



بررسی عددی جریان و انتقال حرارت فروسیال در مبدل حرارتی دولوله‌ای

علی شکیبا¹، مفید گرجی^{2*}

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، موسسه غیرانتفاعی صنعتی مازندران، بابل
 2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل
 * بابل، صندوق پستی 01113234205، gorji@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: 25 شهریور 1393
 پذیرش: 13 آبان 1393
 ارائه در سایت: 29 آذر 1393
 کلید واژگان:
 فروهیدرودینامیک
 فروسیال
 مبدل حرارتی دولوله‌ای
 میدان مغناطیسی

در این مقاله، رفتار حرارتی و هیدرودینامیکی نانوسیال مغناطیسی (آب و 4% اکسید آهن) در یک مبدل حرارتی دولوله‌ای مستقیم افقی، تحت میدان مغناطیسی غیریکنواخت متقاطع با شدت‌های متفاوت به صورت عددی بررسی شده است. فروسیال به عنوان سیال گرم درون لوله داخلی و هوا به عنوان سیال سرد در لوله بیرونی در نظر گرفته شده و هر دو سیال در رژیم جریان آرام با جریانی غیر همسو هستند. میدان مغناطیسی ذکر شده توسط سیم حامل جریان الکتروسیسته ایجاد می‌شود که به موازات طولی مبدل و در فاصله‌ای مشخص و نزدیک به لوله داخلی (بین دولوله) قرار می‌گیرد. از مدل تکفازی و روش حجم محدود برای حل این مسئله استفاده شده است. اثرات میدان مغناطیسی با نوشتن کدهایی به زبان C++، به معادلات حاکم بر جریان فروسیال در نرم‌افزار آنسیس فلونت 14 اضافه شده است. اعمال میدان مغناطیسی غیریکنواخت متقاطع باعث 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. با مقایسه درصد افزایش عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و افت فشار مشخص می‌شود که مقدار بهینه عدد مغناطیس برای $Re_{ff} = 50$ در محدوده $Mn = 1/33 \times 10^6$ و $Mn = 2/37 \times 10^6$ قرار دارد. در نتیجه با اعمال میدان مغناطیسی متقاطع غیریکنواخت ناشی از سیم حامل جریان الکتروسیسته می‌توان جریان فروسیال را کنترل کرده و فرایند خنک کاری فروسیال در مبدل حرارتی دولوله‌ای را بهبود بخشید.

Numerical investigation of ferrofluid flow and heat transfer characteristics through a double pipe heat exchanger

Ali Shakiba¹, Mofid Gorji^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, Mazandaran Institute of Technology, Babol, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran.

* P.O.B. 01113234205, Babol, Iran, gorji@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 16 September 2014
 Accepted 04 December 2014
 Available Online 20 December 2014

Keywords:
 Ferrohydrodynamics
 Ferrofluid
 Double pipe heat exchanger
 Magnetic field

ABSTRACT

This study attempts to numerically investigate the hydro-thermal characteristics of a ferrofluid (water and 4 vol % Fe_3O_4) in a counter-current horizontal double pipe heat exchanger, which is exposed to a non-uniform transverse magnetic field with different intensities. The magnetic field is generated by an electric current going through a wire located parallel to the inner tube and between two pipes. The single phase model and the control volume technique have been used to study the flow. The effects of magnetic field have been added to momentum equation by applying C++ codes in Ansys Fluent 14. The results show that applying this kind of magnetic field causes kelvin force to be produced perpendicular to the ferrofluid flow, changing axial velocity profile and creating a pair of vortices which leads to an increase in Nusselt number, friction factor and pressure drop. Comparing the enhancement percentage of Nusselt number, friction factor and pressure drop demonstrates that the optimum value of magnetic number for $Re_{ff} = 50$ is between $Mn = 1.33 \times 10^6$ and $Mn = 2.37 \times 10^6$. So applying non-uniform transverse magnetic field can control the flow of ferrofluid and improve heat transfer process of double pipe heat exchanger.

1- مقدمه

بسیار مهم است [1]. ضریب هدایت حرارتی یکی از ویژگی‌های موثر سیال در فرایندهای انتقال حرارت بوده و با افزایش این ویژگی نرخ انتقال حرارت را می‌توان بهبود بخشید. از آنجایی که ضریب هدایت حرارتی فلزات در مقایسه با سیالات متداول نظیر آب و اتیل گلیکول بیشتر است، راهکار ترکیب این دو ماده و ایجاد محیط انتقال حرارتی که شبیه به سیال عمل کند و هدایت حرارتی فلزات را داشته باشد، می‌تواند موثر واقع شود. در ابتدا از ذراتی با

امروزه با رشد و توسعه تکنولوژی‌های نوین، انتقال حرارت، کاهش زمان انتقال حرارت، کوچک‌سازی اندازه مبدل‌های حرارتی و در نهایت افزایش راندمان تجهیزات حرارتی مورد توجه بوده است. بهبود فرایند خنک کاری توسط سیالات به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های موجود در کاهش مصرف انرژی در بسیاری از صنایع مانند الکترونیک، حمل و نقل، تولید توان و ماشینکاری

پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از میدان مغناطیسی باعث افزایش نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود. لی و همکارانش [12] در طی انجام آزمایشی به بررسی خصوصیات انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال مغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی خارجی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که میدان مغناطیسی تاثیر قابل توجهی در انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال مغناطیسی دارد و با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی می‌توان فرایند انتقال حرارت را کنترل نمود.

زابلوتسکی و همکارانش [13] در یک کار عددی و تجربی انتقال حرارت جابه‌جایی ترمومغناطیس یک فروسیال با خواص متغیر با دما را در حضور میدان‌های مغناطیسی غیریکنواخت بررسی کردند. آزمایش، روی یک سلول مستطیلی انجام یافته و آهنرباهای دائمی روی دیواره‌های آن نصب شده بود. هنگامی که سلول از پایین گرم می‌شود میزان انتقال حرارت نسبت به حالت بدون میدان به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و نتایج عددی نیز با داده‌های آزمایشگاهی همخوانی خوبی را نشان می‌دهند.

لاجوردی و همکارانش [14] در یک کار آزمایشگاهی، انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیال مغناطیسی آب-اکسید آهن را در یک لوله مستقیم، تحت شرایط شار گرمایی 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 جابه‌جایی را افزایش می‌دهد و اعمال میدان مغناطیسی این افزایش را بیشتر می‌کند. آن‌ها با افزایش کسر حجمی نانوذرات و نیز اعمال میدان مغناطیسی قوی‌تر، افزایش بیشتری در ضریب انتقال حرارت مشاهده نمودند. آن‌ها این افزایش را به تغییر در خواص ترموفیزیکی سیال نظیر هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه نسبت دادند.

امین فر و همکارانش [15] اثر میدان مغناطیسی غیریکنواخت بر رفتار هیدرودینامیکی و حرارتی یک فروسیال در جابه‌جایی ترکیبی در یک لوله عمودی را به‌صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها از مدل دو فاز مخلوط برای شبیه‌سازی 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 تخت‌تر می‌شود و ضریب انتقال گرمایی جابه‌جایی جریان افزایش می‌یابد. درحالی 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.

همچنین، امین فر و همکارانش [16] رفتار گرمایی و هیدرودینامیکی یک نانوسیال مغناطیسی با در نظر گرفتن هدایت الکتریکی در یک کانال مستطیلی عمودی و در حضور میدان‌های مغناطیسی مختلف شامل میدان محوری غیریکنواخت (با گرادیان منفی و مثبت)، میدان متقاطع یکنواخت و حالتی که هر دو میدان مذکور به‌صورت همزمان اعمال شده‌اند به‌صورت عددی مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که هدایت الکتریکی تاثیرات قابل ملاحظه‌ای بر رفتار فروسیال دارد و قابل صرف نظر نیست. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که میدان محوری با گرادیان منفی و میدان متقاطع اثرات مشابهی بر افزایش عدد ناسلت و ضریب اصطکاک دارند، درحالی که میدان محوری با گرادیان مثبت آن‌ها را کاهش می‌دهد.

محمدپورفرد و همکارانش [17] در یک کار عددی و با استفاده از مدل دو فاز مخلوط، رفتار حرارتی و هیدرودینامیکی یک فروسیال را در یک کانال مستقیم عمودی تحت میدان‌های مغناطیسی غیریکنواخت متقاطع و

ابعاد بزرگ‌تر از نانومتر استفاده می‌شد که در مقایسه با نانوذرات مشکلاتی نظیر گرفتگی و سائیدگی مجاری عبوری سیال، ناپایداری، ته‌نشینی سریع در سیال پایه و افزایش افت فشار را ایجاد می‌کردند. نانوپودرها در مقایسه با ذرات با اندازه بزرگ‌تر دارای سطح ویژه بیشتر، مومنوم کمتر و قابلیت حرکت و جابه‌جایی بالاتری هستند.

چوی را بدعت‌گذار استفاده از نانوذرات پراکنده در سیال پایه می‌دانند [2]. وانگ و ایز و همکارانش [3] به بررسی انتقال حرارت نانوذرات TiO_2 در آب پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از نانوسیال در مقایسه با آب، باعث افزایش انتقال حرارت در یک مبدل حرارتی دولوله‌ای خواهد شد. کاناداسان و همکارانش [4] در طی یک کار آزمایشگاهی به بررسی انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال آب- CuO در یک مبدل حرارتی مارپیچ پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با استفاده از نانوسیال عدد ناسلت در نسبت حجمی‌های $0/1\%$ و $0/2\%$ به ترتیب برابر 37% و 49% افزایش می‌یابد. زم‌میان و همکارانش [5] در یک کار تجربی با استفاده از نانوسیلالات آلومینا-اتیلن گلیکول و اکسیدمس-اتیلن گلیکول به بررسی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری در مبدل‌های حرارتی دولوله‌ای و صفحه‌ای پرداختند. بیشترین و کمترین افزایش در این آزمایش به ترتیب برابر 49% و 3% گزارش شده است. هیومینیک و همکارانش [6] در یک کار عددی به بررسی انتقال حرارت نانوسیال در مبدل حرارتی دولوله‌ای مارپیچ در شرایط جریان آرام پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با استفاده از نانوسیال‌هایی نظیر TiO_2 و CuO که در سیال پایه آب، به‌صورت همگن پراکنده شده‌اند، می‌توان به بیشترین افزایش در ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی دست یافت. همچنین، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش کسر حجمی نانوذرات انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد.

در سال‌های اخیر، توانایی کنترل هیدرودینامیکی و یا حرارتی سیال‌ها مورد توجه دانشمندان و مهندسان قرار گرفته است. یکی از روش‌های مناسب برای این کار استفاده از سیال مغناطیسی و میدان مغناطیسی است. نانوسیال‌های مغناطیسی یا فروسیال‌ها¹ در واقع گونه خاصی از نانوسیال‌ها هستند که در آن‌ها نانوذرات مغناطیسی مانند $CoFe_2O_4$ ، $\gamma-Fe_2O_3$ ، Fe_3O_4 ، Fe ، Co و FeC با ابعادی در حدود 3 تا 15 نانومتر به‌طور پایدار در یک سیال پایه² نظیر آب، نفت، روغن‌های صنعتی، ترکیبات اتیلن گلیکول و غیره پراکنده شده‌اند. خصوصیت ویژه نانوسیلالات مغناطیسی این است که علاوه بر افزایش انتقال حرارت، امکان کنترل جریان سیال، انتقال حرارت و حرکت ذرات با به‌کارگیری میدان مغناطیسی مقدور است. این خصوصیات ویژه باعث شده که شاخه‌های مختلف مهندسی نظیر مهندسی انتقال حرارت، مهندسی الکترونیک، مهندسی پزشکی و غیره برای انتخاب سیال مورد نظر، از نانوسیلالات مغناطیسی استفاده کنند. از جمله کاربردهای فروسیال‌ها می‌توان به مواردی نظیر انتقال حرارت، وسایل الکترونیکی، کاهش اصطکاک، موارد نظامی، تجهیزات آنالیز، هوا-فضا، پزشکی، نورشناسی، هنر و غیره اشاره نمود [7-10].

به‌رغم مطالعات گسترده در زمینه انتقال حرارت نانوسیال، مطالعات محدودی در زمینه بررسی جریان و انتقال حرارت نانوسیلالات مغناطیسی انجام شده است. غفرانی و همکارانش [11] به بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری فروسیال گذرنده از یک لوله در حضور میدان مغناطیسی متغیر

1- Magnetic nanofluid or Ferrofluid

2- Base fluid

عمود بر جریان فروسیال جاری در آن، خواهد شد. اثرات میدان مغناطیسی ذکر شده بر رفتار هیدرودینامیکی و حرارتی فروسیال با استفاده از مدل تکفازی مورد بررسی قرار گرفته است. هندسه مبدل حرارتی دولوله‌ای مستقیم مورد مطالعه در این پژوهش و محل قرارگیری سیم حامل جریان را می‌توان در شکل 1 مشاهده کرد. طول مبدل حرارتی دولوله‌ای مستقیم L ، شعاع لوله داخلی r_i ، شعاع لوله خارجی r_o و ضخامت لوله t در نظر گرفته شده است. همچنین، نسبت‌های بی‌بعد در شکل 1 آورده شده است.

3- روش حل

زمینه مطالعه در مورد نانوسیال‌های مغناطیسی امروزه با عنوان فروهیدرودینامیک² شناخته می‌شود. هنگامی که فروسیال در معرض یک میدان مغناطیسی خارجی قرار می‌گیرد، پدیده‌های مختلفی در رفتار فیزیکی آن رخ می‌دهد. فروهیدرودینامیک را می‌توان به رونالدروزویگ³ نسبت داد.

3-1- اصول فروهیدرودینامیک

قانون مغناطیس‌پذیری برای یک گاز پارامغناطیس به وسیله تابع لانژوئن⁴ $L(\zeta)$ ، به صورت رابطه (1) تا (5) توصیف می‌شود [9]:

$$M = M_s L(\zeta) \quad (1)$$

$$M_s = \alpha_p M_d = N_p m_p \quad (2)$$

$$N_p = \frac{1}{V_p} = \frac{6}{\pi d_p^3} \quad (3)$$

$$L(\zeta) = \coth(\zeta) - \frac{1}{\zeta} \quad (4)$$

$$\zeta = \frac{\mu_0 m_p H}{k_p T} \quad (5)$$

در روابط فوق M_s اشباع مغناطیسی نانوسیال مغناطیسی در واحد حجم، ζ پارامتر لانژوئن، M_d گشتاور مغناطیسی حجمی برای یک جسم جامد مغناطیسی، N_p تعداد نانوذرات مغناطیسی در واحد حجم و m_p گشتاور مغناطیسی هر یک از نانوذرات، V_p حجم ذره، μ_0 ثابت گذردهی مغناطیسی خلأ، H شدت میدان مغناطیسی خارجی در محل حضور ذره، K_b ثابت بولتزمن و T دما برحسب کلوین است. با ترکیب روابط فوق، نهایتاً به رابطه (6) برای مغناطیس‌پذیری نانوسیال مغناطیسی می‌رسیم.

$$M = \frac{6m_p}{\pi d_p^3} \left\{ \coth \left(\frac{\mu_0 m_p H}{k_p T} \right) - \frac{k_p T}{\mu_0 m_p H} \right\} \quad (6)$$

نانوذرات مغناطیسی در داخل سیال پایه شبیه مولکول‌های یک گاز پارامغناطیس هستند و روابط فوق برای آن‌ها نیز صادق است [9]. در این مقاله از همین روابط برای فروسیال‌ها استفاده می‌شود.

با اعمال میدان مغناطیسی به یک نانوسیال در حالت حرکت عبارت (7) به معادله مومنوم آن اضافه می‌شود [19].

$$\mu_0 \left(\vec{M} \cdot \nabla \right) \vec{H} + \frac{1}{2} \nabla \times \left(\vec{M} \times \vec{H} \right) \quad (7)$$

که در آن جمله اول معروف به نیروی کلوین⁵ بوده و از تنش یک میدان الکترومغناطیس مشتق شده و جمله دوم نیز با در نظر گرفتن یک مومنوم

محوری با شدت‌های متفاوت به‌صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. میدان مغناطیسی متقاطع غیریکنواخت در مسئله آن‌ها توسط سیم حامل جریان الکتریسته ایجاد شده و به موازات طولی کانال و در فاصله‌ای مشخص از آن قرار دارد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که اعمال میدان مغناطیسی باعث افزایش عدد ناسلت و ضریب اصطکاک شده و همچنین باعث ایجاد یک جفت گردابه خواهد شد که انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد. همچنین، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نرخ افزایش عدد ناسلت به واسطه اعمال میدان مغناطیسی متقاطع غیریکنواخت بیشتر از میدان مغناطیسی محوری است.

همچنین، محمدپورفرد و همکارانش [18] در یک کار عددی با استفاده از مدل دوفازی مخلوط و با استفاده از روش حجم محدود به بررسی رفتار حرارتی و هیدرودینامیکی نانوسیال مغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی خطی در یک لوله افقی و خمیده پرداختند. میدان مغناطیسی خطی در شدت‌های مختلف و در جهت عمود بر جریان فروسیال وارد می‌شود. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با اعمال میدان مغناطیسی خارجی، ضریب انتقال حرارت در لوله خمیده نسبت به لوله مستقیم بیشتر افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که دو عامل نیروی کلوین و نیروی گریز از مرکز می‌تواند به افزایش انتقال حرارت در لوله خمیده کمک کند.

مبدل‌های حرارتی در بسیاری از کاربردها نظیر نیروگاه‌ها، صنایع غذایی، صنایع شیمیایی، الکترونیک، بازیاب‌های حرارتی، تبرید و غیره استفاده می‌شوند. مبدل حرارتی دو لوله‌ای یکی از ساده‌ترین و پرکاربردترین انواع مبدل حرارتی در صنعت، است که از دو لوله هم‌محور تشکیل شده است. اخیراً، کارهای زیادی برای افزایش انتقال حرارت و بازده حرارتی مبدل‌های حرارتی انجام گرفته است. اقداماتی نظیر به‌کارگیری جریان‌های آشفتنه، استفاده از پره‌ها و بغل‌ها، استفاده از نانوسیال‌های مختلف و غیره. با وجود این تحقیقات، بررسی اثرات ناشی از میدان مغناطیسی بر نانوسیال‌های مغناطیسی، با استفاده از اصول فروهیدرودینامیک، جهت افزایش انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این مقاله در نظر است تاثیر اعمال میدان مغناطیسی غیریکنواخت متقاطع بر فروسیال آب- Fe_3O_4 با هدف بهبود فرایند خنک‌کاری در یک مبدل حرارتی دولوله‌ای مستقیم افقی، بررسی شود. تاثیر میدان مذکور بر رفتار هیدرودینامیکی و حرارتی فروسیال در جریان جابه‌جایی ترکیبی¹ آرام با استفاده از مدل تکفازی مورد مطالعه قرار گرفته است.

2- تعریف مسئله

جریان آرام و انتقال حرارت جابه‌جایی برای نانوسیال مغناطیسی شامل آب و 4 درصد حجمی Fe_3O_4 در یک مبدل حرارتی دولوله‌ای مستقیم (افقی) تحت میدان مغناطیسی متقاطع غیریکنواخت مورد بررسی قرار گرفته است. فروسیال به‌عنوان سیال گرم درون لوله داخلی و هوا به‌عنوان سیال سرد در لوله بیرونی با جریان غیرهمسو هستند. در جدول 1 خواص ترموفیزیکی مواد استفاده شده شامل آب، Fe_3O_4 و هوا نشان داده شده است. میدان مغناطیسی توسط یک سیم باریک حامل جریان الکتریکی ایجاد می‌شود که به‌صورت موازی با محور طولی مبدل (محور X) در موقعیت (a, b) ، در زیر لوله داخلی، با فاصله‌ای مشخص و نزدیک به آن قرار گرفته و جریان داخل سیم در جهت مثبت محور X ها شارش می‌یابد. سیم حامل جریان الکتریکی، باعث ایجاد یک میدان مغناطیسی غیریکنواخت متقاطع در تمام طول لوله داخلی مبدل و

2- Ferrohydrodynamics

3- R. Rosensweig

4- Langevin Function

5- Kelvin Force

1- Mixed convection

4-1- روابط میدان مغناطیسی حاصل از سیم حامل جریان الکتروسیسته مولفه‌های میدان مغناطیسی حاصل از سیم حامل جریان الکتروسیسته با شدت جریان I ، H_x و H_y هستند که به صورت رابطه (14) و (15) هستند:

$$H_z(y, z) = \frac{I}{2\pi} \frac{(z-a)}{(y-a)^2 + (z-b)^2} \quad (14)$$

$$H_y(y, z) = -\frac{I}{2\pi} \frac{(y-b)}{(y-a)^2 + (z-b)^2} \quad (15)$$

و اندازه شدت میدان مغناطیسی از رابطه (16) به دست می‌آید:

$$H(x, y, z) = H(y, z) = \frac{I}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(y-a)^2 + (z-b)^2}} \quad (16)$$

4-2- معادلات حاکم بر مسئله

با در نظر گرفتن جریان فروسیال به صورت آرام، پایه، غیرقابل تراکم و ثابت فرض نمودن خواص ترموفیزیکی و با صرف نظر کردن از اتلافات لزجی، معادلات بقا به صورت روابط (17) تا (19) بیان می‌شوند:

معادله پیوستگی

$$\nabla \cdot (\rho_{ff} \vec{v}_{ff}) = 0 \quad (17)$$

معادله مومنتوم

$$\nabla \cdot (\rho_{ff} \vec{v}_{ff} \vec{v}_{ff}) = -\nabla p + \nabla (\mu_{ff} \nabla \vec{v}_{ff}) + \mu_0 (\vec{M} \cdot \nabla) \vec{H} \quad (18)$$

در روابط فوق، ρ_{ff} ، μ_{ff} ، K_{ff} به ترتیب چگالی، لزجت و ضریب هدایت حرارتی فروسیال هستند. جمله $\mu_0 (\vec{M} \cdot \nabla) \vec{H}$ مربوط به نیروی کلون است که در صورت نبودن گرادیان میدان مغناطیسی برابر صفر خواهد بود و در صورت وجود گرادیان مغناطیسی با استفاده از روابط ارائه شده در بخش 3 محاسبه خواهد شد.

معادله انرژی

$$\rho_{ff} C_{p,ff} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v}_{ff} \cdot \nabla T \right) = K_{ff} \nabla^2 T \quad (19)$$

با استفاده از روابط ارائه شده در بخش 3 می‌توان نتیجه گرفت که نیروی اعمالی از طرف میدان مغناطیسی روی یک نانوذره مغناطیسی برابر با $\vec{H} \cdot \nabla (\mu_0 m_p L(\zeta))$ است.

با توجه به رابطه (18)، برای مبدل حرارتی دولوله‌ای مستقیم، که در معرض میدان مغناطیسی غیریکنواخت متقاطع قرار می‌گیرد، جمله

$$\vec{H} \cdot \nabla (\mu_0 M) \frac{\partial H}{\partial z} \quad \text{و} \quad \vec{H} \cdot \nabla (\mu_0 M) \frac{\partial H}{\partial y}$$

راستاهای y و z است.

برای سنجش تاثیر شدت میدان مغناطیسی بر فروسیال از عدد مغناطیس (Mn) که بی‌بعد است استفاده می‌شود، به طوری که عدد مغناطیس، با شدت میدان مغناطیسی رابطه مستقیم داشته و با افزایش شدت میدان مغناطیسی، این عدد نیز افزایش خواهد یافت. عدد مغناطیس از رابطه (20) محاسبه می‌شود:

زاویه‌ای داخلی در تانسور تنش لزجت به دست آمده است. با توجه به این که در کار حاضر معادلات در حالت پایه حل می‌شوند، می‌توان نانوسیال را در حالت تعادل مغناطیسی فرض کرد. بنابراین، $\vec{M} \cdot \vec{H}$ بوده و رابطه فوق به $\mu_0 M \nabla H$ کاهش می‌یابد. در نهایت رابطه (8) به عنوان یک جمله چشمه به معادله مومنتوم اضافه خواهد شد که در آن M از رابطه (6) محاسبه می‌شود.

$$F_{ferromag} = \mu_0 M \nabla H \quad (8)$$

در مطالعه حاضر برای نانوسیال مغناطیسی از ذرات اکسید آهن (Fe_3O_4) استفاده شده است. گشتاور مغناطیسی هر مولکول از اکسید آهن از رابطه (9) محاسبه می‌شود [20] که در آن μ_B مگنتون بوهر¹ است.

$$m_M = 4 \mu_B, \quad \mu_B = 9.27 \times 10^{-24} \text{ A.m}^2 \quad (9)$$

حجم هر سلول از ساختار بلوری اکسید آهن نیز برابر با مقدار رابطه (10) است.

$$V_{cell} = 730 \times 10^{-30} \text{ m}^3 \quad (10)$$

با توجه به این که هر سلول از ساختار بلوری اکسید آهن شامل هشت مولکول است، حجم هر مولکول از آن برابر با مقدار رابطه (11) خواهد بود:

$$V_m = \frac{V_{cell}}{8} = 91.25 \times 10^{-30} \text{ m}^3 \quad (11)$$

بنابراین تعداد مولکول اکسید آهن در هر ذره از آن، از نسبت حجم ذره به حجم مولکول طبق رابطه (12) محاسبه می‌شود:

$$N_M = \frac{V_p}{V_M} \quad (12)$$

و در نهایت گشتاور مغناطیسی هر ذره از اکسید آهن از رابطه (13) به دست می‌آید:

$$m_p = N_M m_M = \frac{4 \mu_B \pi d_p^3}{6 \times 91.25 \times 10^{-30}} \quad (13)$$

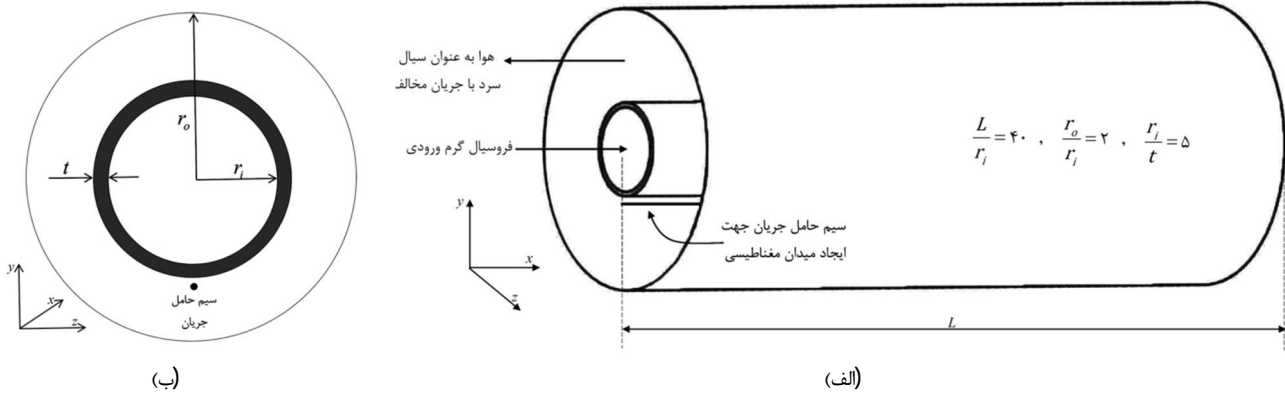
4- معادلات حاکم و شرایط مرزی

به دلیل کوچک بودن ذرات، فرض شده است که آن‌ها به آسانی در سیال پایه پخش شده‌اند و در نتیجه شبیه یک سیال رفتار می‌کنند. به علاوه با فرض ناچیز بودن سرعت لغزشی بین ذرات و فاز پیوسته و برقراری شرط تعادل حرارتی، نانوسیال را می‌توان به عنوان یک سیال تک‌فازی با خواص فیزیکی براساس غلظت دو جزء در نظر گرفت. بنابراین می‌توان تمام معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی مربوط به سیال خالص را به نانوسیال نیز تعمیم داد با این تفاوت که خواص موثر نانوسیال باید جایگزین خواص سیال پایه شوند. لذا در این دیدگاه تمام روابط ارائه شده برای انتقال گرما به همان شکل قابل استفاده هستند و فقط کافی است که خواص موثر جایگزین شوند.

جدول 1 خواص ترموفیزیکی مواد

ماده (اندیس)	$\rho \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$	$C_p \left(\frac{\text{J}}{\text{kg.K}} \right)$	$k \left(\frac{\text{W}}{\text{m.K}} \right)$	$\mu \left(\frac{\text{kg}}{\text{m.s}} \right)$
آب (f)	1024	4001/1	0/596	0/00108
Fe_3O_4 (p)	5200	670	6	-
هوا	1/225	1006/43	0/0242	0/0000179

1- Bohr Magneton



شکل 1 طرحواره مبدل حرارتی دولوله‌ای مستقیم مورد مطالعه (الف) تصویر سه بعدی مبدل حرارتی دولوله‌ای (ب) موقعیت سیم حامل جریان الکتریسیته

ورودی سیال سرد (هوا)

$$x = L: \quad v_{f,y} = v_{f,z} = 0; \quad v_{f,x} = v_{0,cold}; \quad T_{cold,in} = T_{0,cold}$$

دیواره لوله داخلی از جنس مس در نظر گرفته شده و انتقال حرارت در این دیواره ترکیبی از دو انتقال حرارت جابه‌جایی و هدایت است. این دیواره با هر دو سیال گرم و سرد در ارتباط است. بنابراین، در صورتی که دیواره لوله داخلی سمت سیال گرم را در نظر بگیریم، آن را دیواره گرم و اگر سمت سیال سرد را در نظر بگیریم آن را دیواره سرد می‌نامیم. دیواره‌های خارجی مبدل حرارتی عایق در نظر گرفته شده‌اند. در خروجی مبدل حرارتی برای هر دو سیال گرم و سرد، شرط مرزی فشار اتمسفر در نظر گرفته شده است.

5- مدل‌سازی عددی

هندسه مسئله در نرم‌افزار گمبیت¹ 2/3/16 تولید و شبکه‌بندی شده است. شبکه مورد استفاده، همان‌طور که در شکل 2-الف نشان داده شده، به صورت سه‌بعدی تشکیل شده است. همان‌طور که در شکل 2-ب مشاهده می‌شود، شبکه به صورت سازمان‌یافته ایجاد شده است. همچنین، برای افزایش دقت حل، در نواحی نزدیک لایه‌های مرزی از شبکه‌بندی ریزتری برخوردارند. معادلات دیفرانسیل غیرخطی سه‌بعدی حاکم بر مسئله نیز با استفاده از انسیس فلونت 14² براساس روش حجم محدود حل شده‌اند. با توجه به عدم پشتیبانی این نرم‌افزار از مسائل فروهیدرودینامیک، روابط مربوط به اعمال میدان مغناطیسی در کار حاضر با نوشتن سابروتین‌هایی به زبان ++C به این نرم‌افزار اضافه شده است. برای مبدل حرارتی دولوله‌ای مستقیم، نیروی کلونین به صورت دو جمله چشمه³ به معادله‌های مومنوم در راستاهای Z و Y اضافه شده است.

در روش حجم محدود، ابتدا میدان فیزیکی مربوط به مسئله به حجم کنترل‌های⁴ گسسته‌ای تقسیم می‌شود. سپس معادلات حاکم، بر روی هر حجم کنترل انتگرال گیری می‌شود تا معادلات جبری و گسسته⁵ به دست آیند. در گام بعدی معادلات گسسته به دست آمده، خطی‌سازی می‌شوند. سیستم معادلات گسسته و خطی‌سازی شده به صورت هم‌زمان حل می‌شوند. جهت حل مسئله از حل‌کننده فشار مینا⁶ و برای ارتباط فشار و سرعت از اسکیم سیمپل سی⁷ استفاده شده است. برای گسسته‌سازی معادلات مومنوم

$$Mn = \frac{\mu_0 \chi H_f^2 h^2}{\rho_{ff} \alpha_{ff}^2} \quad (20)$$

که در آن μ_0 ثابت گذردهی مغناطیسی خلاء و h طول مقطع عرضی است. α_{ff} نیز ضریب پخش گرمایی بوده و مقدار آن برابر $1/5994815 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}$ است. همچنین، χ ضریب مغناطیس‌پذیری فروسیال است که برای فروسیال آب و 4% اکسید آهن با قطر متوسط 10 نانومتر برابر 0/348586 است [22]. H_f نیز شدت میدان مغناطیسی مشخصه است که با رابطه (21) تعریف می‌شود:

$$H_f = H(a,0) = \frac{l}{2\pi b} \quad (21)$$

3-4- خواص ترموفیزیکی فروسیال

خواص ترموفیزیکی فروسیال با استفاده از روابط (22) تا (25) محاسبه می‌شوند.

چگالی مخلوط

$$\rho_{ff} = \alpha_p \rho_p + (1 - \alpha_p) \rho_f \quad (22)$$

لزجت مخلوط

$$\mu_{ff} = \left(1 + \frac{5}{2} \alpha_p\right) \mu_f \quad (23)$$

هدایت حرارتی مخلوط

$$K_{ff} = \left[\frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)\alpha_p(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \alpha_p(k_f - k_p)} \right] k_f \quad (24)$$

این رابطه برای اولین بار توسط همیلتون و کراسر [23] ارائه شد که در آن n ضریب شکل بوه و برای ذرات کروی مقدار آن برابر 3 است.

ظرفیت گرمایی ویژه مخلوط:

$$C_{ff} = \alpha_p C_{p,p} + (1 - \alpha_p) C_{p,f} \quad (25)$$

4-4- شرایط مرزی

معادلات مذکور با شرایط مرزی زیر حل می‌شوند:

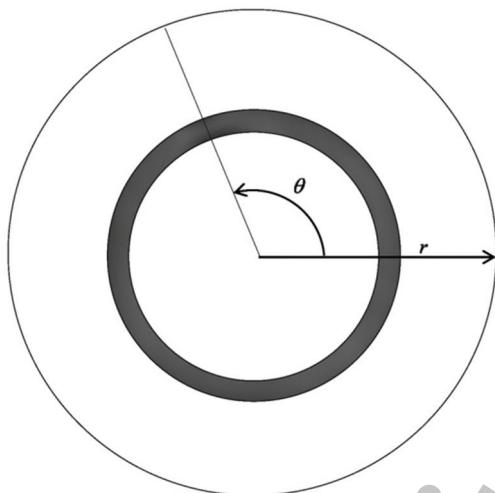
ورودی سیال گرم (فروسیال)

$$x = 0: \quad v_{ff,y} = v_{ff,z} = 0; \quad v_{ff,x} = v_{0,hot}; \quad T_{hot,in} = T_{0,hot}$$

1- Gambit
2- Ansys Fluent 14
3- Source Term
4- Control Volumes
5- Discretized
6- Pressure-based
7- SIMPLC

هستند، پرداخته شده و نتایج به دست آمده از حل عددی این مسئله با یک کار آزمایشگاهی مقایسه شده است. در غیاب میدان مغناطیسی و با استفاده از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم، نتایج حل عددی با نتایج تجربی کیم و همکارانش [24] مقایسه شده است. شکل 4-الف نتایج این مقایسه را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تطابق بسیار خوبی بین نتایج تجربی و حل عددی حاضر وجود دارد.

علاوه بر آن، نتایج به دست آمده از مدل حاضر با نتایج امین فر و همکارانش [15] در یک لوله با فروسیال کروسن- 4% اکسید آهن در $Re=40$ و در حضور میدان مغناطیسی با گرادیان $4 \times 10^6 \frac{A}{m^2}$ مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل 4-ب مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین نتایج مشهود است.



شکل 3 جهات افزایش گره‌ها برای بررسی استقلال از شبکه

جدول 2 بررسی استقلال از شبکه مبدل حرارتی دو لوله‌ای مستقیم در

$$Re_{ff} = 50, Mn = 5/92 \times 10^6, \frac{X}{2r_i} = 20, \frac{Z}{r_i} = 2, \frac{Y}{r_i} = 2$$

خطا	$\frac{T_{hot}}{T_{0,hot}}$	خطا	$\frac{V_{hot,x}}{V_{0,hot}}$	تعداد گره	جهت افزایش گره
-	0/9958483	-	1/87878	141100	θ
0/008649	0/9957622	0/020284	1/87916	169051	
0/008045	0/9958423	0/062017	1/88032	217676	
0/000162	0/9958407	0/030888	1/88090	258412	
-	0/9958423	-	1/88032	217676	r
0/000132	0/9958436	0/062473	1/88150	227876	
0/000083	0/9958443	0/056599	1/88256	243176	
0/000006	0/9958444	0/044594	1/88340	258476	
-	0/9958728	-	1/882517	209744	x (طول مبدل)
0/015401	0/9957195	0/000999	1/882536	224072	
0/012547	0/9958444	0/001392	1/882562	243176	
0/000754	0/9958519	0/000600	1/882573	267056	

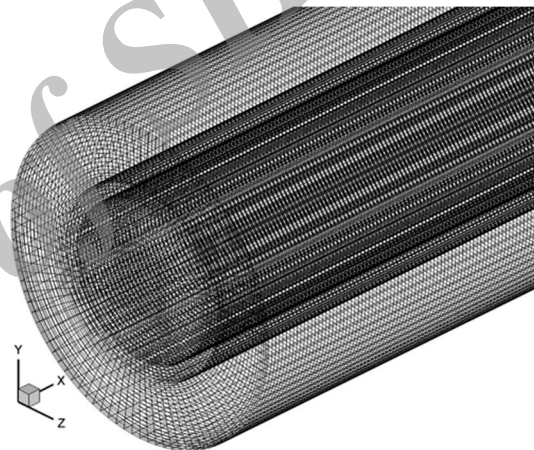
و انرژی از طرح بالادست مرتبه دوم¹ استفاده شده است. معیار همگرایی برای کار حاضر در تمامی معادلات ذکر شده 10^7 در نظر گرفته شده است.

1-5- آزمون استقلال شبکه

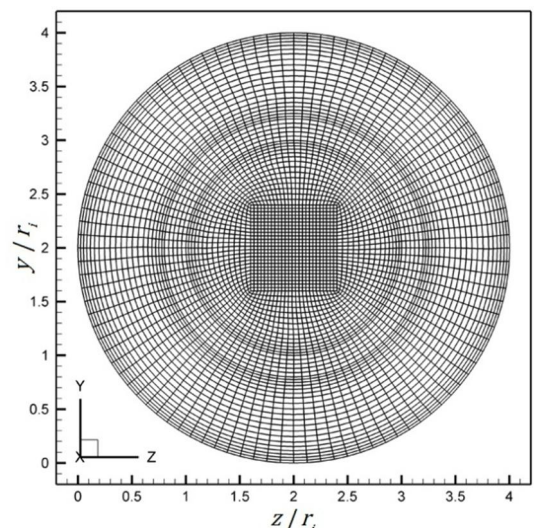
نتایج حاصل از آزمون استقلال از شبکه² برای مبدل حرارتی دولوله‌ای مستقیم در جدول 2 مشاهده می‌شود. برای بررسی استقلال از شبکه، در سه جهت مختلف X, θ, r (با توجه به شکل 3) تعداد گره‌ها افزایش داده شده و تاثیر این افزایش روی دمای بی‌بعد و سرعت بی‌بعد بررسی شده است. نتایج جدول 2 نشان می‌دهد که افزایش در تعداد گره‌ها به بیشتر از تعداد معین در هریک از جهات تنها باعث تغییرات بسیار ناچیزی در دمای بی‌بعد و سرعت بی‌بعد در نقطه ذکر شده می‌شود.

2-5- اعتبار سنجی

برای نشان دادن صحت و دقت مدل حاضر، ابتدا به حل جریان و انتقال حرارت درون یک لوله بلند افقی، که دیواره‌های آن دارای شار حرارتی ثابتی



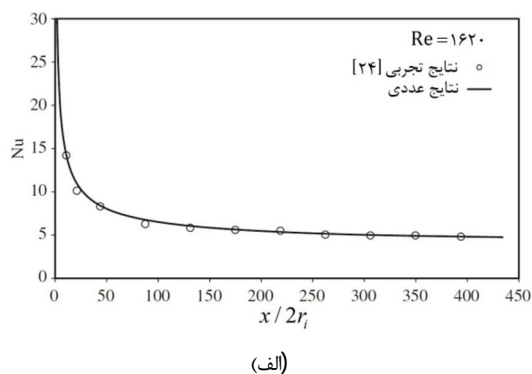
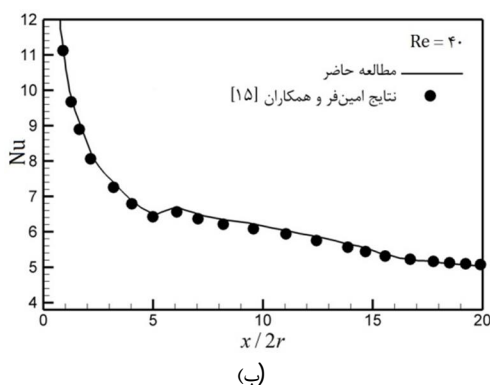
(الف)



(ب)

شکل 2 شبکه بندی استفاده شده (الف) نمای سه بعدی (ب) شبکه بندی در مقطع مبدل حرارتی دولوله‌ای

1- Second-Order Upwind
2- Grid independency test



شکل 4 اعتبارسنجی، الف) مقایسه عددی ناسلت در یک لوله بلند با مدل تجربی [24]، ب) مقایسه حل عددی کار حاضر با نتایج امین فر و همکاران [15]

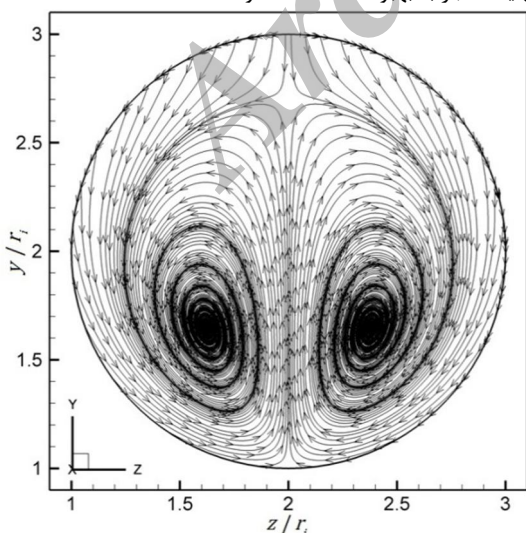
مغناطیسی با شدت $Mn = 5/33 \times 10^6$ است. مشاهده می‌شود که با اعمال میدان مغناطیسی، دمای لوله و هوا افزایش می‌یابند.

شکل 8 تغییرات دمای بی‌بعد در اثر اعمال میدان مغناطیسی مقاطع غیریکنواخت، در $\frac{x}{2r_i} = 20$ را برای $Re_{ff} = 50$ و $Re_{air} = 2300$ و

$Mn = 5/33 \times 10^6$ نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، اعمال میدان مغناطیسی سبب نفوذ لایه مرزی خنک در قسمت‌های مرکزی لوله داخلی مبدل شده و با افزایش شدت میدان مغناطیسی، نفوذ این لایه نیز افزایش خواهد یافت.

اثرات میدان مغناطیسی مقاطع غیریکنواخت حاصل از سیم حامل جریان الکتریسیته که موازی با راستای طولی مبدل و در فاصله‌ای نزدیک لوله داخلی (بین دولوله) قرار گرفته بر روی عدد ناسلت محلی در Mn های مختلف برای $Re_{ff} = 50$ و $Re_{air} = 2300$ در شکل 9 نشان داده شده است.

با اعمال میدان مغناطیسی مقاطع غیریکنواخت عدد ناسلت محلی افزایش یافته و عدد ناسلت متوسط برای $Mn = 2/13 \times 10^6$ تا 14% و برای $Mn = 5/33 \times 10^6$ تا 45% بهبود یافته است. اعمال میدان مغناطیسی غیریکنواخت مقاطع سبب افزایش گرادیان سرعت در نزدیکی دیواره‌ها شده و در نهایت منجر به بهبود عدد ناسلت خواهد شد.



شکل 5 خطوط جریان برای $Re_{ff} = 50$ و $Re_{air} = 2300$ و $Mn = 5/33 \times 10^6$ در

$$\frac{x}{2r_i} = 20 \text{ صفحه متقاطع}$$

6- تحلیل نتایج حل عددی برای مبدل حرارتی دولوله‌ای مستقیم

تأثیر میدان مغناطیسی غیریکنواخت مقاطع بر رفتار هیدرودینامیکی و حرارتی جریان فروسیال، برای حالتی که جریان سیال لوله داخلی و خارجی به صورت مخالف است، مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به این که نیروی مغناطیسی همواره در جهت افزایش گرادیان مغناطیسی است [25]، در نتیجه به واسطه وجود این نیرو پروفیل سرعت محوری حاصله تغییر خواهد کرد.

شکل 5 خطوط جریان را در $\frac{x}{2r_i} = 20$ ، در حضور میدان مغناطیسی

مقاطع غیریکنواخت نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، به سبب اعمال میدان مغناطیسی مقاطع غیریکنواخت دو گردابه تشکیل می‌شود که این گردابه‌ها فروسیال را از دو طرف مقطع لوله داخلی (در صفحه $y-z$) به سمت دیواره‌ها انتقال می‌دهند. همچنین، همان‌طور که ملاحظه می‌شود به سبب وارد شدن نیروی کلویین خطوط جریان از پایین لوله داخلی (نزدیک سیم حامل جریان) دور می‌شوند.

شکل 6 توزیع سرعت محوری بی‌بعد در $\frac{x}{2r_i} = 20$ و $Re_{ff} = 50$ را برای

شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش شدت میدان مغناطیسی، فروسیال به سمت دیواره لوله داخلی هدایت می‌شود.

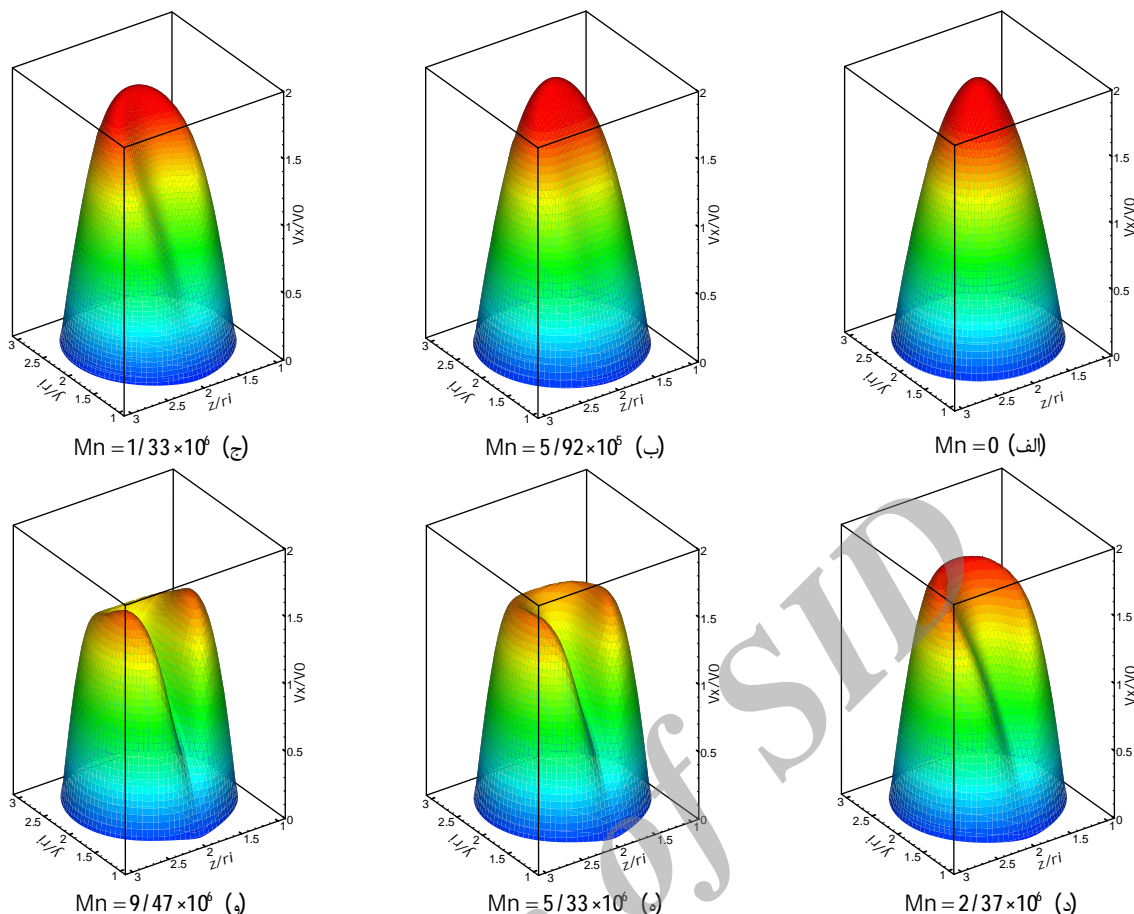
شایان ذکر است که میدان مغناطیسی مقاطع غیریکنواخت همانند میدان مغناطیسی محوری غیریکنواخت تأثیر خیلی کمی در MHD¹ دارد. لذا از ترم مربوط به MHD در معادلات مونتوم صرف نظر شده است [16, 17].

سیم حامل جریان الکتریسیته در جهت Z و Y میدان مغناطیسی مقاطع غیریکنواخت تولید می‌کند. این میدان عمود بر جهت جریان فروسیال است. بنابراین، در جهات Z و Y گرادیان میدان مغناطیسی خواهیم داشت. با افزایش شدت میدان مغناطیسی، نیروی به وجود آمده در صفحه متقاطع افزایش پیدا کرده و سبب ایجاد جریان‌های ثانویه شده که به واسطه آن دو گردابه به وجود خواهد آمد.

شکل 7 تغییرات دمای بی‌بعد را در دو حالت مختلف $Mn = 0$ و

$Mn = 5/33 \times 10^6$ برای لوله بیرونی مبدل حرارتی دولوله‌ای در $\frac{x}{2r_i} = 20$ و

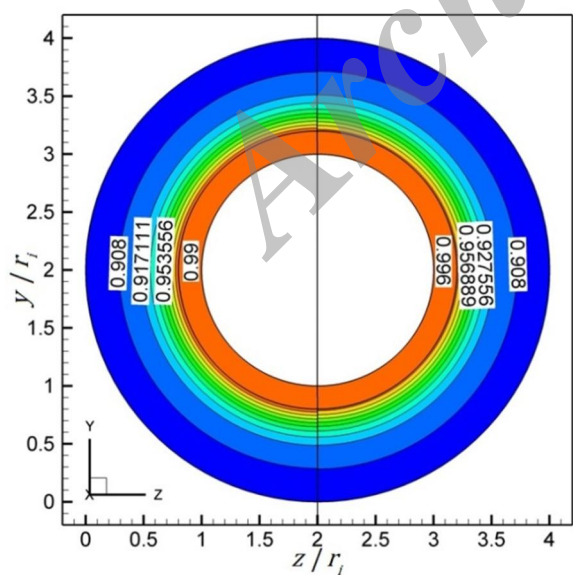
برای $Re_{ff} = 50$ و $Re_{air} = 2300$ نشان می‌دهد. نیمه چپ شکل 7 در حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی ($Mn = 0$) و نیمه راست در حضور میدان



شکل 6 تاثیر میدان مغناطیسی متقاطع غیریکنواخت بر توزیع سرعت محوری بی‌بعد فروسیال (سه بعدی) برای $Re_{ff} = 50$ و $Re_{air} = 2300$ و $\frac{X}{2r_i} = 20$:

(الف) در غیاب میدان مغناطیسی ($Mn = 0$)، (ب) $Mn = 5/92 \times 10^6$ ، (ج) $Mn = 1/33 \times 10^6$ ، (د) $Mn = 2/37 \times 10^6$ ، (ه) $Mn = 5/33 \times 10^6$ ، (و) $Mn = 9/47 \times 10^6$

کامل است، به دو قسمت بالایی و پایینی تقسیم شده و ضریب اصطکاک روی



شکل 7 پروفیل دمایی بی‌بعد لوله بیرونی، در $\frac{X}{2r_i} = 20$ ، برای $Re_{ff} = 50$ و

$Re_{air} = 2300$ (نیمه چپ $Mn = 0$ و نیمه راست $Mn = 5/33 \times 10^6$)

شکل 10 نیز تاثیر میدان مغناطیسی در شدت‌های مختلف میدان، بر

روی عدد ناسلت محلی در $Re_{ff} = 150$ را نمایش می‌دهد.

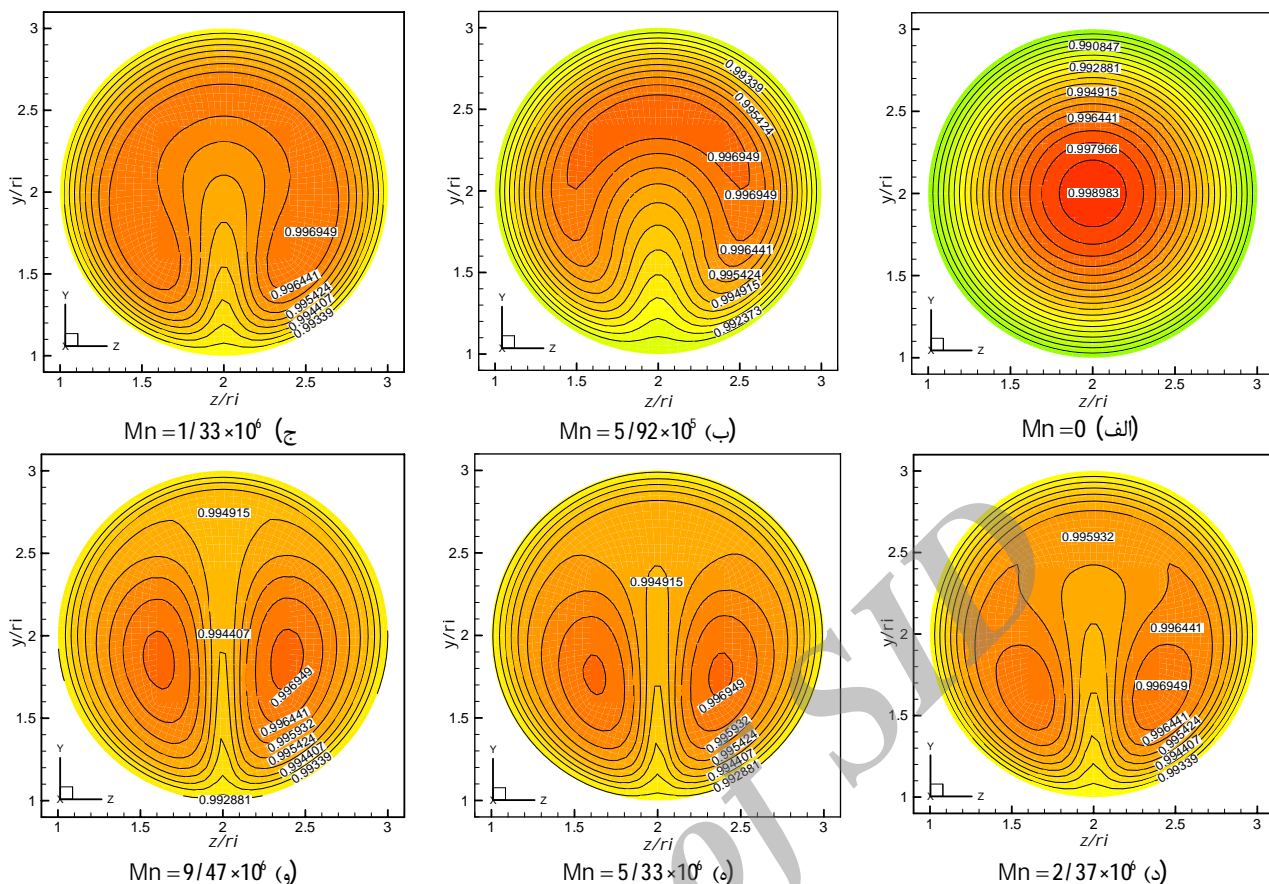
در جدول 3 درصد بهبود عدد ناسلت در شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی برای دو حالت $Re_{ff} = 150$ و $Re_{ff} = 50$ آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش شدت میدان مغناطیسی در ابتدا، این درصد با افزایش شدیدی همراه بوده و در شدت‌های بالاتر میدان درصد بهبود تقریباً ثابت می‌شود. همچنین، ملاحظه می‌شود که در رینولدزهای پایین‌تر درصد بهبود عدد ناسلت بیشتر است.

شکل‌های 11 (الف تا ج) تغییرات دمایی بی‌بعد فروسیال را در مقطع $\frac{X}{2r_i} = 20$ ، برای $\frac{y}{r_i} = 1/5, 2, 2/5$ تحت میدان مغناطیسی غیریکنواخت

مقاطع نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، اعمال میدان مغناطیسی غیریکنواخت متقاطع سبب افزایش گرادیان سرعت در نزدیکی دیواره لوله داخلی و نفوذ لایه مرزی خنک به درون فروسیال شده و در نتیجه دمایی دیواره و دمایی فروسیال در نزدیکی دیواره کاهش می‌یابد.

شکل‌های 12- (الف تا ج) تغییرات ضریب اصطکاک محلی فروسیال با اعمال میدان مغناطیسی غیریکنواخت متقاطع را بر روی محیط بی‌بعد دیواره لوله داخلی در مقطع $\frac{X}{2r_i} = 20$ برای $Re_{ff} = 150$ نشان می‌دهند.

برای نمایش بهتر این نمودار، محیط دیواره در این مقطع، که یک دایره



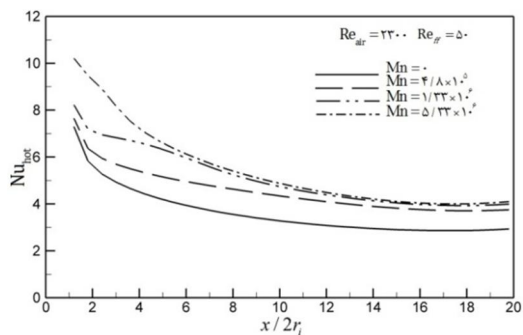
شکل 8 پروفیل دمایی بی بعد در $\frac{x}{2r_i} = 20$ ، برای $Re_{ff} = 50$ ، (الف) در غیاب میدان مغناطیسی ($Mn=0$)، (ب) $Mn = 5/92 \times 10^6$ ، (ج) $Mn = 1/33 \times 10^6$.

(د) $Mn = 2/37 \times 10^6$ ، (ه) $Mn = 5/33 \times 10^6$ ، (و) $Mn = 9/47 \times 10^6$

جدول 3 مقایسه درصد بهبود عدد ناسلت در شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی غیریکنواخت متقاطع در رینولدزهای مختلف

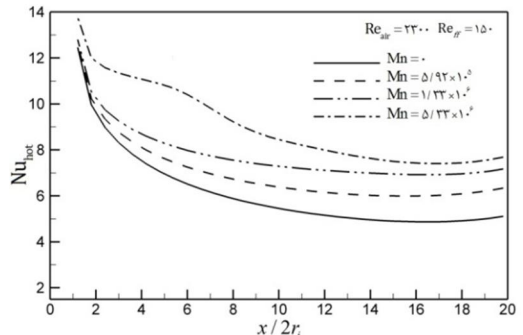
شدت میدان مغناطیسی	درصد بهبود عدد ناسلت	
	نسبت به حالت بدون اعمال میدان در $Re_{ff} = 50$	نسبت به حالت بدون اعمال میدان در $Re_{ff} = 150$
$Mn = 2/13 \times 10^6$	4/62127	1/54417
$Mn = 4/8 \times 10^6$	14/42627	6/25919
$Mn = 5/92 \times 10^6$	17/85487	8/55786
$Mn = 1/33 \times 10^6$	31/09720	21/54529
$Mn = 2/37 \times 10^6$	38/75350	31/62285
$Mn = 3/7 \times 10^6$	42/96189	38/44361
$Mn = 5/33 \times 10^6$	45/27325	43/00248

آن‌ها رسم شده است. همچنین، این نمودار در حالت دایره کامل نیز آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ضریب اصطکاک در اثر میدان مغناطیسی غیریکنواخت متقاطع در ناحیه اعمال میدان کاهش، اما این ضریب به طور کلی افزایش می‌یابد. برای مثال در حالت دایره کامل (شکل 12-ج) میزان افزایش ضریب اصطکاک در $Mn = 1/33 \times 10^6$



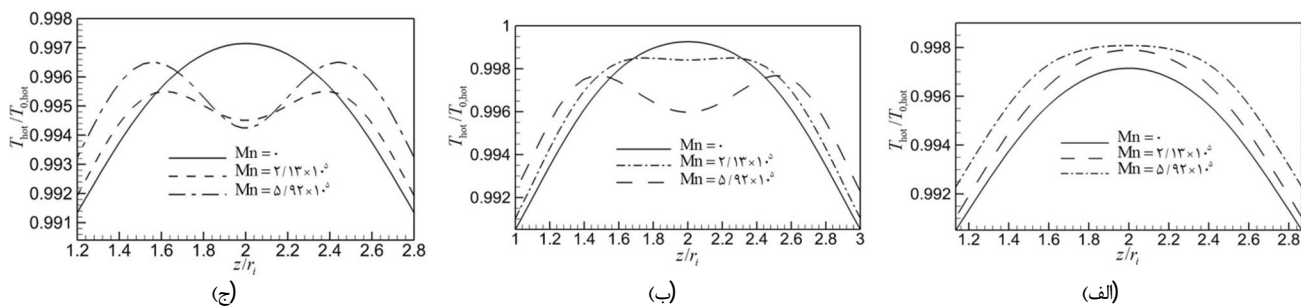
شکل 9 تاثیر شدت میدان مغناطیسی غیریکنواخت متقاطع بر روی عدد ناسلت

محلی برای شدت‌های مختلف میدان در $Re_{ff} = 50$ و $Re_{air} = 2300$



شکل 10 اثرات میدان مغناطیسی غیریکنواخت متقاطع بر عدد ناسلت محلی برای

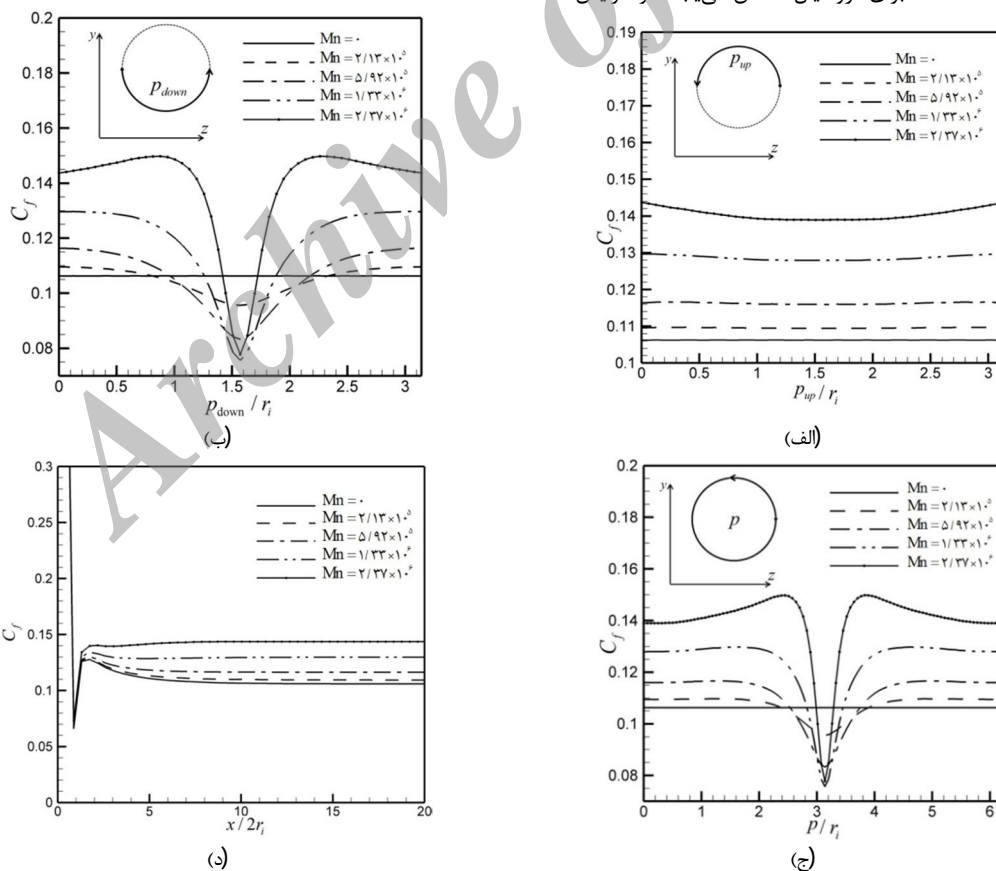
$Re_{air} = 2300$ و $Re_{ff} = 150$



شکل 11 تاثیر میدان مغناطیسی بر دمای بی‌بعد برای $Re_{ff} = 50$ ، $Re_{air} = 2300$ ، $X/2r_i = 20$ ، (الف) $Y/r_i = 2/5$ ، (ب) $Y/r_i = 2$ ، (ج) $Y/r_i = 1/5$

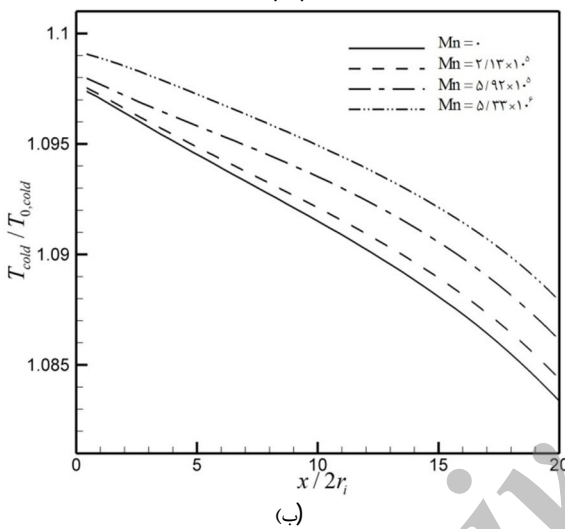
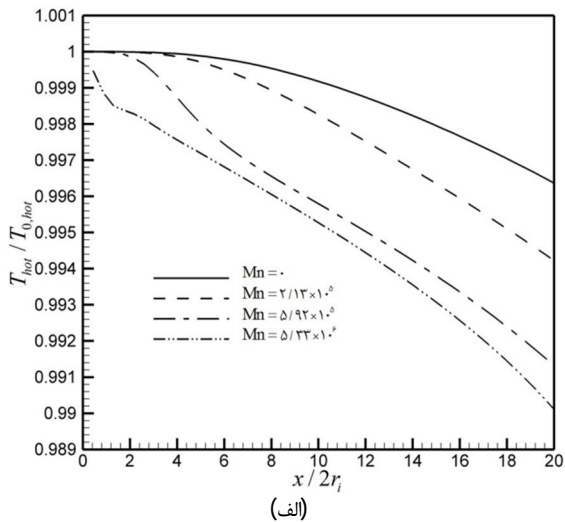
میدان مغناطیسی غیریکنواخت متقاطع بر روی نسبت عدد ناسلت متوسط برای سیال گرم در شکل 14 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش شدت میدان مغناطیسی نسبت ناسلت برای فروسیال افزایش می‌یابد. توزیع محوری فشار استاتیک در طول بی‌بعد لوله داخلی مبدل در شکل 15 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که اعمال میدان مغناطیسی غیریکنواخت متقاطع تاثیر نسبتا ناچیزی در فشار استاتیک دارد و این به دلیل عمودی بودن نیروی کلون است. میدان مغناطیسی به صورت متقاطع با جریان فروسیال اعمال می‌شود و تاثیر اندکی در ممانعت با جریان دارد. بنابراین، با توجه به کم بودن عدد رینولدز و طول کوتاه مبدل، افت فشار ناشی از میدان ناچیز بوده و روی قدرت پمپاژ فروسیال تاثیر چندانی نخواهد داشت.

شکل 12-د نیز $Mn = 2/37 \times 10^6$ به ترتیب برابر 16 و 32 درصد است. ضریب اصطکاک محلی در طول لوله داخلی برای $Re_{ff} = 150$ را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش شدت میدان مغناطیسی ضریب اصطکاک در طول مبدل نیز افزایش می‌یابد. برای نمونه میزان افزایش در $Mn = 1/33 \times 10^6$ و $Mn = 2/37 \times 10^6$ به ترتیب برابر 24 و 45 درصد است. اثر افزایش عدد رینولدز فروسیال بر روی عدد ناسلت متوسط برای سیال گرم در شکل 13 نشان داده شده است. این نسبت به صورت حاصل تقسیم عدد ناسلت متوسط تحت میدان مغناطیسی، به عدد ناسلت متوسط بدون حضور میدان مغناطیسی تعریف می‌شود. مشاهده می‌شود که با ثابت در نظر گرفتن رینولدز هوا و افزایش رینولدز فروسیال، نسبت عدد ناسلت برای فروسیال کاهش می‌یابد. اثر افزایش شدت



شکل 12 تاثیر شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی غیریکنواخت متقاطع بر ضریب اصطکاک محلی برای $Re_{ff} = 150$ و $Re_{air} = 2300$ در $X/2r_i = 20$

(الف) نیمه بالایی روی محیط بی‌بعد لوله داخلی (ب) نیمه پایینی روی محیط بی‌بعد لوله داخلی (ج) کل روی محیط بی‌بعد لوله داخلی (د) طول بی‌بعد لوله داخلی



شکل 16 نمودار دمای بی‌بعد برای $Re_{ff} = 50$ و $Re_{air} = 2300$ (الف) روی دیواره

گرم فروسیال در $\frac{z}{r_i} = 2$ و $\frac{y}{r_i} = 2$ (ب) روی دیواره سرد در $\frac{z}{r_i} = 0/8$ و $\frac{y}{r_i} = 2$

جدول 4 مقایسه درصد افزایش عدد ناسلت، افت فشار و ضریب اصطکاک نسبت به حالت بدون اعمال میدان، در شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی غیریکنواخت

مقاطع برای $Re_{ff} = 50$

ضریب اصطکاک در طول لوله	افت فشار	عدد ناسلت	شدت میدان مغناطیسی
2/83805	0/78464	4/62127	$Mn = 2/13 \times 10^6$
7/24631	2/94972	14/42627	$Mn = 4/8 \times 10^6$
9/29918	4/13899	17/85487	$Mn = 5/92 \times 10^6$
23/95001	13/43453	31/09720	$Mn = 1/33 \times 10^6$
44/95407	24/70138	38/75350	$Mn = 2/37 \times 10^6$
73/48603	34/00407	42/96189	$Mn = 3/7 \times 10^6$
112/22881	40/65890	45/27325	$Mn = 5/33 \times 10^6$

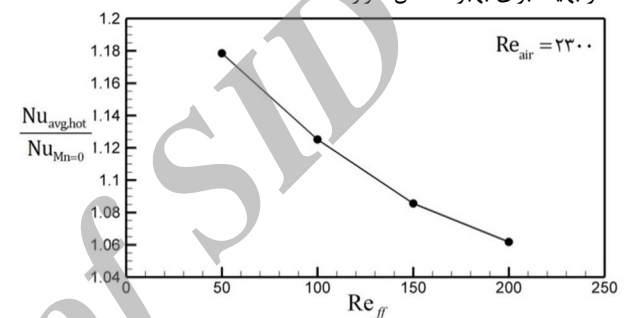
7- نتیجه‌گیری

اعمال میدان مغناطیسی متقاطع غیریکنواخت باعث ایجاد نیروی کلون در جهت عمود بر جریان فروسیال می‌شود. با وارد شدن نیروی کلون یک جفت گردابه تشکیل شده و فروسیال را از هر دو طرف به دیواره‌های لوله داخلی

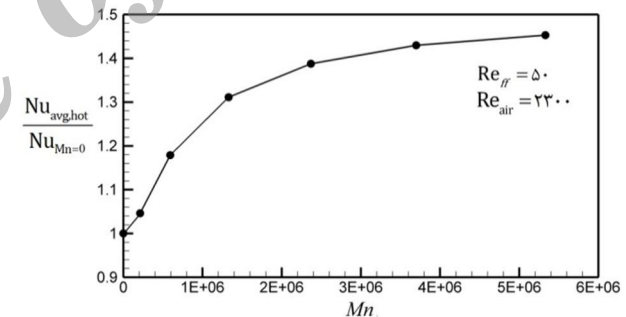
شکل 16-الف نمودار تغییرات دمای بی‌بعد در طول لوله داخلی (فروسیال گرم) را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش شدت میدان مغناطیسی غیریکنواخت متقاطع دمای فروسیال بیشتر کاهش می‌یابد.

شکل 16-ب نیز نمودار تغییرات دمای بی‌بعد هوا در طول لوله بیرونی (دیواره سرد) را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش شدت میدان مغناطیسی غیریکنواخت متقاطع دمای سیال سرد بیشتر افزایش می‌یابد.

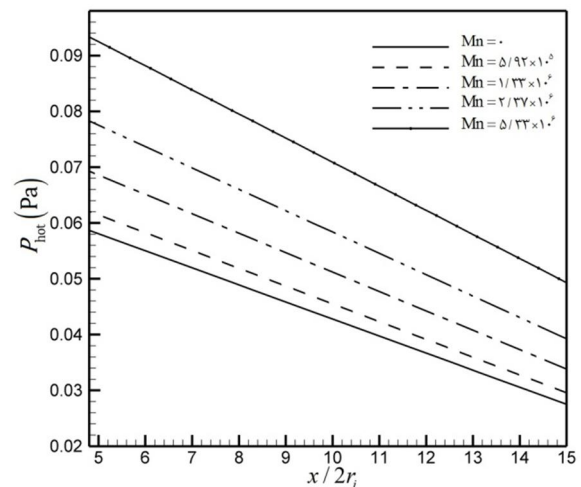
در جدول 4 مقایسه بین میزان افزایش عدد ناسلت، افت فشار و ضریب اصطکاک برحسب درصد در شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی برای $Re_{ff} = 50$ آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در صورتی که عدد مغناطیس از $Mn = 2/37 \times 10^6$ بیشتر شود، عدد ناسلت تغییر چندانی نکرده و بر مقدار افت فشار و ضریب اصطکاک افزوده می‌شود. بنابراین، عدد مغناطیس بین $Mn = 2/37 \times 10^6$ و $Mn = 1/33 \times 10^6$ برای $Re_{ff} = 50$ دارای مقدار بهینه برای بهبود انتقال حرارت است.



شکل 13 بررسی نسبت عدد ناسلت متوسط در رینولدزهای مختلف سیال گرم



شکل 14 بررسی نسبت عدد ناسلت متوسط فروسیال در شدت‌های مختلف میدان



شکل 15 نمودار فشار در راستای طولی روی دیواره گرم فروسیال در

$\frac{z}{r_i} = 1$ و $\frac{y}{r_i} = 2$ برای $Re_{ff} = 50$ و $Re_{air} = 2300$.

- [3] W. Duangthongsuk, S. Wongwises, Heat transfer enhancement and pressure drop characteristics of TiO₂-water nanofluid in a double-tube counter flow heat exchanger, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 7, pp. 2059-2067, 2009.
- [4] N. Kannadasan, K. Ramanathan, S. Suresh, Comparison of heat transfer and pressure drop in horizontal and vertical helically coiled heat exchanger with CuO/water based nano fluids, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 42, pp. 64-70, 2012.
- [5] A. Zamzamin, S. N. Oskouie, A. Doosthoseini, A. Joneidi, M. Pazouki, Experimental investigation of forced convective heat transfer coefficient in nanofluids of Al₂O₃/EG and CuO/EG in a double pipe and plate heat exchangers under turbulent flow, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 35, No. 3, pp. 495-502, 4, 2011.
- [6] G. Huminic, A. Huminic, Heat transfer characteristics in double tube helical heat exchangers using nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, No. 19, pp. 4280-4287, 2011.
- [7] K. Nakatsuka, B. Jeyadevan, S. Neveu, H. Koganezawa, The magnetic fluid for heat transfer applications, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 252, pp. 360-362, 2002.
- [8] S. Odenbach, S. Thurm, *Magnetoviscous effects in ferrofluids*, Bremen, Germany: Springer, 2002.
- [9] R. E. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics*, London: Cambridge University Press, 1985.
- [10] S. Shuchi, K. Sakatani, H. Yamaguchi, An application of a binary mixture of magnetic fluid for heat transport devices, *Journal of magnetism and magnetic materials*, Vol. 289, pp. 257-259, 2005.
- [11] 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*, Vol. 49, pp. 193-200, 2013.
- [12] 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.
- [13] D. Zablotzky, A. Mezulis, E. Blums, Surface cooling based on the thermomagnetic convection: Numerical simulation and experiment, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 23, pp. 5302-5308, 2009.
- [14] 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, 2010.
- [15] 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, 2011.
- [16] H. Aminfar, M. Mohammadpourfard, F. Mohseni, Two-phase mixture model simulation of the hydro-thermal behavior of an electrical conductive ferrofluid in the presence of magnetic fields, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 324, No. 5, pp. 830-842, 2012.
- [17] H. Aminfar, M. Mohammadpourfard, S. Ahangar Zonouzi, Numerical study of the ferrofluid flow and heat transfer through a rectangular duct in the presence of a non-uniform transverse magnetic field, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 327, No. 0, pp. 31-42, 2, 2013.
- [18] H. Aminfar, M. Mohammadpourfard, Y. N. Kahnemouei, Numerical study of magnetic field effects on the mixed convection of a magnetic nanofluid in a curved tube, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 78, pp. 81-90, 2014.
- [19] 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.
- [20] C. Kittel, P. McEuen, *Introduction to solid state physics*: Wiley New York, 1976.
- [21] E. Tzirtzilakis, N. Kafoussias, Three-dimensional magnetic fluid boundary layer flow over a linearly stretching sheet, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 132, No. 1, pp. 70-82, 2010.
- [22] K. H. J. Buschow, *Handbook of magnetic materials*, Amsterdam, North-Holland: Elsevier Science Press, 2006.
- [23] R. Hamilton, O. Crosser, Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems, *Industrial & Engineering chemistry fundamentals*, Vol. 1, No. 3, pp. 187-191, 1962.
- [24] D. Kim, Y. Kwon, Y. Cho, C. Li, S. Cheong, Y. Hwang, J. Lee, D. Hong, S. Moon, Convective heat transfer characteristics of nanofluids under laminar and turbulent flow conditions, *Current Applied Physics*, Vol. 9, No. 2, pp. e119-e123, 2009.
- [25] C. Rinaldi, A. Chaves, S. Elborai, X. T. He, M. Zahn, Magnetic fluid rheology and flows, *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, Vol. 10, No. 3, pp. 141-157, 2005.

هدایت می‌کند. این عمل سبب نفوذ لایه مرزی خنک به فروسیال گرم و در نهایت منجر به افزایش عدد ناسلت و بهبود انتقال حرارت فروسیال می‌شود. با افزایش شدت میدان مغناطیسی متقاطع غیریکنواخت، ضریب اصطکاک و افت فشار افزایش می‌یابد و میزان افزایش در افت فشار، به دلیل عمود وارد شدن نیروی کلون بر جریان فروسیال، نسبتاً ناچیز است. با مقایسه عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و افت فشار مقدار بهینه عدد مغناطیس در $Re_{ff} = 50$ بین $Mn = 1/33 \times 10^6$ و $Mn = 2/37 \times 10^6$ تعیین شد. در نتیجه با اعمال میدان مغناطیسی متقاطع غیریکنواخت ناشی از سیم حامل جریان الکتریسته می‌توان جریان فروسیال را کنترل کرده و فرایند خنک‌کاری در مبدل حرارتی دولوله‌ای را بهبود بخشید.

8- فهرست نمادها

$C_f = \frac{\tau_w}{1/2\rho_{ff}V_{0,hot}^2}$	ضریب اصطکاک فروسیال	C_p	گرمای ویژه
\vec{H}	بردار شدت میدان مغناطیسی (A/m)	\vec{H}_z	بردار شدت میدان مغناطیسی در جهت Z (A/m)
H_y	بردار شدت میدان مغناطیسی در جهت Y (A/m)	I	شدت جریان الکتریکی (A)
k	هدایت حرارتی (W/mK)	k_B	ثابت بولتزمن $1/3806503 \times 10^{23}$ J/K
$Mn = \frac{\mu_0 \chi H_r^2 h^2}{\rho_{ff} \alpha_{ff}^2}$	عدد مغناطیسی	$Nu = \frac{q_w (2r_i)}{k_{ff} (T_w - T_b)}$	عدد ناسلت فروسیال
P	فشار (Pa)	ρ	محیط
Re	عدد رینولدز	T	دما (K)
$V_{0,cold}$	سرعت ورودی سیال سرد (هوا) (m/s)	$V_{0,hot}$	سرعت ورودی سیال گرم (فروسیال) (m/s)
α_p	کسر حجمی نانوذرات	α_{ff}	ضریب پخش حرارتی (m ² /s)
μ	لزجت دینامیکی (kg/ms)	μ_0	نفوذ پذیری مغناطیسی خلاء ($4\pi \times 10^{-7}$ T.m/A)
μ_B	مگنتون بوهر $9/27 \times 10^{-24}$ Am ²		

9- مراجع

- [1] R. Saidur, K. Leong, H. Mohammad, A review on applications and challenges of nanofluids, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 3, pp. 1646-1668, 2011.
- [2] S. Chol, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *ASME-Publications-Fed*, Vol. 231, pp. 99-106, 1995.