

ISME2019-XXXX

بررسی آزمایشگاهی بهبود انتقال حرارت نانوسیال مغناطیسی تحت تاثیر میدان مغناطیسی یکنواخت

در لوله مارپیچ

مجید محمدی^۱، محمد امیر قاسمیان مقدم^۲، ابازر آباده^۳، محمد پسندیده فرد^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک / mohammadi.ma@mail.um.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک / ghasemianmoghammad@mail.um.ac.ir

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک / abazar.abadeh@mail.um.ac.ir

^۴ استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک / mpfard@um.ac.ir

چکیده

در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی تاثیر استفاده از نانوسیال مغناطیسی تحت تاثیر میدان مغناطیسی ثابت بر عدد ناسلت نانوسیال مغناطیسی ۱ در صد جرمی Fe_3O_4 در یک لوله مارپیچ با دمای ثابت دیواره در اعداد رینولدز مختلف پرداخته شده است. بستر این بررسی آزمایشگاهی شامل سیم پیچ مارپیچ شکل، مبدل حرارتی، مخزن، پمپ، فلومتر، ترموکوپل و سیستم کنترل دما می‌باشد.

در این بررسی ابتدا تاثیر افزایش دبی جرمی (کاهش قطر) بر ضریب متوسط انتقال حرارت همرفت بررسی شده است؛ مشاهده شده است که افزایش دبی جرمی باعث افزایش ضریب متوسط انتقال حرارت همرفت می‌شود.

در این بررسی آزمایشگاهی، افزایش متوسط عدد ناسلت تقریباً ۷ درصدی با اعمال میدان مغناطیسی ثابت 600 G مشاهده شده است. با حفظ عدد رینولدز و اعمال میدان مغناطیسی ثابت قوی‌تر 900 G، عدد ناسلت متوسط بیشتری مشاهده شده است. در این پژوهش نتیجه گرفته شده است که وجود میدان مغناطیسی باعث بهبود انتقال حرارت می‌شود و می‌تواند حدود متوسط عدد ناسلت را تا ۱۰٪ افزایش دهد.

واژه های کلیدی

نانوسیال مغناطیسی، میدان مغناطیسی، بهبود انتقال حرارت مقدمه

امروزه اغلب صنایع از روش‌های مختلف صرفه‌جویی انرژی در جهت کاهش هزینه‌ها استفاده می‌کنند. تلاش‌هایی در جهت بهبود انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی و کاهش زمان انتقال حرارت انجام شده است. حوزه‌های مختلف مهندسی چون مهندسی شیمی، مهندسی محیط زیست، صنایع غذایی، بازیابی حرارت، تهویه مطبوع و تبرید از مبدل‌های حرارتی استفاده می‌کنند [1]. به خاطر کاربرد صنعتی فراوان مبدل‌های حرارتی، این حوزه برای پژوهشگران از جذابیت زیادی برخوردار است.

دو روش بصورت کلی برای بهبود انتقال حرارت وجود دارد: روش فعال^۱ و غیر فعال^۲. روش‌های فعال با وجود بازده بالا، بطور قابل ملاحظه‌ای نیز هزینه‌بر هستند. میکس مکانیکی، ارتعاشات مکانیکی و اعمال میدان مغناطیسی از جمله این روش‌ها هستند. بر خلاف روش‌های فعال، روش‌های غیر فعال هرچند بازده کمتری دارند، اما از نظر هزینه مناسبتر هستند. تغییر خواص سیال، تبدیل جریان از جریان لایه‌ای به آشوبناک و ایجاد تغییر در هندسه آزمایش از پراستفاده‌ترین روش‌های غیر فعال به شمار می‌روند [1, 2].

یکی از روش‌های پر بازده افزایش انتقال حرارت غیر فعال، تغییر هندسه‌ی سیستم است [3]. قبلاً در کاربردهای صنعتی نشان داده شده است که استفاده از لوله‌های مارپیچ بخاطر اثر نیروهای جانب از مرکز باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود [4,5]. مانالاز و چرچیل^۳ [6] قبلاً تاثیر نسبت تابیدگی را در لوله‌های مارپیچ برای جریان آرام بررسی کرده‌اند. چپونچولینی و سانتینی^۴ [7] مقدار افت فشار جریان آرام و آشافته را در لوله‌های مارپیچ مختلف بررسی کرده‌اند. هرچند که اثر نسبت انحنای قابل ملاحظه بوده است، اما اثر نسبت تابیدگی قابل چشم‌پوشی گزارش شده است. یکی دیگر از روش‌های غیرفعال برای افزایش انتقال حرارت، افزودن ذرات نانو به سیال و تغییر خواص ترموفیزیکی آن است [8]. پژوهش‌های متعددی در این زمینه برای هندسه‌های مختلف انجام شده است.

یکی از روش‌های افزایش انتقال حرارت فعال، اعمال میدان مغناطیسی ثابت یا متغیر بر جریان‌های خاص سیال است. اعمال میدان مغناطیسی بر نانوسیال مغناطیسی باعث تغییر در خواص ترموفیزیکی آن می‌شود. جاویلی و همکاران^۵ [9] رسانش حرارتی نانو سیال مغناطیسی را تحت تاثیر میدان مغناطیسی بررسی کرده و افزایش حداکثری ۲۰۰ درصدی را برای این خاصیت گزارش کرده‌اند. ساندر و همکاران^۶ [10] بررسی آزمایشگاهی درباره انتقال حرارت از طریق همرفت اجباری نانوسیال مغناطیسی Fe_3O_4 در یک لوله

⁴ Cioncolini and Santini

⁵ Gavili et al.

⁶ Sundar et al.

¹ Active

² Passive

³ Manlapaz and Churchill

۲ ترموکوپل RTD PT 100 با دقت 0.1°C برای اندازه‌گیری دمای ورودی و خروجی در مسیر جریان قرار گرفته است. با استفاده از کنترلر PID دمای آزمایش در دمای 40°C ثابت نگه داشته شده است. نانوسیال مغناطیسی توسط یک پمپ سانتریفیوژی با عبور از فلومتر کالیبره شده، از مخزن پمپ می‌شود. نرخ حجمی سیال در محدوده‌ی ۱۰ الی ۶۰ لیتر بر ثانیه تنظیم شده است. آب خنک از مخزن دمای ثابت دیگری تهیه می‌شود.

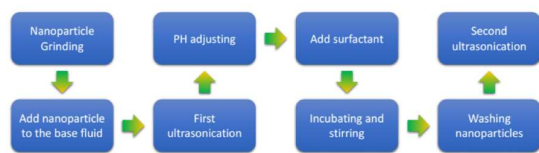
جدول ۱ - مشخصات لوله‌ها

شماره لوله	قطر لوله (mm) D	طول لوله (cm) L	گام (mm) p	δ	τ
1	95	200	30	0.068	0.100
2	135	200	30	0.048	0.070
3	170	200	30	0.038	0.056
4	220	200	30	0.030	0.043
5	135	200	20	0.048	0.047
6	135	200	40	0.048	0.093

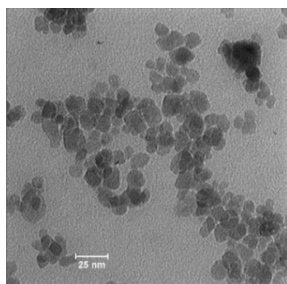
یک میدان مغناطیسی ثابت توسط ۴ آهنربای دائمی نئودیمیومی که در بالا و پایین لوله تعبیه شده است، ایجاد شد.

آماده‌سازی نانوسیال:

در این آزمایش، تمام مواد شیمیایی مورد استفاده بدون انجام عملیات‌های ثانویه رو آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. تمام محلول‌ها توسط آب ۲ بار تقطیر شده آماده شده‌اند. اسید سیتریک تهیه شده از شرکت Merck بعنوان ماده فعال سطحی استفاده شده است و نانوذرات Fe_3O_4 با خلوص ۹۸٪ و اندازه‌ی ۲۰ الی ۳۰ نانومتری از شرکت US research nanomaterials استفاده شده‌اند. تصویر ۲ بصورت شماتیک نحوه‌ی آماده‌سازی نانوسیال را نشان می‌دهد. شکل ۳ تصویر TEM (میکروسکوپ الکترونی عبوری) نانوذرات را نمایش می‌دهد.



تصویر ۲ - شکل شماتیک نحوه آماده‌سازی نانوسیال

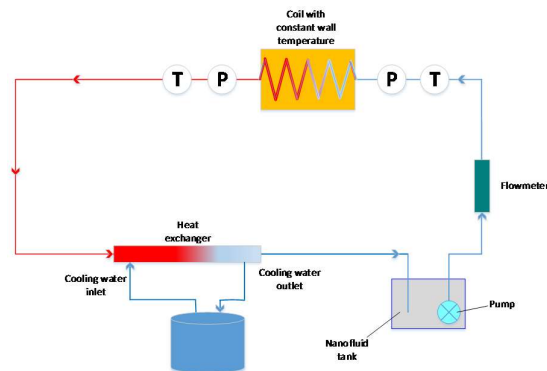


صاف انجام داده‌اند. غفرانی و همکاران^۷ [11] نیز بصورت تجربی به بررسی انتقال حرارت از طریق همرفت اجباری برای نانوسیال مغناطیسی تحت تاثیر میدان مغناطیسی متغیر پرداخته‌اند. آن‌ها بهبود انتقال حرارت از طریق همرفت را در حضور میدان مغناطیسی گزارش کرده‌اند. عزیزیان و همکاران^۸ [12] اثر میدان مغناطیسی را بر انتقال حرارت از طریق همرفت را برای نانوسیال Fe_3O_4 بررسی کرده‌اند. آنها افزایش حداکثری ۳۰۰ درصدی ضریب انتقال حرارت محلی نانوسیال را گزارش کرده‌اند. گوهرخواه و همکاران^۹ [13] بصورت تجربی به بررسی خواص انتقال حرارتی و هیدرودینامیکی نانوسیال مغناطیسی تحت اثر میدان مغناطیسی متغیر در لوله مستقیم پرداخته‌اند. آن‌ها متوجه شده‌اند که در عدد رینولدز ثابت، یک میدان مغناطیسی قوی‌تر باعث انتقال حرارت بیشتر می‌شود.

همانطور که از مرور انجام شده مشخص است، بهبود انتقال حرارت از طریق استفاده از روش‌های فعال و غیرفعال بصورت همزمان کمتر مورد توجه محققان بوده است. در این پژوهش، ترکیبی از روش‌های فعال و غیرفعال برای بهبود انتقال حرارت استفاده شده است. دو روش غیرفعال تغییر هندسه و استفاده از نانوسیال مغناطیسی و یک روش فعال استفاده از میدان مغناطیسی، روش‌های مورد استفاده‌ی این پژوهش هستند.

بستر آزمایشگاهی

تصویر ۱، شکلی شماتیک از بستر آزمایشگاهی مورد استفاده است. ابعاد محفظه‌ی مکعبی که لوله مارپیچ درون آن قرار گرفته است، ۲۵ در ۳۵ در ۳۰ سانتی‌متر است و از بیرون عایق شده است. محفظه به سیستم کنترل دمایی که توانایی ایجاد دمای یکنواخت برای دیواره‌ی لوله‌ی مارپیچ از دمای اتاق تا حدود 70°C را دارد، مجهز شده است. لوله‌های مارپیچ از لوله‌های مستقیم مسی با ۲ متر طول، ۶.۵mm قطر داخلی، ۰.۷mm ضخامت و رسانندگی گرمایی ۳۸۵ W/mK ساخته شده است؛ مقاومت حرارتی ضخامت لوله‌ها قابل چشم‌پوشی است. در جدول شماره ۱ مشخصات لوله‌های مختلف مورد استفاده در این آزمایش، گزارش شده است.



تصویر ۱ - شکل شماتیک بستر آزمایشگاهی

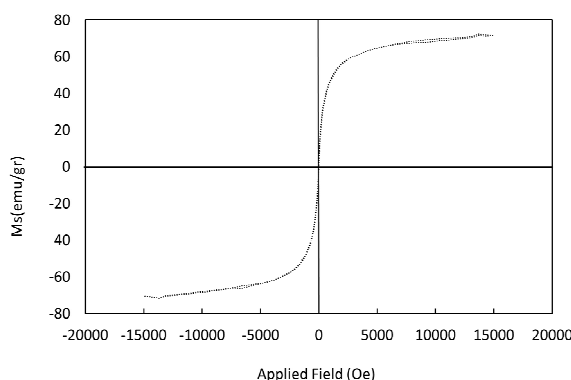
⁹ Goharkhah et al.

⁷ Ghofrani et al.

⁸ Azizian et al.

تصویر ۳- شکل TEM نانوذرات

خاصیت مغناطیسی یکی دیگر از پارامترهای مهم یک نانوسیال مغناطیسی است. از یک دستگاه VSM در دمای اتاق برای تعیین خواص مغناطیسی نانوسیال مغناطیسی آماده شده، استفاده شده است. شکل ۴ نمایانگر رفتار مغناطیسی نانوسیال مغناطیسی آماده شده است. همانطور که از شکل مشخص است، نانوذرات Fe_3O_4 نسبت به تغییر اندازه‌ی میدان مغناطیسی، رفتارشان متغیر است.



تصویر ۴- گزارش VSM نانوسیال مغناطیسی

اندازه‌گیری‌ها

برای بدست آوردن ضریب متوسط انتقال حرارت همرفت، ابتدا مقدار حرارت جذب شده توسط سیال از لوله با دمای دیواره‌ی ثابت محاسبه می‌شود:

$$q_s = \dot{m} C_{p_{nf}} (T_{b,o} - T_{b,i}) \quad (1)$$

که در آن \dot{m} دبی جرمی، $C_{p_{nf}}$ ظرفیت گرمایی نانوسیال، $T_{b,o}$ و $T_{b,i}$ ترتیب دمای متوسط ورودی و خروجی لوله است.

با محاسبه‌ی مقدار گرمایی که سیال جذب می‌کند، ضریب متوسط انتقال حرارت همرفت بدست می‌آید:

$$\bar{h} = q_s / A \Delta T_{lm} \quad (2)$$

$$\Delta T_{lm} = (\Delta T_2 - \Delta T_1) / \ln(\Delta T_2 / \Delta T_1) \quad (3)$$

که در آن، ΔT_{lm} اختلاف دمای متوسط لگاریتمی، \bar{h} ضریب متوسط انتقال حرارت همرفت، $\Delta T_2 = T_{b,o} - T_s$ ، $\Delta T_1 = T_{b,i} - T_s$ و T_s مساحت سطح جانبی داخلی لوله است. در نهایت، عدد ناسلت متوسط و عدد رینولدز بدست می‌آید:

$$Nu_{ave} = \frac{\bar{h} d}{k} \quad (4)$$

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi d \mu} \quad (5)$$

که در آن k رسانندگی گرمایی سیال و سایر پارامترها قبلاً معرفی شده است. معادله ۶ ضریب اصطکاک برای جریان سیال داخل لوله ارائه می‌دهد:

$$f = \frac{\Delta P}{\left(\frac{L}{d}\right) \left(\frac{\rho V^2}{2}\right)} \quad (6)$$

که در آن ΔP اختلاف فشار بین ورودی و خروجی لوله است، V سرعت نانوسیال در لوله و سایر پارامترها قبلاً معرفی شده است.

تحلیل عدم قطعیت

مقادیر عدم قطعیت ابزار مختلف در جدول ۳ ارائه شده است. مثلاً، برای محاسبه‌ی عدم قطعیت مطلق و نسبی عدد ناسلت، روابط بعدی استفاده می‌شود [14].

$$\delta N = \sqrt{\left(\frac{\partial Nu}{\partial h} \delta h\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial D} \delta D\right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial k} \delta k\right)^2} \quad (7)$$

$$\frac{\delta Nu}{Nu} = \sqrt{\left(\frac{\delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\delta k}{k}\right)^2} \quad (8)$$

خواص فیزیکی:

۴ خاصیت اصلی فیزیکی این آزمایش، چگالی، ویسکوزیته، ظرفیت و رسانندگی حرارتی است. رسانندگی و ظرفیت حرارتی نمونه‌های نانوسیال مغناطیسی مورد استفاده، توسط آنالیزور خواص حرارتی KD-Pro 2 و روش خط گذرا منبع حرارتی^{۱۰} اندازه‌گیری شده است. چگالی نانوسیال مغناطیسی توسط دستگاه Densito 30PX و ویسکوزیته نمونه‌ها توسط دستگاه DVE اندازه‌گیری شده است. خواص مورد اشاره در جدول شماره ۲ گزارش شده است.

جدول ۲- خواص ترموفیزیکی اندازه‌گیری شده

سیال	رسانندگی گرمایی (W/m.K)	ویسکوزیته (N.s/m ²)	چگالی (kg/m ³)	ظرفیت گرمایی (J/kg.K)
نانوسیال مغناطیسی (۱ درصد جرمی)	0.6867	0.00071	1005.62	4179
آب خالص	0.6285	0.00065	993	4180

¹⁰ transient line heat source method

بصورت مشابه برای سایر پارامترها:

$$\frac{\delta \Delta T_{lm}}{\Delta T_{lm}} = \quad (9)$$

$$\sqrt{\left(\frac{\delta T_{b,i}}{T_{b,i}}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_{b,o}}{T_{b,o}}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_s}{T_s}\right)^2}$$

$$\frac{\delta h}{h} = \sqrt{\left(\frac{\delta q_s}{q_s}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta T_{lm}}{\Delta T_{lm}}\right)^2 + \left(\frac{\delta A}{A}\right)^2} \quad (10)$$

$$Re = \frac{\delta Re}{\sqrt{\left(\frac{\delta v}{v}\right)^2 + \left(\frac{\delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\delta v}{v}\right)^2}} \quad (11)$$

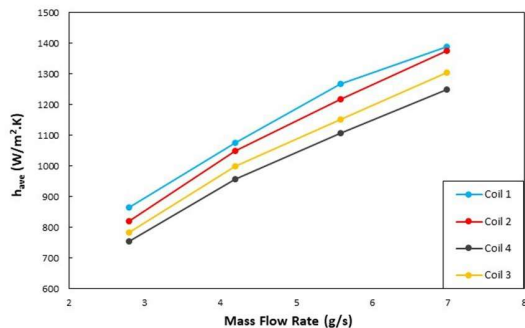
جدول ۴- عدم قطعیت پارامترهای مختلف

پارامتر	عدم قطعیت نسبی
ΔT_{lm}	0.422
h	1.676
Re	1.670
Nu	1.708
q_s	1.796

نتایج و بحث

تأثیر قطر لوله

در ابتدا، آزمایش‌ها برای جریان آرام با ۴ دبی جرمی متفاوت برای ۴ لوله اول در جدول ۱ انجام شد. تصویر ۵ ضریب متوسط انتقال حرارت همرفت برای ۴ لوله مورد اشاره را بر حسب دبی‌های جرمی مختلف اشاره شده با سیال عامل آب خالص نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است، با افزایش دبی جرمی و/یا کاهش قطر لوله، مقدار ضریب متوسط انتقال حرارت همرفت افزایش می‌یابد. کاهش قطر لوله باعث افزایش نیروی مرکزگرای وارد بر سیال جاری در لوله می‌شود. نیروی بیشتر، باعث می‌شود که سیال گرمای بیشتری را از دیواره جذب کند. به علاوه، بخاطر چگالی بیشتر نانوذرات نسبت به سیال پایه، این ذرات تأثیر بیشتری از نیروی مرکزگرا می‌گیرند و به دیواره نزدیک‌تر می‌شوند؛ در نتیجه هرچقدر قطر لوله (D) کوچکتر باشد، مقدار ضریب متوسط انتقال حرارت همرفت افزایش می‌یابد.



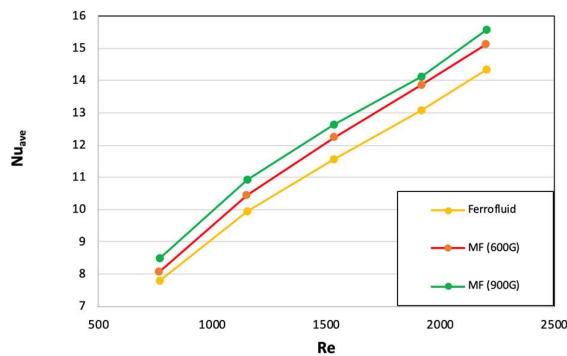
تصویر ۵- ضریب متوسط انتقال حرارت همرفت بر حسب دبی جرمی برای سیال عامل آب خالص

شکل ۶، مقدار ضریب اصطکاک محاسبه شده از رابطه ۶ را برای سیال آب برای ۴ قطر متفاوت لوله و دبی جرمی متفاوت نشان می‌دهد. افزایش عدد رینولدز و/یا کاهش قطر لوله باعث افزایش ضریب اصطکاک (یا افت فشار) می‌شود. با توجه به شکل‌های ۵ و ۶، افزایش دبی جرمی باعث افزایش انتقال حرارت که دلخواه است و همینطور افزایش افت فشار که غیردلخواه است، می‌شود.

حداکثر خطای ممکن برای پارامترهای دخیل در این پژوهش در جدول شماره ۴ بصورت خلاصه گزارش شده است.

جدول ۳- ابزار اندازه‌گیری، اطلاعات آن‌ها و عدم قطعیت

شماره	ابزار	حدود	پارامتر اندازه‌گیری شده	دقت	عدم قطعیت نسبی
1	PTD PT 100 thermocouple	0 - 200 C	inlet and outlet temperature	0.1	0.24/4
2	Pressure transducer	0 - 100 mbar	inlet and outlet pressure	0.1	0.23/8
3	Flow meter	0 - 70 lit/hr	fluid flow rate	1	1.66/7
4	Geometry dimensions	1 - 20 mm	pipe diameter and thickness	0.1	0.5
5	Physical properties	...	conductivity, density, heat capacity, viscosity	...	0.1



تصویر ۸- تاثیر اعمال میدان مغناطیسی ثابت در لوله ۲ برای نانوسیال مغناطیسی

جدول شماره ۵، بهبود انتقال حرارت را با استفاده از میدان‌های مغناطیسی ثابت 600 G و 900 G در مقایسه با حالت بدون وجود میدان مغناطیسی، نمایش می‌دهد. مشخص است که وجود میدان مغناطیسی تاثیر مثبتی بر انتقال حرارت دارد و می‌تواند تا حدود ۱۰٪ عدد ناسلت متوسط را افزایش دهد.

جدول ۵- تاثیر اعمال میدان مغناطیسی ثابت بر بهبود عدد ناسلت متوسط در اعداد رینولدز مختلف

Re	650	1000	1300	1600	1900	2200
600 G	3.6	4.9	5.8	6.0	5.4	6.2
900 G	9.2	9.8	9.3	8.1	8.6	9.7

نتیجه‌گیری

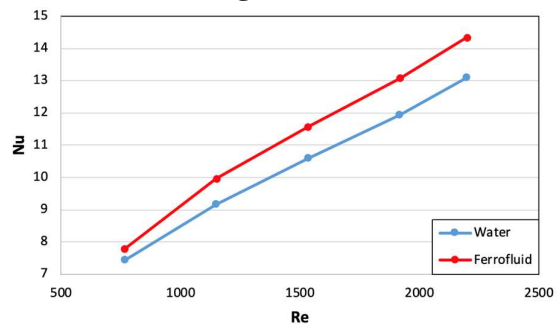
این مقاله به بررسی آزمایشگاهی تاثیر استفاده از نانوسیال مغناطیسی بعنوان سیال عامل و اعمال میدان مغناطیسی ثابت بر عدد ناسلت متوسط محلول نانوسیال مغناطیسی Fe_3O_4 ۱٪ جرمی با سیال پایه آب خالص در لوله‌های مارپیچ با دمای دیواره ثابت در اعداد رینولدز متفاوت پرداخته است.

اثر انحنای لوله مارپیچ با مطالعه‌ی انتقال حرارت در این لوله‌ها با طول ثابت و شعاع انحنای متفاوت بررسی شد و نشان داده شد که لوله‌های مارپیچ قابلیت بهبود انتقال حرارت را دارند. بهبود انتقال حرارت با اعمال میدان مغناطیسی ثابت بررسی شد. با اعمال میدان مغناطیسی ثابت 600 G، مقدار عدد ناسلت متوسط تقریباً به اندازه‌ی ۷٪ افزایش یافت. بعلاوه، در عدد رینولدز ثابت، اعمال میدام مغناطیسی ثابت قوی‌تر (900 G)، باعث عدد ناسلت متوسط بیشتری می‌شود. وجود میدان مغناطیسی تاثیر مثبتی بر انتقال حرارت دارد و عدد ناسلت متوسط را تقریباً ۱۰٪ افزایش می‌دهد.

مراجع و منابع

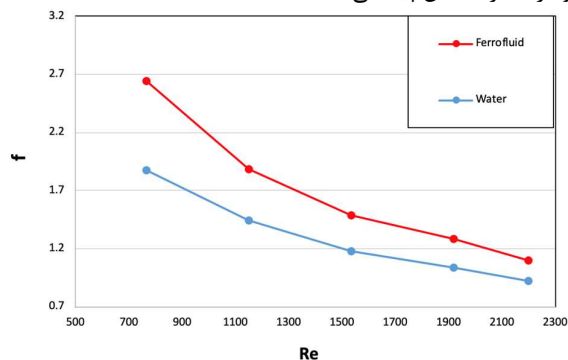
- [1] G. Humnic and A. Humnic, "Application of nanofluids in heat exchangers: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 5625-5638, 2012.

شکل ۷، بهبود عدد ناسلت متوسط را با استفاده از نانوسیال مغناطیسی ۱٪ جرمی Fe_3O_4 در مقایسه با آب خالص (سیال پایه) نشان می‌دهد. این امر بخاطر رسانندگی گرمایی بیشتر نانوسیال نسبت به سیال عامل است. این بهبود انتقال حرارت، برای تمام دبی‌های جرمی در لوله‌ی منتخب شماره‌ی ۲ مشاهده می‌شود.



تصویر ۶- تاثیر استفاده از نانوسیال Fe_3O_4 ۱٪ جرمی در لوله ۲

ضریب اصطکاک نانوسیال مغناطیسی Fe_3O_4 و آب خالص در شکل شماره ۷ نمایش داده شده است. طبیعتاً، ضریب اصطکاک برای هر ۲ سیال آب خالص و نانوسیال مغناطیسی با افزایش عدد رینولدز، کاهش می‌یابد. اختلاف بین ضریب اصطکاک برای این ۲ سیال، در اعداد رینولدز بالاتر، کاهش پیدا می‌کند.



تصویر ۷- مقایسه ضریب اصطکاک برای سیال آب خالص و نانوسیال مغناطیسی در لوله ۲

بهبود انتقال حرارت با اعمال میدان مغناطیسی ثابت در شکل ۸ نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با اعمال میدان مغناطیسی ثابت 600 G، مقدار عدد ناسلت متوسط تقریباً ۷٪ افزایش می‌یابد. همچنین، در عدد رینولدز ثابت، اعمال میدان مغناطیسی قوی‌تر (900 G)، عدد ناسلت متوسط بیشتری را به دنبال دارد.

- of water base ferrofluids under magnetic field," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 41, pp. 94-98, 2012.
- [10] L. S. Sundar, M. Naik, K. Sharma, M. Singh, and T. C. S. Reddy, "Experimental investigation of forced convection heat transfer and friction factor in a tube with Fe₃O₄ magnetic nanofluid," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 37, pp. 65-71, 2012.
- [11] A. Ghofrani, M. Dibaei, A. H. Sima, and 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] R. Azizian, E. Doroodchi, T. McKrell, J. Buongiorno, L. Hu, and B. Moghtaderi, "Effect of magnetic field on laminar convective heat transfer of magnetite nanofluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 68, pp. 94-109, 2014.
- [13] M. Goharkhah, M. Ashjaee, and M. Shahabadi, "Experimental investigation on convective heat transfer and hydrodynamic characteristics of magnetite nanofluid under the influence of an alternating magnetic field," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 99, pp. 113-124, 2016.
- [14] M. Motozawa, J. Chang, T. Sawada, and Y. Kawaguchi, "Effect of magnetic field on heat transfer in rectangular duct flow of a magnetic fluid," *Physics Procedia*, vol. 9, pp. 190-193, 2010.
- [2] D. Wen, G. Lin, S. Vafaei, and K. Zhang, "Review of nanofluids for heat transfer applications," *Particuology*, vol. 7, pp. 141-150, 2009.
- [3] M. Rakhsha, F. Akbaridoust, A. Abbassi, and S.-A. Majid, "Experimental and numerical investigations of turbulent forced convection flow of nano-fluid in helical coiled tubes at constant surface temperature," *Powder Technology*, vol. 283, pp. 178-189, 2015.
- [4] S. Suresh, M. Chandrasekar, and P. Selvakumar, "Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of CuO/water nanofluid under laminar flow in a helically dimpled tube," *Heat and Mass Transfer*, vol. 48, pp. 683-694, 2012.
- [5] R. Xin and M. Ebadian, "The effects of Prandtl numbers on local and average convective heat transfer characteristics in helical pipes," *Journal of Heat Transfer*, vol. 119, pp. 467-473, 1997.
- [6] R. L. Manlapaz and S. W. Churchill, "Fully developed laminar flow in a helically coiled tube of finite pitch," *Chemical Engineering Communications*, vol. 7, pp. 57-78, 1980.
- [7] A. Cioncolini and L. Santini, "An experimental investigation regarding the laminar to turbulent flow transition in helically coiled pipes," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 30, pp. 367-380, 2006.
- [8] H. Zhu, D. Han, Z. Meng, D. Wu, and C. Zhang, "Preparation and thermal conductivity of CuO nanofluid via a wet chemical method," *Nanoscale research letters*, vol. 6, p. 181, 2011.
- [9] A. Gavili, F. Zabihi, T. D. Isfahani, and J. Sabbaghzadeh, "The thermal conductivity