

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

یحیی مالمیرچگینی^۱، نیما امانی فرد^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشکده پردیس، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، mirchegini@gmail.com

۲- استاد مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک- گروه حرارت و سیالات، دانشگاه گیلان، رشت، ایران، namanif@guilan.ac.ir

چکیده

در این مطالعه، جریان هیدرودینامیکی و انتقال حرارت در یک لوله افقی صاف نیمه عایق، 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 اثرگذاری 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.

کلمات کلیدی

تحلیل عددی، خواص سیال، میدان مغناطیسی، نانو سیال، انتقال حرارت

* Corresponding Author: Email: namanif@guilan.ac.ir

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، 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 قابلیت‌ورثیسته 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 تجهیزات مورد نیاز برای انتقال انرژی به همراه خواهد داشت [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 آشفتگی 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 تاثیر پذیر می‌باشند بنابراین می‌توان با اعمال میدان مغناطیسی بر میدان جریان سیال، رفتار هیدرودینامیکی و هیدروترومال نانوسیال را تحت کنترل هدفمند در آورد. 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 شده است. عاشوری و همکاران [۲] در سال ۲۰۱۰ اثر میدان مغناطیسی در یک حفره دو بعدی 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 بدست آمده 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 نداشته است. موسوی و همکاران در سال ۲۰۱۶ اثر میدان مغناطیسی غیر یکنواخت ناشی از سیم حامل جریان الکتریکی عمود بر یک کانال سینوسی دو بعدی 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]. شیخ الاسلامی و شهزاد در سال ۲۰۱۸ اثر میدان مغناطیسی غیر یکنواخت ناشی از یک سیم حامل جریان الکتریکی در یک حفره با محیط متخلخل حامل نانوسیال آب و مگنتیت با لحاظ نمودن نیروی لورنتز 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 غیر یکنواخت 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 شبیه سازی عددی استخراج شده است.

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 شده است اثرات گرادیان دما در مولفه‌های محوری و شعاعی سرعت در نظر گرفته نشده است. 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 داشته باشد. 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 [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 شده است 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 شده است. که مراحل آن در سه بخش زیر مورد مطالعه قرار گرفته است:

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

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

ج) تاثیر خواص متغیر ناشی از تغییر دما بر مشخصه‌های هیدروپنوماتیکی 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).

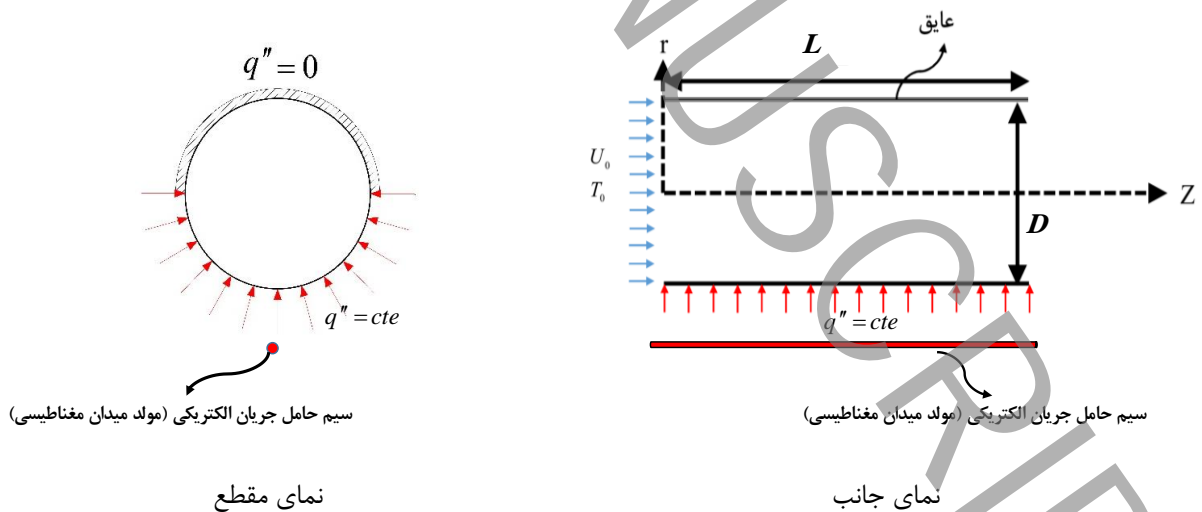


Fig. 1. Schematic view of the computational domain

شکل ۱: شماتیک از دامنه محاسباتی

در این مطالعه روغن ترانسفورماتور به عنوان سیال عامل مورد مطالعه انتخاب شده است. 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 شده است.

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

در رابطه فوق، دما بر حسب کلوین 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 شده است.

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

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

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

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 شده است:

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

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

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

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

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 کلوین و لورنتس بصورت رابطه (۱۰) می‌باشد:

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

$$\vec{M} = \frac{\vec{H}}{|\vec{H}|} |\vec{M}(H, T)|,$$

$$\mu_0 (\vec{M} \cdot \nabla) \vec{H} = \mu_0 \left(\frac{|\vec{M}|}{|\vec{H}|} \right) (\vec{H} \cdot \nabla) \vec{H} = \mu_0 \left(\frac{|\vec{M}|}{|\vec{H}|} \right) \left(\frac{1}{2} \vec{\nabla} (\vec{H} \cdot \vec{H}) - \vec{H} \times (\vec{\nabla} \times \vec{H}) \right) = \quad (10)$$

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

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].

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

مغناطیس پذیری 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 بی بعد مغناطیسی برای مقایسه پارامترهای موثر بصورت زیر بیان شده است:

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

۳-۱- شرایط مرزی هیدرودینامیکی و حرارتی

شرایط مرزی در مسائل دینامیک سیالات محاسباتی با توجه به فیزیک حاکم تنظیم می‌شوند. بنابراین فرض شده است که سیال با سرعت و دمای یکنواخت وارد لوله شده است. همچنین در خروجی جریان نیز شرط جریان خروجی در نظر گرفته شده است. دیواره پایین لوله تحت شار حرارتی ثابت و دیواره بالا عایق فرض شده است.

۴- روند حل عددی

در این مطالعه، به منظور حل عددی معادلات حاکم، از نرم‌افزار فلوئنت نسخه ۱۹/۲ استفاده شده و روش حجم محدود برای گسسته‌سازی معادلات حاکم در نظر گرفته شده است. معادلات سیال به صورت پایا حل شده‌اند. همچنین جهت گسسته‌سازی ترم فشار و سایر ترم‌های 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 باقیمانده‌های تراز شده 10^{-8} می‌باشد. لازم به ذکر است که کلیه محاسبات با استفاده از سیستم نسل ۷ پردازنده‌ای اینتل ۲/۸ گیگاهرتزی انجام شده و زمان محاسبات حدود ۲ الی ۴ ساعت برای معادلات جریان سیال می‌باشد.

۵- تحلیل داده‌ها

به منظور ارزیابی تاثیر خواص ثابت و متغیر بر مشخصه‌های 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:

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

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

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

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

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

همچنین فشار بی‌بعد از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

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

در این رابطه V_{in} سرعت در ورودی لوله می‌باشد.

طول بی‌بعد طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

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

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

¹ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-linked Equations)

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

همچنین ضریب اصطکاک ظاهری برای جریان در حال توسعه از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

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

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

شبکه‌بندی ناحیه محاسباتی توسط نرم افزار تجاری گمبیت ۲/۴ به صورت سازمان‌یافته، غیریکنواخت و شش وجهی ایجاد شده و همچنین در نواحی که گرادیان‌های شدید مورد انتظار است از تراکم بیشتری نسبت به دیگر نواحی استفاده شده است. به عنوان مثال، تغییرات دما و سرعت در نزدیکی دیواره‌ها که دارای گرادیان‌های شدید می‌باشند و به همین دلیل، همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، تراکم شبکه‌بندی در این نواحی نسبت به دیگر نواحی بیشتر می‌باشد. ضمناً ناحیه محاسباتی به نواحی مختلفی تقسیم‌بندی شده است تا کنترل بهتری بر روی شبکه تولیدی صورت گیرد.

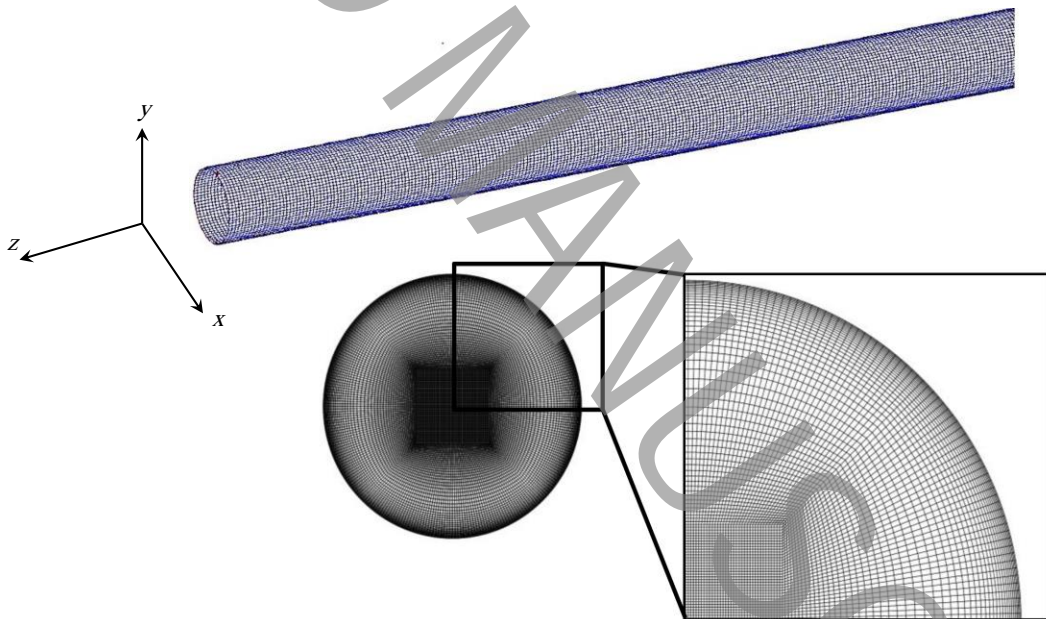


Fig. 2. View of the computational grid

شکل ۲: نمای از شبکه محاسباتی

جهت بررسی استقلال نتایج از شبکه عددی، مسئله در شبکه‌های مختلف با تعداد نقاط مختلف در نرم افزار شبیه‌سازی شده است. ابتدا 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. درصدهای خطا برای شبکه‌های تغییر یافته در راستای شعاعی، نسبت به ریزترین شبکه در جدول ۱ محاسبه شده‌اند.

¹ Gambit2.4

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
.	۱۲/۰۹	۲۰۰	۷۷۹۳

در جدول ۲ عدد ناسلت متوسط و درصد خطای آنها برای شبکه‌های تغییر یافته در راستای محوری نشان داده شده است.

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	۳۵۰	۳۳۷۰
۰/۳۴	۱۲/۰۴	۳۰۰	۳۳۷۰
۰/۲۶	۱۲/۰۳	۳۵۰	۳۳۷۰
۰/۲۰	۱۲/۰۲	۴۰۰	۳۳۷۰
۰/۰۸	۱۲/۰۱	۶۰۰	۳۳۷۰
.	۱۲	۸۰۰	۳۳۷۰

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- اعتبار سنجی نتایج

جهت اطمینان از صحت نتایج عددی بدست آمده، ابتدا مسئله 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 شده است. 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 شده است. همان گونه که مشاهده می شود نتایج تحلیل عددی حاضر با رابطه شاه [۱۸] از تطابق مطلوبی برخوردار می باشد.

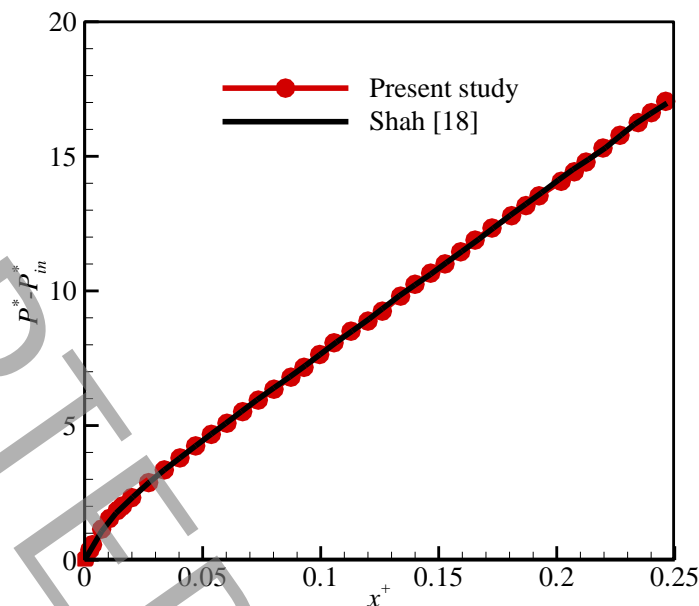


Fig. 3. Comparison of dimensionless pressure drop with the results of Shah [18]

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

علاوه بر این، شاه و لندن [۲۰] برای محاسبه مقادیر عدد ناسلت محلی و متوسط برای جریان هاگن پوزیه درون لوله با شار حرارتی یکنواخت برای شرایط جریان کاملاً توسعه یافته هیدرودینامیکی 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.

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 [15])	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

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 گرمایی ویژه متغیر، ضریب هدایت حرارتی متغیر و ویسکوزیته متغیر بر مشخصات هیدرودینامیکی و حرارتی بررسی شده است.

۸-۱- نتایج هیدرودینامیکی و حرارتی برای سیال پایه

۸-۱-۱- نتایج هیدرودینامیکی

در این بخش، توزیع سرعت و سرعت بی بعد در خط مرکزی لوله در دو حالت خواص ثابت و متغیر (چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه، ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته سیال) با هم مقایسه شده اند. همان گونه که در شکل ۴ مشاهده می شود الگوی تغییرات سرعت بی بعد در خط مرکزی لوله در حالت کلیه خواص متغیر با حالت فقط ویسکوزیته متغیر تقریباً یکسان می باشد. بنابراین از منظر هیدرودینامیکی می توان نتیجه گرفت که هرگاه وابستگی ویسکوزیته بصورت تابعی از دما بیان شود، به راحتی می توان رفتار مشخصه های 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 می شود 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.

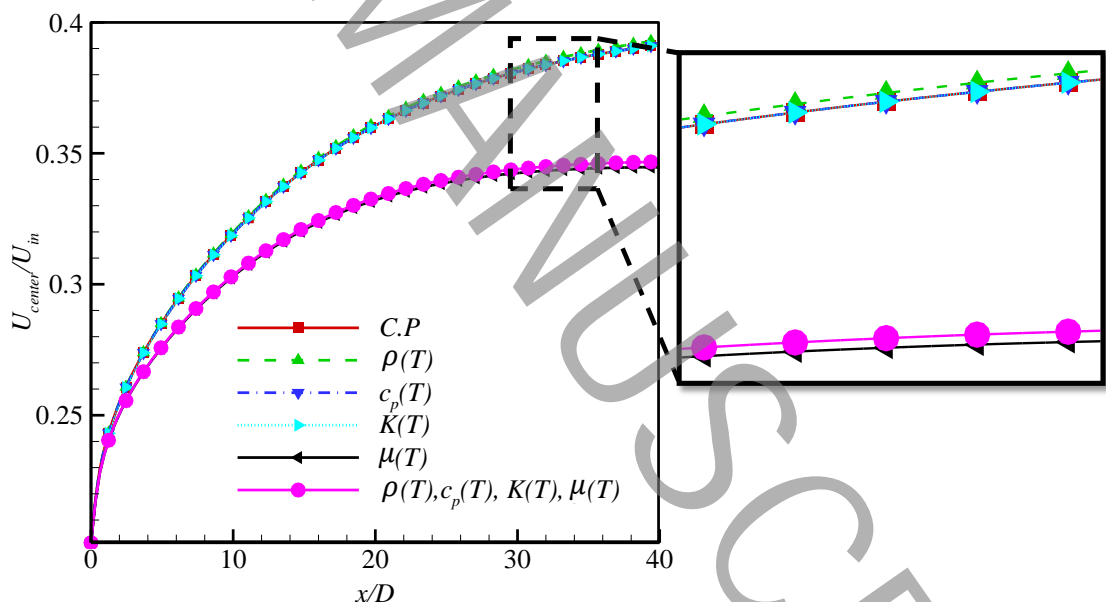


Fig. 4. Dimensional velocity in the central line of the tube for the base fluid with constant and variable properties at $Re=1000$, $q''=5 \text{ kW/m}^2$

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

برای درک بهتر رفتار جریان سیال، پروفیل سرعت در مقطع خروجی لوله در شکل ۵ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود در حالت کلیه خواص متغیر، پروفیل سرعت به سمت دیواره پایین که دمای بالاتری دارد کشیده می شود. 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 جریان می‌یابد. با مشاهده پروفیل سرعت می‌توان نتیجه گرفت که سیال بالادست 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 داشته باشد.

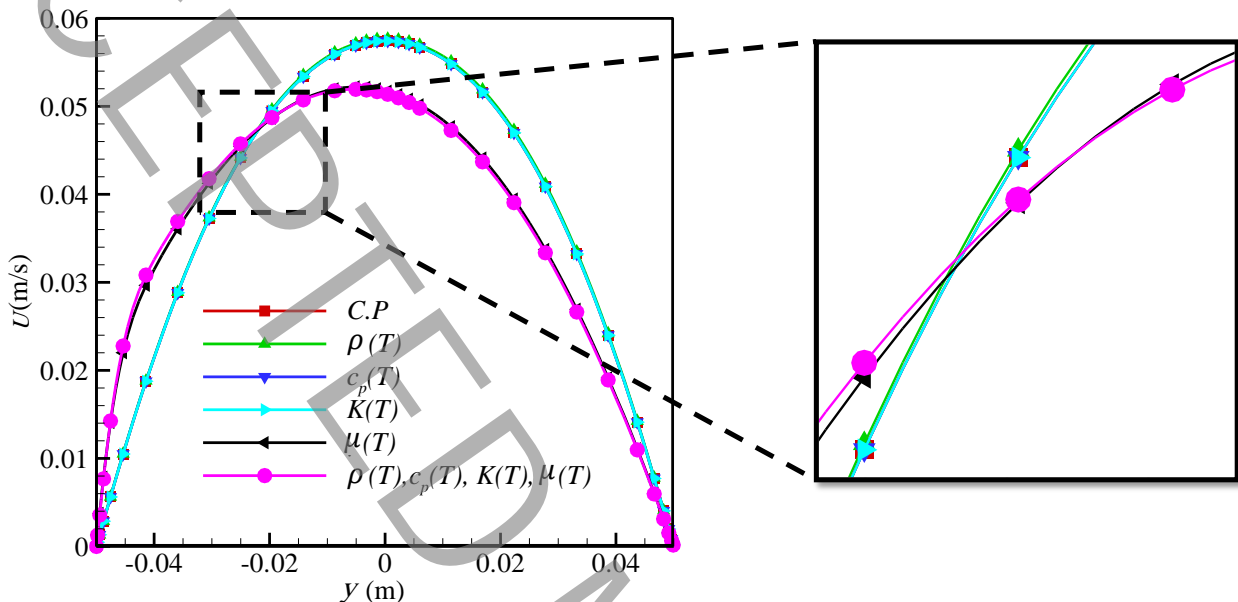


Fig. 5. Base fluid velocity profiles with constant and variable properties at the tube outlet at $Re=1000$, $q''=5 \text{ kW/m}^2$
 شکل ۵: پروفیل سرعت سیال پایه با خواص ثابت و متغیر در خروجی لوله در $Re=1000$ و $q''=5 \text{ kW/m}^2$

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 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 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 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.

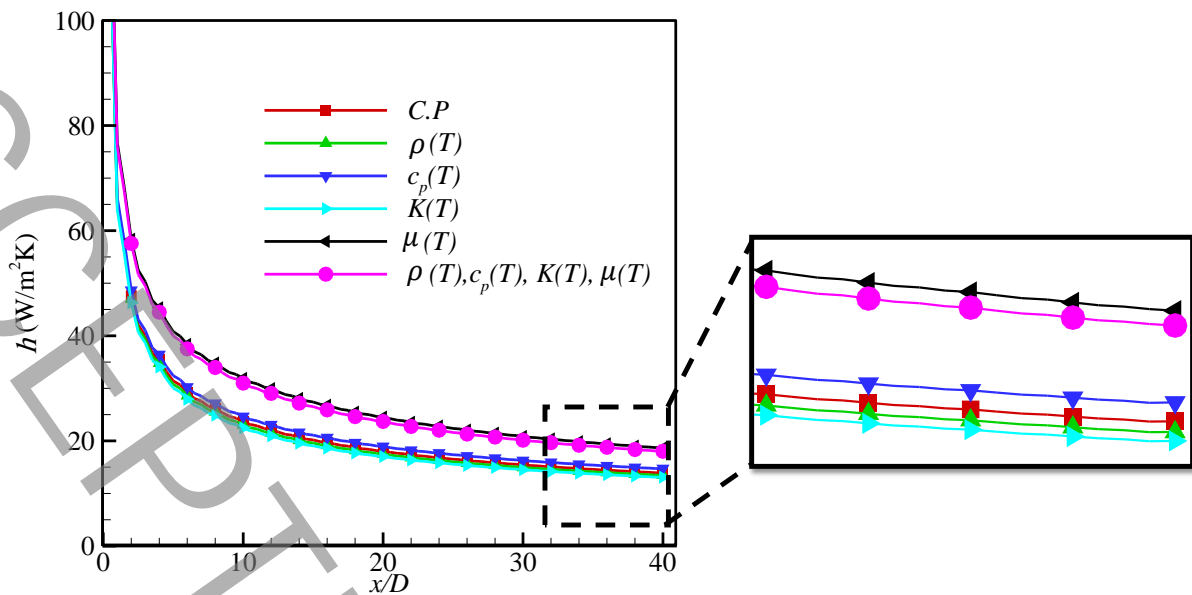


Fig. 6. Variations of the local heat transfer coefficient of the base fluid with variable properties as compared to the constant properties along the tube at $Re=1000$, $q''=5 \text{ kW/m}^2$

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

مهمترین علت تحلیل تاثیر خواص ثابت و متغیر دست‌یابی به 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 خواصی 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 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.

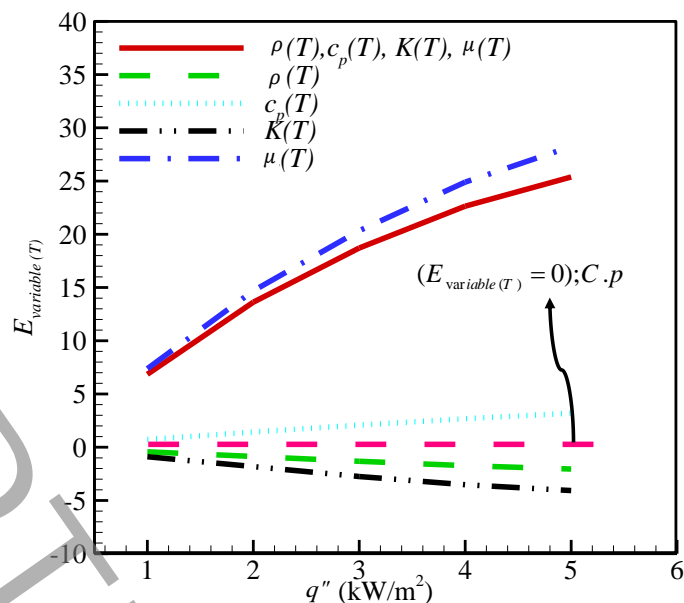


Fig. 7. Variations of the average heat transfer coefficient of the base fluid for variable properties to constant properties at different fluxes for $Re=1000$

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

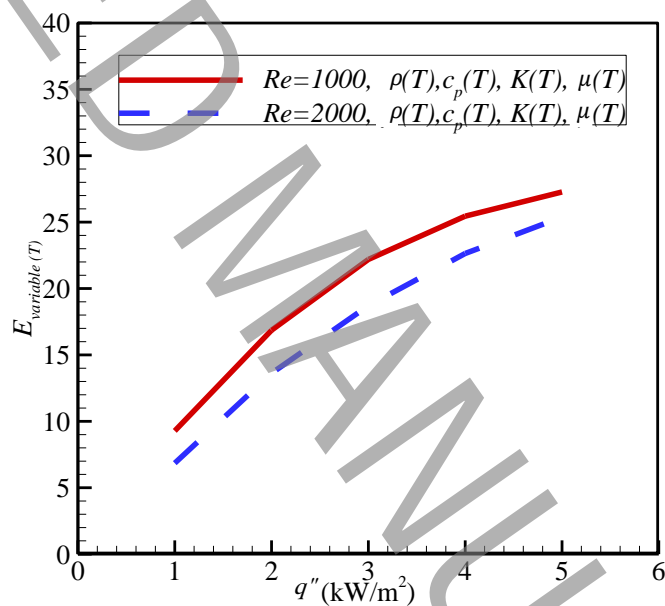


Fig. 8. Variations of the average heat transfer coefficient of the base fluid of variable properties to constant properties in different heat fluxes for Reynolds numbers 1000 and 2000

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

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.

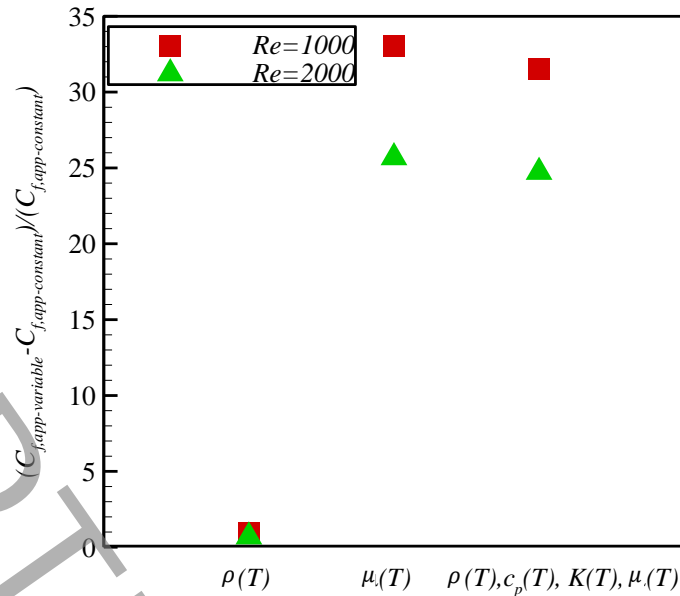


Fig. 9. Variation of the apparent friction coefficient of the properties of the base fluid at $q''=5 \text{ kW/m}^2$

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

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.

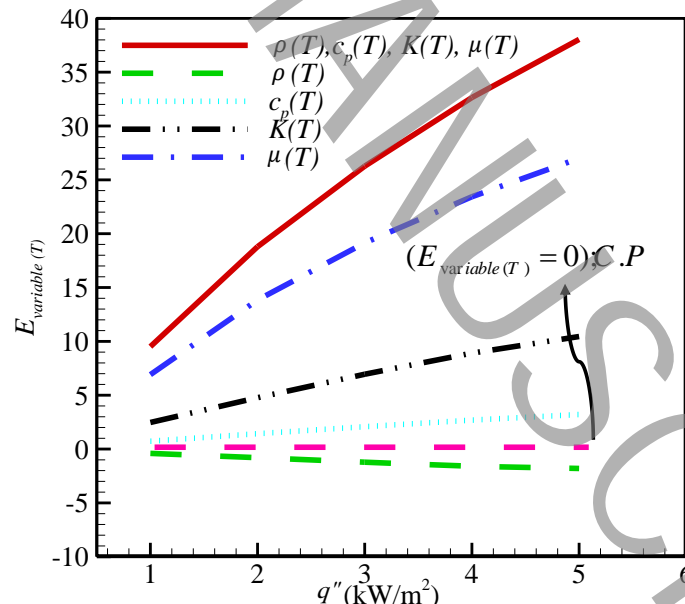


Fig. 10. Variations of the average heat transfer coefficient of nanofluids with variable properties to constant properties in different heat fluxes and $Re=1000$

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

علاوه بر این، 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.

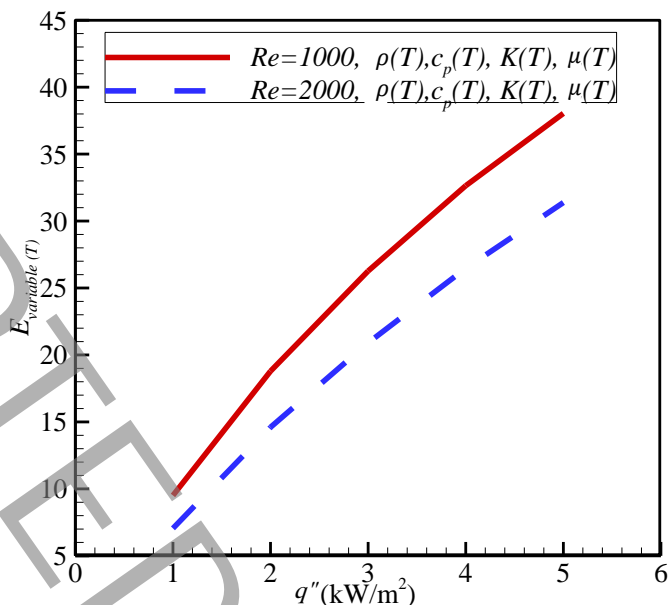


Fig. 11. Variations of the average heat transfer coefficient of nanofluid with variable properties to constant properties in different heat fluxes at Reynolds numbers 1000 and 2000

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

برای نانو سیال، تغییرات ضریب اصطکاک ظاهری برای خواص نانو 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 تعیین کننده رفتار هیدرودینامیکی سیال می‌باشد. همچنین با افزایش عدد رینولدز تغییرات ضریب اصطکاک ظاهری نیز کاهش یافته است.

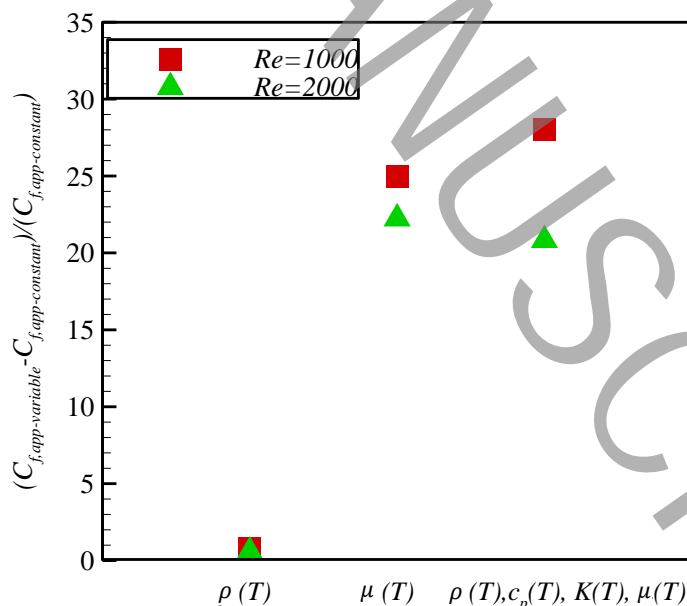


Fig. 12. Variations of the apparent friction coefficient of the properties of nanofluids at $q''=5 \text{ kW/m}^2$

شکل ۱۲: تغییرات ضریب اصطکاک ظاهری خواص نانو سیال در $q''=5 \text{ kW/m}^2$

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.

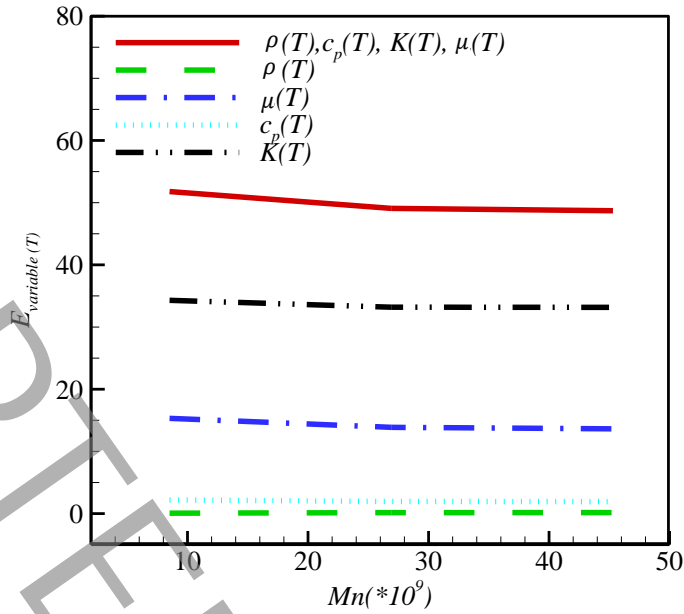


Fig. 14. Variations of average heat transfer coefficient of nanofluid of variable properties to constant properties in different magnetic fields at $q''=5 \text{ kW/m}^2$

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

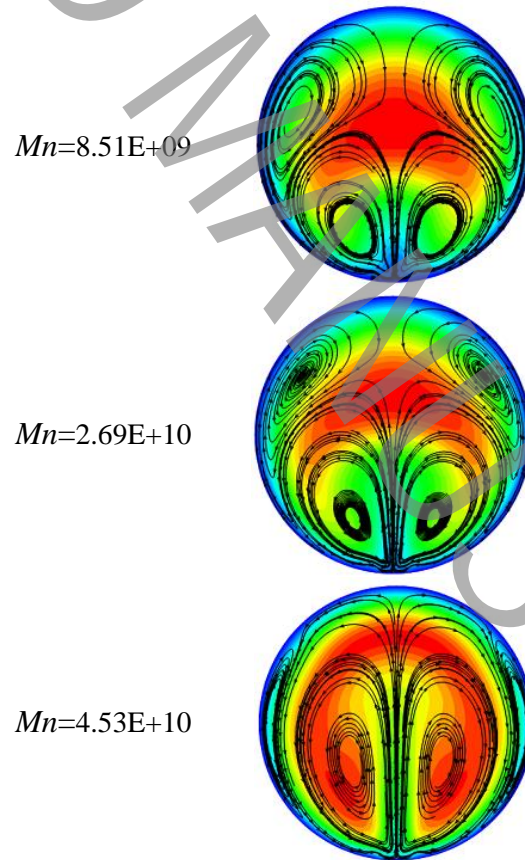


Fig. 15. Temperature distribution variations with stream lines in different magnetic fields

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

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 شده است. 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.

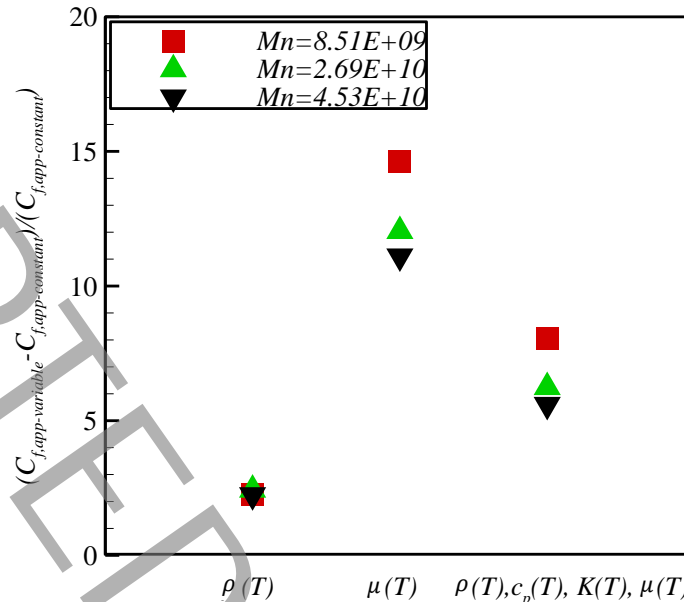


Fig. 16. Variations in the friction coefficient of the properties of nanofluids under a magnetic field, $Re=1000$ and $q''=5 \text{ kW/m}^2$
 شکل ۱۶: تغییرات ضریب اصطکاک ظاهری خواص نانو سیال تحت میدان مغناطیسی در عدد رینولدز ۱۰۰۰ و $q''=5 \text{ kW/m}^2$

۹- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، با توجه به اهمیت موضوع انتقال حرارت در لوله‌های افقی، با استفاده از سیال روغن تراز سفورماتور، به صورت عددی تاثیر خواص متغیر سیال ناشی از تغییر دما مورد بررسی قرار گرفته است. ساختار جریان و انتقال حرارت در یک لوله افقی صاف نیمه عایق تحت میدان مغناطیسی غیر یکنواخت در جریان آرام مورد ارزیابی قرار گرفته است. با تغییر خواص در سیال پایه، نانوسیال و نانو سیال در حضور میدان مغناطیسی موارد زیر بدست آمده است:

- در سیال پایه، پروفیل سرعت در خاصیت ویسکوزیته متغیر نسبت به خواص ثابت پهن تر شده و در نزدیکی دیواره تحت شار ثابت پهنای سرعت نیز بیشتر گردیده است.
- در سیال پایه در شرایط خاصیت ویسکوزیته متغیر، تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط به کلیه خواص متغیر بسیار نزدیک می‌باشد. به عبارت دیگر، ویسکوزیته نسبت به دیگر خواص اثرگذاری بیشتری دارد
 $(E_{\mu(T)} > E_{\mu(T),K(T),\rho(T)\&C_p(T)} > E_{K(T)} > E_{\rho(T)} > E_{C_p(T)})$
 صورتی که با افزایش عدد رینولدز، تغییرات کاهش می‌یابد.
- تغییرات ویسکوزیته در اعداد رینولدز بالاتر در همه شرایط، موثرترین عامل در تغییرات افت فشار در لوله می‌باشد.
- در نانو سیال بدون حضور میدان مغناطیسی، به ترتیب کلیه خواص متغیر، ویسکوزیته متغیر، ضریب هدایت حرارتی متغیر، ظرفیت حرارت ویژه متغیر و چگالی متغیر بیشینه اثرگذاری در تغییرات ضریب انتقال حرارت را دارند
 $(E_{\mu(T),K(T),\rho(T)\&C_p(T)} > E_{\mu(T)} > E_{K(T)} > E_{\rho(T)} > E_{C_p(T)})$
- در نانو سیال تحت میدان مغناطیسی، با افزایش میدان مغناطیسی، تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط کاهش می‌یابد. همچنین به ترتیب کلیه خواص متغیر، ضریب هدایت حرارتی متغیر، ویسکوزیته متغیر، ظرفیت حرارت ویژه متغیر و چگالی متغیر بیشترین اثرگذاری در تغییرات ضریب انتقال حرارت را دارند
 $(E_{\mu(T),K(T),\rho(T)\&C_p(T)} > E_{K(T)} > E_{\mu(T)} > E_{C_p(T)} > E_{\rho(T)})$

۱۰- فهرست علائم

	ضریب اصطکاک	C_f
kJ/kgK	گرمای ویژه	C_p
	خواص ثابت	$C.P$
m	قطر لوله	D
m	قطر ذره	dp
$\text{W/m}^2\text{k}$	ضریب جابجایی انتقال حرارت	h
A/m	شدت میدان مغناطیسی خارجی	H
A	شدت جریان الکتریکی	I
W/mk	ضریب هدایت حرارتی	K
$1/38.065.03 \times 10^{-23} \text{ J/K}$	ثابت بولتزمن	K_B
m	طول	L
A/m	مغناطیس پذیری	M
	عدد مغناطیسی	Mn
Am^2	ممان مغناطیسی ذره	mp
	عدد ناسلت	Nu
Pa	فشار	P
	عدد پرانتل	Pr
W/m^2	شار حرارتی ورودی به جداره	q''
m	فاصله بین محل وایر و دیواره لوله	r_0
	عدد رینولدز	Re
K	دما	T
m/s	سرعت	u, v, w
m	مختصات مکانی	x, y, z

علائم یونانی

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

زیرنویس

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

- [1] D. Wen, G. Lin, S. Vafaei, K. Zhang, Review of nanofluids for heat transfer applications, *Particuology*, 7(2) (2009) 141-150.
- [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*, 322(22) (2010) 3607-3613.
- [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) 94-109.
- [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) 112-124.
- [5] M. Sheikholeslami, S. Shehzad, Numerical analysis of $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-H}_2\text{O}$ nanofluid flow in permeable media under the effect of external magnetic source, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 118 (2018) 182-192.
- [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*, 140(4) (2020) 1919-1934.
- [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) 600-605.
- [9] 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.
- [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*, 50(10) (2007) 1855-1864.
- [11] S. Mahulikar, H. Herwig, Physical effects in laminar microconvection due to variations in incompressible fluid properties, *Physics of Fluids*, 18(7) (2006) 073601.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [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*, 39(18) (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*, 27(4) (2018) 456-473.
- [16] D.H. Lobón, E. Baglietto, L. Valenzuela, E. Zarza, Modeling direct steam generation in solar collectors with multiphase CFD, *Applied Energy*, 113 (2014) 1338-1348.
- [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) 362-372.
- [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) 177-179.
- [19] R.W. Hornbeck, Laminar flow in the entrance region of a pipe, *Applied Scientific Research, Section A*, 13(1) (1964) 224-232.
- [20] R.K. Shah, A.L. London, *Laminar flow forced convection in ducts: a source book for compact heat exchanger analytical data*, Academic press, 2014.

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

Yahya Malmir-Chegini^a, Nima Amanifard^{b*}

^a Faculty of Mechanical Engineering, University Campus 2, University of Guilan, Rasht, Iran

^b 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 has 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 property 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.

KEYWORDS

Numerical analysis, Fluid property, Magnetic field, Nanofluid, Heat transfer.