



Numerical investigation of the effect of thermophysical properties of nanofluid on fluid flow and heat transfer in a tube in presence of magnetic field

Y. Malmir-Chegini¹, N. Amanifard^{2*}

¹ Faculty of Mechanical Engineering, University Campus 2, University of Guilan, Rasht, Iran

² Thermo-Fluids Department, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Iran

ABSTRACT: In this paper, flow characteristics and heat transfer in a smooth horizontal pipe subjected to forced heat convection with constant wall heat flux in the presence of magnetohydrodynamic have been computationally analyzed. The effects of temperature-dependent density, specific heat capacity, thermal conductivity, and viscosity on heat transfer and frictional flow characteristics of transformer oil and local and average heat transfer coefficient have been numerically investigated. Firstly, to validate, the present numerical result has been compared with the analytical and experimental results through a smooth pipe, which shows a good agreement. A significant deviation between constant and variable properties has been achieved. Changes in fluid velocity profiles have led to changes in fluid characteristics including coefficient of friction and heat transfer coefficient. By considering the changes in the parameters, it was observed that the viscosity of the base fluid and the nanofluid have the maximum effect with approximately 30 and 25% increase in heat transfer coefficient and apparent friction coefficient relative to the fixed properties, respectively. Despite the dependence of the thermal properties of the nanofluid on temperature-dependent viscosity, the change in thermal conductivity leads to 35% increase in the heat transfer coefficient in the presence of a magnetic field.

Review History:

Received: Sep. 02, 2020

Revised: Nov. 15, 2020

Accepted: Dec. 25, 2020

Available Online: Jan. 22, 2021

Keywords:

Numerical analysis

Fluid properties

Magnetic field

Nanofluid

Heat transfer

1. INTRODUCTION

Generally, the theoretical relationships proposed for heat transfer in the fluid flow in tubes do not take into account the effects of the temperature gradient on the axial and radial velocity components. Harms et al. [1] analyzed the fully developed laminar flows in a semicircular duct with temperature-dependent viscosity variations. Both the constant temperature and constant heat flux boundary conditions were considered. Numerical solutions for the flow velocity and the temperature fields have been obtained by the finite difference technique. They revealed that the friction factor and Nusselt number results display a strong dependence on the viscosity ratio.

Liu et al. [2-3] numerically investigated the effects of variable properties on flow and temperature fields on microchannel. They showed that flow and temperature fields are affected by the effect of temperature on viscosity and thermal conductivity. Herwig and Mahulikar [4] investigated the effects of variable properties on single-phase and incompressible flow. They reported that the error in the Nusselt number in terms of variable properties compared to the state of constant properties is due to the dependence of viscosity and thermal conductivity on temperature. Besides, many studies have been performed on micro scales that indicate the effect of changing the properties by gradient temperature on the heat transfer coefficient [5-6]. In the present study, the effect of temperature in the base fluid,

nanofluid, and nanofluid under a non-uniform magnetic field on the coefficient of friction and average heat transfer coefficient has been investigated.

2. GEOMETRY

The present geometry consists of a semi-insulated horizontal tube under a constant heat flux with a diameter of 10 cm and a length of 4 m (Fig. 1).

In this study, transformer oil was selected as the working fluid. It is worth noting that solar collectors generally use mineral oils due to their high heat absorption.

3. GOVERNING EQUATION

In this section, the equations of continuity, momentum, energy with the assumption of laminar flow, incompressible Newtonian flow by applying a magnetic field are presented. The continuity equation is obtained as follows:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

By considering Kelvin and Lorentz forces, the momentum conservation equation is obtained as follows:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g} + \mu_0 (\vec{M} \cdot \nabla) \vec{H} + \sigma (\vec{V} \times \vec{B}) \times \vec{B} \quad (2)$$

*Corresponding author's email: namanif@guilan.ac.ir



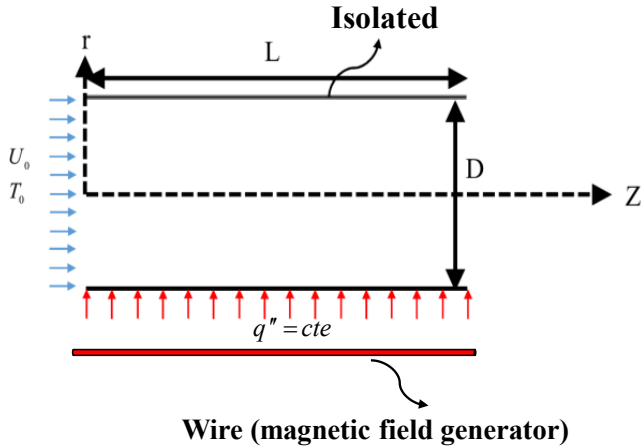


Fig. 1. Schematic view of the computational domain.

By considering the Joule heating effect and magnetocaloric terms, the energy equation is given as follows:

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} - \mu_0 \vec{H} \cdot \left(\frac{\partial \vec{M}}{\partial T} \right)_H \frac{DT}{Dt} + \mu_0 T \left(\frac{\partial \vec{M}}{\partial T} \right)_H \cdot \frac{D\vec{H}}{Dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \sigma |\vec{v} \times \vec{B}|^2 \quad (3)$$

4. RESULTS AND DISCUSSION

Figs. 2 and 3 show the variations of the average heat transfer coefficient of the variable properties (relative to the constant properties) for different heat fluxes on the base fluid. According to the results, it can be deduced that the variations of the average heat transfer coefficient of the

variable viscosity properties are closer to the results of all the variable properties. In other words, viscosity is a more effective impact than other properties. Most deviations are related to the variable viscosity, all variable properties, variable coefficient of thermal conductivity, variable density, and variable specific heat capacity, respectively. Also, these deviations increase with rising heat flux.

As shown in Fig. 3, the effect of the temperature-dependent viscosity in comparison with the temperature-dependent density on the apparent friction coefficient is significant. Therefore, it can be highlighted that finding the trend of variations in viscosity as a function of temperature can provide a correct approximation of pressure changes.

By adding nanoparticles to the base fluid, changing the properties of the base fluid, all variable properties, variable viscosity, variable thermal conductivity, variable specific heat capacity, and variable density have a remarkable effect on the results, respectively. Also, by increasing heat flux, deviations in heat transfer coefficient have increased due to more impact of fluid properties on temperature. Moreover, only the viscosity determines the hydrodynamic behavior of the fluid for the nanofluid.

By comparing the deviations of the average heat transfer coefficient, it is observed that all variable properties, the variable thermal conductivity, the variable viscosity, variable specific heat capacity, and the variable density of the nanofluid under the magnetic field have the more impact on the results, respectively. Variable density and variable viscosity properties are the factors that change the hydrodynamic behaviors, as the magnetic field increases, the uniformity of heat transfer throughout the tube increases, and the effects of temperature on viscosity and density decrease.

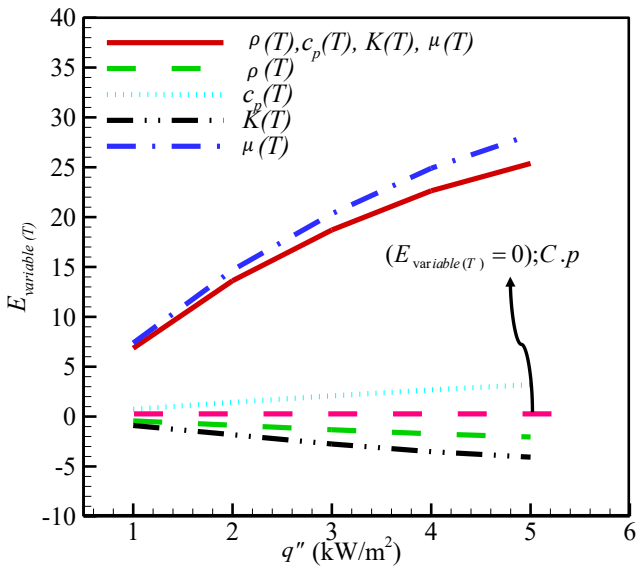


Fig. 2. Variations of the average heat transfer coefficient of the base fluid for variable properties to constant properties at different heat fluxes for Re=1000.

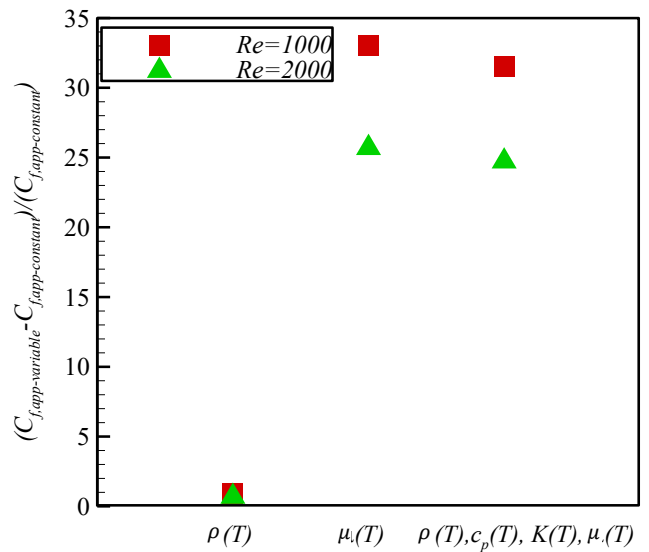


Fig. 3. Variation of the apparent friction coefficient of the properties of the base fluid at q''=delta kW/m^2

5. CONCLUSIONS

In the present study, the effect of variable properties of fluid due to temperature change has been investigated numerically and the following items have been gained.

· In the base fluid, in terms of the deviation of heat transfer coefficient, the variable viscosity, and all variable properties have the same impact. In other words, viscosity is more effective than other properties ($E_{\mu(T)} > E_{\mu(T),K(T),\rho(T),C_p(T)} > E_{K(T)} > E_{\rho(T)} > E_{C_p(T)}$). Besides, by increasing heat flux the deviation rises.

· In nanofluid without a magnetic field, all variable properties, variable viscosity, variable thermal conductivity, variable specific heat capacity and variable density have the maximum effect on deviations of heat transfer coefficient, respectively ($E_{\mu(T),K(T),\rho(T),C_p(T)} > E_{\mu(T)} > E_{K(T)} > E_{\rho(T)} > E_{C_p(T)}$)

· In a nanofluid under a magnetic field, the deviation of the average heat transfer coefficient decrease as the magnetic field increases. Also, all variable properties, variable thermal conductivity, variable viscosity, variable specific heat capacity, and variable density have more influence on deviations of heat transfer coefficient, respectively.

($E_{\mu(T),K(T),\rho(T),C_p(T)} > E_{K(T)} > E_{\mu(T)} > E_{C_p(T)} > E_{\rho(T)}$).

REFERENCES

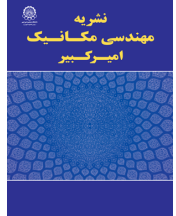
- [1] T. Harms, M. Jog, R. Manglik, Effects of temperature-dependent viscosity variations and boundary conditions on fully developed laminar forced convection in a semicircular duct, *Journal of Heat Transfer (Transactions of the ASME)*, 120 (1998) 600-605.
- [2] J. Liu, X. Peng, B. Wang, Variable-property effect on liquid flow and heat transfer in microchannels, *Chemical Engineering Journal*, 141(3) (2008) 346-353.
- [3] J.T. Liu, X.F. Peng, W.M. Yan, Numerical study of fluid flow and heat transfer in microchannel cooling passages, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(10) (2007) 1855-1864.
- [4] H. Herwig, S.P. Mahulikar, Variable property effects in single-phase incompressible flows through microchannels, *International Journal of Thermal Sciences*, 45(10) (2006) 977-981.
- [5] S. Mahulikar, H. Herwig, O. Hausner, F. Kock, Laminar gas micro-flow convection characteristics due to steep density gradients, *EPL (Europhysics Letters)*, 68(6) (2004) 811.
- [6] S.P. Mahulikar, H. Herwig, Physical effects in pure continuum-based laminar micro-convection due to variation of gas properties, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(18) (2006) 4116.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Y. Malmir-Chegini, N. Amanifard, Numerical investigation of the effect of thermophysical properties of nanofluid on fluid flow and heat transfer in a tube in presence of magnetic field, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(7) (2021) 1025-1028.

DOI: [10.22060/mej.2021.18936.6924](https://doi.org/10.22060/mej.2021.18936.6924)





بررسی عددی تاثیر خواص ترموفیزیکی نانوسیال بر جریان سیال و انتقال حرارت در یک لوله در حضور میدان مغناطیسی

یحیی مالمیرچگینی، نیما امانی فرد*

گروه حرارت و سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۱۲
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۸/۲۵
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۱/۰۳

کلمات کلیدی:

تحلیل عددی
خواص سیال
میدان مغناطیسی
نانوسیال
انتقال حرارت

خلاصه: در این مطالعه، جریان هیدرودینامیکی و انتقال حرارت در یک لوله افقی صاف نیمه‌عایق، تحت انتقال حرارت جابجایی اجباری با شار حرارتی ثابت در حضور میدان مغناطیسی به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در نتیجه، اثرات تغییرات چگالی، ظرفیت حرارتی ویژه، ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته سیال وابسته به دما بر مشخصه‌های اصطکاکی جریان و ضریب انتقال حرارت موضعی و متوسط مورد مطالعه قرار گرفته است. ابتدا به منظور اعتبارسنجی، نتایج عددی حاضر با نتایج تحلیلی و همچنین نتایج تجربی در یک لوله صاف تحت شار حرارتی ثابت مقایسه شده که از تطابق مطلوبی برخوردار می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که اختلاف چشمگیری بین نتایج خواص ثابت و خواص متغیر برای سیال روغن ترانسفورماتور وجود دارد. تغییرات پروفیل سرعت سیال، منجر به تغییر در مشخصه‌های سیال از جمله ضریب اصطکاک و ضریب انتقال حرارت شده است. با در نظر گرفتن تغییرات پارامترها نسبت به خواص ثابت مشاهده شد که ویسکوزیته سیال پایه و نانو سیال به ترتیب با تقریب ۳۰ و ۲۵ درصد افزایش در ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک ظاهری نسبت به خواص ثابت، بیشینه اثر گذاری را دارد. با وجود وابستگی خواص حرارتی نانو سیال به ویسکوزیته وابسته به دما، تغییر ضریب هدایت حرارتی منجر به افزایش ۳۵ درصدی ضریب انتقال حرارت در حضور میدان مغناطیسی شده است.

۱- مقدمه

مطلوب نبودن ضریب هدایت حرارتی، فقدان جاذب‌های مطلوب تابش حرارتی، مناسب نبودن خواص ترموفیزیکی سیال، تحت کنترل نبودن پروفیل سرعت و دما برای افزایش تبادل حرارت، عدم استفاده از قابلیت ورتیسیت به منظور افزایش تبادل حرارت و پایین بودن ضریب انتقال حرارت جابجایی است. بنابراین شناخت خواص سیال و نحوه انتقال حرارت از اهمیت بالایی برخوردار است.

شایان ذکر است که هدف عمده مطالعات محققان، افزایش انتقال حرارت در لوله‌ها می‌باشد. به عبارتی دیگر، بهبود انتقال حرارت در جریان سیال عبوری از مجاری مختلف، نتایج مثبتی از قبیل: کاهش انرژی مورد نیاز برای پمپاژ سیال عبوری، افزایش راندمان حرارتی، افزایش بهره‌وری اقتصادی، افزایش طول عمر و کاهش حجم

انتقال حرارت در جریان لوله به طور گسترده‌ای در صنایع تبرید، تهویه مطبوع، برق، شیمیایی و پتروشیمی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای برون رفت از شرایط سخت رقابتی حاکم بر بازار تجارت، الزام استفاده از تجهیزات با ابعاد کوچکتر و راندمان حرارتی بالاتر ضرورت پیدا می‌نماید. بزرگترین محدودیت تجهیزات حرارتی، عدم توانایی حداکثر انتقال شار حرارتی وارده بر سطوح توسط سیال می‌باشد به طوری که دمای سطح به حدی افزایش می‌یابد که سیال تغییر فاز داده و یا منجر به صدمات فیزیکی در تجهیزات می‌شود. مهمترین علل محدودیت در انتقال شار حرارتی وارده بر سطوح جانبی مجاری،

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: namanif@guilan.ac.ir



تجهیزات مورد نیاز برای انتقال انرژی به همراه خواهدداشت [۱]. روش‌های بهبود انتقال حرارت به دو گروه عمده؛ روش‌های فعال و غیرفعال طبقه‌بندی می‌شوند. در روش‌های فعال راهکارهایی همچون اختلاط مکانیکی، چرخش، لرزش و اعمال میدان‌های مغناطیسی و الکترواستاتیکی به کار می‌روند و در بخش غیرفعال از راهکارهایی همچون تغییر در مشخصه‌های سیال، تغییر شکل و افزایش سطوح، ایجاد زبری و دگرگونی و آشفتنی جریان، استفاده می‌شود.

یکی از روش‌های افزایش انتقال حرارت استفاده از نانو سیالات و اعمال میدان مغناطیسی می‌باشد. به عبارتی دیگر، به منظور کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، طراحی تجهیزات کوچک ابعاد و توسعه محدوده دمای کاری سیالات عامل تبادل حرارت، می‌توان از نانوسیال در حضور میدان مغناطیسی جهت افزایش تبادل حرارت استفاده چشمگیری نمود. نانوسیال مغناطیسی مخلوطی از نانوذرات مغناطیسی با پوشش نگهدارنده به صورت معلق در یک مایع پایه مثل آب، روغن یا اتیلن گلیکول می‌باشد. نانوذرات مگنتیت Fe_3O_4 ، آهن، کبالت و نیکل از پرکاربردترین نانوذرات در نانو سیالات می‌باشند. با توجه به اینکه نانوسیالات مذکور از میدان مغناطیسی تاثیرپذیر می‌باشند بنابراین می‌توان با اعمال میدان مغناطیسی بر میدان جریان سیال، رفتار هیدرودینامیکی و هیدروترومال نانوسیال را تحت کنترل هدفمند درآورد. در سالهای اخیر مقالات متعددی به بررسی انتقال حرارت نانوسیالات در حضور میدان مغناطیسی پرداخته‌اند که در ادامه به مهمترین مطالعات مرتبط به مطالعه حاضر، اشاره شده‌است. عاشوری و همکاران [۲] در سال ۲۰۱۰ اثر میدان مغناطیسی در یک حفره دوبعدی بر انتقال حرارت نانوسیال را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها نیروی کلویین و انرژی مگنتوکالریک را در معادلات حاکم بر مومنتم و انرژی در نظر گرفتند و با استفاده از نتایج بدست‌آمده رابطه‌ای برای ناسلت در شرایط خواص ثابت ارائه دادند که با نتایج عددی آنها ۶٪ خطا دارد. عزیزیان و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۴ انتقال حرارت در لوله عمودی حامل نانوسیال آب و مگنتیت را در حضور میدان مغناطیسی به صورت آزمایشگاهی بررسی نموده‌اند. مطابق نتایج آنها در شرایطی که ضریب انتقال حرارت تا چهار برابر افزایش یافته، افت فشار تغییر محسوسی نداشته‌است. موسوی و همکاران در سال ۲۰۱۶ اثر میدان مغناطیسی غیر یکنواخت ناشی از سیم حامل جریان الکتریکی عمود بر یک کانال سینوسی دوبعدی

حامل نانوسیال آب و مگنتیت با در نظر گرفتن نیروی کلویین در معادلات مومنتم و بدون در نظر گرفتن مگنتوکالریک در معادلات انرژی با روش حجم محدود بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که میدان مغناطیسی تولید گردابه‌ها را افزایش داده و در اثر آنها، مقدار ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد [۴]. شیخ‌الاسلامی و شهزاد در سال ۲۰۱۸ اثر میدان مغناطیسی غیریکنواخت ناشی از یک سیم حامل جریان الکتریکی در یک حفره با محیط متخلخل حامل نانوسیال آب و مگنتیت با لحاظ نمودن نیروی لورنز در معادلات مومنتم و تشعشع در معادله انرژی با روش المان محدود بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که با افزایش عدد هارتمن سرعت سیال و انتقال حرارت کاهش می‌یابد [۵]. چگینی و امانی فرد [۶] اثر میدان مغناطیسی غیریکنواخت ناشی از یک وایر حامل جریان الکتریکی بر روی یک لوله افقی نیمه عایق حامل نانوسیال روغن ترانسفورماتور-مگنتیت با هدف افزایش انتقال حرارت و بهبود کارایی حرارتی، اثر تغییر پارامترهای مختلف بر روی ضریب انتقال حرارت را بررسی و به منظور ایجاد امکان استفاده از نتایج این مطالعه در کاربردهای تبادل حرارت صنعتی روابط کلی برای عدد ناسلت درون یک لوله افقی نیمه عایق با استفاده از شبیه‌سازی عددی استخراج شده‌است.

از طرفی، طراحان تجهیزات انتقال حرارت همیشه نیازمند روابط جامع برای محاسبه انتقال حرارت و افت فشار می‌باشند [۷]. عموماً روابط تئوری که برای انتقال حرارت در جریان سیال در لوله‌ها ارائه شده‌است اثرات گرادیان دما در مولفه‌های محوری و شعاعی سرعت در نظر گرفته نشده‌است. به دلیل وابستگی ویسکوزیته به دما در شارهای حرارتی بالا در بسیاری از مایعات، یک گرادیان ویسکوزیته شعاعی بزرگ ایجاد شده که باعث می‌شود پروفیل سرعت در مقایسه با جریان خواص ثابت تفاوت قابل توجهی داشته‌باشد. بنابراین روابطی که از طریق محاسبات عددی در شرایط خواص ثابت حاصل می‌شود می‌تواند خطای فاحشی ایجاد نماید. هارمز و همکاران [۸] به صورت عددی جریان‌های آرام کاملاً توسعه‌یافته در مجرای نیم دایره‌ای با تغییرات ویسکوزیته وابسته به دما را مورد بررسی قرار دادند. آنها هر دو شرایط دما ثابت و شار ثابت برای مساله در نظر گرفتند و با استفاده از روش اختلاف محدود، میدان‌های سرعت و دمای سیال را محاسبه نموده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک و عدد ناسلت وابستگی شدیدی به ویسکوزیته سیال دارند. لیو و همکاران

ج) تاثیر خواص متغیر ناشی از تغییر دما بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی و هیدروترمال نانو سیال تحت تاثیر میدان مغناطیسی

۲- هندسه مسئله

با توجه به اینکه در بعضی از کاربردهای صنعتی تنها نیمی از لوله‌ها در معرض نور شدید خورشید قرار می‌گیرند [۱۶]، بنابراین برای مدل‌سازی آن از یک لوله نیمه عایق افقی شار ثابت بهره گرفته شده که قطر آن ۱۰ سانتیمتر و طول آن ۴ متر است (شکل ۱).

در این مطالعه روغن ترانسفورماتور به عنوان سیال عامل مورد مطالعه انتخاب شده‌است. شایان ذکر است که در جمع‌کننده‌های خورشیدی عموماً از روغن‌های معدنی به دلیل جذب بالای حرارت استفاده می‌کنند. برای بررسی تاثیر ویسکوزیته سینماتیکی روغن تابع دما بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی و هیدروترمالی، از استاندارد ASTM D341 مطابق با رابطه زیر بهره برده شده‌است.

$$\log \log(\nu + 0.7) = A - B \log T \quad (1)$$

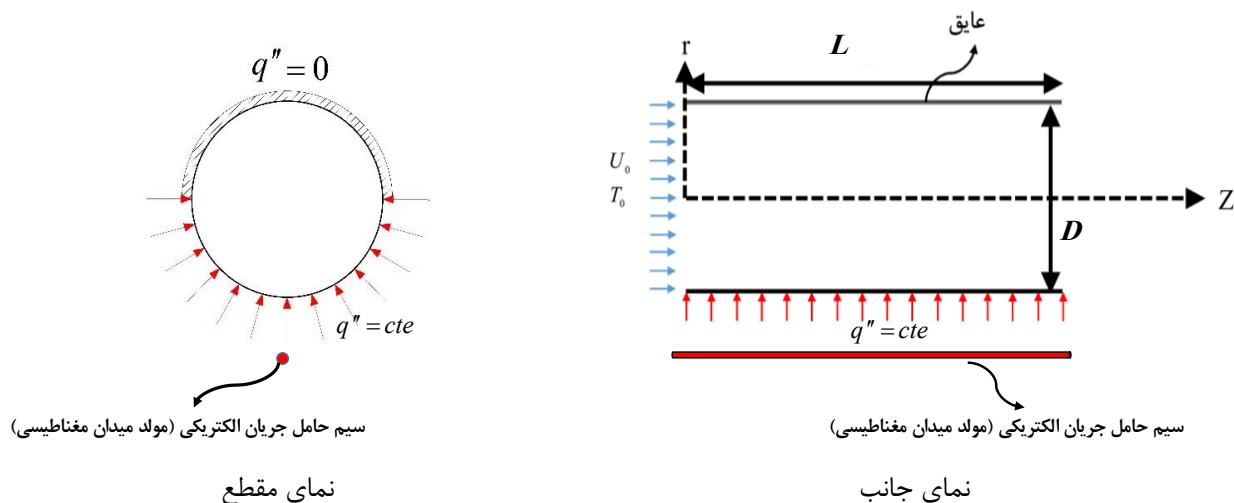
در رابطه فوق، دما بر حسب کلون و ویسکوزیته بر حسب سانتی استوکس است. ضرایب A و B برای روغن ترانسفورماتور به ترتیب ۱۰/۰۹ و ۴/۰۳۱ می‌باشند.

معادلات حاصل از برازش منحنی بر داده‌های آزمایشگاهی برای روغن ترانسفورماتور به صورت زیر استفاده شده‌است.

[۹ و ۱۰] به صورت عددی اثر خواص متغیر بر میدان سیال و دما در خنک‌کاری میکروکانال‌ها را مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که میدان سیال و دما به دلیل تاثیر دما بر ویسکوزیته و هدایت حرارتی تحت تاثیر قرار می‌گیرند. ماهولیکار و هرویگ [۱۱] میزان اثرگذاری ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی ناشی از تغییر دما بر انتقال حرارت در میکروکانال‌ها را مورد بررسی قرار دادند. آنها مشاهده نمودند که میزان اثرگذاری هدایت حرارتی نسبت به ویسکوزیته بر ضریب انتقال حرارت اجباری بسیار بیشتر می‌باشد. هرویگ و ماهولیکار [۱۲] اثرات خواص متغیر را بر سیالات تک فاز و غیرقابل تراکم مورد بررسی قرار دادند. آنها گزارش نمودند که خطا در عدد ناسلت در شرایط خواص متغیر نسبت به حالت خواص ثابت، به دلیل وابستگی ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی به دما می‌باشد. علاوه بر این مطالعات بسیار زیادی در مقیاس‌های میکرو انجام شده‌است که همه دلالت بر تاثیر تغییر خواص تابع دما بر ضریب انتقال حرارت دارد [۱۳-۱۵]. در مطالعه حاضر اثر دما در سیال پایه، نانو سیال و نانو سیال تحت میدان مغناطیسی غیریکنواخت بر ضریب اصطکاک و ضریب انتقال حرارت موضعی و متوسط بررسی شده‌است. که مراحل آن در سه بخش زیر مورد مطالعه قرار گرفته‌است:

الف) تاثیر خواص متغیر ناشی از تغییر دما بر پارامترهای هیدرودینامیکی و هیدروترمال سیال پایه

ب) تاثیر خواص متغیر ناشی از تغییر دما بر شرایط هیدرودینامیکی و هیدروترمال نانو سیال



شکل ۱. نمایی شماتیک از دامنه محاسباتی

Fig. 1. Schematic view of the computational domain

معادله بقاء انرژی با در نظر گرفتن اثر ژول هیتینگ و اثر مگنتو کالریک به صورت رابطه (۱۱) می‌باشد.

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} - \mu_0 \vec{H} \cdot \left(\frac{\partial \vec{M}}{\partial T} \right)_H \frac{DT}{Dt} + \mu_0 T \left(\frac{\partial \vec{M}}{\partial T} \right)_H \cdot \frac{D\vec{H}}{Dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \sigma |\vec{V} \times \vec{B}|^2 \quad (11)$$

با استفاده از روش مقایسه مرتبه‌ها می‌توان اثبات نمود که عبارتهای مرتبط به میدان الکتریکی در مقایسه با عبارتهای دیگر معادله انرژی ناچیز بوده و حذف می‌شوند. میدان مغناطیسی خارجی حاصل از سیم حامل جریان الکتریکی از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۶].

$$H = \frac{I}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2}} \quad (12)$$

مغناطیس‌پذیری فروسیال M از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$M = \frac{6m_p \phi}{\pi d_p^3} \left[\coth(\xi) - \frac{1}{\xi} \right] \quad (13)$$

که در آن ممان مغناطیسی ذره به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$m_p = \frac{4\mu_B \pi d_p^3}{6 \times 91.25 \times 10^{-30}} \quad (14)$$

$$\xi = \frac{\mu_0 m_p H}{k_B T} \quad (15)$$

همچنین عدد بی‌بعد مغناطیسی برای مقایسه پارامترهای موثر بصورت زیر بیان شده‌است:

$$Mn = \frac{\mu_0 \chi H_r^2 d_p^2}{\rho_{nf} \alpha_{nf}^2} \quad (16)$$

۳-۱- شرایط مرزی هیدرودینامیکی و حرارتی

شرایط مرزی در مسائل دینامیک سیالات محاسباتی با توجه به فیزیک حاکم تنظیم می‌شوند. بنابراین فرض شده‌است که سیال با سرعت و دمای یکنواخت وارد لوله شده‌است. همچنین در خروجی جریان نیز شرط جریان خروجی در نظر گرفته شده‌است. دیواره پایین

$$\rho = 891 - 0.6(T - 273.15) \quad (2)$$

$$C_p = 1606.1 \ln T - 7403.3 \quad (3)$$

$$k = 0.112 - 7 \times 10^{-5}(T - 273.15) \quad (4)$$

برای بررسی تاثیر نانو بر خواص سیال از رابطه تجربی آبرومند و همکاران [۱۷] به صورت زیر برای ضریب هدایت حرارتی، ویسکوزیته سیال، ظرفیت حرارتی ویژه و چگالی نانو سیال بهره برده شده‌است:

$$k_{nf} = (3.9 \times 10^{-5} T - 0.0305) \phi^2 + (0.086 - 1.6 \times 10^{-4} T) \phi + 3.1 \times 10^{-4} T + 0.129 - 5.77 \times 10^{-6} k_p - 40 \times 10^{-4} \quad (5)$$

$$\mu_{nf} = \mu_f (1.15 + 1.061 \phi - 0.5442 \phi^2 + 0.1181 \phi^3) \quad (6)$$

$$\rho_{nf} = \phi \rho_p + (1 - \phi) \rho_f \quad (7)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = \phi (\rho C_p)_p + (1 - \phi) (\rho C_p)_f \quad (8)$$

۳- معادلات حاکم و شرایط مرزی

در این قسمت معادلات پیوستگی، مومنتم، انرژی با فرض جریان آرام، سیال نیوتنی تراکم ناپذیر با اعمال میدان مغناطیسی ارائه می‌شوند.

معادله‌ی پیوستگی بصورت رابطه (۹) می‌باشد:

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

معادله‌ی بقاء مومنتم با در نظر گرفتن نیروی کلویین و لورنتس بصورت رابطه (۱۰) می‌باشد:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g} + \mu_0 (\vec{M} \cdot \nabla) \vec{H} + \sigma (\vec{V} \times \vec{B}) \times \vec{B}, \vec{M} = \frac{\vec{H}}{|\vec{H}|} |\vec{M}(H, T)|, \mu_0 (\vec{M} \cdot \nabla) \vec{H} = \mu_0 \left(\frac{|\vec{M}|}{|\vec{H}|} \right) (\vec{H} \cdot \nabla) \vec{H} = \quad (10)$$

$$\mu_0 \left(\frac{|\vec{M}|}{|\vec{H}|} \right) \left(\frac{1}{2} \vec{\nabla} (\vec{H} \cdot \vec{H}) - \vec{H} \times (\vec{\nabla} \times \vec{H}) \right) =$$

$$\mu_0 \left(\frac{|\vec{M}|}{|\vec{H}|} \right) \left(\frac{1}{2} \vec{\nabla} |\vec{H}|^2 - (\vec{H} \times \vec{J}) \right) =$$

$$\mu_0 |\vec{M}| |\vec{\nabla} \vec{H}| - \left(\frac{|\vec{M}|}{|\vec{H}|} \right) (\vec{B} \times \vec{J}) = \mu_0 M \vec{\nabla} H$$

لوله تحت شار حرارتی ثابت و دیواره بالا عایق فرض شده است.

همچنین فشار بی بعد از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$P^* = \frac{P}{1/2\rho V_{in}^2} \quad (21)$$

در این رابطه V_{in} سرعت در ورودی لوله می باشد.

طول بی بعد طبق رابطه زیر تعریف می شود:

$$x^+ = \frac{x/D}{Re_{in}} \quad (22)$$

در این رابطه D قطر لوله بوده عدد رینولدز از رابطه زیر محاسبه

می شود:

$$Re_{in} = \frac{\rho_{in} V_{in} D}{\mu_{in}} \quad (23)$$

همچنین ضریب اصطکاک ظاهری برای جریان در حال توسعه از

رابطه زیر محاسبه می شود.

$$C_{f,app}(x) = \frac{P_{in} - P(x)}{1/2\rho u_{in}^2} \frac{D}{4x} \quad (24)$$

همچنین درصد تغییر ضریب انتقال حرارت متوسط ناشی از تغییر

خواص نیز از رابطه زیر برای هر متغیر قابل محاسبه است:

$$E_{variable(T)} = \frac{|\bar{h}_{variable(T)} - \bar{h}_{C.p}|}{\bar{h}_{C.p}} \times 100 \quad (25)$$

۶- شبکه محاسباتی و استقلال حل از شبکه محاسباتی

شبکه بندی ناحیه محاسباتی توسط نرم افزار تجاری گمبیت ۲٫۴

به صورت سازمان یافته، غیریکنواخت و شش وجهی ایجاد شده و

همچنین در نواحی که گرادیان های شدید مورد انتظار است از تراکم

بیشتری نسبت به دیگر نواحی استفاده شده است. به عنوان مثال،

تغییرات دما و سرعت در نزدیکی دیواره ها که دارای گرادیان های

شدید می باشند و به همین دلیل، همان گونه که در شکل ۲ مشاهده

می شود، تراکم شبکه بندی در این نواحی نسبت به دیگر نواحی بیشتر

می باشد. ضمناً ناحیه محاسباتی به نواحی مختلفی تقسیم بندی

شده است تا کنترل بهتری بر روی شبکه تولیدی صورت گیرد.

جهت بررسی استقلال نتایج از شبکه عددی، مسئله در شبکه های

مختلف با تعداد نقاط مختلف در نرم افزار شبیه سازی شده است. ابتدا

۴- روند حل عددی

در این مطالعه، به منظور حل عددی معادلات حاکم، از نرم افزار

فلوئنت نسخه ۱۹/۲ استفاده شده و روش حجم محدود برای

گسسته سازی معادلات حاکم در نظر گرفته شده است. معادلات

سیال به صورت پایا حل شده اند. همچنین جهت گسسته سازی ترم

فشار و سایر ترم های معادلات به ترتیب، روش استاندارد و تقریب

مرتبه دوم و همچنین برای حل همزمان میدان فشار و سرعت، از

الگوریتم سیمپل^۱ استفاده شده است. به منظور تشخیص همگرایی،

معیار کاهش باقیمانده های تراز شده 10^{-8} می باشد. لازم به ذکر است

که کلیه محاسبات با استفاده از سیستم نسل ۷ پردازنده ای اینتل ۲/۸

گیگاهرتزی انجام شده و زمان محاسبات حدود ۲ الی ۴ ساعت برای

معادلات جریان سیال می باشد.

۵- تحلیل داده ها

به منظور ارزیابی تاثیر خواص ثابت و متغیر بر مشخصه های

جریان سیال و انتقال حرارت، از ضریب انتقال حرارت محلی در هر

مقطع از لوله، ضریب انتقال حرارت متوسط و افت فشار در قالب روابط

زیر بهره گرفته شده است:

$$h_x = \frac{q''}{T_w(x) - T_m(x)} \quad (17)$$

$$T_m(x) = \frac{\int_A \rho C_p V T dA}{\int_A \rho C_p V dA} \quad (18)$$

$$h_m = \frac{1}{x} \int_0^x h_x dx \quad (19)$$

لازم به ذکر است که عدد ناسلت متوسط به صورت زیر تعریف

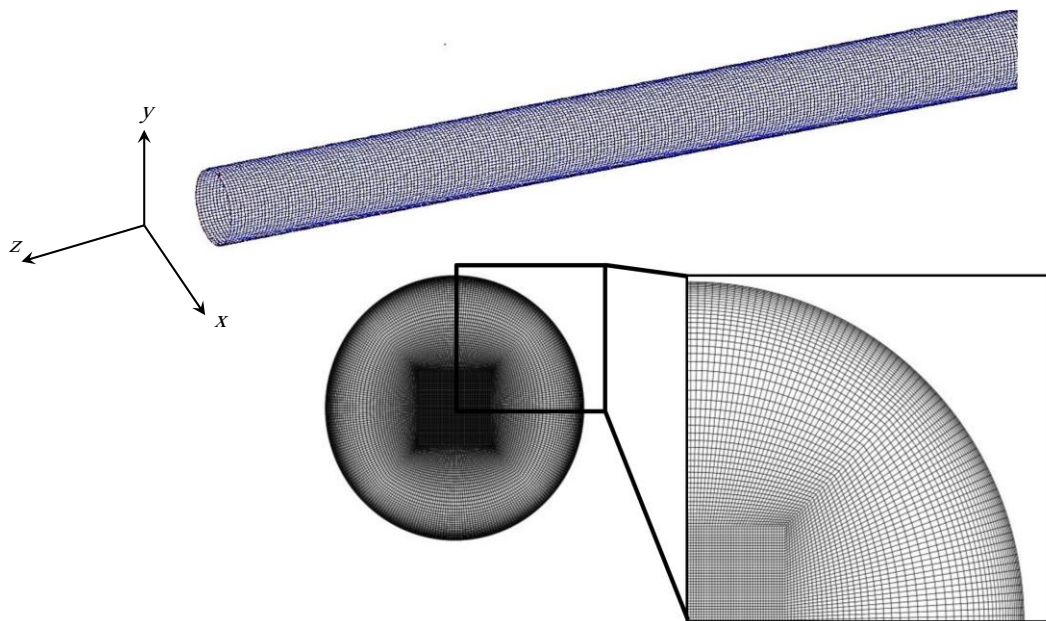
شده است:

$$Nu_m = \frac{h_m D}{K} \quad (20)$$

جدول ۱. بررسی استقلال نتایج از شبکه (تغییر شبکه در راستای شعاعی)

Table 1. Results of grid independence study (with variations cell in the radial direction)

درصد خطای عدد ناسلت متوسط	عدد ناسلت متوسط	تعداد سلول در راستای محور لوله	تعداد سلول در مقطع لوله
۱/۸۷	۱۱/۸۶	۲۰۰	۲۶۴
۱/۳۷	۱۱/۹۲	۲۰۰	۶۳۱
۰/۹۶	۱۱/۹۷	۲۰۰	۱۰۲۶
۰/۶۴	۱۲/۰۱	۲۰۰	۱۵۴۲
۰/۴۶	۱۲/۰۳	۲۰۰	۱۹۳۶
۰/۳۱	۱۲/۰۵	۲۰۰	۲۳۴۸
۰/۱۴	۱۲/۰۷	۲۰۰	۳۳۷۰
۰/۰۸	۱۲/۰۸	۲۰۰	۴۴۹۷
۰/۰۴	۱۲/۰۸	۲۰۰	۵۴۵۶
۰/۰۰۸	۱۲/۰۹	۲۰۰	۶۷۱۰
۰	۱۲/۰۹	۲۰۰	۷۷۹۳



شکل ۲. نمایی از شبکه محاسباتی

Fig. 2. View of the computational grid

شبکه‌های تغییر یافته در راستای محوری نشان داده شده است. با توجه به جدول‌های ۱ و ۲، شبکه با تعداد ۳۳۷۰ سلول در مقطع و ۳۰۰ نقطه در راستای محور لوله به عنوان شبکه مطلوب انتخاب شده است که در نهایت، تعداد کل سلول‌های این شبکه ۱۰۱۱۰۰۰ می‌باشد.

۷- اعتبارسنجی نتایج

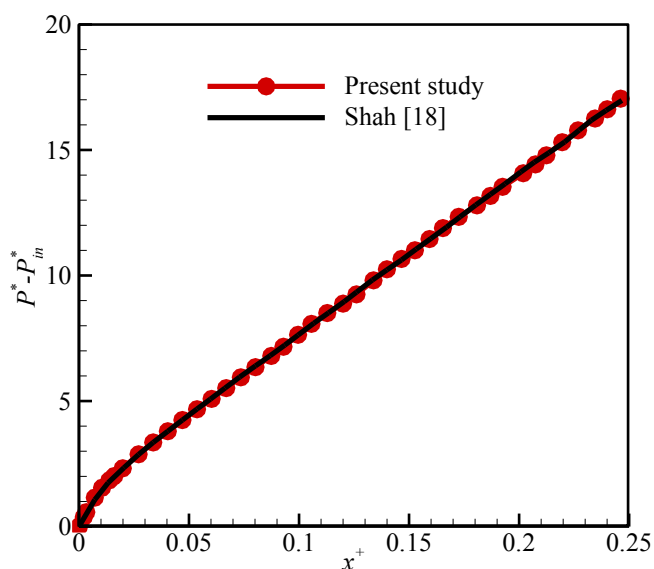
جهت اطمینان از صحت نتایج عددی بدست آمده، ابتدا مسئله

تعداد نقاط شبکه در راستای شعاعی تغییر داده شده و تعداد مناسب انتخاب شده و در مرحله بعد تعداد نقاط شبکه در راستای محوری، تغییر داده شده است. مقدار عدد ناسلت متوسط به عنوان پارامتر اساسی برای مقایسه نتایج در شبکه‌های مختلف انتخاب شده است. درصد خطای برای شبکه‌های تغییر یافته در راستای شعاعی، نسبت به ریزترین شبکه در جدول ۱ محاسبه شده‌اند.

در جدول ۲ عدد ناسلت متوسط و درصد خطای آنها برای

جدول ۲. بررسی استقلال نتایج از شبکه (تغییر شبکه در راستای محوری)
Table 2. Results of grid independence study (with variations cell in the axial direction)

درصد خطای عدد ناسلت متوسط	عدد ناسلت متوسط	تعداد سلول در راستای محور لوله	تعداد سلول در مقطع لوله
۲/۷۳	۱۲/۳۳	۲۵	۳۳۷۰
۱/۸۵	۱۲/۲۲	۵۰	۳۳۷۰
۱/۱۲	۱۲/۱۳	۱۰۰	۳۳۷۰
۰/۵۷	۱۲/۰۷	۲۰۰	۳۳۷۰
۰/۴۳	۱۲/۰۵	۲۵۰	۳۳۷۰
۰/۳۴	۱۲/۰۴	۳۰۰	۳۳۷۰
۰/۲۶	۱۲/۰۳	۳۵۰	۳۳۷۰
۰/۲۰	۱۲/۰۲	۴۰۰	۳۳۷۰
۰/۱۸	۱۲/۰۱	۶۰۰	۳۳۷۰
۰	۱۲	۸۰۰	۳۳۷۰



شکل ۳. مقایسه افت فشار بی بعد با نتایج رابطه شاه [۱۸]

Fig. 3. Comparison of dimensionless pressure drop with the results of Shah [18]

جدول ۳. مقایسه عدد ناسلت متوسط با رابطه شاه و لندن [۲۰] برای لوله شار یکنواخت در اعداد رینولدز مختلف

Table 3. Comparison of the average Nusselt number with the results of Shah and London [20] in a tube at different Reynolds numbers

درصد اختلاف	Nu_m (Shah and London [۱۵])	Nu_m (Present study)	Re
۲/۷	۷/۴۷	۷/۶۷	۲۵۰
۱/۳	۹/۴۱	۹/۵۳	۵۰۰
۱/۵	۱۰/۷۷	۱۰/۹۳	۷۵۰
۱/۷	۱۱/۸۵	۱۲/۰۵	۱۰۰۰
۲/۳	۱۲/۷۷	۱۳/۰۶	۱۲۵۰
۲/۷	۱۳/۵۷	۱۳/۹۳	۱۵۰۰
۳/۲	۱۴/۲۸	۱۴/۷۴	۱۷۵۰
۳/۲	۱۴/۹۳	۱۵/۴۱	۲۰۰۰

کلاسیک جریان در حال توسعه در داخل لوله حل شده و با نتایج موجود مقایسه شده‌اند. برای این کار شرط مرزی حرارتی دیواره بالا و پایین شار ثابت قرار داده شده و خواص سیال ثابت در نظر گرفته شده‌است. شاه [۱۸] برای افت فشار در ناحیه ورودی کانال‌ها، رابطه‌ای را بر اساس داده‌های هورنیک [۱۹] ارائه نمود که خطای آن ۲/۸ درصد است. افت فشار بی بعد حاصل از شبیه سازی عددی مسئله در عدد رینولدز ۷۴۶ بر حسب طول بی بعد در شکل ۳ با رابطه شاه [۱۸] مقایسه شده‌است. همان گونه که مشاهده می شود نتایج تحلیل عددی حاضر با رابطه شاه [۱۸] از تطابق مطلوبی برخوردار می باشد. علاوه براین، شاه و لندن [۲۰] برای محاسبه مقادیر عدد ناسلت محلی و متوسط برای جریان هاگن پوازیه درون لوله با شار حرارتی یکنواخت برای شرایط جریان کاملاً توسعه یافته هیدرو دینامیکی و در حال توسعه حرارتی با استفاده از تقریب های تحلیلی بر اساس حل عددی اعتبارسنجی شده با داده های آزمایشگاهی با ۳ درصد خطا ارائه نموده اند. برای بررسی جامع، اعتبارسنجی در اعداد رینولدز مختلف در جدول ۳ مورد ارزیابی قرار گرفته است. همان گونه که مشاهده می شود تطابق مطلوبی بین نتایج برقرار است.

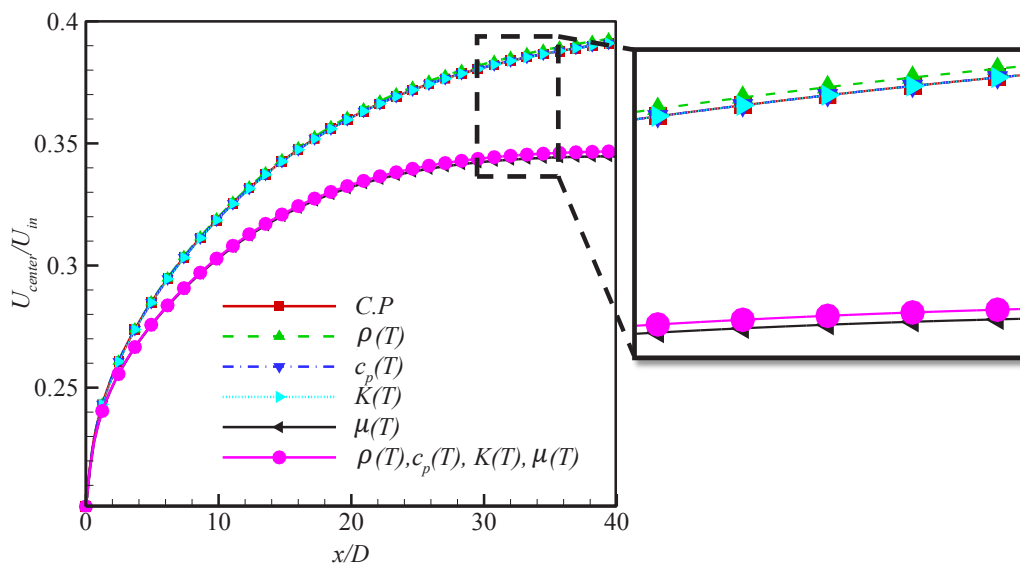
۸- بحث و بررسی نتایج

با توجه به بالا بودن تغییرات دما در مسئله حاضر و وابستگی شدید خواص سیال عامل (روغن ترانسفورماتور) به دما، برای تحلیل دقیق تر لازم است تاثیر خواص سیال وابسته به دما مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین در ادامه، نتایج شبیه سازی برای سه حالت مختلف ارائه شده است؛ ابتدا تاثیر خواص متغیر بر نتایج سیال پایه، در ادامه سیال پایه در حضور نانوذرات و در نهایت تاثیر خواص متغیر در حضور میدان مغناطیسی بر ضریب انتقال حرارت و افت فشار مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اثر خواص چگالی متغیر، ظرفیت حرارتی ویژه متغیر، ضریب هدایت حرارتی متغیر و ویسکوزیته متغیر بر مشخصات هیدرو دینامیکی و حرارتی بررسی شده است.

۸-۱-۱-۱ نتایج هیدرو دینامیکی و حرارتی برای سیال پایه

۸-۱-۱-۱-۱ نتایج هیدرو دینامیکی

در این بخش، توزیع سرعت و سرعت بی بعد در خط مرکزی لوله در دو حالت خواص ثابت و متغیر (چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه،



شکل ۴. سرعت بی بعد در خط مرکزی لوله برای سیال پایه با خواص ثابت و متغیر در $Re=1000$ و $q''=5 \text{ kW/m}^2$

Fig. 4. Dimensional velocity in the central line of the tube for the base fluid with constant and variable properties at $Re=1000$, $q''=5 \text{ kW/m}^2$

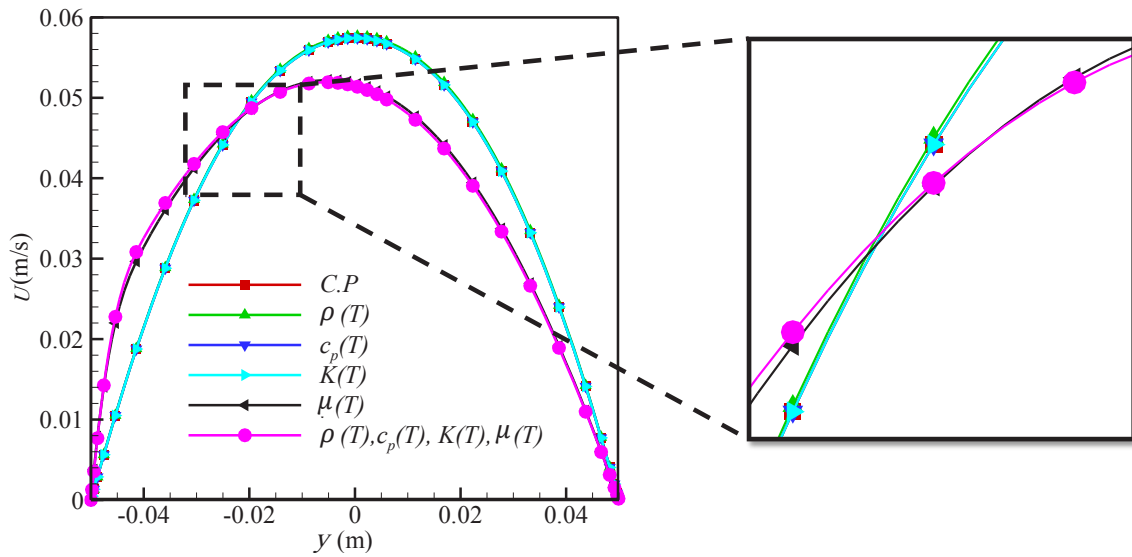
جریان می‌یابد. با مشاهده پروفیل سرعت می‌توان نتیجه گرفت که سیال با لادست هنگامیکه به ناحیه پایین دست که دارای دو منطقه دما بالا و دما پایین است مواجهه می‌شود، بطوریکه در ناحیه دما بالا تنش و نیروی مقاوم نسبت به ناحیه دما پایین کمتر می‌باشد، بنابراین سیال در هنگام مواجهه با دو ناحیه پر مقاوم و کم مقاوم، به سمت ناحیه کم مقاوم گسیل بیشتری پیدا خواهد کرد و در نتیجه آن، پروفیل سرعت به منطقه دما بالا کشیده شده و برای ارضای معادله بقای جرم، باید مقطع پروفیل سرعت پهنای بیشتری داشته‌باشد.

۸-۱-۲- نتایج حرارتی

در این بخش نمودارهای ضریب انتقال حرارت جابجایی موضعی و متوسط برای دو حالت خواص ثابت و متغیر با هم مقایسه شده‌اند. مطابق شکل ۶، ویسکوزیته تابع دما، عاملی اصلی در ایجاد تغییر ضریب انتقال حرارت موضعی سیال خواص متغیر نسبت به خواص ثابت می‌باشد. همچنین تغییر ویسکوزیته تابع دما باعث حرکت سریع سیال در نزدیک دیواره می‌شود. درجه حرارت در نزدیکی دیواره پایینی نسبت به دیگر نواحی به دلیل حرارت ثابت اعمالی به دیواره، افزایش یافته و در نتیجه کاهش ویسکوزیته سیال در نزدیکی دیواره، منجر به پهن شدن پروفیل سرعت و انحراف آن به سمت ناحیه تحت شار حرارتی ثابت می‌شود. از طرفی، ویسکوزیته پایین نزدیک دیواره

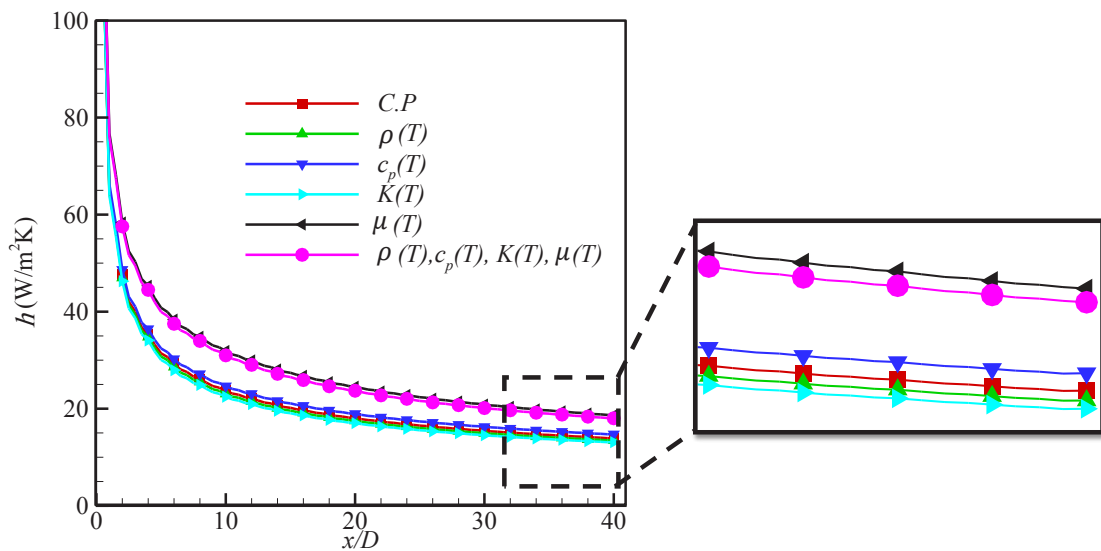
ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته سیال) با هم مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود الگوی تغییرات سرعت بی بعد در خط مرکزی لوله در حالت کلیه خواص متغیر با حالت فقط ویسکوزیته متغیر تقریباً یکسان می‌باشد. بنابراین از منظر هیدرودینامیکی می‌توان نتیجه گرفت که هرگاه وابستگی ویسکوزیته بصورت تابعی از دما بیان شود، به راحتی می‌توان رفتار مشخصه‌های جریان سیال را برآورد نمود. به عبارت دیگر، ویسکوزیته متغیر تاثیر بسیار زیادی نسبت به دیگر متغیرهای وابسته به دما دارد. همچنین در شرایط خواص ثابت مقدار سرعت بی بعد در خط مرکزی نسبت به کلیه خواص متغیر از مقادیر بیشتری برخوردار است. علاوه بر این مشاهده می‌شود که در شرایط خواص متغیر، سیال تمایل بیشتری به توسعه یافتگی هیدرودینامیکی داشته، در حالی که در شرایط خواص ثابت در فاصله دورتری تمایل به حالت توسعه یافتگی هیدرودینامیکی دارد.

برای درک بهتر رفتار جریان سیال، پروفیل سرعت در مقطع خروجی لوله در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در حالت کلیه خواص متغیر، پروفیل سرعت به سمت دیواره پایین که دمای بالاتری دارد کشیده می‌شود. زیرا با افزایش دما در ناحیه نزدیک دیواره پایین، ویسکوزیته سیال کاهش یافته و در نتیجه آن تنش و نیروی مقاوم کمتر و حرکت توده‌ای سیال با سرعت بیشتر



شکل ۵. پروفیل سرعت سیال پایه با خواص ثابت و متغیر در خروجی لوله در $Re=1000$ و $q''=5 \text{ kW/m}^2$

Fig. 5. Base fluid velocity profiles with constant and variable properties at the tube outlet at $Re=1000$, $q''=5 \text{ kW/m}^2$

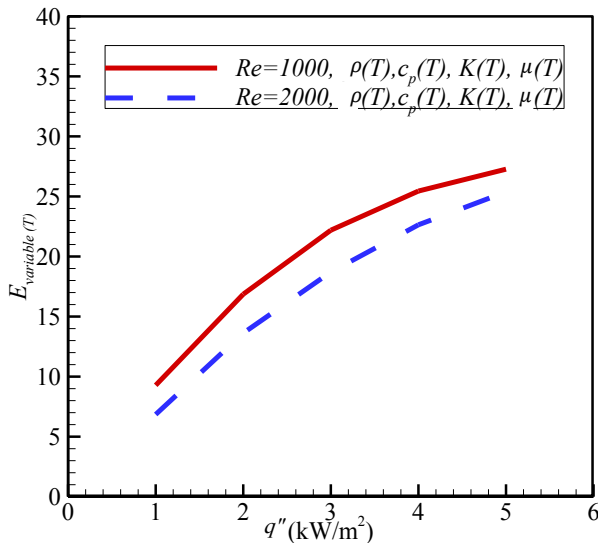


شکل ۶. تغییرات ضریب انتقال حرارت موضعی سیال پایه با خواص متغیر در مقایسه با خواص ثابت در طول لوله در $Re=1000$ و $q''=5 \text{ kW/m}^2$

Fig. 6. Variations of the local heat transfer coefficient of the base fluid with variable properties as compared to the constant properties along the tube at $Re=1000$, $q''=5 \text{ kW/m}^2$

متغیر، ضریب هدایت حرارتی متغیر و ظرفیت گرمایی ویژه متغیر بر مشخصات جریان سیال و انتقال حرارت ناچیز می‌باشد و تنها خاصیت موثر، ویسکوزیته متغیر می‌باشد. به عبارتی دیگر، ویسکوزیته عامل اصلی اثرگذار بر مشخصات جریان سیال و انتقال حرارت است و اثرگذاری آن تقریباً برابر اثرگذاری کلیه خواص متغیر می‌باشد. مهمترین علت تحلیل تاثیر خواص ثابت و متغیر دستیابی به

باعث ایجاد جریان با دبی بیشتر (به دلیل داشتن سیال سرعت بالاتر نزدیک به دیوار) در آن ناحیه می‌شود. به طور کلی می‌توان بیان کرد که تغییرات ضریب انتقال حرارت موضعی در طول لوله کاهش می‌یابد به نحوی که تغییرات ضریب انتقال حرارت در فاصله‌های $x/D=10$ و $x/D=30$ به ترتیب حدوداً برابر ۳۲ درصد و ۲۱ درصد می‌باشد. از شکل ۵ و ۶ می‌توان استنباط نمود که تاثیر خواص چگالی

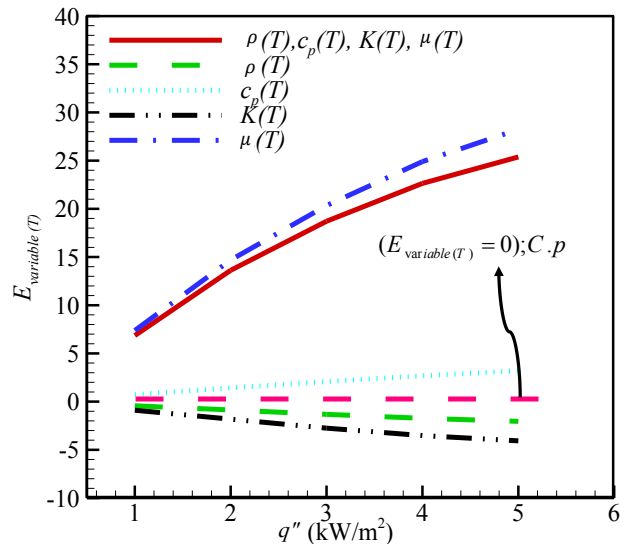


شکل ۸. تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط سیال پایه متغیر به خواص ثابت در شارهای مختلف برای اعداد رینولدز ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰

Fig. 8. Variations of the average heat transfer coefficient of the base fluid of variable properties to constant properties in different heat fluxes for Reynolds numbers 1000 and 2000

تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط برای ظرفیت حرارتی ویژه و ویسکوزیته تابع دما، به ترتیب حدوداً ۴ درصد و ۳۱ درصد تغییرات بیشتری و برای چگالی و ضریب هدایت حرارتی تابع دما به ترتیب حدوداً ۲ درصد و ۵ درصد تغییرات کمتری نسبت به خواص ثابت می‌باشد. در نهایت با افزایش عدد رینولدز تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط کاهش می‌یابد. زیرا با افزایش عدد رینولدز سرعت سیال در لوله افزایش پیدا کرده و تبادل حرارت زمان کمتری برای اثرگذاری در خواص سیال را خواهد داشت.

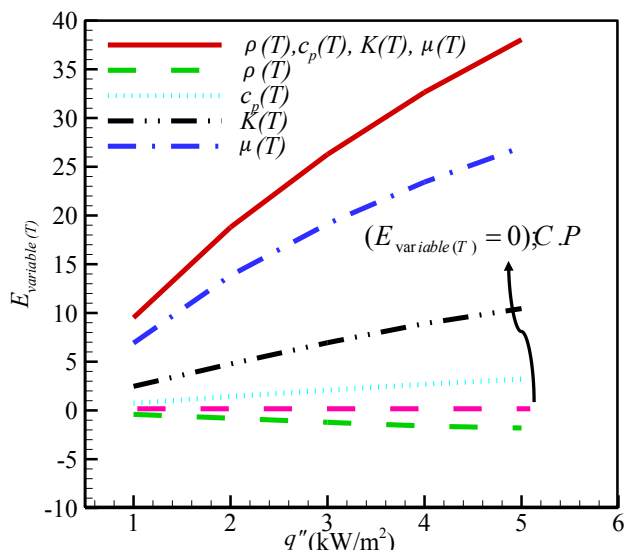
برای محاسبه تغییرات افت فشار (ضریب اصطکاک ظاهری)، کافی است تغییرات چگالی متغیر و ویسکوزیته متغیر مورد بررسی قرار گیرد. زیرا چگونگی حرکت سیال وابسته به خواص هیدرودینامیکی سیال می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۹ نشان داده شده است اثر ویسکوزیته تابع دما نسبت به چگالی تابع دما بر ضریب اصطکاک ظاهری چشمگیر می‌باشد. بنابراین می‌توان بیان نمود که یافتن روند تغییرات ویسکوزیته تابع دما، می‌تواند تقریب درستی از تغییرات فشار را ارائه دهد. همچنین با افزایش عدد رینولدز به دلیل فقدان فرصت کافی در اثرگذاری تبادل حرارت سبب کاهش اختلاف نتایج خواص ثابت و متغیر شده است.



شکل ۷. تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط سیال پایه متغیر به خواص ثابت در شارهای مختلف برای $Re=1000$

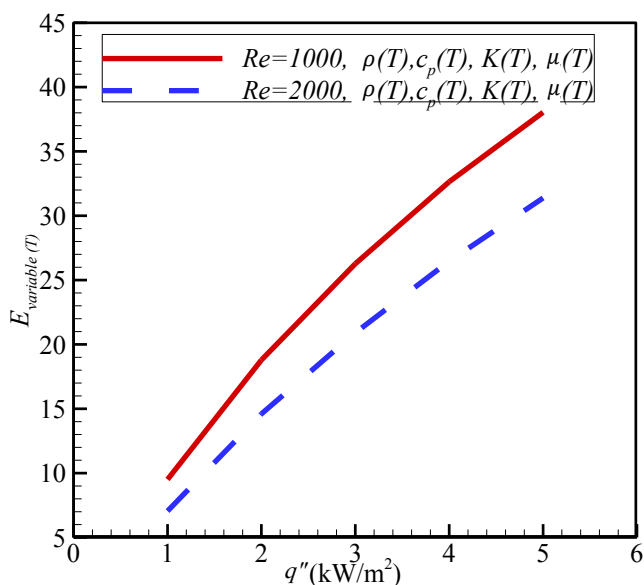
Fig. 7. Variations of the average heat transfer coefficient of the base fluid for variable properties to constant properties at different fluxes for $Re=1000$

ضریب انتقال حرارت دقیق می‌باشد. در شکل ۷ و ۸ برای شارهای حرارتی مختلف برای سیال پایه، تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط خواص متغیر (نسبت به خواص ثابت) در دو عدد رینولدز نشان داده شده است. مطابق نتایج حاضر، می‌توان استنباط نمود که تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط خواص ویسکوزیته متغیر به نتایج کلیه خواص متغیر نزدیک‌تر می‌باشد. به عبارت دیگر، ویسکوزیته نسبت به دیگر خواص عامل موثرتری می‌باشد. بیشترین تغییرات به ترتیب مربوط به ویسکوزیته متغیر، کلیه خواص متغیر، ضریب هدایت حرارتی متغیر، چگالی متغیر و ظرفیت حرارتی ویژه متغیر می‌باشد. علاوه بر این، با افزایش شار حرارتی این تغییرات افزایش می‌یابد به طوری که در عدد رینولدز ۱۰۰۰، تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط برای شرایط ویسکوزیته متغیر در شار حرارتی ۱ کیلووات بر مترمربع، حدوداً ۱۰ درصد و در شار حرارتی ۵ کیلووات بر مترمربع حدوداً ۳۱ درصد می‌باشد. شایان ذکر است که خواص همچون ظرفیت حرارتی ویژه و ویسکوزیته متغیر، نسبت به خواص ثابت، اثر افزایشی در پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت متوسط دارند در صورتی که خواصی همچون چگالی و ضریب هدایت حرارتی تابع دما اثر کاهشی در پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت متوسط نسبت به خواص ثابت دارند. همچنین در شار حرارتی ۵ کیلووات بر مترمربع



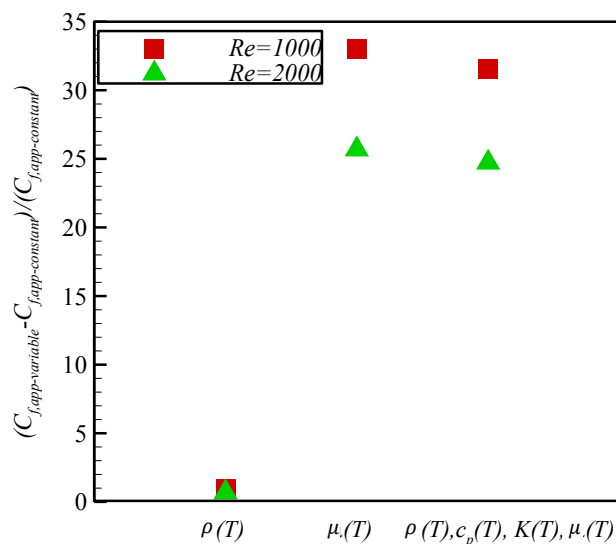
شکل ۱۰. تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط نانو سیال خاص متغیر به خواص ثابت در شارهای مختلف و $Re=1000$

Fig. 10. Variations of the average heat transfer coefficient of nanofluids with variable properties to constant properties in different heat fluxes and $Re=1000$



شکل ۱۱. تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط نانوسیال خاص متغیر به خواص ثابت در شارهای مختلف در اعداد رینولدز ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰

Fig. 11. Variations of the average heat transfer coefficient of nanofluid with variable properties to constant properties in different heat fluxes at Reynolds numbers 1000 and 2000



شکل ۹. تغییرات ضریب اصطکاک ظاهری خواص سیال پایه در $q''=5 \text{ kW/m}^2$

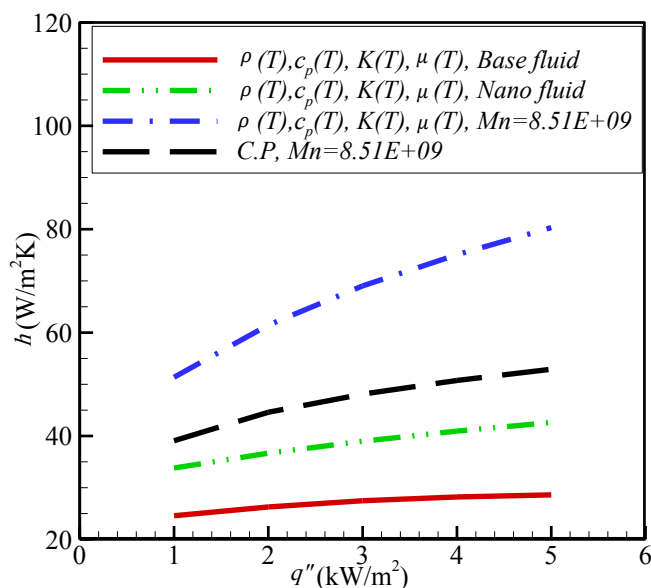
Fig. 9. Variation of the apparent friction coefficient of the properties of the base fluid at $q''=5 \text{ kW/m}^2$

۸-۲- نتایج هیدرودینامیکی و حرارتی برای نانو سیال بدون اعمال میدان مغناطیسی

با افزودن یک درصد حجمی نانو ذرات به سیال پایه ($\phi=1\%$) و تغییر خواص سیال پایه، با رویکرد تک فازی و استفاده از روابط تجربی خواص ترموفیزیکی نانو سیال، تغییرات ضریب انتقال حرارت تحت شارهای مختلف محاسبه شده و در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. با مقایسه تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط، به ترتیب کلیه خواص متغیر، ویسکوزیته متغیر، ضریب هدایت حرارتی متغیر، ظرفیت حرارتی ویژه متغیر و چگالی متغیر بیشترین اثرگذاری در نتایج را دارند. همچنین، با افزایش شارحرارتی، تغییرات ضریب انتقال حرارت به دلیل تاثیرپذیری بیشتر خواص سیال به دما، افزایش یافته است.

علاوه براین، با افزایش عدد رینولدز، تاثیر پذیری خواص سیال به دما کاهش می‌یابد. شایان ذکر است خواصی همچون ظرفیت حرارتی ویژه متغیر، ویسکوزیته متغیر و ضریب هدایت حرارتی متغیر اثرگذاری افزایشی بر ضریب انتقال حرارت متوسط نسبت به خواص ثابت دارند ولی خواص چگالی متغیر اثرگذاری کاهشی بر ضریب انتقال حرارت متوسط نسبت به خواص ثابت دارد.

برای نانوسیال، تغییرات ضریب اصطکاک ظاهری برای خواص نانو

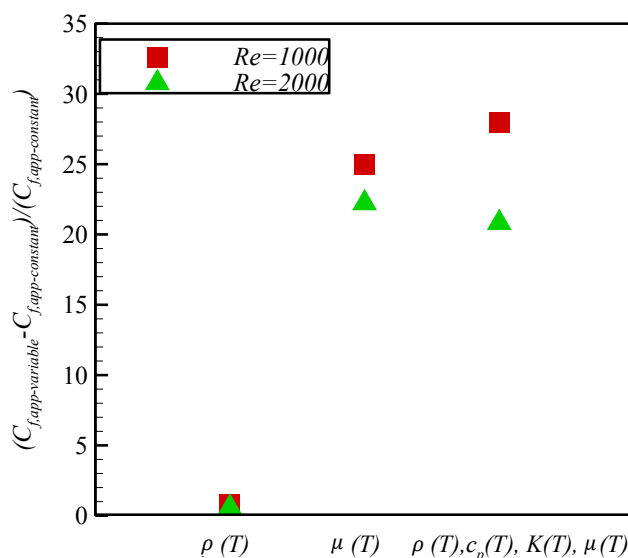


شکل ۱۳. ضریب انتقال حرارت متوسط سیال پایه، نانوسیال و نانوسیال تحت میدان مغناطیسی در دو حالت خواص ثابت و خواص متغیر تابع دما، $Re=1000$

Fig. 13. Average heat transfer coefficient of base fluid, nanofluid and nanofluid under magnetic field in two situations of constant properties and variable properties of dependent-temperature at $Re=1000$

نانو ذرات به سیال، در شار حرارتی ۵ کیلووات بر مترمربع و در عدد رینولدز ۱۰۰۰، ضریب انتقال حرارت متوسط نسبت به سیال پایه، حدوداً ۴۸ درصد افزایش یافته و با اعمال میدان مغناطیسی، افزایش ضریب انتقال حرارت متوسط به ۱۸۰ درصد نیز می‌رسد. نکته قابل تامل در شکل حاضر، اختلاف مشهود بین نتایج ضریب انتقال حرارت متوسط خواص ثابت و خواص متغیر (حدوداً ۵۰ درصد) تحت میدان مغناطیسی می‌باشد. پس می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به اختلاف چشمگیر ضریب انتقال حرارت متوسط در اثر اعمال میدان مغناطیسی در شارهای مختلف ضروری است که برای برآورد دقیقی از ضریب انتقال حرارت باید خواص ساختاری سیال را به صورت تابعی از دما در نظر گرفت.

در شکل ۱۴ تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط خواص متغیر نسبت به خواص ثابت نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش میدان مغناطیسی تغییرات ضریب انتقال حرارت اندکی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، با افزایش میدان مغناطیسی، سرعت چرخش محیطی نانو سیال در داخل لوله افزایش یافته (شکل ۱۵) که این امر موجب افزایش دمای کل سیال شده و میدان حرارتی به سمت یکنواخت شدن میل می‌نماید. در نتیجه حرارت



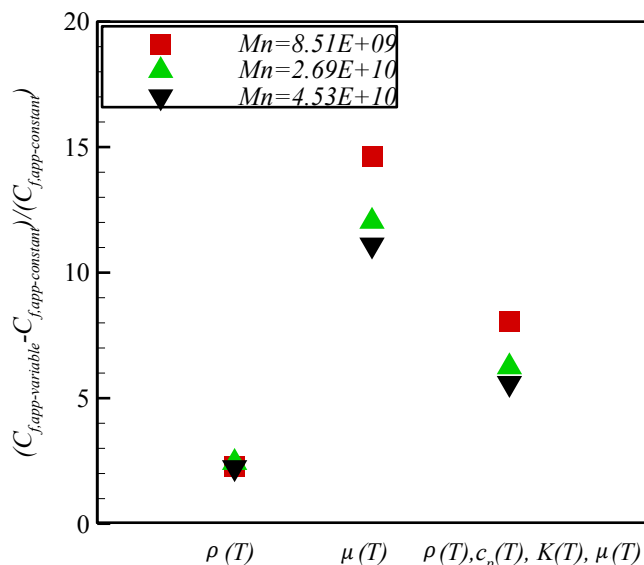
شکل ۱۲. تغییرات ضریب اصطکاک ظاهری خواص نانوسیال در $q''=5$ kW/m²

Fig. 12. Variations of the apparent friction coefficient of the properties of nanofluids at $q''=5$ kW/m²

سیال در شکل ۱۲ نشان داده شده است که مطابق آن، اثر ویسکوزیته متغیر نسبت به چگالی متغیر چشمگیر می‌باشد. در نتیجه تنها ویسکوزیته عامل تعیین‌کننده رفتار هیدرودینامیکی سیال می‌باشد. همچنین با افزایش عدد رینولدز تغییرات ضریب اصطکاک ظاهری نیز کاهش یافته است.

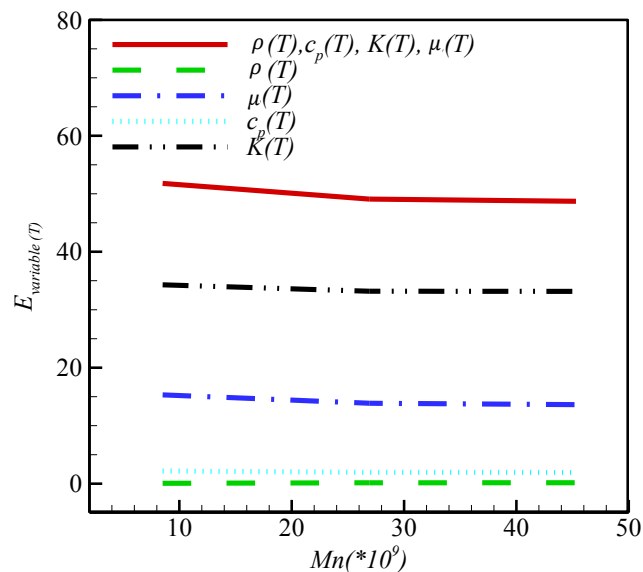
۳-۸- نتایج هیدرودینامیکی و حرارتی نانو سیال با اعمال میدان مغناطیسی

با اعمال میدان مغناطیسی علاوه بر حرکت خطی، حرکت چرخشی نیز ایجاد شده و به تبع آن خواص نانوسیال تحت میدان مغناطیسی نسبت به نانو سیال بدون میدان مغناطیسی تغییر می‌نماید. در ابتدا برای وضوح بیشتر تاثیرگذاری خواص تابع دما و همچنین اثرگذاری افزودن نانو ذرات ($\phi=1\%$) و همزمان با اعمال میدان مغناطیسی، ضریب انتقال حرارت سیال پایه، نانو سیال و نانو سیال تحت میدان مغناطیسی در دو حالت خواص ثابت و کلیه خواص متغیر تابع دما در شارهای حرارتی مختلف در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش نانو ذرات به سیال و اعمال میدان مغناطیسی، ضریب انتقال حرارت متوسط به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد به طوری که با افزودن



شکل ۱۶- تغییرات ضریب اصطکاک ظاهری خواص نانوسیال تحت میدان مغناطیسی در عدد رینولدز ۱۰۰۰ و $q''=5 \text{ kW/m}^2$

Fig. 14. Variations in the friction coefficient of the properties of nanofluids under a magnetic field, $Re=1000$ and $q''=5 \text{ kW/m}^2$



شکل ۱۴. تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط نانوسیال خواص متغیر به خواص ثابت در میدان‌های مغناطیسی مختلف در $q''=5 \text{ kW/m}^2$

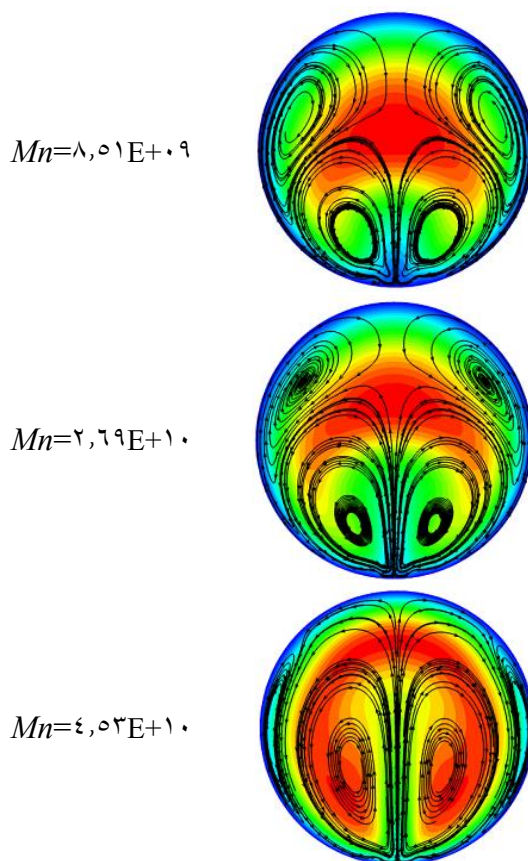
Fig. 14. Variations of average heat transfer coefficient of nanofluid of variable properties to constant properties in different magnetic fields at $q''=5 \text{ kW/m}^2$

انتقال یافته تقریباً به صورت یکنواخت‌تری در کل سیال توزیع می‌شود و به تبع آن خواص سیال در میدان مغناطیسی قوی‌تر، کمتر تحت تاثیر حرارت قرار می‌گیرد. با مقایسه تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط، مشاهده می‌شود که به ترتیب کلیه خواص متغیر، ضریب هدایت حرارتی متغیر، ویسکوزیته متغیر، ظرفیت حرارتی ویژه متغیر و چگالی متغیر نانوسیال تحت میدان مغناطیسی بیشترین اثرگذاری در نتایج را دارند. به طوری که همه خواص متغیر اثرگذاری افزایشی بر ضریب انتقال حرارت متوسط نسبت به خواص ثابت دارند.

با اعمال میدان مغناطیسی، خصوصیات هیدرودینامیکی سیال نیز دچار تغییرات می‌شود. در این راستا، تغییرات ضریب اصطکاک ظاهری برای خواص سیال در حضور میدان مغناطیسی مختلف در شکل ۱۶ نشان داده شده‌است. خاصیت چگالی متغیر و ویسکوزیته متغیر از عوامل تغییرات خواص هیدرودینامیکی محسوب می‌شوند. به طوری که با افزایش میدان مغناطیسی، گسترش حرارت در کل فضای لوله افزایش و در نتیجه اثرات دما بر ویسکوزیته و چگالی کاهش می‌یابد.

۹- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، با توجه به اهمیت موضوع انتقال حرارت در



شکل ۱۵. تغییرات توزیع دما همراه با خطوط جریان در میدان مغناطیسی‌های مختلف

Fig. 15. Temperature distribution variations with streamlines in different magnetic fields

W/m ² k	ضریب جابجایی انتقال حرارت	<i>h</i>	لوله‌های افقی، با استفاده از سیال روغن ترانسفورماتور، به صورت
A/m	شدت میدان مغناطیسی خارجی	<i>H</i>	عددی تاثیر خواص متغیر سیال ناشی از تغییر دما مورد بررسی قرار
A	شدت جریان الکتریکی	<i>I</i>	گرفته‌است. ساختار جریان و انتقال حرارت در یک لوله افقی صاف
W/mk	ضریب هدایت حرارتی	<i>K</i>	نیمه عایق تحت میدان مغناطیسی غیر یکنواخت در جریان آرام مورد
$1/38.06503 \times 10^{-33}$ J/K	ثابت بولتزمن	<i>K_B</i>	ارزیابی قرار گرفته‌است. با تغییر خواص در سیال پایه، نانوسیال و نانو
m	طول	<i>L</i>	سیال در حضور میدان مغناطیسی موارد زیر بدست آمده‌است:
A/m	مغناطیس پذیری	<i>M</i>	• در سیال پایه، پروفیل سرعت در خاصیت ویسکوزیته متغیر
Am ²	عدد مغناطیسی	<i>Mn</i>	نسبت به خواص ثابت پهن تر شده و در نزدیکی دیواره تحت شار ثابت
Pa	عدد ناسلت	<i>mp</i>	پهنای سرعت نیز بیشتر گردیده‌است.
Pa	فشار	<i>Nu</i>	• در سیال پایه در شرایط خاصیت ویسکوزیته متغیر، تغییرات ضریب
W/m ²	شار حرارتی ورودی به جداره	<i>P</i>	انتقال حرارت متوسط به کلیه خواص متغیر بسیار نزدیک می‌باشد. به
m	فاصله بین محل وایر و دیواره لوله	<i>Pr</i>	عبارت دیگر، ویسکوزیته نسبت به دیگر خواص اثرگذاری بیشتری دارد
K	عدد رینولدز	<i>q''</i>	$(E_{\mu(T)} > E_{\mu(T),K(T),\rho(T)&C_p(T)} > E_{K(T)} > E_{\rho(T)} > E_{C_p(T)})$ علاوه
m/s	دما	<i>r₀</i>	براین، با افزایش شار حرارتی تغییرات افزایش می‌یابد. در صورتی که با
m	سرعت	<i>Re</i>	افزایش عدد رینولدز، تغییرات کاهش می‌یابد.
	مختصات مکانی	<i>T</i>	• تغییرات ویسکوزیته در اعداد رینولدز بالاتر در همه شرایط،
		<i>u, v, w</i>	موثرترین عامل در تغییرات افت فشار در لوله می‌باشد.
		<i>x, y, z</i>	• در نانو سیال بدون حضور میدان مغناطیسی، به ترتیب

علائم یونانی

kg/m ³	چگالی	ρ
Ns/m ²	ویسکوزیته دینامیکی	μ
$\pi 4 \times 10^{-7}$ Tm/A	نفوذپذیری مغناطیسی در خلا	μ_0
	کسر حجمی	ϕ
	گذردهی مغناطیسی	χ
	پارامتر لنجوبین	ξ

زیرنویس

*	بی بعد
<i>app</i>	ظاهری
<i>Ave</i>	متوسط
<i>center</i>	مرکز لوله
<i>f</i>	سیال پایه
<i>in</i>	ورودی
<i>m</i>	متوسط
<i>nf</i>	نانوسیال
<i>p</i>	ذره
<i>s</i>	سطح

فهرست علائم

<i>C_f</i>	ضریب اصطکاک
<i>C_p</i>	گرمای ویژه
<i>C.P</i>	خواص ثابت
<i>D</i>	قطر لوله
<i>dp</i>	قطر ذره

- Engineering Journal, 3)141) (2008) 353-346.
- [10] J.T. Liu, X.F. Peng, W.M. Yan, Numerical study of fluid flow and heat transfer in microchannel cooling passages, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 10)50) (2007) 1864-1855.
- [11] S. Mahulikar, H. Herwig, Physical effects in laminar microconvection due to variations in incompressible fluid properties, *Physics of Fluids*, 7)18) (2006) 073601.
- [12] H. Herwig, S.P. Mahulikar, Variable property effects in single-phase incompressible flows through microchannels, *International Journal of Thermal Sciences*, 10)45) (2006) 981-977.
- [13] S. Mahulikar, H. Herwig, O. Hausner, F. Kock, Laminar gas micro-flow convection characteristics due to steep density gradients, *EPL (Europhysics Letters)*, 6)68) (2004) 811.
- [14] S.P. Mahulikar, H. Herwig, Physical effects in pure continuum-based laminar micro-convection due to variation of gas properties, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 18)39) (2006) 4116.
- [15] R. Kumar, S. Mahulikar, Variable fluid property effect on heat transfer and frictional flow characteristics of water flowing through microchannel, *Journal of Engineering Thermophysics*, 4)27) (2018) 473-456.
- [16] D.H. Lobón, E. Baglietto, L. Valenzuela, E. Zarza, Modeling direct steam generation in solar collectors with multiphase CFD, *Applied Energy*, 113 (2014) 1348-1338.
- [17] S. Aberoumand, A. Jafarimoghaddam, M. Moravej, H. Aberoumand, K. Javaherdeh, Experimental study on the rheological behavior of silver-heat transfer oil nanofluid and suggesting two empirical based correlations for thermal conductivity and viscosity of oil based nanofluids, *Applied Thermal Engineering*, 101 (2016) 372-362.
- [18] R. Shah, A correlation for laminar hydrodynamic entry length solutions for circular and noncircular ducts, *Journal of Fluids Engineering (Transactions of the ASME)* 100 (1978) 179-177.
- [19] R.W. Hornbeck, Laminar flow in the entrance region of a pipe, *Applied Scientific Research, Section A*, 1)13) (1964)
- [1] D. Wen, G. Lin, S. Vafaei, K. Zhang, Review of nanofluids for heat transfer applications, *Particuology*, 2)7) (2009) 150-141.
- [2] M. Ashouri, B. Ebrahimi, M. Shafii, M. Saidi, M. Saidi, Correlation for Nusselt number in pure magnetic convection ferrofluid flow in a square cavity by a numerical investigation, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 22)322) (2010) 3613-3607.
- [3] R. Azizian, E. Doroodchi, T. McKrell, J. Buongiorno, L. Hu, B. Moghtaderi, Effect of magnetic field on laminar convective heat transfer of magnetite nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 68 (2014) 109-94.
- [4] S.V. Mousavi, M. Sheikholeslami, M.B. Gerdroodbary, The Influence of magnetic field on heat transfer of magnetic nanofluid in a sinusoidal double pipe heat exchanger, *Chemical Engineering Research and Design*, 113 (2016) 124-112.
- [5] M. Sheikholeslami, S. Shehzad, Numerical analysis of $Fe_3O_4-H_2O$ nanofluid flow in permeable media under the effect of external magnetic source, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 118 (2018) 192-182.
- [6] Y. Malmir-Chegini, N. Amanifard, Heat transfer enhancement inside semi-insulated horizontal pipe by controlling the secondary flow of oil-based ferro-fluid in the presence of non-uniform magnetic field: A general correlation for the Nusselt number, *Applied Thermal Engineering*, 159 (2019) 113839.
- [7] R. Kumar, S.P. Mahulikar, Heat transfer characteristics of water flowing through micro-tube heat exchanger with variable fluid properties, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 4)140) (2020) 1934-1919.
- [8] T. Harms, M. Jog, R. Manglik, Effects of temperature-dependent viscosity variations and boundary conditions on fully developed laminar forced convection in a semicircular duct, *Journal of Heat Transfer (Transactions of the ASME)*, 120 (1998) 605-600.
- [9] J. Liu, X. Peng, B. Wang, Variable-property effect on liquid flow and heat transfer in microchannels, *Chemical*

in ducts: a source book for compact heat exchanger
analytical data, Academic press, 2014.

232-224.

[20] R.K. Shah, A.L. London, Laminar flow forced convection

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Y. Malmir-Chegini, N. Amanifard , Numerical investigation of the effect of thermophysical properties of nanofluid on fluid flow and heat transfer in a tube in presence of magnetic field, Amirkabir J. Mech Eng., 53(7) (2021) 4329-4344.

DOI: [10.22060/mej.2021.18936.6924](https://doi.org/10.22060/mej.2021.18936.6924)

