوانه‌های با قطر کوچک و متوسط (نسبت به طول مرجع L) خطرناک‌ترین طول موج ناپایداری روی استوانه، λ_{cd} ، از خطرناک‌ترین طول موج ناپایداری روی صفحه تخت کوچک‌تر است؛ اما برای استوانه‌های با قطر بزرگ این دو با هم برابرند.

بنابراین در ادامه برای شبیه‌سازی‌هایی که انجام می‌شود، طول دامنه حل به گونه‌ای انتخاب می‌شود که متناظر با بیشترین شدت ناپایداری یا رشد و تکثیر حباب‌ها باشد؛ به عبارت دیگر در همه شبیه‌سازی‌های شامل یک استوانه، طول دامنه برابر با λ_d خواهد بود.

۳- نتایج شبیه‌سازی جوشش فیلمی روی یک استوانه

در این قسمت توسط معادلات و روش ردیابی جبهه که در بخش پیش کاملاً توضیح داده شد، پدیده جوشش فیلمی روی یک استوانه با قطر مشخص

به طور مشابه برای وارد کردن محدوده جامد در معادلات مومنتوم و اعمال شرایط مرزی عدم لغزش و عدم نفوذ در مرز جامد، از تابع اندیکاتور S استفاده می‌شود تا سرعت را در آن محدوده صفر کنیم. فرم نیمه گسسته معادله مومنتوم به صورت زیر است:

$$\frac{\rho^{n+1}u^{n+1} - \rho^n u^n}{\Delta t} = -\nabla P + B \quad (22)$$

در این معادله B شامل جمله‌های جابه‌جایی، نفوذ، نیروی گرانش و نیروی کشش سطحی است. با استفاده از روش تصویرسازی معادله فوق را به دو قسمت تقسیم می‌کنیم:

$$\frac{\rho^{n+1}u^{**} - \rho^n u^n}{\Delta t} = B \quad (23)$$

$$\frac{\rho^{n+1}u^{n+1} - \rho^{n+1}u^{**}}{\Delta t} = -\nabla P \quad (24)$$

در این معادلات u^{**} سرعتی است که از معادله (۲۳) محاسبه می‌شود و باید اصلاح شود تا سرعت را در داخل محدوده جامد صفر کند:

$$u^* = S u^{**} \quad (25)$$

در گام بعدی باید با دیورژانس گرفتن از معادله (۲۳)، معادله فشار را به دست آوریم اما باید به جای u^{**} فرم اصلاح شده آن را یعنی u^* را در آن قرار دهیم. در نتیجه:

$$\nabla \cdot \frac{1}{\rho^{n+1}} \nabla P = \frac{\nabla \cdot u^* - \nabla \cdot u^{n+1}}{\Delta t} \quad (26)$$

در معادله فوق به جای $\nabla \cdot u^{n+1}$ باید از معادله (۱۴) استفاده شود. معادله فشار حاصل توسط حلگر چندشبهه‌ای^۱ که توسط آدامز توسعه یافته حل می‌شود و برای به دست آوردن سرعت از معادله (۲۴) باید به جای ∇P از SVP استفاده شود.

در جوشش فیلمی روی صفحه تخت لایه‌ای از بخار که دارای چگالی کمتری است در زیر لایه مایع که دارای چگالی بیشتری است، با حضور نیروی گرانش و کشش سطحی قرار گرفته است؛ بنابراین تشکیل حباب‌های بخار و رها شدن آن در مایع بالایی نتیجه ناپایداری رایلی-تیلور است.

برای اولین بار بروملی [۸]، هاسلر و وست واتر [۱۷] و زوبر [۱۸] به صورت آزمایشگاهی مشاهده کردند فاصله نقاطی از لایه بخار که حباب‌ها به صورت پیوسته رشد می‌کنند و از یکدیگر جدا می‌شوند، دارای مقدار λ_c است که این مقدار می‌تواند به صورت زیر تغییر کند:

$$\lambda_c < \lambda_i < \sqrt{3}\lambda_c \quad (27)$$

- 2 Wavelength
- 3 Critical wavelength
- 4 The most dangerous wavelength

- 1 Multigrid

Gr ، Ja و Pr به ترتیب اعداد گراشف، جاکوب و پرانتل هستند. اندیس ν برای خواص بخار و اندیس l برای خواص مایع در نظر گرفته شده است. D نیز قطر استوانه است؛ بنابراین در کلیه شبیه‌سازی‌ها باید این مقادیر مشخص باشند. در واقع آن‌ها مشخصه‌های اصلی هر شبیه‌سازی هستند. در مورد کشش سطحی σ بایستی متذکر شد که این پارامتر طبق شرطی که در ناپایداری رایلی-تیلور وجود دارد، نقش خود را در به دست آوردن λ_d که با طول دامنه محاسباتی همواره برابر است، نمایان می‌سازد. در شبیه‌سازی حاضر این پارامترها دارای مقادیر زیر هستند:

$$Gr = 17.78, Ja = 0.064, Pr = 4.22$$

$$\frac{\rho_l}{\rho_v} = 4.78, \frac{\mu_l}{\mu_v} = 2.58, \frac{c_l}{c_v} = 0.546, \frac{k_l}{k_v} = 3.56 \quad (38)$$

همه مقادیر فوق بجز عدد گراشف، نزدیک به خواص آب اشباع در فشار ۱۶۹bar است. عدد گراشف پایین نشان‌دهنده سیال با چسپندگی بالا یا شتاب گرانشی پایین‌تر از شتاب گرانشی معمول، مثل آن چه در موتورهای موشک رخ می‌دهد، است. این مجموعه مقادیر به عنوان مبنای شبیه‌سازی قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که به جز اعداد گراشف و جاکوب بقیه پارامترها همواره در طول تحقیق برای همه شبیه‌سازی‌ها ثابت هستند. شکل ۱ مکان دقیق مرز مشترک و تابع اندیکاتوری را برای دو زمان مختلف ۵ و ۱۵ ثانیه نشان می‌دهد. لازم به ذکر است ابعاد دامنه به صورت $4\lambda_d \times \lambda_d$ است. مقدار λ_d در این شبیه‌سازی ۱/۳ متر است. همچنین شبکه یکنواخت به کار برده شده دارای تراکم 12×12 است.

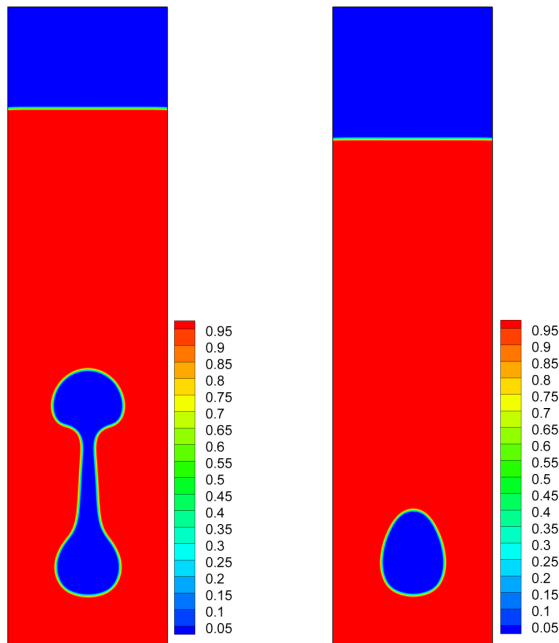


Fig. 1. Contour of Indicator function in $t=5s$ (left) and $t=15s$ (right)

شکل ۱: کانتور تابع اندیکاتوری به ترتیب از چپ به راست برای دو زمان مختلف ۵ و ۱۵ ثانیه

به صورت دو بعدی شبیه‌سازی می‌شود. همواره در کلیه شبیه‌سازی‌ها سرعت روی مرزهای جامد صفر و دما ثابت است. البته مقدار دما می‌تواند در هر شبیه‌سازی تغییر کند. مطابق شکل ۱ دامنه حل عددی به صورت مستطیل است و شرایط مرزی روی آن بدین صورت است که در مرزهای سمت چپ و راست شرط مرزی پریودیک اعمال می‌شود. در مرز پایین شرط مرزی دیواره و در مرز بالا شرط مرزی جریان خروجی نیز اعمال می‌شود؛ اما شرایط اولیه حل عددی بدین گونه است که یک لایه بخار، اطراف استوانه دما ثابت را احاطه کرده است. شعاع این لایه بخار دارای یک انحنای کوچک است که بتواند حباب‌های بخار را تولید کند. در واقع با توجه به این که جوشش فیلمی نتیجه ناپایداری رایلی-تیلور است، برای شروع این ناپایداری باید یک اختلال کوچک توسط یکی از فازها به سمت فاز دیگر صورت بگیرد. شعاع این لایه بخار به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$r(y) = r_0 + \varepsilon \cos\left(\frac{2\pi y}{W_x}\right) \quad (33)$$

r_0 در واقع شعاع متوسط لایه بخار و ε ضریب اختلال و برابر 0.01 است. W_x ، طول دامنه محاسباتی است. همچنین یک لایه بخار دیگر در نزدیکی انتهای بالایی دامنه در نظر گرفته شده است تا حباب‌های ایجاد شده بتوانند وارد لایه بخار بالایی شوند. مطابق با شکل ۱، رنگ قرمز مشخص کننده فاز مایع و آبی مشخص کننده فاز بخار است. دمای اولیه برای هر دو فاز ثابت و برابر T_{sat} (دمای اشباع) در نظر گرفته شده است. بقیه کمیت‌ها از جمله مولفه‌های سرعت و فشار دارای مقدار اولیه صفر هستند.

خواص ترموفیزیکی هر یک از فازهای مایع و بخار چگالی، چسپندگی، ضریب هدایت گرمایی، ضریب گرمایی ویژه هستند. پارامترهای دیگر نیروی شناوری $(\rho_l - \rho_g)g$ ، اختلاف دمای مازاد $\Delta T = T_w - T_{sat}$ ، کشش سطحی σ و گرمای نهان تبخیر h_{fg} هستند. بی‌بعد سازی این کمیت‌ها منجر به به وجود آمدن اعداد بی‌بعد و نسبت‌های خواص زیر می‌شود:

$$Gr = \frac{\rho_v g (\rho_l - \rho_v) D^3}{\mu_v^2} \quad (34)$$

$$Ja = \frac{c_v \Delta T}{h_{fg}} \quad (35)$$

$$Pr = \frac{\mu_v c_v}{k_v} \quad (36)$$

$$\frac{\rho_l}{\rho_v}, \frac{\mu_l}{\mu_v}, \frac{c_l}{c_v}, \frac{k_l}{k_v} \quad (37)$$

- 1 Periodic
- 2 Outflow

مختصه مکانی استفاده شده است. برای به دست آوردن عدد ناسلت متوسط مکانی باید از عدد ناسلت فوق مطابق رابطه (۴۲) حول استوانه در بازه ۰ و 2π انتگرال گیری کرد:

$$\langle Nu(t) \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} Nu(\theta, t) d\theta \quad (42)$$

برای به دست آوردن عدد ناسلت متوسط زمانی و مکانی داریم:

$$\langle Nu \rangle = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_i}^{t_e} \langle Nu(t) \rangle dt \quad (43)$$

در زمان شروع حالت شبه پایا و t_e زمان اتمام شبیه سازی است. در صورتی که جدا شدن حبابها به صورت تناوبی با زمان صورت بگیرد، نمودار $\langle Nu(t) \rangle$ نسبت به زمان، بعد از مدتی به حالت شبه پایا خواهد رسید؛ به عبارت دیگر تغییرات عدد ناسلت نسبت به زمان تکراری می شود و در بازه های زمانی یکسان شکل نمودار یکسان خواهد بود؛ اما اگر حبابها به صورت جت درآیند و جدا نشوند، شبیه سازی به حالت پایا خواهد رسید و بعد از مدتی، عدد ناسلت بر حسب زمان تغییر نخواهد کرد و مقدارش همان عدد ناسلت متوسط زمانی مکانی، $\langle Nu \rangle$ خواهد بود.

برای اطمینان از مستقل بودن حل عددی از شبکه انتخابی، نمودار عدد ناسلت (در واقع نمودار عدد ناسلت متوسط مکانی) بر حسب زمان برای سه نوع شبکه متفاوت با اندازه های 64×256 ، 128×512 و 256×1024 رسم شده است. طبق شکل ۲ مشاهده می شود که نمودار عدد ناسلت برای دو نوع شبکه با تراکم بیشتر به هم نزدیک هستند. بدین منظور برای شبیه سازی های بعدی از شبکه با اندازه 128×512 استفاده می شود.

همانطور که از شکل ۲ دیده می شود، مقدار عدد ناسلت در ابتدا به علت گرادیان بالای دما روی سطح، زیاد است؛ اما با گذشت زمان و انتقال حرارت بین سطح استوانه و لایه بخار و کم شدن گرادیان دما روی سطح، عدد ناسلت کاهش پیدا می کند. در ادامه با رشد حباب بخار، متوسط ضخامت لایه بخار روی استوانه کم خواهد شد و این پدیده موجب افزایش شار حرارتی وارد به لایه بخار و افزایش میزان تبخیر می شود. در نتیجه گرادیان دما در نزدیک سطح افزایش یافته و به تبع آن عدد ناسلت نیز افزایش پیدا می کند. از آنجا که در این شبیه سازی حباب ایجاد شده با ضخامت کمی به سمت بالا حرکت می کند و جدا نمی شود، عدد ناسلت به مقدار ثابتی همگرا می شود. این مقدار، همان عدد ناسلت متوسط زمانی مکانی است. در اینجا عدد ناسلت $Nu = 2/47$ است.

مقدار عدد ناسلت به دست آمده توسط بروملی، برین و وست وائر و ساکورایی به ترتیب برابر است با:

$$Nu_{Br} = 3/63 \quad Nu_{BW} = 2/82 \quad Nu_{Sa} = 1/68$$

یکی از عوامل اصلی تفاوت مقدار عدد ناسلت به دست آمده از حل عددی با مقادیر فوق، دو بعدی بودن شبیه سازی است. بدیهی است که در

شکل ۱ نحوه رشد حباب را در دو زمان مختلف نشان می دهد. نیروی شناوری باعث حرکت بخار به سمت بالا می شود. قسمت بالایی حباب بخار شروع به پهن شدن و قسمت پایینی آن شروع به نازک شدن می کند؛ اما بعد از مدتی به علت تبخیر و عمل نیروی شناوری ضخامت لایه بخار در قسمت پایین استوانه به مقدار ثابتی می رسد. دمای دیواره استوانه به دلیل تبخیر مایع به بخار، از نازک شدن زیاد قسمت پایینی حباب بخار جلوگیری می کند؛ اما همچنان قسمت بالایی حباب بخار رشد می کند و باعث می شود مرز مشترک شکل قارچی^۱ بگیرد. اگر همچنان رشد قسمت بالایی حباب ادامه داشته باشد، حباب تمایل دارد از فیلم بخار جدا شود و قسمت پایینی حباب بخار نازک می شود؛ بنابراین تعادل بین دمای استوانه که باعث افزایش دما و در نتیجه تبخیر مایع در قسمت پایینی حباب می شود، از نازک شدن لایه بخار در این قسمت جلوگیری می کند. سرعت رشد قسمت بالایی حباب و مقدار کشش سطحی که تمایل به نازک شدن لایه بخار دارد، جداسازی حباب از فیلم بخار را کنترل می کند. در شکل ۱ کانتور تابع اندیکاتوری هم نیز مشاهده می شود. این مقدار در داخل مایع یک و در داخل بخار صفر است و در مرز مشترک دو فاز به صورت گستره ای از اعداد صفر تا یک تغییر می کند. هرچه تراکم شبکه محاسباتی بیشتر باشد، ضخامت این گستره کمتر شده و مرز مشترک دو فاز بهتر دیده می شود.

با توجه به این که گرما از استوانه به اطراف منتقل می شود، میزان انتقال حرارت ممکن است در کاربردهای مختلف صنعتی همانند مبدل های حرارتی مهم باشد؛ بنابراین باید درک درستی از میزان انتقال حرارت و تأثیر عوامل مختلف از جمله اعداد بی بعد گراشوف و جاکوب روی انتقال حرارت داشت. بدین منظور با محاسبه عدد ناسلت که در واقع گرادیان دمای بدون بعد روی سطح جسم است، می توان به صورت کمی تغییرات انتقال حرارت روی استوانه را نسبت به زمان و تأثیر عوامل مختلف را بررسی کرد.

عدد ناسلت برای استوانه عبارت است از:

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (39)$$

با توجه به تعریف ضریب انتقال حرارت جابه جایی:

$$h(T_w - T_{sat}) = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (40)$$

n جهت بردار عمود بر سطح استوانه است؛ بنابراین عدد ناسلت عبارت است از:

$$Nu(\theta, t) = -\frac{D}{T_w - T_{sat}} \frac{\partial T}{\partial n} \quad (41)$$

عدد ناسلت به دست آمده در معادله فوق وابسته به زمان و مکان است. دقت شود چون سطح استوانه دایره ای شکل است از مختصه θ به عنوان

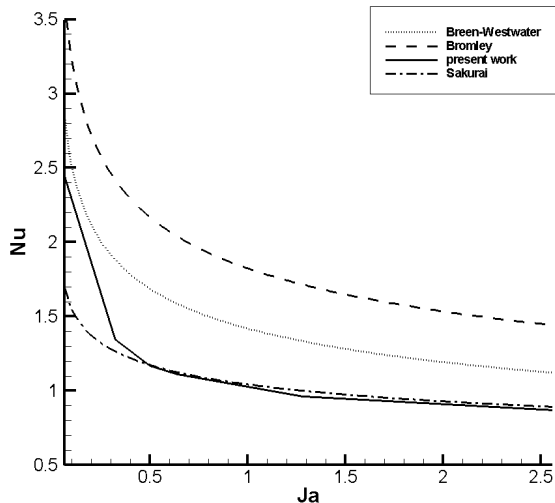


Fig. 3. Plot of Nusselt number versus Jacob number

شکل ۳: نمودار عدد ناسلت بر حسب عدد جاکوب

۴- نتایج شبیه‌سازی جوشش فیلمی روی هندسه‌های پیچیده

در این قسمت در ابتدا دو استوانه را در نظر گرفته و تاثیرات فاصله بین دو استوانه، زاویه بین دو استوانه و همچنین تأثیر قطر استوانه پایینی روی انتقال حرارت در استوانه بالایی بررسی خواهد شد. در انتها تعداد زیادی از استوانه در تعداد ردیف‌های مشخص و آرایش‌های مختلف در نظر گرفته می‌شود و به بررسی عدد ناسلت برای هر یک از استوانه‌ها پرداخته می‌شود.

۴-۱- تأثیر فاصله بین دو استوانه روی عدد ناسلت

در این قسمت با در نظر گرفتن دو استوانه که به صورت هم محور در امتداد عمودی روی هم قرار گرفته‌اند، عدد ناسلت را روی استوانه بالایی پیدا می‌کنیم. فاصله بین دو استوانه در بازه 0.35 تا $1/15$ متر تغییر داده می‌شود. منظور از فاصله بین دو استوانه در واقع فاصله سطح تا سطح استوانه‌ها است. قطر هر یک از استوانه‌ها ثابت و برابر 0.3 متر است. شرایط مرزی و بقیه مشخصه‌های جوشش فیلمی از جمله اعداد گراشف، جاکوب و پرانتل و نسبت خواص ترموفیزیکی نیز همانند مقادیر رابطه ۳۸ هستند. همچنین یک لایه بخار برای آزاد شدن حباب‌های حاصله نیز در سطح بالایی در نظر گرفته می‌شود.

در شکل ۴ نیز فرآیند جوشش فیلمی روی دو استوانه هم محور در جهت عمودی با فاصله سطح تا سطح 0.55 متر در زمان‌های مختلف دیده می‌شود. می‌توان دریافت که با رشد حباب بخار از لایه بخار استوانه پایینی و نزدیک شدن به استوانه بالایی، حباب بخار استوانه پایینی اطراف استوانه بالایی را احاطه خواهد کرد. در نهایت، اطراف استوانه بالایی فقط بخار وجود خواهد داشت.

در شکل ۵، نمودار عدد ناسلت بر حسب زمان برای هر یک از استوانه‌های بالایی و پایینی نشان داده شده است. با حرکت حباب‌های بخار استوانه پایینی و برخورد آن‌ها به استوانه بالایی مقدار عدد ناسلت افزایش پیدا خواهد کرد؛

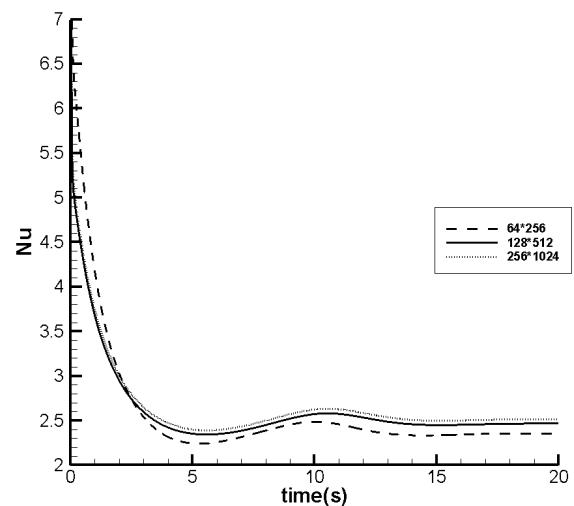


Fig. 2. Plot of Nusselt number versus time for three different types of grid (64×256 , 128×512 , and 256×1024)

شکل ۲: نمودار عدد ناسلت بر حسب زمان برای سه نوع شبکه متفاوت با اندازه‌های 64×256 ، 128×512 و 256×1024

حالت سه بعدی حباب‌های زیادی در طول استوانه رشد کرده و رها می‌شوند. در حالی که در شبیه‌سازی دو بعدی، فقط یک حباب بخار به صورت جت یا به صورت تناوبی به وجود می‌آید و عدد ناسلت تحت تأثیر همان یک حباب تغییر می‌کند.

بررسی‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند با افزایش اختلاف دمای دیواره و دمای اشباع یا به عبارتی با افزایش عدد جاکوب، فرکانس تشکیل حباب و ضخامت لایه بخار افزایش یافته و ضخامت خود حباب بخار هم نیز بیشتر می‌شود. حتی در مواقعی ممکن است، حباب بخار از سطح جدا شده و به صورت جت بخار^۱ به سمت بالا حرکت کند. با افزایش عدد جاکوب ضخامت لایه بخار بیشتر می‌شود. این باعث کاهش عدد ناسلت بر اثر افزایش عدد جاکوب شده که در نمودار شکل ۳ به خوبی دیده می‌شود و همخوانی خوبی با نتایج آزمایشگاهی ساکورایی دارد.

نکته دیگری که باید به آن توجه کرد این است که اگر عدد جاکوب یا اختلاف دمای دیواره و دمای اشباع از حدی بیشتر شود، باید تأثیر تشعشع را در حل عددی در نظر گرفت. با توجه به بررسی عددی که توسط اسماعیلی و تریگواسون [۲۰] در جوشش فیلمی روی صفحه تخت صورت گرفته است، برای در نظر نگرفتن پدیده تشعشع در فیزیک مساله، گستره اعداد جاکوب مورد بررسی باید در بازه $2/132 \leq Ja \leq 0.64$ انتخاب شود. اگر عدد جاکوب بیشتر از حد بالای ذکر شده در نظر گرفته شود، تاثیرات تشعشع باید لحاظ شود. اگر عدد جاکوب کمتر از حد پایین ذکر شده انتخاب شود، به دلیل این که ضخامت لایه بخار بسیار کم می‌شود، تراکم شبکه باید در نزدیکی دیواره و در نتیجه در کل دامنه بیشتر شود. این خود باعث افزایش بسیار زیاد هزینه محاسباتی خواهد شد. همچنین با کاهش بیشتر عدد جاکوب به ناحیه جوشش انتقالی وارد شده و دیگر رژیم جوشش فیلمی وجود ندارد.

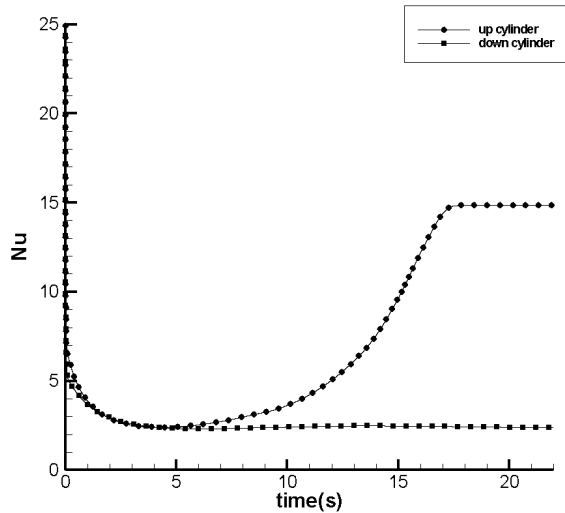


Fig. 5. Plot of Nusselt number versus time for the upper and lower cylinders

شکل ۵: نمودار عدد ناسلت بر حسب زمان برای استوانه‌های بالایی و پایینی

استوانه بالایی قرار نمی‌گیرد؛ اما عدد ناسلت روی استوانه بالایی تحت تأثیر استوانه پایینی قرار می‌گیرد و افزایش پیدا می‌کند. این امر بدیهی است، زیرا با برخورد حباب‌های بخار با یکدیگر میزان به هم ریختگی جریان بیشتر شده و انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش پیدا می‌کند. هر چه این آشفتگی و تشویش در اطراف استوانه بیشتر شود، عدد ناسلت بیشتر خواهد شد. همواره مقداری بخار در حال تولید شدن است و با عبور از استوانه بالایی به سمت لایه بخار بالایی هدایت می‌شود؛ بنابراین در حالت حدی، مقدار عدد ناسلت بعد از گذشت زمان ثابت می‌شود.

در شکل ۶ نمودار عدد ناسلت بر حسب زمان برای چهار فاصله مختلف نشان داده شده است. همانطور که مشخص است مقدار عدد ناسلت وقتی که فاصله بین دو استوانه ۰/۵۵ متر است، بیشترین مقدار را نسبت به فواصل دیگر دارد (۱۴/۸۴). کمترین مقدار عدد ناسلت نیز مربوط به فاصله ۱/۱۵ متر است (۱۳/۹۹). دیده می‌شود که تغییر فاصله عمودی بین دو استوانه تأثیر به‌سزایی روی ناسلت ندارد، با وجود این همین افزایش بسیار کم عدد ناسلت در فاصله ۰/۵۵ متر نسبت به دیگر فواصل ممکن است در بسیاری از کاربردها مهم باشد.

۴-۲- تأثیر زاویه بین دو استوانه روی عدد ناسلت

در این قسمت، تأثیر زاویه بین دو استوانه را روی عدد ناسلت بررسی می‌کنیم. تمامی شرایط از جمله شرایط مرزی و مشخصه‌های جوشش فیلمی مانند قسمت قبل هستند. این زوایا از ۰ تا ۹۰ درجه با گام ۱۵ درجه تغییر می‌کنند. فاصله بین دو استوانه ثابت و برابر ۰/۵۵ فرض شده‌اند. زاویه تعریف شده در واقع زاویه بین خط افقی با خطی است که مراکز دو استوانه را به هم وصل می‌کند. مقدار طول دامنه به دلیل جایگیری استوانه‌ها در دامنه حل در زوایای کم نسبت به قسمت پیش دو برابر شده است اما عرض آن ثابت باقی مانده است.

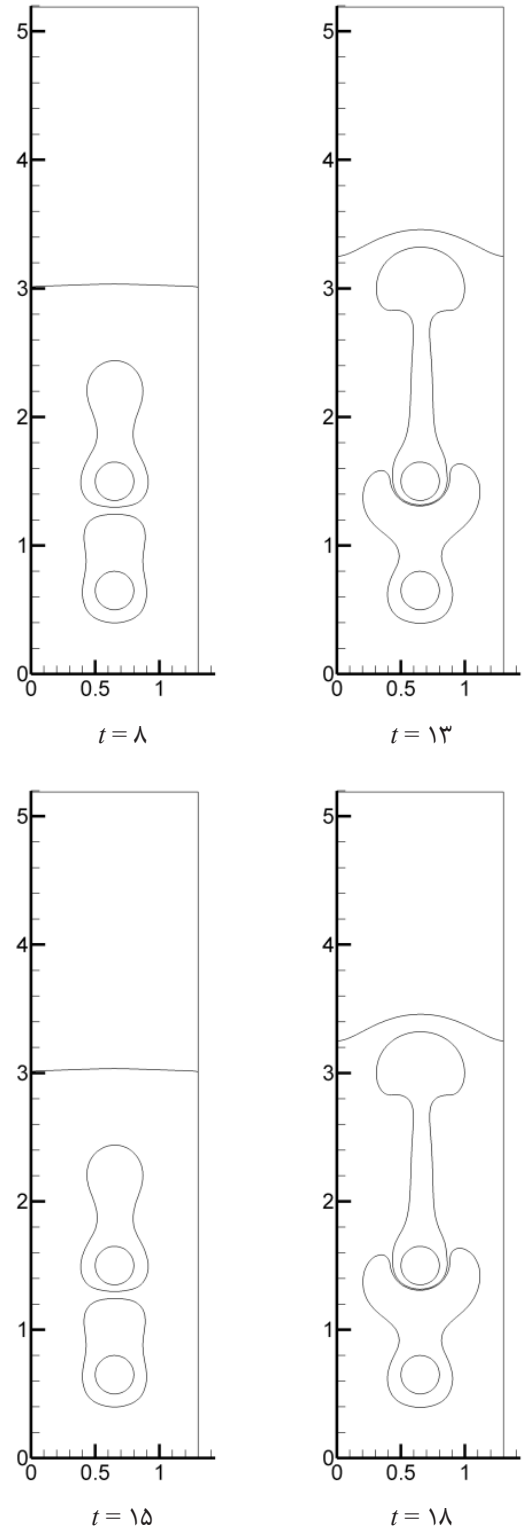


Fig. 4. Different stages of bubble growth at various times

شکل ۴: مراحل رشد حباب‌های بخار در زمان‌های مختلف

زیرا مقدار آشفتگی جریان در اطراف استوانه بالایی بیشتر خواهد شد. مقدار عدد ناسلت برای استوانه پایینی برابر با مقدار عدد ناسلت تک استوانه‌ای است که جوشش فیلمی روی آن اتفاق می‌افتد که در بخش ۳ بررسی شد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت عدد ناسلت روی استوانه پایینی تحت تأثیر

می‌یابد. در زوایای بالا، این افزایش، بسیار بیشتر از زوایای پایین است. مثلاً وقتی که زوایا به ترتیب ۱۵ درجه و ۳۰ درجه باشند، عدد ناسلت به ترتیب ۲/۸۲ و ۲/۹۲ است. اگر زوایا ۶۰ درجه و ۷۵ درجه باشند، عدد ناسلت به ترتیب ۳/۸ و ۴/۵۵ است؛ اما در زوایای نزدیک به ۹۰ درجه این افزایش باز هم بیشتر خواهد شد. به طوری که در زاویه ۹۰ درجه مقدار عدد ناسلت ۱۴/۸۴ است.

۴-۳- تأثیر قطر استوانه پایینی روی عدد ناسلت

در این قسمت با تغییر قطر استوانه پایینی، تغییرات عدد ناسلت را روی استوانه بالایی بررسی می‌کنیم. از آن‌جا که استوانه بالایی، تحت تأثیر استوانه پایینی است، تغییرات قطر برای استوانه پایینی در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین قطر استوانه بالایی همواره ثابت و برابر ۰/۳ متر در نظر گرفته می‌شود. فاصله مرکز تا مرکز دو استوانه ۱ متر و زاویه بین دو استوانه ۹۰ درجه است. با رشد حباب‌ها و حرکت روبه بالای آن‌ها حباب بخار ناشی از استوانه پایینی، استوانه بالایی را در برمی‌گیرد و باعث آشفته‌گی و افزایش عدد ناسلت می‌شود. شکل ۸ عدد ناسلت را برحسب زمان برای قطرهای مختلف نشان می‌دهد.

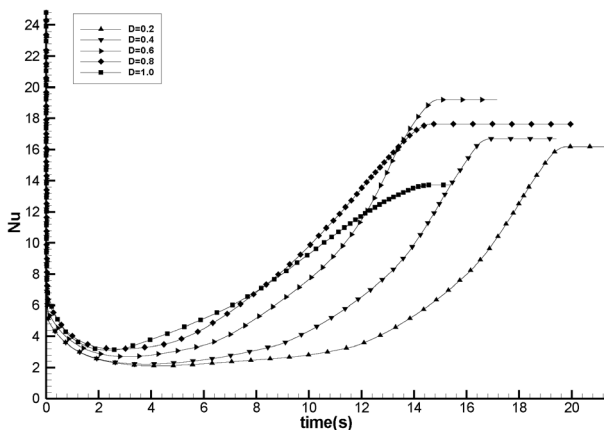


Fig. 8. Plot of Nusselt number on the upper cylinder versus time for different diameters of the lower cylinder

شکل ۸: نمودار عدد ناسلت برحسب زمان روی استوانه بالایی برای قطرهای مختلف استوانه پایینی

دیده می‌شود که مقدار عدد ناسلت برای قطر ۰/۶ متر بیشترین مقدار را دارد (۱۹/۲). با افزایش قطر از ۰/۲ متر تا مقدار ۰/۶ متر، مقدار عدد ناسلت افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر قطر از این مقدار، عدد ناسلت کاهش پیدا می‌کند. نکته دیگری را که می‌توان به آن پی برد این است که مقدار بیشینه عدد ناسلت در این حالت از مقدار بیشینه عدد ناسلت در دو قسمت گذشته که مربوط به زوایا و فاصله‌های مختلف بود، بیشتر است. در واقع با تغییر قطر استوانه‌ها عدد ناسلت را می‌توان بیشتر افزایش داد.

۴-۴- تأثیر آرایش و تعداد ردیف استوانه‌ها

در سه قسمت قبل، به بررسی جوشش فیلمی روی دو عدد استوانه با در

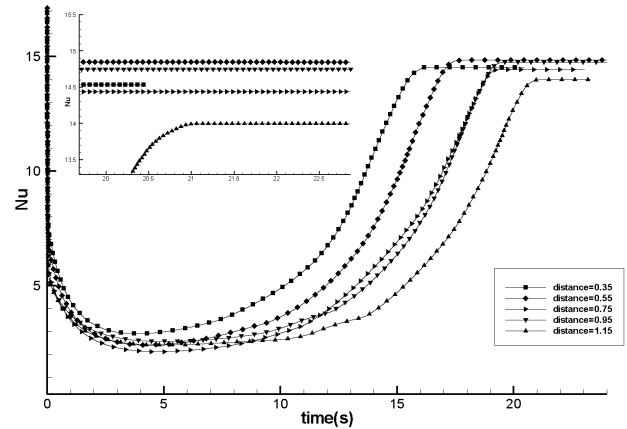


Fig. 6. Plot of Nusselt number versus time for the upper cylinder at different distances to the lower cylinder

شکل ۶: نمودار عدد ناسلت بر حسب زمان برای استوانه بالایی در فواصل مختلف از استوانه پایینی

هرچه زاویه بیشتر باشد، درگیری استوانه بالایی با حباب‌های بخاری که از استوانه پایینی به سمت بالا حرکت می‌کنند، بیشتر است. در نتیجه عدد ناسلت نیز افزایش می‌یابد. در این‌جا هم تغییرات عدد ناسلت استوانه پایینی همانند یک تک استوانه که در بخش ۳ بررسی شد، است. همانطور که در شکل ۷ دیده می‌شود، مقدار عدد ناسلت وقتی که زاویه ۹۰ درجه باشد یعنی دو استوانه به صورت عمودی روی هم قرار بگیرند، بیشینه است؛ زیرا حباب‌های بخاری که از استوانه پایینی به سمت بالا حرکت می‌کنند به صورت کامل با استوانه بالایی درگیر می‌شوند.

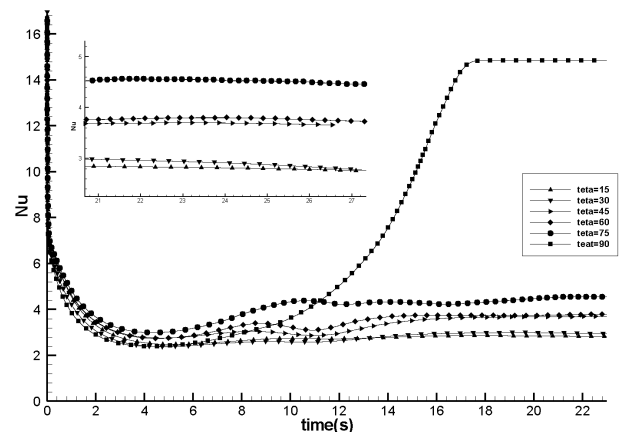


Fig. 7. Plot of Nusselt number on the upper cylinder versus time at different angles to the lower cylinder

شکل ۷: نمودار عدد ناسلت بر حسب زمان روی استوانه بالایی برای زوایای مختلف با استوانه پایینی

همانطور که مشخص است هنگامی که زاویه بین دو استوانه ۱۵ درجه است، عدد ناسلت برابر ۲/۸۲ است و هنگامی که این زاویه ۷۵ درجه باشد، عدد ناسلت برابر ۴/۵۵ و در زاویه ۹۰ درجه عدد ناسلت ۱۴/۸۴ است. این مطلب نشان می‌دهد که نحوه آرایش دو استوانه یا لوله نسبت به زاویه، بسیار اهمیت دارد. هرچه زاویه بین دو لوله افزایش یابد، مقدار عدد ناسلت افزایش

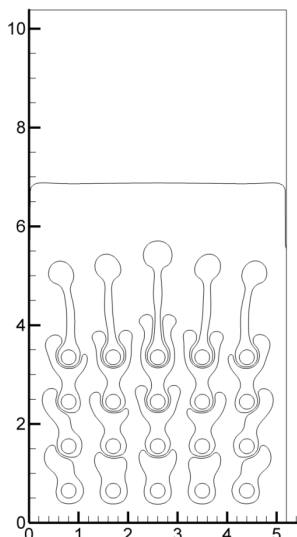


Fig. 10. Shape of interface at 10 s

شکل ۱۰: شکل مرز مشترک در زمان ۱۰ ثانیه

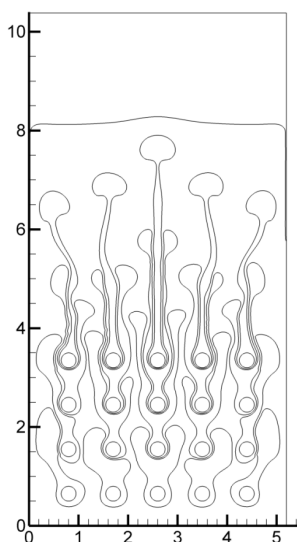


Fig. 11. Shape of interface at 15 s

شکل ۱۱: شکل مرز مشترک در زمان ۱۵ ثانیه

در این مرحله به بررسی مقادیر عدد ناسلت روی هر یک از استوانه‌ها پرداخته می‌شود. همانطور که در قسمت‌های قبلی دیده شد، مقدار عدد ناسلت روی استوانه‌های پایینی مستقل از استوانه‌های بالایی است؛ زیرا آشفستگی ایجاد شده برای افزایش انتقال حرارت از خود استوانه‌های پایینی نشأت می‌گیرد. مقدار عدد ناسلت روی آن‌ها متناظر با عدد ناسلت روی یک تک استوانه است؛ بنابراین در این قسمت از به دست آوردن عدد ناسلت روی استوانه‌های پایینی صرف نظر می‌کنیم.

برای این که نمودار عدد ناسلت بر حسب زمان را برای استوانه‌های ردیف دوم، سوم و چهارم رسم کنیم، این استوانه‌ها را شماره گذاری می‌کنیم. شماره استوانه ردیف دوم از ۶ تا ۱۰، ردیف سوم از ۱۱ تا ۱۵ و ردیف چهارم

نظر گرفتن فواصل، زوایا و قطرهای مختلف استوانه پایینی، پرداختیم. به طور کلی دیده شد که هرچه استوانه بالایی بیشتر تحت تأثیر حباب‌های بخاری که از استوانه پایینی به سمت بالا حرکت می‌کند، قرار بگیرد آشفستگی جریان بیشتر می‌شود و مقدار انتقال حرارت و عدد ناسلت نیز افزایش می‌یابد. با توجه به این که در اکثر کاربردهای صنعتی، جوشش فیلمی روی تعداد زیادی از لوله‌ها یا استوانه‌ها اتفاق می‌افتد، شبیه‌سازی این پدیده روی هندسه‌های پیچیده‌تر که شامل تعداد زیادی استوانه است، کاملاً ضروری به نظر می‌رسد. چرا که این شبیه‌سازی‌ها و یافتن میزان انتقال حرارت توسط عدد ناسلت در هریک از لوله‌ها می‌تواند باعث طراحی بهینه آرایش قرارگیری لوله‌ها در کنار یکدیگر شود. در این قسمت دو نوع آرایش ساده و جابه‌جا شده استوانه‌ها در تعداد ردیف‌های مختلف در نظر گرفته می‌شود. تعداد استوانه‌ها را در هر ردیف ۵ عدد در نظر می‌گیریم. در هر نوع آرایش ساده یا جابه‌جا شده، تأثیرات تعداد ردیف استوانه‌ها بر روی عدد ناسلت استوانه‌های بالایی بررسی می‌شود. نمودار عدد ناسلت بر حسب زمان برای هر یک از استوانه‌های ردیف بالایی رسم می‌شود. در نهایت با توجه به مقدار عدد ناسلت در هر یک از استوانه‌های ردیف بالایی مقایسه‌ای بین این دو نوع آرایش قرارگیری استوانه‌ها صورت می‌پذیرد.

فاصله هر یک از استوانه‌ها با استوانه مجاور چه در جهت عمودی و چه در جهت افقی ۰/۹ متر در نظر گرفته شده است. قطر هریک از استوانه‌ها ثابت و برابر ۰/۳ متر است.

در شکل‌های ۹ و ۱۰ و ۱۱ رشد و حرکت حباب‌ها در زمان‌های مختلف برای چهار ردیف استوانه دیده می‌شود. همانگونه که دیده می‌شود، حباب‌های بخار از استوانه‌های پایینی رشد کرده و کم‌کم با رد شدن از استوانه‌های بالایی، آن‌ها را دربرمی‌گیرند. همچنین حباب‌های رشد کرده از استوانه‌های بالایی به لایه بخار قسمت بالای دامنه حرکت می‌کنند.

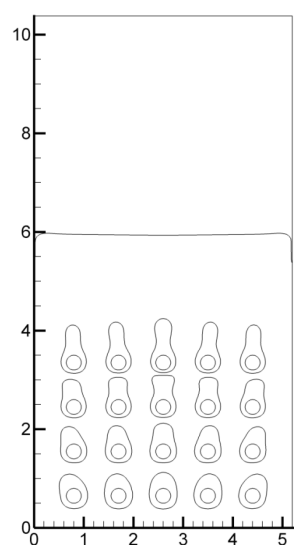


Fig. 9. Shape of interface at 5 s

شکل ۹: شکل مرز مشترک در زمان ۵ ثانیه

با توجه به شکل‌های فوق، هنگامی که از دو ردیف استوانه در آرایش ساده استفاده می‌شود، عدد ناسلت برای استوانه‌های شماره ۶ و ۱۰ تقریباً یکسان و برابر $6/4$ است؛ اما برای هر یک از استوانه‌های میانی یعنی استوانه‌های شماره ۷ و ۸ و ۹ عدد ناسلت به دلیل آشفتگی بیشتر جریان و درگیری بیشتر با حباب‌های بخار بیشتر است. به طوری که عدد ناسلت برای استوانه شماره ۹ به مقدار $7/78$ رسیده است؛ اما هنگامی که از سه ردیف استوانه در این آرایش استفاده می‌شود، با توجه به شکل ۱۳، عدد ناسلت برای استوانه‌های ردیف سوم نسبت به استوانه‌های ردیف دوم افزایش یافته است. در واقع استوانه‌های ردیف اول و دوم با رشد حباب‌های بخار و به هم آمیختگی جریان تأثیر به‌سزایی در افزایش عدد ناسلت روی استوانه‌های ردیف سوم داشته‌اند. در حالی که افزایش عدد ناسلت استوانه‌های ردیف دوم فقط وابسته به استوانه‌های ردیف پایینی یا ردیف اول بوده است. دیده می‌شود که اعداد ناسلت روی استوانه‌های ردیف سوم تقریباً همگی به هم نزدیک هستند و عدد ناسلت روی استوانه ۱۵ به مقدار $8/13$ رسیده است. با افزایش تعداد ردیف استوانه‌ها، یعنی وقتی که چهار ردیف استوانه وجود داشته باشد، مطابق شکل ۱۴ دیده می‌شود که مقادیر عدد ناسلت کمی پایین‌تر از مقادیر عدد ناسلت مربوط به استوانه‌های ردیف سوم هستند. به طوری که عدد ناسلت بیشینه روی استوانه ۱۶ برابر با $7/62$ است. در واقع این پدیده را می‌توان این گونه توجیح کرد که اثرات آشفتگی جریان با رشد حباب‌های بخار ناشی از استوانه‌های ردیف اول و دوم به استوانه‌های ردیف چهارم نرسیده است و بیشتر باعث افزایش عدد ناسلت روی استوانه‌های ردیف سوم می‌شوند. افزایش عدد ناسلت روی استوانه‌های ردیف چهارم، بیشتر ناشی از حباب‌های برخاسته از ردیف سوم است. در واقع می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر جابه‌جایی جریان که از رشد و حرکت حباب بخار استوانه‌های پایینی نشأت می‌گیرد، استوانه‌های ردیف سوم را تحت تأثیر قرار می‌دهد و تأثیر آن روی ردیف‌های بالاتر کم و کم‌تر می‌شود.

در آرایش جابه‌جا شده هر یک از استوانه‌های ردیف بالاتر در بین استوانه‌های ردیف پایینی قرار می‌گیرند. فاصله عمودی و افقی مرکز تا مرکز هر یک از استوانه‌ها همانند آرایش ساده برابر $0/9$ متر و قطر همه استوانه‌ها نیز برابر $0/3$ متر است. ابعاد دامنه طوری در نظر گرفته شده که برای تغییر فاز مایع اطراف استوانه‌ها به حد کافی بزرگ باشد. تمامی روند فرآیند شبیه‌سازی در این آرایش مشابه با آرایش ساده است. بعلاوه نحوه شماره گذاری استوانه‌ها نیز با آرایش ساده یکسان است. بدین صورت که استوانه‌های ردیف پایین از چپ به راست دارای شماره‌های ۱ تا ۵، ردیف دوم دارای شماره‌های ۶ تا ۱۰، ردیف سوم دارای شماره‌های ۱۱ تا ۱۵ و ردیف چهارم دارای شماره‌های ۱۶ تا ۲۰ هستند.

در شکل‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۷ نمودار عدد ناسلت بر حسب زمان، برای آرایش جابه‌جا شده و تعداد ردیف استوانه‌های مختلف رسم شده است. هنگامی که از دو ردیف استوانه در این آرایش استفاده می‌شود، تغییرات عدد ناسلت بر حسب زمان مطابق با شکل ۱۵ است. در این شکل دیده می‌شود

از ۱۶ تا ۲۰ است. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ نشان‌دهنده نمودار عدد ناسلت بر حسب زمان به ترتیب برای دو، سه و چهار ردیف استوانه در آرایش ساده است. دقت شود که در هر نمودار فقط عدد ناسلت استوانه‌های ردیف بالایی کشیده شده است.

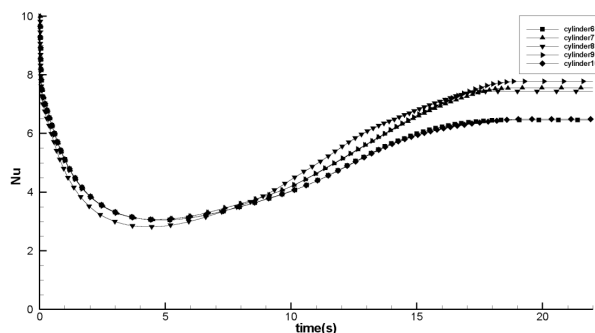


Fig. 12. Plot of Nusselt number versus time for simple arrangement with two rows of cylinders

شکل ۱۲: نمودار عدد ناسلت بر حسب زمان برای آرایش ساده به همراه دو ردیف استوانه

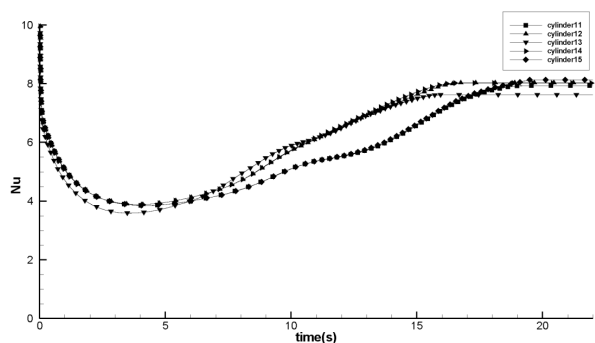


Fig. 13. Plot of Nusselt number versus time for simple arrangement with three rows of cylinders

شکل ۱۳: نمودار عدد ناسلت بر حسب زمان برای آرایش ساده به همراه سه ردیف استوانه

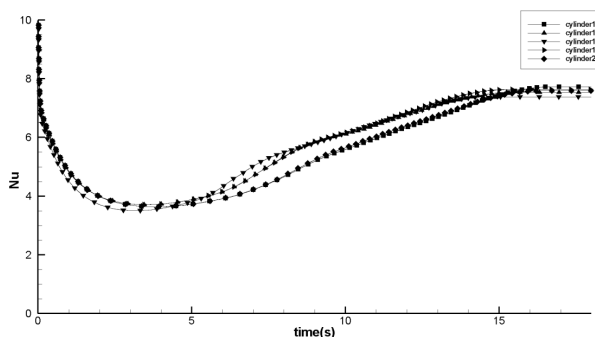


Fig. 14. Plot of Nusselt number versus time for simple arrangement with four rows of cylinders

شکل ۱۴: نمودار عدد ناسلت بر حسب زمان برای آرایش ساده به همراه چهار ردیف استوانه

در شکل ۱۷ هنگامی که از چهار ردیف استوانه استفاده می‌شود، مقدار عدد ناسلت روی استوانه‌های ۱۶ تا ۱۹ در زمان‌های نهایی حل بسیار نزدیک به هم هستند. عدد ناسلت روی استوانه‌های ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۱۹ به ترتیب برابر با ۷/۳۴، ۷/۴۹، ۷/۴۹ و ۷/۹۴ است. با مقایسه شکل‌های ۱۷ و ۱۴ دیده می‌شود که عدد ناسلت در استوانه‌های ردیف چهارم، در آرایش جابه‌جا شده همگی نزدیک به هم هستند و به صورت میانگین از مقادیر عدد ناسلت روی استوانه‌های ردیف چهارم در آرایش ساده کمی بیشتر هستند. در واقع می‌توان گفت آشفتگی جریان ناشی از رشد حباب‌های بخار روی استوانه‌های سه ردیف پایینی تأثیر بیشتری روی استوانه‌های ردیف چهارم در آرایش جابه‌جا شده نسبت به آرایش ساده دارد.

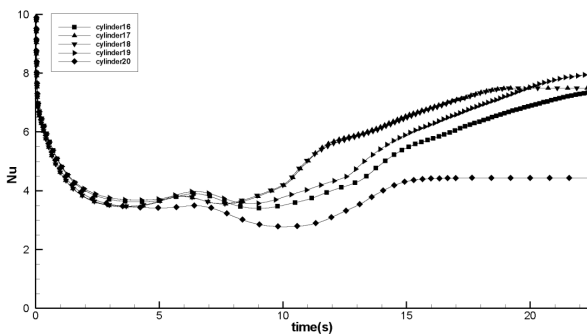


Fig. 17. Plot of Nusselt number versus time for the staggered arrangement with four rows of cylinders

شکل ۱۷: نمودار عدد ناسلت بر حسب زمان برای آرایش جابه‌جا شده به همراه چهار ردیف استوانه

۵- نتیجه‌گیری

جوشش فیلمی کاربردهای بسیاری در صنایع مختلف داراست. مطالعه عددی برای درک درست و شناخت بهتر روی این پدیده، کاملاً لازم و ضروری است. تاکنون تمامی تحقیقات انجام شده پیرامون شبیه‌سازی جوشش فیلمی به هندسه‌های ساده نظیر صفحه تخت یا یک استوانه محدود می‌شوند. در این تحقیق برای اولین بار پدیده جوشش فیلمی توسط روش ردیابی جبهه روی تعداد زیادی از استوانه‌ها شبیه‌سازی گردید. در ابتدا این روش برای شبیه‌سازی جوشش فیلمی روی یک استوانه معرفی شد. این روش در این مقاله برای در نظر گرفتن هندسه‌های پیچیده پیشرفت و توسعه داده شد.

در ابتدا دو استوانه در نظر گرفته شد که جوشش فیلمی به صورت همزمان روی آن دو رخ می‌دهد. تأثیر فاصله بین دو استوانه روی عدد ناسلت استوانه بالایی، تأثیر زاویه بین دو استوانه روی عدد ناسلت و تأثیر قطر استوانه پایینی روی عدد ناسلت برای استوانه بالایی، بررسی شد. نتیجه کلی بدین صورت بود که هر چه میزان آشفتگی بیشتر شود، مقدار عدد ناسلت بیشتر می‌شود. میزان آشفتگی در واقع تابعی از درهم آمیختگی و درگیری حباب‌های بخار ناشی از استوانه پایینی با استوانه بالایی است. هرچه استوانه

که مقدار عدد ناسلت روی استوانه‌های شماره ۶ تا ۹ تقریباً نزدیک به هم هستند؛ اما مقدار عدد ناسلت روی استوانه شماره ۱۰ به دلیل آشفتگی کمتر جریان و درگیری کمتر با حباب‌های بخار حاصل از استوانه‌های ردیف پایینی، کمتر است و مقدار آن برابر ۳/۶۸ است. در حالی که مقدار عدد ناسلت در استوانه شماره ۹، بیشینه و برابر با ۵/۸۶ است. همانطور که مشخص است مقدار عدد ناسلت روی استوانه‌های ردیف دوم در آرایش ساده بیشتر از مقدار عدد ناسلت روی استوانه‌های ردیف دوم در آرایش جابه‌جا شده است.

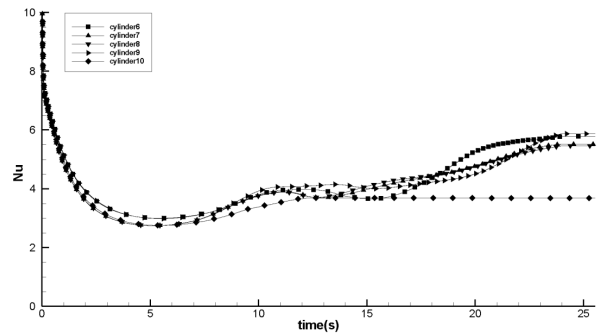


Fig. 15. Plot of Nusselt number versus time for the staggered arrangement with two rows of cylinders

شکل ۱۵: نمودار عدد ناسلت بر حسب زمان برای آرایش جابه‌جا شده به همراه دو ردیف استوانه

در شکل ۱۶ دیده می‌شود که مقادیر عدد ناسلت روی استوانه‌های ردیف سوم با یکدیگر اختلاف قابل توجهی دارند. این مقادیر روی استوانه‌های شماره ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ به ترتیب ۵/۴۴، ۸/۵۲، ۷/۵۷، ۷ و ۸/۰۴ هستند. در حالی که این مقادیر روی استوانه‌های ردیف سوم در آرایش ساده، بسیار نزدیک به هم بودند. می‌توان گفت در آرایش جابه‌جا شده میزان پیچیدگی هندسه زیاد بوده و مقدار آشفتگی جریان و حباب‌های بخار ناشی از استوانه‌های پایینی به صورت یکسان روی استوانه‌های ردیف سوم تأثیر نداشته است. به همین دلیل عدد ناسلت در استوانه‌های این ردیف مقداری با یکدیگر تفاوت دارد.

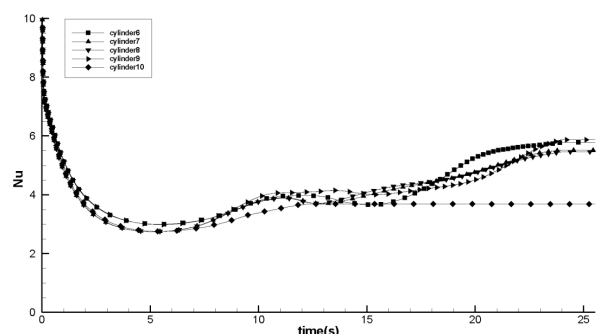


Fig. 16. Plot of Nusselt number versus time for the staggered arrangement with three rows of cylinders

شکل ۱۶: نمودار عدد ناسلت بر حسب زمان برای آرایش جابه‌جا شده به همراه سه ردیف استوانه

cylinder to subcooled liquid: Part 1—A theoretical pool film boiling heat transfer model including radiation contributions and its analytical solution, *Journal of Heat Transfer*, 112(2) (1990) 430-440.

- [11] A. Sakurai, M. Shiotsu, K. Hata, A general correlation for pool film boiling heat transfer from a horizontal cylinder to subcooled liquid: Part 2—Experimental data for various liquids and its correlation, *Journal of heat transfer*, 112(2) (1990) 441-450.
- [12] G. Son, V.K. Dhir, Three-dimensional simulation of saturated film boiling on a horizontal cylinder, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(5-6) (2008) 1156-1167.
- [13] M. Yuan, Y. Yang, T. Li, Z. Hu, Numerical simulation of film boiling on a sphere with a volume of fluid interface tracking method, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(7-8) (2008) 1646-1657.
- [14] A. Esmaceli, G. Tryggvason, Computations of film boiling. Part I: numerical method, *International journal of heat and mass transfer*, 47(25) (2004) 5451-5461.
- [15] U. Schumann, R.A. Sweet, A direct method for the solution of Poisson's equation with Neumann boundary conditions on a staggered grid of arbitrary size, *Journal of Computational Physics*, 20(2) (1976) 171-182.
- [16] A. Esmaceli, G. Tryggvason, A front tracking method for computations of boiling in complex geometries, *International Journal of Multiphase Flow*, 7(30) (2004) 1037-1050.
- [17] E.R. Hosler, Film boiling on a horizontal plate, *ARS Journal*, 32(4) (1962) 553-558.
- [18] N. Zuber, Nucleate boiling. The region of isolated bubbles and the similarity with natural convection, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 6(1) (1963) 53-78.
- [19] J. Lienhard, P. Wong, The dominant unstable wavelength and minimum heat flux during film boiling on a horizontal cylinder, *Journal of Heat Transfer*, 86(2) (1964) 220-225.
- [20] A. Esmaceli, G. Tryggvason, Computations of film boiling. Part II: multi-mode film boiling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(25) (2004) 5463-5476.

بالایی بیشتر در معرض حرکت حباب‌های بخار استوانه پایینی قرار گیرد، میزان به هم ریختگی و آشفته‌گی بیشتر شده و انتقال حرارت بیشتر می‌شود. سپس تعداد استوانه‌ها بیشتر شد. دو نوع آرایش ساده و جابه‌جا شده در نظر گرفته شد و استوانه‌ها در تعداد ردیف‌های مختلف در کنار یکدیگر قرار گرفتند. تأثیر تعداد ردیف‌ها بر مقادیر اعداد ناسلت روی استوانه‌های ردیف بالایی در هر یک از آرایش‌ها بررسی شد و مقایسه‌ای بین این دو آرایش صورت گرفت. در واقع نتایج این مقاله می‌تواند جهت طراحی و ساخت و بهینه‌سازی مبدل‌های حرارتی که در آن‌ها رژیم جوشش فیلمی وجود دارد، استفاده شود.

منابع

- [1] A. Swain, M.K. Das, A review on saturated boiling of liquids on tube bundles, *Heat and Mass Transfer*, 50(5) (2014) 617-637.
- [2] M.-G. Kang, Local pool boiling coefficients on horizontal tubes, *Journal of mechanical science and technology*, 19(3) (2005) 860-869.
- [3] Z.-H. Liu, Y.-H. Qiu, Enhanced boiling heat transfer in restricted spaces of a compact tube bundle with enhanced tubes, *Applied thermal engineering*, 22(17) (2002) 1931-1941.
- [4] Y.-H. Qiu, Z.-H. Liu, Boiling heat transfer of water on smooth tubes in a compact staggered tube bundle, *Applied thermal engineering*, 24(10) (2004) 1431-1441.
- [5] M.-G. Kang, Pool boiling heat transfer on tandem tubes in vertical alignment, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 87 (2015) 138-144.
- [6] P.J. Berenson, Film-boiling heat transfer from a horizontal surface, *Journal of Heat Transfer*, 83(3) (1961) 351-356.
- [7] V. Klimenko, Film boiling on a horizontal plate—new correlation, *International journal of heat and mass transfer*, 24(1) (1981) 69-79.
- [8] L.A. Bromley, *Heat transfer in stable film boiling*, (1949).
- [9] B.P. Breen, J.W. Westwater, Effect of diameter of horizontal tubes on film boiling heat transfer, *Chemical Engineering Progress*, 58(2) (1962) 67-72.
- [10] A. Sakurai, M. Shiotsu, K. Hata, A general correlation for pool film boiling heat transfer from a horizontal

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

A.Sedaghatkish and S.Mortazavi, Two Dimensional Simulation of Film Boiling Heat Transfer in Complex Geometries

Using Front Tracking Method, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(6) (2018) 1319-1332.

DOI: 10.22060/mej.2017.13222.5573

