

# بررسی عددی تاثیر مگنتوهیدرودینامیک بر روی فروسیال درون کانال استوانه‌ای

بهنام وثوق<sup>۱</sup>، هادی کارگر شریف آباد<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۲- استادیار، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

\* سمنان، صندوق پستی 3519697951، h.kargar@semnanaiau.ac.ir

## چکیده

در این مطالعه، رفتار حرارتی و هیدرودینامیکی یک فروسیال (آب بعلاوه ۲٪ اکسید آهن) در یک کانال دو بعدی افقی و در حضور میدان های مغناطیسی مختلف، به صورت عددی با استفاده از مدل تک فازی و روش حجم محدود مورد بررسی قرار گرفته است. با در نظر گرفتن اصول مگنتوهیدرودینامیک، تاثیر اضافه کردن نانو ذرات مغناطیسی به سیال حامل به طور جداگانه بررسی شده و سپس تاثیر میدان های مختلف مغناطیسی غیر یکنواخت بر روی فروسیال بررسی میشود. دیواره های کانال مورد بررسی در دمای ثابت ۲۹۰ کلوین قرار داشته و سیال با دمای ۳۴۰ کلوین و رینولدز ۲۰۰۰ وارد کانال می‌شود. سیال مورد نظر توسط ۴ دو قطبی مغناطیسی که در فواصل مساوی در طول کانال قرار دارند که سیال را تحت میدان مغناطیسی با قدرت های ۰/۱، ۰/۱۵، ۰/۲، ۰/۲۵ قرار می‌دهند و تاثیرات این میدان بر روی مؤلفه های سرعت، فشار، نرخ انتقال حرارت و عدد ناسلت نشان دهنده تاثیر ناچیز نیروی لورنتز بر بهبود انتقال حرارت در محل اعمال میدان را نشان می‌دهد و قابل صرف نظر کردن است.

## کلیدواژگان

فروسیال، مگنتوهیدرودینامیک، انتقال حرارت جابجایی، کانال

## Numerical Study of Magneto Hydrodynamic on Ferro fluid flow in channel

Behnam Vosoogh<sup>1</sup>, Hadi KargarSharifabad<sup>2\*</sup>,

1- Graduate student, Energy and Sustainable Development Research Center, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

2- Strategic Center for Energy and Sustainable Development, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

\* P.O.B.3519697951 Semnan, Iran, h.kargar@semnanaiau.ac.ir

## Abstract

In this numerical case study, thermal and hydrodynamic behavior of Ferro fluid (water + %2 Fe2O3) in two dimension channel in present of magnetic field has been study by single phase model and finite volume method. Magneto hydrodynamic effect and then impact of adding magnetic Nano and effect of non-uniform magnetic field on fluid has been study. channel's wall are on constant temperature of 290 kelvin and main fluid inter the channel in 340 K. four magnetic dipole place along channel and the placed the fluid under magnetic field strength of 0.1,0.15,0.2,0.25. impact of these magnetic field on velocity, pressure, heat transfer rate and Nusselt number studied and it showed very little impact heat transfer enhancement under magnetic field and can be negligible.

## Keywords

Ferro Fluid, Magneto hydrodynamic, channel

مجاری بسیار ریز، میسر نیست. پیشرفت‌های اخیر در فناوری مواد تولید ذرات با اندازه نانومتر (نانو مواد) را که توان فائق آمدن بر این مشکلات را دارند فراهم آورده است. با پخش کردن این نانو مواد در سیال نوع جدیدی از سیال به وجود می‌آید که نانوسیال<sup>۱</sup> نامیده می‌شوند.

چو<sup>۱</sup> [۱] از بخش تکنولوژی انرژی آزمایشگاه ملی آرگون ۳ آمریکا، در سال ۱۹۹۵ اولین بار موضوع نانوسیال را به‌عنوان محیط جدید انتقال حرارت مطرح کرد. آیهار<sup>۲</sup> و همکاران [۲] جریان دو بعدی سیال مغناطیسی با ۵۰٪ جرمی ذرات مغناطیسی Mn-Zn را در لوله افقی که یک دیواره با دمای ثابت و دیواره دیگر تحت میدان مغناطیسی غیر یکنواخت قرار دارد را به صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها از مدل تکفازی برای شبیه سازی جریان استفاده کردند جریان را به صورت خطی و کاملاً توسعه یافته در نظر گرفتند و قابلیت کنترل جریان به وسیله ی میدان مغناطیسی غیر یکنواخت نشان داده‌اند.

## ۱- مقدمه

در چند دهه اخیر به منظور صرفه‌جویی در مصرف انرژی و مواد اولیه و با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی و زیست محیطی تلاش‌های زیادی برای ساخت دستگاه‌های تبادل حرارت پربازده صورت پذیرفته است. هدف اصلی کاهش اندازه مبدل حرارتی موردنیاز برای یک بار حرارتی معین و افزایش ظرفیت مبدل‌های حرارتی موجود می‌باشد. تقاضای جهانی برای دستگاه‌های تبادل حرارتی کارآمد، قابل اطمینان و اقتصادی مخصوصاً در صنایع فرآیندی، تولید الکتروسیته، سیستم‌های سرمایش و تهویه مطبوع، مبدل‌های حرارتی، وسایل نقلیه و... به سرعت رو به افزایش است. اگر اصول مربوط به روش‌های افزایش انتقال حرارت و طراحی دستگاه‌های انتقال حرارت با سطح زیاد به‌خوبی شناخته شوند، امکان صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش آلودگی محیط‌زیست میسر خواهد بود.

افزایش ضریب هدایتی حرارتی مایعات در نتیجه افزودن ذرات با اندازه میلی‌متر و میکرومتر بیش از ۱۰۰ سال است که شناخته شده می‌باشد. اما استفاده از این ذرات به دلیل مشکلات عملی نظیر ته‌نشین شدن سریع ذرات، ایجاد سایش شدید، افزایش افت فشار و عدم امکان استفاده از آن‌ها در

<sup>1</sup> Nano Fluid

<sup>2</sup> Choi

<sup>3</sup> Argonne

<sup>4</sup> Aihara

فروهیدرو دینامیک در نظر گرفته خواهد شد بنابر این اثرات آن با کمک نوشتن کدهایی به معادلات حاکم بر جریان سیال در نرم افزار آنسیس فلونت ۱۵ اضافه شده است.

## ۲- روابط حاکم

### ۱-۲ نیروی لورنتز

قانون گاوس برای چگالی شار مغناطیسی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{M} + \vec{H}) \quad (1)$$

نیروی لورنتز ناشی از برهمکنش جریان الکتریکی و میدان مغناطیسی است. به همین دلیل اثر این نیرو در جریان‌هایی سیالی که هادی الکتریسته هستند بیشتر است. به عبارت دیگر این نیرو نسبت مستقیم با هدایت الکتریکی سیال یا فروسیال دارد. نیروی لورنتز را می‌توان به شکل زیر بیان نمود:

$$\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B} \quad (2)$$

که در آن  $\vec{j}$  بیانگر جریان الکتریکی سیال است و  $B$  چگالی شار مغناطیسی.

### ۲-۳ معادلات جریان سیال و انتقال حرارت

معادله حاکم برای بقای جرم، مومنتم در جهت های  $X$  و  $Y$  (معادلات ناویر - استوکس)<sup>۴</sup> و انرژی به صورت زیر است:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + F_L(x) \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + F_L(y) \quad (5)$$

و معادله انرژی به صورت زیر است:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \mu \theta \quad (6)$$

که در آن  $\theta$  معرف اتلاف ویسکوزیته می‌باشد و از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\theta = 2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \quad (7)$$

### ۳-۳ میدان مغناطیسی

میدان مغناطیسی که توسط یک دوقطبی در فضای دوبعدی ایجاد می‌شود را می‌توان توسط رابطه زیر بیان نمود:

$$\vec{H} = \frac{m}{2\pi r^2} (\cos(2\varphi)i + \sin(2\varphi)j) \quad (8)$$

که در آن  $m$  شدت میدان مغناطیسی دوقطبی بود و  $r$  و  $\varphi$  به ترتیب بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$r = \sqrt{(x - X)^2 + (y - Y)^2} \quad (9)$$

گانگولی<sup>۱</sup> و همکاران [۳] جریان و انتقال حرارت یک سیال مغناطیسی با دمای ۳۸۰K را بین دو صفحه موازی که یک صفحه با دمای ثابت ۳۰۰K و یک صفحه به صورت آدیاباتیک تحت اثر یک دوقطبی مغناطیسی با استفاده از روش های عددی بررسی کرده اند. در این بررسی سیال به صورت نارسانا در نظر گرفته شده است. آن ها به این نتیجه رسیدند که میدان مغناطیسی اعمالی روی جریان موثر نخواهد بود مگر اینکه میدان مغناطیسی از قدرت کافی برای غلبه بر نیروی لزجت برخوردار باشد و عدد ناسلت با افزایش میدان مغناطیسی افزایش پیدا خواهد کرد. لاجوردی و همکاران [۴] در یک کار آزمایشگاهی، انتقال حرارت جابجایی اجباری فروسیال آب-اکسید آهن با قطر ۰.۱mm را در یک لوله ی مستقیم تحت شرایط شار حرارتی ثابت دیواره و میدان مغناطیسی یکنواخت در راستای جریان و در رژیم آرام بررسی کردند. این محققین نشان دادند که افزودن نانوذرات اکسید آهن به سیال پایه به تنهایی انتقال حرارت جابجایی را افزایش نمی‌دهد و اعمال میدان مغناطیسی عامل افزایش انتقال حرارت است و همچنین با افزایش میدان مغناطیسی شاهد افزایش قابل توجه ضریب انتقال حرارت می‌شویم. ژان<sup>۲</sup> و همکاران [۵] با استفاده از روش تلیس- بلتزنم به مطالعه عددی انتقال حرارت فروسیال ۱٪ که با دمای ۳۸۰K که بین دو صفحه که یکی در دمای ثابت ۳۰۰K و صفحه دیگر آدیاباتیک در جریان است را در حضور میدان های مغناطیسی غیر یکنواخت پرداختند. نتایج آنها نشانگر امکان کنترل میزان انتقال حرارت با تغییر جهت گرادیان میدان مغناطیسی است. بیشترین میزان افزایش انتقال حرارت هنگامی است که گرادیان میدان هم جهت جریان باشد، کاهش انتقال حرارت مشاهده شده است. امین فر و همکاران [۶] اثر میدان مغناطیسی غیر یکنواخت بر رفتار هیدرو دینامیکی و حرارتی یک فرو سیال ۴٪ در جابجایی ترکیبی در یک لوله عمودی بررسی کردند. آنها از مدل دو فازی مخلوط برای شبیه سازی فروسیال مورد نظر استفاده کردند و نشان دادند هنگامی که از میدان مغناطیسی که دارای گرادیان منفی در جهت جریان است استفاده می‌کنند پروفیل سرعت تحت تر می‌شود و ضریب انتقال حرارت جابجایی جریان افزایش می‌یابد در حالی که برای میدان مغناطیسی با گرادیان مثبت عکس این قضیه صادق است. همچنین آنها نشان دادند که اثر میدان مغناطیسی با افزایش شدت میدان و کاهش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. شیخ الاسلامی و گنجی [۷] در یک شبیه سازی عددی فروهیدرو دینامیک و مگنتو هیدرو دینامیک در یک کانال خمیده با جریان آزاد فروسیال مس-آب برای مقادیر مختلف عدد رایلی بدست آوردند که اثر فروهیدرو دینامیک باعث افزایش عدد مغناطیسی<sup>۳</sup> می‌شود.

با وجود این مطالعات، برای آشنایی کامل با رفتار هیدرو دینامیکی و حرارتی فروسیال های تحت اثر میدان های مغناطیسی مختلف انجام تحقیقات بیشتری ضروری به نظر می‌رسد.

در کار حاضر در نظر است که تاثیر اعمال میدانهای مغناطیسی بر فروسیال، در یک کانال دو بعدی افقی بررسی شود. تاثیر میدان بر رفتار هیدرو دینامیکی و حرارتی فروسیال در جریان جابجایی ترکیبی آرام با استفاده از مدل تک فازی بررسی شده است که با تغییر توان میدان مغناطیسی، میزان اثر گزاری نیروی کلون بر روی عدد ناسلت، میزان حرارت منتقل شده از دیواره ها، میزان اثر گزاری آن بر فشار و سرعت مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. چهار توان مختلف میدان اعمال خواهد شد. همانطور که قبلا هم ذکر شد اصول

<sup>1</sup> Ganguly

<sup>2</sup> Xuan

<sup>3</sup> Magnetic Number

<sup>4</sup> Navier-Stokes equations

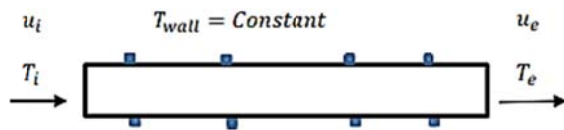
جدول ۱ جدول مشخصات ترموفیزیکی سیال پایه و نانو ذرات

چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )	گرمای ویژه (J/kgK)	رسانش گرمایی (W/mK)	گرانروی (Ns/m <sup>2</sup> )
نانو ذرات	۴۹۵۰	۷	۰/۰۰۰۶۵
آب	۹۹۷	۰/۶۱	۰/۰۰۰۶۹
نانوسیال (۲٪)	۱۰۷۶	۳۸۵۴	۰/۶۴

#### ۵- حل عددی

##### ۵-۱ شرح مسئله

مسئله‌ای که در پروژه حاضر بررسی می‌شود، جریان آب و فروسیال در یک کانال دو بعدی به صورت چداگانه شبیه سازی می‌شود. ابعاد کانال ۴ میلی‌متر (ارتفاع) در ۰/۵ متر (طول) است. کانال حاوی فروسیال است که از آب و ۲ درصد حجمی اکسید آهن Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> تشکیل شده است. عدد رینولدز جریان ۲۰۰۰ است. در دو طرف کانال ۸ عدد (در هر طرف ۴ عدد) دوقطبی مغناطیسی قرار گرفته‌اند که با فواصل مساوی روی دیواره و روبرو هم چیده شده‌اند. شکل هندسه این کانال همراه با محل دوقطبی‌های مغناطیسی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ طرح هندسی مسله

همانطور که گفته شد شبیه‌سازی برای عدد رینولدز ۲۰۰۰ صورت گرفته است. این عدد رینولدز با توجه به ارتفاع کانال و مقدار لزجت محاسبه شده، معادل سرعت  $\bar{u} = 0.326 \text{ m/s}$  و دبی جرمی  $\dot{m} = 1.3 \text{ kg/s}$  برای آب خالص و سرعت  $\bar{u} = 0.317 \text{ m/s}$  و دبی جرمی  $\dot{m} = 1.365 \text{ kg/s}$  برای فروسیال ۲ درصد می‌باشد. دمای ورودی در تمامی اجراها، ۳۴۰ درجه کلوین و دمای دیواره‌ها ۲۹۰ درجه کلوین در نظر گرفته شده است. دوقطبی‌ها با فرکانس ۱ هرتز قطع و وصل می‌شوند. دوقطبی‌های بالای کانال دارای اختلاف فاز  $\pi$  با دوقطبی‌های پایین کانال هستند. این بدان معنی است که نیم ثانیه دوقطبی‌های پایین روشن هستند و سپس خاموش شده و نیم ثانیه بعدی دوقطبی‌های بالای کانال فعال می‌شوند. جریان فروسیال علاوه بر تبادل گرمایی با دیواره‌ها تحت تأثیر میدانهای مغناطیسی که بصورت جمله چشمه در معادلات ممنتوم وارد می‌شوند و حرکت سیال را تحت تأثیر خود قرار می‌دهند، دچار جابه‌جایی اجباری می‌شوند. برای شبیه‌سازی این مسأله باید معادلات حاکم بر جریان را همراه با شروط مرزی مربوطه حل نمود.

برای شبیه سازی اثر مگنتو هیدروودینامیک و نیروی لورنتز است که معادله آن در ادامه شرح داده خواهد شد از ابزار MHD نرم افزار فلونت استفاده شده تا براساس میدان متغیر با زمان و مکان، نیروی لورنتز را محاسبه نموده و به معادله ممنتوم اضافه نماید.

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{y - Y}{x - X} \right) \quad (10)$$

که در آن (X,Y) مختصات دوقطبی ها هستند.

#### ۴- خواص ترموفیزیکی مخلوط

##### ۴-۱ جرم حجمی

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_n \quad (11)$$

##### ۴-۲ گرمای ویژه

$$c_{p,nf} = \frac{(1 - \phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_n}{(1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_n} \quad (12)$$

##### ۴-۳ ضریب انتقال حرارت هدایتی

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_n + 2k_f - 2\phi(k_f - k_n)}{k_n + 2k_f + 2\phi(k_f - k_n)} \quad (13)$$

##### ۴-۴ لزجت (ویسکوزیته)

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 2/5 \phi) \quad (14)$$

##### ۴-۵ هدایت الکتریکی

$$\frac{\sigma_{nf}}{\sigma_f} = 1 + \frac{3(\frac{\sigma_n}{\sigma_f} - 1)\phi}{\left(\frac{\sigma_n}{\sigma_f} + 2\right) - \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_f} - 1\right)\phi} \quad (15)$$

که در آنها زیرنویس‌های f و n به ترتیب بیانگر سیال و ذرات جامد بوده و  $\phi$  بیانگر نسبت حجمی ذرات جامد در سیال (در اینجا ۲ درصد) می‌باشد. با داشتن خواص سیال و همچنین خواص نانوذرات جامد (در اینجا Fe304) از داخل مقالات، خواص ترموفیزیکی نانو سیال مورد نظر با استفاده از روابط بالا به صورت زیر به دست می‌آید.

جرم حجمی:

$$\rho_{nf} = 0.98 \times 997 + 0.02 \times 4950 = 1076.06$$

گرمای ویژه:

$$c_{p,nf} = \frac{0.98 \times (997 \times 4180) + 0.02 \times (4950 \times 640)}{1076.06} = 3854.31$$

ضریب انتقال حرارتی:

$$k_{nf} = \frac{7 + 2 \times 0.61 - 2 \times 0.02 \times (0.61 - 7)}{7 + 2 \times 0.61 + 2 \times 0.02 \times (0.61 - 7)} \times 0.61 = 0.6491$$

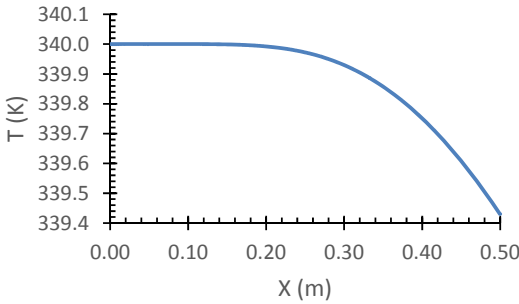
لزجت:

$$\mu_{nf} = 0.00065 \times (1 + 2.5 \times 0.02) = 0.0006825$$

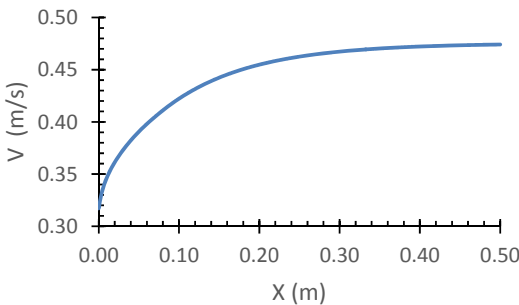
هدایت الکتریکی:

$$\sigma_{nf} = 1.06\sigma_f = 0.053$$

ملاحظه می‌نمایید. همانطور که مشاهده می‌شود دمای ۳۴۰ درجه وردی در اثر تبادل حرارت با دیواره اندکی کاهش می‌یابد. همچنین سرعت به دلیل تشکیل لایه مرزی در ابتدای ورودی کانال افزایش یافته و نهایت به مقدار توسعه یافته که ۱/۵ برابر مقدار ورودی است می‌رسد. تغییرات دما و مؤلفه افقی سرعت در طول کانال بر روی خط میانی جریان را در شکل های ۳ و ۴ مشاهده می‌کنید.

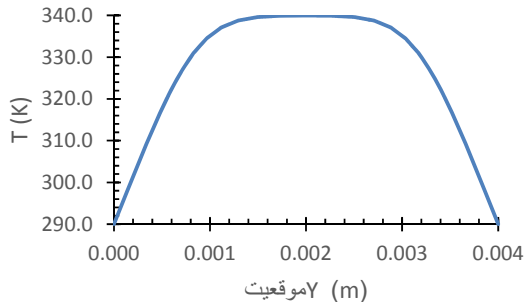


شکل ۳ تغییرات دما بر روی خط میانی جریان در طول کانال



شکل ۴ تغییرات مؤلفه افقی سرعت بر روی خط میانی جریان در طول کانال

در شکل ۵ نیز تغییرات دما و در شکل ۶ تغییرات مؤلفه افقی سرعت در عرض کانال (روی خط میانی) نشان داده شده است. شکل سهموی سرعت در عرض کانال مشهود است. دما بر خلاف سرعت یک ناحیه تقریباً هموار را در مرکز خود داراست که بیانگر حفظ دما تا فاصله مشخصی از دیواره کانال می‌باشد.



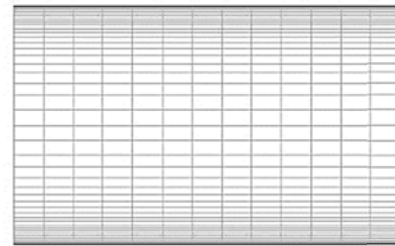
شکل ۵ تغییرات دما در عرض کانال (در وسط کانال)

همچنین در شکل ۷ و ۸ کانتور دما و کانتور سرعت در داخل کانال نشان داده شده است که در آن توسعه یافتگی جریان به خوبی مشهود است

در کار حاضر از نرم‌افزار فلونت که معادلات را به روش حجم‌محدود حل می‌نماید، برای شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. از روش مرتبه دوم پسر<sup>۱</sup> برای گسسته‌سازی مکانی و از روش مرتبه دوم ضمنی<sup>۲</sup> برای گسسته‌سازی زمانی استفاده شده است.

## ۵-۲ شبکه بندی

گام نخست برای شبیه‌سازی عددی جریان گسسته نمودن دامنه یا همان شبکه‌بندی است. کانال مورد نظر توسط نرم‌افزار گمبیت شبکه‌بندی شده است. برای شبکه‌بندی کانال، ۵۰ شبکه در عرض و ۱۰۰۰ شبکه در طول کانال استفاده شده است. شبکه مرزهای کانال را در شکل ۱ ملاحظه می‌نمایید. همانطور که در این شکل ۲ نیز قابل مشاهده است، نقاط شبکه در نزدیکی دیواره برای بالا بردن دقت شبیه‌سازی مجتمع شده‌اند.



شکل ۲ شبکه بندی در نزدیکی دیواره ها

## ۶- نتایج و بحث

### ۶-۱ آزمون استقلال از شبکه

نتایج بررسی آزمون استقلال جواب ها از شبکه بندی انجام شده و در جدول ۲ ارائه شده است. در این راستا جریان در شبکه بندی های ۴۰×۸۰، ۳۰×۷۰، ۶۰×۱۱۰ و ۷۰×۱۲۰ گره بررسی شده و نتایج نشان دهنده تغییرات بسیار ناچیز دما در نقطه مورد نظر است.

جدول ۲ بررسی استقلال جواب ها از شبکه بندی

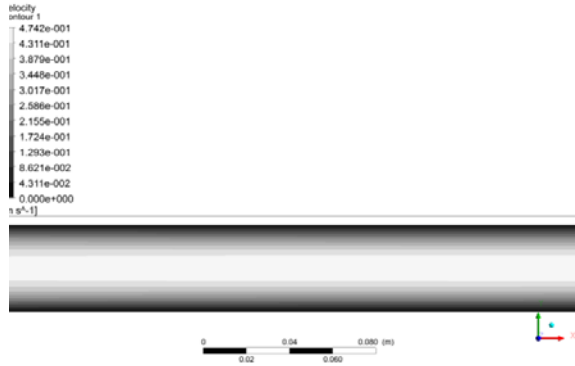
فروسیال ۲٪	
تعداد گره	دما (کلوین)
۷۰×۳۰	۳۳۹/۵۷۷۴۸۴
۸۰×۴۰	۳۳۹/۶۱۸۷۷۴
۱۰۰×۵۰	۳۳۹/۴۳۰۳۲۸
۱۱۰×۶۰	۳۳۹/۶۳۹۹۵۴
۱۲۰×۷۰	۳۳۹/۶۳۷۹۳۹

### ۶-۲ نتایج بدون میدان مغناطیسی

در ابتدا جریان پایای فروسیال درون کانال بدون حضور میدان مغناطیسی با اعمال خواص ذکر شده و شرایط مرزی مسأله حل شده است. در شکل زیر تغییرات دما و سرعت در طول کانال (روی خط میانی) را

<sup>1</sup> Second Order Upwind

<sup>2</sup> Second Order Implicit



شکل ۹ کانتور سرعت در طول کانال

در ادامه به منظور بررسی میزان اثر گذاری فروسیال، اقدام به شبیه سازی جریان آب درون کانال کرده ونتایج آن همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌کنید با نمودار شاه مقایسه شده است. در شکل ۱۰ مقایسه عدد ناسلت برای آب و فروسیال را مشاهده می‌کنید که به وضوح می‌توان مشاهده کرد که اضافه کردن نانوذرات منجر به بهبود انتقال حرارت شده است. در شکل ۱۱ حرارت منتقل شده از دیواره کانال برای مقطعی از دیوار نشان داده شده است.

### ۳-۶ اعتبار سنجی

در این قسمت به عنوان بخش میانی از یک مسأله پایا و ساده‌تر استفاده شده است. به منظور اعتبارسنجی مسأله آقای گانگولی<sup>۱</sup> در این کار شبیه‌سازی شده است. در این کار از یک میکروکانال ۲ میلی‌متر در ۲۰ میلیمتری برای شبیه‌سازی استفاده شده است. سرعت ورودی ۵ میلی‌متر بر ثانیه و دمای آن ۳۸۰ درجه کلونین است. دیواره بالایی آدیاباتیک بوده و دیواره پایینی دارای دمای ثابت ۳۰۰ درجه کلونین است. یک دوقطبی مغناطیسی در وسط کانال و در ۱ میلیمتری زیر آن قرار گرفته است. در اینجا دوقطبی با شدت مغناطیسی ۰/۵۸ که در طول زمان نیز ثابت است، شبیه سازی شده است. خواص مورد استفاده در این کار متفاوت با شبیه سازی اصلی پروژه حاضر و همانهایی است که در مقاله مورد اشاره استفاده شده است. به عبارت دیگر:

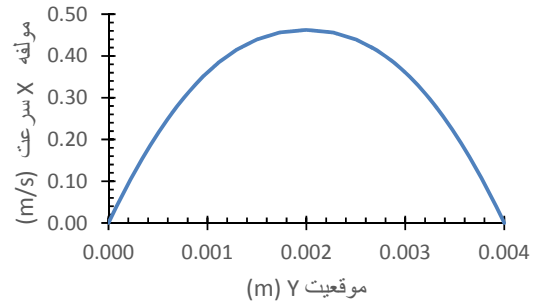
جدول ۳ مشخصات سیال مورد استفاده در کار آقای گانگولی

گرانروی (Ns/m <sup>2</sup> )	رسانش گرمایی (W/mK)	گرمای ویژه (J/kgK)	چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )
۰/۰۰۱	۰/۷۲۷۲	۴۰۰۰	۱۱۸۰

در شبیه سازی این کار از حل پایای فلوننت استفاده شده است. در بخش اول نیروی لورنتز ابزار MHD برنامه فلوننت شبیه سازی شده است. نتایج حاصل شده در شکل ۱۲ قابل مشاهده است.

### ۴-۶ نتایج مسئله اصلی

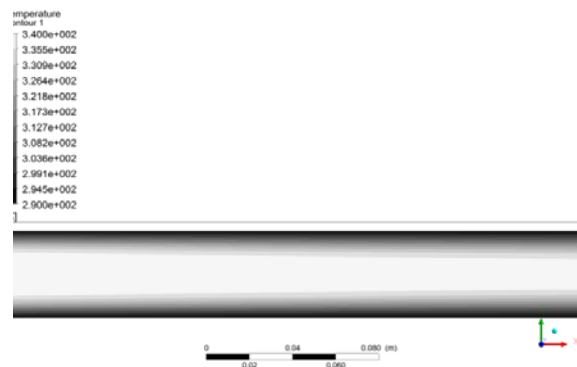
در این بخش نتایج شبیه‌سازی‌های مسأله اصلی ارائه خواهد شد. این شبیه‌سازی‌ها برای مقادیر مختلف شدت میدان مغناطیسی شامل  $m=0/1$



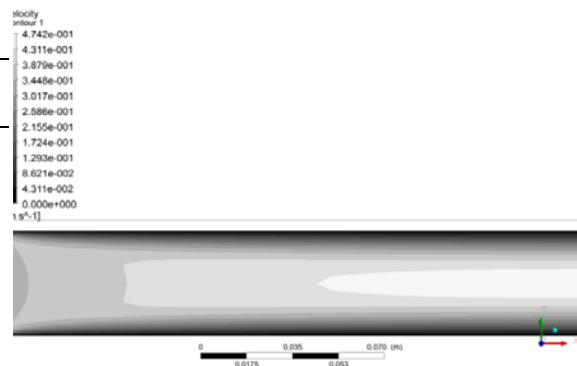
شکل ۶: تغییرات سهموی سرعت در عرض کانال (در وسط کانال)



شکل ۷ کانتور دما در ابتدای کانال



شکل ۸ کانتور دما در طول کانال



شکل ۸ کانتور سرعت در ابتدای کانال

<sup>1</sup> Ganguly

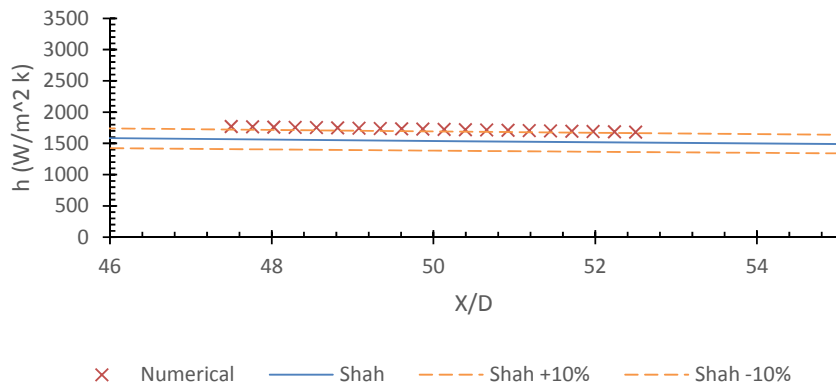
در زیر تغییرات دما و سرعت در طول کانال را در شکل های ۱۴ و ۱۵ مشاهده می‌نمایید. همانطور که در این شکلها مشهود است نیروی لورنتز تأثیر چندانی بر مولفه افقی سرعت و در نتیجه دما نداشته است. علت این امر همانطور که در بخشهای قبل نیز گفته شد، وابستگی نیروی لورنتز به مقدار هدایت الکتریکی است. از آنجاییکه هدایت الکتریکی سیال بسیار پایین است، این نیرو تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر میدان سرعت و دما نداشته است. هرچند این نیرو تأثیر خود را بر مولفه عمودی سرعت که چندین مرتبه کوچکتر است، نشان داده که در شکل ۱۶ قابل مشاهده است .

۰/۱۵، ۰/۲، ۰/۲۵ صورت پذیرفته است. برای هرکدام از این مقادیر سه شبیه‌سازی فروهیدرودینامیک توسط ابزار MHD فلونت انجام شده است. شبیه سازی‌ها به دلیل ناپایا بودن میدان‌های مغناطیسی بصورت ناپایا انجام شده است.

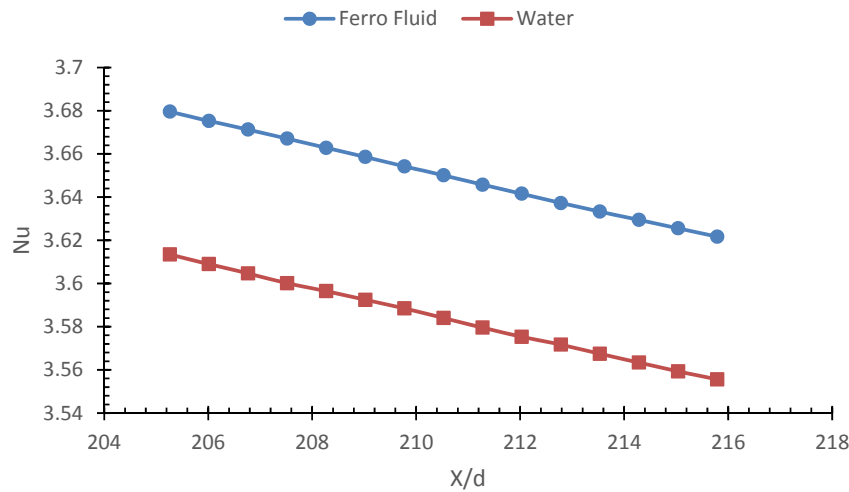
برای نشان دادن میزان وابستگی نیروی لورنتز به مقدار هدایت الکتریکی، یک شبیه‌سازی با رسانایی الکتریکی پیش فرض فلونت که مقدار بسیار بالایی است (۱۰۰۰) انجام شده و نتایج آن با نتایج اصلی مقایسه شده و در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

### مقایسه ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی آب مقطر با معادلات

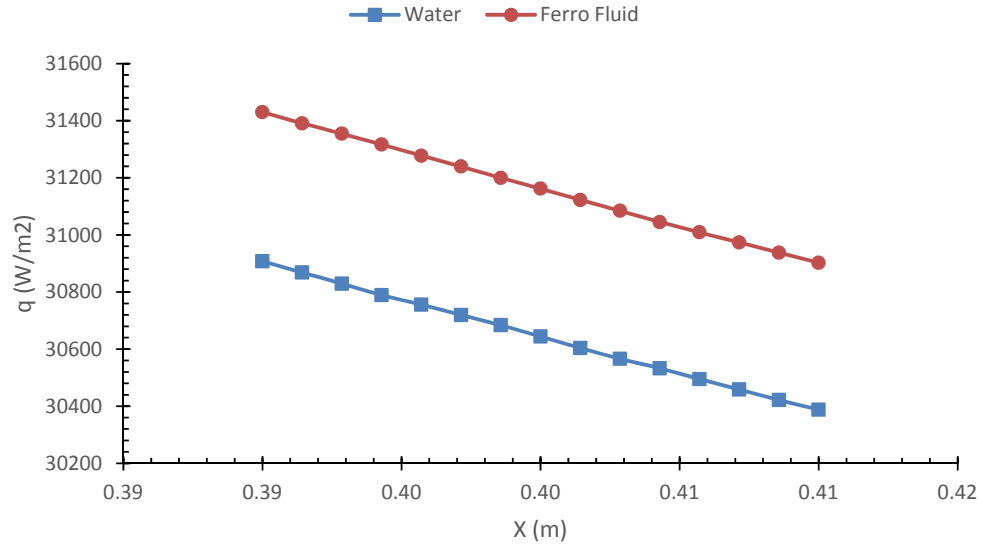
شاه



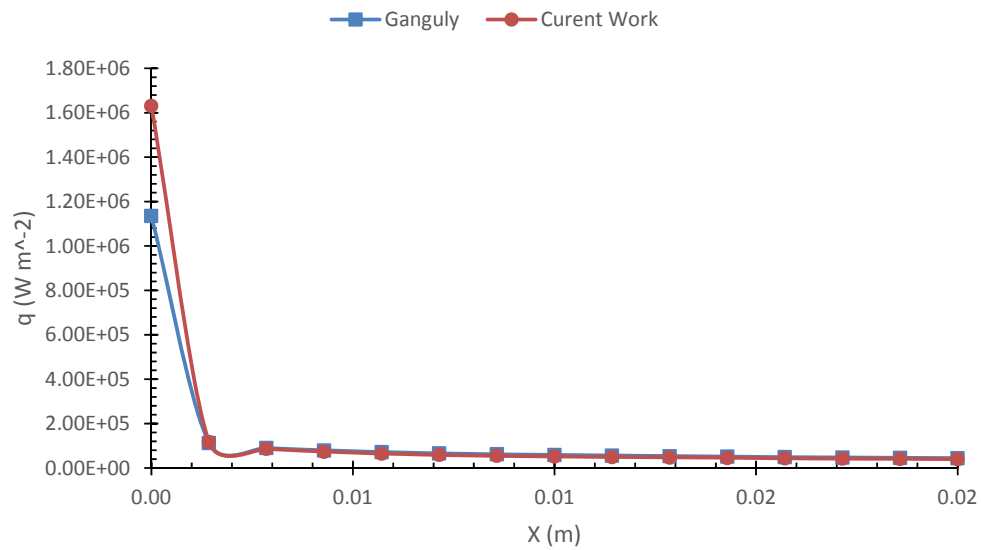
شکل ۱۰ مقایسه میزان حرارت منتقل شده از دیواره ها با معادله شاه



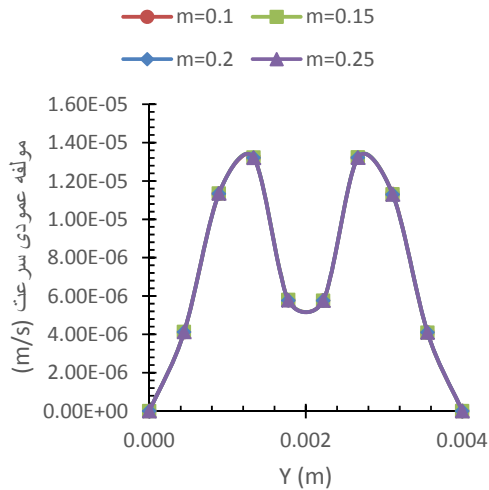
شکل ۱۱ مقایسه عدد ناسلت برای آب و فروسیال



شکل ۱۲ مقایسه حرارت منتقل شده از دیواره برای آب و فروسیال

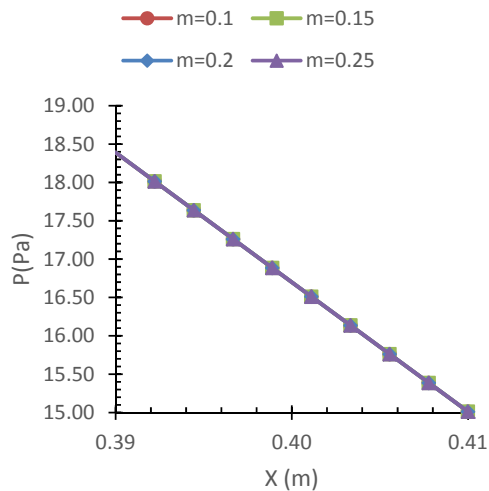


شکل ۱۳ مقایسه نتایج کار آقای گانگولی با کار فعلی

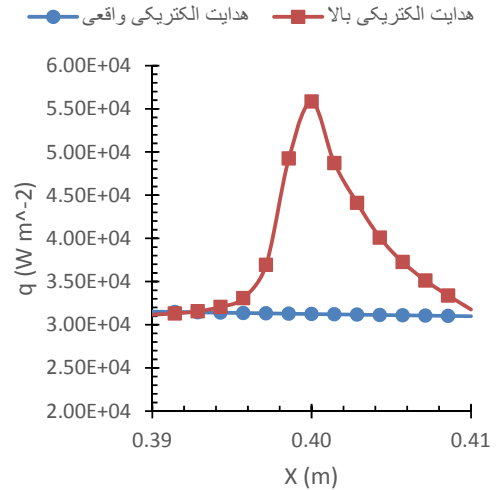


شکل ۱۷ مولفه عمودی سرعت در نزدیکی یکی از میدان های مغناطیسی

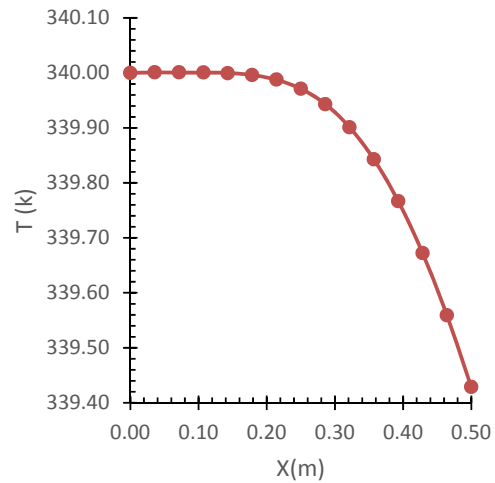
همچنین می توان تاثیر بسیار ناچیز نیروی لورنتز را بر روی مولفه فشار و میزان انتقال حرارت دیواره ها و عدد ناسلت را در شکل های ۱۷ و ۱۹ و ۱۸ مشاهده نمود.



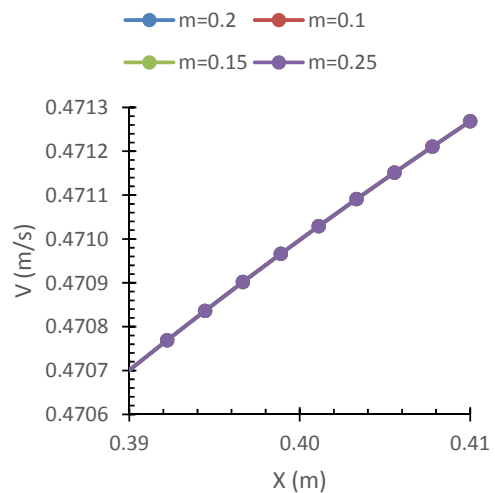
شکل ۱۸ مولفه فشار در نزدیکی یکی از میدان های مغناطیسی



شکل ۱۴ مقایسه تاثیر هدایت الکتریکی در افزایش انتقال حرارت



شکل ۱۵ دما در طول کانال تحت میدان ۰/۲ آمپر متر

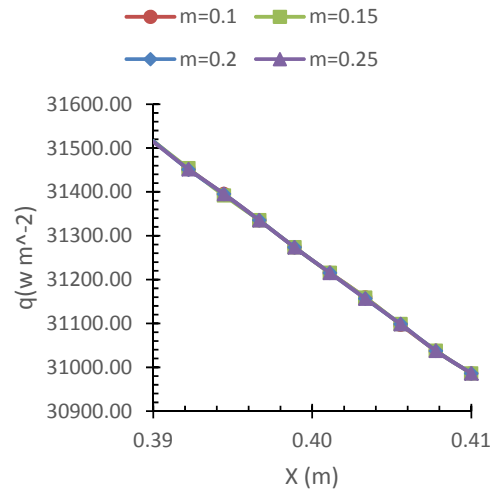


شکل ۱۶ مولفه سرعت در نزدیکی یکی از میدان های مغناطیسی



گرفته شده است را بررسی کردیم و برای نشان دادن تاثیر هدایت الکتریکی نتایج بدست آمده با یک مورد فروسیال که میزان هدایت الکتریکی آن به صورت مصنوعی افزایش داده شده مقایسه کردیم و نتایج زیر بدست آمده است:

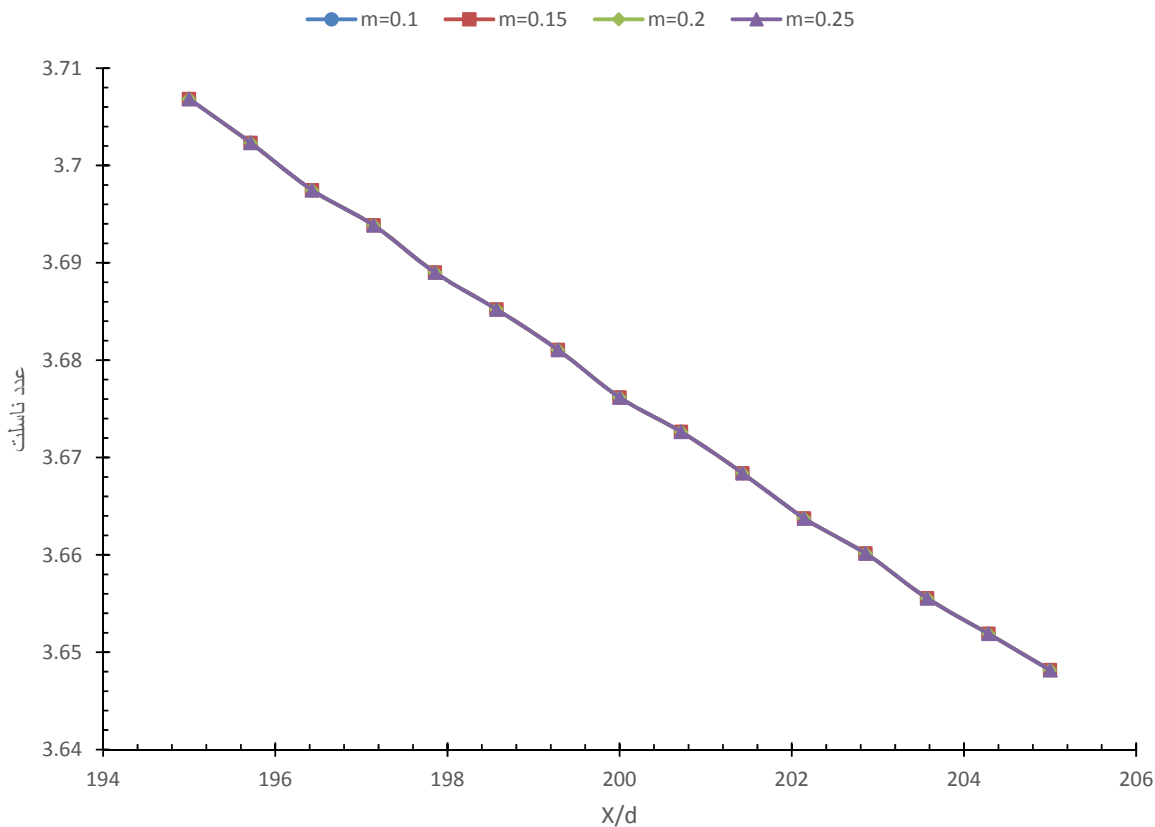
- با اضافه کردن نانو ذرات مغناطیسی نرخ انتقال حرارت به میزان ۷/۴٪ بهبود خواهد یافت.
- به علت پایین بودن هدایت الکتریکی فروسیال، نیروی لورنتز تاثیری بر مولفه افقی سرعت نداشته و در نتیجه منجر به بعبود انتقال حرارت نمی شود
- نیروی لورنتز تاثیر بسیار کمی بر مولفه عمودی سرعت دارد
- می‌توان در شبیه سازی ها از نیروی لورنتز صرف نظر کرد



شکل ۱۹ میزان انتقال حرارت از دیواره های کانال در محدوده یکی از میدان های مغناطیسی

#### ۷-نتیجه گیری

تاثیر اضافه کردن نانو ذرات مغناطیسی به سیالات برای بهبود انتقال حرارت و تاثیر نیروی لورنتز بر انتقال حرارت جریان آرام فروسیال درون یک کانال که تحت میدان های مغناطیسی ۰/۱، ۰/۱۵، ۰/۲، ۰/۲۵ آمپر متر قرار



شکل ۲۰ عدد ناسلت در محل اعمال میدان مغناطیسی

## ۸- فهرست علائم

$B$	چگالی شار
$c_p$	گرمای ویژه
$F_k$	نیروی کلومین
$H$	میدان مغناطیسی
$z, r_a$	جهت واحد ها (عمودی و افقی)
$m$	قدرت میدان مغناطیسی
$Nu$	عدد ناسلا
$P$	فشار (پاسکال)
$r$	شعاع - مختصات دایره ای (متر)
$T$	دما (K)
$t$	زمان
$u, v$	مولفه های سرعت سیال
$X, Y$	مختصات دوقطبی های مغناطیسی
$x, y$	مختصات کارتزین

## علائم یونانی

$\rho$	چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
$\theta$	اتلاف لزجت
$\varphi$	زاویه قطبی

## بالانویس ها

$nf$	نانو سیال
$n$	ذرات مغناطیسی
$f$	سیال پایه

- [1] S. Choi, J. Eastman, *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles*, Argonne National Lab., IL (United States), pp. 1995.
- [2] T. Aihara, J.-K. Kim, K. Okuyama, A. Lasek, Controllability of convective heat transfer of magnetic fluid in a circular tube, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 122, No. 1, pp. 297-300, 1993/04/01, 1993.
- [3] R. Ganguly, S. Sen, I. K. Puri, Heat transfer augmentation using a magnetic fluid under the influence of a line dipole, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 271, No. 1, pp. 63-73, 2004.
- [4] M. Lajvardi, J. Moghimi-Rad, I. Hadi, A. Gavili, T. Dallali Isfahani, F. Zabihi, J. Sabbaghzadeh, Experimental investigation for enhanced ferrofluid heat transfer under magnetic field effect, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 322, No. 21, pp. 3508-3513, 11//, 2010.
- [5] Y. Xuan, Q. Li, M. Ye, Investigations of convective heat transfer in ferrofluid microflows using lattice-Boltzmann approach, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 46, No. 2, pp. 105-111, 2007/02/01, 2007.
- [6] H. Aminfar, M. Mohammadpourfard, Y. Narmani Kahnemouei, A 3D numerical simulation of mixed convection of a magnetic nanofluid in the presence of non-uniform magnetic field in a vertical tube using two phase mixture model, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 323, No. 15, pp. 1963-1972, 8//, 2011.
- [7] M. Sheikholeslami, D. D. Ganji, Ferrohydrodynamic and magnetohydrodynamic effects on ferrofluid flow and convective heat transfer, *Energy*, Vol. 75, pp. 400-410, 10/1/, 2014.