



بررسی تجربی انتقال حرارت جابجایی اجباری و افت فشار فروسیال در لوله U-شکل تحت میدان مغناطیسی متناوب

علی اصلاحچی^۱، محمد حسن نوبختی^{۲*}، محمد بهشاد شفیعی^۳، محمد حسین دیبایی بناب^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۴- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

* محمدحسن نوبختی، آدرس پست الکترونیکی: m.nobakhti@srbiau.ac.ir

چکیده

در این مقاله رفتار هیدرودینامیکی و حرارتی جریان فرو سیال Fe_3O_4 در یک لوله U-شکل افقی مسی به صورت تجربی تحت یک میدان مغناطیسی بر روی یک سطح پرداخته شده است. جریان از طریق یک لوله U-شکل، با شار حرارتی یکنواخت در رینولدز پایین عبور می‌کند. هدف از این تحقیق بررسی تجربی تأثیرگذاری هر یک از پارامترهای درصد حجمی نانو ذرات، تغییرات عدد رینولدز، خم انحنا لوله و تأثیر میدان مغناطیسی ثابت و متناوب بر روی افت فشار و انتقال حرارت جابجایی اجباری در لوله U-شکل بوده است. نتایج نشان داده است بیشترین عامل تأثیرگذار برافت فشار در لوله U-شکل، عامل نسبی انحنا لوله به میزان $72/8\%$ و بیشترین عامل تأثیرگذار برافزایش انتقال حرارت در لوله U-شکل افزایش نسبی عدد رینولدزهای مورد آزمایش، به میزان 44% نسبت به سایر عوامل دیگر بوده است. لذا با معرفی شاخص عملکرد η ، بیشترین شاخص عملکرد، جهت کنترل هم‌زمان افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی و افت فشار در بهترین شرایط مورد آزمایش، مقدار $2/31$ گزارش شده است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۵ فروردین ۱۳۹۹

پذیرش: ۳۱ مرداد ۱۳۹۹

ارائه در سایت: ۳۱ مرداد ۱۳۹۹

کلیدواژگان

افت فشار

انتقال حرارت

میدان مغناطیسی

لوله U-شکل

فرو سیال

Experimental evaluation of forced convective heat transfer and pressure drop of ferrofluid in a U-shaped tube under variable magnetic field

Ali Eslahchi¹, Mohammad Hassan Nobakhti^{2,*}, Mohammad Behshad Shafii³, Mohammad Hosein Dibaei Bonab⁴

1- Department of mechanical engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Department of mechanical engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

4- Department of mechanical engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran

* P.O.B. 14515/775 Tehran, Iran, m.nobakhti@srbiau.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received 13 April 2020

Accepted 21 August 2020

Available Online 21

ABSTRACT

In this paper, the hydrodynamic and thermal behavior of Fe_3O_4 ferrofluid flow is experimentally investigated in a horizontal U-shaped copper tube under a magnetic field on a surface. The flow passes through a U-shaped tube, with a uniform heat flux in the lower Reynolds. The aim of this study

Please cite this article using:

Ali Eslahchi, Mohammad Hassan Nobakhti, Mohammad Behshad Shafii, Mohammad Hosein Dibaei Bonab, Experimental evaluation of forced convective heat transfer and pressure drop of ferrofluid in a U-shaped tube under variable magnetic field, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 11, No. 2, pp 23-35, 2020 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

August 2020

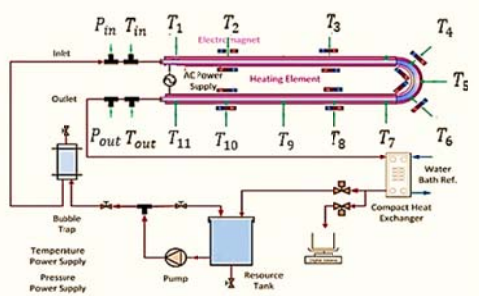
Keywordspressure drop
heat transfer
Magnetic field
U-shaped tube
ferrofluid

was to experimentally investigate the effect of each of the parameters of nanoparticle volume percentage, Reynolds number changes, tube curvature bending and the effect of constant and alternating magnetic field on pressure drop and forced convection heat transfer in U-shaped tube. The results show that the most effective factor on pressure drop in U-shaped tube, was the curvature of the pipe to about 72.8% and the most effective factor on increasing heat transfer in U-shaped tube, was the relative increase in the tested Reynolds numbers to about 144% compared to other factors. Therefore, with the introduction of performance index η , the highest performance index to simultaneously control the increase in heat transfer coefficient and pressure drop in the best tested conditions, is reported to be 2.31.

۱-مقدمه

متوسط ۲۰ نانومتر و کسر حجمی حداکثر ۰/۲٪ در یک لوله دما ثابت پرداخته‌اند و دریافته‌اند که افت فشار و نرخ انتقال حرارت نانو سیال بسیار بیشتر از سیال پایه است. عدد رینولدز در همه آزمایش‌ها کوچک‌تر از ۳۵۰۰۰ بوده است. آن‌ها از یک مانومتر جیوه‌ای با عدم قطعی ۰/۰۵ سانتیمتر جیوه برای اندازه‌گیری افت فشار استفاده نموده‌اند. پالانیسمی و همکاران [۱۲] به صورت تجربی به بررسی تأثیر نانو سیال آب/نانولوله کربنی در یک لوله مارپیچ مخروطی شکل پرداخته است. نتایج نشان داده است که با افزایش در صد نانو سیال، افت فشار و ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می‌یابد. آبا و همکاران [۱۳] در یک کار تجربی در یک لوله مستقیم به بررسی اثر فرکانس بر روی نانو سیال Fe_3O_4 پرداخته است نتایج نشان داده است که اعمال فرکانس بالاتر از ۱۰۰ هرتز تا ۱۰۰۰ هرتز تأثیر مشخصی بر روی عدد ناسلت داشته است. احمد پور و همکاران [۱۴] در یک کار تجربی به بررسی تأثیر نانو ذرات لوله کربنی در یک مخلوط روغن در یک لوله U-شکل پرداخته‌اند. نتایج نشان داده است با افزایش ۰/۳ درصد نانو ذرات لوله کربنی به سیال پایه منجر به افزایش انتقال حرارت به میزان ۶۸/۲ درصد شده است. فرنام و همکاران [۱۵] در یک کار تجربی به بررسی تأثیر نوار پیچ‌خورده در لوله U-شکل نسبت به لوله مستقیم پرداخته‌اند. نتایج نشان داده است که ضریب انتقال حرارت و افت فشار نسبت به لوله مستقیم افزایش یافته است. یو و همکاران [۱۶] در یک کار تجربی به بررسی پارامترهایی مانند قطر لوله و دبی جرمی در یک لوله خمیده بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی در سوخت مایع پرداخته‌اند. نتایج نشان داده است ضریب انتقال حرارت با کاهش قطر لوله و افزایش دبی حجمی افزایش می‌یابد. فو و همکاران [۱۷] به بررسی تجربی تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی در یک سوخت هیدروکربنی در

انتقال حرارت و افت فشار همواره یکی از چالش‌های مهم در حوزه مهندسی بوده است. تغییر در خواص انتقال حرارت سیالات پایه به شکل نانو سیال، تغییر شکل هندسی مسیرهای جریان سیال و استفاده از میدان‌های مغناطیسی یکی از روش‌های غلبه بر این چالش است که در دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است. لذا روش‌های زیادی برای افزایش بهبود انتقال حرارت پیشنهاد شده است. ولی افت فشار همواره مسئله‌ای بحث‌انگیز در این زمینه مطرح بوده است. از این رو رشد سریع مقالات و مطالعات مرتبط با این زمینه نشانگر اهمیت و کارایی بالای سیالات نانو در بهبود خواص انتقال حرارت سیالات می‌باشد [۱]. در این زمینه تلاش‌های بسیاری جهت افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی و کنترل افت فشار در نانو سیالات به شکل‌های مختلف انجام شده است. محققان در بررسی‌های خود بیان کردند خواص و رفتار نانو سیال به پارامترهایی همچون خواص سیال پایه و فاز پراکنده شده، غلظت ذرات، اندازه شکل ذرات، همچنین به حضور یا عدم حضور سورفکتانت‌ها بستگی دارد [۲-۴]. همچنین محققین دیگری وابستگی هدایت حرارتی را به اندازه ذرات، دما و غلظت آن بیان کردند [۵-۸]. کارگر شریف آباد و فلسفی [۹] به بررسی عددی انتقال حرارت جابجایی داخلی سیال مغناطیسی تحت میدان مغناطیسی منقطع و فرکانس‌های زمانی متفاوت پرداخته‌اند. نتایج نشان داده است در اعداد رینولدز مختلف اثر میدان مغناطیسی در اعداد رینولدز کم و فرکانس‌های بزرگتر، بیشتر بوده است. دیبایی و کارگر شریف آباد [۱۰] در یک بررسی تجربی بر روی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانو سیال Fe_3O_4 تحت میدان مغناطیسی بیان کردند که در فرکانس‌های بالا، افزایش فرکانس منجر به افزایش جزئی ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌شود. فتوکیان و نصر اصفهانی [۱۱] به بررسی انتقال حرارت و افت فشار نانو سیال آب-اکسید آلومینیم با قطر



شکل ۱. فیزیک جریان سیال داخل لوله U-شکل تحت شار حرارتی در نرم افزار کنترلی متصل به دستگاه

سیستم آزمایشگاهی از یک منبع ذخیره سیال، پمپ، سیستم لوله‌ها شامل خط اصلی و بایپس‌ها، قسمت تست سیال، سیستم خنک‌کننده و اجزای اندازه‌گیری (دبی و حرارت) تشکیل شده است. از یک گرم‌کن برای رسیدن به شار ثابت در شرط مرزی مسئله استفاده می‌شود. منبع ۶ لیتری برای جمع‌آوری سیال و مخزن در نظر گرفته شده است. همچنین برای رسیدن سیال به یک دمای ثابت در مقطع ورودی قسمت تست، از یک مبدل حرارتی استفاده شده است. برای تنظیم دبی باید از شیر سوزنی تعبیه شده در مسیر اصلی و لوله بایپس و شیرهای دوراهه استفاده نمود. در پایان چرخه می‌توان از یک شیر دوراهه که به یک مخزن دیگر منتهی می‌شود به عنوان ابزاری برای اندازه‌گیری دبی جریان استفاده نمود. برای رسیدن به شار ثابت در جداره لوله از المنت حرارتی استفاده شده است. این المنت توان ایجاد حرارت ۶۰ وات بر متر را دارد که با تغییر در ولتاژ ورودی می‌توان میزان شار حرارتی را کنترل نمود. ورودی و خروجی قسمت تست می‌بایست با بوش‌های پلاستیکی عایق کاری کرد تا اتلاف گرما در راستای محوری از بین برود و محیط خارجی لوله را نیز باید به خوبی عایق‌بندی کرد. برای اندازه‌گیری ثبت فشار و دما، از دو سنسور فشار، ۱۱ ترموکوپل نوع k، ۲ ترموکوپل نوع PT100 (بالک سیال) و از یک یو اس بی کارت (NA 6009) استفاده شده است دما و فشار توسط سیگنال‌های مقاومتی اهمی توسط سنسورها به یک دستگاه مبدل ارسال می‌گردد و از آنجا به یو اس بی کارت و نرم‌افزار لب ویو^۱ متصل به سیستم آزمایش، جهت آنالیز ارسال می‌شود. توسط این برنامه مقدار دماها و فشارها را در هر میلی‌ثانیه دلخواه می‌توان کنترل نمود. برای دستیابی به حالت پایدار در سیستم، سیال خروجی از قسمت تست که تحت

لوله U-شکل پرداخته‌اند. نتایج نشان داده است به علت نیروی گریز از مرکز در بخش خم لوله یک جریان اختلاط در محل خم، تقویت شده که آن باعث افزایش ضریب انتقال حرارت به میزان ۴۰٪ نسبت به لوله مستقیم گردیده است. کومر و همکاران [۱۸] در یک کار تجربی با استفاده از روش تاگوچی با هشت متغیر ورودی به بهینه‌سازی میزان انتقال حرارت سیال آب در یک مکانیزم دو لوله‌ای U-شکل پرداخته‌اند. نتایج نشان داده است که در حالت بهینه میزان انتقال حرارت می‌تواند از میزان ۱۱/۱۱٪ به مقدار ۸۶/۴۲٪ افزایش یابد. مطالعات تجربی در مورد عوامل تأثیرگذار بر قسمت‌های مختلف لوله U-شکل در روند افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی و افت فشار به‌طور کامل تاکنون انجام نشده و نیاز به مطالعه بیشتر دارد. هدف اصلی این تحقیق مطالعه تجربی انتقال حرارت جابجایی اجباری و افت فشار فرو سیال و شناسایی عوامل مؤثر (درصد حجمی نانو سیال، عدد رینولدز، خم انحنا لوله، میدان مغناطیسی ثابت و نوسانی) بر این رفتار پیچیده در قسمت‌های مختلف لوله U-شکل و ایجاد شرایط قیاس برای دو عامل انتقال حرارت و افت فشار با معرفی پارامتر سومی به نام شاخص عملکرد می‌باشد.

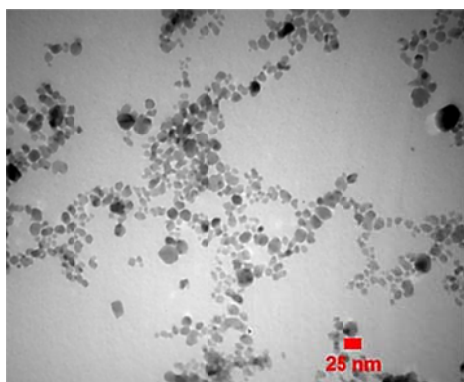
۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- ساختمان دستگاه

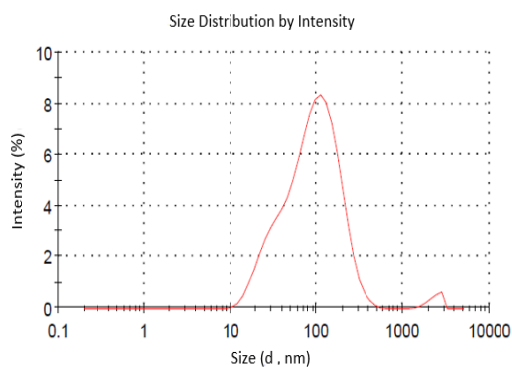
هندسه لوله مسی U-شکل که به صورت افقی قرار داده شده، در شکل (۱) نشان داده شده است که شامل جریان با شرط مرزی شار حرارتی ثابت در جداره می‌باشد. قطر داخلی لوله ۷/۶ میلی‌متر و قطر خارجی ۹/۶ میلی‌متر و طول آن ۱۷۱۲ میلی‌متر بوده، که تحت شار یکنواخت W/m^2 ۱۲۹۱ قرار گرفته است. که در نهایت تحلیلی در جهت افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی و افت فشار در خم لوله‌های مورد نظر، برای درصدهای حجمی و رینولدزهای مختلف تحت میدان مغناطیسی صورت پذیرفته است.

¹ Lab view

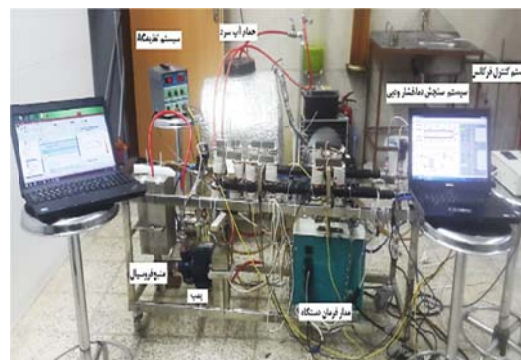
تأثیر شار حرارتی ثابت قرار گرفته است، می‌بایست گرمای جذب شده را به نحوی دفع نماید. بدین منظور پس از خروج سیال از لوله مسی، این سیال وارد یک مبدل حرارتی پوسته لوله‌ای می‌شود که مبرد آن توسط یک حمام آب سرد تأمین می‌شود. برای ایجاد میدان مغناطیسی مناسب در اطراف لوله از دوازده عدد هسته‌ی فریت استفاده گردیده است. هسته‌ها می‌بایست از نظر اندازه به گونه‌ای انتخاب می‌گردید که با ضخامت لوله تست متناسب باشد. برای ایجاد شار مغناطیسی مناسب از ۲۰۰۰ دور سیم مسی با پوشش لاک ۵ به قطر ۰/۵ میلی‌متر استفاده شده است. طراحی این دستگاه به گونه‌ای است که در آن از یک ترانسفورماتور و یک مدار الکترونیکی استفاده شده است که قابلیت تغییرات فرکانس را از ۰ تا ۹۹ هرتز، ولتاژ را از ۰ تا ۱۰۰۰ ولت و توانایی ایجاد حداکثر میدان مغناطیسی ۱۰۰۰ گوس را در هر آهنربا دارد. میدان‌های مغناطیسی ذکر شده توسط یک دستگاه گاوسمتر (HT201 gauss meter) اندازه‌گیری شده است. برای از بین بردن اغتشاشاتی که از طرف میدان مغناطیسی متناوب بر روی ترموکوپل ایجاد می‌شود از سپر مغناطیسی استفاده شده است در نتیجه مشکلات تداخل امواج مغناطیسی برای خواندن دما از ترموکوپل‌ها حل شده است. شکل (۲) نمایی از این دستگاه را نشان می‌دهد.



شکل ۳ آزمایش TEM فرو سیال تهیه شده



شکل ۴ شدت توزیع ابعاد ذرات سیال فرو تهیه شده توسط آزمایش DLS



شکل ۲ نمایی از دستگاه آزمایشگاهی

۲-۲- تهیه نانو سیال

ذرات مغناطیسی مورد استفاده در این تحقیق توسط روش هم رسوبی سنتز شده‌اند. برای جلوگیری از واکنش نانو ذرات Fe_3O_4 با اکسیژن، تولید آن هم‌زمان با فرایند گاز زدایی با استفاده از گاز N_2 انجام می‌شود. برای تهیه هیدروکسید سدیم مورد نیاز، ۲۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر، با ۱۵ گرم هیدروکسید سدیم جامد حل شده است. یک محلول از ۵/۲ گرم $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ ۲ گرم

۳-۲- اعتبار سنجی سیستم آنالیز و پردازش داده‌ها

برای تجزیه و تحلیل انتقال حرارت و افت فشار، ضریب انتقال حرارت جابجایی (h) و مقادیر نشان داده شده در سنسورهای فشار با داده‌های تجربی به شرح زیر محاسبه شده است. در ابتدا به منظور کسب اطمینان از ثابت بودن شار حرارتی اعمال شده به جداره لوله، شار حرارتی در آزمایش با آب دی یونیزه با استفاده از اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی و طبق رابطه (۱) محاسبه شده است.

$$q'' = \frac{\rho_{bf} \dot{m} C_{p,bf} (T_{out} - T_{in})}{\pi d_{out} L} \quad (1)$$

که ρ_{bf} چگالی آب، \dot{m} دبی حجمی آب، $C_{p,bf}$ گرمای ویژه آب، T_{in} دمای آب ورودی به لوله، T_{out} دمای آب خروجی از لوله، d_{out} قطر خارجی لوله و L طول لوله است. سپس، شار حرارتی اعمال شده توسط منبع تغذیه نیز از رابطه (۲) اندازه‌گیری و محاسبه شده است.

$$q'' = \frac{q}{\pi d_{out} L} = \frac{VI}{\pi d_{out} L} \quad (2)$$

که V و I ولتاژ و جریان تولیدی توسط منبع تغذیه می‌باشند که در طول آزمایش ثابت نگه‌داشته می‌شوند. مقایسه این دو مقدار شار حرارتی در دبی ۱۰ لیتر بر ساعت نشان داد که شار حرارتی محاسبه شده توسط رابطه (۲) حدود ۸ درصد کمتر از شار حرارتی حاصل از رابطه (۱) است. بنابراین نتیجه می‌توان گرفت که حرارت اعمال شده به لوله با دقت خوبی از نوع شار ثابت می‌باشد. به راحتی مشاهده می‌شود که ناسلت را می‌توان از روابط (۳) و (۴) به دست آورد:

$$q'' = h(T_s - T_m) \quad (3)$$

شار ثابت است که از روابط قبل قابل محاسبه است. در این رابطه T_s دمای دیواره خوانده شده توسط ترموکوپل و T_m از رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$T_m(x) = T_{in} + \frac{q'' \pi d_{out}}{\dot{m} C_p} x \quad (4)$$

در این رابطه \dot{m} برابر دبی است که به صورت دلخواه می‌توان در بازه‌ی مختلف آن را تغییر داد، x فاصله ترموکوپل از مقطع

ورودی، T_{in} دمای خوانده شده توسط ترموکوپل ورودی می‌باشد. در نهایت ناسلت طبق رابطه (۵) قابل محاسبه است.

$$Nu = \frac{h d_{in}}{k} \quad (5)$$

در این رابطه d_{in} قطر داخلی لوله و k ضریب هدایت حرارتی سیال در دمای مربوطه است. به منظور بررسی صحت و دقت دستگاه آزمایش، قبل انجام آزمایشات روی نانو سیالات و لوله U-شکل آب دی یونیزه به عنوان سیال پایه در داخل لوله مستقیم مورد استفاده قرار گرفته، اعتبار سنجی این سیستم با مقایسه عدد ناسلت حاصل از رابطه (۶) با پیش بینی معادله شاه در مورد جریان آب غیر یونیزه در اعداد رینولدز مختلف صورت می‌گیرد. معادله شاه به پیش بینی رفتار انتقال حرارت جابجایی جریان سیال داخلی می‌پردازد و تاکنون مبنای اعتبار سنجی بسیاری از مطالعات تجربی صورت گرفته است. این معادله به صورت رابطه (۶) است.

$$Nu = \left\{ 1.953 \left(RePr \frac{D}{x} \right)^{\frac{1}{3}} \right\} \quad RePr \geq 33.3 \quad (6)$$

اعداد رینولدز و پرانتل نیز طبق روابط (۷) و (۸) محاسبه می‌شوند:

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi d_{in} \mu} \quad (7)$$

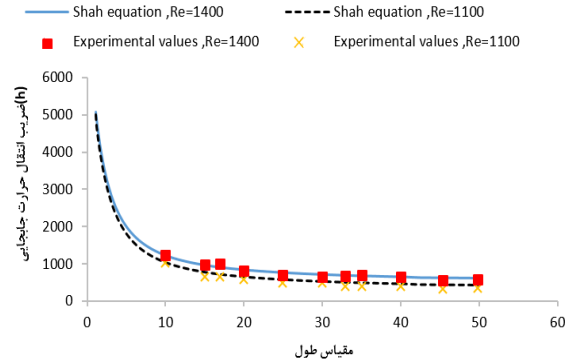
$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (8)$$

که μ ویسکوزیته سیال است. لازم به ذکر است که در تحقیق حاضر، اعداد رینولدز و پرانتل برحسب خواص سیال در دمای ورودی به لوله محاسبه شده‌اند. مقایسه عدد ناسلت حاصل از رابطه (۶) با پیش‌بینی معادله شاه در مورد جریان آب در دو عدد رینولدز در شکل (۵) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج دارای انطباق خوبی است.

آزمایش‌ها به بررسی عوامل مؤثر بر روی افت فشار و ضریب انتقال حرارت جابجایی توسط دو سنسور فشار که قبل و بعد از لوله U-شکل و سه سنسور نمادین T_2, T_6, T_8 که به ترتیب در سه قسمت لوله مستقیم ورودی نانو سیال قبل از انحنا، قسمت انحنا و لوله مستقیم خروجی نانو سیال بعد از انحنا در لوله U-شکل قرار داده شده‌اند، اندازه‌گیری می‌شود. در این پژوهش، ذرات مغناطیسی Fe_3O_4 در سیال پایه آب با سه غلظت ۱٪، ۵٪ و ۲۰٪ حجمی، در رینولدزهای مختلف در شعاع‌های خم $10\text{ cm}, 15\text{ cm}, 20\text{ cm}$ تحت میدان مغناطیسی، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. که تحلیل نتایج به دست آمده، در این بخش ارائه گردیده است.

۳-۱- تأثیر افزودن نانو سیال برافت فشار جریان سیال تحت میدان مغناطیسی متناوب

شکل (۶) به مقایسه افت فشار در نسبت‌های حجمی ۱٪، ۵٪ و ۲۰٪ نسبت به سیال پایه آب در دبی ثابت در اعداد رینولدز مختلف برای شعاع خم 10 cm پرداخته است. افزودن نانو سیال به سیال پایه که تحت میدان مغناطیسی نوسانی 800 Gauss با فرکانس 50 Hz قرار گرفته است منجر به افزایش افت فشار شده است و این روند افزایشی برای نانو سیالات با درصدهای حجمی بالاتر ادامه پیدا می‌کند، به طوری که بیشترین میزان افت فشار برای جریان نانو سیال ۲ درصد حجمی حاصل شده است. از طرفی به تدریج با افزایش عدد رینولدز، اختلاف بین مقادیر افت فشار جریان در داخل لوله U-شکل بیشتر می‌شود. این امر به این دلیل است که در اعداد رینولدز بالاتر، میزان حرکت اغتشاشی نانو سیالات در داخل سیال پایه افزایش می‌یابد. در نهایت بیشترین درصد افزایش افت فشار برای جریان نانو سیال ۲ درصد حجمی در شار حرارتی ثابت $\frac{1291\text{ W}}{m^2}$ و عدد رینولدز 1984 ، برابر با $7/12\text{ KPa}$ حاصل شده است.



شکل ۵ مقایسه مقادیر ضریب انتقال حرارت جابجایی آب مقطر با معادله شاه

همچنین افت فشار آب دی یونیزه نیز به کمک رابطه (۹) بدست می‌آید:

$$\Delta P = \frac{32\mu Lv}{d_{in}^2} \quad (9)$$

که در آن v سرعت سیال داخل لوله می باشد که به میزان $\pm 2\%$ با مقادیر اندازه گیری توسط سنسورهای فشار در مقیاس پاسکال اختلاف داشته که نشان دهنده دقت کالیبراسیون و مقادیر اندازه گیری شده توسط سنسورهای فشار در سیستم آزمایشگاهی می باشد. از طرفی در یک میدان مغناطیسی، B القای مغناطیسی است و فرکانس میدان مغناطیسی به صورت زیر تعریف می‌شود:

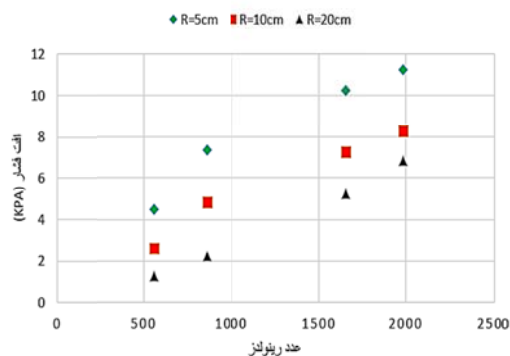
$$F = \frac{1}{T} \quad (10)$$

که در آن T زمان قطع و وصل میدان مغناطیسی متناوب است. همچنین برای اطمینان از عدم تأثیرگذاری میدان مغناطیسی بر روی ترموکوپل‌ها و سنسورهای فشار، آزمایشات در حضور میدان مغناطیسی تکرار شده و مشاهده شد که دما و فشار ثبت شده توسط ترموکوپل‌ها و سنسورهای فشار در حالت حضور و عدم حضور میدان مغناطیسی یکسان هستند و می‌توان نتیجه گرفت که میدان مغناطیسی بر روی ترموکوپل‌ها تأثیری ندارند.

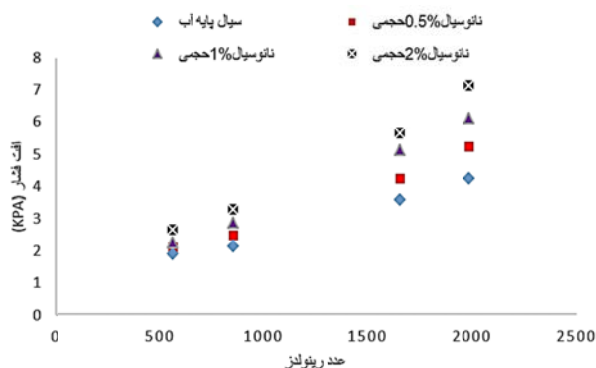
۳- نتایج و بحث

۳-۳- تأثیر شعاع لوله U-شکل برافزایش افت فشار تحت میدان مغناطیسی متناوب

تغییرات افت فشار در جریان نانو سیال ۲ درصد حجمی تحت میدان مغناطیسی متناوب ۸۰۰ گوس با فرکانس ۵۰ هرتز برای سه خم لوله به شعاع‌های انحناء ۵، ۱۰ و ۲۰ سانتیمتر در شکل (۸) نمایش داده شده است. همانطور که مشهود است، استفاده از لوله U-شکل با شعاع کوچکتر منجر به افزایش افت فشار خواهد شد. همچنین از شکل (۹) و جدول (۱) می‌توان روند نسبت افت فشار را بدین صورت تحلیل نمود که در هر محدوده‌ی عدد رینولدز، درصد نسبی افت فشار لوله‌ای که خم انحنای آن نسبت به خم انحنای لوله به شعاع ۲۰ سانتیمتر کمتر باشد، افت فشار آن بیشتر می‌باشد، درحالی‌که شیب افت فشار این نسبت، با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد. دلیل این امر زمان تشکیل گردابه‌ها و جریان برگشتی است که برای لوله‌ها با شعاع کمتر در اعداد رینولدز پایین‌تر اتفاق می‌افتد. از طرفی نیروی گریز از مرکز ایجاد شده در لوله U-شکل منجر به ایجاد جریان ثانویه شده که سبب می‌شود پروفیل‌های سرعت شدیداً تحت تأثیر قرار گرفته و نقطه ماکزیمم این پروفیل‌ها به سمت دیواره بیرونی رانده می‌شوند لذا افزایش تغییرات پروفیل سرعت در نزدیکی دیواره لوله U-شکل، افزایش تنش برشی را به همراه خواهد داشت که این امر باعث افزایش افت فشار جریان در داخل لوله U-شکل می‌شود. لذا پیش‌بینی می‌گردد، هر چه شعاع خم لوله کوچک‌تر باشد پدیده جریان ثانویه در مسیر حرکت جلوتر اتفاق می‌افتد که سبب می‌شود که در شعاع‌های خم کمتر افت فشار بیشتری مشاهده گردد.



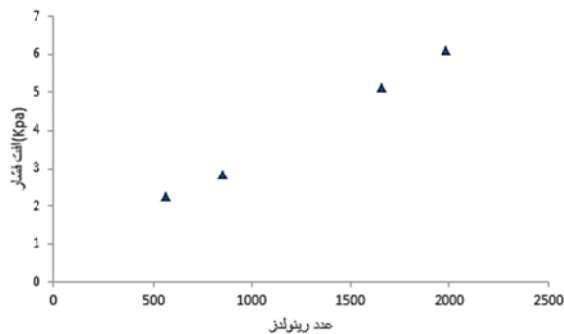
شکل ۸ مقایسه تغییرات افت فشار نانو سیال ۲٪ حجمی در خم لوله‌های مختلف در رینولدزهای مختلف تحت میدان مغناطیسی



شکل ۶ مقایسه تغییرات افت فشار نانو سیال در اعداد رینولدز مختلف برای درصدهای حجمی متفاوت تحت میدان مغناطیسی متناوب

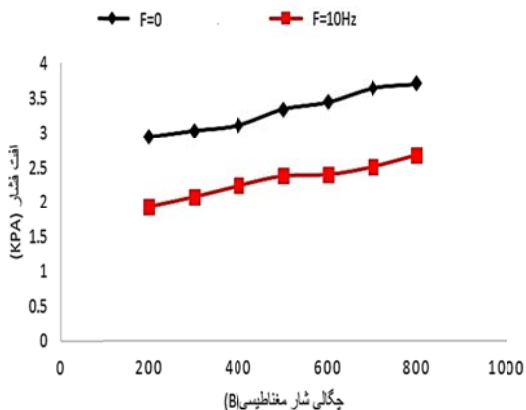
۳-۲- تأثیر عدد رینولدز بر تغییرات فشار جریان تحت میدان مغناطیسی متناوب

همان‌طور که در شکل (۷) دیده می‌شود در یک شار حرارتی ثابت $\frac{w}{m^2}$ ۱۲۹۱ و میدان مغناطیسی نوسانی ۸۰۰ گوس با فرکانس ۵۰ هرتز، برای خم انحنای ۱۰ cm با افزایش عدد رینولدز افت فشار افزایش می‌یابد، درواقع میزان افت نانو سیال ۱٪ حجمی از مقدار ۲/۲۵ کیلو پاسکال در رینولدز ۵۵۹ به مقدار ۶/۱۲ کیلو پاسکال در رینولدز ۱۹۸۴ تغییر می‌کند. درواقع با افزایش عدد رینولدز، دبی جریان و در نتیجه سرعت جریان افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه میزان افت فشار جریان سیال به شدت تابع سرعت جریان می‌باشد، افزایش افت فشار ناشی از افزایش عدد رینولدز بدیهی به نظر می‌رسد. به منظور بررسی دقیق‌تر، میزان افت فشار نانو سیال ۱٪ حجمی در شار حرارتی ثابت $\frac{w}{m^2}$ ۱۲۹۱ در رینولدزهای مختلف در شکل (۸) آمده است.

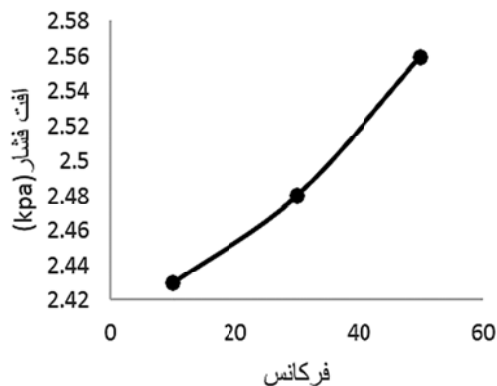


شکل ۷ نتایج تجربی افت فشار در رینولدزهای مختلف نانو سیال ۱٪ حجمی تحت میدان مغناطیسی متناوب

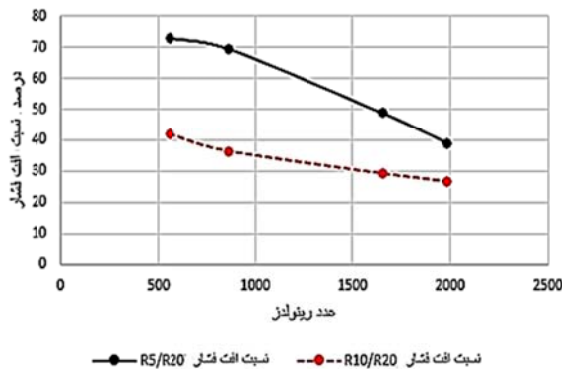
است مابین فرکانس‌های مختلف در چگالی شار مغناطیسی ۸۰۰ گوس در رینولدز ۵۹۹ که مطابق جدول (۲) تغییرات افت فشار در فرکانس‌های مختلف بسیار ناچیز می‌باشد، به طوری که بیشترین افت فشار مابین فرکانس ۵۰ هرتز و ۱۰ هرتز در حدود ۵٪ می‌باشد.



شکل ۱۰ مقایسه تغییرات افت فشار نانو سیال ۲٪ حجمی در شعاع خم ۱۰ سانتیمتر و رینولدز ۵۹۹ تحت میدان مغناطیسی نوسانی و ثابت



شکل ۱۱ مقایسه‌ای است مابین فرکانس‌های مختلف در چگالی شار مغناطیسی ۸۰۰ گوس در رینولدز ۵۹۹



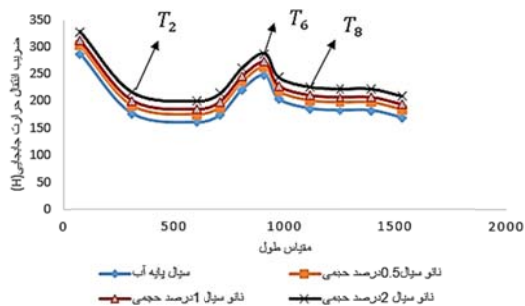
شکل ۹ نسبت افت فشار خم انحناء تحت میدان مغناطیسی

جدول ۱ درصد نسبت افت فشار خم انحناء به شعاع‌های ۱۰ سانتیمتر نسبت به خم انحناء به شعاع ۲۰ سانتیمتر

خم انحنای لوله	افت فشار در عدد رینولدز
	۱۹۸۴ ۱۶۵۰ ۸۵۶ ۵۵۹
$\frac{R_{5cm}}{R_{20cm}}$	۳۹/۱٪ ۴۸/۷٪ ۶۹/۳٪ ۷۲/۸٪
$\frac{R_{10cm}}{R_{20cm}}$	۲۶/۶٪ ۲۹/۲٪ ۳۶/۴٪ ۴۱/۹٪

۳-۴- تأثیر میدان مغناطیسی بر تغییرات افت فشار

شکل (۱۰) تغییرات افت فشار را در چگالی شار مغناطیسی مختلف برای نانو سیال ۲ درصد حجمی Fe_3O_4 در رینولدز ۵۹۹ در دو حالت میدان ثابت و میدان مغناطیسی نوسانی نشان داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افت فشار میدان مغناطیسی ثابت، ۲۰ الی ۳۰ درصد بیشتر از افت فشار میدان مغناطیسی نوسانی در چگالی شار مغناطیسی‌های مختلف می‌باشد. اعمال میدان مغناطیسی منجر به افزایش ویسکوزیته سیال شده و مانع جریان سیال می‌شود. همچنین میدان مغناطیسی ثابت افت فشار ثابتی را القا می‌کند که این افت فشار جریان سیال را به تعویق می‌اندازد. با اعمال میدان مغناطیسی نوسانی بر خوردگی بین ذرات مغناطیسی و فعل و انفعالات بین ذرات و سیال و همچنین ذرات و سطح لوله افزایش می‌یابد از این‌رو می‌توان بیان نمود که افت فشار میدان مغناطیسی نوسانی کمتر از افت فشار میدان مغناطیسی ثابت است. همچنین شکل (۱۱) مقایسه‌ای



شکل ۱۲ مقایسه تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی تجربی برای جریان نانو سیال در لوله U شکل با شعاع انحناء ۱۰ سانتیمتر و رینولدز ۸۵۶

جدول ۳ تأثیرگذاری درصد نانو سیال در نواحی مختلف لوله U شکل با شعاع انحناء ۱۰ سانتیمتر و رینولدز ۸۵۶

درصد حجمی نانوسیال			درصد افزایش (h) نسبت
۲٪	۱٪	۰/۵٪	به سیال پایه
۹/۱۲٪	۸/۴٪	۴/۸٪	در سنسور دمایی T_2
۱۳/۸٪	۹/۱٪	۵/۷٪	در سنسور دمایی T_6
۱۳/۲٪	۸/۸٪	۵/۲٪	در سنسور دمایی T_8

۳-۶- تأثیر افزایش عدد رینولدز بر ضریب انتقال حرارت جابجایی تحت میدان مغناطیسی متناوب

همان طور که در شکل (۱۳) مشاهده می شود، با افزایش عدد رینولدز نرخ جریان عبوری از مجاورت دیواره ها بیشتر شده که این موضوع سبب افزایش انتقال حرارت از دیواره ها شده است که دلیل اصلی آن می تواند افزایش حرکت بروانی و میل بیشتر ذرات به تغییر مکان در سرعت های بالا باشد. افزایش عدد رینولدز باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی در قسمت انحناء، بیشتر از سایر قسمت های لوله گردیده است و آن به علت به وجود آمدن جریان ثانویه در قسمت انحناء می باشد از طرفی با افزایش عدد رینولدز پدیده جریان ثانویه جلوتر اتفاق می افتد لذا همان طور که در نمودارها مشاهده می شود با افزایش عدد رینولدز قله ی نمودار در مقیاس طول کمتری نسبت به ابتدای لوله پدید می آید. تا جایی که در رینولدز ۱۹۸۴ این افزایش در فاصله ۸۰۰ mm از ابتدای لوله به وجود آمده است ولی در رینولدزهای ۵۵۹ و ۸۵۶ به ترتیب در

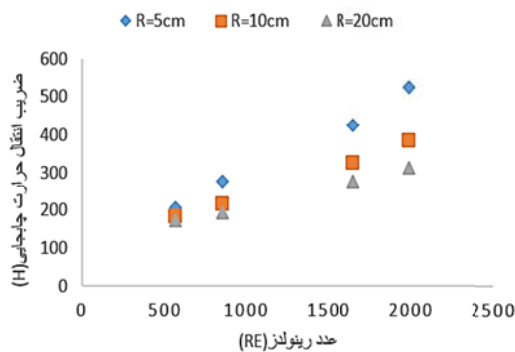
جدول ۲ افت فشار در فرکانس های مختلف در چگالی شار مغناطیسی ۸۰۰ گوس در رینولدز ۵۹۹

افت فشار kpa	فرکانس هرتز
۲/۴۳	۱۰
۲/۴۸	۳۰
۲/۵۶	۵۰

۳-۵- بررسی تأثیر استفاده از فرو سیال Fe_3O_4 بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی تحت میدان مغناطیسی متناوب

در شکل (۱۲) و جدول (۳) به مقایسه درصد تأثیرگذاری ضریب انتقال حرارت جابجایی فرو سیال Fe_3O_4 تحت میدان مغناطیسی نوسانی ۸۰۰ گوس با فرکانس ۵۰ هرتز در نسبت های حجمی ۰/۵٪، ۱٪ و ۲٪ نسبت به سیال پایه آب در دبی ثابت برای نقاط مورد آزمایش (T_2, T_6, T_8) در لوله U-شکل به شعاع خم ۱۰ سانتیمتر، برای عدد رینولدز ۸۵۶ پرداخته شده است. همان طور که مشخص است بیشترین افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی در خم انحنای لوله در سنسور T_6 به ازای درصد حجمی ۲٪ به میزان ۱۳/۸٪ می باشد. اضافه کردن نانو ذرات به سیال ساختار جریان را تغییر می دهد و در کنار این موضوع، هدایت حرارتی را که دلیل آن ماهیت فلزی ذرات با ضریب هدایت حرارتی قابل ملاحظه بوده را افزایش می دهد و حرکت نامنظم نانو ذرات و توزیع و نوسان آنها در سیال افزایش می یابد، در واقع با زیادتر شدن کسر حجمی و افزایش لزجت نانوسیال، اثر اصطکاک و نیروی ویسکوز بیشتر شده و سبب کاهش نرخ جریان عبوری در گردش نزدیک دیواره ها به ویژه در محل های خم لوله می شود. که نتیجه آن کاهش دمای سطح لوله و افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی در سیال بوده است.

فاصله‌های ۹۲۰mm و ۹۶۴mm از ابتدای لوله اتفاق افتاده است. و در نهایت می‌توان عنوان نمود که مطابق جدول (۴) بیشترین درصد افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی در این قیاس در بین سه سنسور دمایی مربوط به عدد رینولدز ۱۹۸۴ نسبت به عدد رینولدز ۵۵۹ در نقطه T_6 در قسمت انحنای لوله به میزان ۱۴۴٪ بوده است.



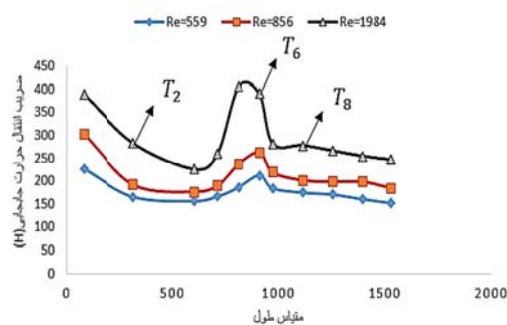
شکل ۱۴ مقایسه تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی در وسط زانویی لوله U-شکل در شعاع‌های خم مختلف تحت میدان مغناطیسی

جدول ۵ مقایسه نسبت درصد تأثیر افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی در وسط زانویی لوله U-شکل برای شعاع‌های خم مختلف تحت میدان مغناطیسی

شعاع انحنای لوله	عدد رینولدز			
	۵۵۹	۸۵۶	۱۶۵۰	۱۹۸۴
$\frac{R_{5cm}}{R_{10cm}}$	۱۱/۸٪	۱۴/۵٪	۱۷/۵۶٪	۲۶/۷٪
$\frac{R_{5cm}}{R_{20cm}}$	۱۴/۶٪	۱۸/۰۵٪	۲۵/۳٪	۳۴/۸٪

شکل ۱۳ مقایسه تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی با عدد رینولدز برای جریان نانو سیال ۲ درصد حجمی

جدول ۴ تأثیر افزایش عدد رینولدز بر ضریب انتقال حرارت جابجایی در لوله U-شکل تحت میدان مغناطیسی متناوب



جدول ۴ تأثیر افزایش عدد رینولدز بر ضریب انتقال حرارت جابجایی در لوله U-شکل تحت میدان مغناطیسی متناوب

نسبت درصد افزایش (h)	در سنسور دمایی		
	T_8	T_6	T_2
$\frac{Re_{856}}{Re_{559}}$	٪۱۵	٪۲۷	٪۱۱
$\frac{Re_{1984}}{Re_{559}}$	٪۵۹	٪۱۴۴	٪۴۴

همان‌طور که در شکل (۱۴) نشان داده شده است در صد افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی به ازای شار حرارتی ثابت $1291 \frac{W}{m^2}$ و تحت میدان مغناطیسی نوسانی ۸۰۰ گوس با فرکانس ۵۰ هرتز برای شعاع خم ۵ سانتیمتر نسبت به شعاع‌های خم ۱۰ و ۲۰ سانتیمتر در رینولدزهای مختلف بیشتر است که این امر نشان‌دهنده این است که با کاهش شعاع انحنا ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می‌یابد. با کاهش شعاع انحنا در طول ثابت لوله، افت دما در سطح لوله افزایش پیدا کرده و آن به سبب نیروی گریز از مرکز بر جریان و ایجاد پدیده جدیدی به نام جریان ثانویه به ازای انحنای لوله هست. همچنین مطابق جدول (۴) که به مقایسه نسبت درصد افزایش ضریب انتقال

۸-۳- تأثیر افزایش فرکانس در میدان مغناطیسی نوسانی و اعمال میدان مغناطیسی ثابت بر ضریب انتقال حرارت جابجایی

با اعمال میدان مغناطیسی نوسانی، برخوردهای بین ذرات مغناطیسی و فعل‌وانفعالات بین ذرات و سیال و همچنین ذرات و سطح لوله افزایش می‌یابد و فرایند انتقال حرارت بهبود می‌یابد. از طرفی اعمال میدان مغناطیسی ثابت منجر به افزایش ویسکوزیته سیال شده و مانع جریان سیال می‌شود. این پدیده حرکت سیال را کند می‌کند و موجب کاهش انتقال حرارت جابجایی می‌شود. در شکل (۱۵) اثر تغییرات فرکانس بر افزایش

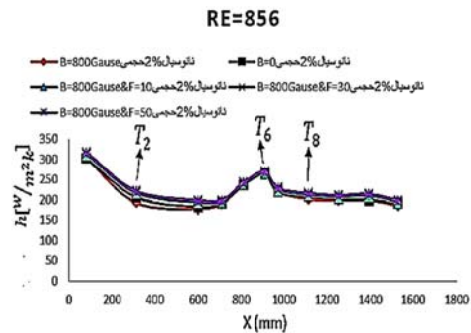
۳-۹- ارزیابی عملکرد استفاده از نانو سیال از نظر افزایش همزمان انتقال حرارت و افت فشار

به دلیل اینکه ضریب انتقال حرارت و افت فشار با وجود تأثیرگذاری بر روی یکدیگر دو عامل مستقل از هم بوده که توسط رابطه‌های خاص به یکدیگر مرتبط نمی‌شوند، مقایسه دو حالت مختلف امکان‌پذیر نیست. بنابراین باید عامل سومی را در نظر گرفت که با هر دو رابطه داشته باشد و بتواند شرایط قیاس برای این دو عامل را فراهم آورد. این عامل سوم را می‌توان شاخص عملکرد تعریف کرد. شاخص عملکرد را می‌توان از تقسیم نسبت ضریب انتقال حرارت جابجایی نانو سیال به سیال پایه $\left(\frac{h_{nf}}{h_{bf}}\right)$ ، به نسبت افت فشار نانو سیال به سیال پایه $\left(\frac{\Delta p_{nf}}{\Delta p_{bf}}\right)$ محاسبه کرد. بنابراین شاخص عملکرد η از رابطه (۱۱) قابل محاسبه است.

$$\eta = \frac{\left(\frac{h_{nf}}{h_{bf}}\right)}{\left(\frac{\Delta p_{nf}}{\Delta p_{bf}}\right)} = \frac{R_h}{R_{\Delta p}} \quad (11)$$

که R_h نسبت ضریب انتقال حرارت نانو سیال به سیال پایه و $R_{\Delta p}$ نسبت افت فشار نانو سیال به سیال پایه می‌باشد. در صورتی که بر اساس رابطه (۱۱) شاخص عملکرد بزرگ‌تر از یک باشد، استفاده از نانو سیال مورد نظر کاملاً مقرون به صرفه است. به منظور بررسی همزمان استفاده از نانو سیال، لوله U-شکل و میدان مغناطیسی، با توجه به بهترین عملکرد هر کدام از عوامل تأثیرگذار در شرایط آزمایشگاهی استفاده از لوله U-شکل به شعاع خم ۵ سانتیمتر، درصد حجمی نانو سیال ۲٪ حجمی و میدان مغناطیسی ۸۰۰ گوس تحت فرکانس ۵۰ هرتز مورد آزمایش قرار گرفت. شکل (۱۶) تغییرات شاخص عملکرد در شرایط ذکر شده و تحت شار حرارتی ثابت $\frac{W}{m^2}$ ۱۲۹۱ بر حسب عدد رینولدز را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، در شار حرارتی $\frac{W}{m^2}$ ۱۲۹۱، بیشترین شاخص عملکرد برای جریان نانو سیال ۲ درصد حجمی و میدان مغناطیسی نوسانی ۸۰۰ گوس تحت فرکانس ۵۰ هرتز برابر ۲/۳۱ در رینولدز ۱۹۷۱ رخ داده است. نتیجه دیگری که از این شکل قابل حصول می‌باشد این است که روند خاصی از شاخص عملکرد با تغییر رینولدز دیده می‌شود. در این شکل در اعداد

انتقال حرارت جابجایی در قسمت مستقیم ابتدای لوله U-شکل (محل قرارگیری سنسور T_2) که هنوز اثرات جریان پیچشی در قسمت انحنا بر آن تأثیر زیادی نگذاشته است، بیشتر مشهود است. زیرا شانس بیشتر ذرات مغناطیسی برای جذب شدن و جابجایی و اختلال اغتشاش لایه مرزی حرارتی در سرعت‌های پایین و عدم حضور جریان پیچشی وجود دارد. با ایجاد جریان پیچشی و افزایش سرعت، بخصوص در قسمت خم لوله در محدوده فاصله ۸۰۰ الی ۱۰۰۰ میلی‌متر از ابتدای لوله (محل قرارگیری سنسور T_6) فرایند جذب ذرات سخت‌تر می‌شود و تأثیرگذاری فرکانس بر بهبود انتقال حرارت به صفر می‌رسد. از فاصله بعد از حدود ۱۰۰۰ میلی‌متر تا انتها، اثرگذاری میدان مغناطیسی و فرکانس به واسطه تأثیرگذاری آثار جریان‌های ثانویه در این قسمت (محل قرارگیری سنسور T_8) کاهش پیدا کرده است. در نهایت پیش‌بینی می‌گردد همان‌طور که در جدول (۶) نشان داده شده است تغییر فرکانس نوسانی تأثیر ناچیزی بر انتقال حرارت جابجایی نسبت به حالت بدون میدان مغناطیسی در قسمت‌های مختلف لوله U-شکل برای رینولدز ۸۵۶ داشته است.



شکل ۱۵ مقایسه تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی در حضور میدان مغناطیسی نوسانی

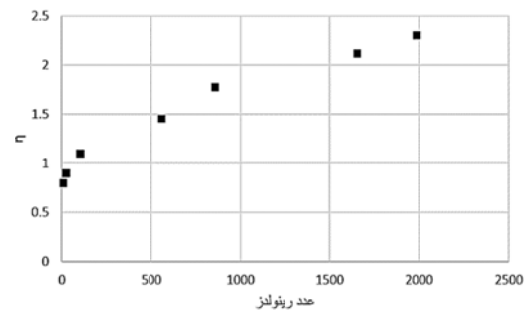
جدول ۶ تأثیرگذاری درصد افزایش (h) میدان مغناطیسی نوسانی در فرکانس‌های مختلف نسبت به حالت بدون میدان مغناطیسی

فرکانس (هرتز)	سنسورهای دمایی		
	T_8	T_6	T_2
۱۰	۱/۴٪	۰٪	۴/۶٪
۳۰	۱/۷٪	۰٪	۴/۸۶٪
۵۰	۱/۹۵٪	۰٪	۴/۹۵٪

سطح لوله افزایش می‌یابد و فرایند انتقال حرارت بهبود می‌یابد. از طرفی اعمال میدان مغناطیسی ثابت منجر به افزایش ویسکوزیته سیال شده و مانع جریان سیال می‌شود که در نهایت باعث افزایش افت فشار می‌گردد.

● روند خاصی از شاخص عملکرد (η) با تغییر رینولدز دیده می‌شود. به طوری که در اعداد رینولدز بسیار پایین شاخص عملکرد کمتر و با افزایش رینولدز شاخص عملکرد افزایش می‌یابد.

رینولدز بسیار پایین شاخص عملکرد کمتر و با افزایش عدد رینولدز شاخص عملکرد افزایش می‌یابد.



شکل ۱۶ تغییرات شاخص عملکرد بر حسب عدد رینولدز

۵- مراجع

[1] Choi S.U., *Enhancement thermal conductivity of fluids with nanoparticles*, 1995.

[2] Wen D., and Ding D., formulation of Nano fluids for natural convective heat transfer applications, *international journal of heat and fluid flow*, vol.26, pp.855-864, 2005.

[3] Anoop K., Sundararajan T., and Das S.D., Effect of particle size on the convective heat transfer in nanofluid in the developing region., *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, pp. 2189-2195, 2009.

[4] Sundar LS., Singh MK., Sousa AC.. Investigation of thermal conductivity and viscosity of Fe3O4 nanofluid for heat transfer applications. *International communications in heat and mass transfer*, Vol. 44, No.1, pp. 7-14, 2013.

[5] Kumar DH., Patel HE., Kumar VR., Sundararajan T., Pradeep T., Das SK., Model for heat conduction in nanofluids. *Physical Review Letters*, Vol. 93, No.14:144301, 2004.

[6] Einstein A., Eine neue bestimmung der molekul dimensioen; *Annalen Der physic*, vol.324, pp.289-306, 1906.

[7] Brink man H., the viscosity of concentrated suspensions and solutions. *The journal of chemical physics*, vol.20, pp, 571-571, 2004.

[8] Heyhat- MM., Know sary f., Rashidi AM., Momen Pourmu., Amrollahi A., Experimental investigation of laminar convective heat transfer and pressure drop of water- based Al2O3 Nano fluids in fully developed flow regime. *Exptherm fluid Sci*, Vol. 44, pp. 483-486, 2012.

[9] H. Kargarsharifabad, M. Falsafi, Numerical modeling of internal convection heat transfer of magnetic fluid in the pulse magnetic field and different time frequencies, *Modares Mechanical Engineering* Vol. 15, No. 6 pp. 91-98, 2015 (in Persian)

[10] Dibaei, Mohammadhosein, and Hadi Kargarsharifabad. "New achievements in Fe3O4 nanofluid fully developed

۴- نتایج

در این قسمت نتایج آزمایش‌های مربوط به انتقال حرارت و افت فشار برای لوله U-شکل در شار حرارتی ثابت در رینولدزها، خم انحناها، درصد‌های نانو سیال و میدان‌های مغناطیسی مختلف ارائه شده است، که در مجموع نتایج زیر به دست آمده است:

● افزودن نانو سیال Fe_3O_4 به سیال پایه منجر به افزایش افت فشار و افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌گردد.

● میزان افزایش افت فشار ناشی از استفاده از لوله U-شکل در شرایط یکسان آزمایشگاهی با شعاع کوچک‌تر بیشتر از استفاده از نانو سیال با غلظت بالاتر است.

● استفاده از لوله U-شکل با شعاع کوچک‌تر به طور قابل توجهی باعث افزایش افت فشار و افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی شده است. در شرایط آزمایشگاهی بیشترین عامل تأثیرگذار برافت فشار از بین عوامل تأثیرگذار نسبت شعاع خم انحنا ۵ سانتیمتر به ۲۰ سانتیمتر در رینولدز ۵۵۹ به میزان حداکثر ۷۲/۸٪ گزارش می‌شود.

● افزایش عدد رینولدز میزان افت فشار جریان و ضریب انتقال حرارت جابجایی را افزایش می‌دهد. در نهایت افزایش نسبی عدد رینولدزهای مورد آزمایش به میزان ۱۴۴٪ بیشترین تأثیرگذاری را نسبت به سایر عوامل بر روی افزایش ضریب انتقال حرارت داشته است.

● با اعمال میدان مغناطیسی نوسانی برخوردهای بین ذرات مغناطیسی و فعل و انفعالات بین ذرات و سیال و همچنین ذرات و

condensation of HC-R600a based nano-refrigerant inside a horizontal U-shaped tube. *International Journal of Thermal Sciences*;146:106110,2019.

[15] Farnam M., Khoshvaght-Aliabadi M., Asadollahzadeh M.J. Heat transfer intensification of agitated U-tube heat exchanger using twisted-tube and twisted-tape as passive techniques. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, Vol. 133, No.1, pp. 137-147,2018.

[16] Yu J., Jiang Y., Cai W., Li F., Forced convective condensation flow and heat transfer characteristics of hydrocarbon mixtures refrigerant in helically coiled tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 124, No.1, pp. 646-654,2018.

[17] Fu Y., Wen J., Tao Z., Xu G., Huang H., Experimental research on convective heat transfer of supercritical hydrocarbon fuel flowing through U-turn tubes. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 116, No.1, pp. 43-55,2017.

[18] Kumar S., Murugesan K., Optimization of geothermal interaction of a double U-tube borehole heat exchanger for space heating and cooling applications using Taguchi method and utility concept. *Geothermics*, 83:101723,2020

forced convection heat transfer under the effect of a magnetic field: An experimental study." *Journal of Heat and Mass Transfer Research* 4.1 (2017): 1-11.

[11] S.M. Fotukian; M. Nasr Esfahany, "Experimental investigation of turbulent convective heat transfer of dilute Al₂O₃/water nanofluid inside a circular tube", *Int. J. Heat Fluid Flow*, No. 31, pp. 606– 612, 2010.

[12] Palanisamy K., Kumar PM., Experimental investigation on convective heat transfer and pressure drop of cone helically coiled tube heat exchanger using carbon nanotubes/water nanofluids. *Heliyon* , Vol. 5, No.5, :e01705,2019.

[13] Abadeh A., Sardarabadi M., Abedi M., Pourramezan M., Passandideh-Fard M., Maghrebi M.J., Experimental characterization of magnetic field effects on heat transfer coefficient and pressure drop for a ferrofluid flow in a circular tube. *Journal of Molecular Liquids*,299:112206,2020.

[14] Ahmadpour MM., Akhavan-Behabadi MA., Experimental investigation of heat transfer during flow