



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

هادی کارگرشریف آباد<sup>1\*</sup>، محمد فلسفی<sup>2</sup>

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 35145-179، h.kargar@semnaniau.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

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

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.

## 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 نانوسیال با خواص مناسب پیشنهاد کردند که قابل استفاده برای کاربردهای عملی باشد. در این بررسی ها با مد نظر قرار دادن نقش نفوذ براونی<sup>1</sup>، 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 نانومتري 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

نانوسیال ارائه شده است. ژوان و روتزل [4] در مطالعات تئوری خود با استفاده از مدل پراکندگی، روابطی برای بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی نانو سیال در داخل لوله ارائه داده‌اند. در این معادلات نقش ذرات نانو در انتقال حرارت به صورت ترم‌های اضافی در معادله کلی انتقال حرارت ظاهر می‌شود. لی و ژوان [5] طی آزمایش‌هایی برای اندازه‌گیری انتقال حرارت نانو سیال آب- مس در داخل لوله‌ای با شار حرارتی ثابت دیواره نشان دادند که عدد ناسلت نانو سیال حاوی 1 درصد حجمی ذرات مس بیش از 12 درصد افزایش می‌یابد. رحیمی گرجی و همکاران [6] انتقال حرارت نانو سیال‌های 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 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 نانو سیال بین دو صفحه موازی استفاده کردند و در نهایت مشخص شد که روش کمینه مربعات بهترین روش حل تحلیلی معادلات حاکم بر جریان نانو سیال است.

سیالات مغناطیسی یا فروسیال‌ها<sup>1</sup>، سوسپانسیون‌های کلویدی از نانوذرات 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. نانوذرات مغناطیسی  $Fe_3O_4$  می‌تواند از راه مخلوط کردن نمک‌های آهن II و III در یک محلول پایه به دست 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. شکیبی و گرجی [12] رفتار حرارتی و هیدرودینامیکی نانو سیال مغناطیسی (آب و 4 درصد اکسید آهن) در یک مبدل حرارتی دولوله‌ای مستقیم افقی، تحت میدان مغناطیسی غیریکنواخت متقاطع با شدت‌های متفاوت به صورت 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. محمدپورفرد [13] رفتار حرارتی و هیدرودینامیکی یک نانو سیال غیرنیوتونی مغناطیس‌شونده (با فرض سیال پایه غیرنیوتونی به علاوه 4 درصد اکسید آهن) در یک کانال مستطیلی

عمودی و در حضور میدان‌های مغناطیسی مختلف، به صورت 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 صرف نظر نیست و میدان محوری با گردایان منفی و میدان متقاطع اثرات مشابهی بر افزایش عدد ناسلت و ضریب اصطکاک دارند، در حالی که میدان محوری با گردایان مثبت آن‌ها را کاهش می‌دهد. در تحقیق دیگری [14] انتقال حرارت جابه‌جایی در یک کانال سینوسی شکل حاوی نانو سیال تحت میدان مغناطیسی بررسی شده است. در این تحقیق تغییر پارامترهایی نظیر اثر شکل هندسی، درصد حجمی نانو سیال، 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 می‌یابد. شیخ الاسلامی و گرجی بندی [15] انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی کبالت- نفت سفید درون محفظه بسته تحت میدان مغناطیسی را با روش عددی لیتیس بولتزمن<sup>2</sup> 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 فروهیدرودینامیک و هیدرودینامیک مغناطیسی با در نظر 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 مغناطیس افزایش و با عدد تابش و عدد هارتمن کاهش می‌یابد. 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 کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد عدد ناسلت با افزایش عدد رایلی و کسر حجمی نانوذرات 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 به صورت عددی و شناسایی عوامل مؤثر بر این رفتار پیچیده، برای نخستین بار بوده است. ضعف عمده روش آزمایشگاهی بر هزینه و زمان گیر بودن آن است، در حالی که 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

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،  $\rho_0$  چگالی،  $p$  فشار،  $u$  بردار سرعت،  $T$  دمای سیال،  $S$  تانسور تنش،  $k$  بردار واحد نیروی جاذبه و  $\alpha$  ضریب انبساط حرارتی است. معادله انرژی برای یک سیال ترکم ناپذیر از قانون اصلاح شده فوریه تبعیت می کند که براساس رابطه 6 بیان می شود [19].

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

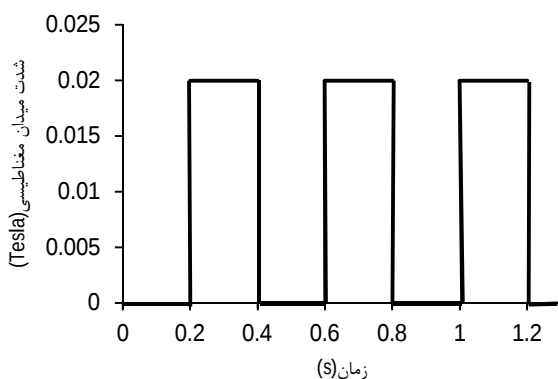
که  $\eta$  ویسکوزیته و  $\eta \phi$  اتلاف ویسکوزیته است.

### 3- روش حل مسئله

با در نظر گرفتن نانوسیال به صورت سیال تک فاز و استفاده از خواص اصلاح شده برای نانوسیال، معادلات اساسی حاکم بر مسئله از روش ضمنی حجم محدود و با روش مرتبه دوم بالادست، گسسته سازی و میدان سرعت و فشار با استفاده از روش تکراری الگوریتم سیمپل در نرم افزار فلوئنت حل شده است. با توجه به این که نرم افزار تجاری فلوئنت فقط قابلیت بررسی هیدرودینامیک مغناطیسی را دارد لازم است مسئله شامل فروهیدروینامیک برای این نرم افزار به صورت مناسب تعریف شود. براین اساس دستورات برنامه نویسی مورد نیاز شامل اضافه کردن ترم نیروی کلون به معادله مومنوم و اثر حرارت مغناطیسی در معادله انرژی [17] و به دنبال آن شرایط مرزی کافی و مناسب نیز تعریف شده است. براین اساس، شرایط مرزی خاص برای تأثیر میدان مغناطیسی بر فصل مشترک بین لوله و فروسیال عبوری از داخل آن در نظر گرفته شده است، که به صورت توابع تعریف شده توسط کاربر در نرم افزار فلوئنت استفاده شده است. از نظر زمانی نیز در حالت میدان مغناطیسی متناوب در فرکانس های مختلف میدان مغناطیسی قطع و وصل می شود. مبنای این تحقیق ایجاد میدان مغناطیسی متغیر با قطع و وصل کردن میدان است. در تمامی بررسی های 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 گره های محاسباتی

مدل سازی مسئله و شبکه بندی آن در نرم افزار گمبیت انجام شده است. جهت بررسی استقلال از شبکه و ایده آل سازی آن، افزایش تعداد گره های 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 جابه جایی داخلی شامل قسمت هایی 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 مغناطیسی خارجی و قسمت های عایق الکترومغناطیس در شکل 1 نشان داده شده است. قطر داخلی لوله 9 میلی متر، طول آن 56 سانتی متر، تحت شار حرارتی یکنواخت  $300 \text{ kW/m}^2$ ، فشار مطلق خروجی یک اتمسفر و جریان آرام در نظر گرفته شده است. نانو سیال شامل ذرات مغناطیسی  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  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 جابه جایی در غیاب میدان مغناطیسی برای یکی از رژیم های جریان، مورد بررسی قرار گرفته است. سپس ضریب انتقال حرارت جابه جایی با اعمال میدان مغناطیسی متناوب با قدرت 0/02 تسلا در فرکانس های مختلف برای درصدهای حجمی و رینولدزهای مختلف، با در نظر گرفتن قسمت هایی 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 به صورت ساده سازی شده برای یک سیال غیرهادی و بدون جریان جابه جایی براساس روابط (1) و (2) عبارتند از [19].

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

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

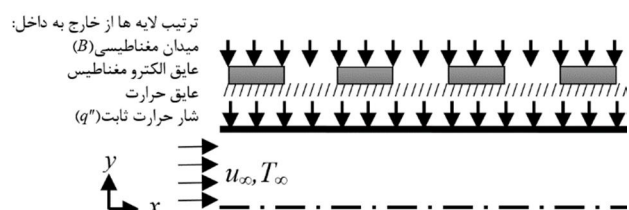
که  $B$  القای مغناطیسی و  $H$  بردار میدان مغناطیسی است. علاوه بر این بردار میدان مغناطیسی، القای مغناطیسی و بردار مغناطیس کنندگی طبق معادله اساسی (3) با هم در ارتباط هستند.

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

که در آن  $\mu_0$  نفوذپذیری مغناطیسی است. معادله پیوستگی برای سیال تراکم ناپذیر براساس رابطه (4) عبارتست از:

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

معادله مومنوم برای جریان جابه جایی مغناطیسی با توجه به روابط پیشین و فرض هایی که برای این مسئله داشتیم تبدیل می شود به رابطه (5) [19].



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

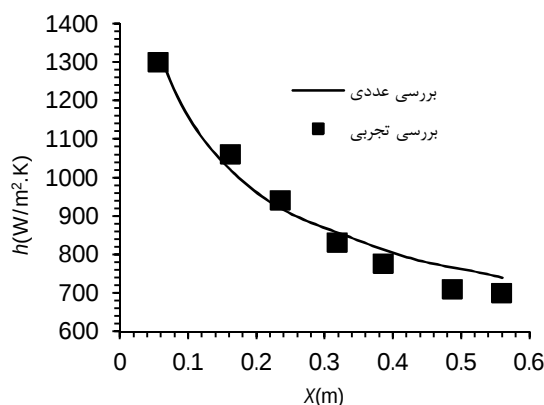
در روابط استفاده شده در این بخش،  $\phi$  درصد حجمی نانو ذرات، اندیس  $m$  مربوط به خواص نانوسیال، اندیس  $f$  خواص سیال پایه و اندیس  $p$  نشان دهنده خواص نانو ذرات است.

### 3-3- اعتبارسنجی بررسی عددی

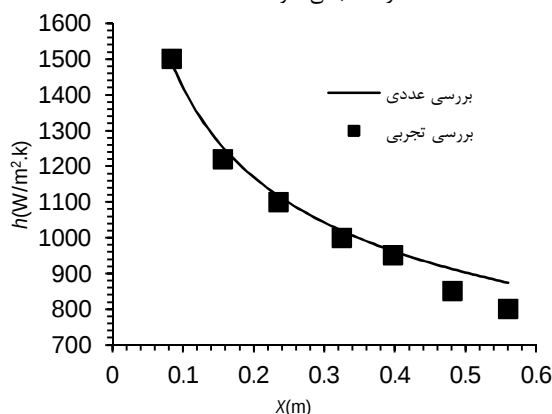
برای اعتبارسنجی نتایج عددی، ضریب انتقال حرارت جابه جایی تحت یک میدان مغناطیسی متناوب با قدرت 0/02 تسلا برای یک میدان مغناطیسی متناوب در دو حالت با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده که در جدول 3 و شکل های 3 و 4 آمده است. هماهنگی خوبی بین نتایج به دست آمده از بررسی

جدول 3 مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه جایی نتایج عددی با کار آزمایشگاهی برای فرکانس 5 هرتز، درصد حجمی 2،  $Re = 560$

| 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 جابه جایی 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 جابه جایی محلی تحت میدان مغناطیسی با فرکانس 50 هرتز، درصد حجمی 1% و  $Re = 930$

از طریق منوی تطبیق در نرم افزار فلوئنت انجام شده است. به عنوان معیاری برای بررسی هم گرایی جریان بر شبکه محاسباتی، تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه جایی متوسط فروسیال برای  $Re=560$ ،  $\phi = 2\%$  در حالت بدون میدان مغناطیسی رصد شده است. نتایج مربوط به بررسی حساسیت گره های محاسباتی در جدول 1 ارائه شده است.

مطابق با این جدول از بین گره های تولیدی برای مدل دوبعدی، شبکه چهارم برای ضریب انتقال حرارت جابه جایی متوسط در لوله به عنوان معیار سنجش استقلال گره ها نتیجه مناسب تری نسبت به سایر گره ها ارائه داده است. با توجه به جدول 1 مشاهده می شود با افزایش تعداد گره های محاسباتی، دو شبکه 4 و 5، اندازه ضریب انتقال حرارت جابه جایی متوسط فروسیال تقریباً ثابت مانده است. با استفاده از معیار کالیک [20] جهت بررسی دقت شبکه بندی استفاده شده، عدم قطعیت شبکه بندی استفاده شده برای پارامتر ضریب انتقال حرارت جابه جایی متوسط، 0/16 درصد به دست آمده است.

### 3-2- روابط محاسبه خواص فروسیال

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

چگالی نانوسیال از رابطه (7) به دست می آید [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) به دست می آید

[23,22,16].

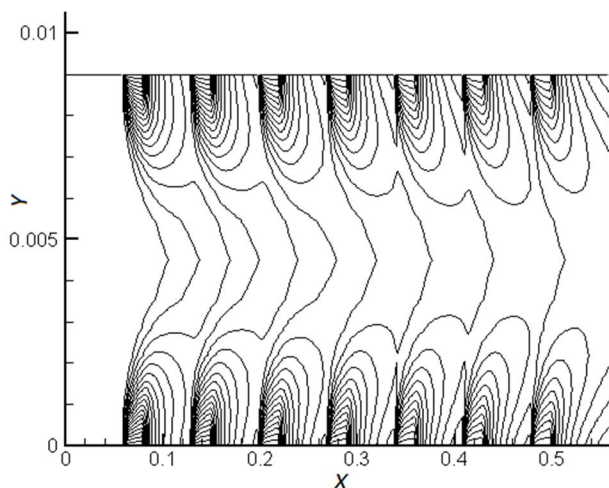
$$k_m = k_f \left[ \frac{2 + k_{pf} + 2\phi(k_{pf} - 1)}{2 + k_{pf} - \phi(k_{pf} - 1)} \right], k_{pf} = \frac{k_p}{k_f} \quad (11)$$

جدول 1 گره های محاسباتی و نتایج حاصل از آن ها

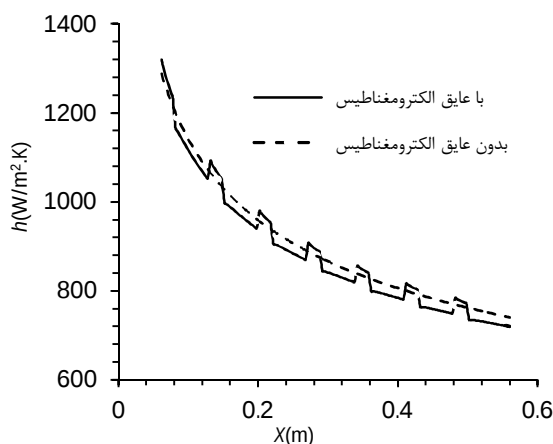
| شبکه  | تعداد سلول | تعداد گره | ضریب انتقال حرارت جابه جایی متوسط $(W/m^2.K)$ |
|-------|------------|-----------|-----------------------------------------------|
| اول   | 2000       | 2121      | 877/5423                                      |
| دوم   | 2708       | 3065      | 877/95478       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

جدول 2 خواص سیال پایه و نانو ذرات [17]

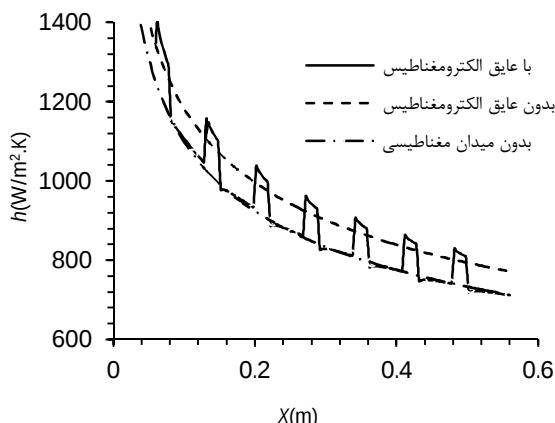
| خواص            | سیال پایه (آب) | نانوذره ( $Fe_3O_4$ ) |
|-----------------|----------------|-----------------------|
| $C_p(J/kg.K)$   | 4179           | 670                   |
| $\rho(kg/m^3)$  | 997/1          | 5200                  |
| $k(W/m.K)$      | 0/613          | 6                     |
| $\mu(kg/ms)$    | 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 انجام‌شده توسط قفرانی و همکارانش [18] وجود دارد و بیشینه خطای روش عددی انجام‌شده 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.

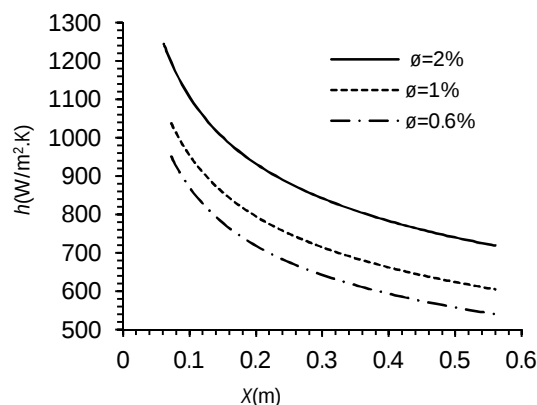
##### 4-2- بررسی عددی انتقال حرارت جابه‌جایی تحت میدان مغناطیسی

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



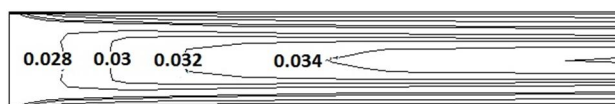
شکل 5 نمودار ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی فروسیال در امتداد فاصله محوری بدون میدان مغناطیسی با درصد‌های حجمی 0/6، 1 و 2 در  $Re=560$

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.

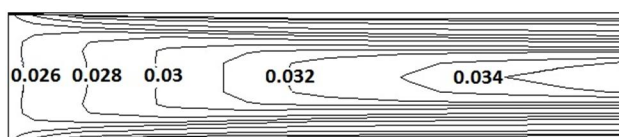
ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متناسب با  $k/\delta_t$  است. که در آن  $k$  ضریب انتقال حرارت هدایتی و  $\delta_t$  ضخامت لایه مرزی حرارتی است. هم‌زمان با افزودن ذرات  $Fe_3O_4$  به آب و تشکیل نانو سیال مغناطیسی ضمن افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی سیال که سبب افزایش، در صورت عبارت  $k/\delta_t$  و به دنبال 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

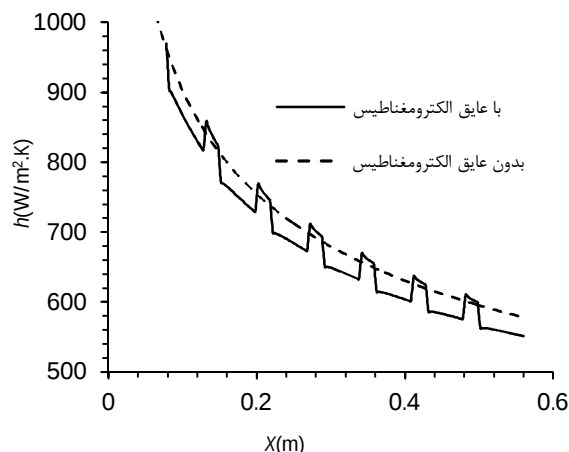


الف بدون میدان مغناطیسی

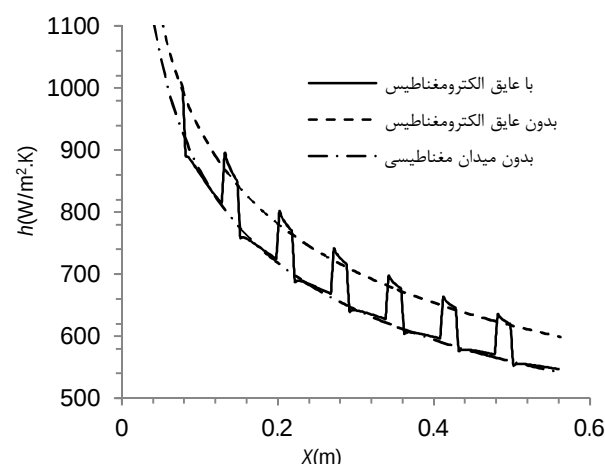


ب با میدان مغناطیسی

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 | $\phi$     | 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 به‌وجود آمده و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متناسب با $k/\delta_t$ است. که در آن $k$ ضریب انتقال حرارت هدایتی و $\delta_t$ 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 درصورت عبارت $k/\delta_t$ و به دنبال آن افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود. |
| شرایط اولیه         | $\theta$   | - 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.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| خواص سیال           | $f$        | - 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.                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| خواص نانوسیال       | $m$        | - 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.                                                                                                                                                                                                       |
| 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, 5/1/1, 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.

## 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                          |
| $\alpha$ | ضریب پخش حرارت $m^2/s$           |
| $\beta$  | ضریب تراکم‌پذیری $1/K$           |
| $\rho$   | چگالی $kg/m^3$                   |
| $\mu$    | ویسکوزیته دینامیکی $kg/ms$       |
| $\mu_0$  | نفوذپذیری مغناطیسی               |

علائم یونانی

- 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 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 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 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanofluid for heat transfer