

Predicting the distribution pattern of parameters affecting the heat transfer coefficient of nanofluid in shell and tube heat exchangers using computational fluid dynamics

Abdolsatar Avazsoofian¹, Seid Mahdi Jafari^{2*}, Mahdi Kashaninejad³,
Alireza Sadeghi⁴, Narges Malekjani⁵

¹ Faculty of Food Science, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, Gorgan, Iran,
Email: Soofian_sattar@yahoo.com

² Faculty of Food Science, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, Gorgan, Iran,
Email: jafarism@hotmail.com

³ Faculty of Food Science, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, Gorgan, Iran,
Email: kashaninejad@yahoo.com

⁴ Faculty of Food Science, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, Gorgan, Iran,
Email: sadeghi.gau@gmail.com

⁵ Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Guilan, Iran, Email: Narjes.malekjani@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 2022-05-05
Revised: 2022-07-16
Accepted: 2022-08-17

Keywords:
Heat Exchanger
Simulation
Heat Transfer
Nanofluid

ABSTRACT

Background and objectives: Among the types of heat exchangers, shell and tube heat exchangers are the most common heat exchange equipments. The energy efficiency of a heat exchanger can be increased by improving the heat transfer properties. Nanofluids are Colloidal suspension of nanoparticles in a base fluid. The nanoparticles used in nanofluids are usually made of metals, oxides, carbides, or carbon nanotubes. The heat transfer rate is affected by the thermophysical properties of the nanofluid, which increases with the increasing volume of nanoparticles in the base fluid. Nanofluid properties are affected by nanoparticle concentration, purity level, and variable structure. The main purpose of this paper is to provide an overview on the use of nanofluids in shell and tube heat exchangers to increase heat transfer co-efficients and simulate the parameters affecting the flow and heat transfer to predict temperature distribution, velocity, and pressure drop in different parts of the heat exchanger.

Material and methods: In this study, Camsol multiphysics simulation software version 6 was used to build a computational model of shell and tube heat exchanger to simulate temperature, velocity, and pressure drop changes in the heat exchanger. Hot nanofluid (353.15 °K) enters the tube and the product (298.15 °K) enters the shell. The role of geometry parameters used on heat transfer rate has been investigated and presented. The temperature and total heat transfer characteristics of the pipe wall are calculated and designed for theoretical, experimental, and numerical methods using the K- ε heat transfer model.

Results: By performing a computational fluid dynamics study, and calculating the desired values of each of the studied parameters, a good agreement was obtained between the computational fluid dynamics study and experimental results. The results of temperature, velocity, and pressure drop counters show that the addition of nanoparticles to the fluid can effectively increase the thermal conductivity of the fluid the temperature of the added nanoparticles are directly related to the thermal conductivity

ratio. The velocity changes in the shell are very scarce and in most areas of the shell, the speed according to both numerical calculations and the colored guide bar is about 0.05 meters per second, but at the points of collision of the current with the baffles, inlet and outlet values are different, ranging between 0.15 to 0.2 meters/ seconds. According to / Based on the numerical results, it can be seen that the velocity values in the vicinity of the walls are very low, which is due to the strong friction gradient. Examining the temperature-related contours, it can be seen that the heat transfer is not uniform throughout the length of the exchanger and the decrease in temperature in the direction of flow is visible.

Conclusion: The use of alumina nanoparticles in the base fluid in the amount of 4% caused an increase of 0.9 degrees Kelvin in the average output temperature in one cycle of passing through the system, which increases the temperature more by repeating this cycle. According to the pressure drop contour, the pressure drop of nanofluids is much higher than the base fluid and the more pressure drop increases, the more increasing the concentration of nanoparticle will be noticed.

Cite this article: Avazsoofian, A., Jafari, S.M., Kashaninejad, M., Sadeghi, A.R., Malekjani, N. 2022. Predicting the distribution pattern of parameters affecting the heat transfer coefficient of nanofluid in shell and tube heat exchangers using computational fluid dynamics. *Food Processing and Preservation Journal*, 14 (4), 17-36.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/FPPJ.2022.20156.1703

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



پیش‌بینی الگوی توزیع پارامترهای موثر بر ضریب انتقال حرارت نانوسیال در مبدل حرارتی پوسته و لوله با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

عبدالستار عوض صوفیان^۱، سید مهدی جعفری^{۲*}، مهدی کاشانی‌نژاد^۳، علیرضا صادقی^۴، نرجس ملک‌جانی^۵

^۱ دانشجوی دکتری علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

^۲ استاد گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، رایانامه: jafarism@hotmail.com

^۳ استاد گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

^۴ استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

^۵ استادیار گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله:	سابقه و هدف: در بین انواع مبدل‌ها، مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله رایج‌ترین تجهیزات تبادل حرارتی هستند. راندمان انرژی یک مبدل حرارتی را می‌توان با بهبود ویژگی‌های انتقال حرارت افزایش داد. نانوسیالات سوسپانسیون‌های کلئیدی شده نانوذرات در یک سیال پایه هستند. نانوذرات مورد استفاده در نانوسیال‌ها معمولاً از فلزات، اکسیدها، کربیدها یا نانولوله‌های کربنی ساخته می‌شوند. سرعت انتقال حرارت تحت تأثیر خواص ترموفیزیکی نانوسیال است که با افزایش حجم نانوذرات در سیال پایه افزایش می‌یابد. خواص نانوسیال تحت تأثیر غلظت نانوذرات، سطح خلوص و ساختار متغیر است. هدف اصلی این مقاله ارائه یک بررسی کلی استفاده از نانوسیال در مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله جهت افزایش ضرایب انتقال حرارت و شبیه‌سازی پارامترهای مؤثر در انتقال جریان و حرارت است تا بتوان توزیع دما، سرعت و افت فشار را در نقاط مختلف مبدل حرارتی پیش‌بینی کرد.
مقاله کامل علمی-پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۵	
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۵	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۶	
واژه‌های کلیدی:	
مبدل حرارتی	
شبیه‌سازی	
انتقال حرارت	
نانوسیال	
	مواد و روش‌ها: در این مطالعه، نرم‌افزار شبیه‌سازی چند فیزیکی کامسول نسخه ۶ برای ساخت یک مدل محاسباتی از مبدل حرارتی پوسته و لوله، به منظور شبیه‌سازی تغییرات دما، سرعت و افت فشار در مبدل حرارتی استفاده شد. نانوسیال داغ (۳۵۳/۱۵ درجه کلونین) به عنوان سیال گرم در لوله افقی و محصول (۲۹۸/۱۵ درجه کلونین) نیز از سمت پوسته وارد شده است. نقش مربوط به پارامترهای هندسه مورد استفاده بر میزان انتقال گرما بررسی و ارائه شده است. مشخصات دما و میزان انتقال حرارت کلی از دیواره لوله محاسبه و برای روش‌های تئوری، تجربی و عددی با استفاده از مدل انتقال حرارت K-E طراحی شده است.
	یافته‌ها: با انجام بررسی دینامیک سیالات محاسباتی محاسبه مقادیر مطلوب هر یک از پارامترهای مورد بررسی، انطباق خوبی بین بررسی دینامیک سیالات محاسباتی و نتایج تجربی حاصل شد. نتایج حاصله از کانتورهای دما، سرعت و افت فشار نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات به سیال می‌تواند به طور مؤثری نسبت رسانایی حرارتی سیال را افزایش دهد و دمای

نانوذرات افزوده شده با نسبت هدایت حرارتی رابطه مستقیم دارد. تغییرات سرعت در پوسته بسیار ناچیز است و در بیشتر مناطق پوسته سرعت طبق محاسبات عددی و با توجه به نوار رنگی راهنما حدود ۰/۰۵ متر بر ثانیه است، ولی در نقاط برخورد جریان با بافل‌ها و ورودی و خروجی مقادیر متفاوت و بین ۰/۱۵ تا ۰/۲ متر بر ثانیه است. از نتایج عددی، فهمیده می‌شود که مقادیر سرعت در مجاورت دیواره‌ها بسیار کم است که به دلیل وجود گرادیان قوی اصطکاک است. با بررسی کانتورهای مربوط به دما می‌توان یافت که انتقال حرارت در سراسر طول مبدل یکنواخت نیست و کاهش درجه حرارت در جهت جریان قابل مشاهده است.

نتیجه‌گیری کلی: استفاده از نانوذره آلومینا در سیال پایه به مقدار ۴ درصد باعث افزایش ۰/۹ درجه کلون دمای میانگین خروجی در یک سیکل گذر از سیستم شد که با تکرار این سیکل افزایش دما بیشتر می‌شود. با توجه به کانتور افت فشار، افت فشار نانو سیالات به مراتب بیشتر از سیال پایه بوده و با افزایش غلظت نانوذره افت فشار نیز افزایش می‌یابد.

استناد: عوض صوفیان، ع.، جعفری، س.م.، کاشانی‌نژاد، م.، صادقی، ع.، ملک‌جانی، ن. (۱۴۰۱). پیش‌بینی الگوی توزیع پارامترهای موثر بر ضریب انتقال حرارت نانو سیال در مبدل حرارتی پوسته و لوله با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی. فرآوری و نگهداری مواد غذایی، ۱۴ (۴)، ۱۷-۳۶.

DOI: 10.22069/FPPJ.2022.20156.1703



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

مبدل‌های حرارتی^۱ تجهیزاتی هستند که به منظور انتقال بهینه حرارت از یک محیط به محیط دیگر استفاده می‌شوند؛ این تجهیزات، حرارت را بین دو یا چند جریان سیال منتقل می‌کنند. بهینه‌سازی خواص انتقال حرارت این سیالات می‌تواند گامی مهم در راستای بهینه‌سازی عملکرد مبدل حرارتی و در نهایت افزایش بهره‌وری در صنایع غذایی شود (۱). اهمیت مبدل‌های حرارتی از نقطه نظر حفظ انرژی و نگرانی‌های زیست‌محیطی به شدت افزایش یافته است. در بین انواع مبدل‌ها، مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله رایج‌ترین تجهیزات تبادل حرارتی هستند. راندمان انرژی یک مبدل حرارتی را می‌توان با بهبود ویژگی‌های انتقال حرارت افزایش داد. تحقیقات زیادی برای بهبود طراحی و سرعت انتقال حرارت با استفاده از بافل‌ها، میکروکانال‌ها و فین‌ها انجام شده است. اکنون محققان بر روی یافتن راهی جدید برای افزایش نرخ انتقال حرارت در جهت صرفه‌جویی در انرژی، کاهش فضا و همچنین هزینه مبدل‌های حرارتی متمرکز شده‌اند (۲، ۳ و ۴).

نانوسیالات^۲ سوسپانسیون‌های کلوئیدی شده نانوذرات در یک سیال پایه هستند. نانوذرات مورد استفاده در نانوسیالات معمولاً از فلزات، اکسیدها، کاربیدها یا نانولوله‌های کربنی ساخته می‌شوند. سیالات پایه رایج عبارت‌اند از آب، اتیلن گلیکول و روغن است (۵). نانوسیالات هدایت حرارتی و ضریب انتقال حرارت همرفتی را در مقایسه با سیال پایه افزایش می‌دهند. دانستن رفتار رئولوژیکی نانوسیالات در انتخاب برای مناسب بودن آن‌ها برای کاربردهای انتقال حرارت همرفتی بسیار حیاتی است (۶). تحقیقات زیادی در مورد خصوصیات نانوسیالات، سنتز و کاربردهای آن‌ها در سامانه‌های مختلف منتشر

شده است. تفاوت‌های زیادی در مورد خواص نانوسیال وجود دارد. درک مناسب از خواص ترموفیزیکی و ویژگی‌های انتقال حرارت برای استفاده از آن مورد نیاز است. سرعت انتقال حرارت تحت تأثیر خواص ترموفیزیکی نانوسیال است که با افزایش حجم نانوذرات در سیال پایه افزایش می‌یابد. خواص نانوسیال تحت تأثیر غلظت نانوذرات، سطح خلوص و ساختار متغیر است. از بررسی‌ها پیدا شده است که هدایت حرارتی نانوسیالات بالاتر از سیالات پایه مربوطه است (۷).

ایستمن و همکاران (۲۰۰۱) افزایش ۴۰ درصدی در هدایت حرارتی نانوسیالات مس-اتیلن گلیکول در غلظت ۰/۳ درصد گزارش کردند (۸). مرشد و همکاران (۲۰۰۸) رسانایی حرارتی نانوسیالات آلومینیوم، آلومینیوم اکسید و تیتانیوم اکسید را با آب دیونیزه شده، اتیلن گلیکول و روغن به‌عنوان سیالات پایه در بخش‌های حجمی مختلف ۱ تا ۵ درصد، در دماهای مختلف با استفاده از روش سیم داغ گذرا اندازه‌گیری کردند. آن‌ها نیز افزایش رسانایی حرارتی نانوسیالات را تأیید کردند (۹). اکثر محققان با بررسی‌های تجربی و نظری خود به این نتیجه رسیدند که هدایت حرارتی نانوسیال با افزایش نانوذرات در سیال پایه افزایش می‌یابد که تنها به دلیل حرکت براونی نانوذرات در سیال پایه امکان‌پذیر است (۱۰)، (۱۱). اندازه نانوذرات در سیال پایه بر هدایت حرارتی نانوسیال تأثیر می‌گذارد. تنگ و همکاران (۲۰۱۰) از مشاهدات تجربی خود به این نتیجه رسیدند که هدایت حرارتی نانوسیال با کاهش اندازه نانومواد افزایش می‌یابد. دما یکی دیگر از پارامترهایی است که بر هدایت حرارتی نانوسیالات تأثیر می‌گذارد (۱۲).

نگوین و همکاران (۲۰۰۸) از نانوسیال آلومینا/آب برای آزمایش خود استفاده کردند و اثرات کسر حجمی و دما بر ویسکوزیته را پیدا کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ویسکوزیته نانوسیال با افزایش کسر

1. Heat exchangers
2. Nanofluids

محاسباتی^۳ یک ابزار شبیه‌سازی است که با استفاده از نرم‌افزارهای کامپیوتری و به‌کارگیری روابط ریاضی، برای مدل‌سازی فرآیندهایی مثل انتقال جرم، حرارت، مومنتوم و همچنین بهینه‌سازی طراحی فرآیندهای صنعتی به کار می‌رود (۱۷)؛ بنابراین، شبیه‌سازی زمینه‌ای را برای آزمایش مقرون‌به‌صرفه و توسعه تجهیزات و فرآیندهای جدید، مانند کاربرد نانوسیال‌ها در سامانه‌های انتقال حرارت، فراهم می‌کند (۱۸).

نرم‌افزار کامسول^۴ یک نرم‌افزار تحلیلی شبیه‌سازی براساس المان محدود، چندفیزیکی است و دارای مجموعه وسیعی از توابع برای تحلیل‌ها و راه‌حل‌ها است. این نرم‌افزار شامل ماژول انتقال حرارت، ماژول الکترومغناطیس، ماژول آکوستیک، ماژول علوم زمین، ماژول مهندسی شیمی و ماژول مکانیک سازه است. همچنین دارای بسیاری از عملکردهای پیش و پس از پردازش است که یک محیط کاری جذاب را برای حل مشکلات پیچیده علمی و مهندسی در مقیاس بزرگ فراهم می‌کند (۱۹، ۲۰). نرم‌افزار کامسول قادر به اتصال انواع مختلف پدیده‌های فیزیکی در یک واحد است، بنابراین این انعطاف‌پذیری نه‌تنها روند مدل‌سازی را ساده می‌کند، بلکه زمان محاسبات را نیز کاهش می‌دهد. روش مدل‌سازی شامل چند مرحله است که به کاربر امکان می‌دهد هندسه، انتخاب ماژول فیزیک، خواص مواد، تخصیص مقادیر، تعیین مرزها، اندازه‌مش و شرایط کلی را برای ارزیابی جریان و انتقال حرارت در میان پارامترهای دیگر تغییر دهد. پس‌از آن، یک هندسه سه‌بعدی برای نزدیک شدن مدل به شرایط واقعی ضروری است (۲۱).

در این پژوهش، از مبدل حرارتی پوسته و لوله در مقیاس نیمه‌صنعتی برای مدل‌سازی جریان سمت پوسته و لوله با استفاده از نرم‌افزار چند فیزیک کامسول نسخه ۶ استفاده شد. حساسیت نتایج

حجمی افزایش می‌یابد درحالی‌که با افزایش دما کاهش می‌یابد (۱۳). سرعت انتقال حرارت نانوسیال نیز تحت تأثیر خاصیت دیگری به نام گرمای ویژه است. اکثر پارامترهای مهم انتقال حرارت مانند عدد ناسلت (Nu)، عدد پکلت (Pe) و عدد پراندتل (Pr) تحت تأثیر خواص مهم نانوسیال به نام چگالی هستند. اکثر محققان از مشاهدات تجربی خود به این نتیجه رسیدند که چگالی با افزایش غلظت حجمی نانوسیال افزایش می‌یابد (۱۴).

جعفری و همکاران (۲۰۱۷) تحقیقی به‌منظور ارزیابی عملکرد حرارتی نانوسیالات در مبدل حرارتی پوسته و لوله برای پاستوریزاسیون آب هندوانه داشتند، در این پژوهش از نانوسیال آب/آلومینا در غلظت‌های صفر و ۴ درصد برای پاستوریزاسیون آب هندوانه تحت شرایط دمایی ۷۵، ۸۰ و ۸۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵، ۳۰ و ۴۵ ثانیه استفاده گردید. ضریب کلی انتقال حرارت نانوسیال آب/آلومینا ۱، ۲ و ۴ درصد به ترتیب ۵، ۸ و ۱۳ درصد افزایش یافت (۱۵). این امر به دلیل هدایت حرارتی بالای نانوسیال می‌باشد. همچنین با افزایش دما از دمای محیط تا دمای فرآوری، هدایت حرارتی نانوسیال‌های با غلظت ۲ و ۴ درصد به ترتیب ۵/۷ و ۶ درصد افزایش یافت. بسیاری از مطالعات انتقال حرارت همرفتی نانوسیال‌ها را ارزیابی کردند. به‌عنوان مثال، نشان داده شده است که نانوسیال آلومینا / آب در ۶ درصد حجمی می‌تواند ضریب انتقال حرارت را در مناطق ورودی و مناطق کاملاً توسعه‌یافته در مقایسه با آب خالص به ترتیب ۱۷ و ۲۷ درصد افزایش دهد (۱۶).

هدف اصلی این مقاله ارائه یک بررسی کلی از استفاده از نانوسیال در مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله جهت افزایش ضرایب انتقال حرارت و شبیه‌سازی پارامترهای مؤثر در انتقال جریان و حرارت است تا بتوان توزیع دما، سرعت و افت فشار را در نقاط مختلف مبدل حرارتی پیش‌بینی کرد. دینامیک سیالات

1. Computational fluid dynamics
2. Comsol software

فشار توسط دو پمپ سانتریفیوژی استیل $0/55 \text{ Kw}$ تأمین شد. دریچه‌های کنترل، برگشت و تخلیه در محل‌های مناسب تعبیه شدند. عملکرد گرمایی و دمای مواد غذایی و نانو سیال توسط ترموکوپل‌ها برای تنظیم جریان سیالات کنترل می‌شود. نانو سیال و مایع غذایی انرژی حرارتی خود را با دور زدن ۱۳ لوله با قطر خارجی، ضخامت و طول به ترتیب ۸، ۲ و ۸۰۰ میلی‌متر (به ترتیب) و عبور از پوسته‌ای با قطر داخلی ۱۰۰ میلی‌متر به صورت جریان مخالف، تبادل کردند. کنترل سرعت جریان دو سیال و تبدیل الکتریسیته سه فاز الکتروپمپ‌ها به حالت تک فاز از طریق یک کامپیوتر و دو اینورتر برداری (Hyundai heavy Korea industries co. LTD. N700E) انجام شد. تغییرات دما در سیالات توسط سنسورهای 100 PT بررسی شد. رله‌های گرمایش، اینورتر (پمپ) و سنسورهای حرارتی 100 PT به ورودی میکروکنترلر متصل شده و از طریق پورت‌های USB به سیستم مانیتورینگ متصل شدند. ارسال دستورات به سیستم و نمایش نمودارهای دما-زمان به ترتیب توسط نرم‌افزار Visual Studio و Microsoft Excel انجام شد (۲).

شبیه‌سازی با انتخاب‌های مدل‌سازی مانند مدل مش و آشفستگی بررسی شده است. پس از انتخاب یک مش مناسب، یک طرح گسسته‌سازی و یک مدل آشفستگی، شبیه‌سازی برای نرخ جریان در سمت لوله با سیال پایه و نانو سیال انجام شد. نتایج شبیه‌سازی برای محاسبه ضرایب انتقال حرارت سمت پوسته و لوله، سرعت و الگوی جریان و افت فشار استفاده می‌شود.

مواد و روش‌ها

مبدل حرارتی پوسته و لوله: سیستم مبدل حرارتی پوسته و لوله (طراحی و ساخته شده به روش الگوی سازه‌ای در دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان) شامل دو مخزن مجزا، یکی برای مواد غذایی مایع و دیگری مجهز به یک گرم‌کن ۱ کیلوواتی برای گرم کردن سیال (آب یا نانو سیال) و لوله‌های حلقوی برای انتقال سیالات از مخزن به مبدل حرارتی است (شکل ۱). تمام قطعات از استیل ضدزنگ L۳۱۶ ساخته شده و با فویل آلومینیومی برای جلوگیری از اتلاف حرارتی عایق‌بندی شده‌اند. توان مورد نیاز برای غلبه بر افت



شکل ۱- سامانه حرارتی طراحی و ساخته شده در دانشکده صنایع غذایی (دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان)

Figure1- Thermal system designed and built in the Faculty of Food Science and Engineering (Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources)

خریداری و با غلظت‌های حجمی مختلف صفر و چهار درصد W/V در آب مقطر دیونیزه شده حل شدند. جزئیات ویژگی‌های نانوذرات در جدول ۲ نشان داده شده است. سپس برای اطمینان از پایداری نانو سیال، آن را به مدت یک ساعت با گرم‌کن مجهز به همزن با دور ۱۵۰۰ در دقیقه به‌طور کامل همزده شد. پس از ۲۴ ساعت هیچ رسوبی در نانو سیال تهیه شده مشاهده نشد (۱۰).

اجزای مبدل حرارتی پوسته و لوله طبق شکل ۱ شماره‌گذاری شده است: ۱. مبدل حرارتی پوسته و لوله ۲. سنسورهای دمایی ۳. مخزن مجهز به گرم‌کن سیال حرارتی ۴. مخزن سیال سرد ۵. الکتروپمپ سانتریفیوژی ۶. اینورتر ۷. کنترلر دیجیتال ۸. نرم‌افزار پایش سامانه
آماده‌سازی نانو سیال: نانوذرات آلومینا با خلوص ۹۹ درصد (US research nano-materials, Inc.)

جدول ۱- مقادیر پارامترهای مبدل حرارتی سازه‌ای

Table 1- Structural heat exchanger parameter values

نشانه	مقادیر طراحی سازه‌ای	اجزاء مبدل حرارتی
sign	Structural design values	Heat exchanger components
nt	۱۳	تعداد لوله‌های گرمایی (Number of heating tubes)
Re _i	۲۸۲۷/۰۸۴	عدد جریان رینولدز داخل لوله‌ها (Reynolds flow number inside the tubes)
Pr _i	۰/۰۱۵	عدد پرانتل جریان داخل لوله‌ها (Prandtl number flow inside the tubes)
h _i (Wm ⁻² K ⁻¹)	۴۰۹۲/۵۶۴	ضریب انتقال حرارت همرفت جریان داخل لوله‌ها (Convection Heat transfer coefficient of flow inside the tubes)
d _i (m)	۰/۰۰۸	قطر داخلی لوله‌های گرمایی (Internal diameter of heat tubes)
L (m)	۰/۸	طول لوله‌های گرمایی (Length of heating tubes)
Re _o	۶۰۶۴۱	عدد رینولدز جریان خارج لوله‌ها (Reynolds number of outflow the tubes)
Pr _o	۰/۰۰۲	عدد پرانتل جریان خارج لوله‌ها (Prandtl number of outflow the tubes)
h _o (Wm ⁻² K ⁻¹)	۱۹۶۹۴/۹۳۷	ضریب انتقال حرارت همرفت جریان خارج لوله‌ها (Convection heat transfer coefficient of flow outside the tubes)
B (m)	۰/۰۲	فاصله بافل‌ها (The distance between the baffles)
D _s (m)	۰/۱	قطر پوسته (Shell diameter)
Pitch (m)	۰/۰۱۲	گام لوله‌های گرمایی (Heat tubes step)
U (Wm ⁻² K ⁻¹)	۲۶۱۵/۴۷۱	ضریب کلی انتقال حرارت (Overall heat transfer coefficient)
A (m)	۰/۰۲۵	سطح تبادل حرارتی (Heat exchange level)

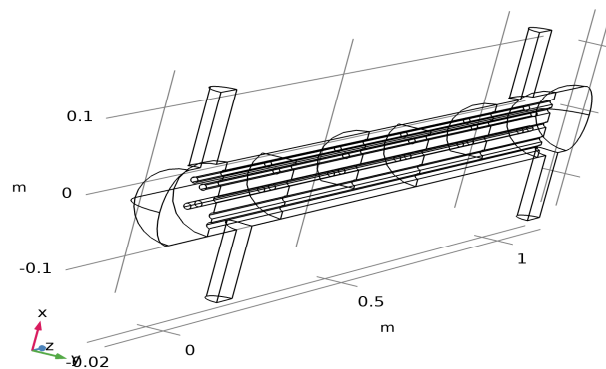
جدول ۲ - خواص ترموفیزیکی نانوذره و آب (سیال پایه)

Table 2- Thermophysical properties of nanoparticles and water (base fluid)

نوع ماده Material type	دانسیته Density (kg/m ³)	هدایت حرارتی Thermal conductivity (W/mk)	گرمای ویژه Specific Heat (J/kg k)	اندازه ذرات Particle size (nm)	رنگ Color
نانوذره آلومینا Alumina nanoparticles	۳۹۵۰	۴۲/۳۴	۷۷۳	۴۰-۵۰	سفید White
آب water	۹۹۷/۱۳	۰/۶۰۵	۴۱۷۹	-	-

به‌عنوان نقاط داده برای دما و جریان سیالات در طول شبیه‌سازی عددی عمل می‌کنند (شکل ۲). عناصر و گره‌های مش در سراسر تجهیزات با استفاده از ترکیب‌های مختلف روش‌های مش‌بندی خودکار موجود در برنامه پراکنده شدند. از آنجایی که جریان در این مطالعه آشفتگی است، اثرات تلاطم باید با استفاده از مدل‌سازی آشفتگی در نظر گرفته شود. انتخاب مدل آشفتگی در شبیه‌سازی CFD بسیار مهم است (۹، ۲۲). با این حال، هیچ معیار جهانی برای انتخاب مدل آشفتگی وجود ندارد. مدل آشفتگی مورد استفاده در یک مطالعه ممکن است در مطالعه دیگری کارایی نداشته باشد.

دینامیک سیالات محاسباتی و مش‌بندی مبدل حرارتی: پارامترهای طراحی مبدل حرارتی پوسته و لوله در جدول ۱ جهت مدل‌سازی سیستم درج گردیده است. همچنین، برای تجزیه و تحلیل ساده سمت پوسته و لوله‌ها فقط به‌عنوان استوانه‌های جامد مدل شده‌اند. رویکرد مدل‌سازی ساده شده امکان تجزیه و تحلیل پارامترهای ترموفیزیکی سمت پوسته را فراهم می‌کند، جایی که سیال در آن جریان دارد. این رویکرد از مدل‌سازی اوزدن و تئوری (۲۰۱۰) اقتباس شده است (۱۹). مش‌بندی محاسباتی با استفاده از پیش‌فرض Fine نرم‌افزار کامسول انجام شد (جدول ۲). عناصر مش برای کل مدل مخلوطی از سلول‌های چهاروجهی و شش‌وجهی هستند. این سلول‌ها



شکل ۲- نمای هندسی محاسبه و رسم شده جهت شبیه‌سازی

Figure 2- Geometric view calculated and drawn for simulation

جدول ۳- اطلاعات هندسه مبدل حرارتی جهت مش بندی

Table 3- Geometry information of heat exchanger for meshing

مقادیر	تعاریف
(Fluid dynamics) دینامیک سیالات	کالیبره کردن برای (Calibrate for)
۳	ابعاد فضا (Space dimension)
۲	تعداد دامنه ها (Number of domains)
۱۷۷	تعداد مرزها (Number of boundaries)
۴۰۲	تعداد گوشه ها (Number of edges)
۲۲۸	تعداد راس ها (Number of vertices)
۰/۰۰۷۶۵	بیشترین اندازه عنصر (Maximum element size)
۰/۰۰۱۴۴	کمترین اندازه عنصر (Minimum element size)
۰/۵	فاکتور انحناء (Curvature factor)
۰/۸	وضوح مناطق باریک (Resolution of narrow regions)
۱/۱۳	حداکثر نرخ رشد اندازه (Maximum element growth rate)
Fine	اندازه از پیش تعریف شده (Predefined size)

معادله (۱)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \rho U_2}{\partial x_2} + \frac{\partial \rho U_3}{\partial x_3} = 0$$

معادلات اندازه حرکت (مومنتوم): معادلات مومنتوم^۶

به عنوان معادلات ناویر استوکس شناخته می شوند که از قانون دوم نیوتن پیروی می کند یعنی تغییر در اندازه حرکت در هر جهت برابر مجموع نیروهای وارد در آن جهت است.

معادله (۲)

$$\rho \frac{D}{Dt}(u) = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \nabla^2(u)$$

$$\rho \frac{D}{Dt}(v) = \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \nabla^2(v)$$

$$\rho \frac{D}{Dt}(w) = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \nabla^2(w)$$

معادله انرژی: مهم ترین معادله که برای شبیه سازی دمای مبدل حرارتی استفاده می شود. معادله انرژی است. قانون بقای انرژی بیان می کند که تغییرات انرژی داخل سیال برابر با مجموع انرژی ها است.

معادلات حاکم بر جریان در مبدل حرارتی پوسته و

لوله: اکثر معادلات، پارامترها و مدل هایی که در این بخش مورد بحث قرار می گیرند، از مطالعات مختلف CFD مبدل های حرارتی پوسته و لوله اقتباس شده اند. در این مطالعه عددی^۹، مفروضات ساده سازی زیر اتخاذ شده است: جریان متلاطم و ثابت، مشخصات سرعت و دما یکنواخت در ورودی و سیال تراکم ناپذیر است. اتلاف ویسکوزیته نیز نادیده گرفته شد. معادلات حاکم بر جریان عبارتند از: معادلات پیوستگی، معادلات ناویر-استوکس و معادله انرژی. همه معادلات به وسیله یک حجم کنترل در سه بعد به دست می آید. سه مجهول سرعت، فشار ترمودینامیکی و دمای مطلق باید به طور هم زمان از معادلات اساسی ذیل استخراج شوند (۱۱، ۲۲، ۲۳).

معادله پیوستگی: معادله پیوستگی، بقاء جرم در یک سیستم است؛ یعنی نرخ افزایش جرم در یک سیستم برابر است با نرخ خالص ورود جرم به سیستم که معادله به صورت زیر نوشته می شود:

تجربی در طرف پوسته، با معادله اغتشاش مدل کا-اِپسیلین به‌دست آمد (۱). اوزدن و تاری (۲۰۱۰) به شبیه‌سازی یک مبدل حرارتی پوسته و لوله کوچک، با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی، برای سیال آب پرداختند. آن‌ها مدل‌های موجود آشفتگی را موردبررسی قرار دادند و دریافته‌اند که از میان مدل‌های اغتشاش موجود، مدل k-ε (معادله ۵) نتایج دقیق‌تری را از خود نشان می‌دهد (۱۹).

معادله (۵)

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-\rho I + K] + F$$

$$\rho \nabla \cdot u = 0$$

$$k = (\mu + \mu_T)(\nabla_u + (\nabla u)^T)$$

$$\rho(U \cdot \nabla)K = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_K} \nabla_K \right) \right] + P_K - \rho \varepsilon$$

$$\rho(U \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \nabla_\varepsilon \right) \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{K} P_K - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{K}$$

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon}$$

$$P_K = \mu_T \left[\nabla_u : (\nabla_u + (\nabla u)^T) \right]$$

یافتن خواص ترموفیزیکی نانوسیال: خواص ترموفیزیکی نانوسیال باید قبل از مطالعه خصوصیات انتقال حرارت همرفتی محاسبه شود. از معادلات جدول ۴ که پرکاربردترین معادلات برای یافتن نتایج خواص ترموفیزیکی مواد است، استفاده گردید (۱۲، ۲۳، ۱۵).

معادله (۳)

$$\frac{\partial(h_m)}{\partial t} = -U_j \frac{\partial(h_m)}{\partial x_j} + P \frac{\partial U_i}{\partial x_i} - \frac{\partial(PU_i)}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} U_i) - \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \rho g U_i$$

آخرین ترم در معادله کار انجام‌شده توسط نیروی گرانش است. به‌طور مشابه، برای به تعادل رسیدن حرارت، می‌توان منبع حرارتی را اضافه نمود و ساده‌سازی نمود (۲۰، ۲۳).

معادله (۴)

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} = -U_j \frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial x_j} + k_{eff} \frac{\partial^2 T}{\partial x_j \partial x_j} - P \frac{\partial U_j}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial U_k}{\partial x_j}$$

معادله آشفتگی: مدل کا-اِپسیلین استاندارد یا

Standard k-ε Model یک مدل بر اساس مدل معادلات انتقال برای انرژی جنبشی آشفته (K) و نرخ اتلاف آن (ε) است. معادله انتقال برای انرژی جنبشی آشفته از معادله دقیق مشتق شده است، درحالی‌که معادله انتقال برای نرخ اتلاف (اِپسیلین) با استفاده از استدلال فیزیکی و شباهتی به همتای ریاضی دقیق آن به دست آمد. در به دست آوردن مدل کا-اِپسیلین استاندارد فرض بر این است که جریان کاملاً آشفته است و اثرات لزجت مولکولی قابل‌اغماض است؛ بنابراین مدل کا-اِپسیلین استاندارد تنها برای جریان‌های کاملاً متلاطم معتبر است (۹، ۲۲). رحمن (۲۰۱۲) شبیه‌سازی مبدل حرارتی پوسته و لوله را انجام داد و نتایج به‌دست آمده را با نتایج آزمایشگاهی مورد تطبیق قرار داد. وی دریافت که نزدیک‌ترین اطلاعات به‌دست آمده از شبیه‌سازی به اطلاعات

جدول ۴- معادلات ریاضی به کار برده شده جهت یافتن خواص ترموفیزیکی نانوسیالات

Table 4- Mathematical equations used to find the thermophysical properties of nanofluids

خواص ترموفیزیکی	مدل‌های ریاضی	همبستگی
ویسکوزیته (viscosity)	Einstein	$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{ref}} = 1 + 2.5\phi$
	Pak and Cho	$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{ref}} = 1 + 2.5\phi + 6.2\phi^2$
	Gherasim	$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{ref}} = 0.904e^{14.8\phi}$
	Brickman	$\frac{\Delta p}{L} = \frac{128}{\pi} \cdot \frac{\mu Q}{D_c^4}$
	Wang	$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{ref}} = (1 + 7.3\phi + 123\phi^2)$
دانشیه (density)	Xuan and Roetzel model	$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_p$
	Maxwell	$\frac{k_{eff}}{k_{ref}} = \frac{2k_{ref} + k_p + 2\phi(k_p - k_{ref})}{2k_{ref} + k_p - \phi(k_p - k_{ref})}$
هدایت حرارتی (Thermal conductivity)	Hamilton & crosser	$\frac{k_{eff}}{k_{ref}} = \frac{(n+1)k_{ref} + k_p - (n-1)\phi(k_{ref} - k_p)}{(n+1)k_{ref} + k_p + \phi(k_{ref} - k_p)}$
	Buongiorno model	$\frac{k_{eff}}{k_{ref}} = 1 + 2.92\phi - 11.99\phi^2$
	Timofeeva model	$\frac{k_{eff}}{k_{ref}} = 1 + 2.92\phi - 11.99\phi^2$
گرمای ویژه (Specific Heat)	Pak and Cho	$Cp_{nf} = \frac{(1 - \phi)(\rho Cp)_{bf} + \phi(\rho Cp)_{np}}{(1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_{np}}$
افت فشار (Pressure drop)	Darcy-Weisbach	$\frac{\Delta p}{L} = \frac{128}{\pi} \cdot \frac{\mu Q}{D_c^4}$

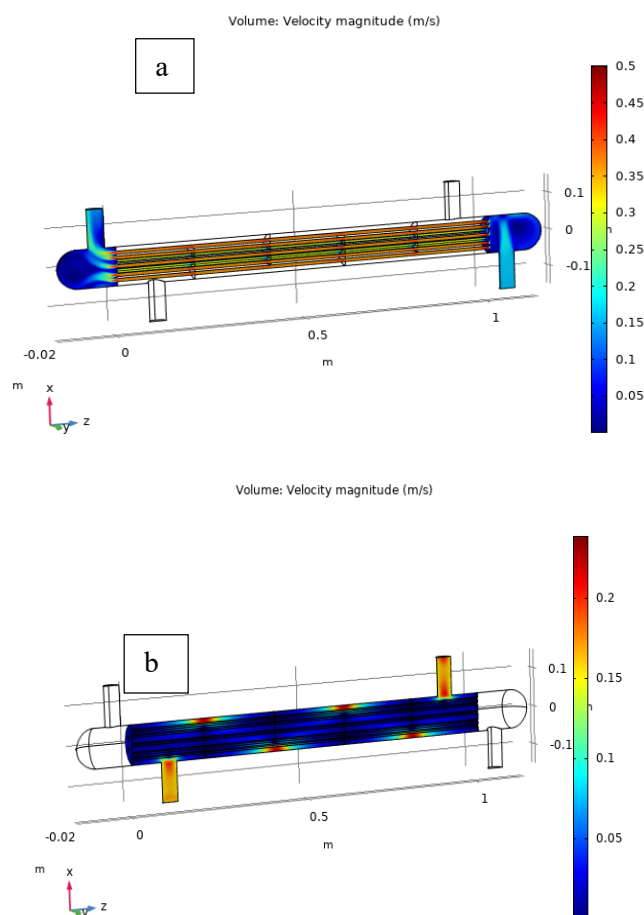
بوجود می‌آید و نسبت به قبل از محیط بافل که سیال پیوسته در حال حرکت است زودتر گرم می‌شود. کیم و همکاران (۲۰۱۸)، اوزدن و همکاران (۲۰۱۰)، با مطالعه‌ی تجربی و عددی که بر روی انتقال حرارت در مبدل حرارتی پوسته و لوله داشتند به نتایج مشابهی دست یافتند (۳، ۱۹). شکل ۳ a و b کانتورهای شبیه‌سازی شده جریان سیال در مبدل حرارتی پوسته و لوله است. وقتی سیال وارد پوسته می‌شود با لوله‌ها برخورد کرده، جریان دچار پاشش شده و از یکدیگر جدا می‌شود و حالت چرخش جریان در این ناحیه

نتایج و بحث

الگوی جریان و سرعت در مبدل حرارتی پوسته و لوله: با توجه به این که نوع جریان حاضر در مبدل حرارتی برحسب محاسبه عدد رینولدز آشفته می‌باشد (جدول ۱) کلیه محاسبات مهندسی از معادلات جریان آشفته پیروی می‌کند. با دقت در سرعت جریان مشاهده می‌گردد که جریان وقتی از بافل عبور می‌کند و وارد ناحیه بعدی می‌شود یک منطقه از سیال ساکن در پشت بافل ایجاد می‌شود که در این منطقه به دلیل ساکن بودن سیال، زمان بیشتری برای تبادل حرارت

توزیع سرعت به صورت نمای جانبی نشان داده شده است. تغییرات سرعت در پوسته بسیار ناچیز است و در بیشتر مناطق پوسته سرعت طبق محاسبات عددی حدود $0/05$ متر بر ثانیه است، ولی در نقاط برخورد جریان با بافل‌ها و ورودی و خروجی مقادیر متفاوت و بین $0/15$ تا $0/2$ متر بر ثانیه است. از نتایج عددی، اشاره می‌شود که مقادیر سرعت در مجاورت دیواره‌ها بسیار کم است که به دلیل وجود گرادیان قوی اصطکاک است (۳، ۶).

اتفاق می‌افتد. از مسیر خطوط جریان در کانتورهای مربوطه می‌توان مشاهده کرد که برخی از خطوط مسیر بیشتر یا کمتر به طور پراکنده به جلو حرکت می‌کنند. بافل‌های موجود در سمت پوسته همانند مانع عمل نموده و باعث مغشوش شدن جریان می‌شوند و در نقاط برخورد با بافل به دلیل باریک شدن مجرای ورودی سرعت افزایش و دوباره بعد از عبور به دلیل بزرگ شدن مجرا سرعت کاهش می‌یابد که به دلیل تفاوت در مجرای ورودی و افزایش ناگهانی فشار دینامیکی سیال است (۳، ۶). در شکل ۳ a کانتور



شکل ۳- کانتور سرعت سیال سمت پوسته (a)، کانتور سرعت سیال سمت لوله (b)

Figure 3 - velocity contour of the shell side (a); velocity contour of the tube side (b)

از هم پاشیده می‌شود و به قسمت ورودی لوله‌ها هدایت و سیال بین لوله‌ها تقسیم و درون لوله‌ها جریان پیدا می‌کند. طبق نوار رنگی راهنما شکل ۳ b

طبق شکل ۳ b کانتور الگوی جریان سمت لوله به این صورت است که جریان ورودی به لوله پس از تماس با صفحه پخش‌کننده جریان در قسمت ورودی

توزیع سرعت در مقادیر بین ۰/۰۵ تا ۰/۵ متر بر ثانیه است و همگرایی در جریان داخل لوله‌ها غیر مناطق ورودی و خروجی دیده می‌شود. همان‌طور که در شکل مشخص است بیشترین سرعت سیال در قسمت ورودی لوله است و در قسمت خروجی لوله سرعت سیال افت می‌کند. در بررسی که بر روی نقش غلظت نانوذرات در رفتار انتقال حرارت نانوسیال $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ آب در یک مبدل حرارتی لوله متحدالمرکز تحت شرایط جریان آشفته داشتند، به این نتیجه رسیدند که افزایش عدد رینولدز و غلظت نانوذرات منجر به افزایش قابل توجهی در عدد ناسلت و ضرایب انتقال حرارت شد (۲۴).

الگوی توزیع دما: نتایج شبیه‌سازی حاصل از مدل‌های کامسول با داده‌های تجربی برای تأیید اعتبار آن مقایسه شد. جدول ۵ مقایسه بین دماهای پیش بینی شده جریان سیال را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی وجود دارد. توزیع دما در شکل‌های ۴ a و b در طول مبدل حرارتی از طریق نمای جانبی و با توجه به نمودار رنگی سمت راست نمایان است. شکل ۴ a و b تغییرات دما در طول مبدل حرارتی برای سیال پایه و نانوسیال سمت لوله است. تصاویر مربوطه گویای آن است که انتقال حرارت در سراسر طول مبدل یکنواخت نیست. تغییرات درجه حرارت در جهت جریان برای سیال سمت لوله را می‌توان با خطوط جریان با رنگ‌های مختلف نشان داده شده تجسم کرد. کاهش درجه حرارت در جهت جریان قابل مشاهده است. در بررسی کانتور مربوطه، مشاهده می‌شود که در ورودی پوسته دما تقریباً ثابت و تغییر رنگ چندانی ندارد و بعد از آن تغییر رنگ از فاصله حدود ۴۰ سانتی‌متر از نقطه ورود شروع شده که نشان‌دهنده افت دما در این ناحیه بوده و بیشترین تبادل حرارت در این ناحیه

اتفاق می‌افتد و دما در فاصله حدود ۴۰ سانتی‌متر باقی‌مانده به خروجی لوله، تقریباً ثابت مانده و در نهایت جریان از لوله خارج می‌شود. همچنین نمایان است برای تمامی نانوسیالات در تمامی مقادیر عدد رینولدز، ضریب انتقال حرارت بیشتر از سیال پایه است (۳، ۶، ۲۵، ۲۶). در تصاویر مشاهده می‌شود که صرف‌نظر از سیال مورد استفاده، حرارت‌دهی تا حدود ۴۰ سانتی‌متر از مبدل حرارتی یکنواخت است که در آن یک گرادیان دما بوجود می‌آید. اگرچه در صورت مقایسه خطوط دمایی آب و نانوسیال، تفاوت آشکار وجود ندارد، اما دمای توده نانوسیال در واقع بالاتر از دمای توده آب است.

تفاوت ترکیب سیال شکل ۴ a و b در مقدار نانوذره موجود در سیال پایه است که در شکل a سیال مربوطه آب است ولی در شکل b سیال پایه با ترکیب چهار درصد نانوذره است. با توجه به جدول شماره ۵ و داده‌های به‌دست‌آمده از نرم‌افزار کامسول دمای ورودی در کانتور شماره ۴ a و b، $353/15$ درجه کلونین است ولی دمای میانگین خروجی به ترتیب، $307/15$ و $308/05$ درجه کلونین است. تفاوت مشاهده شده به دلیل تفاوت در ترکیب سیال حرارتی است. استفاده از نانوذره آلومینا در سیال پایه به مقدار ۴ درصد باعث افزایش $0/9$ درجه کلونین دمای میانگین خروجی در یک سیکل گذر از سیستم شد که با تکرار این سیکل افزایش دما مشهودتر می‌شود. به‌طورکلی ضریب انتقال حرارت جابجایی را می‌توان متناسب با k/δ_t دانست که k و δ_t به ترتیب هدایت حرارتی و ضخامت لایه مرزی حرارتی می‌باشند (۲۲، ۲۳، ۲۷). با افزایش درصد نانوذره در سیال پایه و به تبع آن افزایش هدایت حرارتی طبق معادلات مربوطه در جدول ۴، ضریب انتقال حرارت جابجایی نیز افزایش می‌یابد. این علت توسط محققان مختلفی از جمله کرووز و همکاران (۲۰۲۲) و هی و همکاران

افزایش می‌دهد که منجر به افزایش نرخ تبادل انرژی و در نتیجه بالارفتن نرخ انتقال حرارت بین سیال و دیواره می‌شود. به عبارت دیگر، افزایش غلظت نانوذرات مکانیسم‌های مرتبط با افزایش انتقال حرارت را تشدید می‌کند (۲۲، ۲۶ و ۳۱).

(۲۰۰۷) به منظور توجیه افزایش ضریب انتقال حرارت نیز بیان شده است (۱۴، ۲۸). ایزدی و همکاران (۲۰۰۹) و بیانکو و همکاران (۲۰۰۹) نیز پی بردند که با افزایش درصد نانوذره، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد (۲۹، ۳۰). افزایش غلظت حجمی نانوذرات برهمکنش و برخورد میان نانوذرات را

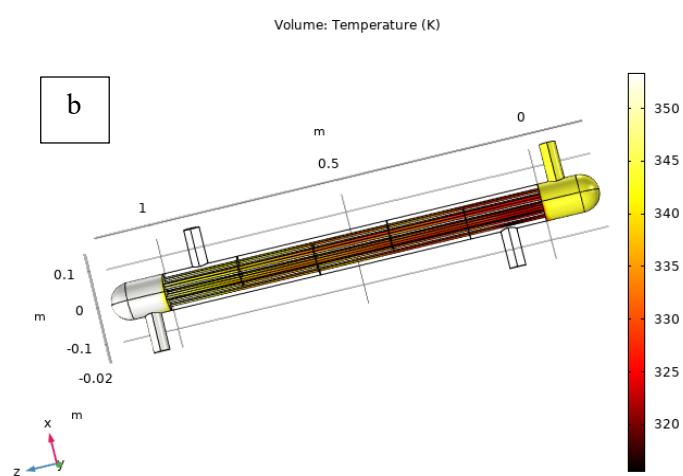
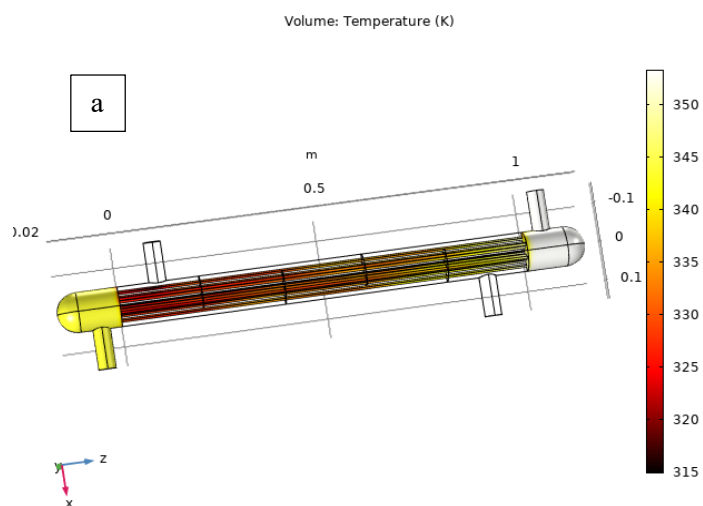
جدول ۵- نتایج حاصله از محاسبات عددی و تجربی در یک سیکل گذر از مبدل حرارتی

Figure 5- Results from numerical and experimental calculations in a heat exchanger passage cycle

سیال عامل	دمای میانگین خروجی سمت لوله (درجه کلونین) The mean outlet temperature of the tube side	دمای میانگین خروجی سمت پوسته (درجه کلونین) The mean outlet temperature of the shell side	دمای ورودی سمت پوسته (درجه کلونین) Inlet temperature of the shell side	دمای ورودی سمت لوله (درجه کلونین) Inlet temperature of the tube side
آب (Water)				
محاسبات عددی	۳۰۷/۱۵	۳۴۳/۷۳	۲۹۸/۱۵	۳۵۳/۱۵
محاسبات تجربی	۳۰۶/۱۲	۳۴۳/۱۱	۲۹۸/۲۵	۳۵۳/۲
آب/آلومینا (۴ درصد) (water/alumina)				
محاسبات عددی	۳۰۸/۰۵	۳۴۳/۹۴	۲۹۸/۱۵	۳۵۳/۱۵
محاسبات تجربی	۳۰۶/۹۶	۳۴۳/۳۶	۲۹۸/۳	۳۵۳/۳۵

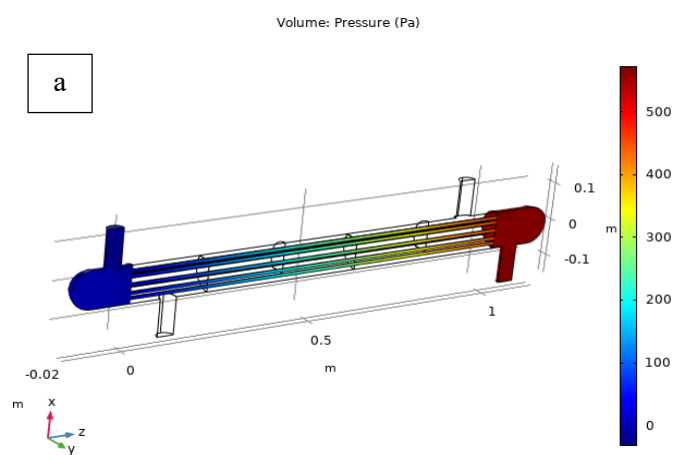
پاسکال است که با گذر جریان به مراتب کاهش یافته و در محدوده خروجی لوله که با رنگ آبی در شکل نمایان است، صفر در نظر گرفته می‌شود. تأثیرات نامطلوب استفاده از غلظت‌های بالاتر نانوسیال، افزایش افت فشار ناشی از آن است (۲۲، ۲۳). روند واضحی را می‌توان در شکل مشاهده کرد که در آن افزایش ذرات معلق و عدد رینولدز به طور قابل توجهی افت فشار را افزایش می‌دهد. عامل اصلی دیگر برای مشاهدات مذکور، ویسکوزیته بالاتر نانوسیال در استفاده از درصدهای بالای نانوذره است. افزایش افت فشار طبق معادلات موجود در جدول ۵ نسبت مستقیمی با ویسکوزیته دینامیکی دارد که با افزایش آن افت فشار نیز افزایش می‌یابد (۱۲).

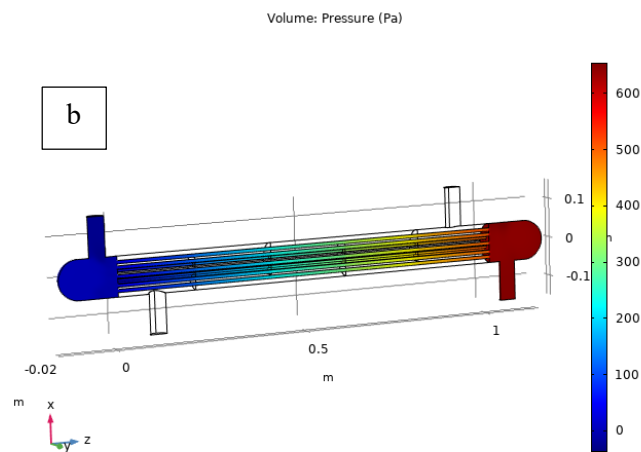
بررسی مقدار افت فشار در مسیر جریان: پروفیل فشار در مبدل حرارتی پوسته و لوله در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در پروفیل فشار مشاهده می‌شود، هنگامی که جریان سیال گرم یا سرد از مبدل حرارتی پوسته و لوله عبور می‌کند، فشار کاهش می‌یابد. این یافته با پژوهش‌های کیا و همکاران (۲۰۲۰)، جعفری و همکاران (۲۰۱۷) مطابقت دارد (۱۰، ۱۱). بررسی نتایج افت فشار نشان می‌دهد افت فشار نانوسیالات به مراتب بیشتر از سیال پایه است. با توجه به شکل ۵ افت فشار در محدوده بین رنگ آبی و قهوه‌ای مشاهده می‌شود. افت فشار در منطقه ورودی نانوسیال نسبت به ورودی سیال پایه در شکل ۵ b بیشتر است. فشار نسبی ورودی در محدوده ۶۰۰



شکل ۴- کانتور دما (سیال پایه: آب) (a)، کانتور دما (نانوسیال) (b)

Figure 4- temperature contour (basefluid: water) (a); temperature contour (nanofluid) (b)





شکل ۵- کانتور افت فشار (سیال پایه: آب) (a)، کانتور افت فشار (نانوسیال) (b)

Figure 5 - pressure drop contour (basefluid: water) (a); pressure drop contour (nanofluid) (b)

بر ثانیه است، ولی در نقاط برخورد جریان با بافل‌ها و ورودی و خروجی مقادیر متفاوت و بین $0/15$ تا $0/2$ متر بر ثانیه است. طبق نوار رنگی راهنما شکل ۳ در قسمت لوله توزیع سرعت در مقادیر بین $0/05$ تا $0/5$ متر بر ثانیه است و همگرایی در جریان داخل لوله‌ها غیر مناطق ورودی و خروجی دیده می‌شود. استفاده از نانوذره آلومینا در سیال پایه به مقدار ۴ درصد باعث افزایش $0/9$ درجه کلون دمای میانگین خروجی در یک سیکل گذر از سیستم شد که با تکرار این سیکل افزایش دما بیشتر و بیشتر می‌شود. با توجه به کانتور افت فشار، افت فشار نانوسیالات به مراتب بیشتر از سیال پایه بوده و با افزایش غلظت نانو سیال افت فشار افزایش می‌یابد که به دلیل تصادم بیشتر و افزایش ویسکوزیته است.

نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی مبدل حرارتی با نرم‌افزار کامسول با نتایج تجربی مقایسه گردید که شرایط قابل قبول با داده‌های تجربی را دارد. بررسی الگوی جریان در این مبدل حرارتی مشخص گردید که در مناطق ورودی جریان دچار گسستگی شده و از یکدیگر جدا و در جهت جریان تغییر اتفاق می‌افتد. نتایج حاصله از کانتورهای دما، سرعت و افت فشار نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات به سیال می‌تواند به‌طور مؤثری نسبت رسانایی حرارتی سیال را افزایش دهد و کسر وزنی و دمای نانوذرات افزوده شده با نسبت هدایت حرارتی رابطه مستقیم دارد. تغییرات سرعت در پوسته بسیار ناچیز است و در بیشتر مناطق پوسته سرعت طبق محاسبات عددی حدود $0/05$ متر

References

1. Rehman, U. U. 2012. Heat transfer optimization of shell-and-tube heat exchanger through CFD studies (Master's thesis).
2. Jafari, S. M., Saramnejad, F., and Dehnad, D. 2018. Designing and application of a shell and tube heat exchanger for nanofluid thermal processing of liquid food products. *Journal of food process engineering*. 41: 3.e12658.
3. Kim, S., Song, H., Yu, K., Tserengombo, B., Choi, S. H., Chung, H., ... and Jeong, H. 2018. Comparison of CFD simulations to experiment for heat transfer characteristics with aqueous Al₂O₃ nanofluid in heat exchanger tube. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 95: 123-131.

4. Farajollahi, B., Etemad, S. G., and Hojjat, M. 2010. Heat transfer of nanofluids in a shell and tube heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 53: (1-3).12-17.
5. Fuskele, V., and Sarviya, R. M. 2017. Recent developments in nanoparticles synthesis, preparation and stability of nanofluids. *Materials Today: Proceedings*. 4: 2.4049-4060.
6. Gupta, S. K., Verma, H., and Yadav, N. 2022. A review on recent development of nanofluid utilization in shell & tube heat exchanger for saving of energy. *Materials Today: Proceedings*. 54: 579-589.
7. Bahiraei, M. 2014. A comprehensive review on different numerical approaches for simulation in nanofluids: traditional and novel techniques. *Journal of dispersion science and technology*. 35: 7. 984-996.
8. Eastman, J.A., Choi, S., Li, S., Yu, W., and Thompson, L. 2001. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. *Applied physics letters*. 78: 6.718-720.
9. Murshed, S., Leong, K., and Yang, C. 2008. Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids. *International journal of thermal sciences*. 47: 5.560-568.
10. Jafari, S. M., Saremnejad, F., Dehnad, D., and Rashidi, A.M. 2017. Evaluation of performance and thermophysical properties of alumina nanofluid as a new heating medium for processing of food products. *Journal of Food Process Engineering*. 40: 5.e12544.
11. Kia, S.M., Nobakhti, M.H., and Khayat, M. 2020. Experimental investigation on heat transfer and pressure drop of Al₂O₃-base oil nanofluid in a helically coiled tube and effect of turbulator on the thermal performance of shell and tube heat exchanger. *Journal of Energy Conversion*. 7: 3.61-80 (in persian)
12. Teng, T.-P., Hung, Y.-H., Teng, T.-C., Mo, H.-E., and Hsu, H.-G. 2010. The effect of alumina/water nanofluid particle size on thermal conductivity. *Applied Thermal Engineering*. 30: (14-15). 2213-2218.
13. Nguyen, C., Desgranges, F., Galanis, N., Roy, G., Maré, T., Boucher, S., and Mintsa, H. A. 2008. Viscosity data for Al₂O₃-water nanofluid—hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable? *International journal of thermal sciences*. 47: 2.103-111.
14. He, Y., Jin, Y., Chen, H., Ding, Y., Cang, D., and Lu, H. 2007. Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 50: (11-12).2272-2281.
15. Jafari, S. M., Saremnejad, F., and Dehnad, D. 2017. Nano-fluid thermal processing of watermelon juice in a shell and tube heat exchanger and evaluating its qualitative properties. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 42: 173-179.
16. Youcef, A., and Saim, R. 2019. Computational analysis of turbulent flow and thermal transfer in a shell and tube heat exchanger. *Int. J. Heat Technol*. 37: 4.1043-1051.
17. Ding, Y., Alias, H., Wen, D., and Williams, R. A. 2006. Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49: (1-2).240-250.
18. Somasekhar, K., Rao, K. M., Sankararao, V., Mohammed, R., Veerendra, M., and Venkateswararao, T. 2018. A CFD investigation of heat transfer enhancement of shell and tube heat exchanger using Al₂O₃-water nanofluid. *Materials Today: Proceedings*. 5: 1.1057-1062.
19. Ozden, E., and Tari, I. 2010. Shell side CFD analysis of a small shell-and-tube heat exchanger. *Energy Conversion and Management*. 51: 5.1004-1014.
20. Wen, D., and Ding, Y. 2004. Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 47: 24.5181-5188.
21. Pryor, R.W. 2009. *Multiphysics modeling using COMSOL®: a first principles approach*. Jones & Bartlett Publishers.

22. Paul, G., Philip, J., Raj, B., Das, P. K., and Manna, I. 2011. Synthesis, characterization, and thermal property measurement of nano-Al₁₉₅Zn₀₅ dispersed nanofluid prepared by a two-step process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 54: (15-16).3783-3788.
23. Cordioli, M., Rinaldi, M., Copelli, G., Casoli, P., and Barbanti, D. 2015. Computational fluid dynamics (CFD) modelling and experimental validation of thermal processing of canned fruit salad in glass jar. *Journal of Food Engineering*. 150: 62-69.
24. Khalifa, A. J. N., and Banwan, M. A. 2015. Effect of volume fraction of γ -Al₂O₃ nanofluid on heat transfer enhancement in a concentric tube heat exchanger. *Heat Transfer Engineering*. 36: 16.1387-1396.
25. Kumar, N., Sonawane, S.S., and Sonawane, S.H. 2018. Experimental study of thermal conductivity, heat transfer and friction factor of Al₂O₃ based nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 90: 1-10.
26. Meikandan, M., Sundarraj, M., Yogaraj, D., and Malarmohan, K. 2020. Experimental and numerical investigation on bare tube cross flow heat exchanger-using COMSOL. *International Journal of Ambient Energy*. 41: 5.500-510.
27. Jafari, S. M., Jabari, S. S., Dehnad, D., and Shahidi, S. A. 2017. Heat transfer enhancement in thermal processing of tomato juice by application of nanofluids. *Food and Bioprocess Technology*. 10: 2.307-316.
28. Cruz, P.A.D., Yamat, E.J.E., Nuqui, J.P.E., and Soriano, A.N. 2022. Computational Fluid Dynamics (CFD) Analysis of the Heat Transfer and Fluid Flow of Copper (II) Oxide-Water Nanofluid in a Shell and Tube Heat Exchanger. *Digital Chemical Engineering*. 18:100014.
29. Izadi, M., Behzadmehr, A., and Jalali-Vahida, D. 2009. Numerical study of developing laminar forced convection of a nanofluid in an annulus. *International journal of thermal sciences*. 48: 11. 2119-2129.
30. Bianco, V., Chiacchio, F., Manca, O., and Nardini, S. 2009. Numerical investigation of nanofluids forced convection in circular tubes. *Applied Thermal Engineering*, 29: 17-18.3632-3642.
31. Skočilas, J., and Palaziuk, I. 2015. CFD simulation of the heat transfer process in a chevron plate heat exchanger using the SST turbulence model.

