

Numerical Investigation of the Effect of Fin Geometry and Film Thickness on Heat Transfer in Falling Film Evaporation on a Horizontal Tube

Ali Rahimi^{*}, Mohammadhasan Jalaeddin Abyaneh^{*}, Farzad Jafarkazemi

Department of Mechanical Engineering, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Article History

Received: July 13, 2026
Revised: September 11, 2026
Accepted: September 28, 2026
ePublished: October 22, 2026

ABSTRACT

Falling film evaporation is one of the most efficient heat transfer methods in heat exchangers and evaporators. Its performance strongly depends on liquid film hydrodynamics and surface distribution. This study investigated the effect of three circumferential fin geometries on hydrodynamic characteristics and thermal performance of a falling film over a horizontal tube using CFD. Simulations were at $Re=217$ with VOF two-phase model and constant wall temperature. Liquid volume fraction, film thickness, velocity and temperature fields, and local heat transfer coefficient were extracted at various angles and cross-sections along the tube.

Results showed fin geometry plays a decisive role in redistribution, wettability, and thermal resistance. Model F1 gave the best balance between hydrodynamics and heat transfer. Despite 15.4% higher average film thickness than the smooth tube, it enhanced the heat transfer coefficient by 16.4%. Model F2 showed a 14.9% increase in heat transfer. However, its less uniform distribution caused greater local fluctuations. Model F3, due to accumulation and 69% thicker average film, caused a 74.8% reduction in heat transfer.

A key contribution of this study is the simultaneous assessment of the effects of fin geometry on film distribution and thickness, surface wetting, and heat transfer, thereby elucidating the role of film uniformity in thermal performance. The results demonstrate that increasing the finned surface area or even the average film thickness does not necessarily enhance heat transfer. Instead, uniform film redistribution and the prevention of local liquid accumulation play a more significant role in improving the heat transfer coefficient.

Keywords: Falling Film Evaporation, Horizontal Finned Tube, Computational Fluid Dynamics (CFD), Volume of Fluid (VOF), Film Thickness, Heat Transfer Coefficient

How to cite this article

Rahimi A, Abyaneh M J, Jafarkazemi F, Numerical Investigation of the Effect of Fin Geometry and Film Thickness on Heat Transfer in Falling Film Evaporation on a Horizontal Tube. Modares Mechanical Engineering; 2027;27(02): 115-138.

*Corresponding author's email: ali.rahimi8842@iau.ir, mhj_abyaneh@azad.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0009-0007-0008-5007



Copyright© 2027, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



بررسی عددی تأثیر هندسه فین و ضخامت فیلم بر انتقال حرارت در تبخیر فیلم ریزان روی لوله افقی

علی رحیمی*^{ID}، محمد حسن جلال الدین ابیانه*، فرزاد جعفرکاظمی

گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران جنوب دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

چکیده

تبخیر فیلم ریزان از کارآمدترین روش‌های انتقال حرارت در مبدل‌ها و تبخیرکننده‌هاست که عملکرد آن به هیدرودینامیک فیلم مایع و توزیع سطحی آن وابسته است. در این پژوهش، اثر سه هندسه فین محیطی بر ویژگی‌های هیدرودینامیکی و عملکرد حرارتی جریان فیلم ریزان روی لوله افقی با شبیه‌سازی CFD بررسی شد. شبیه‌سازی‌ها در عدد رینولدز ۲۷۱ با مدل دوفازی VOF و شرط دمای ثابت دیواره انجام شد. برای ارزیابی عملکرد، توزیع کسر حجمی مایع، ضخامت فیلم، میدان‌های سرعت و دما و ضریب انتقال حرارت موضعی در زوایا و مقاطع مختلف طول لوله استخراج گردید. نتایج نشان داد هندسه فین نقش تعیین‌کننده‌ای در بازتوزیع فیلم، کنترل ترشوندگی و تغییر مقاومت حرارتی دارد. در میان هندسه‌ها، مدل F1 بهترین تعادل را بین هیدرودینامیک و انتقال حرارت ارائه داد؛ علی‌رغم افزایش ۱۵/۴ درصدی ضخامت متوسط فیلم نسبت به لوله صاف، ضریب انتقال حرارت را حدود ۱۶/۴ درصد افزایش داد. مدل F2 افزایش ۱۴/۹ درصدی ضریب انتقال حرارت داشت، اما به دلیل توزیع غیریکنواخت‌تر فیلم، نوسانات موضعی بیشتری ایجاد کرد. مدل F3 به دلیل تجمع مایع و افزایش ضخامت متوسط فیلم تا ۶۹ درصد، موجب کاهش ۷۴/۸ درصدی ضریب انتقال حرارت شد. نوآوری این پژوهش، بررسی همزمان اثر هندسه فین بر توزیع و ضخامت فیلم، ترشوندگی سطح و انتقال حرارت و تبیین نقش یکنواختی فیلم در عملکرد حرارتی است؛ نتایج نشان می‌دهد که افزایش سطح فین یا حتی افزایش ضخامت متوسط فیلم الزاماً موجب بهبود انتقال حرارت نمی‌شود و بازتوزیع یکنواخت فیلم و جلوگیری از تجمع موضعی مایع، عامل مؤثرتری در افزایش ضریب انتقال حرارت است.

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۲۲

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۲۰

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۰۶

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۷/۳۰

کلیدواژه‌ها: تبخیر فیلم ریزان، لوله افقی فین‌دار، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، روش حجم سیال (VOF)، ضخامت فیلم، ضریب انتقال حرارت.

نحوه ارجاع به این مقاله

رحیمی علی، ابیانه محمد حسن جلال الدین، جعفرکاظمی فرزاد، بررسی عددی تأثیر هندسه فین و ضخامت فیلم بر انتقال حرارت در تبخیر فیلم ریزان روی لوله افقی، مهندسی مکانیک مدرس. ۱۳۸-۱۱۵(۰۲):۱۴۰۵.

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ali.rahimi8842@iau.ir, mhj_abyaneh@azad.ac.ir

*شناسه ارکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ۰۰۰۷-۰۰۰۸-۰۰۰۹



۱- مقدمه

فرآیند تبخیر فیلم ریزان یکی از مکانیزم‌های مهم انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی به شمار می‌رود که در کاربردهایی نظیر سیستم‌های تبرید، تهویه مطبوع، آب‌شیرین‌کن‌ها و صنایع انرژی به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. در این فرآیند، یک لایه نازک از سیال بر روی سطح خارجی لوله جریان یافته و همزمان با دریافت انرژی از سطح گرم، تبخیر شده و انتقال حرارت انجام می‌شود. به دلیل مقاومت حرارتی پایین فیلم مایع، این روش یکی از کارآمدترین شیوه‌های انتقال حرارت در تبخیرکننده‌ها محسوب می‌شود.

عملکرد حرارتی تبخیرکننده‌های فیلم ریزان به عوامل متعددی از جمله دبی جرمی، خواص ترموفیزیکی سیال، شرایط مرزی حرارتی، وضعیت جریان و به ویژه هندسه سطح انتقال حرارت وابسته است [۲، ۳]. در میان این عوامل، استفاده از فین‌های سطحی علاوه بر افزایش سطح مؤثر انتقال حرارت، موجب تغییر الگوی حرکت فیلم مایع، بازتوزیع جریان، تغییر ضخامت فیلم و در نتیجه تغییر مقاومت حرارتی لایه مایع می‌شود [۴]. بنابراین، عملکرد فین تنها به افزایش سطح تبادل حرارت محدود نبوده و به نحوه کنترل رفتار هیدرودینامیکی فیلم نیز وابسته است [۵]. مطالعات عددی اخیر نیز نشان داده‌اند که هندسه فین، ترشوندگی سطح، فاصله ستون‌های ورودی مایع و شرایط تغذیه جریان، تأثیر مستقیمی بر توزیع ضخامت فیلم و ضریب انتقال حرارت دارند، به‌ویژه، تحقیقات جدید نشان می‌دهد که در اعداد رینولدز پایین، ترشوندگی سطح و فاصله ستون‌های مایع نقش تعیین‌کننده‌تری در عملکرد حرارتی ایفا می‌کنند [۶].

به دلیل برهم‌کنش همزمان جریان دوفازی، انتقال حرارت، تبخیر و تغییر شکل سطح آزاد، تحلیل این فرآیند با استفاده از روش‌های تجربی با محدودیت‌هایی همراه است. از این‌رو، روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، به‌ویژه مدل حجم سیال (VOF)، به ابزار مناسبی برای مطالعه رفتار فیلم ریزان تبدیل شده‌اند [۷]. در سال‌های اخیر، روش‌های عددی به‌ویژه مدل Volume of Fluid (VOF) به‌طور گسترده برای شبیه‌سازی رفتار سطح مشترک مایع-بخار و تحلیل فرآیند تبخیر فیلمی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۸-۱۰]. مدل‌سازی عددی تبخیر فیلم ریزان روی لوله افقی نشان داده است که افزایش قطر لوله تأثیر منفی بر انتقال حرارت داشته و خطر خشک‌شدگی فیلم مایع را افزایش می‌دهد [۱۰]. همچنین، شبیه‌سازی‌های عددی اخیر برای مبردهای غیر ایزوتروپیک نشان داده است که حداقل ضخامت فیلم مایع در زوایای محیطی بین ۱۳۰ تا ۱۴۰ درجه رخ می‌دهد [۱۱].

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که هندسه سطح تأثیر قابل توجهی بر عملکرد حرارتی مبدل‌های فیلم ریزان دارد. به عنوان مثال، افزایش چگالی یا تغییر ساختار فین‌ها می‌تواند موجب افزایش اغتشاش در لایه مایع و در نتیجه بهبود نرخ انتقال حرارت شود

[۱۲-۱۴] همچنین، در یک مطالعه آزمایشگاهی، استفاده از سیم‌پیچ داخلی در لوله‌های افقی حامل مبرد R-134a موجب افزایش ضریب انتقال حرارت تا ۸۳ درصد نسبت به لوله صاف شد و نشان داده شد که افزایش ضخامت سیم‌پیچ در گام ثابت، عملکرد حرارتی را بیش از پیش بهبود می‌بخشد. این نتایج بیانگر نقش مؤثر اصلاح هندسه سطح و جریان در افزایش انتقال حرارت است [۱۵]. در این راستا، پژوهش‌های جدید حاکی از آن است که لوله‌های با شیارهای مثلی در مقایسه با لوله صاف، می‌توانند ضریب انتقال حرارت را تا ۳۴/۵ درصد افزایش دهند [۱۴]. از سوی دیگر، پدیده‌هایی مانند ناپایداری جریان و تشکیل نواحی خشک‌شدگی (Dry-out) می‌توانند موجب کاهش سطح مؤثر تبخیر و افت عملکرد حرارتی سیستم شوند [۱۶-۱۸]. برای مقابله با این چالش، روش‌های نوینی نظیر جبران خشک‌شدگی سطح با استفاده از اسپری ارائه شده است که می‌تواند ضریب انتقال حرارت را تا ۲/۷۳ برابر افزایش داده و نرخ پوشش سطح را بالای ۷۰ درصد حفظ کند [۱۸].

در مطالعه‌ای تجربی، اثر تغییر طول ناحیه تبخیرکننده بر عملکرد حرارتی یک لوله حرارتی نوسانی پنج‌دوره حاوی نانوسیال فروفلوید بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش طول ناحیه تبخیرکننده موجب بهبود عملکرد حرارتی و افزایش ظرفیت انتقال حرارت لوله می‌شود. این یافته بیانگر نقش مهم هندسه و ابعاد ناحیه انتقال حرارت در ارتقای عملکرد سامانه‌های حرارتی است [۱۹]. با وجود پیشرفت قابل توجه مدل‌های عددی، اغلب مطالعات اخیر بر بررسی ضخامت فیلم، رژیم‌های جریان، یا توزیع ضریب انتقال حرارت برای لوله‌های صاف یا هندسه‌های متداول متمرکز بوده‌اند و ارزیابی هم‌زمان رفتار هیدرودینامیکی و عملکرد حرارتی هندسه‌های مختلف فین در شرایط عملیاتی یکسان هنوز محدود است. بسیاری از مطالعات پیشین یا بر هندسه‌های ساده (مانند لوله صاف) متمرکز بوده‌اند [۵، ۱۶]، یا تنها یک شرایط عملیاتی خاص را بررسی کرده‌اند [۱۹، ۲۰]. از این‌رو، هنوز مشخص نیست که هندسه‌ای که موجب بهبود توزیع جریان می‌شود، لزوماً بهترین عملکرد حرارتی را نیز ارائه دهد. این شکاف تحقیقاتی در مقالات مروری اخیر نیز تأیید شده است، به‌گونه‌ای که کمبود مطالعات سه‌بعدی جامع درباره ارتباط رفتار هیدرودینامیکی و عملکرد حرارتی هندسه‌های مختلف به عنوان یکی از مسیرهای ضروری برای پژوهش‌های آینده معرفی شده است [۲۲].

با وجود پیشرفت مطالعات عددی در زمینه تبخیر فیلم‌ریزان، بخش قابل توجهی از پژوهش‌های پیشین [۲۲-۲۵] بر بررسی جداگانه ویژگی‌های هیدرودینامیکی فیلم، نظیر توزیع و ضخامت آن، یا ارزیابی عملکرد حرارتی سطوح اصلاح‌شده متمرکز بوده‌اند. در مطالعات مربوط به سطوح فین‌دار نیز، اثر هندسه عمدتاً از منظر افزایش سطح انتقال حرارت یا تغییر رفتار جریان بررسی شده است و ارزیابی هم‌زمان و سه‌بعدی ارتباط میان هندسه فین، بازتوزیع

شده‌اند تا نقش هندسه در پایداری فیلم مایع و شدت تبخیر به‌صورت نظام‌مند مورد ارزیابی قرار گیرد. جریان مایع از طریق یک ورودی در بخش فوقانی دامنه به سطح خارجی لوله وارد شده و تحت اثر گرانش بر روی سطح آن پخش می‌شود و به‌صورت فیلم نازک جاری می‌گردد. شرایط هندسی و مرزی به‌گونه‌ای تعریف شده‌اند که تشکیل جریان فیلم ریزان در رژیم آرام تضمین شود.

هدف اصلی این پژوهش، مقایسه اثر هندسه‌های مختلف فین بر رفتار فیلم و عملکرد حرارتی تحت یک شرایط هیدرودینامیکی یکسان است. از این‌رو، عدد رینولدز برابر با ۲۱۷، مطابق با شرایط هیدرودینامیکی مورد استفاده در مطالعه Cao و همکاران [۲۶]، به‌عنوان شرایط مرجع انتخاب شد. انتخاب این مقدار، ضمن فراهم‌کردن مبنایی یکسان برای مقایسه هندسه‌های مختلف، امکان مقایسه رفتار هیدرودینامیکی فیلم با نتایج مطالعه مرجع را نیز فراهم می‌کند. در این شرایط، سرعت ورودی آب برابر با 0.7 m/s تعیین شد.

همچنین، دمای سطح لوله به‌صورت یکنواخت و ثابت برابر با $335/10$ کلوین فرض شده است. اختلاف دمای بین فاز مایع ورودی و سطح گرم، به‌عنوان نیروی محرکه اصلی برای فرآیند تبخیر در نظر گرفته شده است. این شرایط حرارتی به‌گونه‌ای اعمال شده‌اند که امکان بررسی اثر هندسه و دینامیک جریان بر فرآیند تبخیر به‌صورت مستقل فراهم شود.

در این پژوهش، چهار پیکربندی شامل یک لوله صاف و سه لوله فین‌دار با هندسه‌های $F1$ ، $F2$ و $F3$ برای شبیه‌سازی جریان فیلم ریزان در نظر گرفته شد. هندسه و ابعاد تمامی پیکربندی‌ها، شامل لوله صاف و سه هندسه فین‌دار، بر اساس مدل‌های ارائه‌شده توسط Cao و همکاران [۲۶] تعیین و در مدل محاسباتی حاضر به کار گرفته شد. به این منظور، مشخصات هندسی گزارش‌شده در مطالعه مرجع، شامل قطر لوله، گام، ارتفاع و ضخامت فین، مبنای تعریف هندسه‌های مورد بررسی قرار گرفت. شکل هندسی و نحوه آرایش فین‌ها در شکل ۱-ج نشان داده شده و مشخصات ابعادی دقیق هر چهار پیکربندی در جدول ۱ ارائه شده است.

آب با عدد رینولدز ۲۱۷ از قسمت ورودی بالایی روی لوله جاری شد. دمای آب ورودی $333/15$ کلوین (60°C درجه سلسیوس) و سرعت آن 0.7 متر بر ثانیه تعیین گردید. این جریان آب به‌خاطر اختلاف دمای ۲ کلوینی با سطح لوله تبخیر می‌شود؛ به‌طوری‌که دمای سطح لوله ثابت و برابر $335/15$ کلوین در نظر گرفته شده است. جدول ۲ پارامترهای فیزیکی هوای ورودی و آب را ارائه می‌دهد.

فیلم مایع، یکنواختی ترشوندگی و ضریب انتقال حرارت، به‌ویژه در شرایط عملیاتی یکسان، همچنان محدود است. در نتیجه، مشخص نیست که بهبود ویژگی‌های هیدرودینامیکی فیلم در یک هندسه خاص لزوماً به بهبود عملکرد حرارتی منجر شود یا خیر. این موضوع یک خلأ مهم در درک رابطه متقابل هیدرودینامیک فیلم و انتقال حرارت در تبخیرکننده‌های فیلم‌ریزان فین‌دار ایجاد می‌کند.

برای پاسخ به این خلأ، در پژوهش حاضر چهار پیکربندی شامل یک لوله صاف و سه هندسه مختلف فین محیطی با استفاده از یک مدل سه‌بعدی CFD مبتنی بر روش VOF و در شرایط عملیاتی یکسان، شامل عدد رینولدز ۲۱۷، شبیه‌سازی شدند. اثر هندسه فین بر بازتوزیع سه‌بعدی فیلم، ضخامت و یکنواختی پوشش مایع، ترشوندگی سطح و انتقال حرارت به‌صورت هم‌زمان ارزیابی شد. این رویکرد امکان بررسی مستقیم ارتباط میان نحوه هدایت و توزیع مجدد فیلم مایع و عملکرد حرارتی را فراهم می‌کند و مشخص می‌سازد که آیا افزایش سطح یا تغییر ضخامت فیلم به‌تنهایی می‌تواند معیار مناسبی برای ارزیابی عملکرد هندسه فین باشد یا خیر.

۲- روش تحقیق

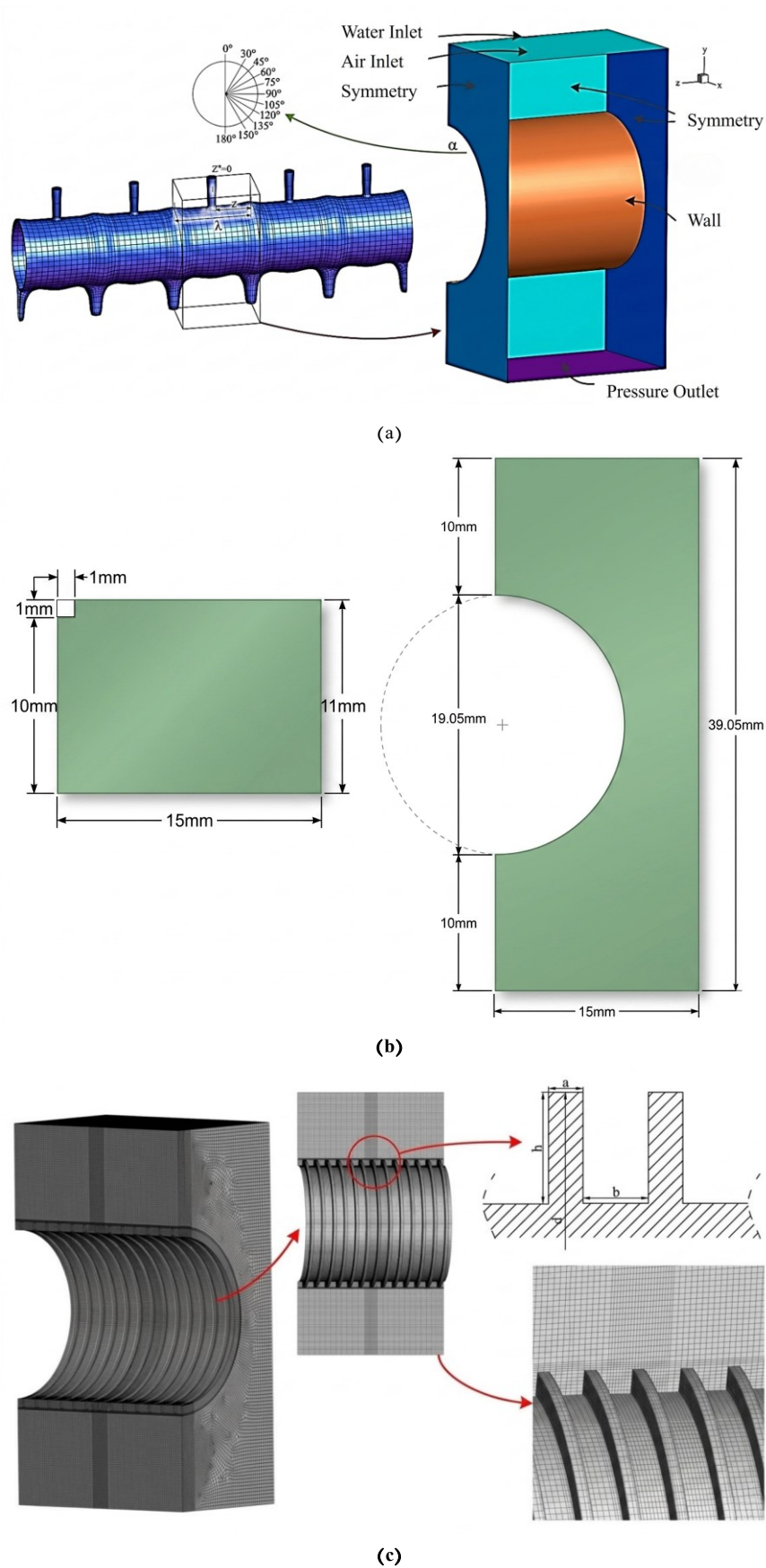
در این مطالعه، به‌منظور تحلیل عددی جریان فیلم ریزان و فرآیند تبخیر بر روی سطح خارجی لوله افقی، یک مدل سه‌بعدی مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) توسعه داده شده است. برای کاهش هزینه محاسباتی و در عین حال حفظ دقت فیزیکی، از دامنه‌ای نیم‌استوانه‌ای با اعمال شرط تقارن استفاده شده است.

۲-۱- هندسه و مدل محاسباتی

هندسه مورد بررسی شامل یک لوله افقی با چهار پیکربندی مختلف است که عبارت‌اند از یک لوله صاف و سه نوع لوله فین‌دار. هدف از انتخاب این پیکربندی‌ها، بررسی اثر تغییرات هندسی سطح بر رفتار هیدرودینامیکی فیلم مایع، الگوی توزیع ضخامت فیلم و عملکرد انتقال حرارت در فرآیند تبخیر می‌باشد.

در شکل ۱-الف، چگونگی جریان یافتن یک فیلم نازک مایع بر روی لوله‌ای افقی نشان داده شده است. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی محدوده گسترش این جریان مایع روی سطح لوله، در نتیجه پخش شدن ناشی از یک اسپری ورودی است. ارتفاع پاشش مایع در این مدل، مطابق شکل ۱-ب، برابر با ۱۰ میلی‌متر تنظیم شده است. افزون بر این، سطح جلو و مرزهای کناری مدل، به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده‌اند که از تقارن هندسی برخوردارند.

فین‌های ایجادشده بر روی سطح خارجی لوله به‌صورت محیطی طراحی شده‌اند و تفاوت میان سه هندسه فین‌دار مورد استفاده در این مطالعه، در پارامترهای هندسی شامل ارتفاع فین، فاصله بین فین‌ها و ضخامت نوک فین‌ها است. این تغییرات هندسی به‌منظور ایجاد تغییر در میزان سطح مؤثر انتقال حرارت انتخاب



شکل ۱ الف و ب هندسه سه بعدی، ج) ساختار فین

Fig. 1 (a) and (b) Three-Dimensional Geometry; (c) Fin Structure

جدول ۱ مشخصات هندسی لوله صاف و لوله‌های فین‌دار

Table 1 Geometric Characteristics of the Smooth Tube and Finned Tubes

Tube Type	Diameter	Fin Pitch	Fin Height	Fin Thickness
	(d, mm)	(a, mm)	(h, mm)	(b, mm)
Smooth Tube	19.05	-	-	-
Fin 1 (F1)	18.93	1.24	0.5	1.51
Fin 2 (F2)	18.93	0.41	0.83	1.27
Fin 3 (F3)	18.93	0.31	1.05	0.73

جدول ۲ پارامترهای فیزیکی هوای و آب ورودی [۲۷، ۲۸]

Table 2 Thermophysical Properties of the Inlet Air and Water [27, 28]

Parameter	Water	Air
Dynamic Viscosity	$\mu(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	1.003×10^{-3} 1.789×10^{-5}
Density	$\rho(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	998.2 1.22
Surface Tension	$\sigma(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	0.072 -

۲-۲- معادلات حاکم

برای شبیه‌سازی جریان فیلم ریزان و فرآیند تبخیر بر روی سطح خارجی لوله، از نرم‌افزار ANSYS Fluent 2022 استفاده شد. حل میدان جریان و انتقال حرارت بر پایه روش حجم محدود انجام گرفت. کوپل فشار-سرعت با استفاده از الگوریتم SIMPLE برقرار شد. برای گسسته‌سازی فشار از طرح PRESTO! و برای معادلات مومنتوم و انرژی از طرح مرتبه دوم استفاده گردید.

به منظور ردیابی سطح مشترک بین فازهای آب و هوا، روش حجم سیال (Volume of Fluid, VOF) به کار گرفته شد. با توجه به ماهیت جریان فیلم ریزان، وجود یک سطح آزاد مشخص و متغیر بین فاز مایع و گاز از ویژگی‌های اصلی مسئله حاضر است. شکل و موقعیت این سطح مشترک در اثر گرانش، کشش سطحی، ترشوندگی و هندسه سطح انتقال حرارت تغییر می‌کند و مستقیماً بر توزیع و ضخامت فیلم و در نتیجه بر انتقال حرارت اثر می‌گذارد. از این رو، روش حجم سیال (VOF) برای ردیابی سطح مشترک مایع-گاز انتخاب شد. این روش با حل معادله کسر حجمی هر فاز، امکان تعیین موقعیت سطح مشترک و پیش‌بینی تغییرات شکل، گستردگی و ضخامت فیلم را در طول سطح لوله فراهم می‌کند [۲۷]. این قابلیت برای مطالعه حاضر اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا مقایسه سه‌بعدی بازتوزیع فیلم و ضخامت آن در لوله صاف و هندسه‌های مختلف فین، یکی از اهداف اصلی پژوهش است. همچنین، ترکیب VOF با مدل انتقال جرم Lee امکان شبیه‌سازی هم‌زمان حرکت سطح مشترک و تغییر فاز ناشی از تبخیر را فراهم می‌سازد [۲۸].

این مدل یکی از پرکاربردترین روش‌های شبیه‌سازی تغییر فاز در محیط فلوئنت بوده و بر مبنای انتقال جرم بین فازهای مایع و بخار عمل می‌کند. در این مدل، هنگامی که دمای موضعی سیال از دمای اشباع بیشتر شود، فرآیند تبخیر رخ داده و جرم از فاز مایع به فاز بخار منتقل می‌شود. در مقابل، در شرایطی که دمای موضعی کمتر از دمای اشباع باشد، فرآیند میعان اتفاق می‌افتد.

معادله نرخ انتقال جرم:

$$\dot{m}_{lv} = C_{evap} \alpha_l \rho_l \frac{T - T_{sat}}{T_{sat}} T > T_{sat}$$

و برای میعان:

$$\dot{m}_{vl} = C_{cond} \alpha_v \rho_v \frac{T_{sat} - T}{T_{sat}} T < T_{sat}$$

در این پژوهش، ضرایب انتقال جرم مدل Lee شامل ضریب تبخیر C_{evap} ضریب میعان C_{cond} مطابق مقادیر پیش‌فرض نرم‌افزار ANSYS Fluent، هر دو برابر با 0.1 s^{-1} در نظر گرفته شدند. همچنین دمای اشباع برابر با $333/15$ کلوین تعریف شد. این مقادیر در تمامی شبیه‌سازی‌ها ثابت نگه داشته شدند تا اثر هندسه فین بر رفتار هیدرودینامیکی و عملکرد حرارتی به‌صورت مستقل ارزیابی شود. در روابط فوق، C_{evap} و C_{cond} به‌ترتیب ضرایب انتقال جرم تبخیر و میعان، a کسر حجمی فاز، r چگالی و T_{sat} دمای اشباع می‌باشند. معادلات حاکم بر اساس روش VOF، شامل معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی برای جریان دوفازی بوده و به صورت زیر بیان می‌شوند [۲۷]:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{V}) = -\nabla P + \nabla [\mu (\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F}_{vol} \quad (2)$$

در این رابطه، $\vec{F}_{vol}$ عبارت مربوط به ترم منبع کشش سطحی حجمی (Volume Surface Tension Source Term) می‌باشد. برای تخمین این مقدار، رابطه زیر ارائه شده است [۲۹]:

$$\vec{F}_{vol} = \sigma \frac{\rho \cdot \vec{k}_1 \cdot \nabla \alpha_2}{0.5(\rho_1 + \rho_g)} \quad (3)$$

که در آن $\vec{k}_1$ بیانگر انحنای موضعی سطح فاز مایع است. همچنین σ ضریب کشش سطحی را نشان می‌دهد. مقدار $\vec{k}_1$ بر اساس دیورژانس بردار نرمال واحد تعریف می‌شود.

$$\vec{k}_1 = -\nabla \hat{n} \quad (4)$$

$$\hat{n} = \frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} \quad (5)$$

$$\vec{n} = \nabla \alpha_2 \quad (6)$$

در فرآیند شبیه‌سازی، هوا و آب به‌ترتیب به‌عنوان فاز اول (Primary Phase) و فاز دوم (Secondary Phase) تعریف شده‌اند. کسر حجمی فاز مایع به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \alpha_2}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla (\alpha_2) = 0 \quad (7)$$

کسر حجمی فاز گاز نیز به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\alpha_1 = 1 - \alpha_2 \quad (8)$$

علاوه بر این، ویسکوزیته دینامیکی و چگالی با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۲۷]:

$$\mu = \alpha_2 \mu_1 + (1 - \alpha_2) \mu_g \quad (9)$$

$$\rho = \alpha_2 \rho_1 + (1 - \alpha_2) \rho_g \quad (10)$$

نیروی کشش سطحی در سطح مشترک فازها با استفاده از مدل CSF ارائه شده توسط Brackbill و همکاران [۲۹] لحاظ گردید. در این

- ۱- جریان فیلم مایع و فاز گاز به صورت نیوتنی و تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شدند.
- ۲- خواص ترموفیزیکی سیالات شامل چگالی، ویسکوزیته، رسانندگی حرارتی و گرمای ویژه ثابت فرض شدند.
- ۳- جریان در محدوده اعداد رینولدز مورد بررسی در رژیم آرام فرض شد و اثرات آشفتگی لحاظ نگردید.
- ۴- انتقال حرارت در دیواره لوله به صورت یکنواخت اعمال شد و دمای سطح لوله در طول شبیه‌سازی ثابت در نظر گرفته شد.
- ۵- فرآیند تبخیر در سطح مشترک مایع-گاز با استفاده از مدل Lee شبیه‌سازی گردید [۲۸].
- ۶- زاویه تماس بین مایع و دیواره در تمامی شبیه‌سازی‌ها ثابت و برابر با مقدار تعیین‌شده در شرایط مرزی در نظر گرفته شد.
- ۷- اثر نیروهای کشش سطحی و گرانش در معادلات حاکم لحاظ گردید.
- ۸- انتقال حرارت تشعشعی در مقایسه با انتقال حرارت جابجایی و تغییر فاز ناچیز فرض شد و در مدل وارد نگردید.
- تغییر فاز در سطح مشترک مایع-بخار با استفاده از مدل Lee انجام شد و فرض گردید که نرخ انتقال جرم تنها تابع شرایط حرارتی موضعی بوده و اثر واکنش‌های شیمیایی یا فرآیندهای غیرتعادلی در نظر گرفته نشده است.
- این مجموعه فرضیات مطابق مدل Lee [۲۸] باعث ساده‌سازی تحلیل شده و تمرکز اصلی را بر اثر شکل لوله بر رفتار جریان و ویژگی‌های انتقال حرارت در تبخیر فیلم ریزان قرار می‌دهد.

۲-۴- شرایط مرزی

به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند تبخیر فیلم ریزان بر روی سطح خارجی یک لوله افقی، شرایط مرزی مطابق با شرایط فیزیکی واقعی سیستم تعریف شد. در این مدل، آب به‌عنوان فاز ثانویه از طریق مرز ورودی در بخش بالایی دامنه محاسباتی وارد شده و کسر حجمی آن در ورودی برابر با یک در نظر گرفته شد. دمای سیال ورودی نیز برابر با ۳۳۳/۱۵ کلوین تعیین گردید.

در این مطالعه، جریان با سرعت ورودی ۰/۶ متر بر ثانیه، متناظر با عدد رینولدز ۲۱۷، مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور ارزیابی اثر شرایط جریان بر رفتار هیدرودینامیکی فیلم مایع و ویژگی‌های انتقال حرارت، سایر پارامترهای عملیاتی در تمامی شبیه‌سازی‌ها ثابت نگه داشته شدند.

سطح خارجی لوله به‌صورت دیواره‌ای با دمای ثابت مدل‌سازی شد و دمای آن برابر با ۳۳۵/۱۵ کلوین در نظر گرفته شد. اختلاف دمای ایجادشده بین دیواره و سیال ورودی، نیروی محرکه لازم برای انتقال حرارت از سطح لوله به فیلم مایع و در نتیجه وقوع فرآیند تبخیر را فراهم می‌سازد.

در مرز خروجی دامنه محاسباتی، شرط فشار خروجی اعمال شد تا خروج آزادانه فازهای موجود از دامنه تضمین گردد. همچنین،

مدل، اثر کشش سطحی به صورت یک نیروی حجمی در معادله مومنوم وارد می‌شود.

برای توصیف شرایط جریان، عدد رینولدز فیلم مطابق رابطه (۱۱) تعریف گردید [۳۰].

$$Re = \frac{4\Gamma}{\mu} = \frac{4\rho u A 1000}{\mu \cdot 2 \cdot \lambda} \quad (11)$$

به منظور تعیین ضخامت فیلم مایع، سطح مشترک فازها از روی کانتور کسر حجمی آب استخراج شد و مکان متناظر با مقدار $VOF=0.5$ به عنوان مرز بین فاز مایع و گاز در نظر گرفته شد [۳۰].

مطابق با شکل ۱، Z نشان‌دهنده فاصله محوری از مرکز ستون مایع تا هر نقطه روی سطح لوله است. به منظور توصیف ساده‌تر گستردگی جریان فیلم نازک در جهت محوری، کمیت بی‌بعد Z^* تعریف می‌شود. فرمول Z^* بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۲۸]:

$$Z^* = \frac{Z}{\lambda} \quad (12)$$

$$\lambda = 2\pi \sqrt{\frac{n\sigma}{\rho g}} \quad (13)$$

در این رابطه، λ طول محوری مدل و n یک ثابت تجربی است. زمانی که جریان سیال از روی لوله‌های افقی عرضی عبور می‌کند و ضخامت فیلم روی دیواره کم باشد، مقدار $n = 2$ در نظر گرفته می‌شود. در حالی که در شرایطی که ضخامت فیلم زیاد باشد، مقدار $n = 3$ خواهد بود [۳۰].

همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود، زاویه ساعت‌گرد (θ) در اطراف محیط لوله تعریف شده است. سطح مشترک میان گاز و مایع بر اساس مقدار مشخصی از کسر حجمی VOF تعیین می‌شود. سپس ضخامت فیلم با تبدیل این سطح مشترک در نقطه‌ای که مقدار VOF برابر ۰/۵ است، محاسبه می‌گردد [۳۰].

$$\theta = 90^\circ - \tan^{-1}(y/x)|_{VOF=0.5} \frac{80^\circ}{\pi} \quad (14)$$

$$\delta = \sqrt{x^2 + y^2} |VOF = 0.5 - \frac{D}{2} \quad (15)$$

ضریب انتقال حرارت موضعی $h(\theta, z)$ تابعی از موقعیت زاویه‌ای θ در راستای محیط استوانه گرم‌شده و همچنین موقعیت محوری z می‌باشد. برای شرایط دما ثابت، ضریب انتقال حرارت موضعی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$h = \frac{1}{\frac{\Delta T}{q''} - \frac{\delta}{k}} = \frac{1}{\frac{T_w(\theta, z) - T_f}{q''(\theta, z)} - \frac{\delta}{k}} \quad (16)$$

که در آن q'' شار حرارتی سطحی لوله، $T_w(\theta, z)$ دمای موضعی دیواره لوله و T_f دمای بالک سیال ورودی، δ ضخامت فیلم مایع و ضریب هدایت حرارتی فیلم مایع است.

۲-۳- فرضیات

به منظور کاهش پیچیدگی محاسبات و توسعه یک مدل قابل اعتماد، فرضیات زیر در شبیه‌سازی اعمال شدند [۲۸]:

جدول ۳ شرایط مرزی و پارامترهای ورودی

Table 3 Boundary Conditions and Operating Parameters

Inlet Velocity (m/s)	Reynolds Number	Temperature (K)	Water Volume Fraction	Contact Angle (Degree)
0.6	217	333.15	1	12

به منظور کاهش هزینه محاسباتی و بهره‌گیری از تقارن هندسی مسئله، سطوح متقارن با استفاده از شرط مرزی تقارن مدل‌سازی شدند.

برای لحاظ کردن اثر ترشوندگی سطح، زاویه تماس بین آب و سطح لوله برابر با ۱۲ درجه در نظر گرفته شد. این مقدار بر اساس نتایج مطالعات پیشین انتخاب شده و در تمامی حالات شبیه‌سازی ثابت نگه داشته شد. افزون بر این، اثر نیروی گرانش در راستای قائم در معادلات حاکم منظور گردید تا حرکت، توزیع و ضخامت فیلم مایع بر روی سطح لوله با دقت بیشتری پیش‌بینی شود.

در این پژوهش، شرط دمای ثابت دیواره به عنوان یک ساده‌سازی مدل‌سازی اعمال شد تا اثر هندسه فین بر رفتار هیدرودینامیکی فیلم، توزیع ضخامت و عملکرد انتقال حرارت، مستقل از تغییرات دمایی دیواره مورد ارزیابی قرار گیرد. این فرض، امکان مقایسه مستقیم چهار پیکربندی مورد بررسی را تحت یک شرایط حرارتی یکسان فراهم می‌کند و از این رو، نتایج حاصل عمدتاً برای مقایسه نسبی عملکرد هندسه‌های مختلف قابل تفسیر هستند. با این حال، در شرایط واقعی، دمای دیواره لزوماً در طول لوله ثابت نیست و تحت تأثیر تغییرات دمای سیال گرم‌کننده، مقاومت حرارتی دیواره و فین و همچنین فرآیند تغییر فاز قرار می‌گیرد. بنابراین، شرط دمای ثابت دیواره را نمی‌توان به طور کامل معادل شرایط عملیاتی واقعی در نظر گرفت. بررسی رفتار حرارتی تحت شرط شار حرارتی ثابت و یا با استفاده از مدل انتقال حرارت مزدوج (Heat Conjugate Transfer) می‌تواند در مطالعات آتی، اثر متقابل تغییرات دمای دیواره و هندسه فین را با جزئیات بیشتری مشخص کند.

جدول ۳ خلاصه شرایط مرزی اعمال شده در شبیه‌سازی‌های حاضر را نشان می‌دهد.

فرآیند انتقال جرم ناشی از تغییر فاز بین فازهای مایع و بخار با استفاده از مدل Lee شبیه‌سازی شد. در این مدل، نرخ انتقال جرم به اختلاف دمای موضعی سیال نسبت به دمای اشباع وابسته بوده و وقوع تبخیر یا میعان در هر سلول محاسباتی بر اساس شرایط ترمودینامیکی حاکم تعیین می‌شود. بدین ترتیب، در نواحی با دمای بالاتر از دمای اشباع، انتقال جرم از فاز مایع به فاز بخار رخ داده و فرآیند تبخیر شبیه‌سازی می‌شود؛ در حالی که در دماهای پایین‌تر از دمای اشباع، فرآیند میعان اتفاق می‌افتد.

به کارگیری مدل Lee امکان مدل‌سازی هم‌زمان انتقال جرم و انتقال حرارت در جریان‌های دوفازی همراه با تغییر فاز را فراهم می‌کند و به دلیل سادگی، پایداری عددی و دقت مناسب، به طور گسترده در مطالعات مرتبط با تبخیر و میعان فیلم‌های مایع مورد استفاده قرار گرفته است [۲۸].

۲-۵- اعتبارسنجی

با وجود انجام مطالعات گسترده نظری و تجربی در دهه‌های اخیر پیرامون جریان‌های فیلم ریزان و تحلیل ضخامت فیلم مایع، بخش قابل توجهی از مبانی علمی این حوزه بر پایه پژوهش‌های اولیه Nusselt [۳۱] استوار است. اهمیت ضخامت فیلم به دلیل تأثیر مستقیم آن بر ویژگی‌های هیدرودینامیکی جریان، انتقال حرارت و انتقال جرم، موجب شده است که این پارامتر همواره مورد توجه پژوهشگران قرار گیرد.

Nusselt [۳۱] نخستین چارچوب تحلیلی برای توصیف جریان فیلم ریزان را ارائه کرد. وی در توسعه این مدل، فیلم مایع را به صورت لایه‌ای پیوسته، هموار و آرام در نظر گرفت و با فرض ناچیز بودن اثرات اینرسی و مومنتوم، جریان را تحت تأثیر تعادل میان نیروی گرانش و نیروهای لزجی تحلیل نمود. بر اساس این فرضیات، رابطه‌ای تحلیلی برای پیش‌بینی ضخامت فیلم ارائه شد که تاکنون به عنوان یکی از روابط پایه و مرجع در مطالعات جریان‌های فیلمی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳۱]. این رابطه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\delta = \left(\frac{3\mu_L \Gamma}{\rho_L(\rho_L - \rho_G)g \sin \beta} \right)^{1/3} \quad (17)$$

در این رابطه، β زاویه محیطی اندازه‌گیری شده از بالاترین نقطه لوله افقی را نشان می‌دهد و Γ بیانگر نرخ جریان جرمی مایع در یک سمت لوله است.

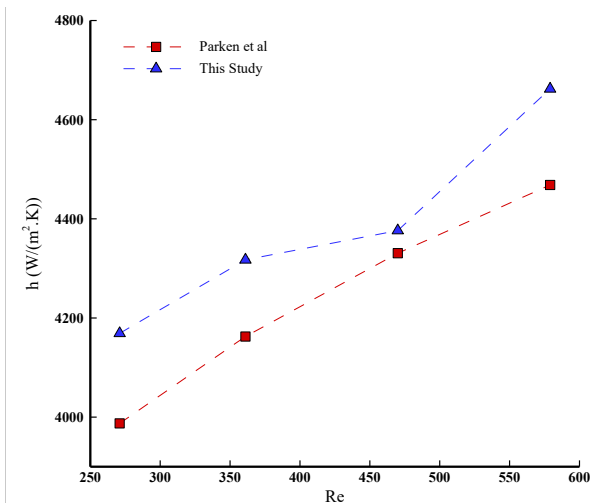
بر اساس این تعاریف، عدد رینولدز فیلم به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۱]:

$$Re = \frac{4\Gamma}{\mu} \quad (18)$$

به منظور افزایش دقت پیش‌بینی ضخامت فیلم، اثر فاصله بین لوله‌ها از طریق پارامتری بُعد (S/D) در مدل لحاظ شد. در این رابطه، قطر خارجی لوله (D = 19.05 mm) ثابت در نظر گرفته شده است؛ از این رو، تأثیر تغییرات قطر خارجی بر ضخامت فیلم ناچیز فرض می‌شود. علاوه بر این، به منظور در نظر گرفتن اثر مومنتوم و انباشت جریان در نواحی پایینی لوله، برای زوایای محیطی $\beta > 90^\circ$ یک تابع دو ضابطه‌ای به کار گرفته شد تا رفتار واقعی فیلم مایع در این ناحیه با دقت بیشتری توصیف شود.

بر این اساس، Hou و همکاران [۳۲] با توسعه و اصلاح رابطه کلاسیک Nusselt (معادله ۱۷)، یک رابطه تجربی برای پیش‌بینی ضخامت فیلم ارائه کردند که قادر است اثر فاصله بین لوله‌ها و تغییرات هیدرودینامیکی جریان در امتداد محیط لوله را در نظر بگیرد. رابطه اصلاح شده مورد استفاده در این مطالعه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\delta = C \left(\frac{3\mu_L \Gamma}{\rho_L(\rho_L - \rho_G)g \sin \beta} \right)^{1/3} \left(\frac{S}{D} \right)^n \quad (19)$$



شکل ۳ مقایسه تغییرات ضریب انتقال حرارت بین نتایج حاضر و رابطه Parken [۳۳].

Fig. 3 Comparison of the Heat Transfer Coefficient Variation between the Present Results and the Parken Correlation [33].

جدول ۵ مقایسه ضریب انتقال حرارت متوسط حاصل از شبیه‌سازی با رابطه تجربی Parken و همکاران

Table 5 Comparison of the Average Heat Transfer Coefficient Obtained from the Simulation with the Empirical Correlation of Parken et al.

Re	h (W/m²K)		Difference(%)
	Simulation	Parken et al.	
217	4169.0	3987.4	4.36
361	4317.3	4162.6	3.58
470	4376.4	4330.7	1.04
579	4662.2	4468.3	4.16

به‌منظور ارزیابی دقت مدل عددی در پیش‌بینی انتقال حرارت، ضریب انتقال حرارت متوسط حاصل از شبیه‌سازی با رابطه تجربی ارائه‌شده توسط Parken و همکاران [۳۳] مقایسه شد. این رابطه که بر اساس داده‌های آزمایشگاهی تبخیر فیلم ریزان روی لوله افقی توسعه یافته است، به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\bar{h} \left(\frac{v^2}{gk^3} \right)^{\frac{1}{3}} = 0.042 Re^{0.15} Pr^{0.53} \quad (20)$$

که در آن $\bar{h}$ ضریب انتقال حرارت متوسط، Re عدد رینولدز، Pr عدد پرانتل، k هدایت حرارتی سیال، n ویسکوزیته سینماتیکی و g شتاب گرانش است.

به‌منظور بررسی دقت مدل، ضریب انتقال حرارت متوسط برای چهار عدد رینولدز مختلف محاسبه و با مقادیر حاصل از رابطه Parken مقایسه شد. نتایج این مقایسه در جدول ۵ ارائه شده است.

همان‌گونه که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط رابطه تجربی Parken در تمامی شرایط کمتر از ۵ درصد بوده و کمترین اختلاف مربوط به عدد رینولدز ۴۷۰ با مقدار ۱/۰۴ درصد است، در حالی که بیشترین اختلاف در عدد رینولدز ۲۱۷ برابر ۴/۳۶ درصد به دست آمده است.

جدول ۴ ضرایب رابطه ضخامت فیلم اندازه‌گیری‌شده

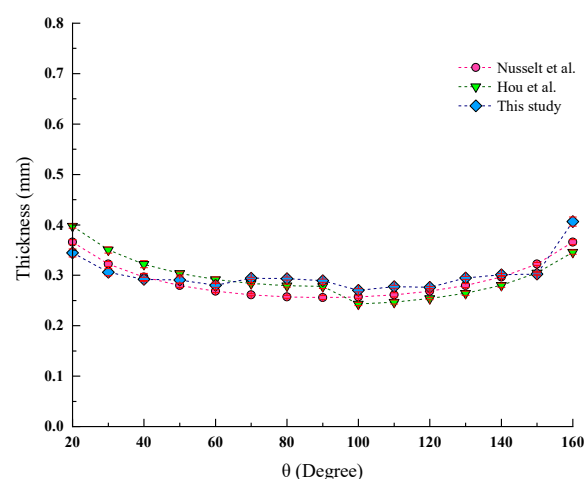
Table 4 Coefficients of the Measured Film Thickness Correlation

$\beta (^{\circ})$	C	n	D (mm)	S (mm)
$0^{\circ} < \beta \leq 90^{\circ}$	0.97540	-0.16670	19.05	10
$90^{\circ} < \beta \leq 180^{\circ}$	0.84978	-0.16479	19.05	10

به‌منظور ارزیابی دقت و صحت مدل عددی توسعه‌یافته، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های مرجع ارائه‌شده توسط et al Hou [۳۲] و همچنین پیش‌بینی‌های مدل تحلیلی Nusselt [۳۱] مقایسه شد. شکل ۲ تغییرات ضخامت فیلم مایع را بر حسب زاویه محیطی لوله (θ) نشان می‌دهد.

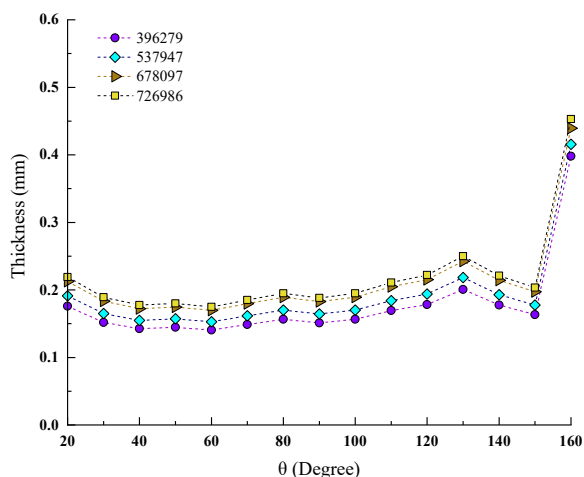
همان‌گونه که از شکل ۲ مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از شبیه‌سازی حاضر تطابق بسیار مطلوبی با داده‌های مرجع و مدل تحلیلی Nusselt دارند. علاوه بر نزدیکی مقادیر ضخامت فیلم، روند تغییرات آن در امتداد محیط لوله نیز به‌خوبی توسط مدل عددی بازتولید شده است که بیانگر توانایی مناسب مدل در پیش‌بینی رفتار هیدرودینامیکی جریان فیلم ریزان می‌باشد.

به‌منظور ارزیابی کمی دقت مدل، میانگین اختلاف نسبی نتایج شبیه‌سازی با داده‌های مرجع محاسبه شد که مقدار آن حدود ۱ درصد به دست آمد. این میزان خطا نشان‌دهنده دقت بالای مدل در پیش‌بینی توزیع ضخامت فیلم مایع بر روی سطح لوله است. بر اساس نتایج اعتبارسنجی، می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب مدل چندفازی VOF و مدل تغییر فاز Lee قادر است رفتار هیدرودینامیکی جریان فیلم ریزان را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند. بنابراین، مدل توسعه‌یافته از اعتبار لازم برای بررسی اثر پارامترهای هندسی فین‌ها و شرایط عملیاتی جریان بر فرآیند انتقال حرارت و تبخیر فیلم ریزان برخوردار بوده و می‌تواند به‌عنوان ابزاری قابل اعتماد برای تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار گیرد.



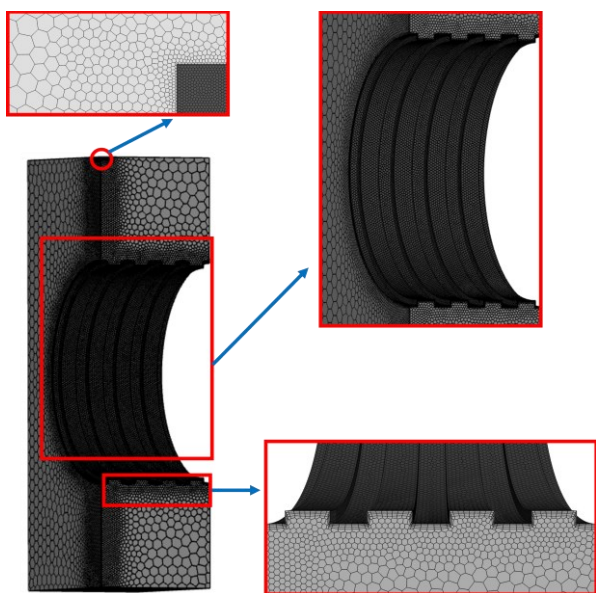
شکل ۲ مقایسه تغییرات ضخامت فیلم بر حسب زاویه محیطی بین نتایج حاضر، رابطه Nusselt [۳۱] و داده‌های Hou و همکاران [۳۲].

Fig. 2 Comparison of the Film Thickness Variation with Circumferential Angle between the Present Results, the Nusselt Correlation [31], and the Data of Hou et al. [32].



شکل ۴ مقایسه تغییرات ضخامت فیلم بر حسب زاویه محیطی برای شبکه‌های محاسباتی مختلف در $Z^* = 0$

Fig. 4 Comparison of the Film Thickness Variation with Circumferential Angle for Different Computational Meshes at $Z^* = 0$



شکل ۵ نمای کلی شبکه محاسباتی و بزرگنمایی نواحی ریزشده در مجاورت سطح لوله و فین

Fig. 5 Overall computational mesh and enlarged views of the refined regions near the tube and fin surfaces

۳- نتایج و بحث

در این بخش، به منظور تحلیل اثر هندسه فین بر رفتار جریان فیلم ریزان، ابتدا توزیع کسر حجمی مایع به عنوان شاخصی از نحوه پوشش سطح و پایداری فیلم بررسی می‌شود. سپس تغییرات ضخامت فیلم، ضریب انتقال حرارت، میدان سرعت و میدان دما به ترتیب تحلیل می‌شوند تا ارتباط میان ویژگی‌های هیدرودینامیکی و عملکرد حرارتی هندسه‌های مختلف به صورت گام به گام تبیین گردد.

اختلاف مشاهده شده می‌تواند ناشی از تفاوت میان شرایط و فرضیات مطالعه تجربی Parken و مدل عددی حاضر باشد. رابطه Parken بر اساس داده‌های تجربی حاصل از انتقال حرارت فیلم آب روی لوله‌های افقی توسعه یافته است و در تعیین خواص ترموفیزیکی، دمای فیلم، یعنی میانگین دمای سطح لوله و دمای آب ورودی، مبنا قرار گرفته است. در مقابل، در مدل حاضر خواص ترموفیزیکی سیال ثابت فرض شده و دمای سطح لوله نیز به صورت یکنواخت و ثابت اعمال شده است. علاوه بر این، تفاوت در شرایط واقعی شکل‌گیری و توزیع فیلم در آزمایش و شرایط ایده‌آل‌سازی شده مدل عددی می‌تواند در اختلاف مشاهده شده مؤثر باشد. بنابراین، اختلاف موجود را می‌توان حاصل برهم‌کنش تفاوت شرایط تجربی و فرضیات مدل‌سازی و همچنین ماهیت تجربی رابطه Parken دانست.

۶-۲- استقلال شبکه

به منظور اطمینان از مستقل بودن نتایج نسبت به اندازه شبکه محاسباتی، مطالعه استقلال شبکه برای چهار شبکه با تعداد سلول‌های ۳۹۶۲۷۹، ۵۳۷۹۴۷، ۶۷۸۰۹۷ و ۷۲۶۹۸۶ انجام شد. در این بررسی، ضخامت فیلم مایع به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای هیدرودینامیکی جریان فیلم ریزان انتخاب گردید. مقایسه نتایج در مقطع $Z^* = 0$ انجام شد.

شکل ۴ تغییرات ضخامت فیلم را بر حسب زاویه محیطی لوله برای شبکه‌های مختلف نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که با افزایش تعداد سلول‌ها، تغییرات پیش‌بینی شده ضخامت فیلم به تدریج کاهش یافته و پاسخ عددی به سمت یک مقدار پایدار همگرا می‌شود. بیشترین اختلاف بین نتایج مربوط به شبکه‌های ۳۹۶۲۷۹ و ۵۳۷۹۴۷ سلولی مشاهده شد که عمده‌تاً در نواحی انتهایی مسیر جریان و زوایای بزرگ‌تر از ۱۴۰ درجه رخ می‌دهد. با افزایش تعداد سلول‌ها از ۶۷۸۰۹۷ به ۷۲۶۹۸۶، تغییرات ضخامت فیلم بسیار ناچیز بوده و اختلاف میان نتایج کمتر از ۳ درصد به دست آمد. این موضوع نشان می‌دهد که حل عددی به حالت مستقل از شبکه رسیده است و افزایش بیشتر تعداد سلول‌ها تأثیر محسوسی بر نتایج ندارد. با توجه به دقت مناسب و همچنین هزینه محاسباتی کمتر نسبت به ریزترین شبکه، شبکه شامل ۶۷۸۰۹۷ سلول به عنوان شبکه نهایی برای تمامی شبیه‌سازی‌های این پژوهش انتخاب شد.

شکل ۵ نحوه ایجاد و ریزسازی شبکه محاسباتی در نواحی مختلف دامنه، شامل ناحیه نزدیک دیواره، ورودی جریان و نواحی مجاور فین‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شبکه در نواحی مذکور با تراکم بیشتری ایجاد شده است تا تغییرات میدان جریان و سطح مشترک مایع-گاز با دقت مناسب ثبت شود.

۳-۱- تحلیل گسترش فیلم و ترشوندگی سطح

به منظور درک بهتر تأثیر هندسه فین بر رفتار فیلم مایع، کانتورهای کسر حجمی آب برای چهار هندسه مورد بررسی قرار گرفت. توزیع کسر حجمی اطلاعات ارزشمندی در خصوص نحوه گسترش فیلم مایع، میزان پوشش سطح و احتمال تشکیل نواحی خشک‌شدگی ارائه می‌دهد. از آنجا که عملکرد حرارتی تبخیرکننده‌های فیلم ریزان به شدت به یکنواختی ترشوندگی سطح وابسته است، بررسی این پارامتر می‌تواند مکانیزم‌های مؤثر در تغییر ضخامت فیلم را آشکار سازد.

شکل ۶ توزیع کسر حجمی فاز مایع را برای لوله صاف و سه هندسه فین‌دار در شرایط جریان یکسان، از دو نمای روبه‌رو و ایزومتریک، نشان می‌دهد. این تصاویر نشان می‌دهند که تغییر هندسه فین علاوه بر تغییر ضخامت فیلم، نحوه گسترش، هدایت و پوشش سطح توسط فیلم مایع را نیز به طور محسوسی تحت تأثیر قرار می‌دهد.

در لوله صاف، پس از برخورد جریان به قسمت فوقانی لوله، فیلم مایع بدون وجود هیچ مانع هندسی در امتداد سطح گسترش یافته و تقریباً تمام محیط لوله را می‌پوشاند. همان‌گونه که در نمای ایزومتریک مشاهده می‌شود، سطح ترشده پیوسته و یکنواخت بوده و تنها در قسمت پایینی، به دلیل اثر گرانش، افزایش ضخامت فیلم و تجمع نسبی مایع مشاهده می‌شود. این رفتار بیانگر توزیع نسبتاً یکنواخت فیلم روی سطح خارجی لوله است.

در هندسه F1، فین‌ها مسیر حرکت فیلم را تغییر داده و باعث هدایت مایع در امتداد شیارهای ایجادشده می‌شوند. در نتیجه، پهنای ناحیه ترشده نسبت به لوله صاف کاهش یافته و فیلم به جای گسترش یکنواخت، در مسیرهای مشخصی متمرکز می‌شود. با وجود این، هنوز بخشی از سطح بین فین‌ها توسط فیلم پوشیده شده و پیوستگی جریان تا حد زیادی حفظ می‌شود.

در هندسه F2، اثر هدایت‌کنندگی فین‌ها نسبت به F1 افزایش یافته است. تصاویر نشان می‌دهند که فیلم مایع عمدتاً در ناحیه مرکزی متمرکز شده و عرض ناحیه ترشده کاهش بیشتری یافته است. در نمای ایزومتریک نیز مشاهده می‌شود که مایع تمایل دارد در امتداد کانال‌های ایجادشده بین فین‌ها حرکت کند و بخش قابل توجهی از سطح جانبی لوله از تماس مستقیم با فیلم مایع خارج می‌شود. این رفتار نشان‌دهنده افزایش پدیده کانالیزه شدن جریان است.

در هندسه F3، این پدیده بیشترین شدت را دارد. فیلم مایع تقریباً به چند مسیر باریک محدود شده و حرکت آن کاملاً تحت تأثیر هندسه فین قرار گرفته است. همان‌گونه که در هر دو نما مشاهده می‌شود، عرض ناحیه ترشده در مقایسه با سایر هندسه‌ها کمترین

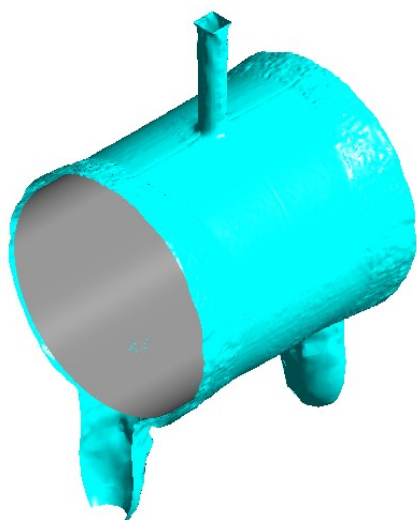
مقدار را داشته و قسمت‌های وسیعی از سطح خارجی لوله فاقد پوشش مایع هستند. علاوه بر این، خروج مایع از انتهای ناحیه فین‌دار به صورت یک جریان متمرکز نشان می‌دهد که فین‌ها مسیر حرکت فیلم را به طور مؤثری کنترل کرده‌اند.

در مجموع، تصاویر نشان می‌دهند که با تغییر هندسه فین از F1 به F3، توزیع فیلم مایع از یک پوشش نسبتاً گسترده و یکنواخت به یک جریان هدایت‌شده و کانالیزه تبدیل می‌شود. در نتیجه، پهنای ناحیه ترشده کاهش یافته و ناهمگنی توزیع فیلم روی سطح افزایش می‌یابد. هندسه فین علاوه بر هدایت جریان، الگوی ترشوندگی سطح را نیز تغییر می‌دهد. در هندسه F1 بخش عمده سطح لوله همچنان توسط فیلم مایع پوشیده باقی می‌ماند و پیوستگی فیلم حفظ می‌شود. این موضوع موجب توزیع یکنواخت‌تر شار حرارتی می‌شود. در مقابل، در هندسه F2 و به ویژه F3، تمرکز جریان در مسیرهای محدود، سطح مؤثر ترشوندگی را کاهش داده و موجب افزایش ناهمگنی توزیع انتقال حرارت می‌شود. بنابراین، هندسه فین نه تنها بر ضخامت موضعی فیلم اثرگذار است، بلکه الگوی گسترش و مسیر حرکت مایع را نیز کنترل می‌کند. این تغییرات هندسی زمینه‌ساز تغییر در رفتار انتقال حرارت و توزیع ضریب انتقال حرارت خواهند بود که در بخش‌های بعدی مقاله به صورت کمی مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

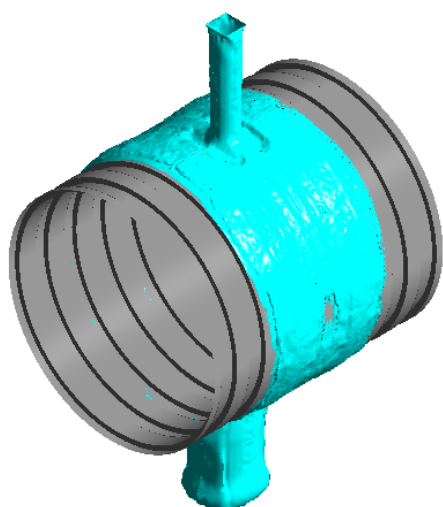
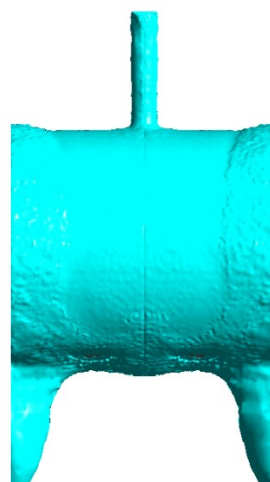
کاهش ضخامت فیلم به تنهایی معیار مناسبی برای ارزیابی عملکرد نیست، بلکه یکنواختی توزیع فیلم در محیط لوله نیز اهمیت زیادی دارد؛ زیرا نازک شدن بیش از حد فیلم می‌تواند احتمال خشک‌شدگی موضعی را افزایش دهد.

علاوه بر نیروی گرانش، کشش سطحی نیز در حفظ پیوستگی فیلم نقش مهمی ایفا می‌کند. در مجاورت فین‌ها، تغییر ناگهانی هندسه موجب تغییر انحنای سطح آزاد شده و نیروهای موئینگی ناشی از کشش سطحی مسیر حرکت فیلم را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

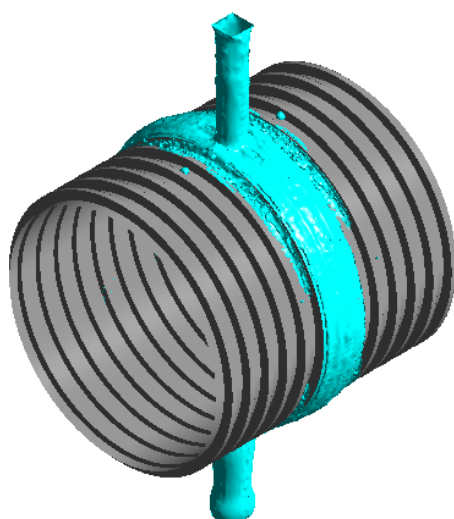
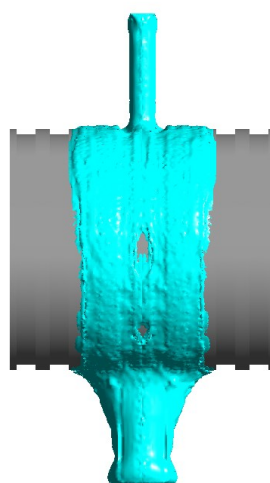
برهم‌کنش میان کشش سطحی و گرانش تعیین‌کننده نحوه گسترش فیلم، تشکیل رگه‌های جریان و پایداری ترشوندگی سطح است. بنابراین، بررسی کسر حجمی نشان می‌دهد که هندسه فین نه تنها نحوه توزیع فیلم مایع را تغییر می‌دهد، بلکه پایداری فیلم روی سطح لوله را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. از آنجا که ضخامت فیلم مستقیماً از نحوه توزیع مایع ناشی می‌شود، در ادامه تغییرات ضخامت فیلم در زوایا و موقعیت‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.



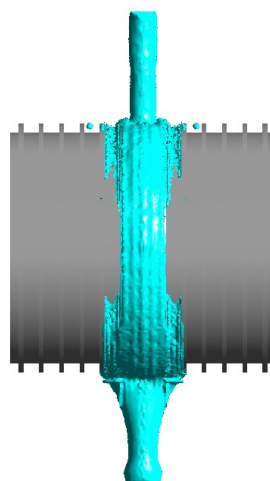
(a) لوله صاف

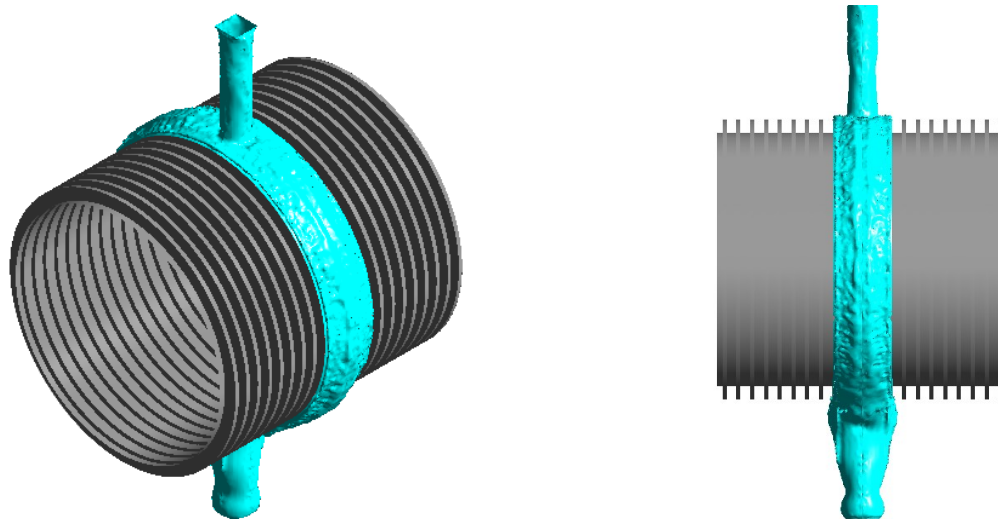


(b) لوله فین‌دار (F1)



(c) لوله فین‌دار (F2)





(d) لوله فین دار (F3)

شکل ۶ توزیع کسر حجمی آب برای مدل‌های لوله‌های صاف و فین دار
Fig. 6 Water Volume Fraction Distribution for the Smooth and Finned Tube Models.

۳-۲- تأثیر هندسه فین بر توزیع ضخامت فیلم

ضخامت فیلم مایع یکی از مهم‌ترین پارامترهای حاکم بر عملکرد تبخیر فیلم ریزان محسوب می‌شود، زیرا به‌طور مستقیم مقاومت حرارتی لایه مایع و میزان انتقال حرارت بین سطح گرم و سیال را کنترل می‌کند. از این رو، بررسی اثر هندسه فین بر نحوه توزیع ضخامت فیلم می‌تواند درک بهتری از مکانیزم‌های بهبود انتقال حرارت در لوله‌های فین‌دار فراهم سازد.

از آنجا که ضخامت فیلم در امتداد طول لوله به‌طور پیوسته تغییر می‌کند، در این بخش ابتدا رفتار موضعی فیلم در مقطع $Z^*=0$ مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس تغییرات میانگین ضخامت فیلم در کل طول لوله تحلیل می‌شود تا اثر هندسه فین بر رفتار کلی فیلم مایع به‌صورت جامع ارزیابی گردد.

شکل ۷ تغییرات ضخامت فیلم مایع را بر حسب زاویه محیطی در مقطع $Z^*=0$ برای لوله صاف و سه هندسه مختلف فین نشان می‌دهد. این مقطع در ابتدای ناحیه توسعه‌یافته جریان انتخاب شده است تا اثر اولیه هندسه فین بر بازتوزیع فیلم مایع و تغییرات ضخامت آن در امتداد محیط لوله بررسی شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در لوله صاف توزیع ضخامت فیلم در بخش عمده محیط لوله نسبتاً یکنواخت است، به‌طوری‌که از زاویه ۲۰ تا حدود ۱۳۰ درجه تغییرات اندکی در ضخامت فیلم مشاهده می‌شود. پس از این ناحیه، ضخامت فیلم به‌تدریج افزایش می‌یابد که ناشی از حرکت رو به پایین فیلم تحت تأثیر نیروی گرانش و تجمع تدریجی مایع در نیمه پایینی لوله است.

در مقابل، استفاده از فین باعث تغییر قابل توجه در توزیع محیطی فیلم شده است، اما میزان این تغییر به هندسه فین بستگی دارد. در هندسه F1 تا حدود زاویه ۶۰ درجه رفتار فیلم مشابه لوله صاف است، اما در بازه ۷۰ تا ۱۰۰ درجه کاهش محسوسی در ضخامت فیلم مشاهده شده و کمترین مقدار در حدود ۱۰۰ درجه به دست می‌آید.

این رفتار نشان می‌دهد که فین‌ها با هدایت مجدد جریان و جلوگیری از تجمع موضعی مایع، موجب کاهش ضخامت فیلم در بخش قابل توجهی از محیط لوله شده‌اند. پس از زاویه ۱۱۰ درجه، ضخامت فیلم مجدداً افزایش یافته و در زوایای انتهایی از لوله صاف بیشتر می‌شود که ناشی از تجمع مجدد مایع در پایین‌دست جریان است.

هندسه F2 رفتار متفاوتی را نشان می‌دهد. در بخش بالایی لوله، به‌ویژه بین زوایای ۳۰ تا ۸۰ درجه، ضخامت فیلم به مقادیر بسیار کمی کاهش می‌یابد که بیانگر هدایت بخش عمده جریان به سایر نواحی محیطی است. از حدود زاویه ۹۰ درجه به بعد، ضخامت فیلم به‌سرعت افزایش یافته و در بازه ۱۰۰ تا ۱۶۰ درجه از لوله صاف بیشتر می‌شود. این رفتار نشان می‌دهد که اگرچه فین‌ها موجب بازتوزیع جریان شده‌اند، اما تمرکز جریان در مسیرهای محدود، موجب تشکیل نواحی با فیلم ضخیم‌تر در نیمه پایینی لوله شده و یکنواختی توزیع فیلم نسبت به هندسه F1 کاهش یافته است.

بیشترین تغییر در توزیع فیلم مربوط به هندسه F3 است. در این مدل، ضخامت فیلم تقریباً در تمام محیط لوله از سایر هندسه‌ها بیشتر بوده و از حدود زاویه ۵۰ درجه به بعد به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و تا انتهای مسیر در محدوده حدود ۰/۶ تا ۰/۹ میلی‌متر باقی می‌ماند. این رفتار بیانگر تمایل بیشتر این هندسه به نگهداشت و تجمع مایع روی سطح لوله است. افزایش ضخامت فیلم نشان می‌دهد که مسیرهای ایجادشده توسط فین موجب کاهش قابلیت تخلیه مایع و افزایش تجمع فیلم در اطراف فین‌ها شده‌اند؛ در نتیجه مقاومت حرارتی لایه مایع افزایش یافته و شرایط انتقال حرارت نامطلوب‌تری ایجاد می‌شود.

نتایج این مقطع نشان می‌دهد که تغییر هندسه فین موجب تغییر قابل توجه در نحوه بازتوزیع فیلم مایع در محیط لوله می‌شود. با این حال، از آنجا که این نتایج تنها رفتار جریان را در یک مقطع

سازگاری مناسبی دارد و میانگین‌گیری تنها موجب هموار شدن نوسانات موضعی شده است. در لوله صاف، افزایش تدریجی ضخامت فیلم در زوایای انتهایی همچنان مشاهده می‌شود که ناشی از اثر گرانش و تجمع تدریجی مایع است.

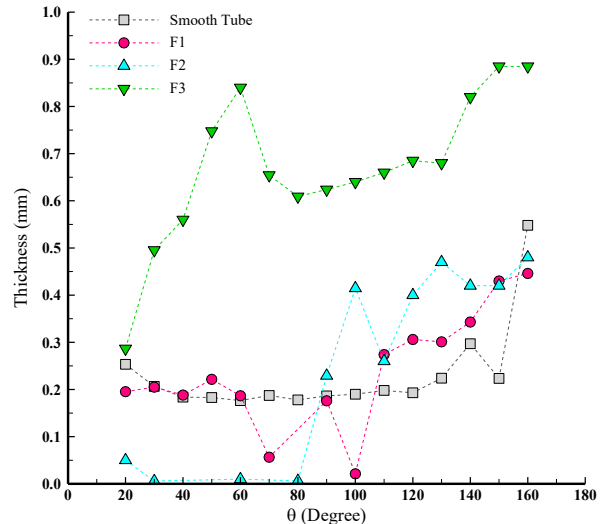
در هندسه F1، کاهش ضخامت فیلم و یکنواختی توزیع آن در بخش عمده طول لوله حفظ شده است که بیانگر هدایت مناسب جریان و جلوگیری از تجمع موضعی مایع توسط فین‌ها است. در هندسه F2 اگرچه کاهش ضخامت فیلم در برخی زوایا مشاهده می‌شود، اما افزایش ضخامت در سایر نواحی موجب شده است توزیع فیلم نسبت به F1 یکنواختی کمتری داشته باشد. در مقابل، هندسه F3 همچنان بیشترین میانگین ضخامت فیلم را در بیشتر زوایای محیطی نشان می‌دهد که بیانگر تداوم تجمع مایع در طول مسیر جریان و افزایش مقاومت حرارتی فیلم است.

به‌طور کلی، نتایج میانگین ضخامت فیلم، مشاهدات حاصل از مقطع $Z^*=0$ را تأیید کرده و نشان می‌دهد که روند تغییرات مشاهده‌شده محدود به یک مقطع خاص نبوده، بلکه در کل طول لوله نیز برقرار است. بنابراین، عملکرد مناسب هندسه فین تنها به کاهش موضعی ضخامت فیلم وابسته نیست، بلکه ایجاد توزیع یکنواخت و پایدار فیلم مایع در کل سطح لوله نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود عملکرد حرارتی دارد. از این‌رو، در بخش بعدی، ارتباط این رفتار هیدرودینامیکی با تغییرات ضریب انتقال حرارت بررسی خواهد شد.

۳-۳- تأثیر هندسه فین بر ضریب انتقال حرارت

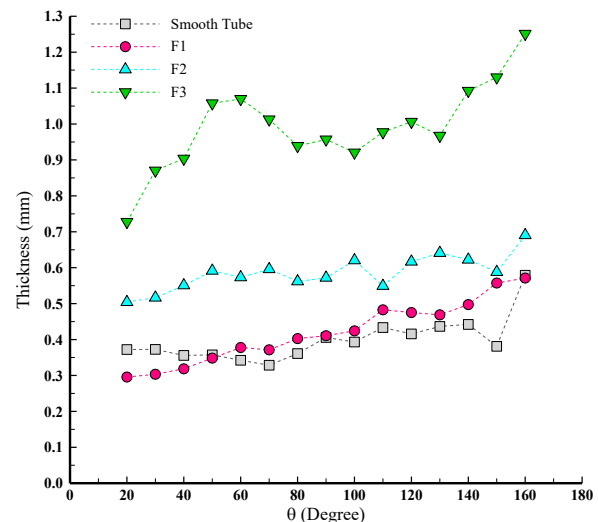
پس از بررسی اثر هندسه فین بر توزیع ضخامت فیلم مایع، در این بخش عملکرد حرارتی هندسه‌های مختلف از طریق تحلیل ضریب انتقال حرارت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. از آنجا که مقاومت حرارتی فیلم مایع به ضخامت، یکنواختی توزیع و میدان سرعت جریان وابسته است، انتظار می‌رود تغییرات هیدرودینامیکی ناشی از هندسه فین به‌طور مستقیم بر توزیع ضریب انتقال حرارت اثرگذار باشد. مشابه بخش قبل، ابتدا تغییرات موضعی ضریب انتقال حرارت در مقطع $Z^*=0$ بررسی شده و سپس میانگین آن در کل طول لوله تحلیل می‌شود.

شکل ۹ تغییرات ضریب انتقال حرارت موضعی را بر حسب زاویه محیطی در مقطع $Z^*=0$ برای چهار هندسه مورد بررسی نشان می‌دهد.



شکل ۷ تغییرات ضخامت فیلم بر حسب زاویه محیطی برای مدل‌های لوله‌های صاف و فین‌دار در $Z^*=0$

Fig. 7 Film Thickness Variation with Circumferential Angle for the Smooth and Finned Tube Models at $Z^* = 0$.



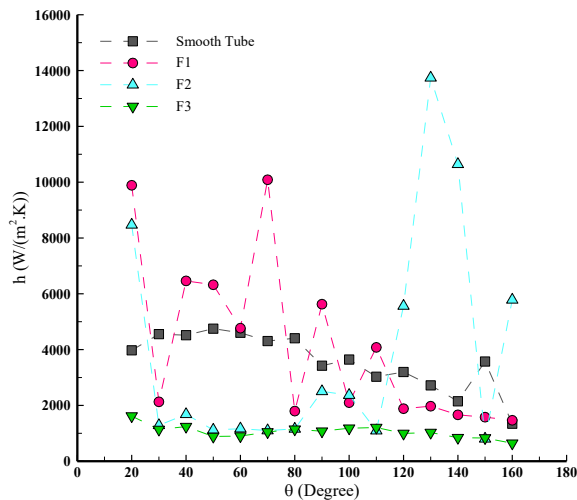
شکل ۸ تغییرات میانگین ضخامت فیلم بر حسب زاویه محیطی برای مدل‌های لوله‌های صاف و فین‌دار

Fig. 8 Average Film Thickness Variation with Circumferential Angle for the Smooth and Finned Tube Models.

مشخص نشان می‌دهند، برای ارزیابی عملکرد کلی هندسه‌ها لازم است تغییرات ضخامت فیلم در کل طول لوله نیز مورد بررسی قرار گیرد.

اگرچه بررسی ضخامت فیلم در مقطع $Z^*=0$ اطلاعات ارزشمندی درباره رفتار موضعی جریان ارائه می‌دهد، اما ضخامت فیلم در اثر حرکت سیال تحت تأثیر نیروی گرانش و برهم‌کنش با فین‌ها در امتداد طول لوله به‌طور پیوسته تغییر می‌کند. بنابراین، به‌منظور ارزیابی عملکرد کلی هندسه‌ها، میانگین ضخامت فیلم در کل طول لوله برای تمامی زوایای محیطی محاسبه شد.

همان‌گونه که در **شکل ۸** مشاهده می‌شود، روند کلی تغییرات میانگین ضخامت فیلم با نتایج به‌دست‌آمده در مقطع $Z^*=0$



شکل ۱۰ تغییرات میانگین ضریب انتقال حرارت موضعی بر حسب زاویه محیطی برای مدل‌های لوله‌های صاف و فین‌دار

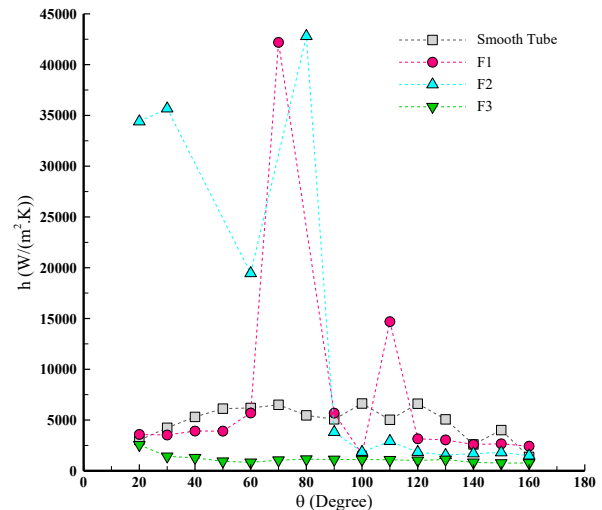
Fig. 10 Average Local Heat Transfer Coefficient Variation with Circumferential Angle for the Smooth and Finned Tube Models.

با این حال، از آنجا که این نتایج تنها مربوط به یک مقطع مشخص هستند، برای ارزیابی عملکرد کلی هندسه‌ها لازم است میانگین ضریب انتقال حرارت در کل طول لوله نیز بررسی شود.

همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، روند کلی تغییرات میانگین ضریب انتقال حرارت با نتایج مقطع $Z^*=0$ همخوانی دارد، اما تفاوت عملکرد حرارتی هندسه‌ها در مقیاس کل لوله واضح‌تر است. در هندسه F1، افزایش ضریب انتقال حرارت در بخش قابل توجهی از محیط لوله حفظ شده و توزیع آن نسبت به سایر مدل‌های فین‌دار یکنواخت‌تر است. در مقابل، هندسه F2 اگرچه در برخی زوایا بیشترین مقادیر موضعی ضریب انتقال حرارت را ایجاد می‌کند، اما نوسانات بیشتری داشته و یکنواختی عملکرد آن کمتر است. در هندسه F3 نیز به دلیل ضخامت بیشتر فیلم و افزایش مقاومت حرارتی، ضریب انتقال حرارت در اغلب زوایا کمتر از سایر مدل‌ها باقی می‌ماند.

مقایسه هم‌زمان نتایج ضخامت فیلم و ضریب انتقال حرارت نشان می‌دهد که بین این دو پارامتر رابطه معکوسی برقرار است. در نواحی دارای فیلم نازک‌تر، مسیر هدایت حرارت از دیواره به سطح آزاد کوتاه‌تر بوده و مقاومت حرارتی کاهش می‌یابد؛ بنابراین ضریب انتقال حرارت افزایش پیدا می‌کند. با این حال، نتایج نشان می‌دهد که عملکرد حرارتی تنها تابع ضخامت متوسط فیلم نیست، بلکه نحوه بازتوزیع جریان، یکنواختی ترشوندگی سطح و افزایش سرعت موضعی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در انتقال حرارت دارند.

به‌منظور مقایسه کمی عملکرد هندسه‌ها، میانگین ضخامت فیلم و میانگین ضریب انتقال حرارت برای هر چهار مدل محاسبه شده و نتایج در جدول ۶ ارائه شده است.



شکل ۹ تغییرات ضریب انتقال حرارت موضعی بر حسب زاویه محیطی برای مدل‌های لوله‌های صاف و فین‌دار در $Z^*=0$.

Fig. 9 Local Heat Transfer Coefficient Variation with Circumferential Angle for the Smooth and Finned Tube Models at $Z^* = 0$.

در لوله صاف، ضریب انتقال حرارت در بیشتر زوایا تغییرات نسبتاً ملایمی داشته و با توزیع نسبتاً یکنواخت ضخامت فیلم مطابقت دارد. نبود ساختارهای هدایت‌کننده موجب شده است که انتقال حرارت عمدتاً تحت تأثیر گرانش و افزایش تدریجی ضخامت فیلم در نیمه پایینی لوله باشد.

در هندسه F1، افزایش محسوسی در ضریب انتقال حرارت، به‌ویژه در بازه زوایای حدود ۷۰ تا ۱۱۰ درجه مشاهده می‌شود. این افزایش با کاهش موضعی ضخامت فیلم و هدایت مناسب جریان توسط فین‌ها مطابقت دارد. هدایت جریان موجب افزایش تنش برشی بر سطح فیلم، کاهش زمان ماند سیال و در نتیجه کاهش مقاومت حرارتی لایه مایع شده است؛ بنابراین انتقال حرارت در این نواحی تقویت می‌شود.

در هندسه F2 نیز مقادیر بالایی از ضریب انتقال حرارت مشاهده می‌شود، اما این افزایش به چند ناحیه محدود بوده و با نوسانات قابل توجه همراه است. علت این رفتار، تمرکز بیش از حد جریان در کانال‌های ایجادشده بین فین‌ها است. در این حالت، اگرچه سرعت موضعی و انتقال حرارت در برخی مسیرها افزایش می‌یابد، اما هم‌زمان در سایر نواحی ضخامت فیلم بیشتر شده و عملکرد حرارتی یکنواختی حاصل نمی‌شود.

در مقابل، هندسه F3 کمترین مقادیر ضریب انتقال حرارت را در اغلب زوایا نشان می‌دهد. این رفتار با افزایش ضخامت فیلم و تجمع مایع در اطراف فین‌ها سازگار است. تجمع سیال موجب افزایش زمان ماند، کاهش سرعت موضعی و افزایش مقاومت حرارتی فیلم شده و در نتیجه انتقال حرارت در بخش عمده سطح تضعیف می‌شود.

نتایج این مقطع نشان می‌دهد که هندسه فین علاوه بر تغییر مقدار ضریب انتقال حرارت، نحوه توزیع مکانی آن را نیز کنترل می‌کند.

جدول ۶ مقایسه میانگین ضخامت فیلم و میانگین ضریب انتقال حرارت در مدل‌های مختلف نسبت به لوله صاف

Table 6 Comparison of the Average Film Thickness and Average Heat Transfer Coefficient of Different Models Relative to the Smooth Tube.

Model	Average Film Thickness	Thickness Change	Average Heat Transfer Coefficient	Heat Transfer Coefficient Change
	(mm)	(%)	(W/m ² ·K)	(%)
Smooth Tube	0.308	—	4169	—
F1	0.364	+15.4	4988	+16.4
F2	0.620	+50.2	4896	+14.9
F3	0.992	+69	1052	-74.8

و مقاومت حرارتی فیلم را کاهش دهد. بر این اساس، F1 بهترین تعادل را میان رفتار هیدرودینامیکی و عملکرد حرارتی ایجاد کرده است، در حالی که F2 اگرچه بیشینه‌های موضعی بالاتری ایجاد می‌کند، اما یکنواختی کمتری دارد و F3 به دلیل افزایش ضخامت فیلم و تجمع مایع، ضعیف‌ترین عملکرد حرارتی را نشان می‌دهد. از آنجا که تغییرات ضریب انتقال حرارت نتیجه مستقیم رفتار هیدرودینامیکی جریان است، در بخش بعد میدان سرعت بررسی می‌شود تا مکانیزم فیزیکی ایجاد این تغییرات به‌طور دقیق‌تر تبیین شود.

۴-۳- تحلیل میدان سرعت

پس از بررسی توزیع ضخامت فیلم و ضریب انتقال حرارت، برای تبیین مکانیزم هیدرودینامیکی حاکم بر این تغییرات، میدان سرعت جریان مورد بررسی قرار گرفت. میدان سرعت یکی از مهم‌ترین پارامترهای کنترل‌کننده رفتار فیلم ریزان است، زیرا نحوه هدایت مایع، بازتوزیع فیلم، تنش برشی دیواره و در نهایت ضخامت فیلم و ضریب انتقال حرارت را تعیین می‌کند. از این رو، تحلیل کانتورهای سرعت می‌تواند ارتباط میان هندسه فین و عملکرد حرارتی مشاهده‌شده در بخش‌های قبل را آشکار سازد. شکل ۱۱ کانتورهای سرعت جریان را برای چهار هندسه مورد مطالعه از دو نمای روبه‌رو و ایزومتریک نشان می‌دهد.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در تمامی مدل‌ها سرعت فیلم در نزدیکی ورودی کم بوده و با حرکت در امتداد سطح لوله، تحت تأثیر نیروی گرانش به تدریج افزایش می‌یابد. این رفتار ناشی از تبدیل انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی بوده و با کاهش تدریجی ضخامت فیلم در امتداد مسیر جریان مطابقت دارد.

در لوله صاف، میدان سرعت توزیع نسبتاً یکنواختی دارد و جریان عمدتاً تحت تأثیر نیروی گرانش حرکت می‌کند. نبود ساختار هدایت‌کننده موجب می‌شود فیلم به تدریج در بخش‌های پایینی لوله تجمع یافته و سرعت موضعی کاهش یابد؛ رفتاری که با افزایش ضخامت فیلم در این نواحی همخوانی دارد.

با افزودن فین‌ها، الگوی سرعت به‌طور محسوسی تغییر می‌کند. فین‌ها با هدایت جریان در کانال‌های مشخص، گرادیان سرعت را در مجاورت دیواره افزایش داده و در نتیجه تنش برشی وارد بر فیلم مایع بیشتر می‌شود. افزایش تنش برشی باعث کشیده شدن فیلم روی سطح، کاهش ضخامت موضعی و کاهش زمان ماند سیال می‌شود. در مقابل، در نواحی پشت فین‌ها یا محل اتصال آن‌ها، کاهش سرعت و تشکیل نواحی بازچرخشی، زمینه تجمع موضعی مایع را فراهم می‌کند.

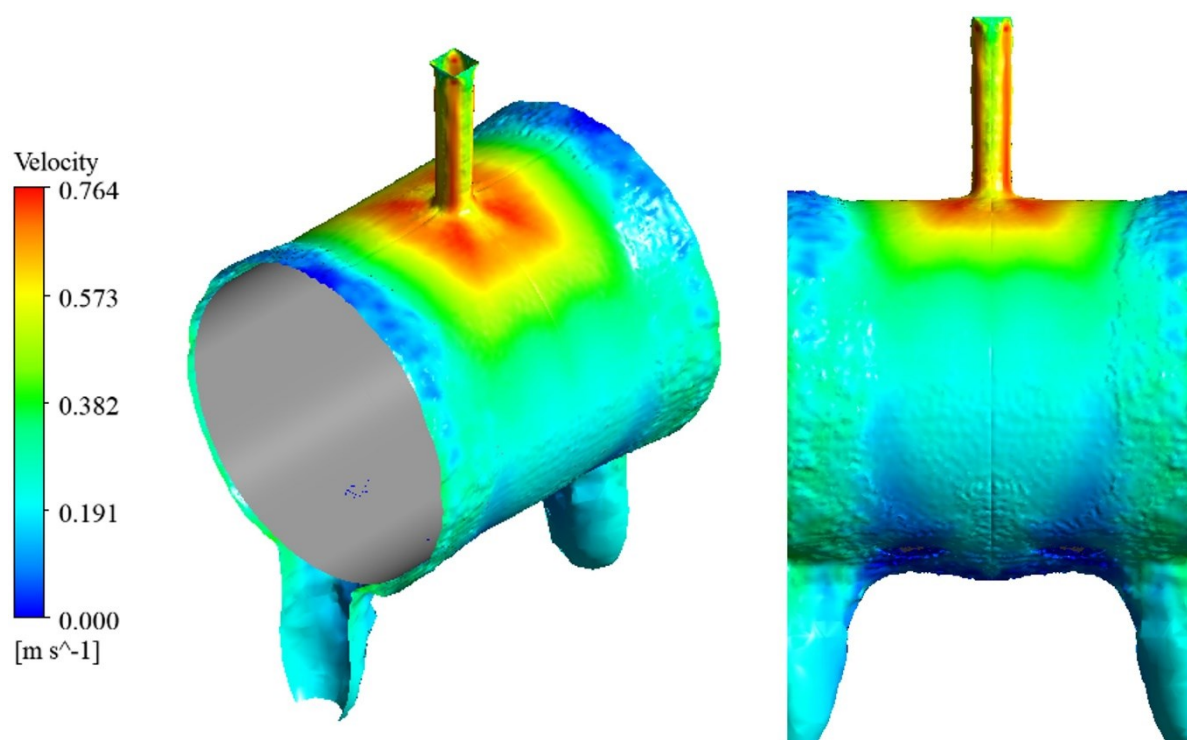
همان‌گونه که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، استفاده از فین‌ها اثر قابل توجهی بر رفتار هیدرودینامیکی و عملکرد حرارتی جریان فیلم ریزان داشته است. لوله صاف به‌عنوان حالت مرجع دارای میانگین ضخامت فیلم ۰/۳۰۸ میلی‌متر و میانگین ضریب انتقال حرارت 4169 W/m²·K است.

در هندسه F1، میانگین ضخامت فیلم حدود ۱۵/۴ درصد افزایش یافته، اما میانگین ضریب انتقال حرارت نیز ۱۶/۴ درصد بیشتر از لوله صاف است. این نتیجه نشان می‌دهد که افزایش انتقال حرارت صرفاً تابع ضخامت متوسط فیلم نیست، بلکه هدایت مناسب جریان، افزایش یکنواختی ترشوندگی و کاهش مقاومت حرارتی در بخش عمده سطح، نقش اصلی را در بهبود عملکرد این هندسه ایفا می‌کنند.

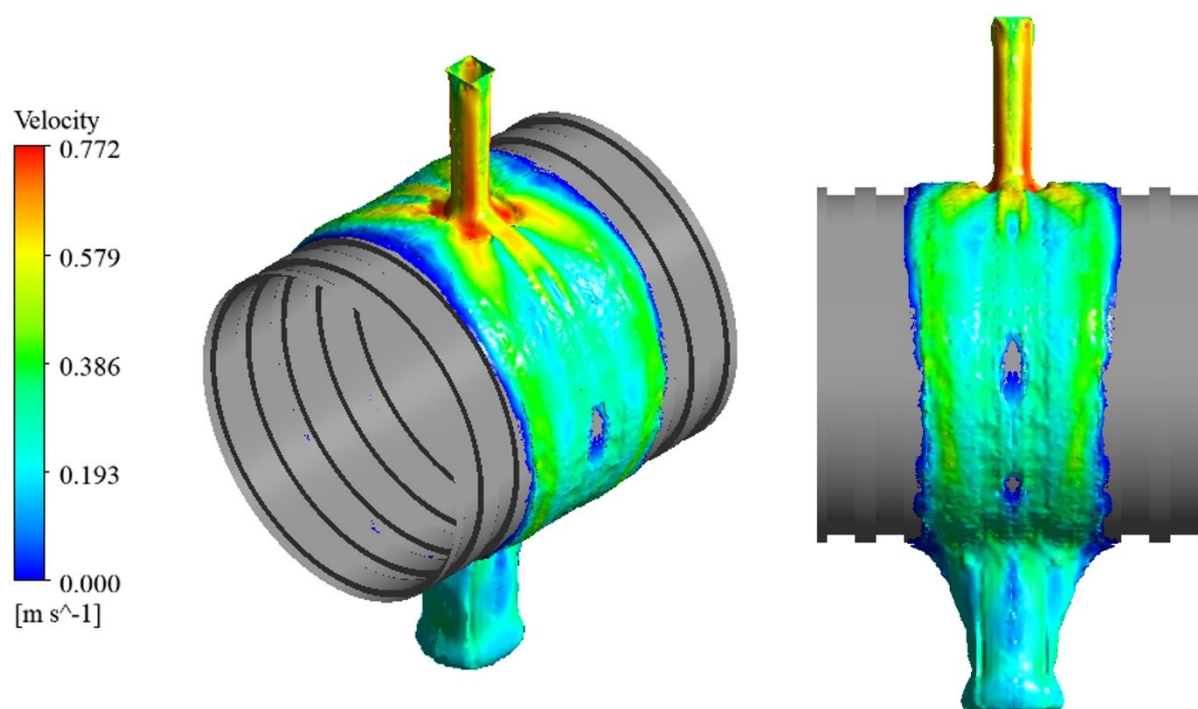
در هندسه F2، اگرچه میانگین ضخامت فیلم حدود ۵۰/۲ درصد بیشتر از لوله صاف است، اما میانگین ضریب انتقال حرارت همچنان ۱۴/۹ درصد افزایش یافته است. این رفتار بیانگر آن است که افزایش سرعت موضعی و تشکیل مسیرهای جریان نازک در اطراف فین‌ها می‌تواند اثر افزایش ضخامت متوسط فیلم را تا حد زیادی جبران کند؛ هرچند به دلیل تمرکز جریان در کانال‌های محدود، یکنواختی عملکرد این هندسه کمتر از F1 است.

در مقابل، هندسه F3 با میانگین ضخامت فیلم ۰/۹۹۲ میلی‌متر، کمترین میانگین ضریب انتقال حرارت (1052 W/m²·K) را نشان می‌دهد که نسبت به لوله صاف حدود ۷۴/۸ درصد کاهش یافته است. این نتیجه با نتایج کسر حجمی، ضخامت فیلم و میدان سرعت کاملاً سازگار بوده و نشان می‌دهد که تجمع گسترده مایع، کاهش سرعت موضعی و افزایش مقاومت حرارتی فیلم، علت اصلی افت شدید عملکرد حرارتی این هندسه است.

به‌طور کلی، نتایج این بخش نشان می‌دهد که افزایش سطح انتقال حرارت به‌تنهایی تضمین‌کننده عملکرد بهتر نیست. هندسه‌ای عملکرد مطلوب‌تری خواهد داشت که علاوه بر افزایش سطح تبادل حرارت، بتواند جریان فیلم را به‌صورت یکنواخت هدایت کرده، از تجمع موضعی مایع جلوگیری کند، زمان ماند سیال را کنترل کرده

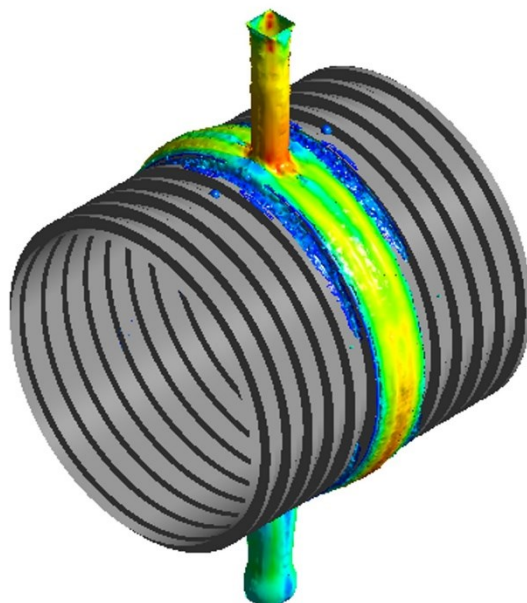


(a) لوله صاف

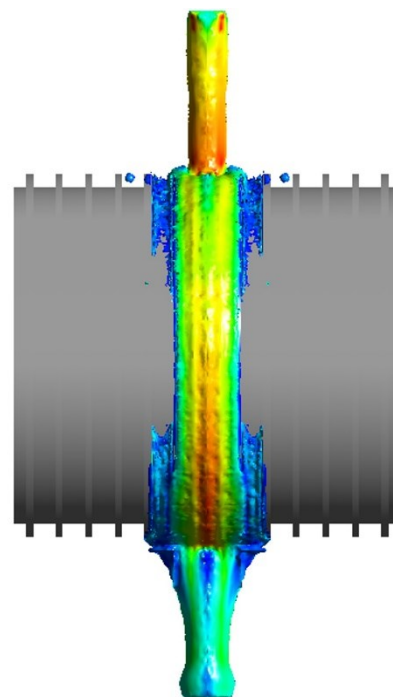


(b) لوله فین‌دار (F1)

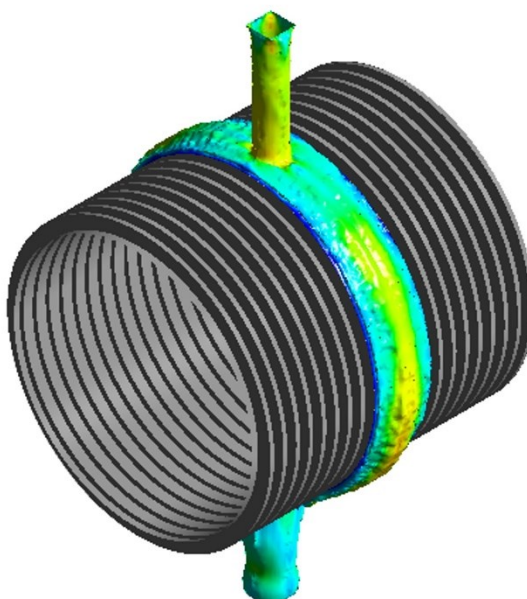
Velocity
0.670
0.502
0.335
0.167
0.000
[m s⁻¹]



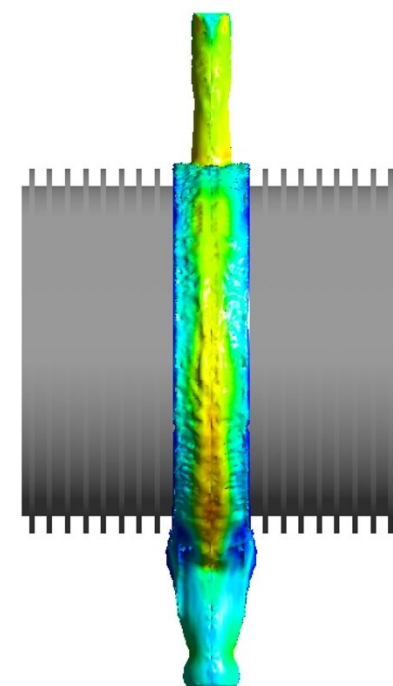
(c) لوله فین‌دار (F2)



Velocity
0.83
0.62
0.41
0.21
0.00
[m s⁻¹]



(d) لوله فین‌دار (F3)



شکل ۱۱ کانتور سرعت جریان برای مدل‌های لوله‌های صاف و فین‌دار

Fig. 11 Flow Velocity Contours for the Smooth and Finned Tube Models

سرعت در طول مسیر یکنواخت‌تر است. این موضوع موجب توزیع مناسب‌تر تنش برشی، جلوگیری از تجمع موضعی مایع و کاهش نسبتاً یکنواخت ضخامت فیلم شده که با افزایش میانگین ضریب انتقال حرارت این هندسه مطابقت دارد.

در F2، هدایت جریان شدیدتر بوده و کانال‌های پرسرعت مشخصی بین فین‌ها ایجاد شده است. اگرچه این رفتار موجب افزایش سرعت و انتقال حرارت در برخی نواحی می‌شود، اما تمرکز جریان

نمای ایزومتریک نشان می‌دهد که اثر فین‌ها تنها به محل استقرار آن‌ها محدود نبوده و الگوی هدایت جریان تا پایین‌دست ادامه می‌یابد. در نتیجه، میدان سرعت از حالت نسبتاً یکنواخت در لوله صاف به الگوی هدایت‌شده‌ای تبدیل می‌شود که به هندسه فین وابسته است.

مقایسه سه هندسه فین‌دار تفاوت‌های مشخصی را نشان می‌دهد. در F1، کانال‌های جریان به صورت منظم تشکیل شده و توزیع

در لوله صاف، افزایش دما روندی نسبتاً یکنواخت دارد، اما در بخش‌های انتهایی مسیر، به دلیل تجمع تدریجی مایع، نواحی با دمای بالاتر مشاهده می‌شود. این رفتار با افزایش ضخامت فیلم و کاهش سرعت در این نواحی مطابقت داشته و نشان‌دهنده افزایش زمان اقامت سیال روی سطح است.

با افزودن فین‌ها، الگوی توزیع دما تغییر می‌کند. هدایت فیلم در کانال‌های ایجادشده توسط فین‌ها موجب شکل‌گیری مسیرهای مشخص انتقال انرژی شده و میدان دما از حالت نسبتاً یکنواخت در لوله صاف به الگویی وابسته به هندسه فین تبدیل می‌شود. همچنین، تغییر مسیر جریان در اطراف فین‌ها باعث ایجاد گرادیان‌های دمایی موضعی می‌شود که اثر آن تا پایین‌دست ادامه دارد.

مقایسه سه هندسه فین‌دار نشان می‌دهد که F1 یکنواخت‌ترین توزیع دما را ایجاد کرده است. هدایت مناسب جریان و جلوگیری از تجمع موضعی مایع سبب شده است گرادیان دمایی در سطح لوله متعادل‌تر بوده و انتقال حرارت در بخش وسیع‌تری از سطح انجام شود. این رفتار با بیشترین میانگین ضریب انتقال حرارت در این هندسه مطابقت دارد.

در F2 گرادیان‌های دمایی شدیدتری در مسیرهای هدایت‌شده توسط فین مشاهده می‌شود. اگرچه این رفتار موجب افزایش موضعی انتقال حرارت می‌شود، اما به دلیل تمرکز جریان در کانال‌های محدود، یکنواختی میدان دما نسبت به F1 کمتر است؛ موضوعی که با نوسانات بیشتر ضریب انتقال حرارت نیز همخوانی دارد.

در مقابل، F3 گسترده‌ترین نواحی با دمای بالا را نشان می‌دهد. تجمع مایع و افزایش ضخامت فیلم موجب افزایش زمان ماند سیال و مقاومت حرارتی لایه مایع شده و در نتیجه، اگرچه دمای فیلم افزایش می‌یابد، اما شدت انتقال حرارت کاهش پیدا می‌کند. این رفتار علت افت قابل توجه ضریب انتقال حرارت در این هندسه را توضیح می‌دهد.

به‌طور کلی، نتایج میدان دما نشان می‌دهد که توزیع حرارت در فیلم مایع مستقیماً از رفتار هیدرودینامیکی جریان تأثیر می‌پذیرد. هندسه‌ای که بتواند فیلم را به‌صورت یکنواخت هدایت کرده، از تجمع موضعی مایع جلوگیری کند و گرادیان دمایی مناسبی در سطح ایجاد نماید، عملکرد حرارتی بهتری خواهد داشت. همخوانی نتایج میدان دما با تغییرات میدان سرعت، ضخامت فیلم و ضریب انتقال حرارت، مکانیزم بهبود عملکرد حرارتی در هندسه F1 و افت عملکرد F3 را به‌خوبی تأیید می‌کند.

در مسیرهای محدود باعث ایجاد نواحی کم‌سرعت در اطراف آن‌ها شده و یکنواختی میدان سرعت نسبت به F1 کاهش می‌یابد. این موضوع علت نوسانات بیشتر ضخامت فیلم و ضریب انتقال حرارت در این هندسه است.

در مقابل، F3 گسترده‌ترین نواحی کم‌سرعت را نشان می‌دهد. تجمع مایع در اطراف فین‌ها سبب کاهش تنش برشی، افزایش زمان ماند سیال و افزایش ضخامت فیلم می‌شود. در نتیجه مقاومت حرارتی لایه مایع افزایش یافته و کمترین ضریب انتقال حرارت در میان هندسه‌های بررسی‌شده حاصل می‌شود.

به‌طور کلی، نتایج میدان سرعت نشان می‌دهد که نقش اصلی فین‌ها افزایش سرعت متوسط جریان نیست، بلکه کنترل نحوه هدایت و بازتوزیع فیلم مایع، تنظیم تنش برشی دیواره و جلوگیری از تجمع موضعی سیال است. این تغییرات هیدرودینامیکی مستقیماً ضخامت فیلم و در نتیجه مقاومت حرارتی آن را کنترل کرده و علت تفاوت عملکرد حرارتی هندسه‌های مختلف را تبیین می‌کنند.

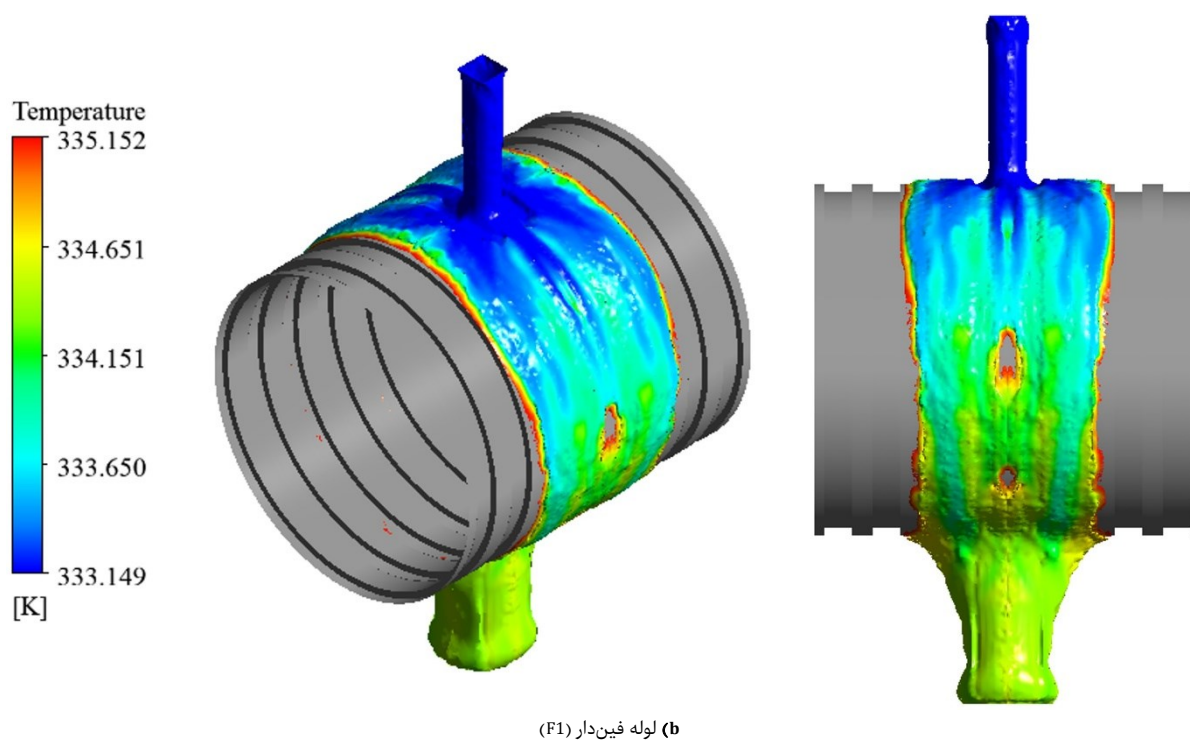
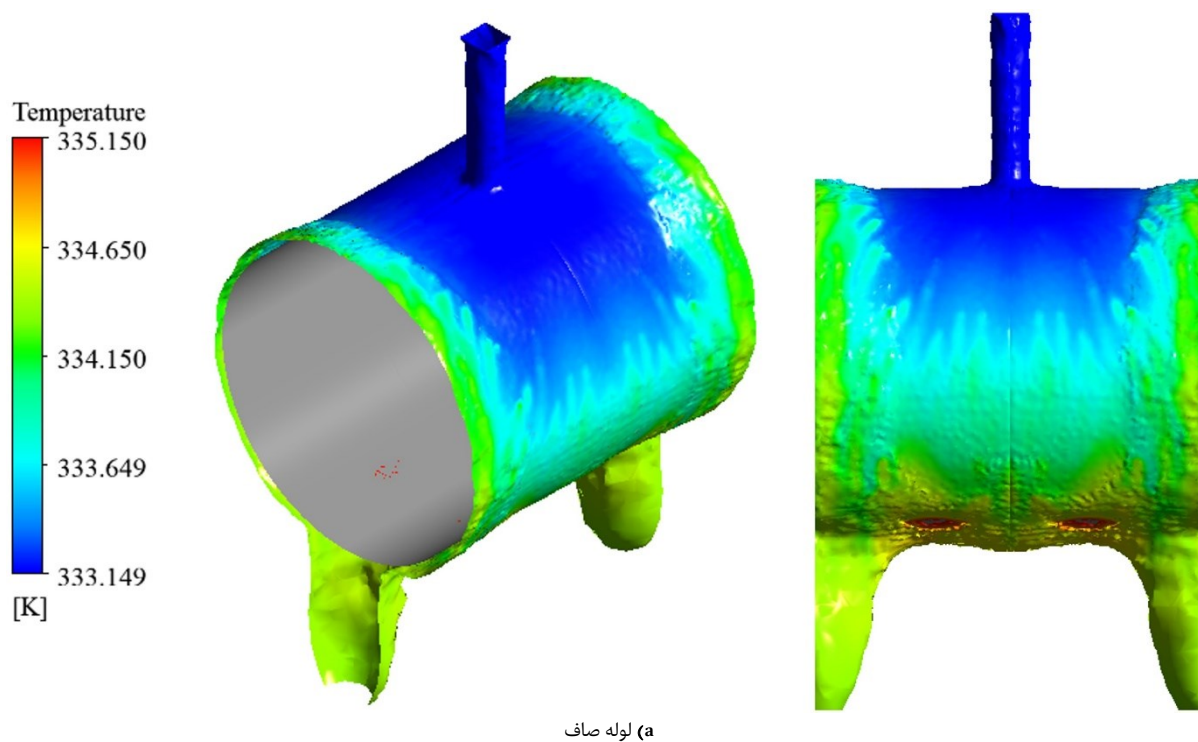
با توجه به ارتباط مستقیم میدان سرعت و انتقال انرژی درون فیلم مایع، در بخش بعد اثر این تغییرات بر میدان دما بررسی می‌شود.

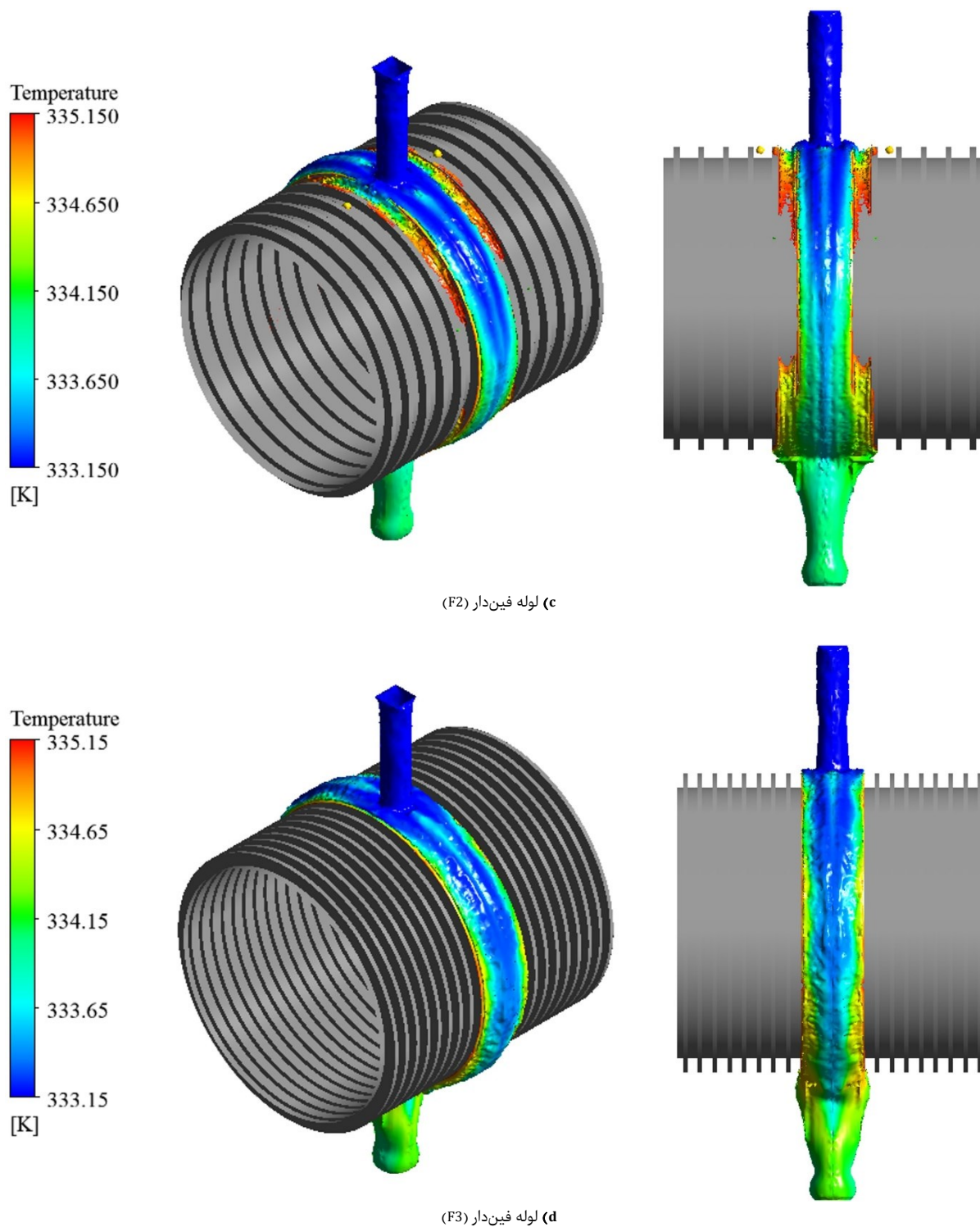
۳-۵- تحلیل میدان دما

پس از بررسی میدان سرعت و توزیع ضخامت فیلم، در این بخش میدان دما به‌عنوان نتیجه نهایی برهم‌کنش رفتار هیدرودینامیکی و انتقال حرارت مورد بررسی قرار می‌گیرد. توزیع دما در فیلم مایع بیانگر نحوه جذب انرژی از دیواره گرم بوده و می‌تواند ارتباط میان میدان سرعت، ضخامت فیلم و عملکرد حرارتی هندسه‌های مختلف را نشان دهد. شکل ۱۲ کانتورهای دمای فیلم مایع را برای چهار هندسه مورد مطالعه از دو نمای روبه‌رو و ایزومتریک نشان می‌دهد.

در تمامی مدل‌ها، کمترین دما در ناحیه ورودی مشاهده می‌شود، زیرا سیال با دمای پایین وارد سطح لوله شده و هنوز گرمای قابل توجهی از دیواره دریافت نکرده است. با حرکت فیلم در امتداد سطح، دمای سیال به‌تدریج افزایش می‌یابد که بیانگر انتقال پیوسته انرژی از دیواره گرم به فیلم مایع است.

توزیع دما به‌طور مستقیم تحت تأثیر سرعت جریان و زمان ماند فیلم روی سطح قرار دارد. در نواحی با سرعت بیشتر، سیال سرد سریع‌تر جایگزین شده و زمان تماس آن با دیواره کاهش می‌یابد؛ بنابراین دمای موضعی فیلم پایین‌تر باقی می‌ماند. در مقابل، کاهش سرعت و افزایش ضخامت فیلم موجب افزایش زمان ماند، جذب بیشتر انرژی و افزایش دمای فیلم می‌شود.





شکل ۱۲ کانتور دما برای مدل‌های لوله‌های صاف و فین‌دار

Fig. 12 Temperature Contours for the Smooth and Finned Tube Models.

هندسه‌های فین‌دار تنها به افزایش سطح انتقال حرارت وابسته نیست، بلکه نحوه هدایت جریان، بازتوزیع فیلم مایع، یکنواختی ترشوندگی سطح و مقاومت حرارتی فیلم نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در انتقال حرارت دارند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر سه هندسه مختلف فین محیطی بر رفتار هیدرودینامیکی و عملکرد حرارتی جریان فیلم ریزان روی یک لوله افقی با استفاده از یک مدل سه‌بعدی CFD مبتنی بر روش VOF مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که عملکرد حرارتی

عدد رینولدز مشخص انجام شدند و خواص ترموفیزیکی سیال مستقل از دما فرض شدند. همچنین اثر آشفتگی، انتقال حرارت تشعشعی و تغییرات شار حرارتی در مدل لحاظ نشد و تمامی محاسبات تحت شرط مرزی دمای ثابت دیواره انجام گرفت.

در پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود اثر اعداد رینولدز مختلف، شرایط شار حرارتی ثابت، تغییر خواص ترموفیزیکی با دما، مدل‌های آشفتگی و اعتبارسنجی تجربی هندسه‌های فین‌دار بررسی شود. همچنین، بهینه‌سازی پارامترهای هندسی فین می‌تواند به طراحی تبخیرکننده‌های فیلم ریزان با عملکرد هیدرودینامیکی و حرارتی بالاتر منجر شود.

بیانیه هوش مصنوعی: در تهیه این مقاله از ابزار هوش مصنوعی صرفاً به‌منظور بهبود نگارش و ویرایش زبانی استفاده شده است. تمامی ایده‌ها، طراحی پژوهش، روش‌شناسی، تحلیل نتایج، تفسیر یافته‌ها و نتیجه‌گیری توسط نویسندگان انجام شده و مسئولیت کامل صحت، اصالت و محتوای نهایی مقاله بر عهده نویسندگان است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از تمامی افرادی که با ارائه دیدگاه‌های علمی و پیشنهادها سازنده در انجام این پژوهش همکاری داشته‌اند، صمیمانه قدردانی می‌کنند.

حامی مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی از سازمان‌ها، مؤسسات یا نهادهای دولتی، خصوصی یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

نقش نویسندگان

نویسنده اول: مفهوم‌پردازی، روش‌شناسی، توسعه مدل، انجام شبیه‌سازی‌ها، تحلیل داده‌ها، تهیه پیش‌نویس اولیه مقاله، ترسیم شکل‌ها و ویرایش متن.

نویسنده دوم (استاد راهنما): نظارت بر پژوهش، ارائه راهنمایی علمی، اعتبارسنجی روش و نتایج، بازنگری و ویرایش علمی مقاله، و تأیید نسخه نهایی.

نویسنده سوم (استاد مشاور): مشارکت در توسعه روش تحقیق، ارائه مشاوره علمی، تفسیر نتایج، بازنگری محتوای علمی مقاله و تأیید نسخه نهایی.

تعارض منافع: در این مقاله از برخی نتایج حاصل از رساله دکتری نویسنده مسئول استفاده شده است. هیچ تعارض منافع دیگری برای اظهار وجود ندارد.

نتایج نشان داد که هندسه F1 بهترین تعادل را میان رفتار هیدرودینامیکی و عملکرد حرارتی ایجاد می‌کند. این هندسه با هدایت مناسب جریان، جلوگیری از تجمع موضعی مایع و ایجاد توزیع یکنواخت‌تر فیلم، موجب افزایش ۱۶/۴ درصدی میانگین ضریب انتقال حرارت نسبت به لوله صاف شد. هندسه F2 نیز با وجود افزایش ۱۴/۹ درصدی ضریب انتقال حرارت، به دلیل تمرکز جریان در مسیرهای محدود و ایجاد نوسانات بیشتر در ضخامت فیلم، عملکردی کمتر یکنواخت نسبت به F1 داشت. در مقابل، هندسه F3 به دلیل تجمع گسترده مایع، افزایش ضخامت فیلم، کاهش تنش برشی دیواره و افزایش مقاومت حرارتی، ضعیف‌ترین عملکرد را نشان داد و میانگین ضریب انتقال حرارت آن حدود ۷۴/۸ درصد کمتر از لوله صاف بود.

نتایج این مطالعه همچنین نشان داد که ضخامت متوسط فیلم به‌تنهایی معیار مناسبی برای ارزیابی عملکرد حرارتی نیست و نحوه بازتوزیع جریان، یکنواختی توزیع فیلم، حفظ ترشوندگی سطح و افزایش تنش برشی نقش مؤثرتری در بهبود انتقال حرارت دارند. بنابراین، طراحی بهینه فین باید علاوه بر افزایش سطح انتقال حرارت، بر کنترل رفتار هیدرودینامیکی فیلم مایع نیز متمرکز باشد. بر اساس ارزیابی هم‌زمان تمامی شاخص‌های هیدرودینامیکی و حرارتی شامل توزیع کسر حجمی، ضخامت فیلم، میدان سرعت، میدان دما و ضریب انتقال حرارت، ترتیب عملکرد هندسه‌های بررسی‌شده به صورت زیر به دست آمد:

$$F1 > F2 > SM > F3$$

این رتبه‌بندی نشان می‌دهد که هندسه F1 با ایجاد مناسب‌ترین تعادل میان هدایت جریان، یکنواختی توزیع فیلم و بهبود انتقال حرارت، بهترین گزینه در میان هندسه‌های بررسی‌شده است؛ در حالی که F3 به دلیل افزایش تجمع مایع و مقاومت حرارتی فیلم، ضعیف‌ترین عملکرد را ارائه می‌دهد.

یافته‌های حاضر با نتایج مطالعات پیشین درباره اثر اصلاح هندسه سطح بر رفتار فیلم و انتقال حرارت نیز قابل مقایسه است. Cao و همکاران [۲۶] نشان دادند که تغییر هندسه سطح لوله می‌تواند الگوی گسترش و بازتوزیع فیلم را به‌طور قابل‌توجهی تغییر دهد و فین‌ها با محدودکردن حرکت فیلم، بر توزیع ضخامت و پوشش سطح اثر می‌گذارند. همچنین، Cao و همکاران [۶] در مطالعه لوله فین‌دار نشان دادند که میزان پوشش سطح و شرایط ترشوندگی با عملکرد انتقال حرارت ارتباط دارند و تغییر هندسه و شرایط عملیاتی می‌تواند رفتار هیدرودینامیکی و عملکرد حرارتی را به‌طور هم‌زمان تغییر دهد. نتایج Chen و همکاران [۲۳] نیز در بررسی لوله‌های با هندسه اصلاح‌شده نشان داد که تغییر هندسه سطح می‌تواند مسیر حرکت فیلم، ضخامت و توزیع آن و در نهایت مشخصه‌های انتقال حرارت را تغییر دهد.

این مطالعه دارای محدودیت‌هایی است که باید در تفسیر نتایج مدنظر قرار گیرد. شبیه‌سازی‌ها در شرایط جریان آرام و برای یک

منابع

- [1] R. Collignon and B. Stutz, "Numerical simulation and modeling of the heat and mass transfer in a grooved flat falling film evaporator," *International Journal of Refrigeration*, vol. 146, pp. 148–157, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2022.10.021.
- [2] H.-Y. Lin, M. Muneeshwaran, C.-M. Yang, K. Nawaz, and C.-C. Wang, "On falling film evaporator – A review of mechanisms and critical assessment of correlation on a horizontal tube bundle with updated development," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 150, p. 107165, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.107165.
- [3] S. M. Ammar and C. W. Park, "Evaporation heat transfer characteristics of falling film in small diameter fabricated tubes of absorption refrigeration system: An experimental investigation," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 165, p. 120618, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120618.
- [4] A. A. Bhuiyan and A. K. M. S. Islam, "Thermal and hydraulic performance of finned-tube heat exchangers under different flow ranges: A review on modeling and experiment," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 101, pp. 38–59, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.022.
- [5] E. Ya. Gatapova et al., "The temperature jump at water–air interface during evaporation," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 104, pp. 800–812, Sept. 2016, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.111.
- [6] C. Cao, L. Xie, X. He, Q. Ji, H. Zhao, and Y. Du, "Numerical study on the flow and heat-transfer characteristics of horizontal finned-tube falling-film evaporation: Effects of liquid column spacing and wettability," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 188, p. 122665, 2022, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122665.
- [7] Y. Li, M. Li, Y. Li, W. Cai, and L. Yao, "Experimental investigation on the heat transfer performance of falling film evaporation with lubrication oil on horizontal tubes having different structures," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 160, p. 106669, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2020.106669.
- [8] S. Y. Misyura, "Effect of various key factors on the law of droplet evaporation on the heated horizontal wall," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 129, pp. 306–313, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.cherd.2017.11.033.
- [9] M. H. J. Abyaneh, M. H. Saidi, and C. Aghanajafi, "Experimental investigation of aqueous LiBr solution absorber bundle with horizontal elliptical tubes," *HVAC&R Research*, vol. 20, no. 2, pp. 251–263, Feb. 2014, doi: 10.1080/10789669.2013.868288.
- [10] C.-Y. Zhao et al., "Modelling of evaporative falling-film heat transfer over a horizontal tube," *Applied Thermal Engineering*, vol. 255, p. 123997, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123997.
- [11] Q. Wang et al., "Numerical simulation of flow characteristics of falling-film evaporation of R32/R134a non-azeotropic refrigerant outside a horizontal tube," *Applied Thermal Engineering*, vol.

فهرست علائم

نماد	شرح	واحد
a	گام پره	mm
b	ضخامت فین	mm
h	ارتفاع فین	mm
Z	فاصله محوری	mm
Z^*	فاصله محوری بی‌بعد	-
d	قطر لوله	mm
P	فشار	Pa
h	ضریب انتقال حرارت موضعی	W/(m ² ·K)
Re	عدد رینولدز ($4\Gamma/\mu$)	-
$\vec{F}_{vol}$	نیروی حجمی ناشی از کشش سطحی	N/m ³
$\vec{g}$	شتاب گرانش	m/s ²
$\vec{n}$	بردار عمود بر سطح مشترک	-
$\hat{n}$	بردار واحد عمود بر سطح مشترک	-
$\hat{t}$	بردار واحد مماس بر سطح مشترک	-
v	بردار سرعت	m/s

نماد	شرح	واحد
Γ	چگالی پاشش (دبی جرمی بر واحد عرض)	kg/(m·s)
ψ	زاویه تماس	درجه
α	کسر حجمی	-
δ	ضخامت فیلم مایع	mm
θ	زاویه محیطی	درجه
κ	انحنای موضعی سطح	1/m
μ	ویسکوزیته دینامیکی	kg/(m·s)
ρ	چگالی	kg/m ³
σ	ضریب کشش سطحی	N/m
λ	فاصله بین دو قله مجاور موج	mm

زیرنویس‌ها

نماد	شرح
1	فاز اصلی
2	فاز دوم
l	مایع
g	بخار
w	دیواره

اختصارات

اختصار	معادل فارسی
3D	سه‌بعدی
CFD	دینامیک سیالات محاسباتی
VOF	روش کسر حجمی سیال

- A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 197, p. 114384, Mar. 2024, doi: [10.1016/j.rser.2024.114384](https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114384).
- [23] X. Chen, J. Sheng, T. Lu, J. Wang, K. Zhang, and X. Chen, "Three-dimensional heat transfer coefficient distributions in horizontal tube falling film evaporation," *Applied Thermal Engineering*, vol. 216, p. 119141, Nov. 2022, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2022.119141](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119141).
- [24] Y. Tohidi and S. J. Ormiston, "Advanced CFD Modelling of Falling Film Evaporation on a Horizontal Tube using Sharp Interface Tracking," *Journal of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer*, vol. 12, no. 1, p. 279, Jul. 2025, doi: [10.11159/jffhmt.2025.027](https://doi.org/10.11159/jffhmt.2025.027).
- [25] T. Petrova and R. Dooley, "Revised Release on Surface Tension of Ordinary Water Substance," *Proceedings of the International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS)*, Moscow, Russia, pp. 23–27, 2014.
- [26] C. Cao, L. Xie, Y. Du, X. Zhu, and W. Zhang, "Three-Dimensional Flow Behavior of a Falling Film on Horizontal Tubes: A Comparative Study on Smooth and Finned Tubes," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 61, no. 5, pp. 2346–2358, Jan. 2022, doi: [10.1021/acs.iecr.1c04734](https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c04734).
- [27] C. W. Hirt and B. D. Nichols, "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries," *Journal of Computational Physics*, vol. 39, no. 1, pp. 201–225, Jan. 1981, doi: [10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5).
- [28] "A Pressure Iteration Scheme for Two-Phase Flow Modeling," in *Computational Methods for Two-Phase Flow and Particle Transport*, pp. 61–82, May 2013, doi: [10.1142/9789814460286_0004](https://doi.org/10.1142/9789814460286_0004).
- [29] J. U. Brackbill, D. B. Kothe, and C. Zemach, "A Continuum Method for Modeling Surface Tension," *Journal of Computational Physics*, vol. 100, no. 2, pp. 335–354, Jun. 1992, doi: [10.1016/0021-9991\(92\)90240-Y](https://doi.org/10.1016/0021-9991(92)90240-Y).
- [30] S. Lin, X. Liu, and X. Li, "The Spatial Distribution of Liquid Film Thickness Outside the Horizontal Falling Film Tube," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 143, p. 118577, Aug. 2019, doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118577](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118577).
- [31] W. Nusselt, "Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes," *VDI-Zeitschrift*, vol. 60, p. 541, 1916.
- [32] H. Hao, Q. Bi, H. Ma, and W. Gang, "Distribution characteristics of falling film thickness around a horizontal tube," *Desalination*, vol. 285, pp. 393–398, Jan. 2012, doi: [10.1016/j.desal.2011.10.020](https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.10.020).
- [33] W. H. Parken, L. S. Fletcher, V. Sernas, and J. C. Han, "Heat Transfer Through Falling Film Evaporation and Boiling on Horizontal Tubes," *Journal of Heat Transfer*, vol. 112, no. 3, pp. 744–750, Aug. 1990, doi: [10.1115/1.2910449](https://doi.org/10.1115/1.2910449).
- 236, p. 121724, Oct. 2023, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2023.121724](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121724).
- [12] M. Li, L. Tao, L. Huang, and C. Jin, "Numerical and experimental investigation on condensing heat transfer and flow characteristics outside horizontal dentate-fin tubes," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 217, p. 124403, Sept. 2023, doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124403](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124403).
- [13] C.-Y. Zhao, D. Qi, W.-T. Ji, P.-H. Jin, and W.-Q. Tao, "A comprehensive review on computational studies of falling film hydrodynamics and heat transfer on the horizontal tube and tube bundle," *Applied Thermal Engineering*, vol. 202, p. 117869, 2022, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2021.117869](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117869).
- [14] W. Zhang, B. Niu, Z. Liu, and Z. Wang, "Numerical investigation on heat transfer enhancement of falling film evaporation by surface structure optimization," *Desalination and Water Treatment*, vol. 322, p. 101073, Apr. 2025, doi: [10.1016/j.dwt.2025.101073](https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101073).
- [15] S. Haghayegh, M. H. Saeidi, H. Afshin, M. B. Shafii, and A. Adibnia, "Effects of Evaporator's Length on Pulsating Heat Pipes' Thermal Performance," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 15, pp. 110–115, 2014, doi: [20.1001.1.10275940.1392.13.15.21.1](https://doi.org/10.1001.1.10275940.1392.13.15.21.1).
- [16] B. D. Bock, M. Bucci, C. N. Markides, J. R. Thome, and J. P. Meyer, "Falling film boiling of refrigerants over nanostructured and roughened tubes: Heat transfer, dryout and critical heat flux," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 163, p. 120452, 2020, doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120452](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120452).
- [17] M. M. Shah, "Prediction of dryout in evaporation of falling films on horizontal plain tubes," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 179, pp. 527–534, 2022, doi: [10.1016/j.cherd.2022.01.039](https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.01.039).
- [18] T. Zhang, M. Su, C. Zhang, H. Zhang, and B. Dou, "Experimental study on the flow and heat transfer of a horizontal falling film evaporator with spray compensation," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 68, p. 105939, Feb. 2025, doi: [10.1016/j.csite.2025.105939](https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.105939).
- [19] M. A. Akhavan Bahabadi and H. Ramazanzadeh, "Augmentation of Heat Transfer During Flow Boiling of R-134a Inside a Tube by Coiled Wire Insert," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 59–68, 2008, doi: [20.1001.1.10275940.1387.8.1.9.6](https://doi.org/10.1001.1.10275940.1387.8.1.9.6).
- [20] A. Karmakar and S. Acharya, "Numerical simulation of falling film sensible heat transfer over round horizontal tubes," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 190, p. 122727, 2022, doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122727](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122727).
- [21] Y. Guo, M. Bao, L. Gong, S. Shen, and K. Zhang, "Numerical investigation of the falling film thickness and heat transfer characteristics over horizontal round tube," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 149, p. 103977, Jan. 2022, doi: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2022.103977](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2022.103977).
- [22] C.-Y. Zhao *et al.*, "Correlations of falling film hydrodynamics and heat transfer on horizontal tubes: