

شبیه سازی CFD اثر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت اجباری جریان فروسیال داخل لوله

سامان محمدی^۱، ندا عظیمی^{۲*} و محمد خزاعی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۲۰	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۰۴	
واژگان کلیدی: شبیه سازی، انتقال حرارت، CFD، میدان مغناطیسی، فروسیال.	امروزه یکی از روش های مناسب جهت بهبود انتقال حرارت، استفاده از فروسیالات تحت اثر میدان مغناطیسی است. فروسیال، یک سوسپانسیون پایدار حاوی نانوذرات مغناطیسی و سیال پایه است که دارای ضریب هدایت حرارت بالاتری نسبت به سیال پایه می باشد. در این تحقیق، شبیه سازی CFD تأثیر میدان مغناطیسی ثابت بر میزان انتقال حرارت در جریان فروسیال آب-Fe ₃ O ₄ در یک لوله ی مدور تحت شار حرارتی ثابت انجام شده است. شبیه سازی در دو قسمت، شامل عدم حضور میدان مغناطیسی و در حضور میدان مغناطیسی با اعمال شار حرارتی ثابت بر جداره ی لوله انجام شد. نتایج نشان داد که حضور نانوذرات مغناطیسی در آب در غیاب میدان مغناطیسی، منجر به افزایش ۳۳/۴-۲۰/۵ درصد در عدد ناسلت می شود. به علاوه، اعمال میدان مغناطیسی بر لوله به دلیل ایجاد جریان های عرضی در جریان، باعث ۵۳/۱۰۰-۶۶/۷ درصد افزایش در عدد ناسلت شد. با افزایش عدد رینولدز، دمای سیال خروجی و همچنین دمای جداره ی لوله کاهش و ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت افزایش یافت. در پایان، نتایج شبیه سازی CFD با نتایج آزمایشگاهی موجود در یک مرجع، مقایسه و تطابق خوبی مشاهده شده است.

۱-مقدمه

اغلب سیالات معمول در سیستم های گرمایشی و سرمایشی همانند آب، اتیلن گلیکول، پروپیلن گلیکول، روغن موتور، استون و روغن های معدنی، در ظرفیت و ویژگی های حرارتی، دارای محدودیت های ذاتی هستند که موانع متعددی را به منظور کاربرد آن ها در انتقال حرارت ایجاد می کند. یکی از روش های مناسب برای رفع این محدودیت ها و در نتیجه بهبود انتقال حرارت، استفاده از نانوسیالات است [۱]. فروسیالات نوع خاصی از نانوسیالات هستند که از سوسپانسیون ذرات سوپر پارامغناطیس در یک مایع مناسب (معمولاً آب یا روغن) تشکیل می شوند. مطالعات آزمایشگاهی نشان می دهند نانوذرات نه تنها باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال می شوند، بلکه ضریب انتقال حرارت جابه جایی آن را نیز نسبت به سیال پایه

افزایش می دهند [۲]. از آنجا که امکان دارد ذرات به واسطه ی خاصیت مغناطیسی شان به یکدیگر بچسبند، بایستی سطح ذرات با یک فاز ثانویه پوشش داده شود. این دسته از نانوسیالات معمولاً دارای ۳ تا ۸ درصد حجمی نانوذرات سوپر پارامغناطیس و بیش از ۱۰ درصد حجمی ماده سطح ساز می باشند. در غیاب میدان مغناطیسی خارجی، نانوذرات به علت وجود حرکت براونی، رسوب نمی کنند. به محض اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی، ذرات در راستای میدان آرایش می یابند، به همین دلیل می توان از میدان مغناطیسی خارجی جهت حرکت دادن فروسیال ها بهره برد. تهیه سیالاتی که خواص آن ها توسط میدان مغناطیسی معمولی قابل کنترل است، برای محققین علاقه مند در زمینه مکانیک سیالات، تا مدت ها به عنوان یک چالش مطرح بوده است. از جمله موضوعات مهم و

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: n.azimi@iauksh.ac.ir

۱. دانشجو، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی.

۲. استادیار، گروه مهندسی شیمی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

۳. دانشجو، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه.

بنیادی در رابطه با فروسیال‌های مغناطیسی، خواص رئولوژیکی آن‌ها تحت تأثیر میدان مغناطیسی می‌باشد. به‌رغم مطالعات گسترده در زمینه انتقال حرارت نانوسیالات، مطالعات محدودی در راستای بررسی جریان و انتقال حرارت فروسیالات مغناطیسی انجام شده است. لذا مطالعه‌ی تأثیر میدان مغناطیسی بر جریان فروسیال و انتقال حرارت آن به‌عنوان گامی در جهت بهبود انتقال حرارت در تجهیزات صنعتی نظیر مبدل‌های حرارتی، بسیار حائز اهمیت است [۷-۳].

شریفی‌اصل و همکاران [۸] با روش عددی، انتقال حرارت جابجایی در یک لوله افقی هنگامی که جریان نانوسیال مغشوش و غیرنیوتنی بود را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها دریافتند که افزودن نانوذرات Al_2O_3 موجب افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی موضعی سیال غیرنیوتنی می‌شود. همچنین دریافتند که میزان این افزایش با غلظت نانوذرات و عدد رینولدز رابطه مستقیم دارد.

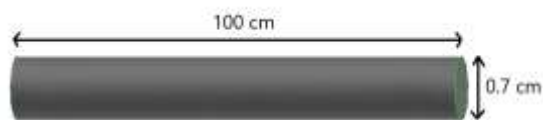
فرج‌الهی و همکارانش [۹] به بررسی رفتار حرارتی دو نانوسیال آب-گاما اکسید آلومینیوم و آب-اکسید تیتانیوم در یک مبدل حرارتی پوسته-لوله پرداختند. نتایج نشان دادند که با افزودن این نانوذرات به سیال پایه، ضریب انتقال حرارت سیال افزایش می‌یابد. به‌علاوه، آن‌ها دریافتند که هر دو نانوسیال، غلظت‌های حجمی بهینه‌ی مختلفی دارند که در آن غلظت‌های نانوذرات، ضریب انتقال حرارت سیال، بیشترین افزایش را دارد. زینالی و همکاران [۱۰] با بررسی ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات آب/اکسید آلومینیوم و آب/اکسید مس در لوله‌ای که دارای دمای ثابت در دیواره و تحت شرایط جریان آرام قرار داشت، دریافتند که افزودن نانوذرات اکسید فلزی به آب سبب بهبود ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت می‌شود. ژوان و همکارانش [۱۱] با استفاده از روش لیتیس-بولتزمن به مطالعه‌ی عددی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال مغناطیسی در داخل یک میکروکانال در حضور میدان‌های مغناطیسی غیریکنواخت پرداختند. نتایج آن‌ها بیانگر امکان کنترل میزان انتقال حرارت با تغییر جهت گرادیان میدان مغناطیسی است. بیشترین میزان افزایش انتقال حرارت زمانی حاصل شد که گرادیان میدان، هم جهت با جریان سیال بود. لاجوردی و همکاران [۱۲] در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی، انتقال حرارت جابجایی نانوسیال مغناطیسی آب-اکسید آهن را در یک لوله‌ی

مسی، تحت شرایط شار گرمایی ثابت دیواره و میدان مغناطیسی یکنواخت عمود بر راستای جریان بررسی کردند. نتایج حاکی از افزایش قابل توجه انتقال حرارت در فروسیال، با اعمال میدان مغناطیسی ثابت با قدرت‌های مختلف است. این محققین، مهمترین دلیل این افزایش انتقال حرارت را تغییرات قابل ملاحظه‌ی خواص ترموفیزیکی فروسیال در حضور میدان مغناطیسی دانستند. امین‌فر و همکارانش [۱۳] تأثیر اعمال میدان مغناطیسی غیریکنواخت بر رفتار هیدرودینامیکی و حرارتی فروسیال نفت سفید-اکسید آهن در جابه‌جایی ترکیبی در یک لوله‌ی عمودی را به‌صورت عددی بررسی کردند. در این سیستم، شدت میدان مغناطیسی اعمال شده، در طول لوله تغییر می‌کند. در یک حالت، شدت میدان، در جهت جریان، کاهش (گرادیان منفی) و در حالت دیگر، شدت آن در جهت جریان، افزایش (گرادیان مثبت) یافته است. براساس نتایج حاصل، عدد ناسلت با استفاده از میدان مغناطیسی با شدت‌ها و گرادیان‌های مختلف، قابل کنترل است. میدان مغناطیسی با گرادیان منفی، مشابه نیروی بویانسی عمل کرده و عدد ناسلت را افزایش می‌دهد، در حالیکه میدان مغناطیسی با گرادیان مثبت، آن را کاهش می‌دهد. شیخ‌الاسلامی و همکارانش [۱۴] همرفت آزاد فروسیال در یک محفظه، در حضور میدان مغناطیسی را به‌صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. محفظه، مملو از مخلوط نفت سفید-کبالت بوده و از پایین، تحت گرما است. در این سیستم، خنک‌سازی به‌صورت همرفت آزاد و از طریق دو دیواره‌ی عمودی محفظه صورت می‌گیرد. نتایج این پژوهش، با مطالعات آزمایشگاهی و عددی دیگر، مقایسه و تطابق بسیار قابل قبولی حاصل شده است. تأثیر عدد رایلی، طول منبع حرارتی و اندازه و درصد حجمی نانوذرات کبالت بر رفتار هیدرودینامیکی و حرارتی فروسیال بررسی شد. نتایج نشان می‌دهند که عدد ناسلت رابطه‌ی مستقیمی با عدد رایلی و طول منبع حرارتی و رابطه‌ی معکوسی با اندازه و درصد حجمی نانوذرات دارد. امروزه نرم‌افزارهای شبیه‌سازی، کاربرد گسترده‌ای در طراحی و خلق فرآیندها دارند. سرعت و دقت بالای این روش‌ها امکان پیش‌بینی عملکرد فرآیندها، با دقت و صرف زمان کم را فراهم می‌سازد. یکی از ارزشمندترین و پرکاربردترین شبیه‌سازی در بسیاری از علوم به خصوص علوم مهندسی، شبیه‌سازی با دینامیک سیالات محاسباتی

برای بررسی تاثیر میدان مغناطیسی بر میزان انتقال حرارت جریان فروسیال در یک لوله با تحریک نانوذرات مغناطیسی از شبیه سازی CFD استفاده شد.

۲-۱- طراحی هندسه

نخستین مرحله در انجام شبیه سازی، ساخت هندسه ی سیستم و شبکه بندی آن است. به منظور تصدیق نتایج شبیه سازی، هندسه ی مورد استفاده در مطالعه ی آزمایشگاهی حسین زاده و همکارانش [۱۷] انتخاب گردیده است. برای ساخت هندسه ی سیستم، یک لوله ی استوانه ای با ابعادی مطابق هندسه ی واقعی آن (طول ۱۰۰ cm و قطر ۰/۷ cm) در راستای محور x در محیط نرم افزار گمبیت ایجاد شده است که شماتیک آن در شکل (۱) نمایش داده شده است. از آنجا که در مسائل انتقال حرارت باید ضخامت لوله در نظر گرفته شود، باید یک استوانه ی دیگر با شعاع بزرگتر ترسیم گردد. به این منظور، ضخامت دیواره ی استوانه را ۱ mm در نظر گرفته و استوانه ای دیگر با قطر ۰/۹ cm و طول ۱۰۰ cm ترسیم شد. سپس حجم استوانه ی اول از استوانه ی دوم جدا شد که حاصل آن، ایجاد دو حجم استوانه ای هم محور است.



شکل ۱- شماتیک کلی هندسه ی مورد بررسی.

۲-۲- مش بندی و بررسی استقلال از مش

برای مش بندی صفحه ی فصل مشترک و صفحه ی جانبی استوانه خارجی، از مش های مثلثی با اندازه ی ۰/۱ cm استفاده شده است. برای دقت بیشتر، در نواحی ورودی و خروجی سیال نیز مش های ریزتری به کار گرفته شد (شکل ۲). برای اطمینان استقلال حل از اندازه مش ها، پنج اندازه برای مش بندی بررسی شد که تعداد حجم کنترل های حاصل $۱/۴۵ \times ۱۰^۵$ ، $۰/۸۸ \times ۱۰^۵$ ، $۱/۳۶ \times ۱۰^۵$ ، $۱/۵۴ \times ۱۰^۵$ و $۱/۶۵ \times ۱۰^۵$ بود. پارامتر دما به عنوان معیار برای بررسی استقلال مدل از اندازه مش، در نظر گرفته شد. تغییر چشمگیری در پارامتر ذکر شده با تعداد حجم کنترل های بیش تر از $۱/۷۹ \times ۱۰^۵$ مشاهده نشد. بنابراین، برای کاهش زمان محاسبات، این حالت برای مش بندی انتخاب گردید.

(CFD) است. در دینامیک سیالات محاسباتی، سیستم های شامل جریان سیالات، انتقال جرم، انتقال حرارت و واکنش های شیمیایی با استفاده از شبیه سازی کامپیوتری، با دقت بالایی تحلیل می شوند.

جعفری و همکاران [۱۵] شبیه سازی CFD جریان فروسیال با پایه ی نفت سفید، درون یک هندسه ی استوانه ای با قطر و ارتفاع ۱۰ mm به منظور بهبود انتقال حرارت انجام دادند. در شبیه سازی جریان دوفازی، مدل مخلوط برای تشریح رفتار ذرات مغناطیسی به کار گرفته شد. یک میدان مغناطیسی یکنواخت با قدرت ها و جهت های مختلف بر سیستم اعمال شد. نتایج عددی نشان داد که در مقایسه با عدم اعمال میدان، در حضور میدان مغناطیسی فرایندهای انتقال بهبود می یابد.

گدیک و همکاران [۱۶] شبیه سازی CFD جریان آرام سیال تراکم ناپذیر مگنتورئولوژی بین دو صفحه ی موازی در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت را انجام دادند. هدف از این مطالعه، توسعه ی یک روش عددی که قادر به شبیه سازی جریان سیالات مگنتورئولوژی باشد و بتواند تأثیر میدان مغناطیسی اعمال شده بر توزیع سرعت و فشار سیال را بررسی کند، است. یک میدان مغناطیسی عرضی یکنواخت عمود بر جهت جریان اعمال شده است. معادلات دیفرانسیل حاکم بر جریان سیال مغناطیسی بین دو صفحه و میدان اعمال شده، با استفاده از ماژول MHD در نرم افزار فلونت به صورت عددی حل شدند. حل های عددی برای توزیع های فشار و سرعت سیال تحت میدان های مغناطیسی مختلف به دست آمدند. مشاهده شد که افزایش شدت میدان مغناطیسی اعمال شده باعث کاهش سرعت جریان می شود. هدف از این تحقیق، تحلیل و بررسی فرآیند انتقال حرارت جریان فروسیال در یک لوله با تحریک نانوذرات مغناطیسی به کمک شبیه سازی CFD است. به منظور بررسی میزان انتقال حرارت، دمای سیال ورودی و عدد ناسلت شبیه سازی و بررسی شده اند. شبیه سازی در دو مرحله شامل عدم حضور نانوذرات و میدان مغناطیسی و نیز در حضور نانوذرات مغناطیسی و میدان مغناطیسی انجام شده است. نتایج حاصل از این دو مرحله شبیه سازی، به منظور بررسی اثر نانوذرات و میدان مغناطیسی بر اختلاط و انتقال حرارت، با هم مقایسه شده اند.

۲- شبیه سازی

$$\rho \left(\frac{\sigma v}{\sigma t} + v \times \nabla v \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \quad (2)$$

که در آن v سرعت سیال و P فشار استاتیکی است. ρ و μ دانسیته و ویسکوزیته می‌باشد.

میدان مغناطیسی به صورت عددی توسط ماژل MHD در نرم افزار فلونت بر اساس روش معادله القای مغناطیسی حل شد. میدان مغناطیسی به عنوان یک نیروی بدنه‌ای به معادله (۲) اضافه شد که با اضافه کردن این ترم، این معادله مجدداً به صورت زیر ویرایش می‌شود [۲۰]:

$$\rho \left(\frac{\sigma v}{\sigma t} + v + \nabla v \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + \mu_0 (M \nabla) H \quad (3)$$

ترم نیروی مغناطیسی است که در آن μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی خلاء، M مقدار مغناطش سیال عامل و H قدرت میدان مغناطیسی است. وقتی که مغناطش (M) با میدان مغناطیسی اعمال شده (H) هم راستا باشد، یا H به اندازه کافی قوی باشد، معادله مغناطش به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$M = \chi H \quad (4)$$

به دلیل استفاده از آهنربای دائمی (میدان مغناطیسی ثابت) در این مطالعه، قانون آمپر برای ارتباط H با جریان الکتریکی (J_c)، به صورت زیر به کار برده شد [۲۰]:

$$\nabla \times H = J \quad (5)$$

قانون دوم گاوس برای تعریف قدرت میدان مغناطیسی در محیط (چگالی شار مغناطیسی) B به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\nabla \times B = 0 \quad (6)$$

معادله‌ی ساختاری برای توضیح رابطه‌ی میان B و H عبارتست از [۱۸]:

$$B = \mu_0 (H+M) = \mu_0 (I + \chi) H \quad (7)$$

۴- استراتژی حل

محاسبات بر مبنای رژیم آرام جریان انجام شد. در حل، از معادلات درجه دوم استفاده شده و میزان مغناطش میدان برابر T ۰/۱۲، ۰/۳۵ و ۱/۲ در نظر گرفته شده است. لوله‌ی طراحی شده دارای یک ورودی بوده که فروسیال با دانسیته‌ی $1050 \frac{kg}{m^3}$ ، ویسکوزیته‌ی $0.0113 \frac{kg}{m.s}$ و نفوذپذیری مغناطیسی $1/11 \frac{H}{m}$ به آن وارد می‌شود [۲۱].



شکل ۲- هندسه‌ی ایجاد شده در نرم افزار گمبیت.

۲-۳- شرایط مرزی و اولیه

شرایط مرزی تعریف شده برای این مسئله عبارتند از سرعت ورودی برای ورودی استوانه‌ی داخلی، جریان خروجی برای خروجی سیال از استوانه‌ی داخلی، دیواره برای سطح جانبی استوانه‌ی داخلی و شرط مرزی دیواره برای سطح جانبی استوانه‌ی خارجی. در جدول ۱ جزئیات شرایط مرزی ارائه شده است.

جدول ۱- شرایط مرزی تعریف شده

Boundary condition	Type
Fluid inlet	Velocity inlet
Fluid outlet	Outflow
Inner wall	Wall
Outer wall	Wall

در قسمت تعیین نوع محیط، نوع محیط استوانه‌ی داخلی، سیال و نوع محیط استوانه‌ی خارجی، جامد تعیین شد.

۲-۴- محاسبات در نرم‌افزار فلونت

پس از ساخت هندسه‌ی سه‌بعدی لوله‌ی استوانه‌ای در نرم‌افزار گمبیت، هندسه‌ی مذکور در نرم‌افزار فلونت فراهوانی شد. محاسبات در نرم‌افزار فلونت در دو مرحله صورت گرفته است. در مرحله‌ی اول، تنها انتقال حرارت در نظر گرفته شده و میدان مغناطیسی به سیستم اعمال نشده است. در مرحله‌ی دوم، اثر حضور هم‌زمان نانوذرات مغناطیسی و میدان مغناطیسی بر الگوی جریان و میزان انتقال حرارت فروسیال، مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که این محاسبات در فشار ثابت ۱ atm انجام شده‌اند.

۳- معادلات حاکم

معادله‌ی پیوستگی برای جریان تک فاز در نرم‌افزار فلونت به صورت زیر بیان می‌شود [۱۸]:

$$\frac{\sigma \rho}{\sigma t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (1)$$

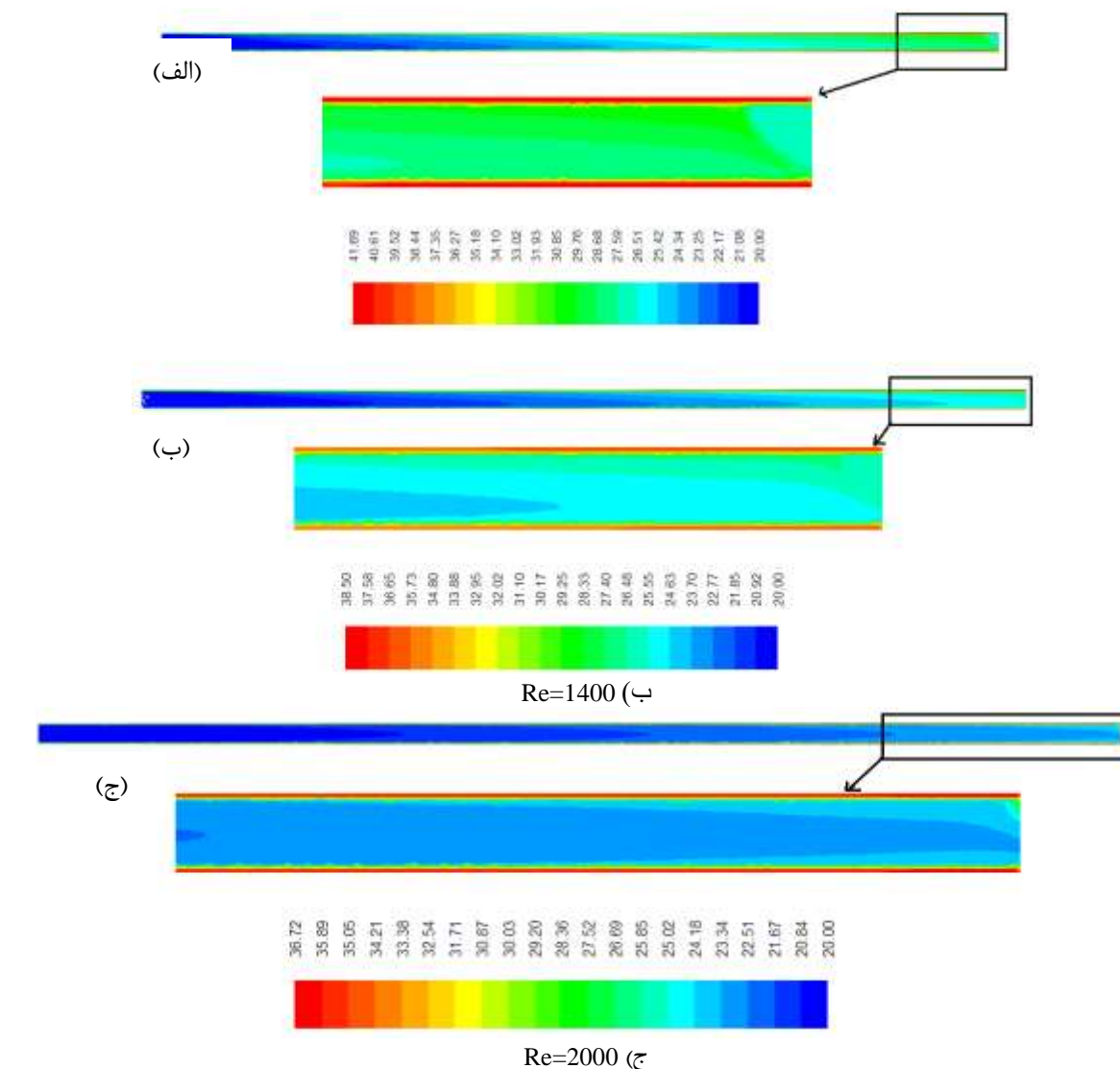
که در آن v سرعت سیال، ρ دانسیته و t زمان می‌باشد. معادله مومنوم: معادله مومنوم برای سیستم مورد مطالعه به صورت زیر می‌باشد [۱۹]:

۵- نتایج و بحث

۵-۱- مدل جریان هیدرودینامیک و توزیع دمای جریان آب داخل لوله در غیاب میدان مغناطیسی

در این بخش، ابتدا آب به عنوان سیال عامل در نظر گرفته شد تا بتوان با مقایسه‌ی نتایج آن با فروسیال، تأثیر فروسیال بر انتقال حرارت را پیش‌بینی کرد. دمای ۲۰ °C و سرعت

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} \quad (۸)$$



شکل ۳- کانتور تغییرات دمای آب خالص (K) با اعمال شار حرارتی در عدم حضور میدان مغناطیسی

(الف) Re=800 (ب) Re=1400 (ج) Re=2000

قرار داده شده است. در بخش شرایط عملیاتی، شتاب گرانش در جهت محور y برابر با $9/8 \text{ m/s}^2$ و محل مرجع فشار، در نقطه‌ی خروجی در نظر گرفته شد. شکل (۳) کانتور دمای استاتیکی آب خالص روی یک صفحه در راستای محور استوانه ($z=0$)، در حالت اعمال شار

بیشینه مقدار عدد رینولدز جریان آب در استوانه‌ی مورد مطالعه، طبق رابطه‌ی فوق، حدود ۲۰۰۰ به دست می‌آید، بنابراین جریان از نوع آرام بوده و در نرم افزار فلوئنت، رژیم جریان آرام برای جریان انتخاب شده است. سطح جانبی استوانه‌ی خارجی در معرض شار حرارتی ثابت 18 kW/m^2

که در آن μ_f ویسکوزیته سیال پایه است. ضریب هدایت حرارتی مؤثر فروسیال را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد [۲۲]:

$$k_{ff} = k_f \left[\frac{k_p + 2k_f - 2\phi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \phi(k_f - k_p)} \right] \quad (۱۳)$$

که در آن k_p و k_f به ترتیب ضریب هدایت حرارتی نانوذرات و سیال پایه هستند.

شکل (۴) کانتور دمای استاتیکی جریان فروسیال در برش $Z=0$ ، در حالت اعمال شار حرارتی 18 KW/m^2 روی جداره‌ی لوله‌ی مدور و در غیاب میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، دمای جریان ورودی برابر 20°C بوده که با اعمال شار حرارتی ثابت روی دیواره‌ی لوله، دمای بالک سیال در طول لوله افزایش می‌یابد. تغییرات دمای فروسیال و در نتیجه دمای فروسیال در خروجی لوله، به سرعت سیال وابسته است و همان‌طور که از شکل پیداست، با افزایش سرعت سیال، میزان افزایش دمای سیال در طول لوله کاهش می‌یابد. از مقایسه‌ی شکل‌های (۳) و (۴) می‌توان نتیجه گرفت که با افزودن نانوذرات مغناطیسی به سیال پایه، دمای جریان خروجی افزایش می‌یابد که علت آن به افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال در حضور نانوذرات رسانای Fe_3O_4 برمی‌گردد.

۵-۳- مدل جریان مگنتو هیدرودینامیک (MHD) و توزیع دمای جریان فروسیال داخل لوله در حضور میدان مغناطیسی

شکل (۵) توزیع چگالی شار مغناطیسی در برش $Z=0$ در لوله را نشان می‌دهد. در این مطالعه، میدان مغناطیسی ثابت با قدرت ۴۰۰ گوس، بر قسمت میانی لوله چگالی شار مغناطیسی، در قسمت میانی لوله دیده می‌شود. به دلیل پتانسیلی که بر فروسیال اعمال شده است، نیروی حجمی مغناطیسی به اسم نیروی کلین بر سیال اعمال می‌شود. نیروی کلین ناشی از برهم‌کنش بین میدان مغناطیسی (H) اعمال شده بر فروسیال و مغناطش (M) است که باعث ایجاد گرادیان فشار می‌شود.

حرارتی 18 KW/m^2 روی لوله‌ی مدور در غیاب میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل (۳) نشان می‌دهد، در ابتدا دمای آب ورودی 20°C بوده که با اعمال شار حرارتی ثابت روی دیواره‌ی استوانه، دمای بالک سیال با پیشروی در طول لوله افزایش یافته است. تغییرات دمای آب در طول لوله، به عدد رینولدز جریان وابسته است. با مقایسه‌ی شکل‌های (۳-الف)، (۳-ب) و (۳-ج) می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش عدد رینولدز، دمای جریان آب خروجی کاهش می‌یابد. علت این مسئله، کاهش زمان اقامت سیال در لوله و در نتیجه کاهش زمان انتقال حرارت بین جداره‌ی لوله و سیال، با افزایش سرعت سیال است.

۵-۲- توزیع دمای جریان فروسیال داخل لوله در غیاب میدان مغناطیسی

به منظور همخوانی شرایط این شبیه‌سازی با سیستم آزمایشگاهی حسین‌زاده و همکارانش، غلظت نانوذرات در فروسیال و شار حرارتی اعمال شده بر لوله به ترتیب برابر $0/1$ درصد وزنی و 18 KW/m^2 در نظر گرفته شد. برای محاسبه‌ی خواص فروسیال در دمای 20°C با غلظت $0/1$ درصد وزنی می‌توان از روابط زیر استفاده کرد [۲۳-۲۱]:

$$\rho_{ff} = \phi\rho_n + (1-\phi)\rho_f \quad (۹)$$

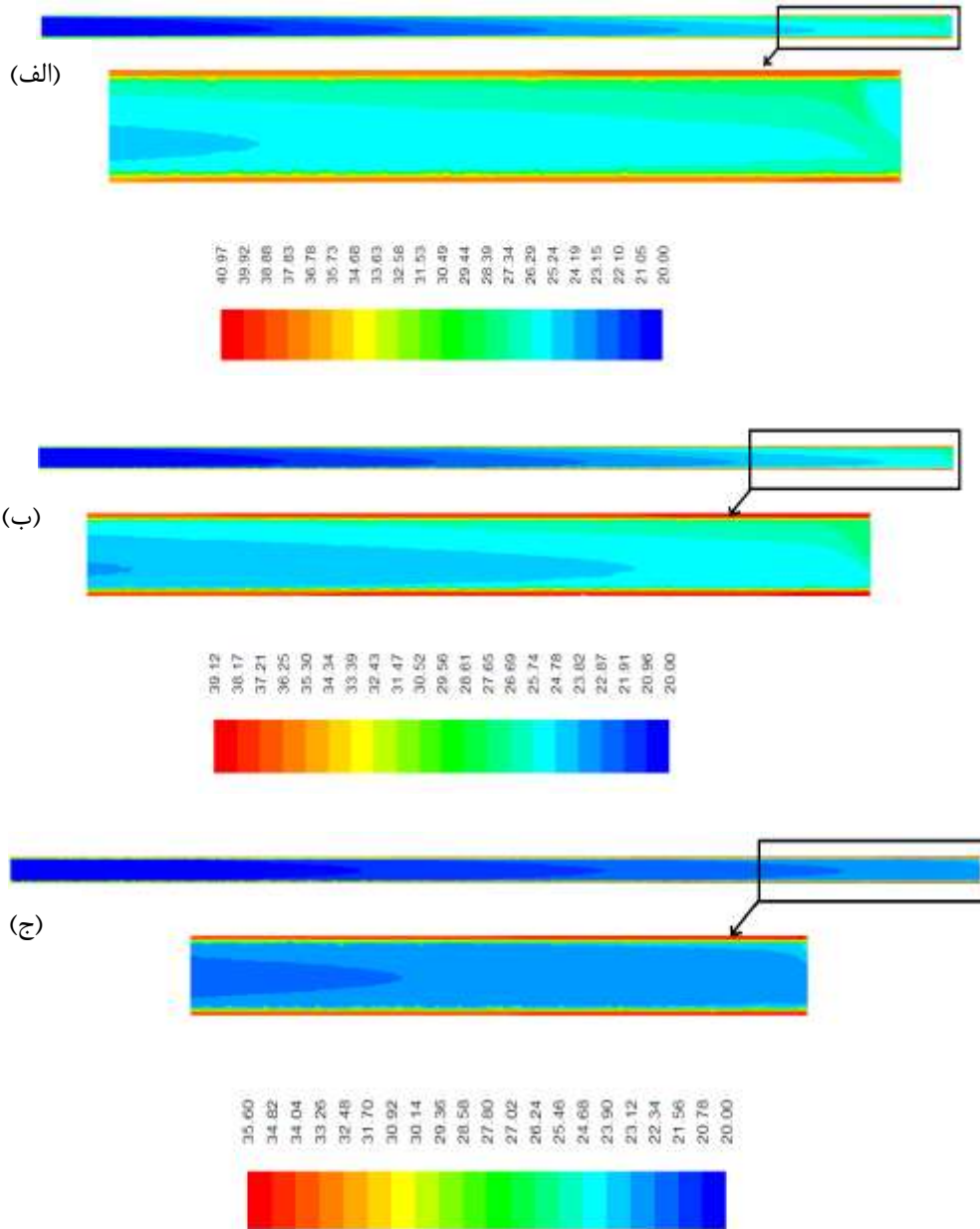
$$C_{p,ff} = \frac{\phi\rho_n C_{p,n} + (1-\phi)\rho_f C_{p,f}}{\rho_{ff}} \quad (۱۰)$$

که ρ_{ff} دانسیته‌ی فروسیال، ρ_n دانسیته‌ی نانوذرات و ρ_f دانسیته‌ی سیال پایه (آب) می‌باشند. ϕ جزء حجمی نانوذرات در سوسپانسیون است که به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۴، ۲۵]:

$$\phi = \frac{m_n / \rho_n}{m_n / \rho_n + m_f / \rho_f} \quad (۱۱)$$

که در آن m_n و m_f به ترتیب جرم نانوذرات و آب هستند. ویسکوزیته‌ی مؤثر فروسیال را نیز می‌توان از رابطه‌ی زیر بدست آورد [۲۴-۲۶]:

$$\mu_{ff} = \mu_f (1 + 2.5\phi) \quad (۱۲)$$

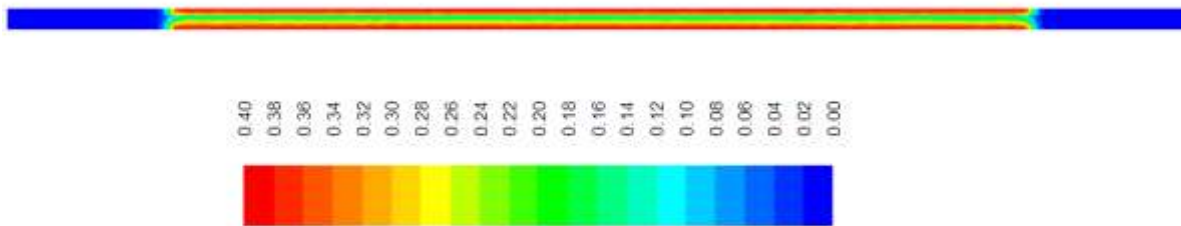


شکل ۴- کانتور دمای فروسیال ($^{\circ}\text{C}$) در برش $Z=0$ ، با اعمال شار حرارتی ثابت، در غیاب میدان مغناطیسی
 (الف) $\text{Re}=800$ (ب) $\text{Re}=1400$ (ج) $\text{Re}=2000$

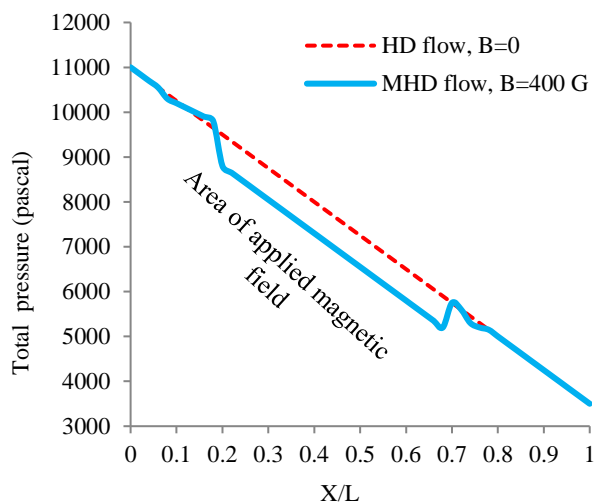
فشار در کنار دیواره‌هایی که میدان مغناطیسی بر آن‌ها اعمال شده، کاهش می‌یابد. بیشترین افت فشار مربوط به نواحی با بالاترین چگالی شار مغناطیسی است.

شکل (۷) کانتور دمای استاتیکی جریان فروسیال در برش $Z=0$ در لوله، با اعمال شار حرارتی 18 KW/m^2 به دیواره‌ی لوله‌ی مدور در حضور میدان مغناطیسی ثابت را نشان می‌دهد.

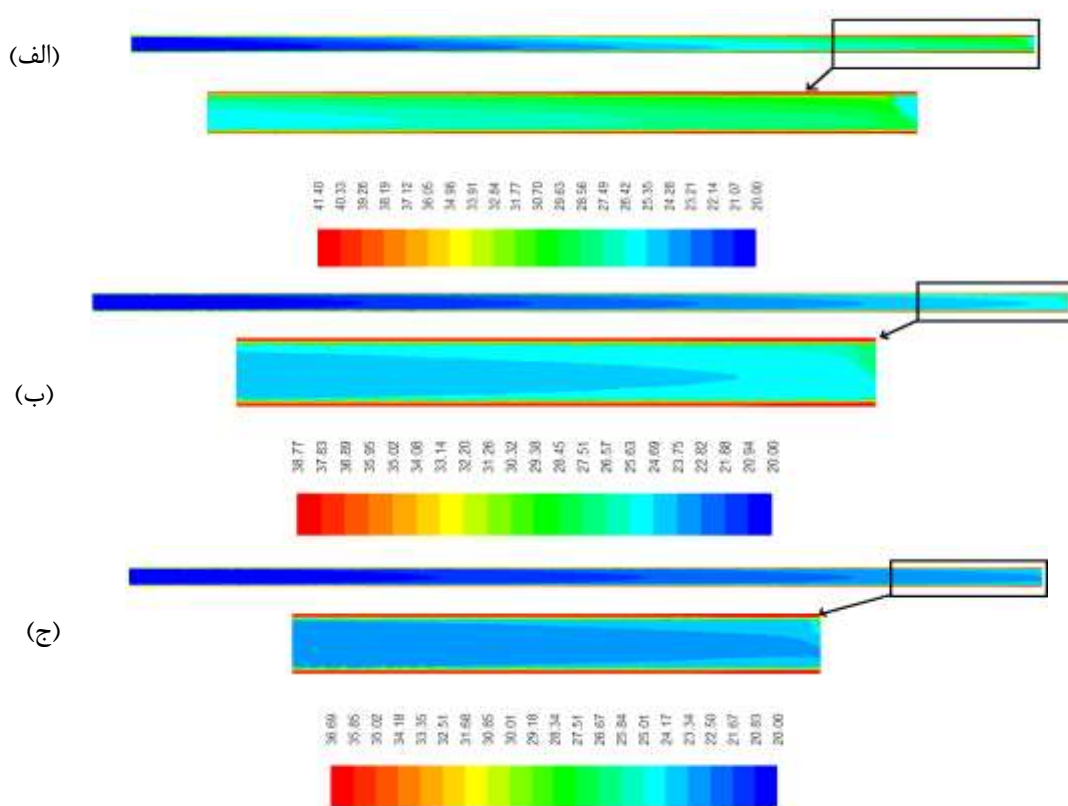
شکل (۶) توزیع فشار کل را برای جریان های HD و MHD نشان می‌دهد. در جریان HD فشار در ابتدا برابر Pa 11000 بوده که با پیشروی در طول لوله، کاهش می‌یابد. تغییرات فشار برای جریان HD به صورت خطی است در حالی که در جریان MHD، فشار به طور ناگهانی در ناحیه ای که میدان مغناطیسی بر آن اعمال شده ($0/66$ - $X/L=0/2$) کاهش پیدا می‌کند. در جریان MHD، توزیع



شکل ۵- کانتور چگالی شار مغناطیسی (B (Tesla)) در برش $Z=0$ در لوله



شکل ۶- توزیع فشار کل در جهت جریان در خط مرکزی لوله در $Re=800$



شکل ۷- کانتور دمای فروسیال ($^{\circ}C$) در برش $Z=0$ با اعمال شار حرارتی ثابت، در حضور میدان مغناطیسی ثابت

(الف) $Re=800$ (ب) $Re=1400$ (ج) $Re=2000$

$$Nu = \frac{hd_h}{k_{ff}} \quad (16)$$

که d_h قطر هیدرولیکی لوله و k_{ff} ضریب هدایت حرارتی سیال می‌باشند.

جدول ۲ مقادیر CFD دماهای دیواره و سیال خروجی از لوله، ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط و همچنین عدد ناسلت متوسط آب خالص در غیاب میدان مغناطیسی را در اعداد رینولدز مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۲- مقادیر CFD دماهای دیواره و بالک سیال خروجی، ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط و عدد ناسلت متوسط آب خالص در غیاب میدان مغناطیسی

Re	U (m/s)	T _b (°C)	T _w (°C)	h _{av} (W/m ² .°C)	Nu _{av}
۸۰۰	۰/۱۱۴۷	۲۶	۴۲	۱۱۲۵	۱۲/۹
۱۱۰	۰/۱۵۷۸	۲۵/۵	۴۱	۱۲۹۰/۳۲	۱۴/۸
۱۴۰۰	۰/۲۰۰۸	۲۴	۳۸/۱	۱۴۱۸/۴۳	۱۶/۲۷
۱۷۰۰	۰/۲۴۳۹	۲۳/۲	۳۶/۷	۱۴۸۱/۴۸	۱۷/۰
۲۰۰۰	۰/۲۸۶۹	۲۲/۷	۳۵/۲	۱۶۰۰	۱۸/۳۶

همان‌طور که جدول ۲ نشان می‌دهد، با افزایش عدد رینولدز، دمای سیال خروجی و همچنین دمای جداره‌ی لوله کاهش و ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت افزایش یافته‌اند. افزایش سرعت سیال، منجر به ایجاد آشفتگی و بهم خوردن لایه مرزی حرارتی و در نتیجه کاهش ضخامت لایه مرزی حرارتی (δ) می‌شود. از آنجا که ضریب انتقال حرارت جابجایی (h) با ضخامت لایه مرزی حرارتی، رابطه‌ی عکس دارد ($h \sim 1/\delta$)، افزایش سرعت سیال، منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی و در نتیجه افزایش عدد ناسلت می‌شود.

شکل (۸) نتایج CFD تغییرات عدد ناسلت موضعی جریان آب خالص با طول بدون بعد (X/L) و نیز تغییرات عدد ناسلت متوسط با عدد رینولدز، در غیاب میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد. برای بدست آوردن این نمودار، ابتدا با توجه به کانتور دمایی، دمای جداره‌ی لوله و بالک آب خروجی از لوله، مشخص شده و سپس با استفاده از روابط (۱۴) تا (۱۶)، ضریب انتقال حرارت جابجایی و سپس عدد ناسلت محاسبه شده‌اند.

همان‌طور که شکل (۷) نشان می‌دهد، دمای جریان فروسیال ورودی به لوله برابر 20°C بوده که در حالت اعمال شار حرارتی ثابت به دیواره‌ی لوله و اعمال میدان مغناطیسی ثابت به قسمت میانی آن، دمای بالک سیال در طول لوله افزایش می‌یابد. تغییرات دمای فروسیال در طول لوله و در نتیجه دمای فروسیال خروجی، به عدد رینولدز وابسته است و با افزایش عدد رینولدز، دمای فروسیال خروجی کاهش یافته است. با مقایسه‌ی شکل‌های (۴) و (۷) می‌توان نتیجه گرفت که با اعمال میدان مغناطیسی ثابت بر جریان فروسیال داخل لوله، دمای جریان خروجی افزایش می‌یابد. علت این پدیده این است که اعمال میدان مغناطیسی عمود بر جهت جریان فروسیال در سیستم مورد مطالعه، منجر به ایجاد جریان‌های عرضی در فروسیال می‌شود و در نتیجه باعث افزایش میزان انتقال حرارت بین جداره‌ی لوله و جریان فروسیال می‌شود.

۵-۴- محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت جریان‌های آب و فروسیال در حضور و

عدم حضور میدان مغناطیسی

استفاده از اعداد بدون بعد در بیان نتایج حاصل از آزمایشات به منظور جلوگیری از تکرار آن‌ها و بیان یک نتیجه‌گیری کلی، بسیار مناسب است. از این رو در این مطالعه، مقدار عدد ناسلت به عنوان معیاری برای تعیین نرخ انتقال حرارت در نظر گرفته شد. در ابتدا، مقادیر ضریب انتقال حرارت جابجایی، قبل و بعد از اعمال میدان مغناطیسی، از رابطه‌ی زیر محاسبه شد:

$$h(x) = \frac{q_w}{T_w(x) - T_b(x)} \quad (14)$$

که در آن T_w و T_b به ترتیب دمای سطح داخلی دیواره‌ی لوله و دمای بالک سیال هستند. h ضریب انتقال حرارت جابجایی و q_w شار حرارتی اعمال شده بر جداره‌ی لوله است. برای محاسبه $T_b(x)$ می‌توان از رابطه‌ی زیر استفاده کرد:

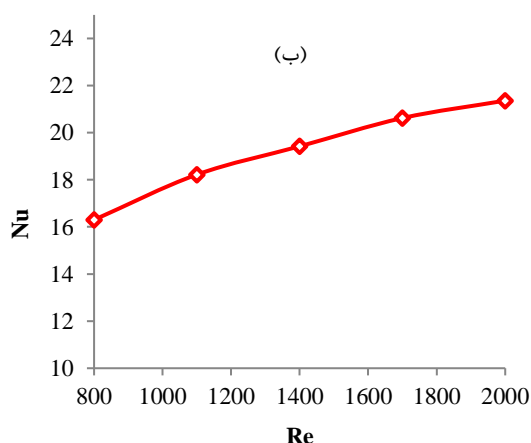
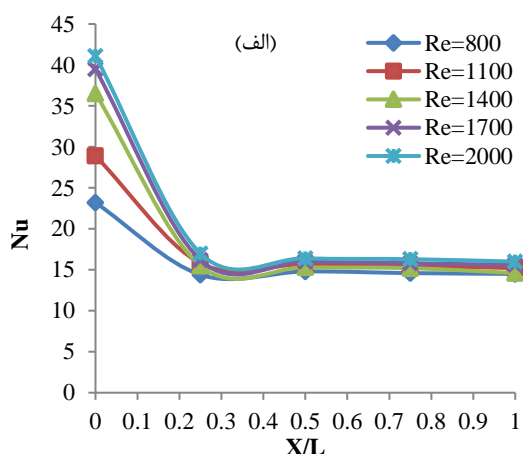
$$T_b(x) = T_i + \frac{Q}{\dot{m}C_p} \left(\frac{x}{L}\right) \quad (15)$$

که در آن T_i دمای سیال ورودی به لوله، Q مقدار کل انتقال حرارت در طول لوله، \dot{m} دبی جرمی جریان سیال، x طول متغیر و L طول لوله می‌باشند.

عدد بدون بعد ناسلت نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

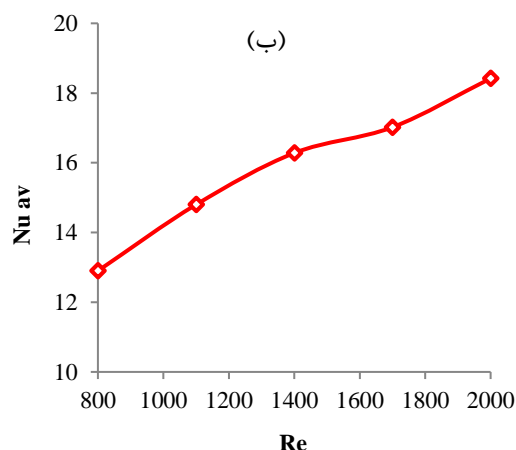
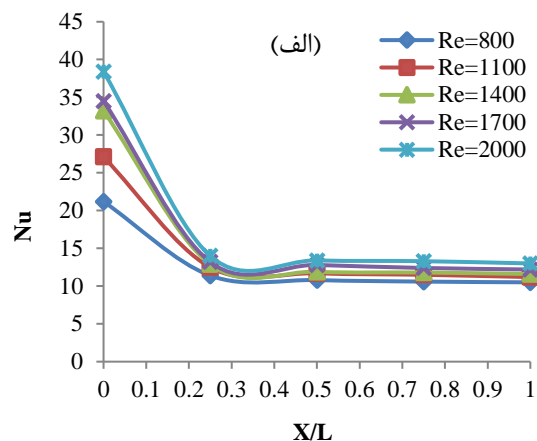
نانوذرات مغناطیسی در آب و اعمال میدان مغناطیسی به آن، منجر به افزایش دمای سیال خروجی، ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت نسبت به حالت استفاده از آب خالص می‌شود. علت افزایش دمای سیال خروجی این است که افزودن نانو ذرات به سیال، باعث افزایش ویسکوزیته‌ی سیال می‌شود. از طرفی، اعمال میدان مغناطیسی عمود بر جهت جریان، ایجاد جریان های عرضی و بی نظمی در جریان سیال می‌شود. مجموع این دو عامل، زمان اقامت سیال در لوله و در نتیجه زمان انتقال حرارت میان جداره‌ی لوله و جریان سیال را افزایش می‌دهد که این امر، منجر به افزایش دمای سیال خروجی می‌شود.

شکل (۹) نتایج CFD تغییرات عدد ناسلت موضعی جریان فروسیال با طول بدون بعد (X/L) و نیز تغییرات عدد ناسلت متوسط با عدد رینولدز، در حضور میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد.



(الف) عدد ناسلت موضعی (ب) عدد ناسلت متوسط

شکل ۹- نتایج CFD تغییرات مشخصه های جریان فروسیال داخل لوله با اعمال شار حرارتی ثابت، در حضور میدان مغناطیسی



شکل ۸- نتایج CFD تغییرات مشخصه‌های جریان آب داخل لوله با اعمال شار حرارتی ثابت در غیاب میدان مغناطیسی (الف) عدد ناسلت موضعی (ب) عدد ناسلت متوسط

جدول ۳ مقادیر CFD دماهای دیواره و سیال خروجی و همچنین ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط و عدد ناسلت متوسط فروسیال در حضور میدان مغناطیسی در اعداد رینولدز مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۳- مقادیر CFD دمای دیواره و بالک سیال خروجی، ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط و عدد ناسلت متوسط فروسیال در حضور میدان مغناطیسی

Re	U (m/s)	T _b (°C)	T _w (°C)	h _{av} (W/m ² .°C)	Nu _{av}
۸۰۰	۰/۱۱۴۷	۲۸/۵	۴۱/۲	۱۴۱۷/۳۲	۱۶/۲۶
۱۱۰۰	۰/۱۵۷۸	۲۷/۷	۴۰/۳	۱۵۸۷/۳۰	۱۸/۲۱
۱۴۰۰	۰/۲۰۰۸	۲۷/۳	۳۸/۶	۱۷۶۹/۹۱	۲۰/۳۱
۱۷۰۰	۰/۲۴۳۹	۲۷	۳۷/۵	۱۹۰۴/۷۶	۲۱/۸۶
۲۰۰۰	۰/۲۸۳۹	۲۶/۱	۳۶	۲۰۲۰/۲۰	۲۳/۱۸

مقایسه‌ی جدول ۳ با جدول ۲ نشان می‌دهد، وجود

مغناطیسی و در حضور میدان مغناطیسی با اعمال شار حرارتی ثابت 18 KW/m^2 روی دیواره‌ی لوله انجام شد. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی نشان داد که حضور نانوذرات مغناطیسی در جریان آب در غیاب میدان مغناطیسی، منجر به افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال و در نتیجه افزایش دمای بالک سیال خروجی نسبت به آب خالص شده است. با افزایش عدد رینولدز، دمای سیال خروجی و همچنین دمای جداره‌ی لوله کاهش و ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت افزایش یافت. افزایش سرعت سیال، منجر به ایجاد آشفتگی و بهم خوردن لایه مرزی حرارتی و در نتیجه افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت می‌شد. به علاوه، اعمال میدان مغناطیسی بر لوله، باعث ۱۰۰-۶۶ درصد افزایش در عدد ناسلت شد. در نهایت، مقادیر عدد ناسلت به دست آمده از شبیه‌سازی CFD، با نتایج آزمایش موجود در منابع، اعتبارسنجی شد که تطابق نسبتاً خوبی با خطای کمتر از ۷٪ ملاحظه گردید.

با توجه به شکل‌های (۸) و (۹) می‌توان به این نتیجه رسید که با افزودن نانوذرات مغناطیسی به آب به‌عنوان سیال پایه و اعمال میدان مغناطیسی به آن در سیستم مورد مطالعه در این پژوهش، عدد ناسلت افزایش یافته است. برای تصدیق نتایج شبیه‌سازی CFD، باید نتایج آن را با داده‌های آزمایشگاهی موجود در مرجع [۱۷] مقایسه کرد. از مقایسه‌ی نتایج CFD در شکل‌های (۸) و (۹) با مرجع آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که تطابق نسبتاً خوبی میان نتایج شبیه‌سازی CFD و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با استفاده از شبیه‌سازی CFD، تأثیر اعمال میدان مغناطیسی ثابت بر میزان انتقال حرارت جابجایی اجباری جریان‌های آب و فروسیال درون یک لوله‌ی مدور تحت شرایط شار حرارتی ثابت دیواره، مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی در دو مرحله، شامل عدم حضور میدان

مراجع

- [۱] سید سجاد جعفری و نوید فریدونی‌مهر، "بررسی تولید انتروپی در یک جریان لغزشی هیدرودینامیک مغناطیسی نانوسیال بر روی یک صفحه نفوذ پذیر گسترش یافته". نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۴۹، تابستان ۱۳۹۶، صفحه ۵۳-۳۹.
- [۲] رضا گورکی و جبین بیکی، "بررسی CFD انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیالات در یک کانال حاوی ذرات کروی شکل". نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۲، بهار ۱۳۹۷، صفحه ۳۶۱-۳۴۷.
- [3] Dinarvand M, Abolhasani M, Hormozi F, Bahrami Z, "Cooling capacity of magnetic nanofluid in presence of magnetic field based on first and second laws of thermodynamics analysis", Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2020, DOI: 10.1080/15567036.2021.1872746.
- [4] Dinarvand M, Abolhasani M, Hormozi F, Bahrami Z, "Effects of magnetic field gradient on heat transfer and irreversibility in a channel", Chemical Engineering Communications, 2021, DOI: 10.1080/00986445.2021.1977927.
- [5] Azimi N, Rahimi M, Zangenehmehr P, "Numerical Study of Mixing and Mass Transfer in a Micromixer by Stimulation of Magnetic Nanoparticles in a Magnetic Field", Chemical Engineering & Technology, Vol. 44, No. 6, 2021, pp. 1084-1093.
- [6] Sun C, Lee JS, Zhang M, "Magnetic nanoparticles in MR imaging and drug delivery", Advanced drug delivery reviews, Vol. 60, No. 11, 2008, pp. 1252-65.
- [7] Jalilzadeh S, Azimi N, "CFD Modeling of Mixing Intensification in Micromixers Using Stimulation of Magnetic Nanoparticles under Magnetic Field", Nashrieh Shimi va Mohandesi Shimi Iran, Vol. 38, No. 1, 2019, pp. 267-279.
- [۸] محمد شریفی‌اصل، داود طغرایبی و احمدرضا عظیمیان، "شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت جابجایی در جریان مغشوش غیرنیوتنی نانوسیال در یک لوله افقی مدور"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۳، تابستان ۱۳۹۷، صفحه ۱۰-۱۰.
- [9] Farajollahi B, Etemad SG, Hojjat M, "Heat transfer of nanofluids in a shell and tube heat exchanger", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 53, No. 1-3, 2010, pp. 12-7.
- [10] Heris SZ, Esfahany MN, Etemad SG, "Experimental investigation of convective heat transfer of Al₂O₃/water nanofluid in circular tube", International journal of heat and fluid flow, Vol. 28, No.2, 2007, pp. 203-10.

- [11] Xuan Y, Li Q, Ye M, "Investigations of convective heat transfer in ferrofluid microflows using lattice-Boltzmann approach", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 46, No. 2, 2007, pp. 105-11.
- [12] Lajvardi M, Moghimi-Rad J, Hadi I, Gavili A, Isfahani TD, Zabihi F, et al, "Experimental investigation for enhanced ferrofluid heat transfer under magnetic field effect", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 322, No. 21, 2010, pp. 3508-13.
- [13] Aminfar H, Mohammadpourfard M, Kahnemouei YN, "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, 2011, pp. 1963-72.
- [14] Sheikholeslami M, Gorji-Bandpy M, "Free convection of ferrofluid in a cavity heated from below in the presence of an external magnetic field", *Powder Technology*, Vol. 256, 2014, pp. 490-8.
- [15] Jafari A, Tynjälä T, Mousavi S, Sarkomaa P, editors, "CFD simulation of heat transfer in ferrofluids", *Proceedings of European congress of chemical engineering (ECCE-6) Copenhagen, 2007*, pp. 16-20.
- [16] Gedik E, Kurt H, Recebli Z, "CFD simulation of magnetohydrodynamic flow of a liquid-metal galinstan fluid in circular pipes", *Fluid Dynamics and Materials Processing*, Vol. 9, No. 1, 2013, pp. 23-33.
- [۱۷] مجتبی حسین‌زاده، سعید زینالی هریس، ابراهیم حسینی‌پور و مهدی شنیدی، "بررسی اثر میدان مغناطیسی بر روی ضریب اصطکاک و انتقال حرارت جریان آرام در لوله مدور در حضور نانوسیال مغناطیسی آب- Fe_2O_3 ". پنجمین کنفرانس بین المللی گرمایش، سرمایه‌ش، و تهویه مطبوع، تهران، ایران، ۱۳۹۳.
- [18] FLUENT 6.3., "User's Manual to FLUENT 6.3." Centerra Resource Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, (2006) USA:Fluent Inc.
- [19] Dizaji AS, Mohammadpourfard M, Aminfar H, "A numerical simulation of the water vapor bubble rising in ferrofluid by volume of fluid model in the presence of a magnetic field", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 449, 2018, pp. 185-96.
- [20] Abareshi M, Goharshadi EK, Zebajad SM, Fadafan HK, Youssefi A, "Fabrication, characterization and measurement of thermal conductivity of Fe_3O_4 nanofluids", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 322, No. 24, 2010, pp. 3895-901.
- [21] Ahmadabadi AR, Rahimi M, Azimi N, Alsairafi AA, "Natural convection heat transfer in an enclosure filled with Fe_3O_4 ferrofluid under static magnetic field (SMF): Experimental investigation and CFD modeling", DOI: 10.1615/JEnhHeatTransf.2021040051.
- [22] Valitabar M, Rahimi M, Azimi N, "Experimental investigation on forced convection heat transfer of ferrofluid between two-parallel plates", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 56, 2020, pp. 53-64.
- [23] Karami E, Rahimi M, Azimi N, "Convective heat transfer enhancement in a pitted microchannel by stimulation of magnetic nanoparticles", *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, Vol. 126, 2018, pp. 156-167.
- [24] Yarahmadi M, Goudarzi HM, Shafii M, "Experimental investigation into laminar forced convective heat transfer of ferrofluids under constant and oscillating magnetic field with different magnetic field arrangements and oscillation modes", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 68, 2015, pp. 601-11.
- [25] Ghasemian M, Ashrafi ZN, Goharkhah M, Ashjaee M, "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, 2015, pp. 158-67.
- [26] Ghofrani A, Dibaei M, Sima AH, Shafii M, "Experimental investigation on laminar forced convection heat transfer of ferrofluids under an alternating magnetic field", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 49, 2013, pp. 193-200.