



مدل سازی عددی انتقال حرارت جابه جایی داخلی سیال مغناطیسی تحت میدان مغناطیسی منقطع و فرکانس های زمانی متفاوت

هادی کارگرشریف آباد^{1*}، محمد فلسفی²

1- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
2- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
* سمنان، صندوق پستی 179-35145، h.kargar@semnaniau.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این مقاله انتقال حرارت جابه جایی اجباری فروسیال در داخل یک لوله مسی شامل قسمت هایی با عایق الکترو مغناطیسی تحت یک میدان مغناطیسی متناوب به صورت عددی بررسی شده، که هدف اصلی تحقیق، افزایش سرعت در لایه مرزی با استفاده از اثر میدان مغناطیسی بر نانوذرات برای افزایش انتقال حرارت بیشتر بوده است. با توجه به این که تاکنون اثر استفاده از عایق الکترومغناطیسی در افزایش انتقال حرارت جابه جایی به صورت تجربی بررسی نشده است، پس از مدل سازی عددی مسئله در حالت بدون عایق الکترو مغناطیسی و اعتبارسنجی آن، اثرات میدان مغناطیسی بر مقدار ضریب انتقال حرارت جابه جایی در درصدهای حجمی و اعداد رینولدز مختلف در لوله ای شامل قسمت هایی با عایق الکترومغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته و با حالت بدون عایق مقایسه شده اند. افزایش فرکانس زمانی میدان مغناطیسی متناوب و کسر حجمی نانوذرات، منجر به افزایش بهتر انتقال حرارت در محدوده مورد نظر گردیده اند، که نتایج تأثیر این پارامترها و تغییرات ناشی از آن ها نسبت به حالت بدون میدان مغناطیسی بیشتر است. همچنین نتیجه بررسی در اعداد رینولدز مختلف نشان داده است که اثر میدان مغناطیسی در اعداد رینولدز کم و فرکانس های بزرگتر، بیشتر بوده است.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 17 اسفند 1393
پذیرش: 16 فروردین 1394
ارائه در سایت: 29 فروردین 1394
کلید واژگان:
فروسیال
نانوذرات مغناطیسی
انتقال حرارت جابه جایی
میدان مغناطیسی متناوب

Numerical modeling of internal convection heat transfer of magnetic fluid in the pulse magnetic field and different time frequencies

Hadi Kargarsharifabad*, Mohammad Falsafi

Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.
*P.O.B. 35145-179, Semnan, Iran, h.kargar@semnaniau.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 08 March 2015
Accepted 05 April 2015
Available Online 18 April 2015

Keywords:
Ferrofluid
Magnetic nanoparticles
Convective heat transfer
Alternating magnetic field

ABSTRACT

This numerical study forced convective heat transfer ferrofluid within a circular copper tube including portions of the electromagnetic isolation under an alternating magnetic field is performed. Laminar flows through a tube under uniform and thermal flux passes. The main objective is intensifying transfer of particles and increasing velocity in the boundary layer using nanoparticles to increase the effect of magnetic field onto more heat transfer. Convection regimens resulting from complex interactions between magnetic nanoparticles were studied under different conditions, with the concentration and volume of different heat transfer processes under different frequencies of the applied magnetic field were also studied. Magnetic field effects on the convective heat transfer coefficient at different Reynolds numbers and volume percentages have been studied. Also, when the electromagnetic is insulated pipe parts of have been studied and have been compared with the modes without insulation. Increase in the frequency and volume fraction of magnetic field, resulting in increased heat transfer were better. Magnetic field at low Reynolds numbers have shown a greater impact. To prove the numerical results. The results showed that the modeling data were in very good agreement with experimental data.

1- مقدمه

که حاوی 5 درصد حجمی ذرات نانو مس باشد قابل مشاهده و استفاده از ذرات نانو یک روش مؤثر برای بهبود خواص حرارتی سیالات است. ژوان و لی [3] روش هایی برای تهیه نانو سیال با خواص مناسب پیشنهاد کردند که قابل استفاده برای کاربردهای عملی باشد. در این بررسی ها با مد نظر قرار دادن نقش نفوذ براونی¹، ته نشینی و پراکندگی، مدلی برای انتقال حرارت در

چوی [1] در سال (1995) نخستین فردی بود که طی مجموعه ای از مطالعات در آزمایشگاه ملی آرگونه در ایالات متحده سیالات حاوی ذرات نانومتری را نانوسیال نامید و با اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی این سیالات به خواص حرارتی برجسته آن ها اشاره کرد. مطالعات بعدی توسط ایستمن [2] نشان داد که افزایش تقریبی 60 درصدی در ضریب هدایت حرارتی آب

1- Brownian

عمودی و در حضور میدان‌های مغناطیسی مختلف، به‌صورت عددی با استفاده از مدل دوفازی مخلوط، مدل قانون توانی و روش حجم محدود مورد بررسی قرار داده است. در این مطالعه مشخص شده است که روند کلی تغییرات برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برای سیال غیرنیوتونی مانند حالت نیوتونی است با این تفاوت که در حالت غیرنیوتونی و با کاهش شاخص توانی، تأثیرپذیری پروفیل سرعت، عدد ناسلت، ضریب اصطکاک از میدان محوری، بیشتر می‌شود. همچنین هدایت الکتریکی تأثیرات قابل ملاحظه‌ای بر رفتار فروسیال دارد و قابل صرف‌نظر نیست و میدان محوری با گرادیان منفی و میدان متقاطع اثرات مشابهی بر افزایش عدد ناسلت و ضریب اصطکاک دارند، در حالی‌که میدان محوری با گرادیان مثبت آن‌ها را کاهش می‌دهد. در تحقیق دیگری [14] انتقال حرارت جابه‌جایی در یک کانال سینوسی شکل حاوی نانوسیال تحت میدان مغناطیسی بررسی شده است. در این تحقیق تغییر پارامترهایی نظیر اثر شکل هندسی، درصد حجمی نانوسیال، عدد بی‌بعد هارتمن و عدد بی‌بعد رینولدز در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داده است با افزایش تمام پارامترهای یادشده، عدد ناسلت افزایش می‌یابد. شیخ الاسلامی و گرجی بندپی [15] انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی کبالت-نفت سفید درون محفظه بسته تحت میدان مغناطیسی را با روش عددی لیتیس بولتزمن² بررسی کردند. تأثیر پارامترهایی مانند عدد رایلی، ضریب مغناطیس، درصد حجمی نانو ذره و غیره مطالعه شده است. جریان و انتقال حرارت فروسیال داخل یک محفظه حلقوی مانند تحت تأثیر فروهیدروینامیک و هیدروینامیک مغناطیسی با در نظر گرفتن تأثیر انتقال حرارت تابشی توسط شیخ‌الاسلامی و همکاران [16] مطالعه شده است. در این تحقیق با استفاده از روش المان محدود تأثیر پارامترهای مختلف بررسی شده است. نتایج نشان داده است که عدد ناسلت با عدد رایلی، کسر حجمی نانو ذرات و عدد مغناطیس افزایش و با عدد تابش و عدد هارتمن کاهش می‌یابد. در مطالعه دیگری توسط شیخ‌الاسلامی و دمیری‌گنجی [17] تأثیر میدان مغناطیسی بر جریان و انتقال حرارت فروسیال در محفظه حلقوی شکل با سطح سینوسی با روش حجم کنترل براساس المان محدود بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد عدد ناسلت با افزایش عدد رایلی و کسر حجمی نانو ذرات افزایش و با افزایش عدد هارتمن کاهش می‌یابد، اما عدد مغناطیس اثر متفاوتی در عدد ناسلت متناظر با عدد رایلی دارد. مطالعات تجربی در مورد انتقال حرارت اجباری فروسیال، تحت یک میدان مغناطیسی متناوب زمانی انجام شده، اما اثرات فرکانس میدان مغناطیسی یا قطع و وصل شدن میدان مغناطیسی با زمان هنوز نامشخص است و نیاز به مطالعه بیشتر دارد. روند انتقال حرارت فروسیال تحت یک میدان مغناطیسی متناوب، بسیار پیچیده است. یک تحقیق عددی می‌تواند کمک شایانی به مطالعه این پدیده کند؛ هدف اصلی در این تحقیق، مطالعه انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری فروسیال تحت میدان مغناطیسی متناوب از نظر زمان و شامل قسمت‌هایی با عایق الکترومغناطیس و با فرکانس‌های مختلف زمانی به‌صورت عددی و شناسایی عوامل مؤثر بر این رفتار پیچیده، برای نخستین بار بوده است. ضعف عمده روش آزمایشگاهی پر هزینه و زمان‌گیر بودن آن است، در حالی‌که در روش حل عددی این چنین نیست. همچنین روش حل دقیق از تحلیل مدلهایی با هندسه پیچیده در اغلب مسائل غیرخطی به ویژه در مواردی که درجه غیرخطی بودن معادلات بالا باشد، عاجز است و تنها روش‌های عددی در این زمینه کارگشاست؛ بنابراین در این مقاله از روش عددی برای بررسی

نانوسیال ارائه شده است. ژوان و روتزل [4] در مطالعات تئوری خود با استفاده از مدل پراکندگی، روابطی برای بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال در داخل لوله ارائه داده‌اند. در این معادلات نقش ذرات نانو در انتقال حرارت به‌صورت ترم‌های اضافی در معادله کلی انتقال حرارت ظاهر می‌شود. لی و ژوان [5] طی آزمایش‌هایی برای اندازه‌گیری انتقال حرارت نانوسیال آب-مس در داخل لوله‌ای با شار حرارتی ثابت دیواره نشان دادند که عدد ناسلت نانوسیال حاوی 1 درصد حجمی ذرات مس بیش از 12 درصد افزایش می‌یابد. رحیمی گرجی و همکاران [6] انتقال حرارت نانوسیال‌های مختلف با سیال پایه آب و اتیلن گلیکل در میکرو کانال را با در نظر گرفتن آن به‌صورت یک محیط متخلخل به روش تحلیلی بررسی و در نهایت نتیجه را با حل عددی مقایسه کردند. اثر پارامترهایی مانند درصد حجمی، نوع و اندازه نانو ذرات، نوع سیال پایه و غیره را روی پروفیل دما، سرعت و عدد ناسلت بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد با افزایش درصد حجمی نانو ذرات به دلیل افزایش حرکت براونی ذرات، انتقال حرارت افزایش می‌یابد. در مطالعه‌ای که توسط پورمهران و همکاران [7] انجام شده است از روش‌های شبکه منظم، کمینه مربعات و رانج کوتاه مرتبه چهارم جهت حل جریان فشرده گذرای نانوسیال بین دو صفحه موازی استفاده کردند و در نهایت مشخص شد که روش کمینه مربعات بهترین روش حل تحلیلی معادلات حاکم بر جریان نانوسیال است.

سیالات مغناطیسی یا فروسیال‌ها¹، سوسپانسیون‌های کلوئیدی از نانو ذرات مغناطیسی هستند که نسبت به میدان مغناطیسی خارجی واکنش نشان می‌دهند. این امر سبب می‌شود که محل قرار گرفتن این محلول را از طریق بکارگیری یک میدان مغناطیسی کنترل کرد. نانو ذرات مغناطیسی Fe_3O_4 را می‌توان از راه مخلوط کردن نمک‌های آهن II و III در یک محلول پایه به‌دست آورد [8]. مطالعات تحقیقاتی زیادی درباره فروسیال‌ها وجود دارد، اما انتقال حرارت فروسیال‌ها به اندازه کافی مورد بررسی قرار نگرفته است. بررسی عددی در مورد انتقال حرارت فروسیال و عدد ناسلت در یک حفره دوبعدی توسط آشوری و همکارانش [9] انجام شد، و آن‌ها یک رابطه عمومی برای عدد ناسلت معرفی کردند. همچنین، بیولیو و اسموردین [10] انتقال حرارت فروسیال‌ها را تحت یک میدان مغناطیسی متناوب با توجه به فرکانس، قدرت میدان مغناطیسی خارجی، ضخامت لایه مرزی و درجه حرارت مورد بررسی قرار دادند. لی و ژوان [11] مطالعات تحقیقاتی در مورد تأثیر میدان‌های مغناطیسی یکنواخت و غیریکنواخت در انتقال حرارت جابه‌جایی فروسیال در اعداد رینولدز پایین انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که میدان مغناطیسی می‌تواند فرآیند انتقال حرارت را شدیداً تحت تأثیر قرار دهد. شکیبا و گرجی [12] رفتار حرارتی و هیدروینامیکی نانوسیال مغناطیسی (آب و 4 درصد اکسید آهن) در یک مبدل حرارتی دولوله‌ای مستقیم افقی، تحت میدان مغناطیسی غیریکنواخت متقاطع با شدت‌های متفاوت به‌صورت عددی بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داده است که اعمال میدان مغناطیسی غیریکنواخت متقاطع سبب ایجاد نیروی کلون در جهت عمود بر جریان فروسیال می‌شود که پروفیل سرعت محوری را تغییر داده و در نهایت با ایجاد یک جفت گردابه، منجر به افزایش عدد ناسلت، ضریب اصطکاک پوسته‌ای و افت فشار فروسیال می‌شود. محمدپور فرد [13] رفتار حرارتی و هیدروینامیکی یک نانوسیال غیرنیوتونی مغناطیس‌شونده (با فرض سیال پایه غیرنیوتونی به‌علاوه 4 درصد اکسید آهن) در یک کانال مستطیلی

2- Lattice Boltzman

1- ferrofluid

$$\rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \nabla \cdot S + \alpha \rho_0 g (T - T_0) k + (M \cdot \nabla) B \quad (5)$$

که در آن، ρ_0 چگالی، p فشار، u بردار سرعت، T دمای سیال، S تانسور تنش، k بردار واحد نیروی جاذبه و α ضریب انبساط حرارتی است. معادله انرژی برای یک سیال ترک‌ناپذیر از قانون اصلاح‌شده فوریه تبعیت می‌کند که براساس رابطه 6 بیان می‌شود [19].

$$\rho_0 C \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) = k \nabla^2 T + \eta \phi - \mu_0 T \frac{\partial M}{\partial T} ((u \cdot \nabla) H) \quad (6)$$

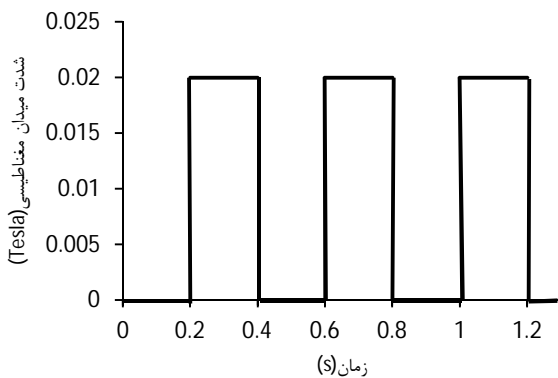
که η ویسکوزیته و $\eta \phi$ اتلاف ویسکوزیته است.

3- روش حل مسئله

با در نظر گرفتن نانوسیال به‌صورت سیال تک‌فاز و استفاده از خواص اصلاح‌شده برای نانوسیال، معادلات اساسی حاکم بر مسئله از روش ضمنی حجم محدود و با روش مرتبه دوم بالادست، گسسته‌سازی و میدان سرعت و فشار با استفاده از روش تکراری الگوریتم سیمپل در نرم‌افزار فلونت حل شده است. با توجه به این‌که نرم‌افزار تجاری فلونت فقط قابلیت بررسی هیدرودینامیک مغناطیسی را دارد لازم است مسئله شامل فروهیدروینامیک برای این نرم‌افزار به‌صورت مناسب تعریف شود. براین‌اساس دستورات برنامه‌نویسی مورد نیاز شامل اضافه کردن ترم نیروی کلونین به معادله مومنوم و اثر حرارت مغناطیس در معادله انرژی [17] و به دنبال آن شرایط مرزی کافی و مناسب نیز تعریف شده است. براین‌اساس، شرایط مرزی خاص برای تأثیر میدان مغناطیسی بر فصل مشترک بین لوله و فروسیال عبوری از داخل آن در نظر گرفته شده است، که به‌صورت توابع تعریف‌شده توسط کاربر در نرم‌افزار فلونت استفاده شده است. از نظر زمانی نیز در حالت میدان مغناطیسی متناوب در فرکانس‌های مختلف میدان مغناطیسی قطع و وصل می‌شود. مبنای این تحقیق ایجاد میدان مغناطیسی متغیر با قطع و وصل کردن میدان است. در تمامی بررسی‌های انجام‌شده تحت میدان مغناطیسی متغیر، زمان قطع و وصل میدان مغناطیسی یکسان بوده و معکوس این زمان (قطع یا وصل) به‌عنوان فرکانس در نظر گرفته شده است. شکل موج میدان مغناطیسی متناوب با زمان در شکل 2 نشان داده شده است.

3-1- شبکه و بررسی حساسیت گره‌های محاسباتی

مدلسازی مسئله و شبکه‌بندی آن در نرم‌افزار گمبیت انجام شده است. جهت بررسی استقلال از شبکه و ایده‌آل سازی آن، افزایش تعداد گره‌های محاسباتی



شکل 2 تغییرات زمانی و شدت میدان مغناطیسی متناوب برای فرکانس 5 هرتز

تأثیر میدان مغناطیسی ثابت و متناوب از نظر زمان بر انتقال حرارت جابه‌جایی داخلی شامل قسمت‌هایی با عایق الکترومغناطیس استفاده شده است.

2- بیان مسئله و حل عددی

هندسه مورد بررسی شامل جریان سیال، شرط مرزی شار حرارتی ثابت در جداره، میدان مغناطیس خارجی و قسمت‌های عایق الکترومغناطیس در شکل 1 نشان داده شده است. قطر داخلی لوله 9 میلی‌متر، طول آن 56 سانتی‌متر، تحت شار حرارتی یکنواخت 300 kW/m^2 ، فشار مطلق خروجی یک اتمسفر و جریان آرام در نظر گرفته شده است. نانو سیال شامل ذرات مغناطیسی Fe_3O_4 در سیال پایه آب با سه میزان درصد حجمی مختلف 2%، 1% و 0/6% انتخاب شده است. برای اعتبارسنجی نتایج عددی، کار تجربی انجام شده توسط، قفرانی و همکارانش [18] مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. تأثیر افزایش درصدهای حجمی مختلف نانوذرات بر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در غیاب میدان مغناطیسی برای یکی از رژیم‌های جریان، مورد بررسی قرار گرفته است. سپس ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با اعمال میدان مغناطیسی متناوب با قدرت 0/02 تسلا در فرکانس‌های مختلف برای درصدهای حجمی و رینولدزهای مختلف، با در نظر گرفتن قسمت‌هایی از لوله که دارای عایق الکترومغناطیس، بررسی شده است.

2-1- معادلات حاکم بر جریان سیال مغناطیسی تحت اثر یک میدان مغناطیسی

معادلات حاکم بر جریان اجباری سیال مغناطیسی تحت اثر میدان مغناطیسی خارجی عبارتند از: معادلات ماکسول، معادله پیوستگی، معادله مومنوم و معادله انرژی. معادلات ماکسول به‌صورت ساده‌سازی شده برای یک سیال غیرهادی و بدون جریان جابه‌جایی براساس روابط (1) و (2) عبارتند از [19].

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \times H = 0 \quad (2)$$

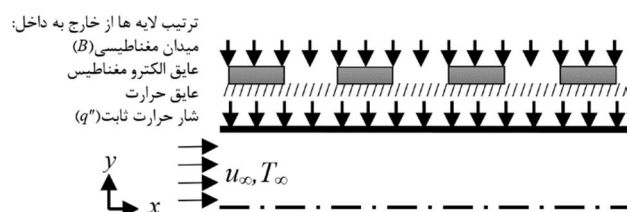
که B القای مغناطیسی و H بردار میدان مغناطیسی است. علاوه بر این بردار میدان مغناطیسی، القای مغناطیسی و بردار مغناطیس‌کنندگی طبق معادله اساسی (3) با هم در ارتباط هستند.

$$B = \mu_0 (M + H) \quad (3)$$

که در آن μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی است. معادله پیوستگی برای سیال تراکم‌ناپذیر براساس رابطه (4) عبارتست از:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (4)$$

معادله مومنوم برای جریان جابه‌جایی مغناطیسی با توجه به روابط پیشین و فرض‌هایی که برای این مسئله داشتیم تبدیل می‌شود به رابطه (5) [19].



شکل 1 فیزیک جریان سیال داخل یک لوله شامل قسمت‌هایی با عایق الکترومغناطیس تحت میدان مغناطیسی

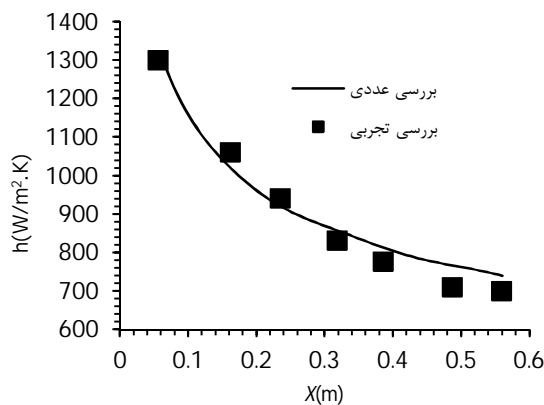
در روابط استفاده‌شده در این بخش، ϕ درصد حجمی نانو ذرات، اندیس m مربوط به خواص نانوسیال، اندیس f خواص سیال پایه و اندیس p نشان‌دهنده خواص نانوذرات است.

3-3- اعتبارسنجی بررسی عددی

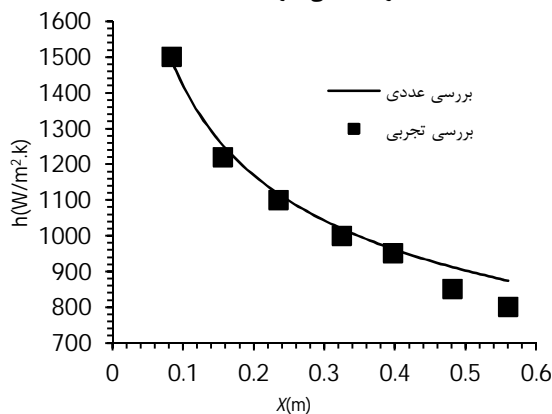
برای اعتبارسنجی نتایج عددی، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی تحت یک میدان مغناطیسی متناوب با قدرت $0/02$ تسلا برای یک میدان مغناطیسی متناوب در دو حالت با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده که در جدول 3 و شکل‌های 3 و 4 آمده است. هماهنگی خوبی بین نتایج به‌دست‌آمده از بررسی

جدول 3 مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نتایج عددی با کار آزمایشگاهی برای فرکانس 5 هرتز، درصد حجمی $Re=560.2$

فاصله از ابتدای لوله (m)	کار حاضر $h(W/m^2.K)$	نتایج آزمایشگاهی $h(W/m^2.K)$ [18]	مقدار خطا (%)
0/056	1305/391	1300/152	0/4
0/1624	1019/461	1060/669	3/8
0/2352	915/236	940/725	2/7
0/3192	853/271	830/654	2/7
0/3864	795/481	775/561	2/5
0/4872	755/088	710/7356	6/2
0/56	738/357	700/546	5/4



شکل 3 مقایسه بین نتایج عددی و تجربی برای تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محلی با میدان مغناطیسی فرکانس 5 هرتز در امتداد فاصله محوری با درصد حجمی 2 و $Re=560$



شکل 4 مقایسه بین نتایج عددی و تجربی برای تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محلی تحت میدان مغناطیسی با فرکانس 50 هرتز، درصد حجمی 1% و $Re=930$

از طریق منوی تطبیق در نرم‌افزار فلونت انجام شده است. به‌عنوان معیاری برای بررسی هم‌گرایی جریان بر شبکه محاسباتی، تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط فروسیال برای $Re=560$ ، $\phi=2\%$ در حالت بدون میدان مغناطیسی رصد شده است. نتایج مربوط به بررسی حساسیت گره‌های محاسباتی در جدول 1 ارائه شده است.

مطابق با این جدول از بین گره‌های تولیدی برای مدل دوبعدی، شبکه چهارم برای ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط در لوله به‌عنوان معیار سنجش استقلال گره‌ها نتیجه مناسب‌تری نسبت به سایر گره‌ها ارائه داده است. با توجه به جدول 1 مشاهده می‌شود با افزایش تعداد گره‌های محاسباتی، دو شبکه 4 و 5، اندازه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط فروسیال تقریباً ثابت مانده است. با استفاده از معیار کالیک [20] جهت بررسی دقت شبکه‌بندی استفاده شده، عدم قطعیت شبکه‌بندی استفاده‌شده برای پارامتر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط، $0/16$ درصد به‌دست آمده است.

3-2- روابط محاسبه خواص فروسیال

در این تحقیق از آب به‌عنوان یک سیال پایه که نانوذرات Fe_3O_4 به آن افزوده شده است به‌عنوان سیال عامل استفاده شده است. مشخصات سیال پایه و نانو ذرات در جدول 2 نشان داده شده است.

چگالی نانوسیال از رابطه (7) به‌دست می‌آید [21].

$$\rho_m = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (7)$$

ضریب انبساط حرارتی نانوسیال از رابطه (8) محاسبه شده است [21].

$$\beta_m = (1 - \phi)\beta_f + \phi\beta_p \quad (8)$$

گرمای ویژه نانوسیال از رابطه (9) محاسبه شده است [2,212].

$$Cp_m = \frac{1}{\rho_m} [(1 - \phi)\rho_f Cp_f + \phi\rho_p Cp_p] \quad (9)$$

ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال از رابطه (10) محاسبه شده است [22].

$$\mu_m = \mu_f (1 - \phi)^{-2.5} \quad (10)$$

ضریب هدایت حرارتی نانوسیال از رابطه (11) به‌دست می‌آید

[23,22,16].

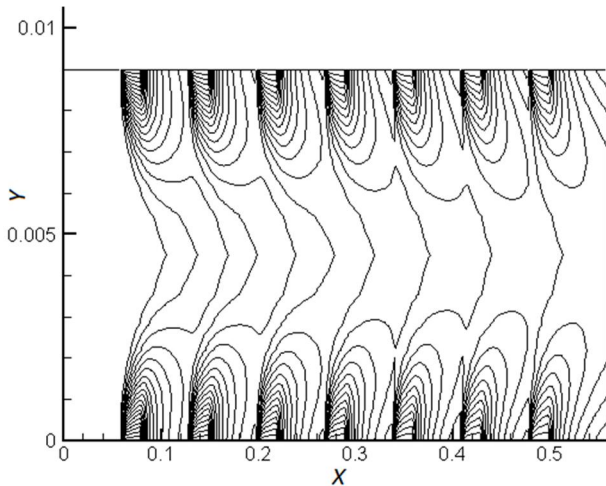
$$k_m = k_f \left[\frac{2 + k_{pf} + 2\phi(k_{pf} - 1)}{2 + k_{pf} - \phi(k_{pf} - 1)} \right], k_{pf} = \frac{k_p}{k_f} \quad (11)$$

جدول 1 گره‌های محاسباتی و نتایج حاصل از آن‌ها

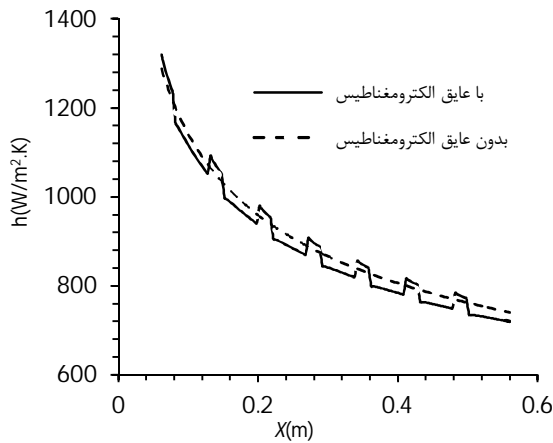
شبکه	تعداد سلول	تعداد گره	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط $(W/m^2.K)$
اول	2000	2121	877/5423
دوم	2708	3065	877/95478
سوم	6224	7049	878/1245
چهارم	10256	11065	878/777791
پنجم	11588	12393	878/7778

جدول 2 خواص سیال پایه و نانوذرات [17]

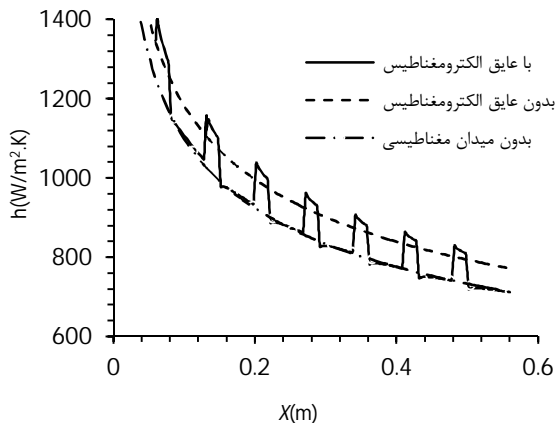
خواص	سیال پایه (آب)	نانوذره (Fe_3O_4)
$C_p(J/kg.K)$	4179	670
$\rho(kg/m^3)$	997/1	5200
$k(W/m.K)$	0/613	6
$\mu(kg/ms)$	0/000891
$\beta(K^{-1})$	0/00021	0/000013



شکل 6 نمایش کانتور میدان مغناطیسی متناوب با قدرت 0/02 تسلا در فرکانس $f=50\text{Hz}$



شکل 7 تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محلی در امتداد فاصله محوری لوله شامل قسمت‌هایی با عایق الکترومغناطیس تحت میدان مغناطیسی، با فرکانس 5 هرتز، درصد حجمی 2 و $Re=560$



شکل 8 تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در امتداد فاصله محوری لوله شامل قسمت‌هایی با عایق الکترومغناطیس تحت میدان مغناطیسی، با فرکانس 50 هرتز، درصد حجمی 2 و $Re=560$

افزایش ضریب انتقال حرارت سیال، حرکات براونی و جابه‌جایی‌های سیال ناشی از تأثیر میدان مغناطیسی سبب می‌شود ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش یابد. همچنین خاصیت مغناطیسی نانو سیال به وجود آمده سبب می‌شود تا ذرات نانو به طرف جداره داخلی لوله حرکت کرده و ضمن

عددی و داده‌های تجربی انجام شده توسط قفرانی و همکارانش [18] وجود دارد و بیشینه خطای روش عددی انجام شده کمتر از 8 درصد بوده است.

4- بحث و نتایج

4-1- بررسی تأثیر استفاده از Fe_3O_4 به جای آب خالص

ابتدا تأثیر افزایش غلظت‌های مختلف نانو سیال بر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، در غیاب میدان مغناطیسی برای یکی از رژیم‌های جریان مورد بررسی قرار گرفته است. نتیجه به دست آمده از ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی فروسیال با درصد‌های حجمی 0/6، 1 و 2، برای رینولدز 560 در شکل 5 نمایش داده شده است.

این نمودار نشان می‌دهد که استفاده از فروسیال انتقال حرارت جابه‌جایی را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، می‌توان از نتایج این گونه استنباط کرد که افزایش غلظت حجمی منجر به بهبود بهتر در انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود.

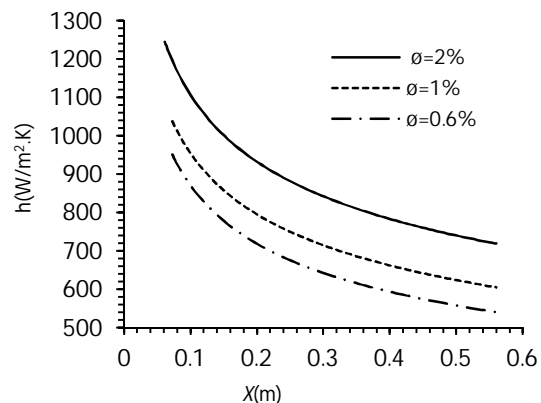
4-2- بررسی عددی انتقال حرارت جابه‌جایی تحت میدان مغناطیسی

متناوب با در نظر گرفتن قسمت‌هایی از لوله به صورت عایق الکترومغناطیس

در این مرحله با توجه به اعتبارسنجی نتایج عددی، انتقال حرارت جابه‌جایی داخل لوله تحت شرایط میدان مغناطیسی متناوب با دو فرکانس مختلف و ماکزیمم قدرت میدان مغناطیسی 0/02 تسلا برای 2 کسر حجمی در اعداد رینولدز مختلف با در نظر گرفتن قسمت‌هایی از لوله به صورت عایق الکترومغناطیس بررسی و نتایج آن با حالت بدون عایق مقایسه شده است. در شکل 6 کانتور میدان مغناطیسی اعمال شده در داخل لوله نشان داده شده است. شکل‌های 7 و 8 تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را در حضور یک میدان مغناطیسی متناوب در درصد حجمی 2، $Re = 560$ برای دو فرکانس 5 و 50 هرتز نشان می‌دهند. مشخص است در قسمت‌هایی از لوله که عایق کاری نشده افزایش ناگهانی ضریب انتقال حرارت روی می‌دهد که از مقایسه آن با حالت پیشین می‌توان مشاهده کرد که این مقدار در فواصل بین عایق‌ها بیشتر از حالت بدون عایق است. بررسی مشابهی برای درصد حجمی 0/6 و $Re = 260$ انجام شد که نتایج آن در شکل‌های 9 و 10 نشان داده شده است.

4-3- تئوری افزایش ضریب انتقال حرارت

هم‌زمان با افزودن ذرات Fe_3O_4 به آب و تشکیل نانو سیال مغناطیسی ضمن



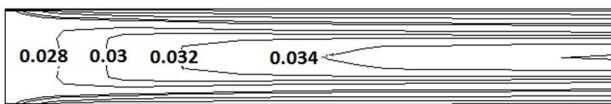
شکل 5 نمودار ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی فروسیال در امتداد فاصله محوری بدون میدان مغناطیسی با درصد‌های حجمی 0/6، 1 و 2 در $Re=560$

افزایش انتقال حرارت قابل توجهی می‌شود. استفاده از عایق الکترومغناطیس در نقاطی از لوله سبب تمرکز امواج الکترومغناطیس در نقاط بین عایق و افزایش بیشتر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در این نقاط می‌شود. میزان افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در حالتی که از عایق الکترومغناطیس استفاده می‌شود نسبت به حالت بدون عایق الکترومغناطیس در حالت‌های مختلف (اعداد رینولدز، درصد‌های حجمی و فرکانس‌های متفاوت) تغییر می‌کند. نتیجه کلی این مقایسه‌ها افزایش موضعی انتقال حرارت در نقاط خاص با افزایش فرکانس میدان مغناطیس و درصد حجمی نانوذرات و کاهش عدد رینولدز است.

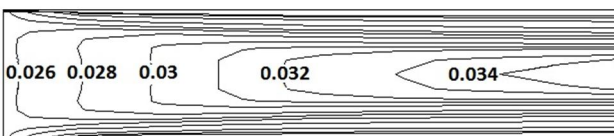
ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متناسب با k/δ_e است. که در آن k ضریب انتقال حرارت هدایتی و δ_e ضخامت لایه مرزی حرارتی است. هم‌زمان با افزودن ذرات Fe_3O_4 به آب و تشکیل نانو سیال مغناطیسی ضمن افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی سیال که سبب افزایش، در صورت عبارت k/δ_e و به دنبال آن افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود، حرکات براونی و جابه‌جایی‌های سیال ناشی از تأثیر میدان مغناطیسی سبب می‌شود با کاهش ضخامت لایه مرزی حرارتی، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش یابد. خاصیت مغناطیسی نانو سیال سبب می‌شود تا المان‌های نانوسیال به طرف جداره داخلی لوله حرکت کرده و ضخامت لایه مرزی را کاهش دهند. مقایسه مقادیر دما قبل از اعمال میدان مغناطیسی و پس از اعمال میدان مغناطیسی نشان می‌دهد که با اعمال یک میدان مغناطیسی و افزایش فرکانس‌ها کاهش ضخامت لایه مرزی حرارتی در لوله تشدید می‌شود. برای پروفیل سرعت نیز میدان مغناطیسی سبب کاهش سرعت در مرکز و افزایش آن در نزدیکی دیواره‌های لوله می‌شود. افزایش عدد رینولدز سبب متمرکز شدن خطوط هم‌دما در مجاورت سطح می‌شود و در قسمت‌هایی که تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، نیروی حجمی مغناطیس سبب افزایش سرعت جریان در مجاورت سطح می‌شود. از این‌رو افزایش این دو سبب افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود. در شکل 11 کانتور اندازه سرعت برای دو حالت بدون میدان مغناطیسی و با میدان مغناطیسی نشان داده شده است و مشخص است که در حالت حضور میدان مغناطیسی سرعت مرکز لوله در فاصله بیشتری از لبه ورودی به مقدار مشخصی می‌رسد.

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله انتقال حرارت کامل‌اً توسعه‌یافته جریان Fe_3O_4 داخل لوله تحت شار حرارتی ثابت به‌صورت عددی بررسی که پارامترهایی نظیر درصد حجمی، عدد رینولدز و فرکانس جریان در نظر گرفته شد. بررسی نتایج



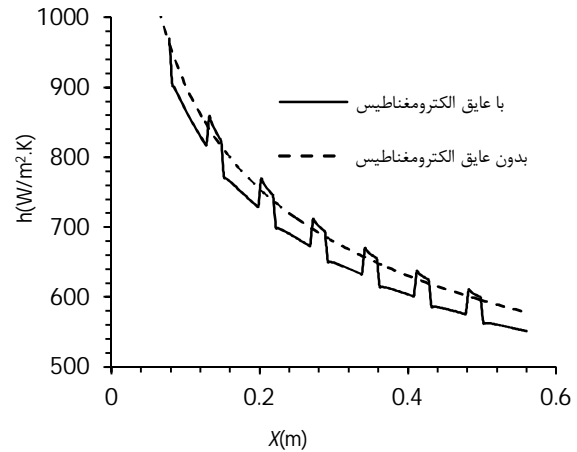
الف بدون میدان مغناطیسی



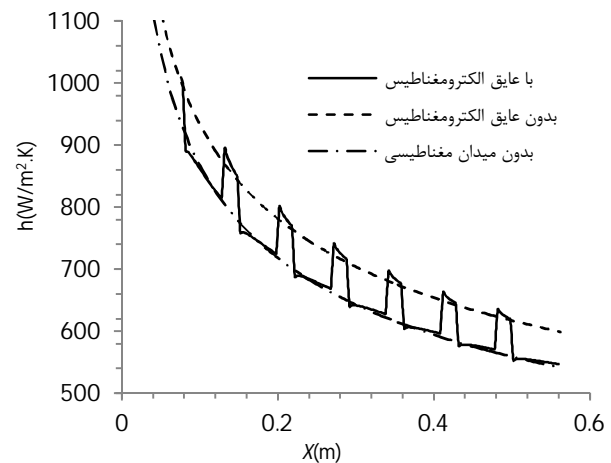
ب با میدان مغناطیسی

شکل 11 کانتور اندازه سرعت برای دو حالت بدون میدان مغناطیسی و با میدان

مغناطیسی



شکل 9 تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محلی در امتداد فاصله محوری لوله شامل قسمت‌هایی با عایق الکترومغناطیس تحت میدان مغناطیسی، با فرکانس 5 هرتز، درصد حجمی 0/6 و $Re=260$



شکل 10 تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محلی در امتداد فاصله محوری لوله شامل قسمت‌هایی با عایق الکترومغناطیس تحت میدان مغناطیسی، با فرکانس 50 هرتز، درصد حجمی 0/6 و $Re=260$

کاهش ضخامت لایه مرزی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را افزایش دهند. نتایج نشان می‌دهد افزایش درصد حجمی ذرات نانو در سیال به دلیل افزایش جذب توده نانو سیال به طرف دیواره سبب افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود. همچنین مشابه همین مکانیزم با افزایش فرکانس اتفاق می‌افتد که سبب می‌شود در واحد زمان تغییرات ضخامت لایه مرزی بیشتری شده و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را افزایش دهند. به‌عنوان یک نتیجه، در این پژوهش، دلایل احتمالی افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در حضور یک میدان مغناطیسی متناوب، افزایش سرعت در لایه مرزی است. هنگامی که سرعت جریان افزایش می‌یابد، روند جذب نانوسیال سخت‌تر خواهد شد، اما در حالت کلی با افزایش عدد رینولدز و افزایش سرعت در لایه مرزی انتقال حرارت افزایش می‌یابد. بدیهی است، حتی در اعداد رینولدز بالا، اگر قدرت میدان مغناطیسی را افزایش دهیم، افزایش انتقال حرارت شدت می‌یابد. علاوه بر این، افزایش در غلظت حجمی در حضور یک میدان مغناطیسی متناوب، سبب افزایش انتقال حرارت خواهد شد، زیرا مکانیزم جذب ذرات به سمت دیواره تشدید می‌شود و به‌عنوان یک نتیجه دیگر می‌توان گفت افزایش قدرت میدان مغناطیسی و غلظت حجمی منجر به

درصد حجمی نانو ذرات	ϕ	موید نکات زیر است.
تلفات لزجت	$\eta\phi$	- با افزودن ذرات Fe_3O_4 به آب خالص در غیاب میدان مغناطیسی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش قابل توجهی دارد و این افزایش در درصدهای حجمی بالاتر بیشتر است که ناشی از افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی نانوسیال به وجود آمده و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متناسب با k/δ_e است. که در آن k ضریب انتقال حرارت هدایتی و δ_e ضخامت لایه مرزی حرارتی است. هم‌زمان با افزودن ذرات Fe_3O_4 به آب و تشکیل نانو سیال مغناطیسی ضمن افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی نانوسیال، سبب افزایش، در صورت عبارت k/δ_e و به دنبال آن افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود.
شرایط اولیه	0	
خواص سیال	f	
خواص نانوسیال	m	
فرایند فشار ثابت	p	
خواص نانوذرات	p	

7- مراجع

- [1] S. U. Choi, J. Eastman, *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles*, Argonne National Lab., IL (United States), pp. 1995.
- [2] J. Eastman, U. Choi, S. Li, L. Thompson, S. Lee, Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids, in *Proceeding of*, Cambridge Univ Press, pp. 3.
- [3] Y. Xuan, Q. Li, Heat transfer enhancement of nanofluids, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 21, No. 1, pp. 58-64, 2000.
- [4] Y. Xuan, W. Roetzel, Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, No. 19, pp. 3701-3707, 2000.
- [5] Q. Li, Y. Xuan, Convective heat transfer and flow characteristics of Cu-water nanofluid, *Science in China Series E: Technological Science*, Vol. 45, No. 4, pp. 408-416, 2002.
- [6] M. Rahimi-Gorji, O. Pourmehran, M. Hatami, D. Ganji, Statistical optimization of microchannel heat sink (MCHS) geometry cooled by different nanofluids using RSM analysis, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 130, No. 2, pp. 1-21, 2015.
- [7] O. Pourmehran, M. Rahimi-Gorji, M. Gorji-Bandpy, D. Ganji, Analytical investigation of squeezing unsteady nanofluid flow between parallel plates by LSM and CM, *Alexandria Engineering Journal*, 2014.
- [8] S. Khalafalla, G. Reimers, Preparation of dilution-stable aqueous magnetic fluids, *Magnetics, IEEE Transactions on*, Vol. 16, No. 2, pp. 178-183, 1980.
- [9] 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*, Vol. 322, No. 22, pp. 3607-3613, 2010.
- [10] A. Belyaev, B. Smorodin, Convection of a ferrofluid in an alternating magnetic field, *Journal of applied mechanics and technical physics*, Vol. 50, No. 4, pp. 558-565, 2009.
- [11] Q. Li, Y. Xuan, Experimental investigation on heat transfer characteristics of magnetic fluid flow around a fine wire under the influence of an external magnetic field, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 33, No. 4, pp. 591-596, 2009.
- [12] A. Shakiba, M. Gorji, Numerical investigation of ferrofluid flow and heat transfer characteristics through a double pipe heat exchanger, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 41-52, 2015 (In Persian).
- [13] M. Mohammadpourfard, Numerical study of magnetic fields effects on the electrical conducting non-Newtonian ferrofluid flow through a vertical channel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 379-389, 2015 (In Persian).
- [14] R. Nouri, M. Gorji, D. Domiri Ganji, Numerical investigation of magnetic field effect on forced convection heat transfer of nanofluid in a sinusoidal channel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 14, pp. 43-55, 2014 (In Persian).
- [15] M. Sheikholeslami, M. Gorji-Bandpy, Free convection of ferrofluid in a cavity heated from below in the presence of an external magnetic field, *Powder Technology*, Vol. 256, No. 0, pp. 490-498, 2014.
- [16] M. Sheikholeslami, D. D. Ganji, M. M. Rashidi, Ferrofluid flow and heat transfer in a semi annulus enclosure in the presence of magnetic source considering thermal radiation, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, No. 0, 2014.
- [17] M. Sheikholeslami, D. D. Ganji, Ferrohydrodynamic and magnetohydrodynamic effects on ferrofluid flow and convective heat transfer, *Energy*, Vol. 75, No. 0, pp. 400-410, 2014.
- [18] A. Ghofrani, M. Dibaei, A. Hakim Sima, M. Shafii, Experimental investigation on laminar forced convection heat transfer of ferrofluids under an alternating magnetic field, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013.
- [19] M. Ghasemian, Z. Najafian Ashrafi, M. Goharkhah, M. Ashjaee, Heat transfer characteristics of Fe_3O_4 ferrofluid flowing in a mini channel under constant and alternating magnetic fields, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 381, No. 0, pp. 158-167, 5/1/2015.
- [20] I. B. Celik, U. Ghia, P. J. Roache, Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in (CFD) applications, *Journal of fluids {Engineering-Transactions} of the {ASME}*, Vol. 130, No. 7, 2008.

- با توجه به اختلاف کم بین نتایج تجربی و حل عددی می‌توان ادعا کرد که حل عددی می‌تواند مسایل شامل میدان مغناطیسی را با دقت قابل قبول شبیه‌سازی و اثر پارامترهای مختلف را بررسی کرد.
- اثر میدان مغناطیسی متناوب از نظر زمانی بر جریان فروسیال سبب افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود که نقش آن در فرکانس‌های زمانی بالاتر بیشتر می‌شود. افزایش فرکانس سبب می‌شود در واحد زمان تغییرات ضخامت لایه مرزی بیشتری شده و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را افزایش دهد.
- استفاده از عایق الکترومغناطیس در نقاطی از لوله سبب تمرکز امواج الکترومغناطیس در نقاط بین عایق و افزایش بیشتر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در این نقاط می‌شود. میزان افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در حالتی که از عایق الکترومغناطیس استفاده می‌شود نسبت به حالت بدون عایق الکترومغناطیس در حالت‌های مختلف (اعداد رینولدز، درصدهای حجمی و فرکانس‌های متفاوت) تغییر می‌کند.

6- فهرست علائم

B	القای مغناطیسی Tesla
C_p	ظرفیت گرمایی J/kg.K
f	فرکانس Hz
H	بردار میدان مغناطیسی Am^{-1}
k	ضریب هدایت حرارتی W/m.K
M	مغناطیس پذیری Am^{-1}
P	فشار Pa
q''	انرژی حرارتی بر واحد سطح W/m^2
Re	عدد رینولدز
r	شعاع m
S	تانسور تنش
T	دما c
t	زمان، s
علائم یونانی	
α	ضریب پخش حرارت m^2/s
β	ضریب تراکم پذیری $1/K$
ρ	چگالی kg/m^3
μ	ویسکوزیته دینامیکی kg/ms
μ_0	نفوذپذیری مغناطیسی

- applications, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 7-14, 2013.
- [23] L. Syam Sundar, M. Naik, K. Sharma, M. Singh, T. C. Siva Reddy, Experimental investigation of forced convection heat transfer and friction factor in a tube with Fe₃O₄ magnetic nanofluid, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 37, pp. 65-71, 2012.
- [21] C.-J. Ho, M. Chen, Z. Li, Numerical simulation of natural convection of nanofluid in a square enclosure: effects due to uncertainties of viscosity and thermal conductivity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, No. 17, pp. 4506-4516, 2008.
- [22] L. S. Sundar, M. K. Singh, A. C. Sousa, Investigation of thermal conductivity and viscosity of Fe₃O₄ nanofluid for heat transfer