



## بررسی عددی انتقال حرارت اجباری سیالات مغناطیسی در لوله‌های مارپیچ تحت تأثیر میدان مغناطیسی در جریان آرام

فرید عزیز پور عربی<sup>۱</sup>، محمد حسین دیبائی بناب<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، شاهرود، ایران (farid\_azizpoor@yahoo.com)

<sup>۲</sup> گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، شاهرود، ایران (diba\_mr60@yahoo.com)

### چکیده

در این تحقیق انتقال حرارت جابجایی اجباری فروسیال  $Fe_3O_4$  در داخل یک لوله مارپیچ مسی تحت یک میدان مغناطیسی به صورت عددی بررسی شده است و نیز بررسی‌هایی در لوله مستقیم و مارپیچ صورت پذیرفت و جهت اطمینان از صحت مطالعه عددی، نتایج با نتایج تئوری و دیگر محققین برای هندسه و شرایط مرزی مشابه اعتبار سنجی شده که توافق بسیار خوبی بدست آمده است. تمام بررسی‌ها در رژیم جریان آرام (عدد رینولدز کمتر از ۱۵۰۰) و تحت شرایط مرزی حرارتی لوله با شار حرارتی یکنواخت در نظر گرفته شده که در بعضی از نقاط تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد که این میدان یک عبارت دیگری بنام نیروی الکترومغناطیسی به معادله‌ی ممنتوم و یک عبارتی به نام اثر ژول به معادله‌ی انرژی اضافه شود. هدف از این تحقیق بررسی اثر پارامترهای استفاده از نانوسیال، کسر حجمی نانوذرات، عدد رینولدز جریان، میدان مغناطیسی در رفتار جریان بوده است.

نتایج نشان می‌دهد به علت بوجود آمدن جریان‌های همرفت پیچیده در سیال به علت اندرکنش بین نانوذرات  $Fe_3O_4$  و میدان مغناطیسی، افزایش میدان مغناطیسی و افزایش کسر حجمی، منجر به افزایش بیشتر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و کاهش دمای جداره لوله شده است که این افزایش با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد.

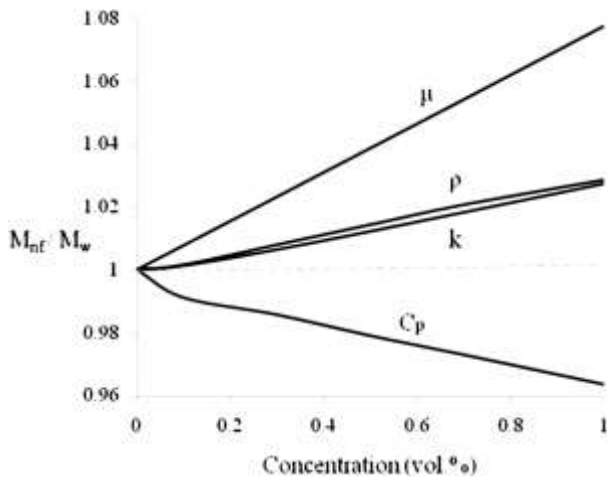
### واژه‌های کلیدی

سیال فرو، انتقال حرارت جابجایی اجباری، میدان مغناطیسی، بهبود انتقال حرارت.

### مقدمه

انتقال حرارت همواره یکی از چالش‌های مهم در حوزه مهندسی بوده است. سیستم‌های خنک‌کننده و گرمایشی، یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های کارخانه‌ها و صنایع و هرجایی است که به‌نوعی با انتقال گرما روبه‌رو می‌باشد. در این شرایط استفاده از سیستم‌های پیشرفته و بهینه، کاری اجتناب‌ناپذیر است. بهینه‌سازی سیستم‌های انتقال حرارت موجود، در اکثر مواقع به‌وسیله افزایش سطح آن‌ها صورت

می‌گیرد که همواره باعث افزایش حجم و اندازه این دستگاه‌ها می‌شود. لذا برای غلبه بر این مشکل، به سیستم‌های جدید و مؤثر نیاز است. اغلب سیالات معمول در سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی همانند آب، اتیلن گلیکول، پروپیلن گلیکول، روغن موتور، استون، روغن‌های معدنی و ... در ظرفیت و ویژگی‌های حرارتی دارای محدودیت‌های ذاتی هستند، که موانع متعددی را به‌منظور کاربرد آن‌ها در انتقال حرارت ایجاد می‌کند، ولی یک روش مناسب، استفاده از فرو سیالات برای انتقال گرماست. فرو سیال نوع جدیدی از مخلوط‌های جامد - مایع است که حاوی نانو ذرات فلزی و سیال پایه می‌باشد و همچنین قابل‌ذکر است که نانو سیال دارای ضریب هدایت حرارت بالاتری نسبت به سیال پایه می‌باشد. از طرف دیگر، شناخت جریان فرو سیالات در حضور میدان‌های خارجی و تأثیر میدان‌های خارجی بر نرخ انتقال حرارت فرو سیالات موضوع بحث بسیاری از علوم مهندسی و پزشکی می‌باشد. فرو سیال مایعی است با ذرات بسیار ریز مغناطیسی (عمدتاً به قطر تقریباً ۱۰ نانومتر) به‌صورت کلئیدی پایدار و چسبیده به مولکول‌های مایع حامل (آب یا یک سیال آلی) می‌باشد و این نوع از نانو سیال‌ها، شامل کلئیدهای مواد نانویی مثل: مگنتیت ( $Fe_3O_4$ ،  $Co$ ،  $CoFe_2O_4$ ،  $Fe$  یا  $Fe C$ ) می‌باشند که به‌طور پایدار در یک مایع حامل پراکنده شده‌اند، در نتیجه، این مواد نانو به‌طور همزمان خواص سیال و مغناطیسم را نشان می‌دهند و نوعاً فروسیال از نظر حجمی متشکل است از حدوداً ۵٪ جامدهای مغناطیسی، ۱۰٪ ترساز، و ۸۵٪ حامل. (ترساز باید قابل‌حل در مایع حامل باشد، ترساز با ایجاد جاذبه‌های مولکولی قوی بین خود و مولکول‌های مایع حامل، سیالی یکدست ایجاد کرده و مانع توده شدگی می‌شود این به این معناست که ذرات جامد، حتی تحت تأثیر میدان‌های مغناطیسی بسیار شدید، دچار توده شدگی یا جدایی فاز نمی‌شوند). فرو سیال مایعی است که در حضور یک میدان مغناطیسی به‌شدت قطبیده می‌شود. میدان‌های مغناطیسی یکی از جمله میدان‌های خارجی اعمال شده روی سیالات می‌باشد که به دلیل ویژگی خاص در دهه‌های اخیر مورد توجه بوده است. سیال مغناطیسی مانند یک سیال هوشمند عمل می‌کند و



شکل ۱: خواص فیزیکی بدون بعد نانوسیال برحسب غلظت نانوسیال برای نانوسیال  $Al_2O_3$  - آب [۵].

از این شکل این چنین برمی آید که هدایت حرارتی، گرانی و دانسیته نانوسیالات با افزایش غلظت نانوذرات، افزایش می یابد ولی گرمای ویژه نانوسیالات با افزایش غلظت، کاهش می یابد.

به طور کلی نانوسیالاتی که به هدف افزایش انتقال حرارت استفاده می شوند، در حقیقت سیالات مرکب رقیق شده به همراه نانوذرات با غلظت حجمی به مقدار کمتر از ۵ تا ۱۰ درصد می باشند. به خاطر ویژگی های عالی نانوسیالات، کاربردهای زیادی در افزایش انتقال حرارت، حتی برای مقیاس های در حد میکرومتر پیدا کرده اند. انتظار می رود که نانوسیال تبدیل به گونه جدیدی از سیالات انتقال حرارت در زمینه مهندسی شود [۴]. استفاده از نانوسیالات در زمینه های حرارتی صنایع مختلف، باعث کاهش دغدغه های موجود در این باره می شود. ولی امکان این امر، نیازمند مطالعات اولیه در این مورد است. برای مثال پیغمبرزاده و همکاران [۵]، از نانوسیال  $Al_2O_3$ -آب جهت بررسی میزان افزایش انتقال حرارت در رادیاتور اتومبیل استفاده کردند. آنان افزایش انتقال حرارت به میزان بیش از ۴۵ درصد، در غلظت حجمی ۱٪ از نانوذرات را در کار خود گزارش کرده اند.

همان طور که می دانیم عدد ناسلت یکی از مهم ترین اعداد بدون بعد در بیان مسائل انتقال حرارت و بیان مشابهت ها و تفاوت های حرارتی در جریان سیالات می باشد. عدد ناسلت، شاخص انتقال حرارت می باشد. نانوسیالات نیز از این قاعده مستثنی نیستند. انتظار می رود ضریب انتقال حرارت جابه جایی و عدد ناسلت نانوسیال به یک سری عوامل همچون هدایت و ظرفیت حرارتی هم سیال پایه و هم نانوذرات بستگی داشته باشد. همچنین الگوی جریان، گرانی و نانوسیال، درصد حجمی ذرات معلق، ابعاد و شکل این ذرات در ساختار جریان نیز در این امر مؤثر است. در نتیجه، قالب کلی عدد ناسلت به صورت زیر بیان می گردد [۴، ۶]:

$$Nu_{nf} = f \left( Re, pr, \frac{k_p}{k_f}, \frac{(\rho C_p)_p}{(\rho C_p)_f}, \phi, \text{dimensions and shape of particles} \right) \quad (1)$$

می توان با کنترل خواص این سیال مغناطیسی، رفتار آن را در راستای انتقال گرما نیز کنترل کرد.

ولی سؤالاتی در اینجا مطرح می شود که: اعمال میدان مغناطیسی چه تأثیری بر خواص ترموفیزیکی و حرارتی فرو سیال دارد؟ جهت و زاویه میدان مغناطیسی اعمالی چه تأثیری در روند کار و این کنترل دارد و آیا جهت میدان مغناطیسی اصولاً تأثیرگذار می باشد یا نه؟ تأثیر میدان مغناطیسی روی ضریب هدایت حرارتی و سایر خواص فرو سیال، می تواند امیدوارکننده باشد؟ با وجود همه این تفاسیر، اعمال میدان مغناطیسی برای انتقال حرارت مثبت است یا منفی و یا بدون تأثیر؟ و آیا زانویی انتقال حرارت را افزایش می دهد یا که خیر؟ و ..

### فیزیک نانو سیالات مغناطیسی

خواص و رفتار نانوسیال به پارامترهایی همچون خواص سیال پایه و فاز پراکنده شده، غلظت ذرات، اندازه و شکل ذرات، همچنین به حضور یا عدم حضور سورفکتانت ها بستگی دارد [۱]. همه این موارد، به نحوه پراکندگی نانوذرات درون سیال پایه و پایداری نانوسیال، جهت دستیابی به خواص و مشخصه های فیزیکی واقعی، بستگی دارد [۲].

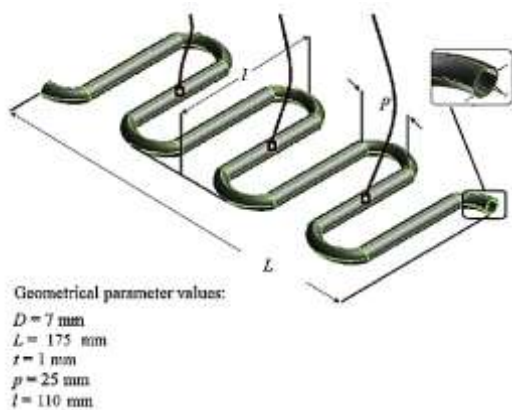
تهیه نانوذرات اولین گام کلیدی در تهیه نانوسیالات جهت تغییر در عملکرد انتقال حرارتی سیالات متداول است. در تهیه نانوسیال بعضی شرایط اساسی مثل جفت شدن ذرات معلق درون سوسپانسیون، دوام سوسپانسیون، کاهش کلوخه شدن ذرات، دچار تغییرات شیمیایی نشدن سیال و ... ضروری است [۳].

در به کارگیری روابط بدون بعد برای نانوسیالات نیاز است که از ویژگی های مناسب حرارتی و انتقالی مربوط به همان نانوسیال استفاده شود. چهار پارامتر اصلی که در محاسبه نرخ انتقال حرارت نانوسیالات مهم اند عبارتند از:

ضریب هدایت حرارتی، گرانی، چگالی و ظرفیت حرارتی، که ممکن است به طور کامل با ویژگی های سیال پایه متفاوت باشند [۴]. لزوم جایگذاری خواص فیزیکی واقعی نانوسیالات در روابط انتقال حرارت، باعث رسیدن به مقادیر صحیح تر از کمیت های انتقال حرارتی و اعداد بی بعد می شود. بسیاری از محققین تلاش کردند تا روابط جامعی برای محاسبه ویژگی های فیزیکی نانوسیالات ارائه دهند. برخی از این روابط صرفاً تئوری، برخی صرفاً تجربی و برخی دیگر ترکیبی از هر دو می باشند. هر کدام از این روابط، تعدادی از عوامل مؤثر بر آن ویژگی را در برمی گیرند و تعدادی را شامل نمی شوند. در اینجا مروری بر برخی از این روابط و یافته های محققین خواهیم داشت، ولی قبل از آن یک تصویر کلی از تأثیر غلظت نانوذرات بر خواص فیزیکی نانوسیالات ارائه می شود. در شکل ۱، خواص فیزیکی بدون بعد نانوسیال (نسبت خاصیت فیزیکی نانوسیال به خاصیت فیزیکی آب خالص)  $Al_2O_3$  - آب برحسب غلظت نانوذرات آورده شده است [۵].

<sup>1</sup> Surfactant

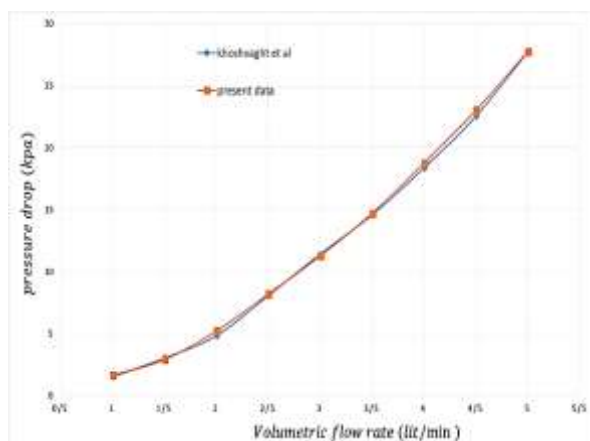
در این پژوهش برای حل عددی انتقال حرارت اجباری سیالات مغناطیسی تحت تأثیر میدان مغناطیسی در جریان آرام از نرم‌افزارهای مهندسی، Gambit 2.4.6 و Fluent 6.3.26 استفاده شده است. **Error! Reference source not found.** مدل ایجاد شده را نشان می‌دهد که در آن جریان نانو سیال مغناطیسی تحت تأثیر میدان مغناطیسی به روش دوفازی تحلیل شده است.



شکل ۲: شماتیک سه‌بعدی هندسه جریان برای لوله مارپیچ.

### نتایج

در اولین گام به بررسی و اعتبار سنجی جریان در لوله صاف در شرایط آب خالص برای مشخص کردن درستی هندسه جریان تولید شده در نرم‌افزار گمبیت و همچنین به بحث و بررسی نتایج برای انتخاب بهترین هندسه جریان نسبت به افزایش انتقال حرارت و در ادامه، حل عددی در شرایط نانو ذرات و جریان مغناطیسی پرداخته می‌شود [۱۱].



شکل ۳: تغییرات افت فشار نسبت به دبی حجمی سیال عبوری آب خالص در این مطالعه در مقایسه با نتایج به‌دست‌آمده دیگر محققین

با توجه به شکل ۳، **Error! Reference source not found.** همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرات افت فشار نسبت به دبی حجمی سیال عبوری در این تحقیق برای آب خالص به‌صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است و نتایج خروجی از حل عددی با نتایج حاصل از تحقیق خوشوقت و علیزاده مورد بررسی و تحلیل برای

نانوسیال در مقایسه با سوسپانسیون‌های حاوی ذرات میکرو و میلی‌متری، بیشتر شبیه یک سیال رفتار می‌کند تا یک مخلوط جامد-مایع. اما نانوسیال ذاتاً یک سیال دوفازی است و برخی از خصوصیات مخلوط جامد-مایع را داراست. تأثیرات عواملی همچون نیروی جاذبه، نیروی برآونی و نیروی اصطکاک بین ذرات جامد و سیال همچنین پدیده‌هایی مثل نفوذ برآونی، ته‌نشینی و پراکندگی ممکن است همزمان در جریان سیال وجود داشته باشد. این بدان معناست که سرعت لغزشی ۲ بین سیال و نانوذرات معلق ممکن است صفر نباشد [۷]. در ابتدا این باور وجود داشت که افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیالات، تنها به دلیل افزایش هدایت حرارتی آنان است. اما تحقیقات بسیاری نشان داد که افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بسیار بیشتر از افزایش در هدایت حرارتی نانوسیال است [۸]. افزایش انتقال حرارتی که نانوسیالات نشان می‌دهند نه تنها ناشی از هدایت حرارتی بالای آن است، بلکه حرکت اتفاقی ۳ و اثر پراکندگی نانوذرات (حرکت برآونی ۴) نیز در آن مؤثر است. پراکندگی ذرات علاوه بر این که نرخ تبادل انرژی در سیال را افزایش می‌دهد، توزیع دمایی را نیز یکنواخت می‌کند و باعث ایجاد یک گرادیان دمایی بین سیال و دیواره ظرف می‌شود. که انتقال حرارت بین دیواره و ظرف را افزایش می‌دهد. این اثر را پراکندگی گرمایی ۵ گویند و در اثر حرکت اتفاقی نانوذرات در جریان سیال اتفاق می‌افتد [۷]. عوامل دیگری مانند مهاجرت ذرات، چرخش ذرات، سرعت لغزشی در مرزها و ... نیز می‌توانند نقشی در این انتقال حرارت داشته باشند [۸، ۹].

### معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان سیال مغناطیسی تحت اثر جاذبه به‌علاوه‌ی یک میدان مغناطیسی خارجی دیگر که خودمان اعمالش می‌کنیم عبارت‌اند از: معادلات ماکسول، معادله‌ی پیوستگی، معادله‌ی مومنوم و معادله‌ی انرژی در قالب تخمین بوزینسک [۱۰]. معادلات ماکسول به‌صورت ساده‌سازی شده برای یک سیال غیرهادی ۶ و بدون جریان جابجایی به این صورت‌اند:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0 \quad (3)$$

که  $B$  القای مغناطیسی و  $H$  بردار میدان مغناطیسی است. علاوه بر این بردار میدان مغناطیسی، القای مغناطیسی و بردار مغناطیسی کنندگی طبق معادله‌ی اساسی زیر باهم در ارتباط هستند:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{M} + \mathbf{H}) \quad (4)$$

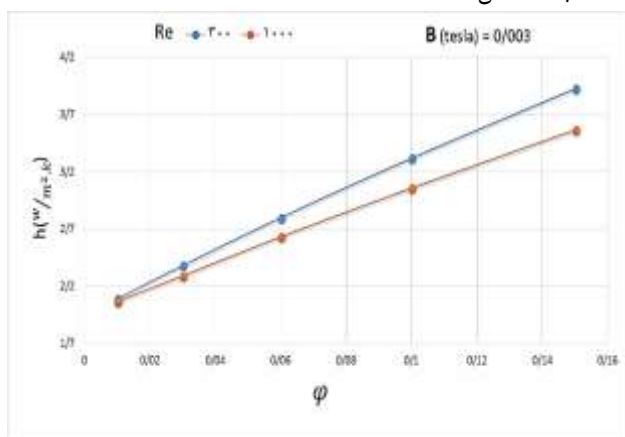
که در آن  $\mu_0$  نفوذپذیری مغناطیسی است.

### روش حل عددی

<sup>2</sup> Slip velocity  
<sup>3</sup> Random motion  
<sup>4</sup> Brownian motion  
<sup>5</sup> Thermal dispersion  
<sup>6</sup> non-conducting

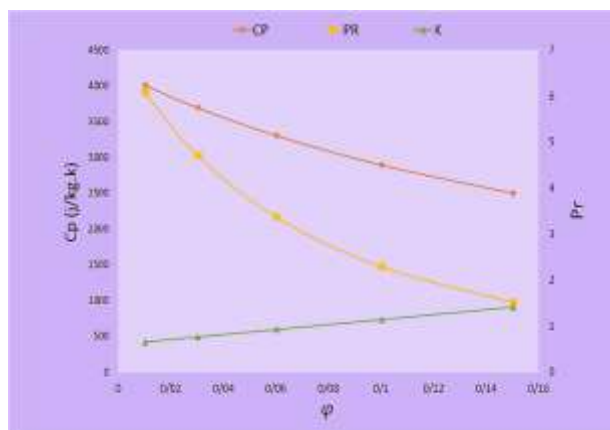
حرارت را داریم و این ضریب با افزایش عدد رینولدز شدت پیدا می‌کند.

با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که مانند حالت نانو ذرات هرچه قدر میزان کسرحجمی نانو ذرات در سیال پایه (آب) اضافه شود میزان ضریب انتقال حرارت افزایش پیدا می‌کند و این در حالی است که هندسه جریان تحت تأثیر میدان مغناطیسی ۳۰ گوس (0.003T) قرار گرفته است و بیشترین ضریب انتقال حرارت زمانی به بیشترین حالت خود می‌رسد که میزان نانو ذرات ( $Fe_3O_4$ ) به بیشترین میزان خود در سیال پایه برسد و هرچه این میزان افزایش پیدا کند ضریب انتقال حرارت نیز افزایش پیدا می‌کند و نیز با افزایش عدد رینولدز که در اینجا ۳۰۰ و ۱۰۰۰ می‌باشد مشاهده می‌شود که ضریب انتقال حرارت در رینولدزهای بیشتر کاهش پیدا کرده است و زمانی ضریب انتقال حرارت ما به بیشترین میزان خود می‌رسد که عدد رینولدز ما کمترین میزان را در هندسه جریان داشته باشد شکل ۷.



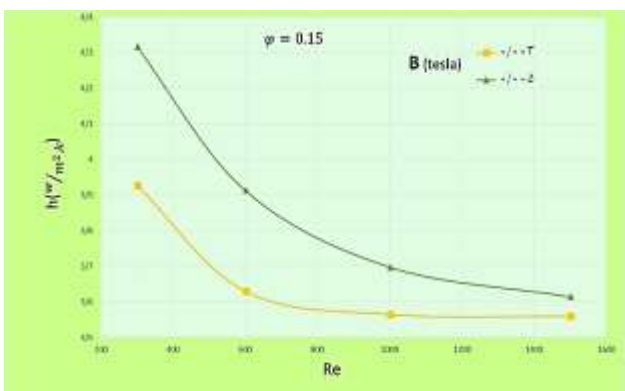
شکل ۶: تغییرات ضریب انتقال حرارت با اعمال جریان مغناطیسی ثابت نسبت به کسر حجمی‌های متفاوت نانو ذره در عدد رینولدز مختلف.

صحت اعتبار سنجی جریان سیال در لوله مارپیچ قرار گرفت و با توجه به شکل و مقایسه دو نتایج می‌توان دریافت نمود که همپوشانی خوبی بین نتایج وجود دارد و اختلافات بسیار ناچیزی بین نتایج این مطالعه و نتایج دیگر مطالعه وجود دارد که می‌توان در کل نتیجه گرفت که هندسه جریان تولیدی و همچنین مدل کردن حل عددی در این پایان‌نامه به صورت صحیح صورت گرفته است و می‌توان ادامه حل را برای هدف اصلی از این تحقیق که حل عددی انتقال حرارت اجباری نانوسیال مغناطیسی تحت تأثیر میدان مغناطیسی می‌باشد را مورد بررسی و تحلیل و به مقایسه روش‌های مختلف پرداخت و بهترین روش برای بهبود انتقال حرارت را مشخص کرد.

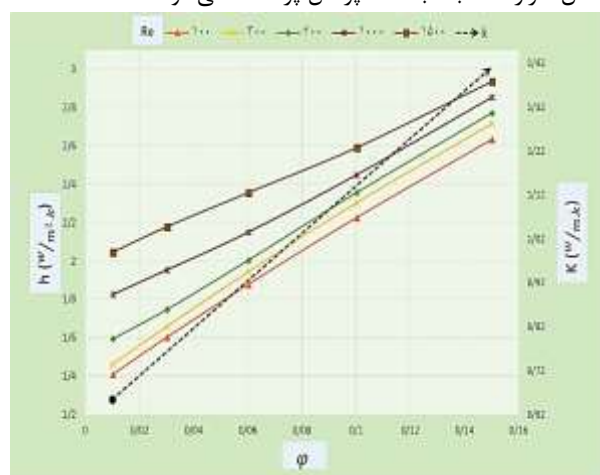


شکل ۴: تغییرات گرمای ویژه، عدد پرانتل و ضریب هدایت گرمایی نسبت به تغییرات کسر حجمی نانو ذرات.

همان‌طور که از شکل ۴ مشاهده می‌شود با افزایش نانو ذره که افزایش  $k$  را در پی دارد باعث کاهش  $C_p$  و عدد  $Pr$  می‌شود و در بیشترین ضریب هدایت حرارتی (بیشترین حجم نانو ذرات) ما کمترین عدد پرانتل و گرمای ویژه را داریم حال به تغییرات ضریب انتقال حرارت نسبت به عدد پرانتل پرداخته می‌شود.



شکل ۷: تغییرات ضریب انتقال حرارت با اعمال جریان مغناطیسی مختلف نسبت به تغییرات عدد رینولدز در کسر حجمی ثابت نانو ذره.



شکل ۵: تغییرات ضریب انتقال حرارت و ضریب هدایت حرارتی نسبت به تغییرات کسر حجمی در رینولدز مختلف.

### نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

با توجه به داده‌های بدست آمده ضریب انتقال حرارت در لوله‌های مارپیچ بیشتر از لوله مستقیم می‌باشد و این ضریب در حالت

و با توجه به شکل ۵ با افزایش کسر حجمی نانو ذرات ( $\phi$ ) افزایش ضریب هدایت گرمایی و در پی آن افزایش ضریب انتقال

### تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود در خصوص حمایت از این پژوهش قدردانی می‌نمایند.

نانوذرات و اعمال میدان مغناطیسی در لوله‌های مارپیچ بیشتر نیز خواهد شد و با افزایش عدد رینولدز در حالت نانوذره افزایش ضریب انتقال حرارت را داریم و در اثر اعمال میدان مغناطیسی کاهش ضریب انتقال حرارت را می‌بینیم به طوری که در کسر حجمی ۰,۰۶ نانوذرات ضریب انتقال حرارت در رینولدز ۳۰۰ ، ۱,۹۴۲ (w / m<sup>2</sup>. k) و در رینولدز ۱۵۰۰ ، ۲,۳۵۵ (w / m<sup>2</sup>. k) می‌باشد که در اثر اعمال جریان مغناطیسی، هرچه بر میزان عدد رینولدز افزوده شود ضریب انتقال حرارت کاهش پیدا می‌کند، در حالت جریان مغناطیسی B=0.005T در عدد رینولدز ۶۰۰ با کسر حجمی ۰,۱۵ نانوذره ضریب انتقال حرارت ۳,۹۱۲ (w / m<sup>2</sup>. k) و در رینولدز ۱۰۰۰ ، ۳,۶۹۷ (w / m<sup>2</sup>. k) می‌رسد

پس از تحلیل و بررسی داده‌های خروجی می‌توان نتیجه کلی گرفت که استفاده از هندسه جریان در لوله‌های مارپیچ از نظر انتقال حرارت بهتر از لوله مستقیم می‌باشد و همچنین با استفاده از نانوذرات در سیال پایه می‌توان این انتقال حرارت را افزایش داد و جریانات مغناطیسی نیز این انتقال را تشدید می‌بخشد و بیشترین میزان انتقال حرارت را در بیشترین کسر حجمی نانوذرات و بیشترین بهبود انتقال حرارت با اعمال جریان مغناطیسی در کمترین عدد رینولدز قابل توجه است.

- Journal of Thermal Sciences, vol. 46, pp. 105-111, 2007.
- [۷] Y. Xuan and Q. Li, "Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids," Journal of Heat Transfer, vol. 125, pp. 151-155, 2003.
- [۸] M .Hojjat, S. G. Etemad, R. Bagheri, and J. Thibault, "Convective heat transfer of non-Newtonian nanofluids through a uniformly heated circular tube," International Journal of Thermal Sciences, vol. 50, pp. 525-531, 2011.
- [۹] M. Lajvardi, J. Moghimi-Rad, I .Hadi, A. Gavili, T. Dallali Isfahani, F. Zabihi, et al., "Experimental investigation for enhanced ferrofluid heat transfer under magnetic field effect," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 322, pp. 3508-3513, 2010.
- [۱۰] T. Streck and H. Jopek" ,Computer simulation of heat transfer through a ferrofluid," physica status solidi (b), vol. 244, pp. 1027-1037, 2007.
- [۱۱] M. Khoshvaght-Aliabadi and A. Alizadeh, "An experimental study of Cu–water nanofluid flow inside serpentine tubes with variable straight-section lengths," Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 61, pp. 1-11, 2015.
- [۱] D. Wen and Y. Ding, "Formulation of nanofluids for natural convective heat transfer applications," International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 26, pp. 855-864, 2005.
- [۲] Y. Hwang, J.-K. Lee, J.-K. Lee, Y.-M. Jeong, S.-i. Cheong, Y.-C. Ahn, et al., "Production and dispersion stability of nanoparticles in nanofluids," Powder Technology, vol. 186, pp. 145-153, 2008.
- [۳] Y. Xuan and Q. Li, "Heat transfer enhancement of nanofluids," International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 21, pp. 58-64, 2۰۰۰.
- [۴] Y. Xuan and W. Roetzel, "Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 43, pp. 3701-3707, 2000.
- [۵] S. M. Peyghambarzadeh, S. H. Hashemabadi, M. S. Jamnani, and S. M. Hoseini, "Improving the cooling performance of automobile radiator with Al2O3/water nanofluid," Applied Thermal Engineering, vol. 31, pp. 1833-1838, 2011.
- [۶] Y. Xuan, Q. Li, and M. Ye, "Investigations of convective heat transfer in ferrofluid microflows using lattice-Boltzmann approach," International