

بررسی تجربی تأثیر میدان مغناطیسی بر عدد ناسلت فروسیال در کانالی مربعی

بهنام نیلفروشان دردشتی، محمد محسن شاه مردان*، محسن نظری

دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده: هدف از مطالعه حاضر بررسی تجربی انتقال گرما در فروسیال Fe_3O_4 آب در یک کانال با سطح مقطع مربعی با اندازه‌های $0.8 \times 0.1 \times 0.1$ متر تحت تأثیر انرژی گرمایی کل یکنواخت در جریان آرام در حضور میدان مغناطیسی بیرونی محلی می‌باشد. بررسی عدد ناسلت محلی فروسیال با کسرهای گوناگون حجمی (۵٪ و ۱٪) و در حضور میدان مغناطیسی و تحت تأثیر شارهای گوناگون گرمایی متفاوت (۳۰، ۸۶/۷، ۲۲۹/۹۵، ۴۳۳/۶۵، ۵۷۳/۵۱ وات) انجام می‌شود. گرما به‌طور کاملاً یکنواخت و بر همه سطوح کانال اعمال می‌شود. انرژی گرمایی کل، میدان مغناطیسی محلی و درصد حجمی فروذره‌ها بر عدد ناسلت به‌طور هم‌زمان و جداگانه بررسی می‌شود. در اعمال میدان مغناطیسی محلی بیرونی بر جریان فروسیال تا $1/33$ برابر افزایش در عدد ناسلت و در استفاده از فروسیال تحت تأثیر میدان مغناطیسی محلی بیرونی نسبت به آب خالص تا $1/36$ برابر افزایش مشاهده می‌شود. این مقادارهای بیشینه در فروسیال با درصد حجمی ۱٪ و در کم‌ترین انرژی گرمایی کل اعمالی یعنی ۳۰ وات اتفاق می‌افتد. این نتیجه‌ها نشان می‌دهد که استفاده از فروذره‌های Fe_3O_4 و میدان مغناطیسی اعمالی بیرونی به‌طور هم‌زمان تأثیر هم‌افزایی بر افزایش عدد ناسلت دارند.

واژگان کلیدی: میدان مغناطیسی، جریان آرام، انتقال گرما، عدد ناسلت، فروسیال

KEYWORDS: Magnetic field, Laminar flow, Heat transfer, Nusselt number, Ferrofluid

مقدمه

به همین خاطر در صنایعی مانند سامانه‌های گرمایی، روان‌کننده‌ها، روغن موتورها، میکروالکترونیک و ... به کار گرفته می‌شوند. حجم زیاد مقاله‌ها ارائه شده در زمینه ساخت، تشریح ویژگی‌های این نوع از سیالات و نیز بررسی مواد گوناگون برای تولید آنها نشان از اهمیت زیاد فروسیالات دارد [۱۲-۱].

مطالعه انتقال گرما در فروسیال بر پایه دو روش بنا شده است. روش اول فروذره‌ها و سیال پایه را به صورت سیالی واحد و همگن در نظر گرفته، فروذره‌ها مجاز به جابه‌جایی نسبت به سیال پایه نیستند. بدین ترتیب ویژگی‌های ترموفیزیکی فروسیال به خاطر

با توزیع ذره‌های فرومغناطیس در اندازه‌های نانو در یک سیال، فروسیال (Ferrofluid) به دست آمده می‌شود. بدین ترتیب این نوع از سیالات نوع خاصی از نانوسیالات می‌باشند که در آنها ذره‌های نانو از مواد فرومغناطیس تشکیل شده‌اند. این نوع از سیالات کاربرد زیادی در مسائل صنعتی دارند. ایجاد مسائلی مانند افت فشار، رسوب (Sedimentation)، خوردگی (Erosion) و گرفتگی لوله‌ها (Fouling) باعث شد تا پژوهشگران به نانو سیالات توجه نمایند. رسانایی گرمایی بالا در کنار تأثیرپذیری از میدان‌های مغناطیسی از جمله دیگر دلیل‌های توجه پژوهشگران به این نوع از سیالات می‌باشد.

* عهده‌دار مکاتبات

+Email: mshahmardan@shahroodut.ac.ir

به دلایلی مانند نیروهای واندروالس و فعل و انفعال‌های دو قطبی، با یکدیگر تجمیع شوند. در صورت عدم وجود میدان مغناطیسی بیرونی، ذره‌ها به صورت تصادفی مرتب می‌شوند و در صورت وجود میدان مغناطیسی بیرونی، دو قطبی‌های ذره‌ها مرتب می‌شوند (روزنرویک^۳ [۱۹]). این نوع از سیالات توان بالقوه زیادی برای مصرف انتقال گرما دارند زیرا انتقال گرما گرمایی-مغناطیسی آن‌ها را می‌توان با تغییر ویژگی‌های سیال مغناطیسی و روش آرایش و شدت میدان مغناطیسی کنترل کرد. برخی پژوهش‌های نظریه و آزمایشگاهی در این خصوص انجام شده است. کراکوف^۴ و همکاران [۲۰] تأثیر گرادیان دما و مغناطیسی یکنواخت را بر روی جابه‌جایی طبیعی گرمایی مغناطیسی در یک روزنه مربعی بررسی کردند. بررسی آزمایشگاهی جابه‌جایی طبیعی در یک محفظه مربعی انجام شده توسط یاماگوچی^۵ و همکاران [۲۱] با افزایش انتقال گرما مشاهده شده با افزایش عدد مغناطیسی رایلی و شبیه‌سازی عددی انجام شده توسط گویلی^۶ و همکاران [۲۲] توافق خوبی نشان داد. کیکورا^۷ و همکاران [۲۳] ساوادا^۸ و همکاران [۲۴] در محفظه حلقوی افقی متحد‌المركز و مکعبی تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی متغیر، پژوهشی آزمایشگاهی انجام دادند. آهنربای دائمی در قسمت‌های گوناگون محفظه قرار داده شده و تأثیر گرادیان مغناطیسی بر انتقال گرما سیال مغناطیسی مورد مطالعه قرار گرفت. انتقال گرمای جابه‌جایی طبیعی و مغناطیسی ترکیبی به روش یک سیال مغناطیسی در محفظه مکعب توسط سیندر^۹ و همکاران [۲۵] به صورت عددی شبیه‌سازی و نتیجه‌ها توافق خوبی با آزمایش نشان داد. زابلوکیس^{۱۰} و همکاران [۲۶] جابه‌جایی گرما-مغناطیسی تولید شده توسط یک میدان مغناطیسی ثابت غیر یکنواخت یک سیم پیچ در یک استوانه گرم را به شکل عددی مطالعه کردند. کانال با سطح مقطع مربعی که هر ۴ وجه کانال تحت شار گرمایی انرژی گرمایی کل ثابت قرار گرفته و میدان مغناطیسی جریان سیال را تحت تأثیر قرار دهد، بر خلاف محفظه مکعبی و یا لوله که به کرات تحت آزمون بوده‌اند، در بازه جریان آرام و اجباری مورد بررسی نبوده و الگوی رفتاری مناسبی از فروسیال در این نوع از هندسه را در اختیار نداریم. برای حل این مسئله نیاز به انجام

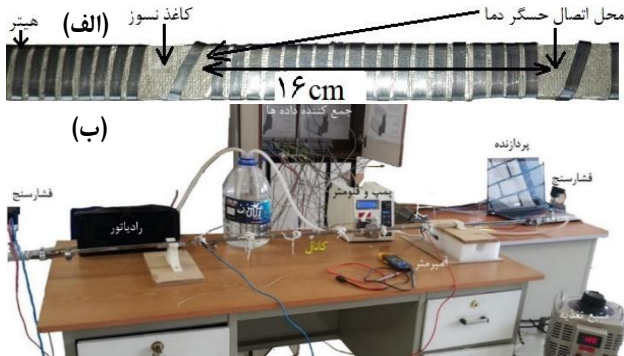
وجود فروذره‌ها تغییر کرده و اثر این تغییرها بر انتقال گرما مورد مطالعه می‌باشد. بنابراین روابط، همان معادله‌های سیال معمولی می‌باشند. در روش دوم، فروسیال را سیالی دوفازی در نظر گرفته که در اثر نیروهای موجود، فروذره‌ها می‌توانند نسبت به سیال پایه بلغزند. فارغ از نوع نگاه به فروسیال، ضریب انتقال گرما فروذره‌ها نسبت به سیال پایه افزایش زیادی داشته و نظریات متنوعی در این باره طرح شده است [۱۳]. کوزتسوف^۱ و همکاران [۱۴] معتقدند که اثرهای انتقال جرم بر انتقال گرما مهم بوده، بدین ترتیب انتقال گرما نانوسیال در لایه مرزی را مطالعه کرده و نشان دادند که انتقال گرمای بیش‌تر این نوع از سیال‌ها به خاطر مهاجرت نانوذره‌ها در سیال پایه بوده و این خود نیز متأثر از انتقال انرژی در لایه مرزی می‌باشد. به‌سرشت و همکاران [۱۵] متوجه شدند که در بررسی‌های پیشین در زمینه اثر مهاجرت نانوذره‌ها، انتخاب بازه اعداد بی‌بعد دقیق نبوده است [۱۶، ۱۴]. براین اساس آن‌ها مهاجرت نانوذره‌ها را در انتقال انرژی مهم گزارش نکردند. نقره‌آبادی و همکاران [۱۷] در پژوهشی دیگر مطرح کردند که این مهاجرت به خاطر لغزش نانوذره‌ها در سیال پایه و ایجاد ناهمگونی، باعث ایجاد تغییرهای محلی در ویژگی‌های نانوسیال شده و بر ضریب جابه‌جایی در نانوسیال تأثیر می‌گذارد. بنابراین پژوهش‌های پیشین که بعضی اوقات تا نقض نتیجه‌های یکدیگر پیش می‌روند نشان دهنده نیاز ما به انجام آزمایش‌های بسیار برای درک عمیق‌تر از انتقال گرما در نانوسیال می‌باشد.

تشکیل خوشه که به علت تجمیع نانوذره‌ها می‌باشد، حرکت براونی و انتقال گرما توسط فونون‌ها از جمله عللی است که کبلینسکی^۲ و همکاران [۱۸] معتقدند بر هدایت گرمایی تأثیر می‌گذارد. چرا که خوشه‌ها دارای مقاومت گرمایی کم‌تری بوده و با تشکیل آن‌ها، همگنی سوسپانسیون از بین رفته و با ایجاد ناحیه‌های خالی از نانوذره‌ها، باعث افزایش مقاومت و کاهش انتقال گرما می‌شوند.

پژوهشگران به واسطه ویژگی‌های فیزیکی فروذره‌ها، مانند تأثیرپذیری از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، هدایت گرمای بالا و ماندگاری مغناطیسی آن‌ها را مطالعه نموده‌اند. برای حفظ حالت تعلیق پایدار فروذره‌های موجود در سیالات مغناطیسی با لایه‌های سورفاکتانت پوشیده می‌شوند. ولی تعدادی از فروذره‌ها ممکن است

(۱) Kuznetsov
(۳) Rosensweig
(۵) Yamaguchi
(۷) Kikura
(۹) Snyder

(۲) Keblinski
(۴) Krakov
(۶) Gavili
(۸) Sawada
(۱۰) Zablockis



شکل ۱- الف) فاصله‌های حسگرهای دما، روش قرارگیری و فاصله‌های گام‌های هیتر نواری بر روی کانال و روش استفاده از کاغذ میکا به منظور عایق‌بندی الکتریکی و جلوگیری از اتصال هیتر به کانال (ب) سامانه آزمایشگاهی

۱-۰ بار، اتوترانس تک‌فاز ۲۰ آمپر با خروجی ۳۲۰-۰ و ورودی ۲۲۰ ولت مدل TDGC2-5KVA، دوربین ترموویژن مدل NEC-AVIO R300SR-HD، به منظور عکس برداری گرمایی با رزولوشن 320×240 پیکسل و حساسیت گرمایی 0.3% درجه سلسیوس، آمپرمتر چنگکی مدل 10-3280HIOKI، دستگاه فراصوت هموژنایزر مدل QSONICA700 W و 10 عدد آهنربا $NdFeB$ ، $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ با اندازه‌های $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ و با شدت میدان مغناطیسی 2928 گاوس نام برد. کارت آدام مدل‌های 4018 ، 4015 و 6015 به منظور گردآوری اطلاعات و نیز به منظور ایجاد انرژی گرمایی کل یکنواخت هیتر نواری مطابق شکل ۱- الف به کار گرفته شد. بنابراین به هر 4 وجه کانال انرژی گرمایی کل یکنواخت و عمود بر جهت جریان سیال مطابق شکل ۲- الف اعمال شد. از همین رو تفاوتی در وجهی که سنسور بر روی آن نصب می‌شود وجود ندارد. طول هیتر نواری، 4 متر بود. برای جلوگیری از اتصال کوتاه نوار هیتر از ورق‌های میکا نسوز (Muscovite)، که مقاومت گرمایی زیادی ندارد استفاده شد. سنسورهای دما در فاصله‌های 0.16 m از یکدیگر به کانال متصل شدند (شکل ۱). در این شکل نمایی از سامانه آزمایشگاهی، کانال، سنسورهای دریافت کننده دمای کانال، هیتر و دیگر قسمت‌های سامانه قابل دیدن است.

شکل ۱- الف فاصله‌های گام‌های هیتر نواری، روش پیچیدن و عایق بندی الکتریکی آن، شکل ۲- الف برای انرژی گرمایی کل اعمالی، شکل ۲- ب روش قرارگیری آهنرباها بر روی کانال و روش قرارگیری قطب‌های آهنربا را نمایش می‌دهد.

آزمایش‌های مکرر و تحلیل نتیجه‌های مربوطه می‌باشد [۲۷-۳۲]. اهمیت این هندسه در مبدل‌های گرمایی به چشم می‌خورد. نامشخص بودن سازوکار تأثیر پارامترهایی مانند شدت میدان مغناطیسی کسر حجمی و برای میدان بر عملکرد هیدرولیک گرمایی جریان فروسیال امری روشن به نظر می‌رسد [۳۳]. در کانالی با سطح مقطع دایروی و در جریان آرام 0.5% سان^۱ و همکاران [۳۴] گزارش دادند که در میدان مغناطیسی 415 گاوس عدد ناسلت محلی $4/36\%$ افزایش یافت. مهرز^۲ و همکاران [۳۵] در یک پژوهش عددی گزارش دادند که یک ناحیه چرخش در نزدیکی منبع مغناطیسی ایجاد می‌شود که در آن لایه مرزی گرمایی برداشته شده و تبادل گرمایی محلی افزایش می‌یابد. تبادل گرمایی کلی با معلق کردن نانوذره‌ها و/یا با افزایش قدرت میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد. در غیاب میدان مغناطیسی، نانوذره‌های معلق می‌تواند نرخ تبادل گرما را تا 20% افزایش دهد.

از دید انتقال گرما در سیالات هدف اصلی این پژوهش می‌باشد که با استفاده از سیال مغناطیسی Fe_3O_4 آب و در حضور میدان مغناطیسی اعمالی بیرونی محلی انجام پذیرفته است. با به کارگیری نتیجه‌های این پژوهش و تبدیل پتانسیل این نوع سیال به بالفعل، در بسیاری از کاربردهای مهندسی که با تولید، توزیع و یا واجذب گرما همراه است می‌توان بسیاری از مشکل‌های صنعت را حل نمود. به منظور رسیدن به این هدف و برای ایجاد درک مناسب از الگوی رفتاری فروسیال به عنوان یک نوآوری، این مطالعه آزمایشگاهی، در حضور انرژی گرمایی کل ثابت اعمالی به همه وجوه کانال و تحت تأثیر میدان مغناطیسی بیرونی محلی در یک کانال مربعی شکل در جریان آرام انجام پذیرفت. بنابراین ارتباط عدد ناسلت^۳ با میدان مغناطیسی، انرژی گرمایی کل اعمالی و غلظت‌های گوناگون مطالعه شد. هندسه مورد استفاده که از نوآوری‌های این پژوهش می‌باشد در مبدل‌های گرمایی به کار می‌رود.

بخش تجربی

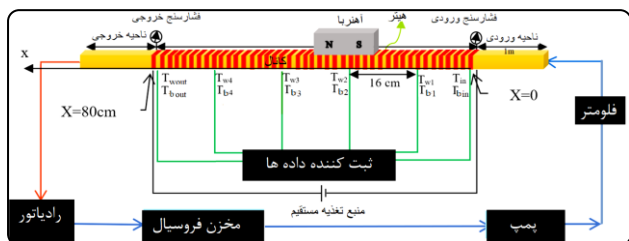
شرح دستگاه

در این آزمایش از دستگاه‌های شامل، پمپ لانگر مدل WT3000-1FA، کانال با سطح مقطع مربعی با اندازه‌ها $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ و با ضخامت جداره 0.03 m ، رادیاتور با $2000-800$ دور بر دقیقه، 12 سنسور دمای 100 pt ، 2 سنسور فشار

(۱) Bin Sun

(۳) Nusselt number

(۲) Mehrez



شکل ۳ - طرحواره سامانه آزمایشگاهی



شکل ۱ - الف) جهت انرژی گرمایی کل اعمالی، ب) روش قرار گیری آهنرباها بر روی کانال قطب‌های آهنربا

آماده‌سازی فروسیالات

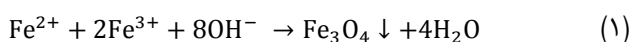
برای آماده‌سازی فروسیالات ۰/۵ و ۱ درصد حجمی مورد آزمایش پس از اضافه کردن مقدارهای لازم از نانو پودر سنتز شده به میزان دو برابر وزن نانو پودر مورد استفاده و به منظور پایدار نمودن فروسیال، استیک اسید به محلول اضافه و پس از آن محلول به مدت ۴۰ دقیقه در دمای ۵۰ درجه سلسیوس درون حمام فراصوت با قدرت ۲۸ کیلوهرتز قرار گرفت. بدین وسیله سوسپانسیون به حالت پایدار درآمد. این پایداری در شکل و شکل و نیز نتیجه آزمون پتانسیل زتا (شکل) به روشنی قابل ملاحظه می‌باشد.

آزمون پتانسیل زتا

همان‌گونه که می‌دانیم یکی از فاکتورهای مهم در پایداری فروسیال پتانسیل زتا است. در صورتی که مقدار این آزمون بیش‌تر از ۰/۳ V باشد فروسیال پایدار، کم‌تر از ۰/۰۲ V پایداری محدود و در صورت کم‌تر از ۰/۰۵ V در فروسیال انباشتگی و کلوخگی رخ می‌دهد [۳۷]. نتیجه‌های آزمون پتانسیل زتا که در شکل آورده شده است مقدار آن را ۰/۰۶۲۱ V نشان می‌دهد که حاکی از پایداری مناسب فروسیال تولیدی دارد. تصویرهای این فروسیال در گذر زمان در شکل ۴ و ۵ آمده است. در شکل‌های ۴-الف و ۵-الف فروسیال‌های نیم و یک درصد پس از گذشت ۵ روز از تاریخ تولید نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود کوچک‌ترین ته‌نشینی از فروذره‌ها در ظروف دیده نمی‌شود. در شکل‌های ۴-ب و ۵-ب فروسیالات پس از گذشت ۷ ماه از تاریخ تولید به تصویر کشیده شده‌اند. در این شکل‌ها مقداری ته‌نشینی قابل ملاحظه است. این مقدار از ته‌نشینی با توجه به زمان زیاد گذشته از تاریخ تولید منطقی به نظر می‌رسد. سرانجام در شکل‌های ۴-ج و ۵-ج این دو فروسیال پس از ۲۱۵ روز از تاریخ تولید و نیز پس از ۵ روز از فراصوتی مجدد نمایش داده شده‌اند.

سنتز فروذره‌ها^۱

برای تولید فروذره‌ها از روش هم رسوبی^۲ که توسط برگر^۳ و همکاران [۳۶] مطرح شد استفاده شد. برای این کار ۰/۰۰۵۴۱ kg و هگزا هیدرات کلرید آهن^۴ III (کلرید آهن III) ۶ آبه و ۰/۰۰۱۹۹ kg و تتراهیدرات کلرید آهن^۵ (کلرید آهن II) ۴ آبه به ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه و به طور یکسان و یکنواخت هم‌زده شد. سپس به منظور گرم کردن، محلول در حمام فراصوت که دمای آن قابل کنترل است، قرار گرفت. هنگامی که درجه گرما به ۵۰ درجه سلسیوس افزایش یافت، ۱۰ میلی‌لیتر آمونیاک غلیظ^۶ به مخلوط واکنش اضافه شد. واکنش شیمیایی آن به شرح زیر است:



سوسپانسیون به‌دست آمده با همزن برقی هم‌زده و در حمام فراصوت با دمای ۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه هم‌زده شد. سپس برای چند دقیقه، تا زمانی که نانوذره‌ها ته‌نشین شوند کنار گذاشته شد. این نانوذره‌ها ۴ مرتبه با الکل اتیلیک خالص شسته شدند. نتیجه نهایی این فرایند فروذره‌ها اکسید آهن III بود.

(۱) Ferroparticle

(۳) Berger

(۵) Iron chloride tetrahydrates, $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (۷) Fe_3O_4

(۲) Coprecipitation

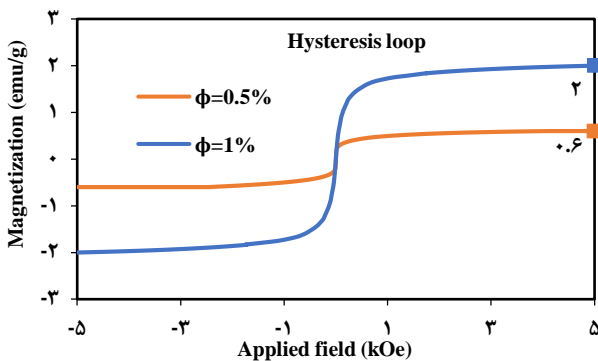
(۴) Iron Chloride Hexahydrate III, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (۶) $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$



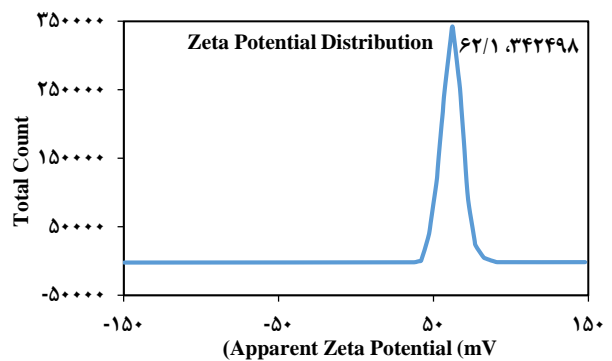
شکل ۴ - فروسیال ۵٪/۰٫۵ϕ (الف) ۵ روز پس از تولید (ب) ۷ ماه پس از تولید (ج) ۷ ماه پس از تولید و ۵ روز پس از انجام فراصوت



شکل ۵ - فروسیال، ۱٪ϕ، (الف) ۵ روز پس از تولید (ب) ۷ ماه پس از تولید (ج) ۷ ماه پس از تولید و ۵ روز پس از انجام فراصوت



شکل ۷ - نمودار مغناطیس سنج فروسیال ۵٪/۰٫۵ و ۱٪



شکل ۶ - نمودارهای آزمون پتانسیل زتا

آزمون‌های هدایت‌های الکتریکی و گرمایی، گرانی، چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه

مقدارهای هدایت الکتریکی و هدایت گرمایی فروسیال‌های تولیدی در جدول ۱ آمده است. در جدول ۲، C_p ظرفیت گرمایی ویژه، ρ چگالی، ϕ درصد حجمی و نتیجه‌های پایدار شده آزمون گرانی، μ ، پارامتر مهم دیگر فروسیال‌های تولیدی آورده شده است.

محاسبات

انرژی گرمایی کل اعمالی به کانال توسط معادله:

در این دو تصویر نیز کوچک‌ترین ته‌نشینی ملاحظه نمی‌شود. این مطلب حاکی از پایداری بسیار مناسب فروسیال تولیدی دارد. بدین ترتیب ملاحظه می‌شود که روش مطرح شده توسط برگر و همکاران [۳۶] روشی بسیار مناسب برای تولید فروسیال آب/ Fe_3O_4 می‌باشد.

آزمون مغناطیس‌سنج

در آزمون مغناطیس‌سنج مقدار اشباع مغناطیسی فروسیال Fe_3O_4 /water با تراکم حجمی ۱٪، عدد ۲ emu/g و برای فروسیال با تراکم ۵٪/۰٫۵، ۰٫۶ emu/g به دست آمد (شکل ۷).

جدول ۲ - نتیجه‌های پایدار شده آزمون گرانیروی دینامیکی فروسیال‌های ۵٪ و ۱٪ در نرخ برشی (1/s) ۱۰۰ در روز اول و دوم پس از تولید و آزمون‌های چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه

$\mu(\text{mPas})$		$C_p(\text{J/kgK})$	$\rho(\text{kg/m}^3)$	کمیت ماده
روز دوم	روز اول			
۰/۹۰	۱	۴۰۹۲	۱۰۱۶	Fe _۳ O _۴ /Water $\phi = ۰/۵\%$
۰/۹۱	۱/۰۱	۳۹۳۸	۱۰۳۷	Fe _۳ O _۴ /Water $\phi = ۱\%$
-		۶۷۰	۵۱۸۰	پودر Fe _۳ O _۴ $\phi = ۱۰۰\%$
۰/۸۹		۴۱۱۰	۹۹۶	آب خالص $\phi = ۰\%$

میدان مغناطیسی نسبت به ضریب انتقال گرما همرفت آب خالص در غیاب میدان مغناطیسی و $Nu_{ferrofluid}$ عدد ناسلت فروسیال در حضور/عدم وجود میدان مغناطیسی می‌باشند.

$$\% \Delta Nu_{ferrofluid} / Nu_{water} = \left[\frac{(Nu_{ferrofluid} - Nu_{water})}{Nu_{water}} \times 100 \right]_{\text{under influence/absence of the magnetic field}} \quad (7)$$

$$\% \frac{\Delta Nu_{local}}{Nu_{local}} = \frac{(Nu_{local, B} - Nu_{local, B=0})}{Nu_{local, B=0}} \times 100 \quad (8)$$

که در آن $\% \frac{\Delta Nu_{local}}{Nu_{local}}$ درصد افزایش عدد ناسلت محلی فروسیال در امتداد بخش تحت آزمون در حضور میدان مغناطیسی نسبت به عدد ناسلت محلی فروسیال در امتداد بخش تحت آزمون در غیاب میدان مغناطیسی $Nu_{local, B}$ و $Nu_{local, B=0}$ عدد ناسلت محلی فروسیال در امتداد بخش تحت آزمون به ترتیب در حضور و عدم وجود میدان مغناطیسی می‌باشند.

برای محاسبه نرخ افزایش عدد ناسلت مطابق مراجع [۳۹-۴۱] از معادله‌های:

$$(9) \quad \frac{Nu_{ferrofluid, B}}{Nu_{ferrofluid, B=0}} = \text{نرخ افزایش عدد ناسلت فروسیال در صورت اعمال میدان مغناطیسی بیرونی نسبت به همان سیال در صورت عدم اعمال میدان بیرونی}$$

$$(10) \quad \frac{Nu_{ferrofluid, B}}{Nu_{water}} = \text{نرخ افزایش عدد ناسلت فروسیال در صورت اعمال میدان مغناطیسی بیرونی نسبت به آب}$$

استفاده شده که نتیجه‌های آن در شکل ۹ و شکل ۱۰ آورده شده است.

جدول ۱ - هدایت الکتریکی و گرمایی نمونه‌های تولیدی و آب خالص مورد استفاده در آزمون‌ها در دماهای گوناگون

هدایت گرمایی (W/mk)					هدایت الکتریکی	نمونه
۶۵ °C	۵۵ °C	۴۵ °C	۳۵ °C	۲۵ °C		
۰/۸۳۰	۰/۸۰۳	۰/۷۷۵	۰/۷۴۳	۰/۶۹۵	۰/۳۱۶ S/m	$\phi = ۰/۵\%$
۰/۹۲۲	۰/۸۸۰	۰/۸۴۰	۰/۸۰۱	۰/۷۶۱	۱۳/۶ S/m	$\phi = ۱\%$

$$q = VI = m C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

قابل محاسبه است که در آن I و V به ترتیب شدت جریان و اختلاف پتانسیل وارد شده به هیتر، \dot{m} شدت جریان جرمی جریان سیال، T_{in} و T_{out} به ترتیب دماهای ورودی و خروجی بخش تحت آزمون می‌باشند. شار گرمایی داده شده به کانال از معادله زیر به دست می‌آید:

$$q'' = \frac{q}{A_{total}} = \frac{VI}{A_{total}} = h_{local} (T_{w_{local}} - T_{b_{local}}) \quad (2)$$

که در آن q'' شار گرمایی داده شده، A_{total} مساحت جانبی کانال و مقدار آن 0.224 m^2 ، 0.8 m طول کانال، $T_{w_{local}}$ و $T_{b_{local}}$ به ترتیب دماهای دیواره و بالک محلی و h_{local} ضریب انتقال گرمایی جابه‌جایی محلی می‌باشند. بدین ترتیب ضریب جابه‌جایی محلی از معادله:

$$h_{local} = \frac{VI}{A_{total} (T_{w_{local}} - T_{b_{local}})} = \frac{q''}{(T_{w_{local}} - T_{b_{local}})} \quad (3)$$

محاسبه می‌شود. برای محاسبه عدد رینولدز می‌دانیم:

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (4)$$

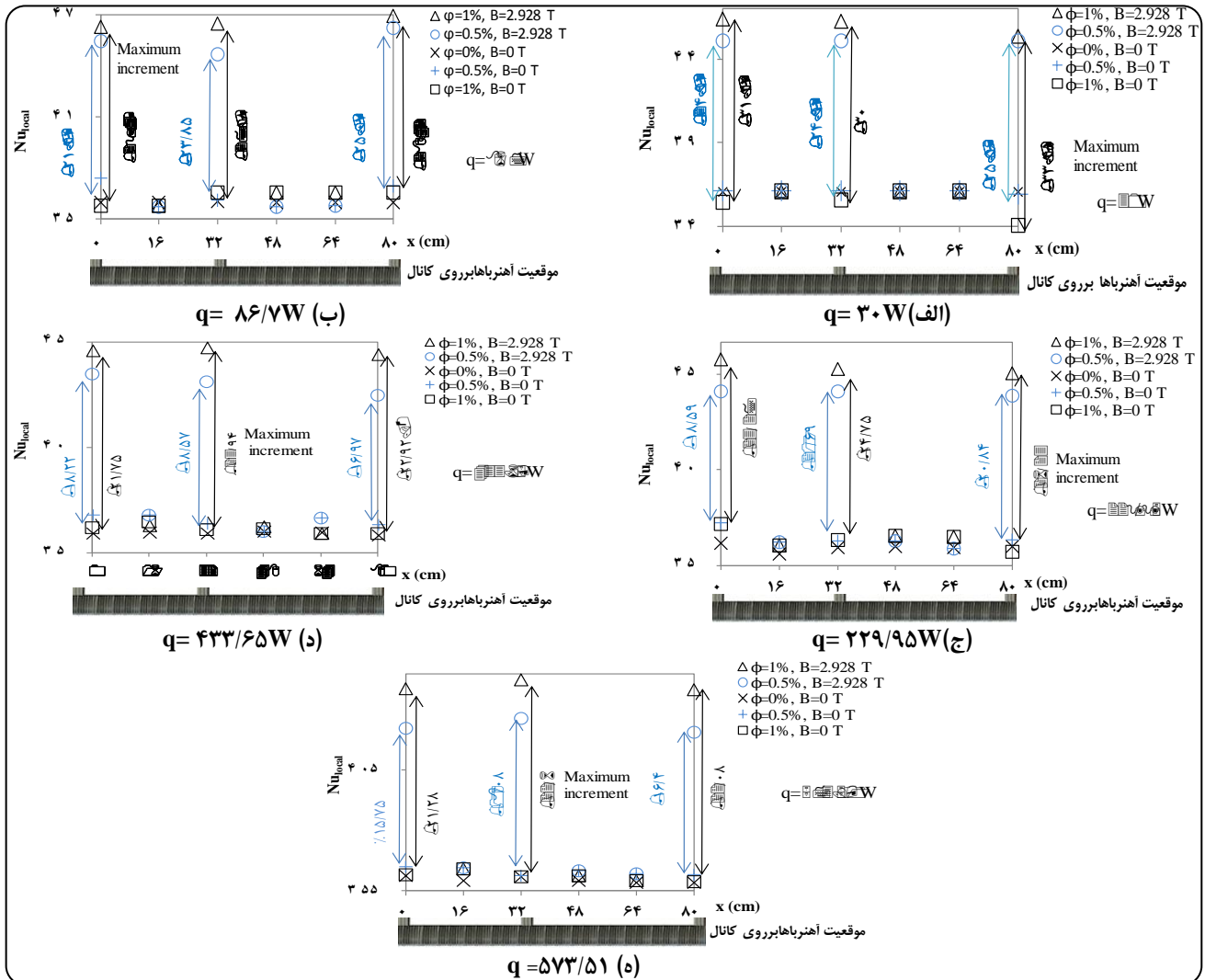
که در آن V سرعت، ρ چگالی، μ گرانیروی سیال $D_h = \frac{4A'}{P} = a = 0.07 \text{ m}$ قطر هیدرودینامیکی، A' مساحت سطح مقطع کانال و P محیط سطح مقطع کانال می‌باشند [۳۸]. برای محاسبه سرعت سیال و عدد ناسلت معادله‌های (۵) و (۶) مورد استفاده قرار گرفت. که در آن‌ها Q و k به ترتیب شدت جریان حجمی و ضریب هدایت گرمایی فروسیال می‌باشند.

$$V = \frac{Q}{A'} \quad (5)$$

$$Nu = \frac{h D_h}{k} \quad (6)$$

برای محاسبه درصد افزایش در نمودارهای شکل ۸ از معادله‌های (۷) و (۸) استفاده شده است.

که در آن $\% \frac{\Delta Nu_{ferrofluid}}{Nu_{water}}$ درصد افزایش عدد ناسلت در حضور/عدم حضور



شکل ۸ - عدد ناسلت محلی در سیالات مغناطیسی با درصدهای حجمی گوناگون، شدت جریان حجمی $m^3/s \times 10^{-6} \times 8/33$ ، تحت انرژی گرمایی کل عملی ثابت، در حضور/عدم حضور میدان مغناطیسی بیرونی در ناحیه توسعه یافته در طول کانال و درصد افزایش آن نسبت به حالت عدم حضور میدان بیرونی، موقعیت آهنربا: $0, +/32, +/8 m$

اعتبار سنجی

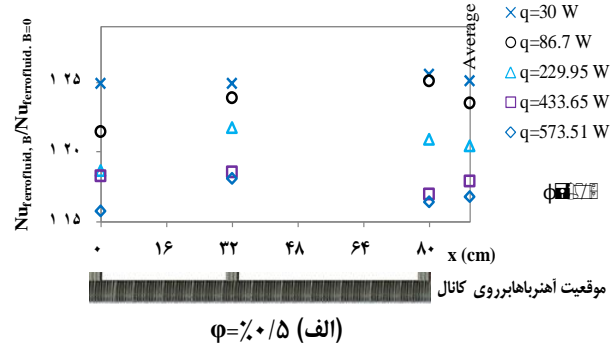
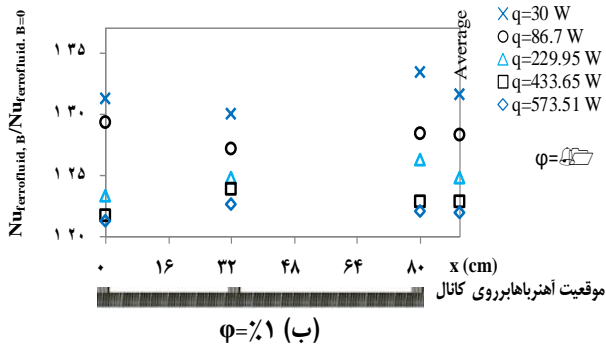
برای صحت سنجی آزمون‌های انجام شده نخست آزمایش‌ها با آب خالص بدون حضور میدان مغناطیسی بیرونی انجام پذیرفت و نتیجه‌های به دست آمده با مراجع، بیژن و همکاران [۳۸]، مقایسه شد. با توجه به شرایط مسئله، عدد ناسلت به نوع سیال وابسته نبوده و تنها به هندسه و اندازه‌های بخش تحت آزمون وابسته است. بدین ترتیب مقدار مرجع عدد ناسلت $3/61$ می‌باشد.

شکل ۸ نشان می‌دهد که در کلیه آزمون‌هایی که با آب خالص، $\phi=0\%$ ، در کلیه شارهای گرمایی و بدون اعمال میدان مغناطیسی بیرونی انجام شده است عدد محلی ناسلت در بازه

$3/56133 > Nu_{\phi=0\%, B=0} > 3/61285$ می‌باشد، که با مقدار بالا، $3/61$ ، مطابقت دارد [۳۸]. محاسبه‌های مربوط به عدم قطعیت در بخش ۶ آمده است.

نتیجه‌ها و بحث

با اعمال میدان مغناطیسی بیرونی به جریان سیال مغناطیسی، عدد ناسلت می‌تواند با میدان مغناطیسی کاهش یا افزایش پیدا کند [۲۷]. این تحول‌ها به عامل‌هایی مانند نسبت نیروی مغناطیسی به نیروی اینرسی، برهمکنش بین حرکت سیال و انباشتگی نانوذره‌ها در نزدیکی سطح درونی دیواره کانال، افزایش هدایت گرمایی محلی سیال و



شکل ۹ - نرخ افزایش عدد ناسلت محلی فروسیالات تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی بیرونی ثابت به عدد ناسلت محلی سیالات نمونه و میانگین آن در طول کانال، $B=0$ ، T ، شدت جریان حجمی $10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ، موقعیت‌های آهنربا: $0/8$ ، $0/32$ ، $0/48$ ، $0/64$ ، $0/80$ m

درصد حجمی ثابت با اعمال میدان مغناطیسی عدد ناسلت افزایش یافته است، $Nu_{\phi=1\%, B=0} > Nu_{\phi=1\%, B=0.08}$ و $Nu_{\phi=5\%, B=0} > Nu_{\phi=5\%, B=0.08}$ ، به عنوان نمونه در انرژی گرمایی کل $573/51 \text{ W}$ و برای غلظت ۱٪، با اعمال میدان مغناطیسی ثابت، عدد ناسلت در $x=0/32 \text{ m}$ ۲۲/۶٪ رشد را نشان می‌دهد. رشد عدد ناسلت با اعمال میدان مغناطیسی در همه شارهای گرمایی اتفاق افتاده و درصد آن در نمودارهای شکل ۸ و با استفاده از معادله (۸) به روشنی نشان داده شده است. ۲ - در مورد درصدهای حجمی برابر و تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی ثابت، با افزایش شار گرمایی، مقدار عدد ناسلت کاهش می‌یابد به عبارت دیگر با افزایش انرژی گرمایی کل، اثر میدان مغناطیسی روی عدد ناسلت کاهش می‌یابد یعنی:

$$Nu_{\phi=1\%, B, q=86/7W} > Nu_{\phi=1\%, B, q=229/95W} > Nu_{\phi=1\%, B, q=433/65W} > Nu_{\phi=1\%, B, q=573/51W}$$

همین نابرابری در مورد کسر حجمی ۵٪ نیز برقرار است. دلیل این موضوع می‌تواند به افزایش هدایت بیش‌تر از همرفت فروسیال مربوط باشد. این مطلب در انرژی گرمایی کل ۳۰ وات برقرار نیست. در این شار به دلیل انرژی گرمایی کل کم اعمالی تغییرهای دما محسوس نبوده و به تبع آن تغییرهای ضریب هدایت به روشنی قابل درک نبوده و در نتیجه تغییرهای عدد ناسلت تابعی از تغییرهای همرفت خواهد بود.

نمودارهای شکل ۹ نرخ افزایش عدد ناسلت محلی را در شرایط اعمال میدان مغناطیسی نسبت به شرایط عدم وجود میدان مغناطیسی نمایش می‌دهد. در این نمودارها از معادله‌های (۹) و (۱۰) استفاده شده است [۳۹-۴۱].

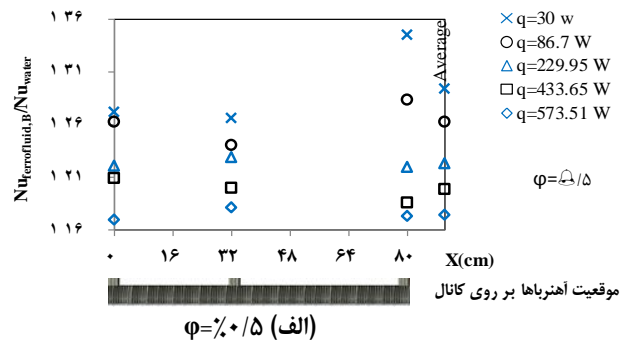
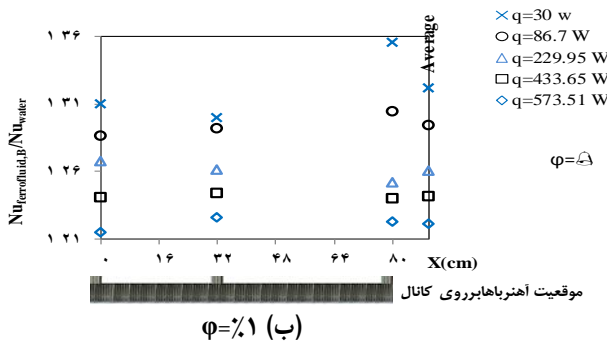
تشکیل خوشه وابسته است. پاستوریزه و همکاران [۴۲] هدایت را در شرایطی که میدان بیرونی وجود نداشته باشد، به شکل تابعی از غلظت و دما اندازه‌گیری کردند. طبق پژوهش‌های آن‌ها هدایت گرمایی با غلظت به تقریب، به صورت خطی رشد می‌کند. ضمن این که، هدایت گرمایی سیالات مغناطیسی با اعمال میدان مغناطیسی بیرونی، متغیر بوده و امکان تعیین مقدار مشخصی برای آن وجود ندارد.

همان‌گونه که گفته شد، در صورت اعمال نشدن میدان بیرونی عدد ناسلت تنها به هندسه مسئله وابسته است که با توجه به یک بودن نسبت اندازه‌ها (a/b) ، عدد ناسلت $3/61$ می‌شود [۳۸]. شکل ۸ عدد ناسلت محلی را در درصدهای حجمی متفاوت سیال مغناطیسی و نیز در حضور/غیبت میدان مغناطیسی محلی اعمالی بیرونی ثابت نمایش می‌دهد. در این آزمون‌ها میدان مغناطیسی توسط ۱۰ عدد آهنربای دائمی به وجود می‌آید. این آهنرباها نخست، $x=0 \text{ m}$ در انتها $x=0/8 \text{ m}$ و در وسط، $x=0/32 \text{ m}$ کانال قرار گرفته‌اند. تأثیر انرژی گرمایی کل‌های گوناگون اعمالی، عمود بر جریان سیال مغناطیسی با درصدهای حجمی ۵٪ و ۱٪، مورد مطالعه قرار گرفته است.

نکات قابل درک از شکل ۸ را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

۱ - در حضور یک میدان مغناطیسی بیرونی ثابت به روشنی تأثیر مثبت افزایش غلظت بر عدد ناسلت محلی ملاحظه می‌شود. به عبارت دیگر با وجود میدان مغناطیسی بیرونی ثابت و در حضور انرژی گرمای کل یکنواخت، عدد ناسلت فروسیال با غلظت ۱٪ بیش‌تر از فروسیال با غلظت ۵٪ می‌باشد $(Nu_{\phi=1\%, B=0.08} > Nu_{\phi=5\%, B=0.08})$.

۲ - تأثیر مثبت میدان مغناطیسی بر عدد ناسلت قابل دیدن است. بدین ترتیب که در انرژی گرمایی کل یکنواخت و



شکل ۱۰ - نرخ افزایش عدد ناسلت محلی فروسیالات نمونه تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی بیرونی ثابت به عدد ناسلت محلی آب خالص تحت انرژی گرمایی کل ثابت، $B=0\ T$ و میانگین نرخ افزایش در طول کانال، شدت جریان حجمی $10^{-6}\ m^3/s$ ، موقعیت‌های آهنربا: $x = 0, 16, 32, 48, 64, 80\ m$

مقدار متوسط این نرخ را در کل طول کانال نشان می‌دهند. همان‌گونه که در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود استفاده از سیال مغناطیسی تحت تأثیر میدان مغناطیسی در مقایسه با آب خاص باعث رشد عدد ناسلت می‌شود $(Nu_{ferrofluid, B=2/928T} > Nu_{water, B=0T})$. این مطلب از نمودارهای شکل ۸ نیز قابل دریافت است. از سویی در صورت اعمال میدان مغناطیسی بیرونی ثابت، با افزایش انرژی گرمایی کل اعمالی، میانگین نرخ رشد عدد ناسلت فروسیال نسبت به آب خالص در کل کانال، کاهش می‌یابد:

$$\left(\frac{Nu_{ferrofluid, B=2/928T}}{Nu_{water}}\right)_{q=30\ W} > \left(\frac{Nu_{ferrofluid, B=2/928T}}{Nu_{water}}\right)_{q=86.7\ W} > \left(\frac{Nu_{ferrofluid, B=2/928T}}{Nu_{water}}\right)_{q=229.95\ W} > \left(\frac{Nu_{ferrofluid, B=2/928T}}{Nu_{water}}\right)_{q=433.65\ W} > \left(\frac{Nu_{ferrofluid, B=2/928T}}{Nu_{water}}\right)_{q=573.51\ W}$$

این مطلب می‌تواند مربوط به افزایش بیش‌تر ضریب هدایت نسبت به ضریب جابه‌جایی با افزایش انرژی گرمایی کل در صورت استفاده از فروسیال به جای آب خالص باشد. مقایسه مانند به مانند شکل ۹-الف و شکل ۱۰-الف و نیز مقایسه شکل ۹-ب و شکل ۱۰-ب نشان می‌دهند که نرخ رشد عدد ناسلت محلی فروسیال در حضور میدان مغناطیسی نسبت به آب خالص از نرخ رشد عدد ناسلت محلی فروسیال در حضور میدان مغناطیسی نسبت به فروسیال بدون حضور میدان مغناطیسی بیشتر است $\left(\frac{Nu_{ferrofluid, B=2/928T}}{Nu_{water}} > \frac{Nu_{ferrofluid, B=2/928T}}{Nu_{ferrofluid, B=0T}}\right)$. یعنی میدان مغناطیسی بیرونی و درصد حجمی فروذره‌ها در برای نرخ افزایش عدد ناسلت دارای یک هم‌افزایی می‌باشند. تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی بیرونی و در میان شارهای گرمایی اعمال شده، بیش‌ترین نرخ افزایش عدد ناسلت محلی فروسیال با غلظت ۰/۵٪ نسبت به آب خالص ۱/۳۴ است، $\left(\frac{Nu_{\phi=0.5, B=2/928T}}{Nu_{water}}\right)_{max} = 1/34$ ، که در انرژی گرمایی کل ۳۰ وات اتفاق می‌افتد. این اعداد برای فروسیال با غلظت ۱٪

نمودارهای شکل ۹ به روشنی نشان می‌دهند که اعمال میدان مغناطیسی در مقدار عدد ناسلت تأثیر مثبت داشته و این به معنای رشد بیش‌تر جابه‌جایی نسبت به هدایت در صورت اعمال میدان مغناطیسی بیرونی می‌باشد $\left(\frac{Nu_{ferrofluid, B}}{Nu_{ferrofluid, B=0}} > 1\right)$. از نکات قابل توجه دیگر در دو نمودار الف و ب شکل ۹ آن است که با افزایش انرژی گرمایی کل، علاوه بر عدد ناسلت محلی، میانگین نرخ افزایش عدد ناسلت نیز کم می‌شود. به عنوان نمونه در درصد حجمی ۰/۵٪، میانگین نرخ افزایش عدد ناسلت در شرایط اعمال میدان مغناطیسی نسبت به شرایط بدون میدان اعمالی در انرژی گرمایی کل ۳۰ وات $1/25133$ و در انرژی گرمایی کل $86/7$ وات $1/233457$ می‌باشد.

$$\left(\frac{Nu_{ferrofluid, B=2/928T}}{Nu_{ferrofluid, B=0}}\right)_{q=30\ W} > \left(\frac{Nu_{ferrofluid, B=2/928T}}{Nu_{ferrofluid, B=0}}\right)_{q=86.7\ W} > \left(\frac{Nu_{ferrofluid, B=2/928T}}{Nu_{ferrofluid, B=0}}\right)_{q=229.95\ W} > \left(\frac{Nu_{ferrofluid, B=2/928T}}{Nu_{ferrofluid, B=0}}\right)_{q=433.65\ W} > \left(\frac{Nu_{ferrofluid, B=2/928T}}{Nu_{ferrofluid, B=0}}\right)_{q=573.51\ W}$$

این مطلب می‌تواند مربوط به افزایش بیش‌تر ضریب هدایت نسبت به ضریب جابه‌جایی با افزایش انرژی گرمایی کل باشد.

در میان همه شارهای گرمایی اعمال شده به فروسیال با غلظت ۰/۵٪ و تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی بیرونی ثابت، حداقل نرخ افزایش عدد ناسلت محلی $1/1575$ و در انرژی گرمایی کل $573/51$ وات بوده و بیش‌ترین آن در انرژی گرمایی کل 730 وات، $1/25579$ می‌باشد. حداقل افزایش این پارامتر برای فروسیال با درصد حجمی ۱٪، $1/21277$ است که در انرژی گرمایی کل $573/51$ وات و بیش‌ترین آن با مقدار $1/333455$ در انرژی گرمایی کل 30 وات مشاهده می‌شود. نمودارهای شکل ۱۰ نرخ افزایش عدد ناسلت را در صورت اعمال میدان مغناطیسی بیرونی نسبت به آب خالص و همچنین

جدول ۳ - دقت کمیت‌های آزمایش

کمیت	مساحت	طول	دما	شدت جریان الکتریکی	ولتاژ
دقت	۰/۰۰۰۰۰۱m ^۲	۰/۰۰۰۱m	۰/۰۱°C	۰/۰۱A	۱V

به ترتیب ۱/۳۶ و ۳۰ وات می‌باشند. حداقل این نرخ برای فروسیال با غلظت ۰/۵٪، ۱/۱۷ و برای فروسیال ۱٪، ۱/۲۱ می‌باشند که هر دو در ۵۷۳/۵۱ وات به وقوع می‌پیوندند.

نکته دیگر در مقایسه ستون میانگین نرخ رشد عدد ناسلت در شکل ۱۰- الف و شکل ۱۰- ب آشکار می‌شود. تحت تأثیر میدان مغناطیسی بیرونی و در شارهای گرمای برابر نرخ رشد عدد ناسلت فروسیال با درصد حجمی ۱٪ نسبت به آب خالص از نرخ رشد عدد ناسلت فروسیال با درصد حجمی ۰/۵٪ نسبت به آب خالص بیش‌تر می‌باشد $(\frac{Nu_{\phi=1, B=792AT}}{Nu_{Water}} > \frac{Nu_{\phi=0.5, B=792AT}}{Nu_{Water}})$. برای اطمینان از تأثیر مثبت درصد حجمی فروذره‌ها بر نرخ رشد عدد ناسلت در حضور میدان مغناطیسی بیرونی و تحت تأثیر انرژی گرمایی کل برابر می‌بایست غلظت‌های بیش‌تری مورد بررسی قرار گیرند که در مقاله‌های آینده این موضوع مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

محاسبه عدم قطعیت

عدم قطعیت عدد ناسلت، $\frac{\Delta Nu}{Nu}$ از معادله زیر به دست می‌آید [۲۹]:

$$\frac{\Delta Nu}{Nu} = \sqrt{\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_w}{T_w - T_b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_b}{T_w - T_b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta k}{k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D_h}{D_h}\right)^2} \quad (11)$$

جدول ۳ دقت مقادیرهای اندازه‌گیری شده برای محاسبه عدم قطعیت عدد ناسلت و جدول ۴ بیش‌ترین عدم قطعیت را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

موارد زیر نتیجه‌های اصلی آزمایش‌های انجام شده در رژیم جریان آرام، یک فازی و در منطقه به طور کامل توسعه یافته در کانال با سطح مقطع مربعی است که هر چهار دیواره آن عایق بندی شده، تحت تأثیر پنج انرژی گرمایی کل یکنواخت و متفاوت قرار گرفته و سه نقطه با فاصله ۰ سانتی‌متری، ۰/۳۲ متری و ۰/۸ متری از ورودی کانال متأثر از میدان مغناطیسی بیرونی یکنواخت می‌باشند.

۱- در صورت وجود میدان مغناطیسی بیرونی در انرژی گرمایی کل ثابت، افزایش غلظت بر عدد ناسلت تأثیر مثبت می‌گذارد $(\overline{Nu}_{\phi=1, B=792AT} > \overline{Nu}_{\phi=0.5, B=792AT})$ به عبارتی در حضور یک میدان مغناطیسی بیرونی ثابت، تأثیر مثبت افزایش غلظت بر عدد

ناسلت محلی ملاحظه می‌شود.

۲- اعمال میدان مغناطیسی در مقدار عدد ناسلت تأثیر مثبت داشته بدین ترتیب که در انرژی گرمایی کل یکنواخت و درصد حجمی ثابت با اعمال میدان مغناطیسی عدد ناسلت افزایش می‌یابد $(Nu_{\phi=1, B=792AT} > Nu_{\phi=0.5, B=792AT})$ و این به معنای رشد بیش‌تر جابه‌جایی نسبت به هدایت در صورت اعمال میدان مغناطیسی بیرونی می‌باشد.

۳- در میان همه شارهای گرمایی اعمال شده به فروسیال‌های با غلظت ۰/۵٪ و ۱٪ تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی بیرونی ثابت، بیش‌ترین عدم قطعیت عدد ناسلت محلی به ترتیب ۰/۵۴۹۴۶۷۵٪ و ۰/۵۳۴۴۰۶۱٪ می‌باشند.

۴- استفاده از فروسیال تحت تأثیر میدان مغناطیسی در مقایسه با آب خاص باعث رشد عدد ناسلت می‌شود $(Nu_{ferrofluid, B=792AT} > Nu_{water, B=792AT})$.

۵- در صورت اعمال میدان مغناطیسی بیرونی ثابت، با افزایش انرژی گرمایی کل اعمالی، میانگین نرخ رشد عدد ناسلت فروسیال نسبت به آب خالص در کل کانال، کاهش می‌یابد. این مطلب می‌تواند مربوط به افزایش بیش‌تر ضریب هدایت نسبت به ضریب جابه‌جایی با افزایش انرژی گرمایی کل در صورت استفاده از فروسیال به جای آب خالص باشد.

۶- با افزایش انرژی گرمایی کل اعمالی، میانگین نرخ رشد عدد ناسلت فروسیال تحت اعمال میدان مغناطیسی بیرونی ثابت نسبت به همان فروسیال در صورت عدم حضور میدان مغناطیسی بیرونی کاهش می‌یابد.

۷- در شارهای گرمایی برابر و تحت تأثیر میدان مغناطیسی بیرونی نرخ میانگین رشد عدد ناسلت فروسیال ۱٪ نسبت به آب خالص از نرخ رشد عدد ناسلت فروسیال ۰/۵٪ نسبت به آب خالص بیش‌تر می‌باشد $(\frac{Nu_{\phi=1, B=792AT}}{Nu_{Water}} > \frac{Nu_{\phi=0.5, B=792AT}}{Nu_{Water}})$.

۸- در درصد‌های حجمی برابر و تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی ثابت، با افزایش انرژی گرمایی کل، مقدار عدد ناسلت کاهش می‌یابد به عبارت دیگر با افزایش انرژی گرمایی کل، اثر میدان مغناطیسی روی عدد ناسلت کم می‌شود:

$$Nu_{\phi=1, B, q=167W} > Nu_{\phi=1, B, q=117/95W} > Nu_{\phi=1, B, q=117/65W} > Nu_{\phi=1, B, q=517/51W}$$

همین نابرابری برای غلظت ۰/۵٪ نیز وجود دارد.

۹- نرخ رشد عدد ناسلت محلی فروسیال در حضور میدان مغناطیسی

جدول ۴ - بیشترین عدم قطعیت کمیت‌های تحت تأثیر میدان مغناطیسی بیرونی

عدم قطعیت	$\% \frac{\Delta V}{V}$	$\% \frac{\Delta I}{I}$	$\% \frac{\Delta a}{a}$	$\% \frac{\Delta L}{L}$	$\% \frac{\Delta T_b}{T_w - T_b}$	$\% \frac{\Delta k}{k}$	$\% \frac{\Delta D_h}{D_h}$	$\left(\frac{\Delta Nu}{Nu} \right)_{\max}$
$\phi = \% / 5$	$\% / 0.16$	$\% / 43$	$\% / 0.714$	$\% / 0.00625$	$\% / 15974$	$\% / 753$	$\% / 0.714$	$\% / 5344.61$
$\phi = \% 1$	$\% / 0.16$	$\% / 43$	$\% / 0.714$	$\% / 0.00625$	$\% / 18518$	$\% / 666$	$\% / 0.714$	$\% / 54946.75$

ΔI	عدم قطعیت شدت جریان الکتریکی A
K	هدایت الکتریکی mS/cm
k	هدایت گرمایی w/mk
L	طول کانال m
ΔL	عدم قطعیت طول m
\dot{m}	شدت جریان جرمی kg/s
Nu	عدد ناسلت
Nu_{local}	عدد ناسلت محلی
ΔNu	عدم قطعیت ناسلت
P	محیط سطح مقطع m
Q	شدت جریان حجمی ml/min
q	انرژی گرمایی w
q''	شار گرمایی بر واحد سطح W/m^2
R	تابع
δR_{Xi}	عدم قطعیت تابع
ΔT	عدم قطعیت دما $^{\circ}C$
T_w	دمای درونی دیواره $^{\circ}C$
T_b	دمای بالک $^{\circ}C$
v	سرعت سیال m/s
V	ولتاژ الکتریکی V
ΔV	عدم قطعیت ولتاژ الکتریکی V
x	فاصله از ابتدای قسمت تحت آزمون
X_i	متغیرهای مستقل
$\pm \delta X_i$	عدم قطعیت متغیرهای مستقل
ρ_{nf}	چگالی نانوسیال kg/m^3
$\rho_{Fe_3O_4}$	چگالی اکسید آهن kg/m^3
ρ_w	چگالی آب خالص kg/m^3
ϕ	درصد حجمی
μ	گرانروی دینامیکی نانوسیال mpa.s
μ_w	گرانروی دینامیکی آب mpa.s
nf	نانوسیال
b	بالک

نسبت به آب خالص از نرخ رشد عدد ناسلت محلی فروسیال در حضور میدان مغناطیسی نسبت به فروسیال بدون حضور میدان بیش‌تر است $\left(\frac{Nu_{ferrofluid, B=\gamma \Delta T}}{Nu_{ferrofluid, B=T}} > \frac{Nu_{ferrofluid, B=\gamma \Delta T}}{Nu_{water}} \right)$. یعنی میدان مغناطیسی بیرونی و درصد حجمی فروذره‌ها در برای نرخ افزایش عدد ناسلت دارای هم افزایی می‌باشند.

۱۰ - تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی بیرونی و در میان شارهای گرمایی اعمال شده، بیش‌ترین نرخ افزایش عدد ناسلت محلی فروسیال با غلظت $\% / 5$ نسبت به آب خالص $1/34$ است، $\left(\frac{Nu_{\phi=\% / 5, B=\gamma \Delta T}}{Nu_{water}} \right)_{\max} = 1/34$ ، که در انرژی گرمایی کل 30 وات اتفاق می‌افتد. این اعداد برای فروسیال با غلظت $\% 1$ به ترتیب $1/36$ و 30 وات می‌باشند. حداقل این نرخ برای فروسیال با غلظت $\% / 5$ ، $1/17$ و برای فروسیال $\% 1$ ، $1/21$ می‌باشند که هر دو در $573/51$ وات به وقوع می‌پیوندند.

نمادها

A'	مساحت سطح مقطع m^2
A	مساحت جانبی کانال m^2
a	عرض درونی کانال m
Δa	عدم قطعیت عرض درونی کانال m
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه j/kgk
C_w	ظرفیت گرمایی ویژه آب j/kgk
$C_{Fe_3O_4}$	ظرفیت گرمایی ویژه اکسید آهن j/kgk
D_h	قطر هیدرودینامیکی m
h	ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی
h_{local}	ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی محلی
Δh	عدم قطعیت ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی
$h_{\phi=\% 1}$	ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی فروسیال با درصد حجمی $\% 1$
$h_{\phi=\% / 5}$	ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی فروسیال با درصد حجمی $\% / 5$
h_{water}	ضریب انتقال گرما جابه‌جایی آب خالص
I	شدت جریان الکتریکی A

دیواره
هیدرودینامیک
محلی

w
h
Local

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۲۵

مراجع

- [1] Ghadimi A., Saidur R., Metselaar H., [A Review of Nanofluid Stability Properties and Characterization in Stationary Conditions](#), *International journal of heat and mass transfer*, **54(17-18)**: 4051-4068 (2011).
- [2] Haddad Z., Abid C., Oztop H.F., Mataoui A., [A Review on How the Researchers Prepare Their Nanofluids](#), *International Journal of Thermal Sciences*, **76**: 168-189 (2014).
- [3] Li Y., Tung S., Schneider E., Xi S., [A Review on Development of Nanofluid Preparation and Characterization](#), *Powder technology*, **196(2)**: 89-101 (2009).
- [4] Yu W., Xie H., [A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Applications](#), *Journal of nanomaterials*, **2012**: 1-17 (2012).
- [5] Özerinç S., Kakaç S., Yazıcıoğlu A.G., [Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids: A State-of-the-Art Review](#), *Microfluidics and Nanofluidics*, **8(2)**: 145-170 (2010).
- [6] Murshed S., Leong K., Yang C., [Thermophysical and Electrokinetic Properties of Nanofluids—a Critical Review](#), *Applied Thermal Engineering*, **28(17-18)**: 2109-2125 (2008).
- [7] Chandrasekar M., Suresh S., Senthikumar T., [Mechanisms Proposed through Experimental Investigations on Thermophysical Properties and Forced Convective Heat Transfer Characteristics of Various Nanofluids—a Review](#), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16(6)**: 3917-3938 (2012).
- [8] Philip J., Shima P.D., [Thermal Properties of Nanofluids](#), *Advances in colloid and interface science*, **183**: 30-45 (2012).
- [9] Suresh S., Venkataraj K., Selvakumar P., Chandrasekar M., [Effect of Al₂O₃-Cu/Water Hybrid Nanofluid in Heat Transfer](#), *Experimental Thermal and Fluid Science*, **38**: 54-60 (2012).
- [10] Halefadi S., Maré T., Estellé P., [Efficiency of Carbon Nanotubes Water Based Nanofluids as Coolants](#), *Experimental Thermal and Fluid Science*, **53**: 104-110 (2014).
- [11] Mehrali M., Sadeghinezhad E., Latibari S.T., Kazi S.N., Mehrali M., Zubir M.N.B.M., Metselaar H.S.C., [Investigation of Thermal Conductivity and Theological Properties of Nanofluids Containing Graphene Nanoplatelets](#), *Nanoscale research letters*, **9(1)**: 15 (2014).
- [12] Madhesh D., Parameshwaran R., Kalaiselvam S., [Experimental Investigation on Convective Heat Transfer and Rheological Characteristics of Cu-TiO₂ Hybrid Nanofluids](#), *Experimental Thermal and Fluid Science*, **52**: 104-115 (2014).
- [13] Haddad Z., Oztop H.F., Abu-Nada E., Mataoui A., [A Rview on Natural Convective Heat Transfer of Nanofluids](#), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16(7)**: 5363-5378 (2012).

- [14] Kuznetsov A., Nield D., [Natural Convective Boundary-Layer Flow of a Nanofluid Past a Vertical Plate](#), *International Journal of Thermal Sciences*, **49(2)**: 243-247 (2010).
- [15] Behseresht A., Noghrehabadi A., Ghalambaz M., [Natural-Convection Heat and Mass Transfer from a Vertical Cone in Porous Media Filled with Nanofluids using the Practical Ranges of Nanofluids Thermo-Physical Properties](#), *Chemical Engineering Research and Design*, **92(3)**: 447-452 (2014).
- [16] Nield D., Kuznetsov A., [The Cheng–Minkowycz Problem for Natural Convective Boundary-Layer Flow in a Porous Medium Saturated by a Nanofluid](#), *International journal of heat and mass transfer*, **52(25)**: 5792-5795 (2009).
- [17] Noghrehabadi A., Ghalambaz M., Ghanbarzadeh A., [Effects of Variable Viscosity and Thermal Conductivity on Natural-Convection of Nanofluids Past a Vertical Plate in Porous Media](#), *Journal of Mechanics*, **30(3)**: 265-275 (2014).
- [18] Koblinski P., Phillpot S., Choi S., Eastman J., [Mechanisms of Heat Flow in Suspensions of Nano-Sized Particles \(Nanofluids\)](#), *International journal of heat and mass transfer*, **45(4)**: 855-863 (2002).
- [19] Rosensweig R., "Ferrohydrodynamics Dover", New York, (1997).
- [20] Krakov M., Nikiforov I., [To the Influence of Uniform Magnetic Field on Thermomagnetic Convection in Square Cavity](#), *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **252**: 209-211 (2002).
- [21] Yamaguchi H., Kobori I., Uehata Y., Shimada K., [Natural Convection of Magnetic Fluid in a Rectangular Box](#), *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **201(1-3)**: 264-267 (1999).
- [22] Gavili A., Lajvardi M., Sabbaghzadeh J., [The Effect of Magnetic Field Gradient on Ferrofluids Heat Transfer in a Two-Dimensional Enclosure](#), *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, **7(8)**: 1425-1435 (2010).
- [23] Kikura H., Sawada T., Tanahashi T., [Natural Convection of a Magnetic Fluid in a Cubic Enclosure](#), *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **122(1-3)**: 315-318 (1993).
- [24] Sawada T., Kikura H., Saito A., Tanahashi T., [Natural Convection of a Magnetic Fluid in Concentric Horizontal Annuli under Nonuniform Magnetic Fields](#), *Experimental Thermal and Fluid Science*, **7(3)**: 212-220 (1993).
- [25] Snyder S.M., Cader T., Finlayson B.A., [Finite Element Model of Magnetoconvection of a Ferrofluid](#), *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **262(2)**: 269-279 (2003).
- [26] Zablockis D., Frishfelds V., Blums E., [Numerical Investigation of Thermomagnetic Convection in a Heated Cylinder under the Magnetic Field of a Solenoid](#), *Journal of physics: condensed matter*, **20(20)**: 204134 (2008).
- [27] Asfer M., Mehta B., Kumar A., Khandekar S., Panigrahi P.K., [Effect of Magnetic Field on Laminar Convective Heat Transfer Characteristics of Ferrofluid Flowing through a Circular Stainless Steel Tube](#), *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **59**: 74-86 (2016).
- [28] Hatami N., Banari A.K., Malekzadeh A., Pouranfard A., [The Effect of Magnetic Field on Nanofluids Heat Transfer through a Uniformly Heated Horizontal Tube](#), *Physics Letters A*, **381(5)**: 510-515 (2017).

- [29] Yarahmadi M., Goudarzi H.M., Shafii M., [Experimental Investigation in to 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*, **68**: 601-611 (2015).
- [30] Sundar L.S., Naik M., Sharma K., Singh M., Reddy T.C.S., [Experimental Investigation of Forced Convection Heat Transfer and Friction Factor in a Tube with Fe₃O₄ Magnetic Nanofluid](#), *Experimental Thermal and Fluid Science*, **37**: 65-71 (2012).
- [31] Chiang Y.-C., Chieh J.-J., Ho C.-C., [The Magnetic-Nanofluid Heat Pipe with Superior Thermal Properties through Magnetic Enhancement](#), *Nanoscale research letters*, **7(1)**: 322 (2012).
- [32] Goharkhah M., Ashjaee M., Shahabadi M., [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*, **99**: 113-124 (2016).
- [33] Zhang X., Zhang Y., [Heat Transfer and Flow Characteristics of Fe₃O₄-Water Nanofluids under Magnetic Excitation](#), *International Journal of Thermal Sciences*, **163**: 106826 (2021).
- [34] Sun B., Guo Y., Yang D., Li H., [The Effect of Constant Magnetic Field on Convective Heat Transfer of Fe₃O₄/Water Magnetic Nanofluid in Horizontal Circular Tubes](#), *Applied Thermal Engineering*, **171**: 114920 (2020).
- [35] Mehrez Z., Cafsi A.E., [Heat Exchange Enhancement of Ferrofluid Flow in to Rectangular Channel in the Presence of a Magnetic Field](#), *Applied Mathematics and Computation*, **391**: 125634 (2021).
- [36] Berger P., Adelman N.B., Beckman K.J., Campbell D.J., Ellis A.B., Lisensky G.C., [Preparation and Properties of an Aqueous Ferrofluid](#), *Journal of Chemical Education*, **76(7)**: 943 (1999).
- [37] Lee T., Lee J.H., Jeong Y.H., [Flow Boiling Critical Heat Flux Characteristics of Magnetic Nanofluid at Atmospheric Pressure and Low Mass Flux Conditions](#), *International journal of heat and mass transfer*, **56(1-2)**: 101-106 (2013).
- [38] Bejan A., Kraus A.D., "Heat Transfer Handbook", John Wiley & Sons, (2003).
- [39] Sheikhejad Y., Hosseini R., Avval M.S., [Experimental Study on Heat Transfer Enhancement of Laminar Ferrofluid Flow in Horizontal Tube Partially Filled Porous Media under Fixed Parallel Magnet Bars](#), *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **424**: 16-25 (2017).
- [40] Ali A.H., Kadhum M.H., Saad H.A., [Experimental Study of Forced Convection Heat Transfer Ferrofluid in Pipe Exposed to Magnetic Field](#), *International J. Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, **5**: 12008-12017 (2016).
- [41] Okada K., Ozoe H., [Experimental Heat Transfer Rates of Natural Convection of Molten Gallium Suppressed under an External Magnetic Field in Either the X, Y, or Z Direction](#), **114(1)**: 107-114 (1992).
- [42] Pastoriza-Gallego M., Lugo L., Legido J., Piñeiro M., [Enhancement of Thermal Conductivity and Volumetric Behavior of Fe X O Y Nanofluids](#), *Journal of Applied Physics*, **110(1)**: 014309 (2011).