



Geometric and Flow Parameters effects on the Efficiency of a Shell-and-Coil Heat Exchanger with Nanofluids

Saeid Hashemi Hashjin¹, Ali Akbar Abbasian Aran^{2*} 

¹ PhD Student, University of Kashan, Kashan, Iran. Email: saeedhashemi0072@gmail.com

² Professor, University of Kashan, Kashan, Iran (*Correspondence: abbasin@kashanu.ac.ir)

HIGHLIGHTS

- Decreasing helical pitch in the coil leads to an increase in heat transfer coefficient and Nusselt number.
- Water/Titanium oxide nanofluid results in a significant improvement in thermal performance.
- The combination of nanofluid and optimal geometric design (decreasing helical pitch) enhances thermal efficiency.
- The necessity of optimal design based on operating conditions

RTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 18 November 2025

Revised: 28 December 2025

Accepted: 21 January 2026

Available online: 20 February 2026

Keywords:

Shell-and-coil Heat exchanger;

Numerical simulation;

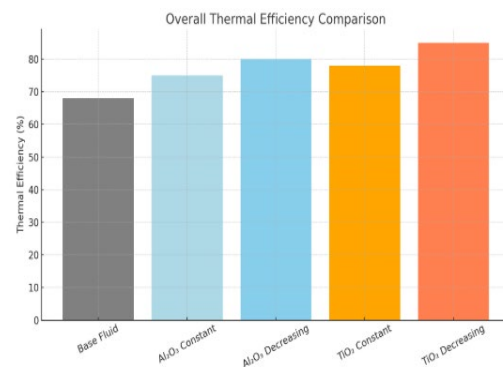
Decreasing pitch;

Thermal performance;

TiO₂-water nanofluid;

Al₂O₃-water nanofluid

GRAPHICAL ABSTRACT



Overall thermal efficiency diagram for different fixed and decreasing step modes in different nanofluid types

ABSTRACT

Shell-and-tube heat exchangers are among the most used thermal devices. Owing to their curved configuration, offer superior characteristics. Recently, nanofluids have gained significant attention due to their enhanced thermophysical properties. This study presents a comprehensive investigation on the influence of geometric and flow parameters on the thermal performance employing nanofluids. A three-dimensional computational model featuring a decreasing helical pitch in both horizontal and vertical directions was developed and compared with conventional constant-pitch configurations. Key thermal-hydraulic parameters, including the Nusselt number, pressure drop, heat transfer coefficient, and overall thermal efficiency, were analyzed using ANSYS Fluent. The findings demonstrate that the use of a decreasing helical pitch can enhance the Nusselt number and heat transfer coefficient by approximately 15–20%, while the associated pressure drop increases only by 5–8%. Furthermore, employing TiO₂-water nanofluid improved the overall thermal efficiency by up to 12% compared with the base fluid. These results confirm that integrating an optimized helical geometry with suitable nanofluids can substantially improve the heat transfer performance of shell-and-coil heat exchangers, offering valuable insights for energy-efficient industrial design.

Cite this article: Hashemi Hashjin S, Abbasian Aran A ◊ A. Geometric and Flow Parameters effects on the Efficiency of a Shell-and-Coil Heat Exchanger with Nanofluids. Fluid Mechanics & Aerodynamics. 2026;14(2): 149- 166

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1404.14.2.9.4>

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein Comprehensive University.



1. Introduction

With the continuous advancement of industrial sectors and the increasing global demand for energy, improving the performance of heat transfer equipment has become increasingly important. Among the various types of heat transfer systems, shell and tube heat exchangers are the most widely used due to their robust design, high thermal efficiency, and operational reliability. In particular, shell and tube heat exchangers with spiral coils, due to their distinctive geometry, provide improved fluid mixing and higher heat transfer coefficients than conventional straight tube exchangers.

1-1 Nanofluids as a passive method

One of the most effective passive techniques for improving heat transfer performance is the use of nanofluids. Nanofluids are engineered colloidal suspensions in which very small nanoparticles (typically smaller than 100 nm) are uniformly dispersed in a conventional base fluid such as water, ethylene glycol, or oil. Their addition significantly improves the thermophysical properties of the base fluid—in particular, thermal conductivity, convective heat transfer coefficient, and energy transfer efficiency—without requiring additional mechanical energy input.

1-2 Review of previous research

Most studies have confirmed that nanofluids significantly enhance convective heat transfer; however, increasing the concentration of nanoparticles may result in higher viscosity and pressure drop, which requires careful optimization. Rajhi et al. (2025) investigated the combined effect of external helical fins and hybrid nanofluids on the thermal performance of shell-and-coil exchangers and showed that this hybrid configuration can significantly improve heat transfer [1]. Similarly, Hassan et al. (2025) experimentally studied hybrid nanofluids consisting of MWCNT and Al_2O_3 nanoparticles in a shell-and-tube exchanger and reported a significant increase in the convective heat transfer rate compared to single-component nanofluids [2]. In addition, Bakak et al. (2022) numerically investigated the flow of hybrid nanofluids in a conical spiral coil exchanger and reported that changing the coil geometry improves fluid mixing and heat transfer, although it is accompanied by a slight increase in pressure drop [3]. In (2020), Nidal et al. analyzed the thermal and hydraulic performance of cross-sectional spiral coil heat exchangers as a new type of exchanger [4]. In (2020), Dan Zheng et al. investigated the performance of a plate heat exchanger using different nanofluids. The results showed that both the heat transfer rate and pressure drop for nanofluids increased significantly compared to the base fluid [5].

1-3 Research and study objectives

Although several studies have investigated different coil geometries, most of them have been limited to fixed-pitch configurations, while the effect of variable or decreasing pitch on thermo-hydraulic performance has been insufficiently addressed. Changes in the helical pitch can significantly alter the secondary flow patterns and fluid mixing intensity, which in turn affect the heat transfer enhancement and pressure drops. Therefore, this study aims to numerically investigate the combined effect of geometric and flow parameters, with an emphasis on decreasing helical pitch designs, on the thermal performance of shell-and-coil heat exchangers using TiO_2 and Al_2O_3 nanofluids.

2. Research Problem Statement and Objectives

Due to their special design, coiled shell and tube heat exchangers can provide better heat transfer than conventional exchangers. The use of nanofluids, especially Titanium oxide and aluminum oxide nanofluids, is one of the effective solutions for increasing the heat transfer coefficient, as they offer improved thermal properties. However, the combination of geometric factors such as spiral pitch and flow parameters with nanofluids has not yet been fully investigated. Also, most of the existing studies are mainly limited to exchangers with a fixed spiral pitch, and the effect of decreasing spiral pitches in the horizontal and vertical directions on the thermal performance of such exchangers has not been comprehensively analyzed. Therefore, the main problem of the present study is to identify and analyze the interaction effect of geometric parameters and flow conditions on the thermal efficiency of a shell-and-tube coil heat exchanger with Titanium oxide nanofluid; which can play a significant role in the optimal design of exchangers. The main objectives of this study are: 1) Numerical investigation of the effect of decreasing spiral pitch in horizontal and vertical directions on heat transfer and pressure drop of the exchanger. 2) Comparison of the results of the model with decreasing spiral pitch with models with fixed pitch in the presence of aluminum oxide nanofluid.

3. Research Method

A three-dimensional numerical model was simulated and its results were compared with the results of previous constant pitch findings. The steps of the research are as follows:

3-1- Heat exchanger geometric model

The geometric model includes a shell-and-tube heat exchanger with a spiral coil, which has two spiral pitch modes: constant pitch and decreasing spiral pitch in the horizontal and vertical directions. The main dimensions such as tube diameter, coil diameter, exchanger length and parameters related to the spiral pitch are defined according to the reference conditions.

3-2- Boundary conditions and flow parameters

Tube side (inside the coil): The nanofluid flow is introduced uniformly with a specified mass flow rate and the flow is considered turbulent (Reynolds number in the range of 6000 to 14000). Shell side: The secondary fluid flow (water) is in specified thermal and flow conditions. The hot fluid is inside the coil and the cold fluid is inside the shell (water). The inlets and outlets of the tube and shell have known flow parameters. The inlet temperatures, wall conditions and other boundary conditions (such as all internal coil walls being thermally insulated) are simulated according to actual or hypothetical conditions.

3-4- Physical models and governing equations

The governing equations include the conservation of mass, momentum, and energy equations for fluid and nanofluid flow, which are solved in three dimensions and in the steady state. The Realizable k- ϵ turbulence model is used, and the physical properties of nanofluid are defined as a function of concentration and temperature. Homogeneous models are used to model the properties of nanofluid.

3-5- Numerical solution method

The simulations are performed using Ansys Fluent software. The meshing of the solution domain includes precise and optimized meshing (mesh type: polyhedral) to increase the accuracy of the results and reduce the calculation time. In Ansys Fluent, the polyhedral mesh is created using Mosaic Meshing technology, which allows the

combination of polyhedral, hexagonal, and boundary layer elements (Wall Inflation) in an automatic and optimal manner.

3-3- Graphs and analysis of results

In Fig. 1, the heat transfer coefficient of the coil is investigated in terms of Reynolds number for water fluid with constant pitch, water fluid with variable pitch, and water/Titanium oxide fluid. The surface heat transfer coefficient for all cases increases significantly with increasing Reynolds number, which is proportional to the increase in turbulence and boundary layer strengthening. The water/Titanium oxide nanofluid with variable pitch has the highest surface heat transfer coefficient. Compared to water with variable pitch, it has a higher surface heat transfer coefficient than water with fixe pitch, which indicates the role of coil geometry in increasing mixing and convection. In Fig. 2, the thermal efficiency of the coil for water fluid with constant pitch, water fluid with variable pitch and water/Titanium oxide fluid is investigated. With increasing Reynolds number, the efficiency (ϵ) decreases for all fluids. This behavior indicates a change in the hot/cold flow ratios and a decrease in the effective mean temperature difference or a change in the effective heat transfer function with increasing velocity. (In coil systems, sometimes an increase in Reynolds number affects the efficiency behavior nonlinearly.) At all Reynolds number values, the water/Titanium oxide nanofluid shows the highest efficiency, followed by water with variable pitch and finally water with fixed pitch. That is, both the variable pitch and the addition of nanoparticles cumulatively increase the efficiency. The distance between the curves decreases or increases with changing Reynolds number, meaning that the relative effect of nanofluid and geometry is different at different Reynolds numbers.

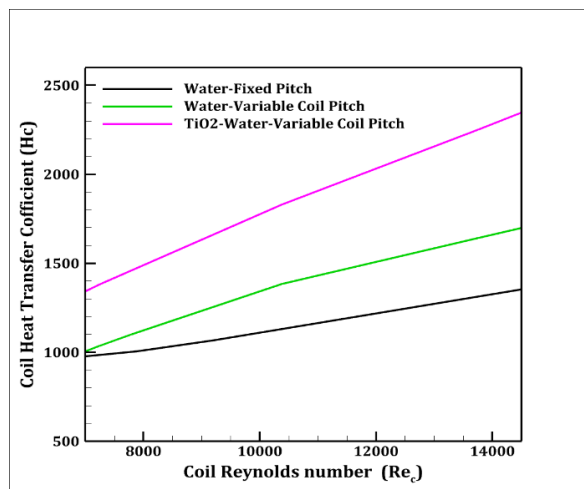


Fig. (1). Heat transfer coefficient with Reynolds number

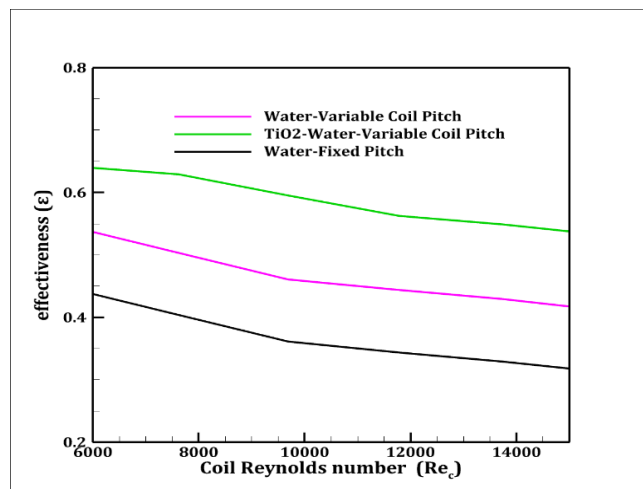


Fig. 2. Coil efficiency as a function of Reynolds number

4. Summary and Conclusion

In this study, the effect of geometric and flow parameters, especially the decreasing spiral pitch, on the thermal performance of the shell and tube heat exchanger with Titanium oxide nanofluid was numerically investigated. The results can be summarized as follows: 1) The use of decreasing spiral pitch in the coil increased the heat transfer coefficient and Nusselt number compared to models with fixed pitch. 2) The use of water/Titanium oxide nanofluid led to a significant improvement in the thermal efficiency of the exchanger, although the pressure drop also increased slightly with increasing nanoparticle concentration. 3) Comparison of the results showed that the combination of nanofluid and optimal geometric design (decreasing spiral pitch) can simultaneously improve

thermal efficiency and maintain hydraulic balance in the exchanger. 4) Sensitivity analysis of flow parameters (Reynolds number and flow velocity) indicates that changing these factors has a significant effect on heat transfer and optimal design should be carried out according to operating conditions.

References

- [1] Rajhi W, Salih AH, Al-Farhany M, Alshammari M, Alzahrani M, Almutairi A, Alazemi A. Synergistic effect of outer helical fins and hybrid nanofluid on hydrothermal performance of shell and two-coil heat exchanger. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2025;72: 104123. doi.org/10.1016/j.csite.2025.104123.
- [2] Hassaan AM. Evaluating experimentally the viability of employing hybrid nanofluids as an operating fluid in a shell-and-tube heat exchanger. *Scientific Reports*. 2025;15: 4030. doi.org/10.1038/s41598-025-87149-7
- [3] Bacak AY, Ghasemi H, Hatami M, Salman S., Sadeghzadeh S. Hydrothermal behaviour of hybrid nanofluid flow in a shell-and conical coil tube heat exchanger: numerical approach. *Journal of Thermal Science*. 2024;33(4): 1183–1205. doi.org/10.1007/s11630-023.
- [4] Abu-Hamdeh NH, Rashad ARB, Tlili I. Analysis of the thermal and hydraulic performance of the sector-by-sector helically coiled tube heat exchangers as a new type of heat exchangers. *International Journal of Thermal Sciences*. 2020;150: 106229. Doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2019.106229
- [5] Zheng D, Wang J, Chen Z, Baleta J, Sundén B. Performance analysis of a plate heat exchanger using various nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;158: 119993. Doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119993



اثر عامل‌های هندسی و جریان بر راندمان مبدل حرارتی پوسته و کوئل با استفاده از نانوسیال

سعید هاشمی هاشجین^۱، علی‌اکبر عباسیان آرانی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران saeedhashemi0072@gmail.com

^۲ استاد، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران (نویسنده مسئول abbasin@kashanu.ac.ir)

برجسته‌ها

- گام مارپیچی کاهشی در کوئل، سبب افزایش ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت
- نانوسیال آب/تیتانیوم اکساید منجر به بهبود محسوس بازده حرارتی
- ترکیب نانوسیال و طراحی هندسی بهینه (گام مارپیچی کاهشی) موجب ارتقای راندمان حرارتی
- لزوم طراحی بهینه باتوجه به شرایط عملیاتی

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۷

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۷

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۲/۰۱

کلیدواژه‌ها:

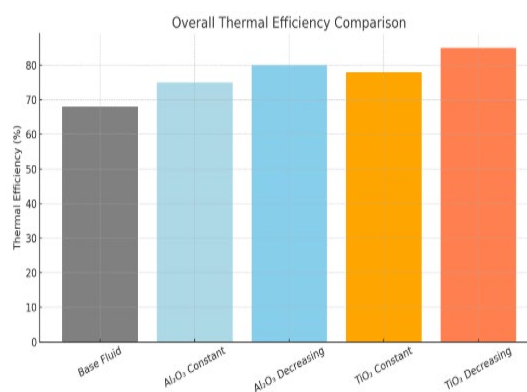
مبدل حرارتی پوسته و کوئل؛

شبیه‌سازی عددی؛

گام کاهشی؛ عملکرد حرارتی؛

نانوسیال آب - TiO₂ و آب - Al₂O₃

چکیده گرافیکی



نمودار بازده حرارتی کلی برای حالت‌های مختلف گام ثابت و گام کاهشی در انواع نانوسیال‌ها

چکیده

مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله از پرکاربردترین دستگاه‌های حرارتی هستند. مبدل‌های حرارتی کوئل مارپیچ ویژگی‌های انتقال حرارت بهتری نسبت به لوله مستقیم ارائه می‌دهند. اخیراً نانوسیال‌ها به دلیل خواص ترموفیزیکی بهبودیافته توجه محققان را به خود جلب کرده‌اند. این مطالعه، تحلیل عددی جامعی بر تأثیر عامل‌های هندسی و جریان بر عملکرد حرارتی مبدل حرارتی در حضور نانوسیال ارائه می‌دهد. مدل محاسباتی سه‌بعدی با گام کاهشی در جهات افقی و عمودی توسعه یافت و با پیکربندی‌های گام ثابت معمولی مقایسه شد. عامل‌های حرارتی - هیدرولیکی با استفاده از نرم‌افزار آنسیس - فلوئنت تحلیل شدند. این تحقیق نشان می‌دهد استفاده از گام مارپیچ کاهشی عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت را حدود ۱۵-۲۰٪ افزایش می‌دهد، درحالی‌که افت فشار مرتبط تنها ۵-۸٪ افزایش می‌یابد. علاوه بر این، به‌کارگیری نانوسیال آب - تیتانیوم اکساید، راندمان حرارتی کلی را تا ۱۲٪ نسبت به سیال پایه بهبود بخشید. این نتایج تأیید می‌کنند که ترکیب هندسه مارپیچ بهینه‌شده با نانوسیال‌های مناسب می‌تواند عملکرد انتقال حرارت مبدل‌های حرارتی پوسته و کوئل را به طور قابل‌توجهی ارتقا دهد و بینش‌های ارزشمندی برای طراحی کارآمد انرژی ارائه کند.

استناد: هاشمی هاشجین سعید، عباسیان آرانی علی اکبر. اثر پارامترهای هندسی و جریان بر راندمان مبدل حرارتی پوسته و کوئل با استفاده از نانوسیال. مکانیک

سیالات و آیرودینامیک. ۱۴۰۴؛ ۱۴(۲): ۱۶۶ - ۱۴۹

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1404.14.2.9.4>

© نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع).



OPEN ACCESS

۱- مقدمه

با پیشرفت مداوم بخش‌های صنعتی و افزایش تقاضای جهانی برای انرژی، بهبود عملکرد تجهیزات انتقال حرارت اهمیت فزاینده‌ای یافته است [1-4]. در میان انواع مختلف سامانه‌های حرارتی، مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله به دلیل طراحی مقاوم، راندمان حرارتی بالا و قابلیت اطمینان عملیاتی، پرکاربردترین نوع هستند. به‌ویژه، مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله با کوئل مارپیچ، به دلیل هندسه متمایز خود، اختلاط سیال بهبودیافته و ضریب‌های انتقال حرارت بالاتری نسبت به مبدل‌های لوله مستقیم معمولی فراهم می‌کنند. با این حال، بهبود انتقال حرارت اغلب با افزایش افت فشار همراه است که باید در طراحی و بهره‌برداری این سامانه‌ها به‌دقت مدنظر قرار گیرد.

۱-۱ نانوسیال‌ها به عنوان روش غیرفعال

یکی از مؤثرترین تکنیک‌های غیرفعال برای بهبود عملکرد انتقال حرارت، استفاده از نانوسیال‌هاست. نانوسیال‌ها سوسپانسیون‌های کلوئیدی مهندسی‌شده هستند که در آن نانوذرات بسیار ریز (معمولاً کوچک‌تر از ۱۰۰ نانومتر) به طور یکنواخت در سیال پایه معمولی مانند آب، اتیلن گلیکول یا روغن پراکنده می‌شوند. نانوذرات ممکن است از فلزات، اکسیدهای فلزی، کاربیدها یا نانولوله‌های کربنی تشکیل شده باشند. افزودن آن‌ها خواص ترموفیزیکی سیال پایه را به طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد - به‌ویژه رسانایی حرارتی، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و کارایی انتقال انرژی - بدون نیاز به ورودی انرژی مکانیکی اضافی. در نتیجه، نانوسیال‌ها به عنوان راه‌حلی کارآمد و پایدار برای بهبود عملکرد حرارتی مبدل‌های حرارتی ظهور کرده‌اند.

۲-۱ مرور تحقیقات پیشین

در دهه گذشته، تحقیقات گسترده‌ای بر کاربرد نانوسیال‌ها در انواع مختلف مبدل‌های حرارتی انجام شده است. بیشتر مطالعات تأیید کرده‌اند که نانوسیال‌ها انتقال حرارت جابه‌جایی را به طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهند؛ با این حال، افزایش غلظت نانوذرات ممکن است منجر به ویسکوزیته بالاتر و افت فشار بیشتر شود که نیاز به بهینه‌سازی دقیق دارد. علاوه بر این، هندسه مبدل و عامل‌های جریان (مانند عدد رینولدز و جهت جریان) نقش‌محوری در تعیین عملکرد کلی حرارتی - هیدرولیکی ایفا می‌کنند [۵].

برای مثال، راجهی و همکاران (۲۰۲۵) اثر ترکیبی پره‌های مارپیچ خارجی و نانوسیال‌های هیبریدی را بر عملکرد حرارتی مبدل‌های پوسته و کوئل بررسی کردند و نشان دادند که این پیکربندی هیبریدی می‌تواند انتقال حرارت را به طور قابل‌توجهی بهبود بخشد [۶]. به طور مشابه، حسن و همکاران (۲۰۲۵) به‌صورت تجربی نانوسیال‌های هیبریدی متشکل از نانوتیوب کربن و

نانوذرات آلومینیم اکسید را در مبدل پوسته و لوله مطالعه کردند و افزایش قابل‌توجه نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی نسبت به نانوسیال‌های تک‌جزئی گزارش دادند [۷]. کارویی و همکاران (۲۰۲۴) تأثیر استفاده از پیکربندی‌های کوئل دوتایی را تحلیل کردند و دریافتند که این آرایش سطح انتقال حرارت و اختلاط سیال را افزایش می‌دهد [۸].

همچنین، عبدالله (۲۰۲۳) با ترکیب تحلیل‌های عددی و تجربی، تأثیر نانوذرات آلومینیم اکسید و گام مارپیچ را بر راندمان حرارتی مبدل‌های کوئل‌دار ارزیابی کرد و نتیجه گرفت که تعامل بین هندسه و عامل‌های جریان برای بهبود عملکرد حیاتی است [۹]. علاوه بر این، باکاک و همکاران (۲۰۲۲) به‌صورت عددی جریان نانوسیال‌های هیبریدی را در مبدل کوئل مارپیچ مخروطی بررسی کردند و گزارش دادند که تغییر هندسه کوئل اختلاط سیال و انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد، هرچند با افزایش جزئی افت فشار همراه است [۱۰]. به همین ترتیب، مقربیه و همکاران (۲۰۲۱) به‌صورت تجربی اثر زاویه شیب و نوع نانوسیال را بر عملکرد مبدل‌های پوسته و لوله مارپیچ ارزیابی کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که افزایش زاویه شیب کوئل، عدد ناسلت و اثربخشی مبدل حرارتی را بهبود می‌بخشد درحالی‌که افت فشار را کاهش می‌دهد [۱۱]. در سال (۲۰۲۰)، نیدال و همکاران عملکرد حرارتی و هیدرولیکی مبدل‌های حرارتی کوئل مارپیچ مقطعی را به عنوان نوع جدیدی از مبدل‌ها تحلیل کردند [۱۳]. [در سال (۲۰۲۰)، دان ژنگ و همکاران عملکرد مبدل حرارتی صفحه‌ای با استفاده از نانوسیال‌های مختلف را بررسی کردند. نتایج نشان داد که هم نرخ انتقال حرارت و هم افت فشار برای نانوسیال‌ها نسبت به سیال پایه افزایش قابل‌توجهی داشت [۱۴].

۳-۱ تحقیقاتی و اهداف مطالعه

اگرچه مطالعات متعددی هندسه‌های کوئل مختلف را بررسی کرده‌اند، بیشتر آن‌ها به پیکربندی‌های گام ثابت محدود شده‌اند، درحالی‌که اثر گام متغیر یا کاهشی بر عملکرد حرارتی - هیدرولیکی به طور ناکافی موردتوجه قرار گرفته است. تغییرات در گام مارپیچ می‌تواند الگوهای جریان ثانویه و شدت اختلاط سیال را به طور قابل‌توجهی تغییر دهد که به نوبه خود بر بهبود انتقال حرارت و افت‌های فشار تأثیرگذار است.

بنابراین، این مطالعه باهدف بررسی عددی تأثیر ترکیبی عامل‌های هندسی و جریان، با تأکید بر طراحی‌های گام مارپیچ کاهشی، بر عملکرد حرارتی مبدل حرارتی پوسته و کوئل با استفاده از نانوسیال‌های تیتانیوم اکسید و آلومینیم اکسید انجام می‌شود. نتایج این پژوهش انتظار می‌رود بینش‌های ارزشمندی برای بهینه‌سازی هندسه مبدل حرارتی و انتخاب نانوسیال‌های مناسب به‌منظور حداکثرسازی راندمان انتقال حرارت و حداقل‌سازی مصرف انرژی در سامانه‌های صنعتی فراهم آورد.

۲ - بیان مسئله و اهداف تحقیق

باتوجه به نقش حیاتی مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله در صنایع مختلف، بهبود عملکرد این تجهیزات همواره از اولویت‌های پژوهشی بوده است. مبدل‌های پوسته و لوله کوپلی به واسطه طراحی خاص خود، می‌توانند انتقال حرارت بهتری نسبت به مبدل‌های معمولی فراهم کنند؛ اما چالش اصلی در بهبود بازده حرارتی این مبدل‌ها، دستیابی به افزایش نرخ انتقال حرارت همراه با حداقل افت فشار است.

استفاده از نانوسیال‌ها، به‌ویژه نانوسیال‌های تیتانیوم اکسید و آلومینیوم اکسید، یکی از راهکارهای مؤثر برای افزایش ضریب انتقال حرارت است، زیرا خواص حرارتی بهبودیافته‌ای ارائه می‌دهند. با این حال، ترکیب عوامل هندسی مانند گام مارپیچی و عامل‌های جریان با نانوسیال‌ها هنوز به طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین، بیشتر مطالعات موجود عمدتاً به مبدل‌های با گام مارپیچی ثابت محدود شده و تأثیر گام‌های مارپیچی کاهشی در جهت‌های افقی و عمودی بر عملکرد حرارتی چنین مبدل‌هایی به‌صورت جامع تحلیل نشده است. از این رو، مسئله اصلی تحقیق حاضر، شناسایی و تحلیل تأثیر متقابل عامل‌های هندسی و شرایط جریان بر بازده حرارتی مبدل حرارتی پوسته و لوله کوپلی با نانوسیال تیتانیوم اکسید است؛ امری که می‌تواند در طراحی بهینه مبدل‌ها نقش بسزایی ایفا نماید.

اهداف اصلی این مطالعه عبارت‌اند از:

- ۱- بررسی عددی اثر گام مارپیچی کاهشی در جهت‌های افقی و عمودی بر انتقال حرارت و افت فشار مبدل.
 - ۲- تحلیل تأثیر عامل‌های جریان سیال شامل عدد رینولدز و سرعت جریان بر عملکرد حرارتی مبدل.
 - ۳- ارزیابی تغییرات ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت در حضور نانوسیال تیتانیوم اکسید نسبت به سیال پایه.
 - ۴- مقایسه نتایج مدل با گام مارپیچی کاهشی با مدل‌های دارای گام ثابت در حضور نانوسیال اکسید آلومینیوم جهت استخراج مزایا و محدودیت‌های هر حالت.
- این پژوهش در پی ارائه راهکارهای عددی برای بهبود طراحی مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله کوپلی با بهره‌گیری از فناوری نانوسیال به‌منظور افزایش بازده حرارتی و کاهش مصرف انرژی در صنایع مختلف است.

۳- نانوسیالات و خواص آن

۳-۱- خواص ترموفیزیکی نانوسیال تیتانیوم اکسید

در این بخش با استفاده از مراجع برای خواص ترموفیزیکی نانوسیال تیتانیوم اکسید جدولی ارائه شده است. جدول ۱ خلاصه‌ای از خواص حرارتی نانوسیال‌های تیتانیوم اکسید را ارائه می‌دهد که از منابع مختلف پژوهشی استخراج شده است و شامل

عامل‌های مانند ضریب هدایت حرارتی، چگالی، ویسکوزیته و ظرفیت گرمایی ویژه است [۱۵]:

جدول ۱: خواص ترموفیزیکی نانوسیال تیتانیوم اکسید		
ویژگی حرارتی	مقدار تقریباً متوسط (بسته به غلظت و روش تهیه)	واحد
(ρ) چگالی	رقیق (حدود ۱۰۰۰ تا ۱۱۰۰)	kg/m^3
ظرفیت گرمایی ویژه (cp)	در حدود ۳،۸ تا ۴،۲	$\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$
ضریب هدایت حرارتی (k)	حدود ۰،۶۵ تا ۰،۷۵	$\text{W/m} \cdot \text{K}$
(μ) ویسکوزیته	افزایش نسبت به آب، معمولاً تا ۱،۲ الی ۱،۶ برابر	Pa.s
اثر بر عدد ناسلت	افزایش ۴ تا ۲۰ درصد بسته به شرایط جریان و درصد حجم	-

لازم است اشاره شود نانوسیال تیتانیوم اکسید معمولاً بین ۰،۱٪ تا ۵٪ وزنی در آب آماده می‌شود که خواص فوق با افزایش درصد حجم ذرات بهبود می‌یابد؛ اما ویسکوزیته نیز افزایش می‌یابد که ممکن است بر مصرف انرژی پمپ اثرگذار باشد. نانوذرات با قطر حدود ۱۰ تا ۵۰ نانومتر در تهیه نانوسیال‌ها معمولاً به کار می‌روند. ضریب هدایت حرارتی نانوسیال‌های تیتانیوم اکسید به علت هدایت بالای ذرات نسبت به سیال پایه افزایش می‌یابد و در کاربردهایی مانند سامانه‌های خنک‌کننده، مبدل‌های حرارتی و رادیاتورها استفاده می‌شود [۱۵].

۳-۲- خواص ترموفیزیکی نانوسیال آلومینیوم اکسید

در این بخش با استفاده از مراجع برای خواص ترموفیزیکی نانوسیال آلومینیوم اکسید جدولی ارائه شده است. جدول ۲ خلاصه‌ای از خواص حرارتی نانوسیال‌های آلومینیوم اکسید را ارائه می‌دهد که از منابع مختلف پژوهشی استخراج شده است و شامل عامل‌های مانند ضریب هدایت حرارتی، چگالی، ویسکوزیته و ظرفیت گرمایی ویژه است [۱۶]:

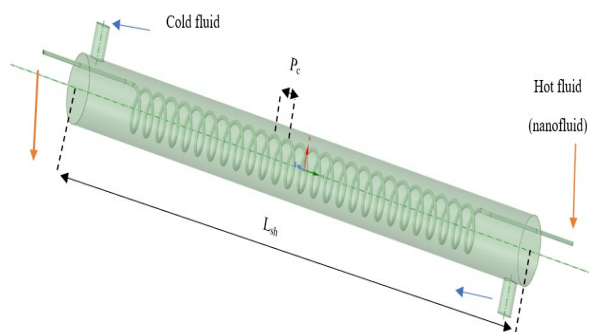
۴- روش تحقیق

در این مطالعه به‌منظور بررسی تأثیر عامل‌های هندسی و جریان، به‌ویژه اثر گام مارپیچی کاهشی، بر عملکرد حرارتی مبدل حرارتی پوسته و لوله کوپلی با نانوسیال تیتانیوم اکسید، یک مدل سه‌بعدی عددی شبیه‌سازی شده و نتایج آن با نتایج گام ثابت‌های یافته‌های قبلی مقایسه گردیده است. مراحل انجام تحقیق به شرح زیر نیز است:

شامل جزئیات پیچیده مارپیچ کویل و ساختار پوسته را فراهم می‌کند.

جدول (۳): مشخصات هندسی مسئله در گام ثابت مبدل حرارتی

عامل	مقدار	واحد
گام ثابت	۳۵.۳۱	میلی‌متر
تعداد دور کویل	۲۷	دور
ارتفاع کویل هلیکالی داخل پوسته	$۳۵.۳۱ \times ۲۷ = ۸۴۶.۴۵$	میلی‌متر
قطر کویل	۶۶.۳۵	میلی‌متر
قطر داخلی کویل هلیکالی	۴.۳۵	میلی‌متر
قطر خارجی کویل هلیکالی	۶.۳۵	میلی‌متر
ضخامت کویل هلیکالی	۲	میلی‌متر
قطر داخلی پوسته	۱۰۷	میلی‌متر
قطر خارجی پوسته	۱۱۴	میلی‌متر
ضخامت پوسته	۷	میلی‌متر
طول پوسته	۱۱۰۰	میلی‌متر
قطر استوانه‌های ورودی و خروجی	۳۰	میلی‌متر
ارتفاع استوانه‌های ورودی و خروجی	۶۰	میلی‌متر



شکل (۱): شکل هندسه گام ثابت مبدل حرارتی پوسته و لوله کویلی

در مرحله بعد، فایل هندسی صادر شده در محیط انسیس فلوئنت وارد شد و قبل از شروع فرایند حل عددی، عملیات پیش‌پردازش شامل اصلاحات هندسی لازم برای بهبود کیفیت مش‌بندی، حذف ناهمواری‌های غیرضروری و بهینه‌سازی ناحیه‌های حساس به انتقال جریان انجام گرفت. همچنین ساختار مش‌بندی بادقت بالا و در نواحی مهم مانند اطراف کویل مارپیچی و دیواره‌ها ایجاد شد تا دقت نتایج شبیه‌سازی اطمینان‌بخش باشد.

این روند طراحی مدل و انتقال آن به نرم‌افزار شبیه‌سازی، اطمینان می‌دهد که شبیه‌سازی‌ها بر اساس هندسه‌ای دقیق و معتبر صورت گرفته و شرایط واقع‌گرایانه در تحلیل عملکرد حرارتی مبدل لحاظ شده است.

جدول (۲): خواص ترموفیزیکی نانوسیال آلومینیوم اکسید

عامل	واحد	آب (سیال)	نانوسیال (۰.۵٪ حجم)	نانوسیال (۱٪ حجم)	دما (K)
چگالی	kg/m ³	۹۹۷	افزایش یافته نسبت به آب	بالاتر از ۰.۵٪	۳۱۰
ظرفیت گرمایی	J/kg·K	۴۱۸۰	کمی کاهش نسبت به آب	۰.۵٪ یا کمتر	۳۱۰
ویسکوزیته	Pa·s	پایین	افزایش نسبت به آب	بیشتر از ۰.۵٪	وابسته به دما
ضریب هدایت	W/m·K	۰.۶	افزایش نسبت به آب	بیشتر از ۰.۵٪	وابسته به دما

۴-۱-۱- مدل هندسی مبدل حرارتی

مدل هندسی شامل یک مبدل حرارتی پوسته و لوله با کویل مارپیچ است که کویل دارای دو حالت گام مارپیچی است: گام ثابت و گام مارپیچی کاهشی در جهت‌های افقی و عمودی. ابعاد اصلی مانند قطر لوله، قطر کویل، طول مبدل و عامل‌های مرتبط با گام مارپیچ مطابق با شرایط مرجع تعریف شده‌اند (جدول ۳). هندسه و دامنه محاسباتی در Space Claim، شبکه محاسباتی و مش‌زنی در Fluent Meshing و شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار انسیس فلوئنت انجام شده است.

۴-۱-۱-۱- مشخصات هندسی مسئله در گام ثابت

مدل هندسی مورد استفاده در این مطالعه شامل یک مبدل حرارتی پوسته و لوله با کویل هلیکالی است. مشخصات هندسی اصلی بر اساس شرایط مرجع و استانداردهای طراحی تعریف شده‌اند که شامل مشخصات کویل و پوسته است. کویل در این حالت دارای گام ثابت است و سایر ابعاد مدل مطابق جدول ۳ آورده شده است.

۴-۱-۲- نحوه ساخت مدل هندسی و انتقال به نرم‌افزار شبیه‌سازی

مدل هندسی مبدل حرارتی پوسته و لوله با کویل مارپیچی (شکل ۱) به صورت سه‌بعدی و مطابق با مشخصات ابعادی داده شده، در نرم‌افزار انسیس (در بخش Space Claim)، به دقت طراحی شده است. در این مرحله، تمامی ابعاد هندسی شامل قطر داخلی و خارجی کویل، قطر و ضخامت پوسته، طول کلی مبدل، تعداد دور کویل و گام مارپیچی (ثابت یا کاهشی) به صورت دقیق وارد و مدل‌سازی گردید. پس از تکمیل مدل هندسی سه‌بعدی، فایل طراحی به فرمت استاندارد قابل‌شناسایی توسط نرم‌افزار انسیس فلوئنت صادر شد. این فرمت امکان انتقال دقیق هندسه

۲-۴- مشخصات نانوسیال

نانوسیال مورد استفاده، ترکیبی از سیال پایه آب و نانوذرات تیتانیوم اکسید با غلظت ۰/۰۰۵ کسر حجمی است. خواص ترموفیزیکی نانوسیال بر اساس روابط تجربی و داده‌های معتبر استخراج شده و در مدل عددی وارد شده‌اند. این خواص شامل چگالی، گرمای ویژه، ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی وابسته به غلظت نانوذرات و دما هستند [۲۹]، (بخش ۳-۱).

۳-۴- شرایط مرزی و عامل‌های جریان

۱- سمت لوله (داخل کوئل): جریان نانوسیال به صورت یکنواخت با دبی جرمی مشخص وارد شده و جریان به صورت آشفته (عدد رینولدز در محدوده ۶۰۰ تا ۱۴۰۰) در نظر گرفته شده است.
 ۲- سمت پوسته: جریان سیال ثانویه (آب) در شرایط مشخص حرارتی و جریان قرار دارد.
 ۳- سیال داغ درون کوئل و سیال سرد درون پوسته (آب) قرار دارد.
 ۴- ورودی و خروجی‌های لوله و پوسته عامل‌های جریان معلوم هستند.
 ۵- دماهای ورودی، شرایط دیواره و سایر شرایط مرزی (مانند همه دیواره‌های درونی کوئل از نظر حرارتی عایق هستند). مطابق با شرایط واقعی یا فرضی شبیه‌سازی شده است (جدول ۴).
 خواص ترموفیزیکی سیال آب (ناحیه مایع) و مس (ناحیه جامد) به شرح جدول ۵ است.

۴-۴- مدل‌های فیزیکی و معادلات حاکم

معادلات حاکم شامل معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی برای جریان سیال و نانوسیال هستند که به صورت سه بعدی و حالت پایا حل شده‌اند. مدل توربولانسی Realizable k-ε استفاده شده و خواص فیزیکی نانوسیال به صورت تابعی از غلظت و دما تعریف شده‌اند [۲۱-۱۷]. به منظور مدل‌سازی خواص نانوسیال از مدل‌های همگن استفاده شده است.

جدول (۴): شرایط مرزی و عامل‌های جریان

عامل	مقدار	واحد
ورودی کوئل	۶۱۰۰	عدد رینولدز
قطر	۴/۳۵	میلی‌متر
سرعت ورودی	۱/۴۱	متر بر ثانیه
دمای ورودی (دمای آب داغ)	۶۰	درجه سلسیوس
شدت آشفتگی	۵	درصد
دبی ورودی پوسته	۳/۴۱	لیتر بر دقیقه
دمای ورودی پوسته	۱۵	درجه سلسیوس
شار حرارتی	۰	وات بر مترمربع
دمای خروجی کوئل	۳۶/۸	درجه سلسیوس
دمای خروجی پوسته	۲۲/۸	درجه سلسیوس

چگالی نانوسیالات را معمولاً از رابطه‌ی نیلد محاسبه می‌کنند که به صورت زیر است [۱۷]:

$$\rho = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (۱)$$

که در آن ρ چگالی نانوسیال است. گفتنی است در رابطه بالا و سایر روابطی که در ادامه خواهند آمد، ϕ کسر حجمی نانوذرات و اندیس‌های f و p به ترتیب مربوط به سیال پایه و نانوذرات بوده و عامل‌های بدون اندیس نیز مربوط به نانوسیال هستند.

جدول (۵): خواص ترموفیزیکی ناحیه مایع و جامد مبدل حرارتی

پوسته و لوله

عامل	مقدار	واحد
چگالی آب	۹۹۸/۲	کیلوگرم بر مترمکعب
ظرفیت گرمایی ویژه آب	۴۱۸۲	ژول بر کیلوگرم کلوین
ضریب رسانش آب	۰/۶	وات بر متر کلوین
ویسکوزیته آب	۰/۰۱۰۰۳	پاسکال ثانیه
چگالی مس	۸۹۷۸	کیلوگرم بر مترمکعب
ظرفیت گرمایی ویژه مس	۳۸۱	ژول بر کیلوگرم کلوین
ضریب رسانش مس	۳۸۷/۶	وات بر متر کلوین
ویسکوزیته مس	حدود ۰/۰۰۱	پاسکال ثانیه

ظرفیت گرمایی ویژه

برای محاسبه ظرفیت گرمایی ویژه مؤثر نانوسیال از رابطه‌ی زیر می‌توان استفاده نمود [۱۸]:

$$(\rho C_p) = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_p \quad (۲)$$

که در آن C_p ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال است.

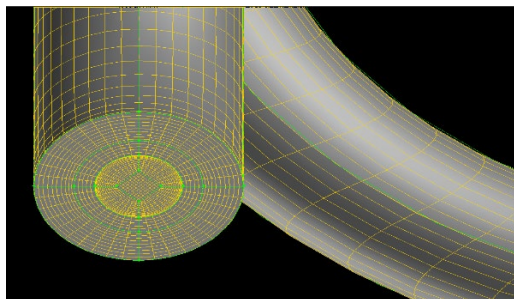
ضریب هدایت حرارتی

مدل استفاده شده برای ضریب هدایت حرارتی برگرفته از کار نیلد و همکاران است. این مدل برای نانوسیال آب - اکسید آلومینیم نیز استفاده می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۷]:

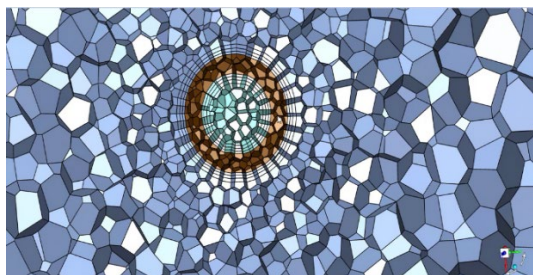
$$\frac{k}{k_f} = 1 + 64.7^{0.746} \left(\frac{d_f}{d_p} \right)^{0.369} \times \left(\frac{k_p}{k_f} \right)^{0.7476} Pr^{0.9955} Re^{1.2321} \quad (۳)$$

$$Pr_f = \frac{\mu_f C_{p,f}}{k_f}, Re_T = \frac{\rho_f K_b T}{3\pi\mu_f^2 \ell_f}, \mu_T = A \times 10^{\frac{B}{T-C}} \quad (۴)$$

فناوری موزایک مش (Mosaic Meshing) ساخته شده که امکان ترکیب المان‌های چندوجهی، شش ضلعی و لایه‌های مرزی (Wall Inflation) را به صورت خودکار و بهینه فراهم کرده است. این ساختار باعث می‌شود که مش یکنواخت و دقیق‌تری حاصل شود که به‌ویژه برای مدل‌سازی جریان سیالات در هندسه‌های پیچیده صنعتی بسیار مفید است. از جمله ویژگی‌های مهم مش پلی هدرال در انسیس فلونت: ۱- کاهش تعداد سلول‌ها در مقایسه با مش‌های tetrahedral که موجب کاهش حجم داده و زمان محاسبات می‌شود. ۲- امکان تولید مش باکیفیت بالا و دقت بیشتر در مشاهده تغییرات جریان در نواحی حساس هندسه. ۳- بهبود عملکرد شبیه‌سازی به دلیل کیفیت بهتر مش و اتصال یکنواخت بین المان‌ها. ۴- مدیریت آسان‌تر و رابط کاربری ساده‌تر نسبت به روش‌های قدیمی مش‌زنی که باعث افزایش بهره‌وری کاربران می‌شود. بنابراین، مش پلی هدرال بخشی از ابزارهای پیشرفته مش‌زنی در انسیس فلونت است که کاربرد گسترده‌ای در شبیه‌سازی‌های CFD برای حصول نتایج دقیق و سریع دارد، به‌ویژه زمانی که با هندسه‌های پیچیده و پر جزئیات سروکار داریم.

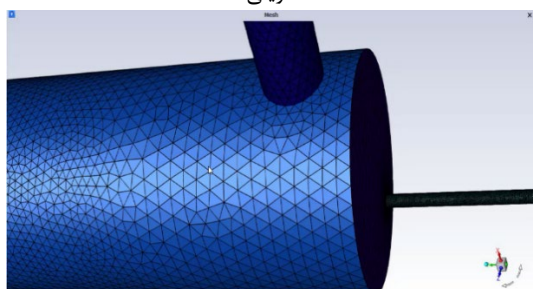


شکل (۲): تصویر مش‌بندی از مقطع کوئل درون پوسته توسط نرم‌افزار



شکل (۳): تصویر شبکه‌بندی مش پلی هدرال در سطح مقطع لوله

کوئلی



که در آن k ضریب هدایت حرارتی نانوسیال، d_f قطر مولکول‌های سیال پایه و d_p قطر نانوذرات است. همچنین k_b و L_f به ترتیب ثابت بولتزمن و مسافت آزاد میانگین مولکول‌های آب هستند.

ویسکوزیته

برای ویسکوزیته دینامیکی از مدل نیلند و همکاران استفاده می‌شود که وابستگی این خاصیت را به حرکت براونی، دما و قطر نانوذرات در نظر گرفته است و به صورت زیر به دست می‌آید [۱۴]:

$$\frac{\mu}{\mu_f} = 1 + \frac{\rho_p V_B d_p^2}{72 N \delta} \quad (5)$$

که در آن μ ویسکوزیته دینامیکی است. همچنین در رابطه بالا δ و V_B به ترتیب فاصله مراکز نانوذرات و سرعت براونی آن‌ها هستند که به صورت زیر به دست می‌آیند [۱۷]:

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6\phi}} d_p \quad (6)$$

$$V_B = \frac{1}{d_p} \sqrt{\frac{18 K_b T}{\pi \rho_p d_p}} \quad (7)$$

و N که به قطر و کسر حجمی نانوذرات مربوط می‌شود و یک عامل برای تطبیق رابطه با نتایج تجربی است به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۱]:

$$N = (c_1 d_p + c_2) \phi + (c_3 d_p + c_4) \quad (8)$$

الف - معادله پیوستگی

معادله پیوستگی برای جریان پایا به صورت زیر است [۱۳]:

$$\nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (9)$$

که در آن ρ چگالی نانوسیال است. همچنین V سرعت میانگین جرمی نانوسیال است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V = \frac{(1 - \phi) \rho_f V_f + \phi \rho_p V_p}{\rho} \quad (10)$$

که در آن ϕ درصد حجمی نانوذرات است.

ب- معادله مومنتوم

معادله مومنتوم با چشم‌پوشی از نیروهای حجمی برای جریان لزج، تراکم‌ناپذیر و پایا به صورت زیر است [۱۷]:

$$\nabla \cdot (\rho V V) = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu (\nabla V)] + \nabla \cdot (\phi \rho_p V_{dr,p} V_{dr,p}) \quad (11)$$

پ - معادله انرژی

معادله انرژی برای جریان لزج، تراکم‌ناپذیر و پایا به صورت زیر است [۱۷]:

$$\nabla \cdot [u(\rho E + P)] = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi + SE \quad (12)$$

۴-۵- روش حل عددی

شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت انجام شده است. شبکه‌بندی حوزه حل شامل مش‌بندی دقیق و بهینه شده (نوع مش: پلی هدرال) برای افزایش دقت نتایج و کاهش زمان محاسبات است. در انسیس فلونت، مش پلی هدرال با استفاده از

شاخص انتقال حرارت و افت فشار کل به عنوان شاخص رفتار هیدرودینامیکی جریان انتخاب شدند. تحلیل داده‌های به دست آمده نشان می‌دهد که با عبور تعداد المان‌ها از مرز یک میلیون، تغییرات مقادیر هدف به شدت کاهش یافته و نرخ خطای نسبی به کمتر از یک درصد تقلیل می‌یابد. براین اساس و با در نظر گرفتن تعادل بهینه میان زمان محاسبات رایانه‌ای و دقت حل عددی، شبکه سوم با تعداد 1.12×10^6 المان به عنوان شبکه نهایی و معیار برای کلیه شبیه‌سازی‌های بعدی برگزیده شد.

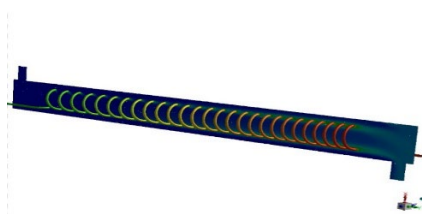
۷-۴- سنجش و ارزیابی نتایج

عامل‌های مانند عدد ناسلت، ضریب انتقال حرارت، افت فشار و راندمان حرارتی مبدل در شرایط مختلف جریان و هندسه در بخش نتایج محاسبه و تحلیل شده‌اند. نتایج مدل با داده‌های مرجع یا مقالات پیشین (مبدل حرارتی با گام ثابت) (مرجع ۷ و ۸) مقایسه شده و اعتبارسنجی شده است.



شکل (۵): شکل هندسه کار حاضر با گام متغیر کاهشی مبدل حرارتی پوسته و لوله کوپلی

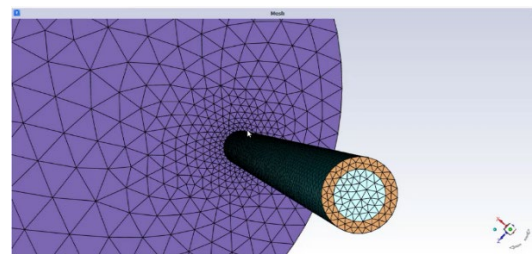
مدل هندسی مورد استفاده در این مطالعه شامل یک مبدل حرارتی پوسته و لوله با کوپل هلیکالی است. مشخصات هندسی اصلی بر اساس شرایط مرجع و استانداردهای طراحی تعریف شده‌اند که شامل مشخصات کوپل و پوسته است. کوپل در حالت گام متغیر (کاهشی) همان مشخصات حالت گام ثابت را دارد و تنها تفاوت آن اندازه‌ی گام‌ها است که از ۴۱/۳۵ میلی‌متر تا ۲۱/۳۵ میلی‌متر (۲۷ دور) در حال کاهش خواهد بود، و نیز سایر ابعاد مدل عیناً مطابق جدول ۳ آورده شده است (شکل ۶).



شکل (۶): شماتیک سه‌بعدی از کاهشی بودن گام در لوله درون پوسته مبدل حرارتی

۲-۵- اعتبارسنجی کار حاضر و بررسی انحراف‌ها

به منظور اعتباربخشی به کار حاضر، مقایسه‌ای بین نتایج تجربی و محاسبه شده سیم‌پیچ عدد ناسلت (Nuc) مطالعه حاضر با نتایج



شکل (۴): تصاویر مش و شبکه روی بدنه پوسته و لوله کنار

دیواره‌ها و در سطح مقطع در اندازه‌های مختلف

روش‌ها و الگوریتم‌های عددی برای حل معادلات شامل: روش حجم کنترل، الگوریتم SIMPLE برای فشار - سرعت، استفاده از مش غیرساخت یافته با ترندهای افزایش دقت در مرزهای معینی است [۲۲] شکل‌های ۲-۴.

۴-۵-۱- مشخصات حل گر (solver)

در جدول ۶ مشخصات کامل حلگر، عامل‌ها، نوع جریان، حالت، شدت آشفتگی، نوع مش نرم‌افزار و سایر مشخصات نیز آورده شده است.

۵- تحلیل و نتایج

۵-۱- شماتیک کلی

در این مطالعه به منظور بررسی تأثیر عامل‌های هندسی و جریان، به ویژه اثر گام مارپیچی کاهشی (شکل ۵)، بر عملکرد حرارتی مبدل حرارتی پوسته و لوله کوپلی با نانوسیال تیتانیوم اکسید، یک مدل سه‌بعدی عددی شبیه‌سازی شده و نتایج آن با نتایج گام ثابت‌های یافته‌های قبلی مقایسه گردیده است.

جدول (۶): مشخصات حلگر (solver) نرم‌افزار انسیس

عامل	نوع و مقدار
عدد ماخ	کمتر از ۳
نوع جریان	تراکم‌ناپذیر
حالت جریان	پایا
شدت آشفتگی	5%
معادله مؤنتم و انرژی	فعال شده
مدل آشفتگی	Realizable k-ε
نوع مش	Polyhedral (پلی هدرال Mesh)
مدل نزدیک دیواره‌ها	Enhanced Wall Treatment
مرتب‌ه حل معادلات در سالور	second مرتبه سکند اردر (order)

۴-۶- استقلال حل از شبکه

به منظور تضمین صحت نتایج عددی و اطمینان از عدم وابستگی حل معادلات حاکم به ابعاد و تعداد شبکه‌بندی، آزمون استقلال از شبکه بر روی چهار ساختار شبکه متفاوت صورت گرفت. عامل‌های هدف در این ارزیابی، عدد ناسلت متوسط به عنوان

چون اغلب تجهیزات در اعداد رینولدز بالا کار می‌کنند. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است همانند شکل ۷، با افزایش عدد رینولدز مقدار عدد ناسلت هم‌افزایش پیدا می‌کند (رفتار فیزیکی کاملاً طبیعی). این یعنی با بالا رفتن سرعت جریان و شدت تلاطم، انتقال حرارت جابه‌جایی بیشتر می‌شود. منحنی قرمز (کار حاضر) در تمام بازه‌ها بالاتر از منحنی‌های مرجع قرار گرفته است. تفاوت‌ها در محدوده‌ی میانی اعداد رینولدز بیشتر است، یعنی جایی که شرایط عملیاتی تجهیزات خنک‌کننده معمولاً قرار دارند. در اعداد رینولدز پایین اختلاف کمتر است (به دلیل محدوده جریان آرام)، اما همچنان عدد ناسلت کار حاضر برابر یا کمی بیشتر است. در اعداد رینولدز بالا همکار حاضر عملکرد پایدارتری نشان می‌دهد. نتیجه نهایی این نمودار این است که کار حاضر در انتقال حرارت بهینه‌تر هست. به‌ویژه برای کاربردهای صنعتی که معمولاً در ناحیه‌ی رینولدز بالا کار می‌کنند، کارایی طراحی حاضر بهتر از مطالعات قبلی است.

نتایج حاصل از عدد ناسلت سیم‌پیچ در کار فعلی به دلیل استفاده از آب به‌عنوان سیال پایه و استفاده از نانوسیال آب/آلومینیوم اکسید با غلظت حجمی ۰.۳ درصد حجمی، با مطالعات دیگر مقایسه شده است. از سوی دیگر، مقادیر عدد ناسلت سیم‌پیچ (Nuc) در تحقیق حاضر کمتر از مطالعه قبلی است و این انحراف به دلیل تفاوت در عامل‌های طراحی است. همچنین درصد خطای محاسبه شده و داده‌های مربوط به اعتبارسنجی کار حاضر برای سیال آب پایه در جدول ۷ و برای آب و آلومینیوم اکسید در جدول ۸، نیز آمده است.

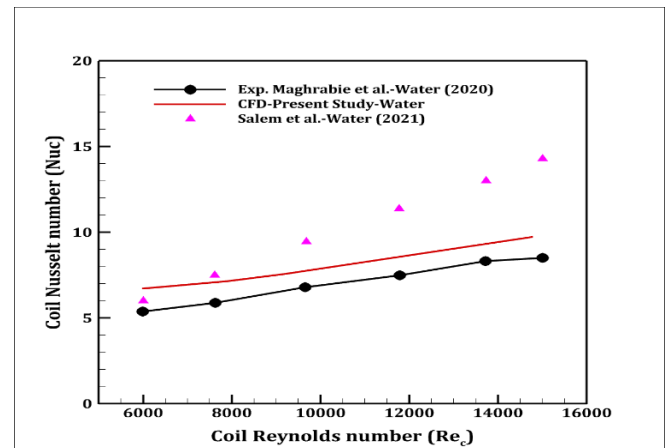
در داخل جداول، داده‌های پژوهش حاضر برای اعداد رینولدز مختلف، دماهای متفاوت، میزان انتقال حرارت، ضریب انتقال حرارتی جابه‌جایی، عدد ناسلت تجربی و عدد ناسلت شبیه‌سازی، آورده شده است. در حالت سیال پایه آب، متوسط خطای محاسبات در حدود ۱۷ درصد و در حالت آب و آلومینیوم اکسید، متوسط خطای محاسبات در حدود ۶ درصد شده است که باتوجه به مقایسه کار حاضر با داده‌های تجربی معقول و قابل قبول به نظر می‌رسد.

جدول (۷): درصد خطای محاسبه شده برای سیال آب

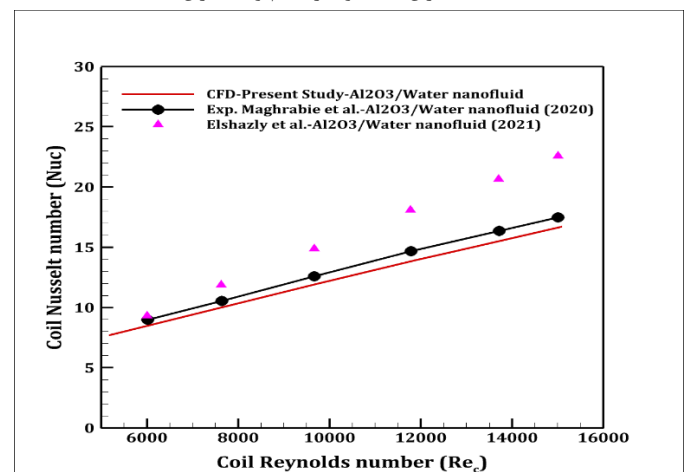
Error (%)	Nu exp	Nu cfd	h_{cfd}	q	T_b	T_w	Re
26.9	5.38	6.83	1021	2076	47	45	6041
21.5	5.88	7.14	1068	2262	49	47	7767
12.3	6.78	7.63	1140	2352	51	48	9277
14.6	7.46	8.59	1228	2408	52	50	11732
12.3	8.30	9.23	1383	2560	53	51	13712
15.6	8.43	9.81	1466	2607	54	52	14980

میانگین درصد خطا: 17.20

مغریبه و همکاران [۱۱]، الشازلی و همکاران و سالم و همکاران [۱۲] در شکل‌های (۷ و ۸) انجام و نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است در همه‌ی نمودارها با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت هم‌افزایش پیدا می‌کند. این رفتار طبیعی است، چون افزایش عدد رینولدز به معنای افزایش شدت جریان و تلاطم بیشتر بوده و بنابراین انتقال حرارت تقویت می‌شود. در اغلب بازه‌ها، منحنی مربوط به کار حاضر بالاتر از کارهای پیشین قرار گرفته است.



شکل (۷): اعتبارسنجی کار حاضر در حالت سیال آب با کار مغریبه و همکاران [۱۱] و کار سالم و همکاران [۱۲]



شکل (۸): اعتبارسنجی کار حاضر در حالت آب و آلومینیوم اکسید با کار مغریبه و همکاران [۱۱] و کار الشازلی و همکاران [۱۲]

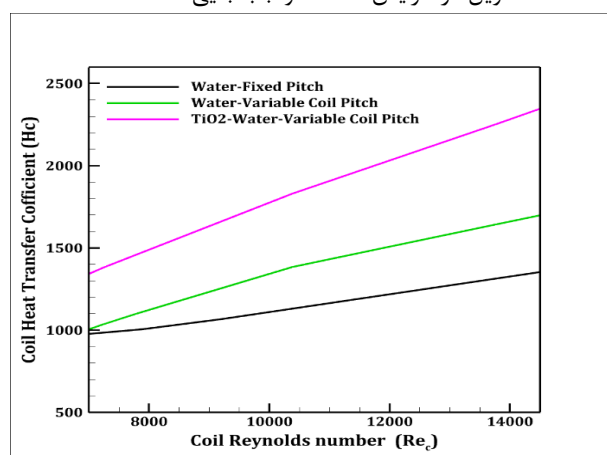
این برتری در محدوده‌ی میانی عدد رینولدز (مثلاً جریان‌های نه خیلی آرام و نه خیلی آشفته) بیشتر نمایان است. یعنی کار حاضر در شرایط عملی متداول، عملکرد قابل‌توجهی دارد. در اعداد رینولدز پایین اختلاف عدد ناسلت بین کار حاضر و روش‌های قبلی کمتر است. این طبیعی است؛ چون در جریان آرام، نقش اصلاحات هندسی یا نوآوری‌های طراحی کمتر می‌شود.

در اعداد رینولدز بالا همچنان عدد ناسلت کار حاضر بالاتر است که نشان‌دهنده‌ی پایداری و کارایی بالای طرح در شرایط آشفته و پرسرعت است. این موضوع برای کاربردهای صنعتی مهم است،

می‌شوند که اختلاط سیال را افزایش داده و انتقال حرارت را تقویت می‌کنند.

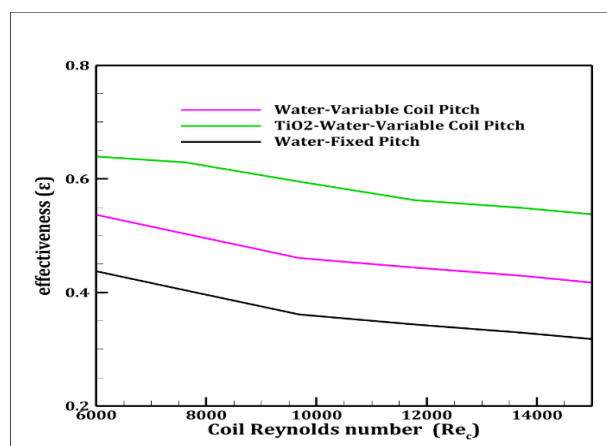
در شکل ۱۰ ضریب انتقال حرارت کوئل برحسب عدد رینولدز برای سیال آب با گام ثابت، سیال آب با گام متغیر و سیال آب/تیتانیوم اکسید بررسی شده است.

ضریب انتقال حرارت سطحی برای همه‌ی حالات با افزایش عدد رینولدز به طور چشمگیر افزایش می‌یابد که با افزایش تلاطم و تقویت لایه‌مرزی متناسب است. نانوسیال آب/تیتانیوم اکسید با گام متغیر بیشترین مقدار ضریب انتقال حرارت سطحی را دارد. در مقایسه آب با گام متغیر نسبت با آب با گام ثابت مقدار ضریب انتقال حرارت سطحی بالاتری دارد که نشان‌دهنده‌ی نقش هندسه کوئل در افزایش اختلاط و جابه‌جایی است.



شکل (۱۰): نمودار ضریب انتقال حرارت برحسب عدد رینولدز برای سیال آب با گام ثابت، سیال آب با گام متغیر و سیال آب/تیتانیوم اکسید

در شکل ۱۱ راندمان حرارتی کوئل برای سیال آب با گام ثابت، سیال آب با گام متغیر و سیال آب/تیتانیوم اکسید بررسی شده است.



شکل (۱۱): راندمان کوئل برحسب عدد رینولدز برای آب با گام ثابت، آب با گام متغیر و آب/تیتانیوم اکسید

با افزایش عدد رینولدز، راندمان (ε) برای همه‌ی سیالات کاهش می‌یابد. این رفتار نشان‌دهنده‌ی تغییر در نسبت‌های جریان‌های

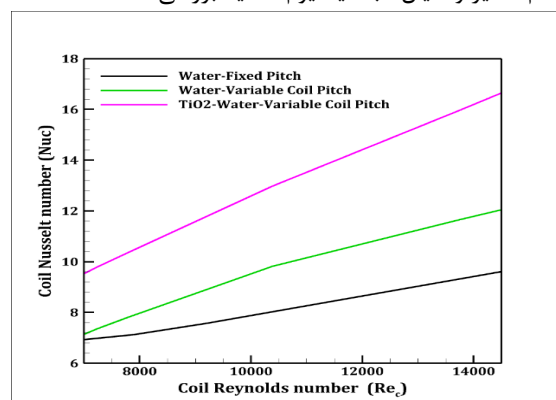
جدول (۸): درصد خطای محاسبه شده برای آب و آلومینیوم اکسید

Error (%)	Nu exp	Nu cfd	h_{cfd}	q	T_b	T_w	Re
8.12	9.04	8.30	1241	1915	48	45	6000
6.02	10.65	9.99	1439	2179	50	48	7600
6.48	12.77	11.93	1783	2351	51	50	9709
5.37	14.60	13.89	2075	2451	53.2	51	11857
7.69	16.05	14.82	2265	2496	53.6	52	12945
3.56	17.38	16.72	2498	2610	54	53	15108

میانگین درصد خطا: 6.21

۵-۳- نمودارها و تجزیه و تحلیل نتایج

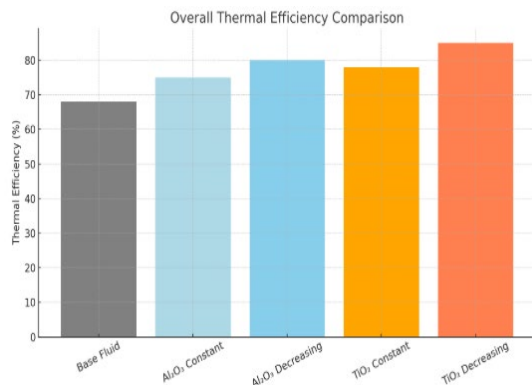
نمودارهای راندمان، افت فشار، ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت در گام متغیر (کاهش) رسم شده است، شکل‌های ۹-۱۲. در شکل ۹ عدد ناسلت کوئل برای سیال آب با گام ثابت، سیال آب با گام متغیر و سیال آب/تیتانیوم اکسید بررسی شده است.



شکل (۹): نمودار عدد ناسلت برحسب عدد رینولدز برای سیال آب با گام ثابت، سیال آب با گام متغیر و سیال آب/تیتانیوم اکسید

چنانچه در شکل ۹ نشان داده شده است با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت افزایش یافته است. این روند طبیعی است؛ چون با افزایش عدد رینولدز جریان از حالت لایه‌ای به سمت آشسته حرکت می‌کند و انتقال حرارت جابه‌جایی تقویت می‌شود. برای زمانی که از نانوسیال استفاده می‌شود برای همه مقادیر اعداد رینولدز، عدد ناسلت نانوسیالات بیشتر از عدد ناسلت سیال پایه است. دلیل اصلی این پدیده افزایش ضریب هدایت حرارتی مؤثر است. در حضور نانوذرات ← بهبود رسانش حرارتی ← افزایش نرخ جابه‌جایی حرارت. در مقایسه دو نانوسیال مورد استفاده معمولاً تیتانیوم اکسید به دلیل هدایت حرارتی بالاتر، در مقادیر پایین اعداد رینولدز بازده بیشتری دارد. اما در برخی محدوده‌ها ممکن است آلومینیوم اکسید عملکرد نزدیک یا حتی نسبت به تیتانیوم اکسید بهتر نشان دهد (بسته به کسر حجمی و پایداری ذرات). این تفاوت می‌تواند ناشی از پایداری بهتر آلومینیوم اکسید در جریان‌های با اعداد رینولدز بالا باشد. اثر افزایش اعداد رینولدز در لوله‌های مارپیچ شدیدتر از لوله‌های مستقیم است به دلیل اینکه در کوئل‌ها نیروهای گریز از مرکز و جریان‌های ثانویه ایجاد

مشهودتر است. این با تشدید جریان ثانویه و حساسیت بیشتر ضریب اصطکاک به آشفستگی/پیمچ سازگار است. در شکل ۱۳ بازده حرارتی کلی برای حالت‌های مختلف گام ثابت و گام کاهشی در انواع نانوسیال‌ها بررسی شده است.



شکل (۱۳): نمودار بازده حرارتی کلی برای حالت‌های مختلف گام ثابت و گام کاهشی در انواع نانوسیال‌ها

شکل ۱۳ بازده حرارتی کلی مبدل را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. ترکیب نانوسیالات با طراحی گام کاهشی موجب بیشترین بهبود بازدهی حرارتی شده است. به‌ویژه، نانوسیال آب/تیتانیوم اکسید با گام کاهشی حدود ۲۵ درصد بازدهی بالاتری نسبت به سیال پایه ارائه می‌دهد. این بهبود به دلیل افزایش رسانایی حرارتی مؤثر، تقویت جریان‌های ثانویه و کاهش گرادیان دمایی در طول کوئل است. نانوسیال آب/آلومینیم اکسید نیز نسبت به سیال پایه بهبود قابل‌توجهی نشان می‌دهد، هرچند میزان آن اندکی کمتر از نانوسیال آب/تیتانیوم اکسید است که علت آن رسانایی حرارتی پایین‌تر آلومینیم اکسید است. همان‌طور که در جدول ۹ مشاهده می‌شود، به‌کارگیری نانوسیالات باعث افزایش محسوس عدد ناسلت و در نتیجه بهبود انتقال حرارت می‌گردد. نانوسیال آب/تیتانیوم اکسید در هر دو حالت گام ثابت و کاهشی نسبت به نانوسیال آب/آلومینیم اکسید عملکرد بهتری دارد. در طراحی گام کاهشی، جریان سیال به‌صورت تدریجی توسعه‌یافته و انتقال حرارت تقویت می‌شود، هرچند افت فشار اندکی افزایش می‌یابد. در مجموع، بیشترین بازده حرارتی (حدود ۸۵٪) مربوط به حالت نانوسیال آب/تیتانیوم اکسید با گام کاهشی است که نسبت به سیال پایه حدود ۲۵٪ بهبود عملکرد نشان می‌دهد. این نتایج تأیید می‌کنند که ترکیب هندسه‌ی بهینه با انتخاب مناسب نوع نانوسیال می‌تواند منجر به افزایش چشمگیر راندمان مبدل‌های پوسته و کوئل گردد.

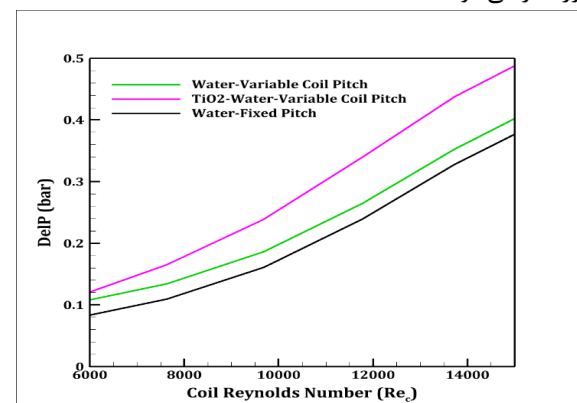
۴-۵- کانتور سرعت

شکل ۱۴ توزیع کیفی سرعت را در داخل کوئل مارپیچی نشان می‌دهد. کانتور سرعت، یک پروفیل سرعت غیریکنواخت را نشان

گرم/سرد و کاهش اختلاف دمای میانگین مؤثر یا تغییر در کارکرد تبادل حرارت مؤثر با افزایش سرعت است. (در سامانه‌های کوئلی گاهی افزایش عدد رینولدز به‌صورت غیرخطی رفتار مؤثر را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد).

در تمام مقادیر عدد رینولدز، نانوسیال آب/تیتانیوم اکسید بیشترین راندمان را نشان می‌دهد، سپس آب با گام متغیر و در آخر آب با گام ثابت قرار می‌گیرد. یعنی هم تغییر هندسه (variable pitch) و هم افزودن نانوذرات به‌طور تجمعی راندمان را افزایش می‌دهد. فاصله بین منحنی‌ها با تغییر عدد رینولدز کمتر یا بیشتر می‌شود؛ یعنی اثر نسبی نانوسیال و هندسه در رینولدزهای مختلف متفاوت است.

در شکل ۱۲ افت فشار کوئل نیز برحسب عدد رینولدز برای سیال آب با گام ثابت، سیال آب با گام متغیر و سیال آب/تیتانیوم اکسید بررسی شده است. هر سه منحنی صعودی‌اند؛ با افزایش دبی/سرعت و در نتیجه (عدد رینولدز کوئل) افت فشار بیشتر می‌شود. منحنی آب با گام متغیر، بالاتر از منحنی آب با گام ثابت است؛ یعنی در همان عدد رینولدز کوئل با گام متغیر افت فشار بیشتری از گام ثابت دارد. دلیل: تغییر پیوسته‌ی انحنا/گام، شدت جریان ثانویه را بیشتر می‌کند و انتقال تکانه عرضی را افزایش می‌دهد؛ بنابراین ضریب اصطکاک و نهایتاً گرادیان فشار بزرگ‌تر می‌شود.



شکل (۱۲): نمودار افت فشار برحسب عدد رینولدز برای آب با گام

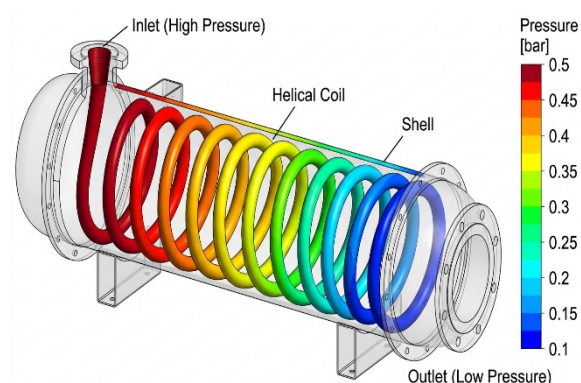
ثابت، آب با گام متغیر و سیال آب/تیتانیوم اکسید

این اثر با افزایش عدد رینولدز قوی‌تر هم می‌شود. منحنی صورتی‌رنگ (سیال آب و تیتانیوم اکسید) بالاتر از هر دو منحنی دیگر است. دلایل:

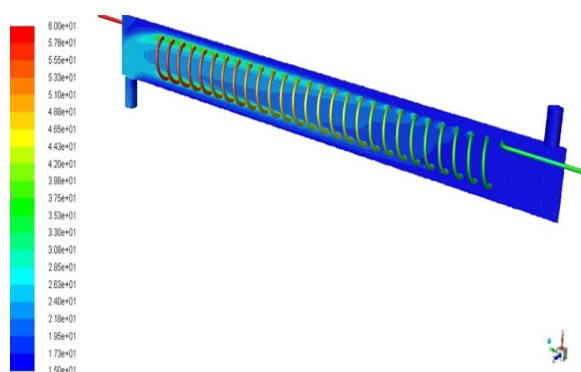
۱- افزایش ویسکوزیته مؤثر مخلوط حاوی نانوذرات ← افزایش اصطکاک.

۲- برهم‌کنش‌های ریزمقیاس ذرات با دیواره/سیال که می‌تواند ضریب اصطکاک را حتی در همان عدد رینولدز کمی افزایش دهد. در نتیجه اگرچه نانوسیال (به‌ویژه با گام متغیر) برای انتقال حرارت مفید است، هزینه‌ی پمپاژ را نیز بالاتر می‌برد. اثر هندسه (گام کاهشی) و اثر نانوذرات در ناحیه‌ی رینولدزهای بالاتر

گردابه‌ها و اختلاط حرارتی به‌خوبی انجام شده است. افزایش گرادیان دما در مجاورت جداره کویل نشان‌دهنده عملکرد موفق نانوسیال در افزایش نرخ انتقال حرارت نسبت به آب خالص است.



شکل (۱۵): توزیع کیفی فشار در داخل کویل مارپیچی



شکل (۱۶): توزیع کیفی دما در داخل کویل مارپیچی

۵-۷- کانتور خطوط جریان

همان‌طور که به‌صورت شماتیک در شکل نشان ۱۷ داده شده است، جریان در داخل هندسه مارپیچی با یک الگوی پیچیده سه‌بعدی مشخص می‌شود. خطوط جریان به‌وضوح توسعه گردش ثانویه (گردابه‌های دین) را نشان می‌دهند که باعث می‌شود سیال به‌جای یک مسیر محوری ساده، از یک مسیر چرخشی پیروی کند. این اختلاط تشدید شده که از طریق تعامل بین خطوط جریان و کانتورهای سرعت مشهود است، عامل بنیادی در افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در پیکربندی‌های پوسته و کویل است.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

۶-۱- جمع‌بندی نتایج

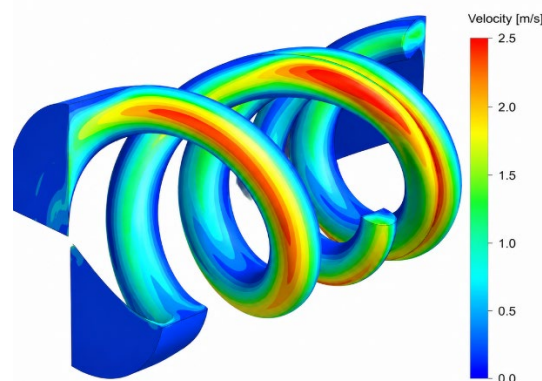
در این پژوهش، تأثیر عامل‌های هندسی و جریان، به‌ویژه گام مارپیچی کاهشی، بر عملکرد حرارتی مبدل حرارتی پوسته و لوله کوپلی با نانوسیال تیتانیوم اکسید و آلومینیم اکسید به‌صورت عددی بررسی شد.

می‌دهد که با افزایش مقدار سرعت به سمت دیواره خارجی انحنا مشخص می‌شود.

جدول (۹): مقایسه درصد بهبود بازده حرارتی حین به‌کارگیری

نانوسیالات				
نوع سیال / هندسه کویل	$(N\bar{u})$	$(\Delta P, Pa)$	بازده (%)	بهبود (%)
Water	82.4	115	68	—
Al ₂ O ₃ -water (Constant pitch)	98.7	130	75	+10.3
Al ₂ O ₃ -water (Decreasing pitch)	104.5	137	80	+17.6
TiO ₂ -water (Constant pitch)	108.3	134	78	+14.7
TiO ₂ -water (Decreasing pitch)	119.6	142	85	+25.0

این پدیده به نیروهای گریزازمرکز که بر سیال وارد می‌شوند و باعث ایجاد جریان‌های ثانویه (گردابه‌های دین) می‌شوند، نسبت داده می‌شود. این حرکت ثانویه باعث افزایش اختلاط جابه‌جایی در نانوسیال شده و در نهایت به بهبود عملکرد حرارتی کمک می‌کند.



شکل (۱۴): توزیع کیفی سرعت در داخل کویل مارپیچی

۵-۵- کانتور فشار

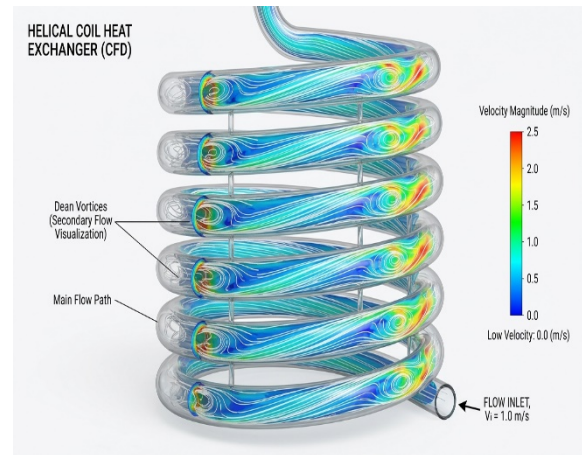
شکل ۱۵ توزیع کیفی فشار را در داخل کویل مارپیچی نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود، یک افت فشار تدریجی از ورودی (که با ناحیه قرمز نشان داده شده) به سمت خروجی (که با ناحیه آبی نشان داده شده) مشاهده می‌شود؛ این امر با افزایش عدد رینولدز و افزایش افت فشار $(\Delta P / \Delta P)$ که در بخش ۵-۳ بحث شد، همخوانی دارد.

۵-۶- کانتور دما

شکل ۱۶ کانتور دما را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، انتقال حرارت در نزدیکی جداره‌های کویل به دلیل ایجاد

۷- مراجع

- [1] Rostami M, Rahmati A, Farajollahi A, Deldarsheikhi J. Increasing the Mechanical and Thermal Performance of Liquid-Gas Micro Heat Exchangers with Cosine-Shaped and NACA0012 Airfoil Wall Geometries and Fouling Reduction. *Fluid Mechanics and Aerodynamics*. 2025;14(1). DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1404.14.1.8.1>
- [2] Emamifar A. Exergoeconomic assessment of employing a regenerative dual organic flash cycle with an ORC in a geothermal power plant. *Fluid Mechanics and Aerodynamics*. 2025;13(2). DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1403.13.2.5.3>
- [3] Pirkandi J, Hashemabadi M, Mahmoodi M. Analysis and finding optimal values of a heat exchanger for using in diesel engine exhaust system. *Fluid Mechanics and Aerodynamics*. 2023;11(2). DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1401.11.2.6.0>
- [4] Farajollahi A, Abadi M, Pourseifi M. Numerical Investigation of Heat Transfer Enhancement in an Automotive Radiator Utilizing Mini-Channel Tubes and Tubes Configuration. *Fluid Mechanics and Aerodynamics*. 2023;11(2). DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1401.11.2.4.8>
- [5] Shabi OA, Alhazmy M, Negeed ESR, Elzoghaly KO. Experimental investigation of shell and helical coiled heat exchanger with Al_2O_3 nanofluid over a wide range of particle concentration. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2024;10: 1386254. doi.org/10.3389/fmech.2024.1386254.
- [6] Rajhi W, Salih AH, Al-Farhany M, Alshammari M, Alzahrani M, Almutairi A, Alazemi A. Synergistic effect of outer helical fins and hybrid nanofluid on hydrothermal performance of shell and two-coil heat exchanger. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2025;72: 104123. doi.org/10.1016/j.csite.2025.104123.
- [7] Hassaan AM. Evaluating experimentally the viability of employing hybrid nanofluids as an operating fluid in a shell-and-tube heat exchanger. *Scientific Reports*. 2025;15: 4030. doi.org/10.1038/s41598-025-87149-7.
- [8] Karoui SHH, Mousavi Ajarostaghi SS, Jasim A. On the thermal performance of a shell and double coil heat exchanger: numerical analysis of the geometrical characteristics impacts. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2024;154: 107704. doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107704.
- [9] Abdullah MS. Experimental and numerical investigations on the heat transfer in shell and helical coiled tube heat exchanger with $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ nanoparticles.



شکل (۱۷): خطوط جریان داخل کوئل مارپیچی

نتایج حاصل را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- ۱- استفاده از گام مارپیچی کاهش دهنده سبب افزایش ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت نسبت به مدل‌های دارای گام ثابت گردید.
- ۲- به کارگیری نانوسیال آب/تیتانیوم اکسید منجر به بهبود محسوس بازده حرارتی مبدل شد، هرچند که با افزایش غلظت نانوذرات، افت فشار نیز اندکی افزایش یافت.
- ۳- مقایسه نتایج نشان داد که ترکیب نانوسیال و طراحی هندسی بهینه (گام مارپیچی کاهش دهنده) می‌تواند هم‌زمان موجب ارتقای راندمان حرارتی و حفظ تعادل هیدرولیکی در مبدل شود.
- ۴- تحلیل حساسیت عامل‌های جریان (عدد رینولدز و سرعت جریان) بیانگر آن است که تغییر این عوامل اثر قابل‌توجهی بر انتقال حرارت داشته و طراحی بهینه باید باتوجه به شرایط عملیاتی صورت پذیرد.

۶-۲- محدودیت‌های تحقیق

این پژوهش صرفاً بر پایه شبیه‌سازی عددی انجام شده و داده‌های تجربی برای اعتبارسنجی کامل مدل در دسترس نبوده است. تنها دو نوع نانوسیال آب/تیتانیوم اکسید و نانوسیال آب/آلومینیم اکسید در نظر گرفته شد. محدوده عدد رینولدز محدود بوده و شرایط جریان بسیار آرام یا بسیار آشفته بررسی نشده است.

۶-۳- پیشنهادها برای تحقیقات آینده

انجام آزمایش‌های تجربی برای تأیید صحت نتایج عددی و توسعه روابط همبستگی معتبر. بررسی نانوسیالات هیبریدی یا نانوسیالات با غلظت‌های متفاوت برای ارزیابی اثرات ترکیبی بر انتقال حرارت و افت فشار. مطالعه محدوده‌های وسیع‌تر جریان آرام و درهم و تحلیل اثر عامل‌های بی‌بعد مانند عدد پرانتل و گراشوف. استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه برای یافتن طراحی هندسی بهینه.

- [20] Abdullah MS. Experimental and numerical investigations on the heat transfer in shell and helical coiled tube heat exchanger with α -Al₂O₃ nanoparticles. *Diyala Journal of Engineering Sciences (DJES)*. 2023;16(4): 110–118. Doi: 10.24237/djes.2023.16306
- [21] Karouei SHH, Yousefi A, Zamzamian MA. On the thermal performance of a shell and double coil heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2024; 210: 124138. Doi: 10.1016/j.csite.2024.105349
- [22] Polyhedral Elements for Fast, Accurate Flow Resolution,” ANSYS White Paper, Canonsburg, PA, USA, 2020. Available: <https://www.ansys.com/content/dam/resource-center/white-paper/ansys-fluent-mosaic-technology-wp.pdf>
- Diyala Journal of Engineering Sciences (DJES). 2023;16(3): 64–81.
- [10] Bacak AY, Ghasemi H, Hatami M, Salman S, Sadeghzadeh S. Hydrothermal behaviour of hybrid nanofluid flow in a shell-and conical coil tube heat exchanger: numerical approach. *Journal of Thermal Science*. 2024;33(4) 1183–1205. doi.org/10.1007/s11630-023 .
- [11] Maghrabie HM, Attalla M, Mohsen AAA. Performance assessment of a shell and helically coiled tube heat exchanger with variable orientations utilizing different nanofluids. *Applied Thermal Engineering*. 2021;182: 116013. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116013.
- [12] Salem MR, Elshazly, Sakr RY, Ali RK. Experimental investigation of coil curvature effect on heat transfer and pressure drop characteristics of shell and coil heat exchanger. *Journal of Thermal Science and Engineering Application*. 2021;7: 011005. doi.org/10.1115/1.4028612.
- [13] Abu-Hamdeh NH, Rashad ARB, Tlili I. Analysis of the thermal and hydraulic performance of the sector-by-sector helically coiled tube heat exchangers as a new type of heat exchangers. *International Journal of Thermal Sciences*. 2020;150: 106229. Doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2019.106229
- [14] Zheng D, Wang J, Chen Z, Baleta J, Sundén B. Performance analysis of a plate heat exchanger using various nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;158: 119993. Doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119993
- [15] Sharifi AH, Zahmatkesh I, Bamoharram FF. Effect of concentration and temperature on viscosity of titanium dioxide nanofluid in saltwater as base fluid. *Journal of Science and Engineering Elites*. 2019;4(5) 62–67. Doi: JR_SEE-4-5_006
- [16] Sheikhzadeh GA, Mollamahdi M. Effects of sedimentation of nanoparticles on flow, heat and mass transfer of Al₂O₃-water nanofluid in a cavity. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 2017;49(3): 581–594. doi: 10.22060/mej.2016.745. Doi: 10.22060/mej.2016.745
- [17] Hassaan AM. Evaluating experimentally the viability of employing hybrid nanofluids as an operating fluid in a shell-and-tube heat exchanger. *Scientific Reports*. 2025;15: 4030. Doi: 10.1038/s41598-025-87149-7
- [18] Rajhi W, Almeshaal MA, Al-Otaibi F. Synergistic effect of outer helical fins and hybrid nanofluid in shell-and-coil heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2025;224: 124987. Doi: 10.1016/j.csite.2025.106238
- [19] Nield DA, Kuznetsov AV. Recent developments in convective heat transfer in nanofluids. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, vol. 36, no. 4, pp. 823–836, 2022. Doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.434