



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

هادی کارگر شریف آباد^{۱*}، محمد فلسوفی^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

*سمنان، صندوق پستی ۳۵۱۴۵-۱۷۹

چکیده

در این مقاله انتقال حرارت جابه جایی اجرای فرسیال در داخل یک لوله مسی شامل قسمت هایی با عایق الکترو مغناطیس تحت یک میدان مغناطیسی متنابض 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 الکترو مغناطیس در افزایش انتقال حرارت جابه جایی به صورت تجربی بررسی نشده است، پس از مدل سازی عددی مسئله در حالت بدون عایق الکترو مغناطیس و اعتبارسنجی آن، اثرات میدان مغناطیسی بر مقدار ضریب انتقال حرارت جابه جایی در درصد های حجمی و اعداد رینولز مختلف در لوله ای شامل قسمت هایی با عایق الکترو مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته و با حالت بدون عایق مقایسه شده اند. افزایش فرکانس زمانی میدان مغناطیسی متنابض و کسر حجمی نانوذرات، منجر به افزایش بیشتر انتقال حرارت در محدوده مورد نظر گردیده اند، که تتابع تأثیر این پارامترها و تعییرات ناشی از آن ها نسبت به حالت بدون میدان مغناطیسی بیشتر است. همچنین نتیجه بررسی در اعداد رینولز مختلف نشان داده است که اثر میدان مغناطیسی در اعداد رینولز کم و فرکانس های بزرگتر، بیشتر بوده است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۷ اسفند ۱۳۹۳

پذیرش: ۱۶ فروردین ۱۳۹۴

ارائه در سایت: ۲۹ فروردین ۱۳۹۴

کلید واژگان:

فرسیال

نانوذرات مغناطیسی

انتقال حرارت جابه جایی

میدان مغناطیسی متنابض

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

Hadi Kargarsharifabab^{*}, 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.

۱- مقدمه

که حاوی ۵ درصد حجمی ذرات نانو مس باشد قابل مشاهده و استفاده از ذرات نانو یک روش مؤثر برای بهبود خواص حرارتی سیالات است. زوان و لی [۳] روش هایی برای تهیه نانوسیال با خواص مناسب پیشنهاد کردند که قابل استفاده برای کاربردهای عملی باشد. در این بررسی ها با مد نظر قرار دادن نقش نفوذ برآونی^۱، ته نشینی و پراکندگی، مدلی برای انتقال حرارت در [۲] نشان داد که افزایش تقریبی ۶۰ درصدی در ضریب هدایت حرارتی آب

1- Brownian

Please cite this article using:

H. Kargarsharifabab, M. Falsafi, Numerical modeling of internal convection heat transfer of magnetic fluid in the pulse magnetic field and different time frequencies, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 91-98, 2015 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

عمودی و در حضور میدان های مغناطیسی مختلف، به صورت عددی با استفاده از مدل دوفازی مخلوط، مدل قانون توانی و روش حجم محدود موربدرسی 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، تأثیر بذیری پروفیل سرعت، عدد ناسلت، ضریب اصطکاک از میدان محوری، بیشتر می شود. همچنین هدایت الکتریکی تأثیرات قبل ملاحظه ای بر رفتار فروسیال دارد و قابل صرف نظر نیست و میدان محوری با گردابیان منفی و میدان متقطع اثرات مشابهی بر افزایش عدد ناسلت و ضریب اصطکاک دارد، در حالی که میدان محوری با گردابیان مثبت آنها را کاهش می دهد. در تحقیق دیگری [14] انتقال حرارت جابه جایی در یک کانال سینوسی شکل حاوی نانوسیال تحت میدان مغناطیسی بررسی شده است. در این تحقیق تغییر پارامترهای نظیر اثر شکل هندسی، درصد حجمی نانوسیال، عدد بی بعد هارتمن و عدد بی بعد رینولدز در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داده است با افزایش تمام پارامترهای یادشده، عدد ناسلت افزایش می یابد. شیخ الاسلامی و گرجی بندپی [15] انتقال حرارت جابه جایی طبیعی کیالت- نفت سفید درون محفظه بسته تحت میدان مغناطیسی را با روش عددی لتبیس بولتزمن² بررسی کردند. تأثیر پارامترهای مانند عدد رایلی، ضریب مغناطیسی، درصد حجمی نانو ذره و غیره مطالعه شده است. جریان و انتقال حرارت فروسیال داخل یک محفظه حلقوی مانند تحت تأثیر فروهدودینامیک و هیدرودینامیک مغناطیسی با درنظر گرفتن تأثیر انتقال حرارت تابشی توسط شیخ الاسلامی 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 نانوذرات و عدد مغناطیسی افزایش و با عدد تابش و عدد هارتمن کاهش می یابد. در مطالعه دیگری توسط شیخ الاسلامی و دمیری گنجی [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 کردند. نتایج نشان می دهد عدد ناسلت با افزایش عدد رایلی و کسر حجمی نانوذرات افزایش و با افزایش عدد هارتمن کاهش می یابد، اما عدد مغناطیسی اثر متفاوتی در عدد ناسلت متناظر با عدد رایلی دارد. مطالعات تجربی در مورد انتقال حرارت اجرایی فروسیال، تحت یک میدان مغناطیسی متنابض 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 متنابض، بسیار پیچیده است. یک تحقیق عددی می تواند کمک شایانی به مطالعه این پدیده کند؛ هدف اصلی در این تحقیق، مطالعه انتقال حرارت جابه جایی اجرای فروسیال تحت میدان مغناطیسی متنابض از نظر زمان و شامل قسمت هایی با عایق الکترومغناطیس و با فرکانس های مختلف زمانی به صورت عددی و شناسایی عوامل مؤثر بر این رفتار پیچیده، برای نخستین بار بوده است. ضعف عمده روش آزمایشگاهی پر هزینه و زمان کم بودن آن است، در حالی که در روش حل عددی این چنین نیست. همچنین روش حل دقیق از تحلیل مدل هایی با هندسه پیچیده در اغلب مسائل غیرخطی به ویژه در مواردی که درجه غیرخطی بودن معادلات بالا باشد، عاجز است و تنها روش های عددی در این زمینه کارگشاست؛ بنابراین در این مقاله از روش عددی برای بررسی

نانوسیال ارائه شده است. ژوان و روتنل [4] در مطالعات تئوری خود با استفاده از مدل پراکنده، روابطی برای بررسی انتقال حرارت جابه جایی نانوسیال در داخل لوله ارائه داده اند. در این معادلات نقش ذرات نانو در انتقال حرارت به صورت ترم های اضافی در معادله کلی انتقال حرارت ظاهر می شود. لی و ژوان [5] طی آزمایش هایی برای اندازه گیری انتقال حرارت نانوسیال آب- مس در داخل لوله ای با شار حرارتی ثابت دیواره نشان دادند که عدد ناسلت نانوسیال حاوی ۱ درصد حجمی ذرات مس بیش از ۱۲ درصد افزایش می یابد. رحیمی گرجی و همکاران [6] انتقال حرارت نانوسیال های مختلف با سیال پایه آب و اتیلن گلیکل در میکرو کانال را با در نظر گرفتن آن به صورت 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 نانوذرات، نوع سیال پایه و غیره را روی پروفیل دما، سرعت و عدد ناسلت بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد با افزایش درصد حجمی نانوذرات به دلیل افزایش حرکت براونی ذرات، انتقال حرارت افزایش می یابد. در مطالعه ای که توسط پورمهران و همکاران [7] انجام شده است از روش های شبکه منظم، کمینه مربعات و رانج کوتا 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 فروسیال ها¹، سوسپانسیون های کلوییدی از نانوذرات مغناطیسی هستند که نسبت به میدان مغناطیسی خارجی واکنش نشان می دهند. این امر سبب می شود که محل قرار گرفتن این محلول را از طریق بکار گیری یک میدان مغناطیسی کنترل کرد. نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4 را می توان از راه مخلوط کردن نمک های آهن I و II و III در یک محلول پایه به دست آورد [8]. مطالعات تحقیقاتی زیادی درباره فروسیال ها وجود دارد، اما انتقال حرارت فروسیال ها به اندازه کافی مورد بررسی قرار نگرفته است. بررسی عددی در مورد انتقال حرارت فروسیال و عدد ناسلت در یک حفره دو بعدی توسط آشوری و همکارانش [9] انجام شد، و آنها یک رابطه عمومی برای عدد ناسلت معرفی کردند. همچنین، بیولیو و اسموردین [10] انتقال حرارت فروسیال ها را تحت یک میدان مغناطیسی متنابض 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 میدان های مغناطیسی یکنواخت و غیر یکنواخت در انتقال حرارت جابه جایی فروسیال در اعداد رینولدز پایین انجام دادند. آنها نتیجه گرفتند که میدان مغناطیسی می تواند فرآیند انتقال حرارت را شدیدا تحت تأثیر قرار دهد. شکیبا و گرجی [12] رفتار حرارتی و هیدرودینامیکی نانوسیال مغناطیسی (آب و ۴ درصد اکسید آهن) در یک مبدل حرارتی دولوله ای مستقیم افقی، تحت میدان مغناطیسی غیر یکنواخت متقطع با شدت های متفاوت به صورت عددی بررسی کردند. نتایج نشان داده است که اعمال میدان مغناطیسی غیر یکنواخت متفاوت سبب ایجاد نیروی کلوین در جهت عمود بر جریان فروسیال می شود که پروفیل سرعت محوری را تغییر داده و در نهایت با ایجاد یک جفت گردابه، منجر به افزایش عدد ناسلت، ضریب اصطکاک پوسته ای و افت فشار فروسیال می شود. محمد پور فرد [13] رفتار حرارتی و هیدرودینامیکی یک نانوسیال غیرنیوتونی مغناطیسی شونده (با فرض سیال پایه غیرنیوتونی به علاوه ۴ درصد اکسید آهن) در یک کانال مستطیلی

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

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 ترکمن‌پذیر از قانون اصلاح شده فوریه تبعیت می‌کند که براساس رابطه 6 بیان می‌شود [19].

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

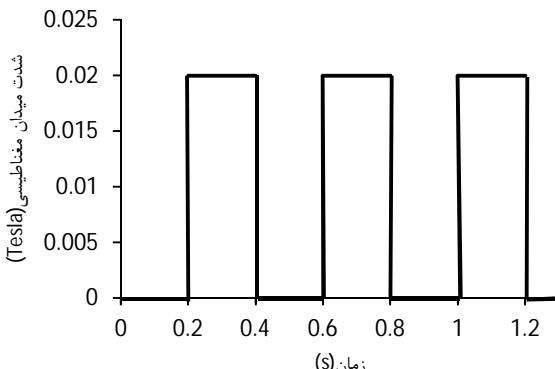
که η ویسکوزیته و ϕ اتلاف ویسکوزیته است.

3- روش حل مسئله

با در نظر گرفتن نانوسیال به صورت سیال تکفاز و استفاده از خواص اصلاح شده برای نانوسیال، معادلات اساسی حاکم بر مسئله از روش ضمنی حجم محدود و با روش مرتبه دوم بالادست، گستته‌سازی و میدان سرعت و فشار با استفاده از روش تکراری الگوریتم سیمپل در نرم‌افزار فلوئنت حل شده است. با توجه به این که نرم‌افزار تجاری فلوئنت فقط قابلیت بررسی هیدرودینامیک مغناطیسی را دارد لازم است مسئله شامل فروهیدرودینامیک برای این نرم‌افزار به صورت مناسب تعریف شود. برای این اساس دستورات برنامه‌نویسی مورد نیاز شامل اضافه کردن ترم نیروی کلوین به معادله مومنتوم و اثر حرارت مغناطیسی در معادله انرژی [17] و به دنبال آن شرایط مرزی کافی و مناسب نیز تعریف شده است. برای این اساس، شرایط مرزی خاص برای تأثیر میدان مغناطیسی بر فعل مشترک بین لوله و فروسیال عبوری از داخل آن در نظر گرفته شده است، که به صورت توابع تعریف شده توسعه کاربر در نرم‌افزار فلوئنت 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 انجام شده تحت میدان مغناطیسی متغیر، زمان قطع و وصل میدان مغناطیسی یکسان بوده و معکوس این زمان (قطع یا وصل) به عنوان 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 درنظر گرفته شده است. نانو سیال شامل ذرات مغناطیسی $0.6\% \text{ Fe}_3\text{O}_4$ در سیال پایه آب با سه میزان درصد حجمی مختلف ۱٪، ۲٪ و ۶٪ 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 درصد های 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 ۰/۰۲ Tسلای در فرکانس‌های مختلف برای درصد های 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 مومنتوم و معادله انرژی. معادلات ماکسول به صورت 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 مغناطیسی‌کنندگی طبق معادله اساسی (3) با هم در ارتباط هستند.

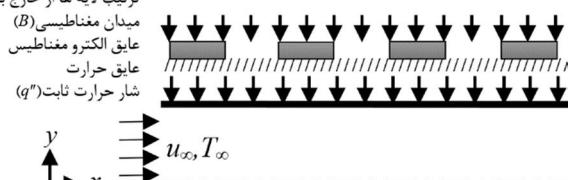
$$B = \mu_0 (M + H) \quad (3)$$

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

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

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

ترتیب لایه‌ها از خارج به داخل:



شکل 1 فیزیک جریان سیال داخلی یک لوله شامل قسمت‌هایی با عایق

الکترومغناطیس تحت میدان مغناطیسی

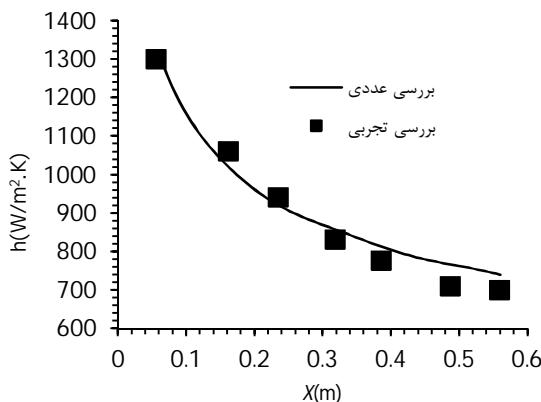
در روابط استفاده شده در این بخش، \emptyset درصد حجمی نانو ذرات، اندیس m مربوط به خواص نانوسیال، اندیس f خواص سیال پایه و اندیس p نشان‌دهنده خواص نانوذرات است.

3-اعتبارسنجی بررسی عددی

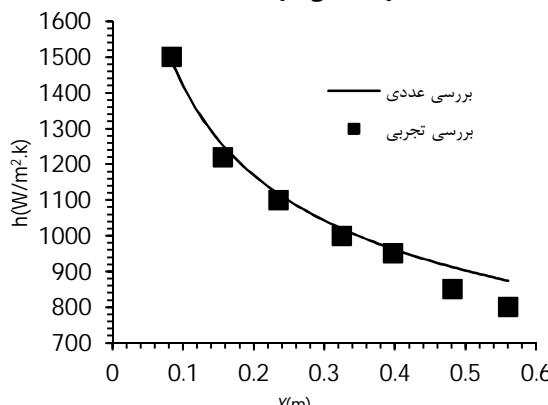
برای اعتبارسنجی نتایج عددی، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی تحت یک میدان مغناطیسی متنابع با قدرت $0/02$ تسلاس برای یک میدان مغناطیسی متنابع در دو حالت با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده که در جدول ۳ و شکل‌های ۳ و ۴ آمده است. همان‌گونی خوبی بین نتایج به دست آمده از بررسی

جدول ۳ مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نتایج عددی با کار آزمایشگاهی برای فرکانس 5 هرتز، درصد حجمی 2 $Re=560.2$

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



شکل ۳ 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 ۴ 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 فلوئنت انجام شده است. به عنوان معیاری برای بررسی همگرایی جریان بر شبکه محاسباتی، تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط فروسیال برای $Re=560$ $\% = 0$ در حالت بدون میدان مغناطیسی رصد شده است. نتایج مربوط به بررسی حساسیت گره‌های محاسباتی در جدول ۱ ارائه شده است.

مطابق با این جدول از بین گره‌های تولیدی برای مدل دوبعدی، شبکه چهارم برای ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط در لوله به عنوان معیار سنجش استقلال گره‌ها نتیجه مناسبتری نسبت به سایر گره‌ها ارائه داده است. با توجه به جدول ۱ 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 دقیق شبکه‌بندی استفاده شده، عدم قطعیت شبکه‌بندی استفاده شده برای پارامتر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط، $0/16$ درصد به دست آمده است.

3-روابط محاسبه خواص فروسیال

در این تحقیق از آب به عنوان یک سیال پایه که نانوذرات Fe_3O_4 به آن افزوده شده است به عنوان سیال عامل استفاده شده است. مشخصات سیال پایه و نانو ذرات در جدول ۲ نشان داده شده است.

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

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

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

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

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

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

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

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

ضریب هدایت حرارتی نانوسیال از رابطه (11) به دست می‌آید [23,22,16].

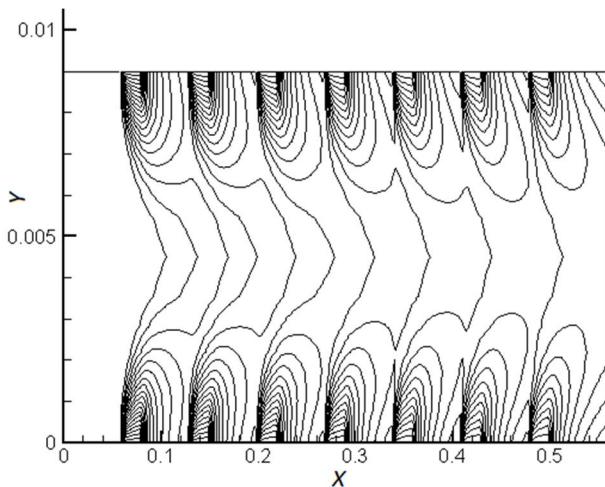
$$k_m = k_f \left[\frac{2 + k_{pf} + 2\emptyset(k_{pf} - 1)}{2 + k_{pf} - \emptyset(k_{pf} - 1)} \right], \quad k_{pf} = \frac{k_p}{k_f} \quad (11)$$

جدول ۱ گره‌های محاسباتی و نتایج حاصل از آن‌ها

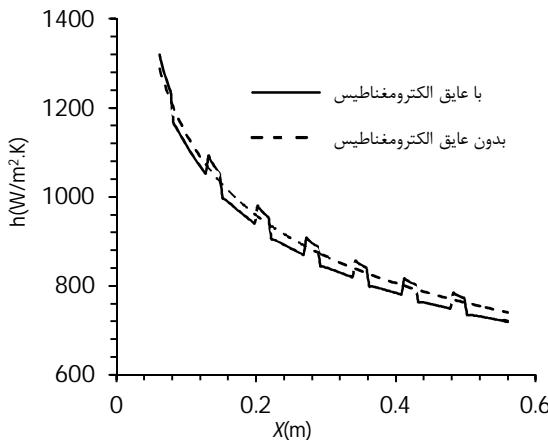
ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (W/m².K) متوسط	تعداد گره	تعداد سلول	شبکه
877/5423	2121	2000	اول
877/95478	3065	2708	دوم
878/1245	7049	6224	سوم
878/777791	11065	10256	چهارم
878/7778	12393	11588	پنجم

جدول 2 خواص سیال پایه و نانوذرات [17]

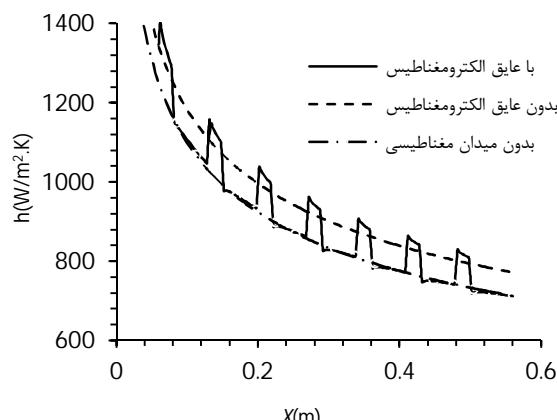
خواص	سیال پایه (آب)	نانوذره (Fe_3O_4)
$C_p(J/kg.K)$	4179	670
$\rho(kg/m^3)$	997/1	5200
$k(W/m.K)$	0/613	6
$\mu(kg/ms)$	0/000891
$\beta(K^{-1})$	0/00021	0/000013



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



شکل 7 تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه جایی محلی در امتداد فاصله محوری لوله شامل قسمت هایی با عایق الکترومغناطیس تحت میدان مغناطیسی، با فرکانس 5 هرتز، درصد حجمی 2 و $\text{Re}=560$



شکل 8 تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه جایی در امتداد فاصله محوری لوله شامل قسمت هایی با عایق الکترومغناطیس تحت میدان مغناطیسی، با فرکانس 50 هرتز، درصد حجمی 2 و $\text{Re}=560$

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

عددی و داده های تجربی انجام شده توسط قفرانی و همکارانش [18] وجود دارد و پیشینه 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

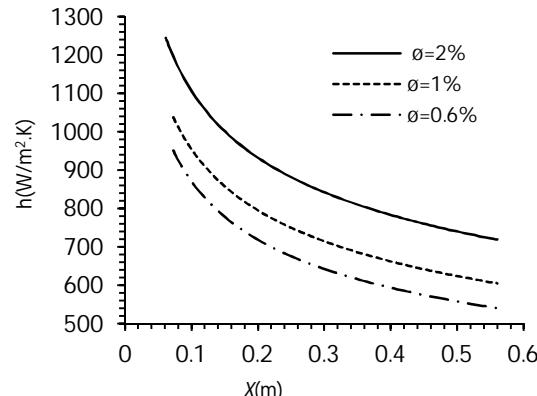
ابتدا تأثیر افزایش غلظت های مختلف نانو سیال بر ضریب انتقال حرارت جابه جایی، در غیاب میدان مغناطیسی برای یکی از رژیم های جریان مورد بررسی قرار گرفته است. نتیجه به دست آمده از ضریب انتقال حرارت جابه جایی فروسیال با درصد های حجمی 0/6، 1 و 2، برای رینولدز 560 در شکل 5 نمایش داده شده است.

این نمودار نشان می دهد که استفاده از فروسیال انتقال حرارت جابه جایی را به طور قابل توجهی بهبود می بخشد.علاوه بر این، می توان از نتایج این گونه استنباط کرد که افزایش غلظت حجمی منجر به بهبود بهتر در انتقال حرارت جابه جایی می شود.

4-2- بررسی عددی انتقال حرارت جابه جایی تحت میدان مغناطیسی متناوب با در نظر گرفتن قسمت هایی از لوله به صورت عایق الکترومغناطیس

در این مرحله با توجه به اعتبارسنجی نتایج عددی، انتقال حرارت جابه جایی داخل لوله تحت شرایط میدان مغناطیسی متناوب با دو فرکانس 0/02 تسلا برای 2 کسر حجمی در اعداد رینولدز مختلف با در نظر گرفتن قسمت هایی 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 تشان داده شده است. شکل های 7 و 8 تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه جایی را در حضور یک میدان مغناطیسی متناوب در درصد حجمی 2 برای $\text{Re} = 560$ در فرکانس 5 و 50 هرتز نشان می دهند. مشخص است در قسمت هایی از لوله که عایق کاری نشده افزایش ناگهانی ضریب انتقال حرارت روی می دهد که از مقایسه آن با حالت پیشین می توان مشاهده کرد که این مقدار در فواصل بین عایق ها بیشتر از حالت بدون عایق است. بررسی مشابه ای برای درصد حجمی 0/6 و $\text{Re} = 260$ انجام شد که نتایج آن در شکل های 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



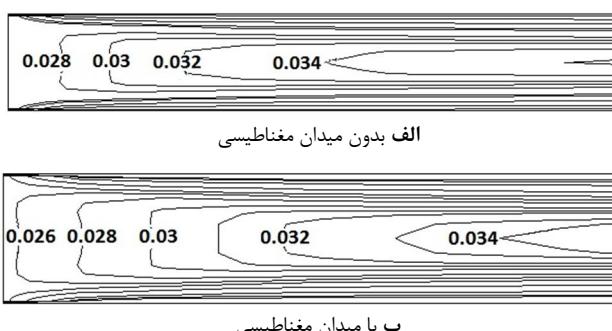
شکل 5 نمودار ضریب انتقال حرارت جابه جایی فروسیال در امتداد فاصله محوری بدون میدان مغناطیسی با درصد های حجمی 1 و 0/6 در $\text{Re}=560$

افزایش انتقال حرارت قابل توجهی می شود. استفاده از عایق الکترومغناطیس در نقاطی از لوله سبب تمکن امواج الکترومغناطیس در نقاط بین عایق و افزایش بیشتر ضریب انتقال حرارت جابه جایی در حالتی که از عایق الکترومغناطیس استفاده می شود نسبت به حالت بدون عایق الکترومغناطیس در حالت های مختلف (اعداد رینولدز، درصد های حجمی و فرکانس های مقاومت) تغییر می کند. نتیجه کلی این مقایسه ها افزایش موضعی انتقال حرارت در نقاط خاص با افزایش فرکانس میدان مغناطیسی و درصد حجمی نانوذرات و کاهش عدد رینولدز است.

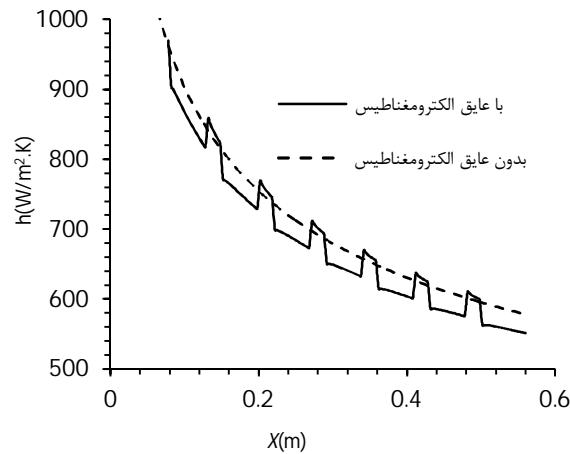
ضریب انتقال حرارت جابه جایی متناسب با k/δ_t است. که در آن k ضریب انتقال حرارت هدایتی و δ_t ضخامت لایه مرزی حرارتی است. هم زمان با افزودن ذرات Fe_3O_4 به آب و تشکیل نانو سیال مغناطیسی ضمن افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی سیال که سبب افزایش، در صورت عبارت k/δ_t و به دنبال آن افزایش ضریب انتقال حرارت جابه جایی می شود، حرکات براونی و جابه جایی های سیال ناشی از تأثیر میدان مغناطیسی سبب می شود با کاهش ضخامت لایه مرزی حرارتی، ضریب انتقال حرارت جابه جایی افزایش یابد. خاصیت مغناطیسی نانو سیال سبب می شود تا المان های نانوسیال به طرف چداره 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 می دهد که با اعمال یک میدان مغناطیسی و افزایش فرکانس ها کاهش ضخامت لایه مرزی حرارتی در لوله تشدید می شود. برای پروفیل سرعت نیز میدان مغناطیسی سبب کاهش سرعت در مرکز و افزایش آن در نزدیکی دیواره های لوله می شود. افزایش عدد رینولدز سبب تمکن شدن خطوط هدم در مجاورت سطح می شود و در قسمت هایی که تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار می گیرد، نیروی حجمی مغناطیس سبب افزایش سرعت جريان در مجاورت سطح می شود. از این رو افزایش اين دو سبب افزایش ضریب انتقال حرارت جابه جایی می شود. 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 مرسد.

5- نتیجه گیری

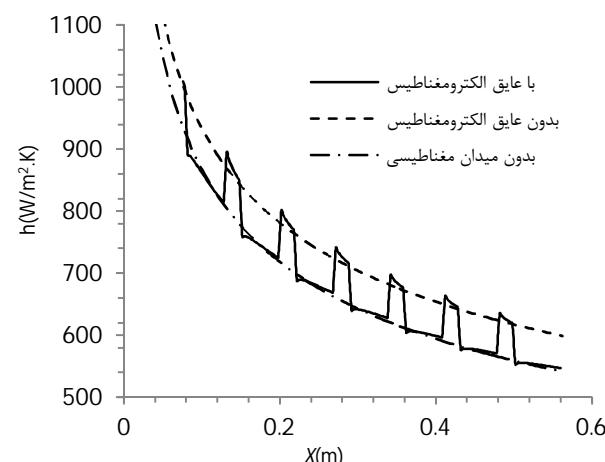
در این مقاله انتقال حرارت حرارت کاملاً توسعه یافته جريان fe304 داخل لوله تحت شار حرارتی ثابت به صورت عددی بررسی که پارامترهای نظری درصد حجمی، عدد رینولدز و فرکانس جريان در نظر گرفته شد. بررسی نتایج



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



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



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

کاهش ضخامت لایه مرزی ضریب انتقال حرارت جابه جایی را افزایش دهنده نتایج نشان می دهد افزایش درصد حجمی ذرات نانو در سیال به دلیل افزایش جذب توده نانو سیال به طرف دیواره سبب افزایش ضریب انتقال حرارت جابه جایی می شود. همچنین مشابه همین مکانیزم با افزایش فرکانس اتفاق می افتد که سبب می شود در واحد زمان تغییرات ضخامت لایه مرزی بیشتری شده و ضریب انتقال حرارت جابه جایی را افزایش دهند. به عنوان یک نتیجه، در این پژوهش، دلایل احتمالی افزایش ضریب انتقال حرارت جابه جایی در حضور یک میدان مغناطیسی متناوب، افزایش سرعت در لایه مرزی است. هنگامی که سرعت جريان افزایش می یابد، روند جذب نانوسیال سخت تر خواهد شد، اما در حالت کلی با افزایش عدد رینولدز و افزایش سرعت در لایه مرزی انتقال حرارت افزایش می یابد. بدیهی است، حتی در اعداد رینولدز بالا، اگر قدرت میدان مغناطیسی را افزایش دهیم، افزایش انتقال حرارت شدت می یابد. 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 می شود و به عنوان یک نتیجه دیگر می توان گفت افزایش قدرت میدان مغناطیسی و غلظت حجمی منجر به

درصد حجمی نانو ذرات	\emptyset
تلفات لزجت	$\eta\phi$
زیرنویس	
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, 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.

موید نکات زیر است.

- 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_t است. که در آن k ضریب انتقال حرارت هدایتی و δ_t 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_t و به دنبال آن افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود.

- 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 متنابع از نظر زمانی بر جریان فروپیال 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 حالی 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 عالیم

الای امگناطیسی	Tesla	B
ظرفیت گرمایی	J/kg.K	C_p
فرکانس	Hz	f
بردار میدان مغناطیسی	Am ⁻¹	H
ضریب هدایت حرارتی	W/m.K	k
مغناطیسی‌بزیری	Am ⁻¹	M
فشار	Pa	P
انرژی حرارتی بر واحد سطح	W/m ²	q"
عدد رینولدز		Re
شعاع	m	r
تائسور تنش		S
دما	c	T
زمان، s	s	t
علمای یونانی		
ضریب پخش حرارت	m ² /s	α
ضریب تراکم‌بزیری	1/K	β
چگالی	kg/m ³	ρ
ویسکوزیته دینامیکی	kg/ms	μ
نفوذپذیری مغناطیسی		μ_0

- 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