Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: https://modelling.semnan.ac.ir/

ISSN: 2783-2538



Research Article

CFD Simulation of Heat Transfer in a Corrugated and Baffled Tube Exchanger

Esmaeil Abedi[a] , Hasan Ghafori[b,*]

[a] *Department of Mechanical Engineering, Shahinshahr Branch, Islamic Azad University, Shahinshahr, Iran*
[b] *Department of Biosystems Engineering, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan. Iran*

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2025-01-19
Revised: 2025-04-21
Accepted: 2025-08-18

Keywords:

Numerical study;
Nusselt number;
Baffle;
Wavy wall;
Nanofluid.

ABSTRACT

The methods of increasing heat transfer are current topics in the field of heat transfer in heat exchangers. The most important methods used to improve heat transfer are the use of nanofluids, changing the shape of the channel body, using porous materials, and using baffles in the flow path. The change in the shape of the channel body from a flat wall to a wavy wall causes heat transfer in heat exchangers. Therefore, the innovation of this research is the use of a baffle in the middle of the channel with a wavy wall to change the shape of the flow lines and fluid turbulence. The aim of this research is to simultaneously investigate the effect of using nanofluids, wavy walls, and baffles on heat transfer using computational fluid dynamics. For this purpose, the effect of Reynolds number, wall wavelength, and water-titanium oxide nanofluid concentration on heat transfer was investigated, assuming laminar, steady, and continuous flow. The channel simulation was performed in two dimensions using Ansys CFX2023R1 software. The results showed that in a channel with corrugated and baffled walls, using a nanofluid with a lower concentration (φ=0), higher flow velocity (Re=500), and a wall with a shorter wavelength (λ=12mm) resulted in a larger Nu number.

DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2025.36621.2794

© 2026 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

*** Corresponding author.**
E-mail address: h.ghafori569@iau.ac.ir

How to cite this article:
Ghafori, H. & Abedi, E., "CFD Simulation of heat transfer in a corrugated and baffled tube exchanger." Journal of Modeling in Engineering, 24 85 (2026): 313–326, doi: 10.22075/jme.2025.36621.2794

مقاله پژوهشی

شبیه‌سازی انتقال حرارت در مبدل لوله‌ای موجی‌شکل و بافل‌دار به‌روش CFD

اسماعیل عابدی[۱]، حسن غفوری[۲*]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰
بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۰۱
پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۲۷

واژگان کلیدی:
مطالعه عددی،
عدد ناسلت،
بافل،
دیوار موجی‌شکل،
نانوسیال

چکیده

روش‌های افزایش انتقال حرارت از موضوعات به‌روز در مبحث انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی است. از مهم‌ترین روش‌های استفاده شده برای بهبود انتقال حرارت، استفاده از نانوسیال، تغییر شکل بدنه کانال، استفاده از مواد متخلخل و استفاده از موانع در مسیر جریان است. تغییر شکل بدنه کانال از دیواره مسطح به دیواره موجی‌شکل موجب انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی می‌گردد. لذا نوآوری این پژوهش استفاده از یک بافل در وسط کانال با دیواره موجی‌شکل برای تغییر شکل خطوط جریان و برهم زدن سیال است. هدف از این تحقیق بررسی هم‌زمان اثر استفاده از نانوسیال، دیواره موجی‌شکل و بافل روی انتقال حرارت به‌روش دینامیک سیالات محاسباتی است. برای این منظور، تأثیر عدد رینولدز، طول موج دیواره و غلظت نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم، با فرض جریان آرام، دائم و پیوسته بر انتقال حرارت بررسی شد. شبیه‌سازی کانال به‌صورت دوبعدی و با استفاده از نرم افزار Ansys CFX2023R1 انجام شد. نتایج نشان داد در یک کانال با دیوارهای موجدار و بافل‌دار، استفاده از نانوسیال با غلظت کم‌تر (φ=۰)، سرعت جریان بیشتر (Re=۵۰۰) و دیواره با طول موج کوتاه‌تر (λ=12mm) منجر به عدد ناسلت بزرگ‌تر شده است.

DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2025.36621.2794

© 2026 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

۱- مقدمه

امروزه براساس نیاز صنعت و با پیشرفت تکنولوژی‌های جدید، روش‌های مختلفی برای افزایش نرخ انتقال حرارت بکار گرفته می‌شود. اما همچنان تحقیق و پژوهش درباره روش‌های افزایش انتقال حرارت سیالات از اهمیت بالایی برخوردار بوده و در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. برخی از محققین سعی در معرفی یک نوع سیال جدید با خواص حرارتی بهبود یافته هستند. افزایش سطح انتقال حرارت از روش‌های دیگر برای افزایش انتقال حرارت است که در رادیاتورها، دیگ‌ها، بویلرها و دیگر تجهیزات صنعتی استفاده می‌شود. یکی از راه‌های دیگر افزایش انتقال حرارت، افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی است. روش‌های مختلفی مانند ایجاد جریان اجباری و معلق کردن ذرات جامد بسیار کوچک در سیال برای افزایش این ضریب استفاده می‌شود. افزودن ذرات جامد با ابعاد میلی‌متر و میکرومتر منجر به افزایش خواص حرارتی سیال همانند ضریب رسانندگی حرارتی می‌شود اما مشکلات متعددی از جمله پایداری ضعیف، فرسایش تجهیزات و خطوط انتقال، بسته شدن خطوط لوله و افت فشار بسیار بالا را ایجاد می‌کند. با کوچک‌تر شدن اندازه ذرات جامد معلق در حد نانوذرات در سیال، ضریب هدایت حرارتی افزایش و افت فشار کاهش می‌یابد. در استفاده از نانوسیال‌ها، برای کاهش دمای سطح، باید از ذرات پایدار استفاده شود و از رسوب ذرات در مایع ممانعت به عمل آید

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: h.ghafori569@iau.ac.ir
۱. گروه مکانیک، واحد شاهین شهر ، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهین شهر، ایران
۲. گروه مهندسی بیوسیستم، واحد اصفهان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

استناد به این مقاله:
غفوری، حسن و عابدی، اسماعیل، "شبیه‌سازی انتقال حرارت در مبدل لوله‌ای موجی‌شکل و بافل‌دار به‌روش CFD." مدل سازی در مهندسی، ۲۴ ۸۵ (۱۴۰۵): ۳۱۳-۳۲۶، doi: 10.22075/jme.2025.36621.2794

[۱]. از طرفی مطالعات متعددی هم وجود دارد که نشان دهنده کاهش مقادیر انتقال حرارت با استفاده از نانوسیال است [۲ و ۳]. در ادامه به برخی مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از نانو سیال، هندسه سطح مقطع عبور جریان، هندسه دیواره عبور جریان و استفاده از بافل پرداخته می‌شود.

تحقیقات نشان می‌دهد با افزودن ذرات جامد به سیال، خواص سیال دست‌خوش تغییر شده و با افزودن نانوذرات مختلفی از جمله اکسید آلومینیوم، ضریب هدایت حرارتی سیال پایه تا ۲۰ درصد افزایش یافته است [۴ و ۵]. وجود نانوذرات در سیال موجب افزایش سطح تماس حرارتی و در نتیجه بهبود خواص گرمایی می‌گردد. برای تحلیل بهتر چگونگی افزایش بازده حرارتی، نیاز به اطلاعات دقیق خواص فیزیکی سیال می‌باشد. در تحقیقات منتشر شده، افزایش مقادیر خواص فیزیکی از جمله ضریب هدایت حرارتی به صورت تابعی از درصد ذرات نانو گزارش شده است، به عنوان مثال عملکرد حرارتی لوله گرمایی پرشده از نانوسیال ذرات نقره نسبت به لوله گرمایی پر شده از آب دیونیزه مطلوب‌تر است [۶]. هدایت حرارتی نانوسیال به طور قابل توجهی با افزایش غلظت نانوذرات افزایش یافته است [۵]. استفاده از نانوسیال حاوی نانولوله‌های کربنی و سیال پایه پلی‌اتیلن گلیکول باعث بهبود پایداری نانوذرات شده است [۷]. در پژوهشی رفتار نانوسیال تیتانیوم در لوله‌های حرارتی به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. نتایج نشان داد استفاده از نانوذره با نسبت ۱۰ درصد حجمی، بازده حرارتی را ۱۰ درصد افزایش داد [۸]. بررسی انتقال حرارت جابجایی اجباری جریان آرام نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم به‌صورت عددی مطالعه شده است. هندسه بررسی شده شامل دو صفحه موازی تحت شار حرارتی یکنواخت است. جریان سیال از مرکز صفحات وارد و به‌صورت شعاعی از میان آن دو عبور کرده و خارج می‌شود. فاصله دو صفحه برابر با یک میلی‌متر و شعاع صفحات ۱۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. نانوسیال با خواص همگن تا غلظت ۱۰٪ در بازه عدد رینولدز ۳۰۰ تا ۹۰۰ در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد که با افزایش کسرحجمی نانوسیال و عدد رینولدز، انتقال حرارت نیز افزایش یافت است [۹]. مطالعه تاثیر نانوسیال با سیال عامل آب در جریان آشفته درون یک مبدل، نشان داد که ضریب انتقال حرارت و راندمان حرارتی با افزایش کسر حجمی نانوسیال ، افزایش یافته است [۱۰].

در تحقیقی به بررسی اثر مدل توربولانس بر شبیه‌سازی عددی جریان آشفته نانوسیال در یک لوله افقی پرداخته شده است. برای این منظور نانوسیال آب- اکسیدسیلیسیم و آب- اکسیدمس برای دو شرایط مختلف در یک لوله افقی مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۱]. مطالعه تجربی و عددی انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در یک کانال مجهز به محیط متخلخل نشان داد که با افزایش دبی نانوسیال، انتقال حرارت افزایش یافت. با افزایش کسر حجمی نانوسیال از ۱٪ به ۲٪ عدد ناسلت متوسط کاهش یافت. همچنین برای جریان نانوسیال با غلظت ۱٪، عدد ناسلت حدود ۷۵ و برای غلظت ۲ درصد عدد ناسلت کمتر از ۷۰ به‌دست آمده است [۳]. بررسی عددی انتقال حرارت دوبعدی جت نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم درون یک کانال متخلخل مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان داد با افزایش عدد پکلت، عدد ناسلت نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش کسر حجمی نانوسیال یا همان غلظت، عدد ناسلت روند کاهشی داشته است [۱۲]. بررسی انتقال حرارت سه‌بعدی آب در کانال با مقطع مستطیلی مورد مطالعه محققین قرار گرفته شده است. به دلیل بالا بودن عدد رینولدز، اغتشاش نیز در محاسبات منظور شده است. طول کانال برابر با ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع و عرض متفاوتی برای آن در نظر گرفته شده است. دیواره‌های کانال تحت شار حرارتی ثابتی قرار داشته و عدد رینولدز بین ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰ فرض شده است. نتایج نشان داد با حرکت سیال در طول کانال، ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت موضعی کاهش می‌یابد اما در مجموع با افزایش عدد رینولدز، بر انتقال حرارت و عدد ناسلت افزوده شد. تغییر نسبت منظری کانال نیز می‌تواند منجر به کاهش و یا افزایش انتقال حرارت در کانال شود هرچند که با تغییر آن، تغییر عمده‌ای در مقایسه با تغییر ابعاد کانال مشاهده نشده است [۲]. در تحقیقی بررسی عددی انتقال حرارت جابجایی اجباری آب دیونیزه شده در کانال با هندسه‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. جریان سیال آرام و خواص آن ثابت در نظر گرفته شده است. دیواره پایینی کانال تحت شار حرارتی ثابت $30\ W/cm^2$ و سرعت سیال در ورودی برابر با $3\ m/s$، فرض شده است. نتایج این کار نشان داد میکروکانال با مقطع مستطیلی بیشترین انتقال حرارت را ایجاد کرده است [۱۳]. مدل‌سازی انتقال حرارت دوبعدی جریان آرام آب با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت مورد مطالعه

قرار گرفته است. در این تحقیق زبری با استفاده از موج سینوسی تولید شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، ساختار زبر دیواره‌های میکروکانال نسبت به سطح صاف باعث افزایش افت فشار و انتقال حرارت شده است. به معنای دیگر این پدیده منجر به کاهش دمای سطح دیواره شده است [۱۴]. در تحقیقی با استفاده از روش المان محدود به بررسی انتقال حرارت میکروکانال گالرکین پرداخته شده است. بر روی دیواره فوقانی میکروکانال، تکه‌های ذوزنقه‌ای شکلی نصب شده و میکروکانال تحت میدان مغناطیسی قرار داشته است. هدف از این مطالعه مشخص کردن فواصل قطعات ذوزنقه‌ای برای دست‌یافتن به بیشترین انتقال حرارت است. نتایج تحقیق نشان داد که با افزایش فاصله یا کاهش ارتفاع ذوزنقه‌ها می‌توان به انتقال حرارت بالاتری دست یافت. همچنین افزایش عدد رینولدز یا افزایش شدت میدان مغناطیسی منجر به افزایش انتقال حرارت شده است. بررسی انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در یک میکروکانال موجی شکل مورد مطالعه قرار گرفته و نشان داده شده که استفاده از هندسه موجی شکل می‌تواند منجر به افزایش انتقال حرارت شود [۱۵]. بررسی دوبعدی انتقال حرارت نانوسیال در کانال دارای موانع در جریان مغشوش نشان داد که شکل هندسی مانع بر انتقال حرارت تأثیرگذار است به طوریکه مانع مثلثی در مقایسه با مانع مربعی و بیضوی منجر به عدد ناسلت بزرگتری شده است [۱۶].

تحقیقات زیادی روی اهمیت بافل‌ها و اثر اشکال مختلف آنها بر انتقال حرارت انجام شده است. بررسی اثر بافل‌های چین‌دار بر جریان و میدان‌های حرارتی در یک مبدل حرارتی با سطح مقطع مستطیلی نشان داد که شکل موج بافل چین‌دار و ارتفاع بافل اثر مستقیم بر انتقال حرارت داشته است [۱۷]. همچنین مطالعه اثر قرارگیری بافل‌ها با زوایای مختلف در کانال بر سرعت انتقال حرارت، بازده و ضریب اصطکاک نشان داد که قرارگیری بافل‌ها با زاویه ۴۵ درجه، انتقال حرارت را بهبود داده‌اند [۱۸].

اثر سطوح گسترش‌یافته بر عملکرد مبدل حرارتی نیز مورد تحقیق قرار گرفته است در این تحقیق اثر پستی و بلندی سطح لوله خارجی مبدل حرارتی با چند هندسه مختلف بر عملکرد حرارتی مبدل بررسی شده است. نتایج نشان داد سطوح مثلثی شکل عملکرد حرارتی بهتری دارد [۱۹]. بررسی اثر شرایط مرزی دیواره انعطاف‌پذیر بر عملکرد مبدل‌های فشرده نشان داد دیواره انعطاف‌پذیر نسبت به حالت استاتیک، عملکرد حرارتی را افزایش داده است [۲۰]. مطالعه طرح تغییر ساختار مبدل حرارتی پوسته لوله با هدف افزایش راندمان و جلوگیری از تشکیل بخارات مایع نشان داد طراحی پیشنهاد شده موجب افزایش انتقال حرارت در دستگاه شده است [۲۱].

بررسی منابع نشان می‌دهد که روش‌های مختلفی برای افزایش انتقال حرارت در صنایع مختلف به‌کار گرفته می‌شوند. یکی از مهم‌ترین روش‌های ذکر شده برای افزایش انتقال حرارت، افزایش مسیر عبور جریان با تغییر شکل بدنه لوله است. به‌دلیل ناشناخته بودن اثر شکل دیواره و اثر لوله مجهز به بافل بر انتقال حرارت در یک مبدل حرارتی، پژوهش حاضر انجام شده است. لذا نوآوری این تحقیق استفاده از یک بافل در وسط کانال با دیواره موجی شکل برای تغییر شکل خطوط جریان و برهم‌زدن سیال است. هدف از این تحقیق، مدل‌سازی یک لوله دوبعدی به منظور بررسی رفتار انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم برای دستیابی به بیشترین مقدار انتقال حرارت است. برای این منظور تأثیر هندسه دیواره موجی‌شکل، غلظت‌های مختلف نانوسیال و عدد رینولدز بر توزیع دما و سرعت جریان بررسی می‌شود.

۲- روش تحقیق

نرم‌افزارهای مختلفی برای انجام شبیه‌سازی توسط محققین و شرکت‌های پیشگام در این زمینه تولید و در اختیار مهندسین قرار گرفته است. یکی از این نرم‌افزارها، نرم‌افزار CFX است.

در این تحقیق نیز از نرم‌افزار Ansys CFX2023R1 استفاده شد.

روابط زیر برای محاسبه خواص نانوسیال منظور شد. برای محاسبه چگالی نانوسیال از رابطه (۱) و برای محاسبه ظرفیت حرارتی ویژه نانوسیال از رابطه (۲) استفاده شد [۲۲]. در این رابطه ρ_f چگالی سیال پایه، ρ_p چگالی نانوذره، ρ_{nf} چگالی نانوسیال، φ کسرحجمی نانوذره، ρ چگالی، C_p گرمای ویژه، زیرنویس f بیانگر خواص سیال پایه، زیرنویس nf بیانگر خواص نانوسیال و زیرنویس p بیانگر خواص نانوذره است.

$$\rho_{nf} = (1-\varphi)\rho_f + \varphi\rho_P \quad (۱)$$

$$(\rho C_P)_{nf} = (1-\varphi)(\rho C_P) + \varphi(\rho C_P)_P \quad (۲)$$

برای محاسبه ویسکوزیته نانوسیال آب-اکسیدتیتانیوم از

رابطه (۳) استفاده شد [۲۲]. در این رابطه μ_{eff} ویسکوزیته دینامیکی نانوسیالات، φ_p کسر حجمی نانوذرات و μ_f ویسکوزیته دینامیکی سیال پایه است.

$$\mu_{eff} = (1+3.544\varphi_p +169.46\varphi_p^2)\mu_f \ , \quad 0 \le \varphi_p \le 0.9 \qquad (۳)$$

برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی نانوسیال از رابطه (۴) که توسط ماکسول [۲۳] ارائه شده است، استفاده شد. در این رابطه k ضریب هدایت حرارتی و بقیه پارامترها همانند تعریف قبل است.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{2k_p + k_f + \varphi(k_p + k_f)}{2k_p + k_f - \varphi(k_p + k_f)} \qquad (۴)$$

۲-۱- معادلات حاکم

معادلات حاکم شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی به‌شرح زیر هستند [۲۴].

معادله پیوستگی برای حالت دائم جریان غیرقابل‌تراکم به‌صورت رابطه (۵) است. در این رابطه u مولفه سرعت در راستای x و v مولفه سرعت در راستای y است.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \qquad (۵)$$

معادله مومنتوم در راستای مختلف به‌صورت زیر است، در این رابطه p فشار و μ ویسکوزیته است.

در راستای x:

$$\rho(u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}) \qquad (۶)$$

در راستای y:

$$\rho(u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}) \qquad (۷)$$

معادله انرژی در میدان سیال داخل کانال به‌صورت رابطه (۸) است که در این رابطه T دما است.

$$\rho c_p(u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y}) = k(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}) \qquad (۸)$$

عدد رینولدز (Re) و عدد ناسلت (Nu) متوسط به‌ترتیب با کمک روابط (۹) و (۱۰) تعریف می‌شوند. در این تعریف از خواص نانوسیال برای محاسبه عدد رینولدز استفاده شده است. همچنین سرعت در ورودی کانال (U) یکنواخت در نظر گرفته شده است. D_h قطر هیدرولیکی، H ارتفاع کانال، h ضریب انتقال حرارت جابجایی، q'' نرخ انتقال حرارت، $\overline{T}$ دمای متوسط است. زیرنویس s به معنای سطح و زیرنویس m به معنای متوسط و Q کل انتقال حرارت و A سطح انتقال حرارت است [۲۴].

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho_{nf} U D_h}{\mu_{nf}}, D_h = 2H \qquad (۹)$$

$$Nu = \frac{hD_h}{k_{nf}}, h = \frac{q''}{(\bar{T}_s - \bar{T}_m)}, q'' = \frac{Q}{A} \qquad (۱۰)$$

مقدار دمای توده‌ای سیال بر روی یک خط در مقطع کانال از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود [۲۴].

$$\bar{T}_m = \frac{\int uTdL}{UL} \qquad (۱۱)$$

عدد ناسلت متوسط با انتگرال گرفتن عدد ناسلت موضعی بر روی دیواره موجی‌شکل به‌دست می‌آید که در این رابطه L طول کانال و برحسب mm است.

$$Nu_m = \frac{1}{L}\int Nu\, dy \qquad (۱۲)$$

جریان سیال به‌صورت تراکم‌ناپذیر، لایه‌ای، دائم و دوبعدی در نظر گرفته شد. همچنین جریان سیال سرد با سرعت یکنواخت و موازی در ورودی کانال وارد شده و پس از انتقال حرارت، از کانال خارج می‌شود. از شرط عدم پرش سرعت و دما روی سطح استفاده شد. سیال عامل انتقال حرارت، نانوسیال به‌صورت همگن بوده و از خواص ترموفیزیکی معادل برای تحلیل استفاده شد. پس از مدل‌سازی و ایجاد شبکه، به اعمال شرایط مرزی و تحلیل مسئله پرداخته شد و اثر سرعت سیال در ورود (عدد رینولدز)، کسر حجمی نانوسیال (غلظت) و طول موج بر انتقال حرارت بررسی شد.

۲-۲- خواص نانوسیال

سیال آب-اکسید تیتانیوم با کسرهای حجمی φ=۰ (سیال پایه)، φ=۰/۰۲ و φ=۰/۰۴ به عنوان سیال مورد تحقیق درنظر گرفته شد. خواص نانوذرات و سیال پایه همانند دیگر محققین به‌صورت مقادیر ذکر شده در جدول (۱) منظور شد [۲۵].

جدول ۱- خواص نانوذرات و آب [۲۵].

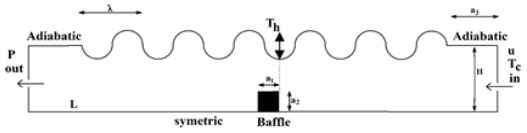
نوع سیال	چگالی (kg/m^3)	ظرفیت حرارتی ویژه (J/kgK)	هدایت حرارتی (W/mK)
آب	۹۹۷/۱	۴۱۷۹	۰/۶۱۳
اکسید تیتانیوم	۴۲۵۰	۶۸۶/۲	۸/۹۵

۲-۳- مدل‌سازی

برای دستیابی به هم‌گرایی بهتر در شبیه‌سازی، ناحیه بالادست جریان به صورت غیرموجی (مسطح) امتداد داده شد. شکل موج از رابطه (۱۳) پیروی می‌کند [۲۶]. در این مسئله، A دامنه موج و λ طول‌موج است. طول‌موج سه مقدار λ=۱۲، λ=۲۴ و λ=۳۶ میلی‌متر درنظر گرفته شد.

$$y = 2.25\sin(\frac{360}{\lambda}x) \qquad (۱۳)$$

شکل (۱) طرحواره هندسه مورد بررسی و جدول ۲ پارامترهای مرتبط با آن را نشان می‌دهد.

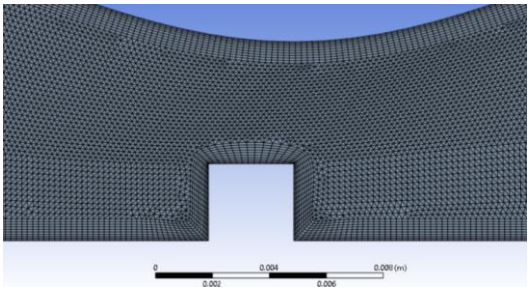


شکل ۱- هندسه مد نظر

جدول ۲- ابعاد هندسه مورد بررسی

H	λ	L	a_1	a_2	a_3
۱۰	۳۶ ،۲۴ ،۱۲	۳۵۰	۳	۳	۳۰

از آنجایی‌که نزدیک دیواره‌ها، تغییرات سرعت و دما (گرادیان) بالا است، از شبکه‌بندی لایه مرزی در نزدیکی دیواره‌ها استفاده شد. شکل (۲) نمونه‌ای از شبکه را نشان



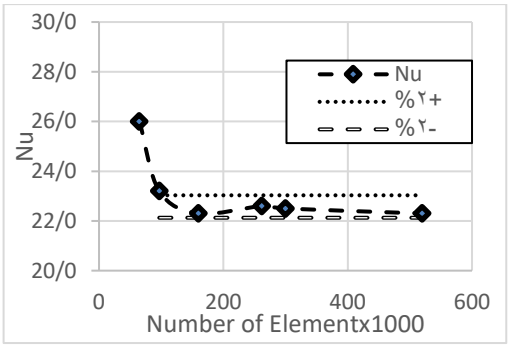
می‌دهد.

شکل ۲- نمونه‌ای از شبکه ایجادشده برای طول‌موج ۳۶ میلی‌متر

برای مرز ورودی، مقدار سرعت ثابت و یکنواخت که از تعریف عدد رینولدز به‌دست می‌آید استفاده شد و دمای ورودی برابر با ۳۰۰ درجه کلوین منظور گردید. برای عدد رینولدز نیز مقادیر ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ در نظر گرفته شد. در مرز خروجی نیز شرط مرزی فشار خروجی نسبی صفر پاسکال منظور شد.

۲-۴- استقلال حل از شبکه

تحلیل‌های صورت گرفته شامل مطالعه استقلال حل از شبکه برای مدلی با طول موج ۳۶ میلی‌متر، عدد رینولدز ۵۰۰ و سیال پایه آب است. معیار هم‌گرایی 10^{-6} است. برای مطالعه استقلال حل از شبکه، عدد ناسلت متوسط بعد از هر تحلیل محاسبه و با حالات دیگر مقایسه شد. عدد ناسلت متوسط براساس تعداد المان در شکل (۳) ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل مربوط به تعداد شبکه در حدود ۱۰۰ هزار المان، توانسته به‌خوبی عدد ناسلت متوسط را پیش‌بینی کند.

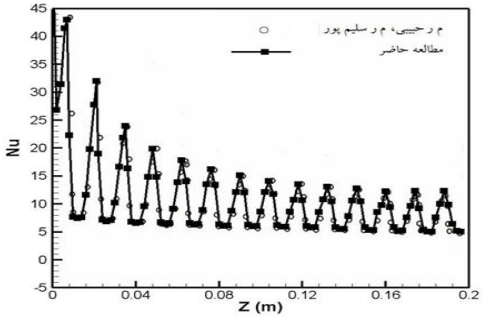


شکل ۳- عدد ناسلت بر حسب تعداد المان

شکل (۳) نشان می‌دهد که برای تعداد المان بیشتر از ۱۶۰ هزار، عدد ناسلت بین مدلهای مختلف اختلاف کمتر از ۲٪ داشته است. لذا تعداد المان ۱۶۰۰۰۰ برای مدل‌سازی استفاده شد.

۲-۵- اعتبارسنجی حل

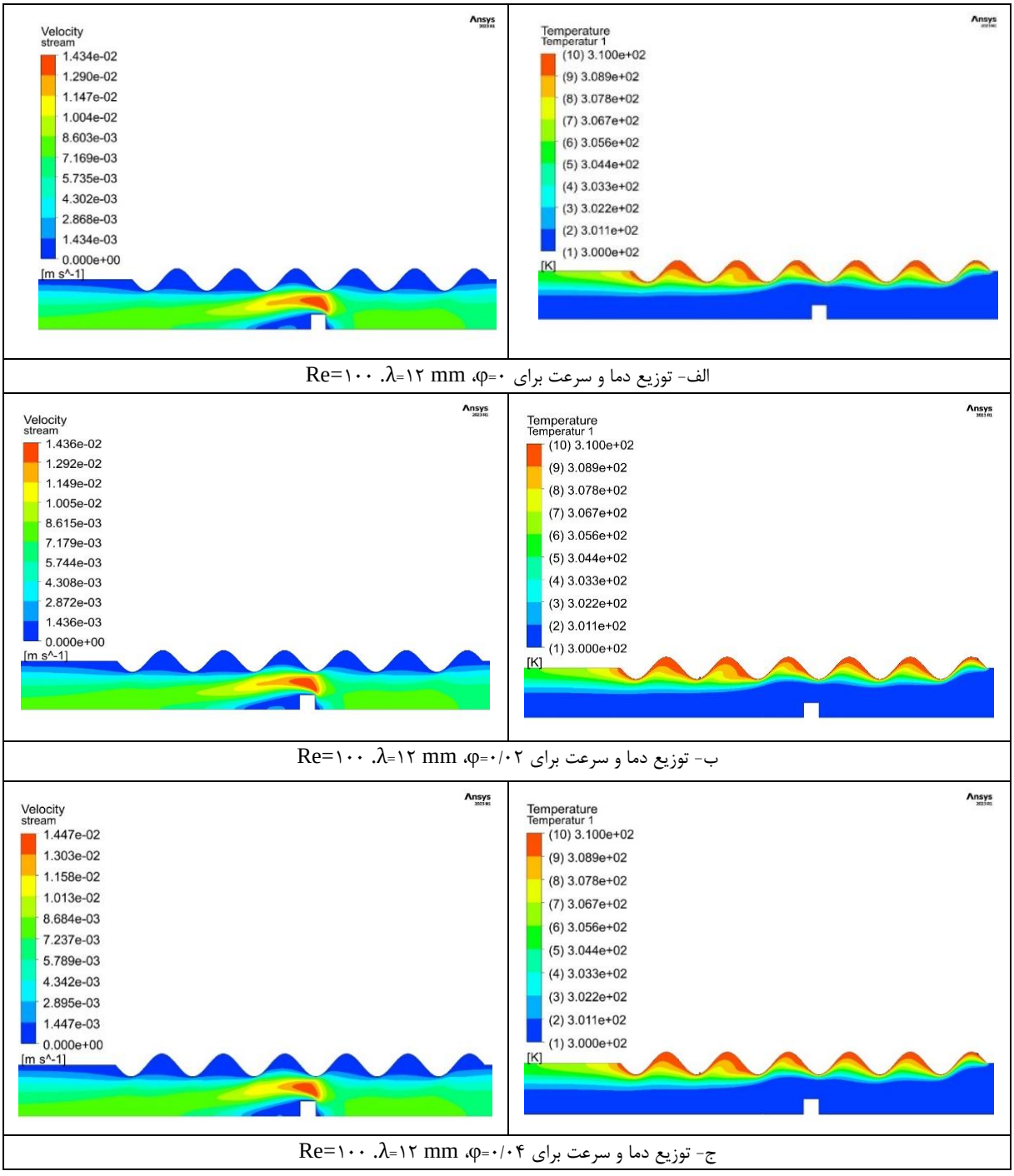
برای اعتبارسنجی حل، مدل ارائه شده توسط حبیبی و سلیم پور [۲۶] با عدد رینولدز ۱۵۰ مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج توزیع عدد ناسلت در طول کانال برای مطالعه حاضر و مطالعه مرجع در شکل (۴) نشان داده شده است. از شکل (۴) مشخص است که بین نتایج مدل حاضر و نتایج مربوط به مطالعه مرجع هم‌خوانی وجود دارد و انحراف مقادیر کمتر از ۴/۶٪ است.



شکل۴- توزیع عدد ناسلت در طول کانال برای مطالعه حاضر و مطالعه مرجع [۲۶]

۳- نتایج و بحث

به منظور بررسی اثر نسبت‌های مختلف نانوسیال روی توزیع دما و سرعت جریان، کانتورهای مربوطه برای نسبت‌های مختلف نانو سیال و λ=۱۲mm و Re=۱۰۰ در شکل (۵) نشان داده شده است. از این شکل‌ها مشخص است که توزیع دما از بیش‌ترین مقدار خود در روی دیوار تا کم‌ترین مقدار خود در قسمت پایین مدل ادامه داشته است. همچنین خطوط سرعت نشان می‌دهند که جریان در عبور از مانع سرعت بالایی پیدا می‌کند و جریان به سمت دیواره فوقانی نزدیک می‌شود.



الف- توزیع دما و سرعت برای φ=۰، λ=۱۲ mm، Re=۱۰۰

ب- توزیع دما و سرعت برای φ=۰/۰۲، λ=۱۲ mm، Re=۱۰۰

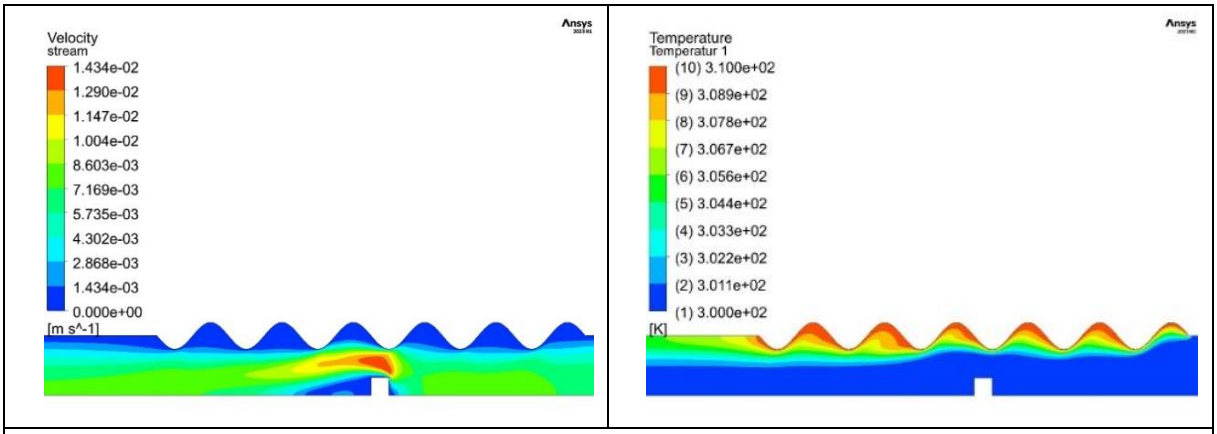
ج- توزیع دما و سرعت برای φ=۰/۰۴، λ=۱۲ mm، Re=۱۰۰

شکل ۵- توزیع دما و سرعت برای نسبت های مختلف نانو سیال و λ=۱۲ mm و Re=۱۰۰

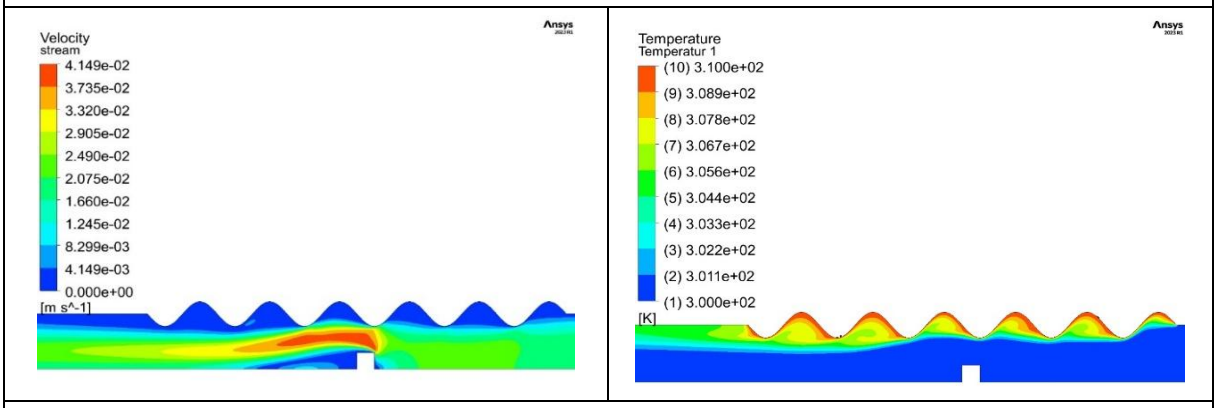
با مقایسه کانتورهای سرعت جریان در شکل‌های الف و ب و ج شکل (۵) مشخص است که با افزایش غلظت نانوسیال از φ=۰ به φ=۰/۰۴، مقدار سرعت بیشینه از ۱/۴۳ به ۱/۴۵ سانتی‌متر بر ثانیه افزایش یافته است که افزایش ۱/۴

درصدی را نشان می‌دهد. از طرفی کانتورهای توزیع دما نشان می‌دهد که با افزایش غلظت نانوسیال تغییری در خطوط دما بوجود نیامده است. بیش‌ترین دما در نزدیکی دیواره و برابر ۳۱۰ درجه کلوین است. نتایج تحقیق سایر محققین در مقایسه میزان انتقال حرارت نانوسیال آب-کسیدآلومینیوم و آب-اکسیدتیتانیوم نشان می‌دهد که نانوسیال آب-اکسیدتیتانیوم نمی‌تواند رفتاری همانند نانوسیال آب-اکسیدآلومینیوم داشته باشد و نانوسیال آب-اکسیدتیتانیوم خواص انتقال حرارت پایینی در مقایسه با نانوسیال آب-اکسیدآلومینیوم دارد [۲۷]. همچنین در برخی از تحقیقات نشان داده شده است که با افزایش کسر حجمی نانوسیال، عدد ناسلت روند کاهشی داشته است [۳ و ۱۲].

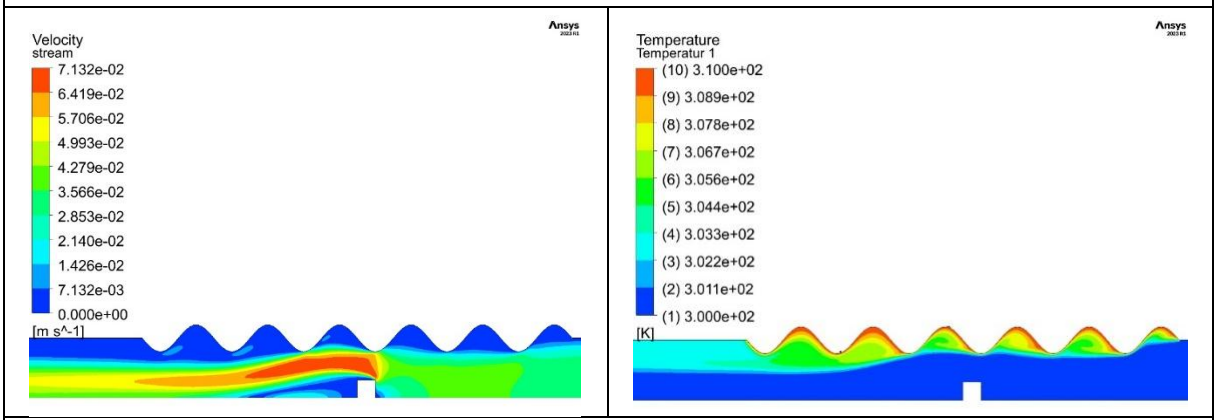
به منظور بررسی اثر عدد رینولدز روی توزیع دما و سرعت جریان، کانتورهای مربوطه برای مقادیر مختلف عدد رینولدر و φ=۰.۰ وλ=۱۲ mm در شکل (۶) نشان داده شده است.



الف- توزیع دما و سرعت برای Re=۱۰۰ و φ=۰، و λ=۱۲ mm



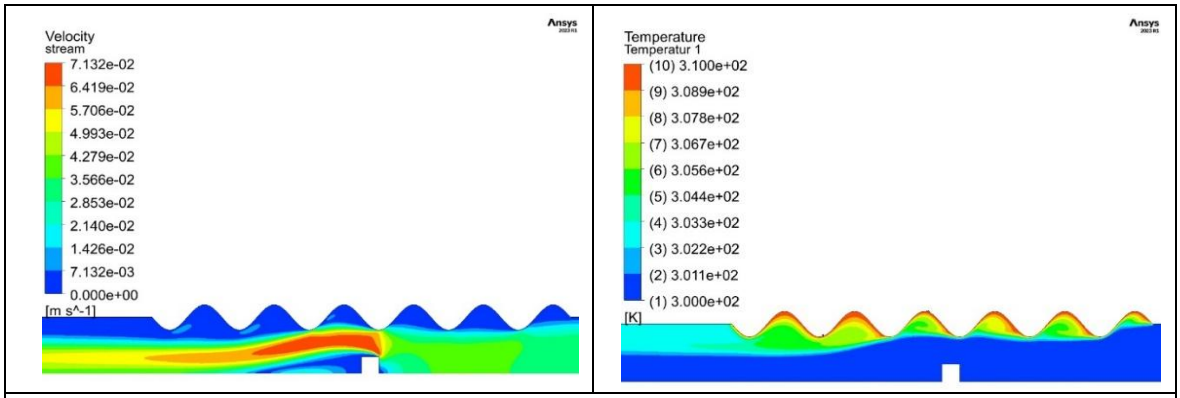
ب- توزیع دما و سرعت برای Re=۳۰۰ و φ=۰، و λ=۱۲ mm



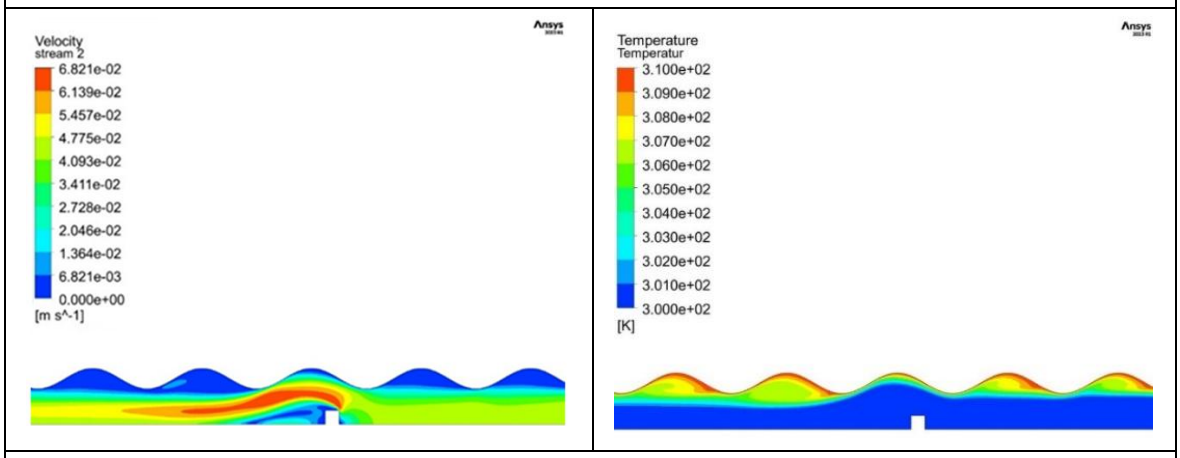
ج- توزیع دما و سرعت برای Re=۵۰۰ و φ=۰، و λ=۱۲ mm

شکل ۶- توزیع دما و سرعت برای اعداد مختلف رینولدز و φ=۰، و λ=۱۲ mm

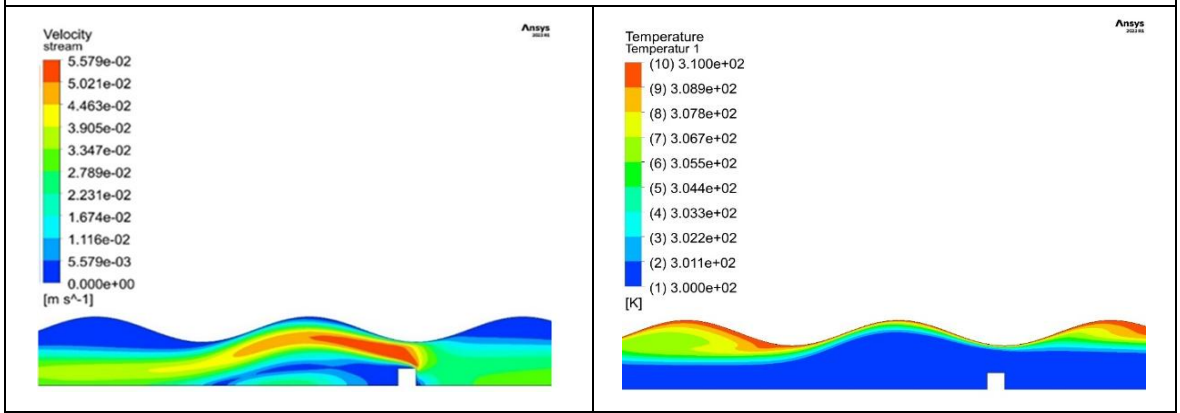
با مقایسه کانتورهای سرعت جریان در شکل (۶) مشاهده می‌شود در اثر وجود مانع و افزایش عدد رینولدز، سرعت سیال افزایش داشته است و افزایش سرعت جریان در نزدیکی مانع، بیش‌ترین مقدار را داشته است. همچنین افزایش عدد رینولدز باعث شده است که سرعت جریان در امتداد موج قبل از رسیدن به مانع افزایش یابد. با افزایش عدد رینولدز از Re=۱۰۰ به Re=۵۰۰، مقدار سرعت بیشینه از ۱/۴۳ به ۷/۱۳ سانتی‌متر بر ثانیه افزایش یافته است که افزایش ۴ برابری را نشان می‌دهد.خطوط دما نیز نشان می‌دهند که با افزایش عدد رینولدز، تغییرات دما در نزدیکی دیواره فوقانی بیش‌تر شده است. توزیع یکنواخت‌تر دما در ناحیه موجی شکل نشان دهده آن است که با افزایش عدد رینولدز انتقال حرارت هم‌رفت بهتر انجام است. هرچه سرعت جریان و تغییرات دما در نزدیکی دیواره کانال بیش‌تر باشد، انتظار می‌رود انتقال حرارت بهتری در نزدیکی دیوارها رخ دهد. طول موج دیواره روی توزیع دما و سرعت جریان، کانتورهای مربوطه برای مقادیر مختلف طول موج و φ=۰.۰ و Re=۵۰۰ در شکل (۷) نشان داده شده است.



الف- توزیع دما و سرعت برای λ=۱۲ mm و φ=۰، Re=۵۰۰



ب- توزیع دما و سرعت برای λ=۲۴ mm و φ=۰، Re=۵۰۰



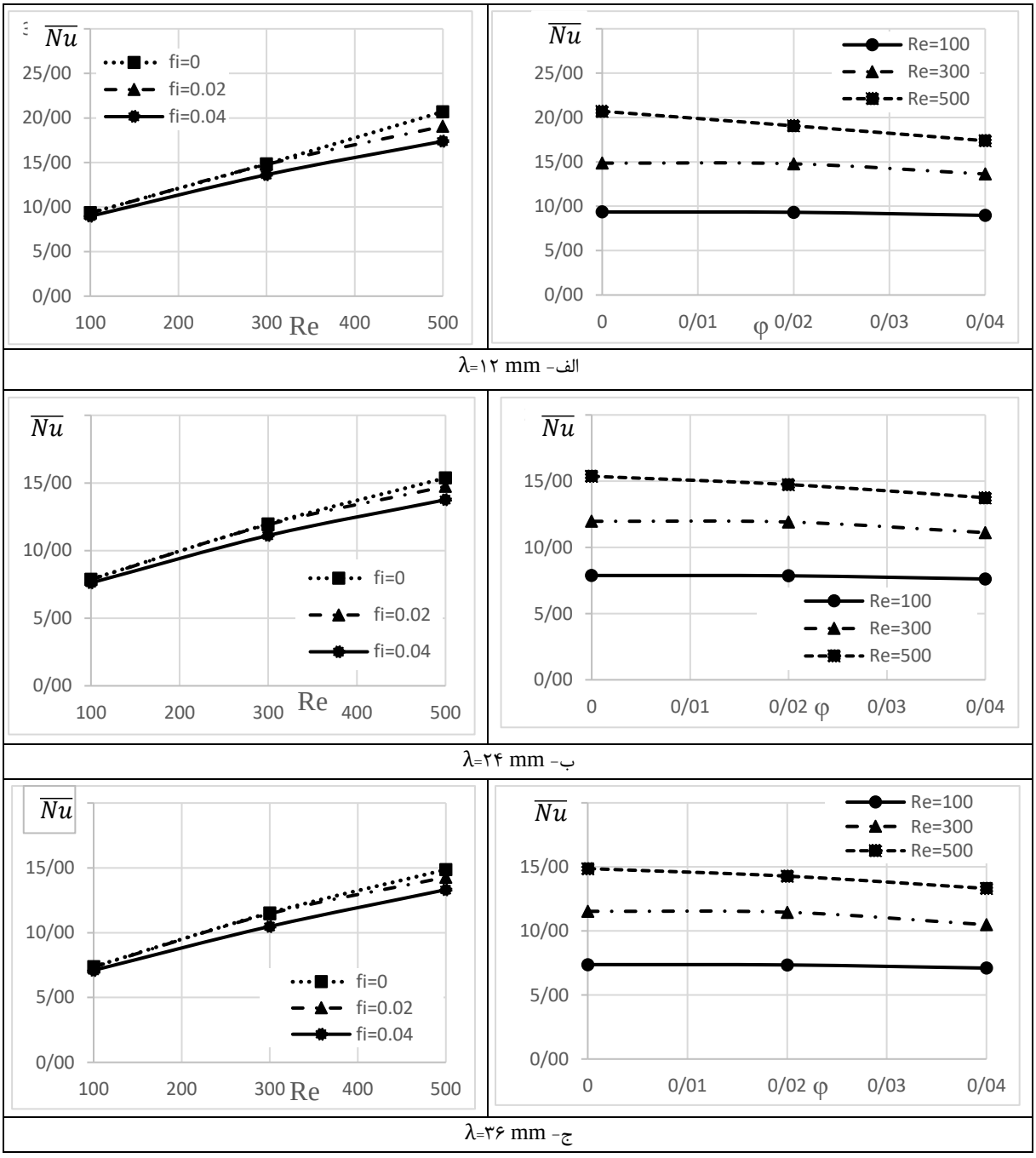
ج- توزیع دما و سرعت برای λ=۳۶ mm و φ=۰، Re=۵۰۰

شکل ۷- توزیع دما و سرعت برای مقادیر مختلف طول موج و φ=۰، و Re=۵۰۰

بررسی کانتورهای سرعت جریان در شکل (۷) نشان می‌دهد با افزایش طول موج از λ=۱۲mm به λ=mm۳۶، سرعت جریان بیشینه در نزدیکی مانع از ۷/۱۳ به ۵/۵۷ سانتی‌متر بر ثانیه کاهش داشته است که کاهش ۲۲ درصدی را نشان می‌دهد. از طرفی به دلیل افزایش طول موج، جریان بیش‌تر به دیواره موجی‌شکل نزدیک شده است و سرعت در نزدیکی یواره افزایش یافته است. کانتورهای خطوط دما نیز نشان می‌دهند که با افزایش طول موج، تغییرات دما در نزدیکی دیواره فوقانی بیش‌تر شده است.

۳-۱- تأثیر کسرحجمی نانوسیال و دامنه موج بر عدد ناسلت متوسط

توزیع عدد ناسلت برحسب عدد رینولدز در غلظت‌های مختلف نانوسیال و طول موج‌های مختلف در شکل (۸) ترسیم شده است.



شکل ۸- عدد ناسلت بر حسب غلظت نانوسیال و عددهای مختلف رینولدز

در شکل (۸) مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز برای تمامی غلظت‌های نانوسیال، عدد ناسلت افزایش می‌یابد. به عبارتی با افزایش سرعت جریان، انتقال حرارت همرفت فعال‌تر شده است. تأثیر عدد رینولدز در غلظت‌های بالاتر نانوسیال کمتر می‌شود. این موضوع از شیب خطوط عدد ناسلت-عدد رینولدز قابل استنتاج است. شیب خطوط برای نانوسیال با غلظت‌های بالاتر کمتر بوده و عدد ناسلت در نانوسیال‌های رقیق‌تر افزایش بیش‌تری داشته است. نکته دیگر این که با افزایش غلظت نانوسیال، عدد ناسلت کاهش داشته است. اثر غلظت نانوسیال در عددهای بزرگ رینولدز بیشتر می‌شود. چنانچه در عددهای کوچک رینولدز، می‌توان گفت که تغییر غلظت نانوسیال تأثیر زیادی بر عدد ناسلت نداشته است. با افزایش عدد رینولدز در کسرحجمی صفر، عدد ناسلت در حدود ۰/۵ درصد و در غلظت ۰/۰۴ در حدود ۸ درصد کاهش داشته است. همچنین از شکل ۸ استنباط می‌شود که توزیع عدد ناسلت برحسب عدد رینولدز در غلظت‌های مختلف نانوسیال برای طول موج‌های λ=۱۲mm، λ=۲۴mm و λ=۳۶mm رفتارهای مشابه دارند. با افزایش طول موج از λ=12mm به λ=۳۶mm، عدد ناسلت متوسط از ۲۱ به ۱۴ کاهش یافته است که معادل ۳۳ درصد است. و با افزایش عدد رینولدز بر عدد ناسلت متوسط افزوده می‌شود. بیشترین افزایش عدد ناسلت در طول موج λ=12mm و در غلظت φ=۰ اتفاق افتاده است. درصد افزایش عدد ناسلت در این حالت ۸۱ درصد بوده است.

این نتایج با یافته‌های سایر محققین [۲] مطابقت دارد. همچنین تغییر شکل دیواره کانال بر انتقال حرارت تأثیر داشته است. با کاهش طول موج یا به عبارتی ایجاد انحناء در دیواره (شبیه زبری) می‌توان عدد ناسلت متوسط را اضافه کرد. مشابه این نتایج توسط منبع [۱۴] گزارش شده است. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم منجر به کاهش انتقال حرارت می شود، این در حالی است نتایج تحقیق منبع [۱۵] نشان داده است که استفاده از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم، انتقال حرارت را افزایش داده است.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که در حالت کلی برای جریان در کانال با دیواره‌های موج‌دار بافل‌دار با افزایش کسرحجمی نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم، عدد ناسلت کاهش یافته است. بیش‌ترین کاهش عدد ناسلت برابر ۸ درصد و مربوط به عدد رینولدز Re=۵۰۰ و غلظت φ=۰/۰۴ بوده است.

با افزایش طول موج، عدد ناسلت کاهش یافت به گونه‌ای که با افزایش طول موج از λ=12mm به λ=mm36، عدد ناسلت متوسط از ۲۱ به ۱۴ کاهش یافته است که معادل ۳۳ درصد است.

با افزایش عدد رینولدز بر عدد ناسلت متوسط افزوده شد. بیش‌ترین افزایش عدد ناسلت، ۸۱ درصد و مربوط به طول موج λ=12mm و غلظت φ=۰ است.

بنابراین در یک کانال با دیوارهای موجدار و بافل‌دار برای دست‌یابی به عدد ناسلت بزرگ‌تر که نشانگر انتقال حرارت همرفت فعال‌تر است باید از نانوسیال با غلظت کم‌تر (φ=۰)، سرعت جریان بیشتر (Re=۵۰۰) و طول موج کوتاه‌تر (λ=12mm) استفاده کرد.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شود که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده اند.

مشارکت های نویسندگان

اسماعیل عابدی: انجام مراحل طرح اولیه، محاسبات آماری و شبیه‌سازی.

حسن غفوری: انجام مراحل نگارش و تدوین مقاله.

منابع مالی

در انجام این مقاله از هیچ منبع مالی خارجی استفاده نشده است.

فهرست علائم

علائم	واحد	توضیحات
زیرنویس **f**	-	بیانگر سیال پایه
زیرنویس **p**	-	بیانگر نانوذره
زیرنویس **nf**	-	بیانگر نانوسیال
زیرنویس **s**	-	بیانگر سطح
زیرنویس **m**	-	به معنای مقدار متوسط
ρ	Kg/m^3	چگالی
$\boldsymbol{\varphi}$	-	کسرحجمی نانوذره
$\mathbf{C_p}$	J/kg.K	گرمای ویژه
$\boldsymbol{\mu}$	Pa.s	ویسکوزیته دینامیکی
$\mathbf{k}$	W/m.K	ضریب هدایت حرارتی
$\boldsymbol{u}$	m/s	مولفه سرعت در راستای x
$\boldsymbol{v}$	m/s	مولفه سرعت در راستای y
$\boldsymbol{p}$	Pa	فشار
$\boldsymbol{T}$	K	دما
Re	-	عدد رینولدز
Nu	-	عدد ناسلت
$\mathbf{D_h}$	m	قطر هیدرولیکی
$\mathbf{h}$	$W/m^2.K$	ضریب انتقال حرارت جابجایی
$\mathbf{q}^{"}$	W/m^2	نرخ انتقال حرارت
$\overline{\mathbf{T}}$	K	دمای متوسط
$\mathbf{Q}$	W	کل انتقال حرارت
$\mathbf{A}$	m^2	سطح انتقال حرارت
H	m	ارتفاع کانال
$\boldsymbol{L}$	m	طول کانال
λ	m	طول‌موج دیواره کانال
a_1	m	طول بافر
a_2	m	ارتفاع بافر
a_3	m	طول قسمت مسطح ورودی

مراجع

[1] Das, Sarit Kumar, Nandy Putra, Peter Thiesen, and Wilfried Roetzel. “Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids.” Journal of Heat Transfer 125, no. 4 (2003): 567–574. https://doi.org/10.1115/1.1571080.

[2] Shevade, Shantanu S., and Muhammad M. Rahman. “Heat Transfer in Rectangular Microchannels during Volumetric Heating of the Substrate.” International Communications in Heat and Mass Transfer 34 (2007): 661–672. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.02.009.

[3] Plant, Robert D., and M. Ziad Saghir. “Numerical and Experimental Investigation of High Concentration Aqueous Alumina Nanofluids in a Two and Three Channel Heat Exchanger.” International Journal of Thermofluids 9 (2021): 100055. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100055.

[4] Wang, Xinwei, Xianfan Xu, and Stephen U. S. Choi. “Thermal Conductivity of Nanoparticle-Fluid Mixture.” Journal of Thermophysics and Heat Transfer 13, no. 4 (1999): 474–480. https://doi.org/10.2514/2.6486.

[5] Xuan, Yimin, and Qiang Li. “Heat Transfer Enhancement of Nanofluids.” International Journal of Heat and Fluid Flow 21, no. 1 (2000): 58–64. https://doi.org/10.1016/S0142-727X(99)00067-3.

[6] Kang, Shung-Wen, Wei-Chiang Wei, Sheng-Hong Tsai, and Shih-Yu Yang. “Experimental Investigation of Silver Nano-Fluid on Heat Pipe Thermal Performance.” Applied Thermal Engineering 26, no. 17 (2006): 2377–2382. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.02.020.

[7] Jou, Rong-Yuan, and Sheng-Chung Tzeng. “Numerical Research of Nature Convective Heat Transfer Enhancement Filled with Nanofluids in Rectangular Enclosures.” International Communications in Heat and Mass Transfer 33, no. 6 (2006): 727–736. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2006.02.016.

[8] Naphon, Paisarn, Pichai Assadamongkol, and Teerapong Borirak. “Experimental Investigation of Titanium Nanofluids on the Heat Pipe Thermal Efficiency.” International Communications in Heat and Mass Transfer 35, no. 10 (2008): 1316–1319. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.07.010.

[9] Yang, Yue-Tzu, and Feng-Hsiang Lai. “Numerical Study of Heat Transfer Enhancement with the Use of Nanofluids in Radial Flow Cooling System.” International Journal of Heat and Mass Transfer 53, no. 25 (2010): 5895–5904. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.07.045.

[10] Biglari, Mojtaba, and Hadi Rostamian. “Experimental Study on Convective Heat Transfer, Thermo-Physical Properties and Pressure Drop of Low Concentration COOH-Functionalized MWCNTs/Water Nanofluid Flow.” Journal of Modeling in Engineering 15, no. 48 (2017): 73–84. https://doi.org/10.22075/jme.2017.5160. (in Persian)

[11] Eslami, Sajjad, and Mahdi Mohseni. “Effect of Turbulence Model on Numerical Simulation of Turbulent Flow of Nanofluids in a Horizontal Pipe.” Journal of Modeling in Engineering 17, no. 58 (2019): 279–293. https://doi.org/10.22075/jme.2019.17099.1681. (in Persian)

[12] Bianco, Vincenzo, Bernardo Buonomo, Anna di Pasqua, and Oronzio Manca. “Heat Transfer Enhancement of Laminar Impinging Slot Jets by Nanofluids and Metal Foams.” Thermal Science and Engineering Progress 22 (2021): 100860. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.100860.

[13] Chen, Yongping, Chengbin Zhang, Mingheng Shi, and Jiafeng Wu. “Three-Dimensional Numerical Simulation of Heat and Fluid Flow in Noncircular Microchannel Heat Sinks.” International Communications in Heat and Mass Transfer 36, no. 9 (2009): 917–920. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.06.004.

[14] Dharaiya, V. V., and S. G. Kandlikar. “A Numerical Study on the Effects of 2D Structured Sinusoidal Elements on Fluid Flow and Heat Transfer at Microscale.” International Journal of Heat and Mass Transfer 57, no. 1 (2013): 190–201. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.10.004.

[15] Akdag, Unal, Selma Akcay, and Dogan Demiral. “Heat Transfer Enhancement with Laminar Pulsating Nanofluid Flow in a Wavy Channel.” International Communications in Heat and Mass Transfer 59 (2014): 17–23. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.10.008.

[16] Ekiciler, Recep, and Muhammet Samet Ali Çetinkaya. “A Comparative Heat Transfer Study between Monotype and Hybrid Nanofluid in a Duct with Various Shapes of Ribs.” Thermal Science and Engineering Progress 23 (2021): 100913. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.100913.

[17] Ameur, Houari. “Effect of Corrugated Baffles on the Flow and Thermal Fields in a Channel Heat Exchanger.” Journal of Applied and Computational Mechanics 6 (2020): 209–218. https://doi.org/10.22055/jacm.2019.28936.1521.

[18] Henniche, Rabah, and Abdelkader Korichi. “Mixed and Forced Convection Heat Transfer in Baffled Channels: A Brief Review.” Journal of Heat and Mass Transfer Research 12, no. 1 (2025): 15–28. https://doi.org/10.22075/jhmtr.2024.34280.1565.

[19] Bakhshi, Naser, Saman Rashidi, and Roohollah Rafee. “Numerical Study on the Effects of Extended Surfaces on the Performance of a Coaxial Geothermal Heat Exchanger.” Journal of Modeling in Engineering 22, no. 76 (2024): 167–175. https://doi.org/10.22075/jme.2023.30329.2433. (in Persian)

[20] Rezazadeh, Sajad, and Tuhid Pashaee Golmarz. “Evaluation of the Impact of Flexible Wall Boundary Conditions on the Productivity of Compact Exchangers.” Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering 44, no. 2 (2025): 549–560. https://doi.org/10.30492/ijcce.2024.2034856.6691.

[21] Rakhimov, Ganisher, and Feruzbek Murtazayev. “Increasing the Efficiency of Heat Exchange by Changing the Construction of a Shell-and-Tube Heat Exchanger.” E3S Web of Conferences 443 (2023). https://doi.org/10.1051/e3sconf/202344303008.

[22] Khanafer, Khalil, and Kambiz Vafai. “A Critical Synthesis of Thermophysical Characteristics of Nanofluids.” International Journal of Heat and Mass Transfer 54, no. 19 (2011): 4410–4428. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.048.

[23] Maxwell, James Clerk. A Treatise on Electricity and Magnetism. Oxford: Clarendon Press, 1873.

[24] Heydarinajad, G. Advanced Fluid Mechanic. Tarbiat Modares University Press, 2019.

[25] Ghasemi, B., and Saiied Mostafa Aminossadati. “Periodic Natural Convection in a Nanofluid-Filled Enclosure with Oscillating Heat Flux.” International Journal of Thermal Sciences 49, no. 1 (2010): 1–9. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2009.07.020.

[26] Habibi, M. R., and M. R. Salimpour. “Numerical Investigation of Heat Transfer and Displacement of Laminar Fluid Flow Inside Tube with Sinusoidal Wall.” Master’s thesis, Faculty of Mechanics, Isfahan University of Technology, 2013. (in Persian)

[27] Gamar, A. “Comparison of Heat Transfer in Tubular Heat Exchangers Using Water-Aluminum Oxide and Water-Titanium Oxide Nanofluids.” Presented at the 10th Conference on Heat Exchangers, Chillers and Cooling Towers, 2018. https://civilica.com/doc/807814. (in Persian)