

بررسی تجربی انتقال گرمایی اجبایی اجباری فرو سیال Fe_3O_4 در لولهی U-شکل تحت میدان مغناطیسی نوسانی

علی اصلاحچی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران،
 eslahchi55@gmail.com

محمدحسن نوبختی*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران،
 m.nobakhti@srbiau.ac.ir

محمد بهشاد شفیعی

استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران،
 behshad@sharif.edu

محمدحسین دیبایی بناب

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران،
 diba_mr60@yahoo.com

چکیده

در این مقاله رفتار هیدرودینامیکی و حرارتی جریان فرو سیال Fe_3O_4 در یک لولهی افقی U-شکل مسی بر روی یک سطح، تحت یک میدان مغناطیسی نوسانی به صورت تجربی بررسی شده است. جریان از طریق یک لوله U-شکل، تحت شرایط مرزی حرارتی لوله، با شار گرمایی یکنواخت که در بعضی از نقاط تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار گرفته است، در رینولدز پایین عبور می کند. هدف از این تحقیق بررسی تجربی اثر پارامترهای استفاده از نانو سیال، درصد حجمی نانو ذرات، اثر فرکانس در میدان مغناطیسی نوسانی و اثر میدان مغناطیسی ثابت در رفتار جریان در سه قسمت لوله مستقیم ورودی، قسمت انحنای لوله و قسمت لوله مستقیم خروجی بوده است. با تحلیل میزان درصد تأثیرگذاری هر یک از پارامترها در قسمت های مختلف، نتایج نشان می دهند که بیشترین تأثیر را میدان مغناطیسی نوسانی با افزایش فاکتور درصد حجمی نانو ذرات در قسمت لوله ورودی مستقیم به میزان 8.8% در فرکانس ۵۰ هرتز داشته است. **واژه های کلیدی:** فرو سیال، اجبایی اجباری، انتقال گرما، لوله U-شکل، میدان مغناطیسی، فرکانس.

Experimental evaluation of forced convective heat transfer of Fe_3O_4 ferrofluid in a U-shaped tube under variable magnetic field

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

A. Eslahchi

M. H. Nobakhti

M. B. Shafii

M. H. Dibaei Bonab

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

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

Department of mechanical engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Shahrud, Iran

Abstract

In this paper, the hydrodynamic and thermal behavior of Fe_3O_4 ferrofluid flow in a horizontal U-shaped copper tube on a surface, is studied experimentally under the effect of a variable magnetic field. The ferrofluid flowed at a low Reynolds value through a U-shaped tube under the thermal boundary conditions of the tube with uniform heat flux affected by magnetic field in some regions. The purpose of the study was the empirical investigation of the effects of using nanofluid, volume percentage of nanoparticles, and frequency on variable magnetic field, and the effect of constant magnetic field on ferrofluid behavior in three regions of the tube, namely straight inlet, curvature, and straight outlet sections. Analysis of the percentage of impact of each parameter in different sections showed that the variable magnetic field had the greatest impact by increasing the volume percentage of nanoparticles in the straight inlet section of the tube by 8.8 % at a frequency of 50 Hz.

Keywords: Ferrofluid, Forced convection, Heat transfer, U-shaped tube, Magnetic field, frequency.

۱-مقدمه

در زمینه اجبایی اجباری نانو سیالات و مکانیزمهای افزایش انتقال گرما در این نوع از سیالات پرداخته می شود. ون و همکاران [۳]، ژوان و همکاران [۴]، سام سندر و همکاران [۵] بیان کردند خواص و رفتار نانوسیال به پارامترهایی همچون خواص سیال پایه و فاز پراکنده شده، غلظت ذرات، اندازه شکل ذرات، همچنین به حضور یا عدم حضور سور فکتانت ها بستگی دارد. کومر و همکاران [۶]، انیشتین [۷]، برینکمن [۸]، هیهات و همکاران [۹] وابستگی هدایت حرارتی را به اندازه ذرات، دما و غلظت آن بیان کردند. همچنین برخی از محققان دیگر تحقیقات مشابه برای نانو سیال های گوناگون تحت شرایط جریان لایه ای انجام داده اند و همه به اتفاق افزایش انتقال حرارت را مشاهده کرده اند. [۱۰-

سیستم های خنک کننده یکی از مهم ترین دغدغه های صنایعی مانند برق و الکترونیک، کامپیوتر، موتور خودروها و هرجایی است که به نوعی با انتقال گرما مواجه می باشند. سیر صعودی در پیشرفت صنایع مختلف و افزایش گرمای تولیدی در حجم های کوچک تر نسبت به گذشته همواره بوده که حاکی از نیاز روزافزون به خنک کاری در حجم های کمتر و به صورت بهینه می باشند. [۱]. بهینه سازی سیستم های انتقال گرمایی موجود، در بیشتر مواقع به وسیله افزایش سطح آن ها صورت می گیرد که همواره باعث افزایش حجم و اندازه این دستگاه ها می شود [۲]. لذا غلبه بر این مشکل، در نسل جدید سیالات خنک کننده، احساس نیاز می شود. در این مطالعه ابتدا به بررسی مطالعات انجام شده

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.nobakhti@srbiau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۵/۳۱

تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۰/۰۲

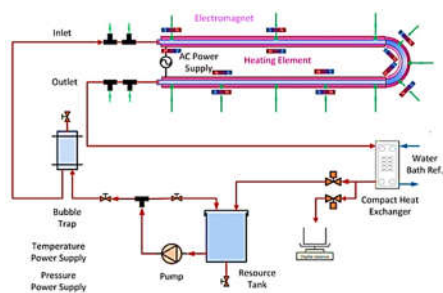
۱۱۳ غفرانی و همکارانش [۱۴]، لاجوردی و همکارانش [۱۵] هرکدام به‌طور جداگانه به بررسی انتقال گرمای جابجایی اجباری فرو سیال گذرنده از یک لوله در حضور میدان مغناطیسی پرداختند نتایج نشان داد که استفاده از میدان مغناطیسی باعث افزایش نرخ انتقال گرمای جابجایی می‌شود. شکبیا و گرجی [۱۶] رفتار حرارتی و هیدرودینامیکی نانوسیال مغناطیسی (آب و ۴ درصد اکسید آهن) در یک مبادله‌کن گرما دو لوله‌ای مستقیم افقی تحت میدان مغناطیسی غیریکنواخت متقاطع با شدت‌های متفاوت به‌صورت عددی بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داده است که اعمال میدان مغناطیسی غیریکنواخت متقاطع سبب ایجاد نیروی کلون در جهت عمود بر جریان فرو سیال می‌شود. که پروفیل سرعت محوری را تغییر داده و درنهایت با ایجاد جفت گردابه منجر به افزایش عددناسلت، ضریب اصطکاک پوسته‌ای و افت فشار فرو سیال می‌شود. در این زمینه محققان دیگری تأثیر میدان مغناطیسی را در افزایش انتقال گرمای جابجایی تحت میدان مغناطیسی به‌صورت مشابه انجام داده‌اند و همه به‌اتفاق افزایش انتقال گرما را گزارش کرده‌اند [۱۷-۲۲]. پالانیسانی و همکاران [۲۳] به‌صورت تجربی به بررسی تأثیر نانو سیال آب/نانولوله کربنی در یک لوله مارپیچ مخروطی شکل پرداخته است. نتایج نشان داده است که با افزایش صد نانو سیال، افت فشار و ضریب انتقال گرمای جابجایی افزایش می‌یابد. آباد و همکاران [۲۴] 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 نداشته است. احمد پور و همکاران [۲۵] 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 گرما به میزان ۶۸/۲ درصد شده است. فرنام و همکاران [۲۶] 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 گرما و افت فشار نسبت به لوله مستقیم افزایش یافته است. یو و همکاران [۲۷] در یک کار تجربی به بررسی پارامترهایی مانند قطر لوله و دبی جرمی در یک لوله خمیده بر روی ضریب انتقال گرمای جابجایی در سوخت مایع پرداخته‌اند. نتایج نشان داده است ضریب انتقال گرما با کاهش قطر لوله و افزایش دبی حجمی افزایش می‌یابد. فو و همکاران [۲۸] به بررسی تجربی تغییرات ضریب انتقال گرمای جابجایی در یک سوخت هیدروکربنی در 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 گرما به میزان ۴۰٪ نسبت به لوله مستقیم گردیده است. کومر و همکاران [۲۹] در یک کار تجربی با استفاده از روش تاگوچی با هشت متغیر ورودی به بهینه‌سازی میزان انتقال گرما سیال آب در یک مکانیزم دو لوله‌ای U-شکل پرداخته‌اند. نتایج نشان داده است که در حالت بهینه میزان انتقال گرما می‌تواند از میزان ۱۷/۱۱٪ به مقدار ۸۶/۴۲٪ افزایش یابد. مطالعات تجربی در مورد لوله U-شکل تحت تأثیر میدان مغناطیسی متناوب در روند افزایش ضریب انتقال گرمای جابجایی به‌طور کامل تاکنون انجام نشده و نیاز به مطالعه بیشتر دارد. روند انتقال گرما فرو سیال تحت یک میدان مغناطیسی متناوب

بسیار پیچیده است و یک تحقیق تجربی می‌تواند کمک شایانی به مطالعه این پدیده کند. هدف اصلی این تحقیق مطالعه انتقال گرمای جابجایی اجباری فروسیال تحت میدان مغناطیسی متناوب و شناسایی عوامل مؤثر (درصد حجمی نانو سیال، عدد رینولدز و فرکانس) بر این رفتار پیچیده در قسمت‌های مختلف لوله U-شکل می‌باشد.

۲- فعالیت‌های تجربی

۱-۲- ساختمان دستگاه

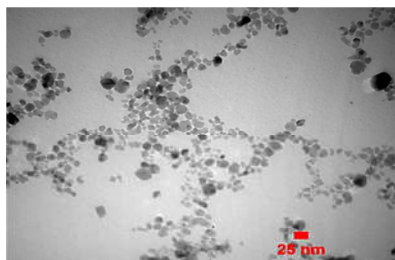
هندسه لوله مسی U- شکل که به‌صورت افقی قرار داده شده، در شکل ۱ نشان داده شده است. که شامل جریان با شرط مرزی شار حرارتی ثابت در جداره و میدان مغناطیسی متناوب خارجی می‌باشد. قطر داخلی لوله ۷/۶ میلی‌متر و قطر خارجی ۹/۶ میلی‌متر و طول آن ۱۷۱۲ میلی‌متر بوده که تحت شار یکنواخت $1291 W/m^2$ و اعمال میدان مغناطیسی متناوب ۸۰۰ گوس قرار گرفته است. که درنهایت تحلیلی در جهت افزایش ضریب انتقال گرمای جابجایی در لوله U- شکل موردنظر، برای درصدهای حجمی، رینولدزها و فرکانس‌های مختلف جریان متناوب در آن صورت پذیرفته است.



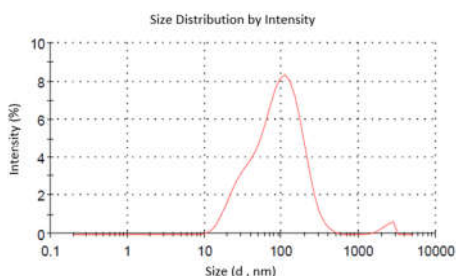
شکل ۱- فیزیک جریان سیال داخل لوله U-شکل تحت شار حرارتی و میدان مغناطیسی متناوب در نرم‌افزار کنترلی (Lab view) متصل به دستگاه

سیستم آزمایشگاهی از یک منبع ذخیره سیال، پمپ، سیستم لوله‌ها که شامل خط اصلی و بایپس‌ها، قسمت تست سیال، سیستم خنک‌کننده و اجزای اندازه‌گیری (دبی و دما) 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 مبادل کن گرما استفاده شده است. برای تنظیم دبی باید از شیر سوزنی تعبیه‌شده در مسیر اصلی و لوله بایپس و شیرهای دوراها استفاده نمود. در پایان چرخه می‌توان از یک شیر دوراها که به یک مخزن دیگر منتهی می‌شود به‌عنوان 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 گرمای ۶۰ وات بر متر را دارد که با تغییر در ولتاژ ورودی می‌توان میزان شار گرمایی را کنترل نمود. ورودی و خروجی قسمت تست می‌بایست با بوش‌های پلاستیکی عایق‌کاری کرد تا اتلاف گرما در راستای محوری را از بین ببرد. همچنین محیط خارجی لوله نیز، به‌خوبی عایق‌بندی شده است. برای اندازه‌گیری و ثبت دما از ۱۱ ترموکوپل نوع k و ۲ ترموکوپل نوع $PT100$ (بالک سیال) و از یک یو

مورد استفاده قرار گرفت) تهیه شد، در نهایت این محلول به تدریج به هیدروکسید سدیم اضافه شد تا در انتها محلول فشرده سیاه رنگی به دست آمد برای کاهش میل به تنشینی نانو ذرات مغناطیسی محلول سیاه را در معرض یک آهنربای قوی قرار دادیم تا این ذرات به طور ناخواسته از HCl و $NaOH$ جدا شوند. در پایان در حالی که همزن با دور 1000 rpm کار می کرد ۸ میلی لیتر از هیدروکسید تترا متیل آمونیم ۲۵٪ به عنوان یک سورفکتانت به محلول اضافه گردید. محلول به دست آمده مخلوط پایدار از ذرات مغناطیسی با قطر متوسط ۲۵ نانومتر می باشد. در شکل ۳ به منظور بررسی ابعاد محلول و صحت اندازه محلول در مقیاس نانو از آزمایش TEM استفاده شده است از آنجاکه تشکیل تصویر در آنالیز TEM نیاز به عبور تعداد زیادی الکترون از نمونه دارد، ضخامت نمونه باید آن قدر کم باشد (حدود ۵ میکرومتر) که الکترون ها بتوانند از آن عبور کنند. همچنین نمونه های تحت بررسی باید جامد باشند. بسته به چگالی مواد، الکترون ها ممکن است از بخش هایی از جسم بگذرند و به صفحه فلورسانس برخورد کنند و تصویر سایه ماندنی از نمونه ایجاد کنند که میزان تیرگی بخش های مختلف جسم، به چگالی مواد در آن بخش ها وابسته است. هر چه جسم کم چگال تر باشد، تصویر تیره تر خواهد بود. از این رو محلول به دست آمده در تصویر ۳ مخلوط پایدار از ذرات مغناطیسی می باشد، که به عنوان نمونه اندازه قطر متوسط 25 nm بر روی آن نشان داده شده است. در شکل ۴ شدت توزیع ذرات از نظر ابعاد توسط آزمایش DLS تهیه شده است. داده آنالیز DLS به صورت شدتی (Intensity) گزارش شده است. در نمودار شدتی، شدت پراکندگی نور از ذرات جامد گزارش می شود. طبق گزارش های تجربی، میزان پراکندگی نور حدوداً با توان ۶ اندازه ذرات متناسب است بنابراین در نمودار شدتی، ذرات بزرگ تر پیک بسیار بزرگ تری نسبت به ذرات کوچک تر دارند. از این رو پراکندگی ذرات با قطر 25 nm حدود ۴٪ گزارش شده است که نمونه آن در تصویر ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳- آزمایش TEM فرو سیال تهیه شده



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

اس بی کارت ($NA\ 6009$) استفاده شده است. دما توسط سیگنال های مقاومتی اهمی توسط حسگرها به یک دستگاه مبادل کن ارسال می گردد و از آنجا به یو اس بی کارت و نرم افزار *Lab view* متصل به سیستم آزمایش، جهت آنالیز ارسال می شود. توسط این برنامه مقدار دماها را در هر میلی ثانیه دلخواه می توان کنترل نمود. برای دستیابی به حالت پایدار در سیستم، سیال خروجی از قسمت تست که تحت تأثیر شارگرمایی ثابت قرار گرفته است، می بایست گرمای جذب شده خود را به نحوی دفع نماید. بدین منظور پس از خروج سیال از لوله مسی، این سیال وارد یک مبادل کن گرمای پوسته لوله ای می شود که مبرد آن توسط یک حمام آب سرد تأمین می شود. برای ایجاد میدان مغناطیسی مناسب در اطراف لوله از دوازده عدد هسته ی فریت استفاده گردیده است. هسته ها می بایست از نظر اندازه به گونه ای انتخاب می گردیدند که با ضخامت لوله تست متناسب باشد. برای ایجاد شار مغناطیسی مناسب از ۲۰۰۰ دور سیم مسی با پوشش لاک ۵ به قطر 0.5 میلی متر استفاده شده است. طراحی این دستگاه به گونه ای است که در آن از یک ترانسفورماتور و یک مدار الکترونیکی استفاده شده است که قابلیت تغییرات فرکانس را از 10 تا 99 هرتز و ولتاژ را از 10 تا 1000 ولت ایجاد می کند. این سیستم توانایی ایجاد حداکثر میدان مغناطیسی 1000 گوس را در هر آهنربا دارد. میدان های مغناطیسی ذکر شده توسط یک دستگاه گاوستر ($HT201\ \text{gauss meter}$) اندازه گیری شده است. برای از بین بردن اغتشاشاتی که از طرف میدان مغناطیسی متناوب بر روی ترموکوپل ایجاد می شود از سپر مغناطیسی استفاده شده است در نتیجه مشکلات تداخل امواج مغناطیسی برای خواندن دما از ترموکوپل حل شده است. شکل ۲ نماهایی از دستگاه آزمایش را نشان می دهند.



شکل ۲- نماهایی از دستگاه آزمایشگاهی (الف-ب)

۲-۲- تهیه نانو سیال

ذرات مغناطیسی مورد استفاده در این تحقیق توسط روش هم رسوبی سنتز شده اند. 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 می شود. برای تهیه هیدروکسید سدیم مورد نیاز، 250 میلی لیتر آب مقطر، با 15 گرم هیدروکسید سدیم جامد حل شده است. یک محلول از $5/2$ گرم $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ و 2 گرم $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ و $1/85$ میلی لیتر هیدرو کلراید (هیدرو کلراید برای جلوگیری از روند تنشینی

۳-۲- اعتبار سنجی سیستم آنالیز انتقال گرمای جابجایی و پردازش داده‌ها

برای تجزیه و تحلیل انتقال حرارت، ضریب انتقال گرمای جابجایی (h) با داده‌های تجربی به شرح زیر محاسبه شده است. در ابتدا به منظور کسب اطمینان از ثابت بودن شار گرمایی اعمال شده به جداره لوله، شار گرمایی در آزمایش با آب غیر یونیزه با استفاده از اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی و طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

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

که ρ_{bf} چگالی آب، \dot{m} دبی حجمی آب، $c_{p,bf}$ ظرفیت گرمایی 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 گرمایی اعمال شده توسط منبع تغذیه نیز از رابطه (۲) اندازه‌گیری و محاسبه می‌شود.

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

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

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

"q" 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.

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

در این رابطه \dot{m} برابر دبی است که به صورت دلخواه می‌توان در بازه 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.

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

d_{in} برابر قطر داخلی لوله و k رسانایی گرمایی سیال در دمای مربوطه است. به منظور بررسی صحت و دقت دستگاه آزمایش، قبل انجام آزمایشات روی نانو سیالات ولوله 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 پیش‌بینی معادله شاه در مورد جریان آب غیر یونیزه در اعداد رینولدز مختلف صورت می‌گیرد. معادله شاه به پیش‌بینی رفتار انتقال گرمای جابجایی جریان سیال داخلی می‌پردازد و تاکنون مبنای اعتبار سنجی بسیاری از مطالعات تجربی صورت گرفته می‌باشد. این معادله به صورت رابطه (۶) است.

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

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

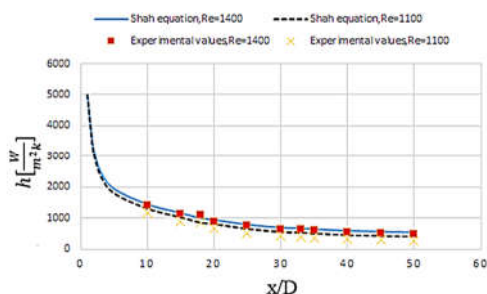
$$Re = \frac{4 \dot{m}}{\pi d_{in} \mu} \quad (7)$$

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

که μ لزجت 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 و از طرفی در یک میدان مغناطیسی، B القای مغناطیسی است و فرکانس میدان مغناطیسی به صورت رابطه (۹) تعریف می‌شود.

$$F = \frac{1}{\tau} \quad (9)$$

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



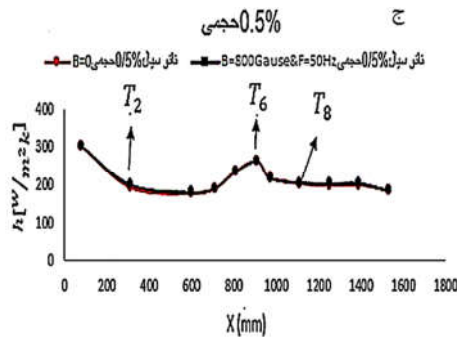
شکل ۵- مقایسه مقادیر ضریب انتقال گرمای جابجایی آب مقطر با معادلات شاه

۳-نتایج و بحث

آزمایشات با بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر روی ضریب انتقال گرمای جابجایی توسط سه حسگر نمادین T_2 ، T_6 و 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٪، ۱٪ و ۲٪ حجمی، در رینولدزهای مختلف، با فرکانس‌های ۱۰ Hz، ۳۰ Hz و ۵۰ Hz مورد بررسی قرار گرفته‌اند. که تحلیل نتایج به دست آمده، در این بخش ارائه گردیده است.

۳-۱- نتایج و بحث بررسی تأثیر استفاده از فرو سیال Fe_3O_4 در درصدهای حجمی به جای آب مقرر در لوله U-شکل تحت میدان مغناطیسی نوسانی

با افزایش درصد حجمی ذرات فرو تحت تأثیر میدان مغناطیسی نوسانی، بهبود بیشتری در انتقال گرمای جابجایی نسبت به حالت بدون اعمال میدان مغناطیسی مشاهده می‌شود. با مقایسه در نمودارهای شکل ۶، مشخص می‌شود که اثرات ناشی از میدان مغناطیسی در درصدهای حجمی بالاتر به علت مکانیزم جذب و جابجایی ذرات و آشفستگی لایه مرزی و احتمالاً تشکیل توده‌ها با اندازه بزرگتر نسبت به حالت بدون میدان مغناطیسی بیشتر است. از طرفی با ایجاد جریان پیشگی و افزایش سرعت در قسمت انحنای لوله که در محدوده فاصله ۸۰۰ میلی‌متری، از ابتدای لوله که در نمودارها نمایش داده شده است، فرایند جذب ذرات توسط میدان مغناطیسی را سخت‌تر نموده و اثر میدان مغناطیسی را بر تغییرات ضریب انتقال گرمای جابجایی را به شدت ناچیزی می‌کند. لذا در این محدوده نقاط در نمودارها بر روی هم منطبق گردیده‌اند. همچنین پیش‌بینی می‌گردد آثار باقیمانده جریان پیشگی در قسمت لوله مستقیم خروجی بعد از انحنای بیشتر از ناحیه لوله مستقیم ورودی قبل از انحنای می‌باشد، که این پدیده، اثرگذاری بیشتر میدان مغناطیسی نوسانی را در ناحیه لوله مستقیم ورودی نسبت به ناحیه لوله مستقیم خروجی، بر ضریب انتقال گرمای جابجایی در نمودارهای شکل ۶ نشان داده شده است. در نمودارهای (الف، ب، ج) در شکل ۶ و جدول ۱ می‌توان تأثیرگذاری درصد افزایش (h) در میدان مغناطیسی نوسانی ۵۰ هرتز را نسبت به حالت بدون میدان مغناطیسی، برای نقاط مورد آزمایش (T_8, T_6, T_2) در لوله U-شکل به شعاع خم ۱۰ سانتیمتر، برای عدد رینولدز ۵۵۹ و برای درصدهای حجمی مختلف مشاهده نمود. همان‌طور که مشخص است بیشترین افزایش ضریب انتقال گرما در حسگر T_2 به ازای ۲٪ حجمی به میزان ۸/۸٪ می‌باشد.



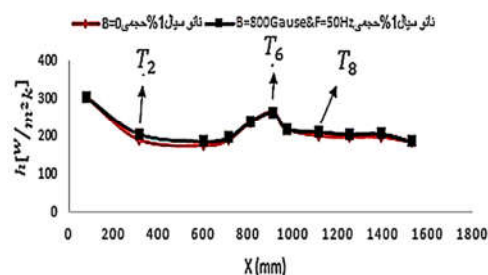
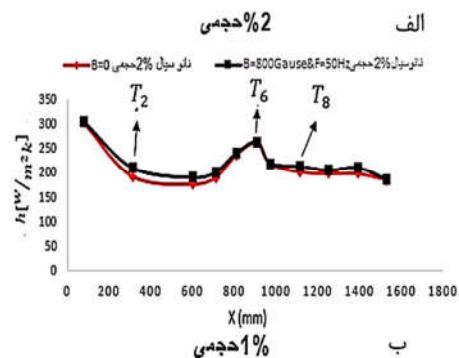
شکل ۶- تغییرات ضریب انتقال گرمای جابجایی در لوله U شکل در میدان مغناطیسی نوسانی ۵۰ هرتز نسبت به حالت بدون میدان مغناطیسی، $Re=559, R=10cm$ (الف: ۲٪، ب: ۱٪، ج: ۰.۵٪ حجمی)

جدول ۱- تأثیرگذاری درصد افزایش (h) در میدان مغناطیسی نوسانی ۵۰ هرتز نسبت به حالت بدون میدان مغناطیسی در نواحی مختلف لوله U-شکل در $R=10cm, Re=559$

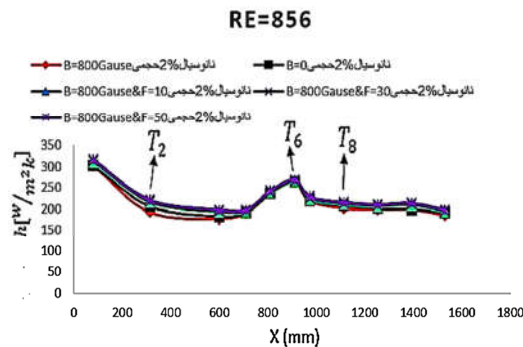
درصد حجمی	در حسگر T_2 دمایی	در حسگر T_6 دمایی	در حسگر T_8 دمایی
۲٪ حجمی	۸/۸٪	۰/۱٪	۵/۶٪
۱٪ حجمی	۵/۳٪	۰٪	۴/۷٪
۰.۵٪ حجمی	۴/۳٪	٪۰	۲/۴٪

۳-۲- تأثیر افزایش فرکانس در میدان مغناطیسی نوسانی و اعمال میدان مغناطیسی ثابت بر ضریب انتقال گرمای 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 گرما بهبود می‌یابد. از طرفی اعمال میدان مغناطیسی ثابت منجر به افزایش لزجت سیال شده و مانع جریان سیال می‌شود. این پدیده حرکت سیال را کند می‌کند و موجب کاهش انتقال گرمای جابجایی می‌شود. در نمودار شکل ۷ اثر تغییرات فرکانس بر افزایش انتقال حرارت جابجایی در قسمت مستقیم ابتدای لوله U-شکل (محل قرارگیری حسگر T_2) که هنوز اثرات جریان پیشگی در قسمت انحنای بر آن تأثیر زیادی نگذاشته است، بیشتر مشهود است. زیرا شانس بیشتر ذرات مغناطیسی برای جذب شدن و جابجایی و اختلال اغتشاش لایه مرزی گرمایی در سرعت‌های پایین و عدم حضور جریان پیشگی وجود دارد. با ایجاد جریان پیشگی و افزایش سرعت، بخصوص در قسمت خم لوله در محدوده فاصله ۸۰۰ میلی‌متری تا ابتدای لوله (محل قرارگیری حسگر T_6) فرایند جذب ذرات سخت‌تر می‌شود و تأثیرگذاری فرکانس بر بهبود انتقال گرما 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 حسگر T_8) کاهش پیدا کرده است. در نهایت پیش‌بینی می‌گردد همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است تغییر فرکانس نوسانی تأثیر ناچیزی بر انتقال گرمای جابجایی نسبت به



حالت بدون میدان مغناطیسی در قسمت‌های مختلف لوله U-شکل برای رینولدز ۸۵۶ داشته است.

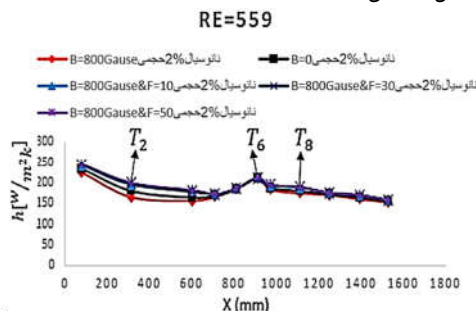


شکل ۷- تغییرات ضریب انتقال گرمای جابجایی در حضور میدان مغناطیسی نوسانی در فرکانس‌های مختلف برای جریان نانو سیال ۲ درصد حجمی در لوله U شکل، Re=856

جدول ۲- تأثیر گذاری درصد افزایش (h) میدان مغناطیسی نوسانی در فرکانس‌های مختلف نسبت به حالت بدون میدان مغناطیسی در نواحی

مختلف لوله در رینولدز ۸۵۶			
فرکانس	در حسگر T_2 دمایی	در حسگر T_6 دمایی	در حسگر T_8 دمایی
F=10Hz	۴/۱۶٪	۰٪	۱/۴٪
F=30Hz	۴/۱۸۶٪	۰٪	۱/۷٪
F=50Hz	۴/۱۹۵٪	۰٪	۱/۹۵٪

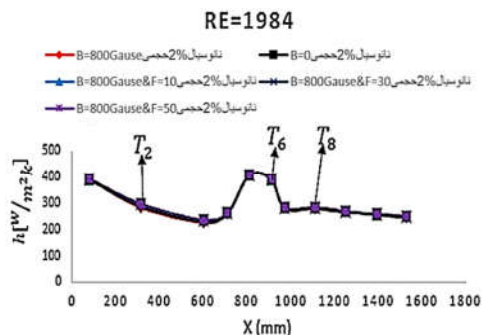
که میدان مغناطیسی هیچ تأثیری بر پروسه انتقال گرما ندارد و با کاهش رینولدز و دبی جریان، تأثیرات حضور میدان نوسانی بیشتر نمایان می‌شود. در جداول ۳ و ۴ میزان این تأثیرگذاری در نواحی مختلف لوله U-شکل مشخص شده است.



شکل ۸- تغییرات ضریب انتقال گرمای جابجایی در حضور میدان مغناطیسی نوسانی در فرکانس‌های مختلف برای جریان نانو سیال ۲ درصد حجمی در لوله U شکل، Re=559

جدول ۳- تأثیر گذاری درصد افزایش (h) میدان مغناطیسی نوسانی در فرکانس‌های مختلف نسبت به حالت بدون میدان مغناطیسی در نواحی

مختلف لوله در رینولدز ۵۵۹			
فرکانس	در حسگر T_2 دمایی	در حسگر T_6 دمایی	در حسگر T_8 دمایی
F=10Hz	۸/۱۶٪	۰٪	۴/۳٪
F=30Hz	۸/۷۴٪	۰٪	۴/۴۵٪
F=50Hz	۸/۸٪	۰٪	۴/۶۵٪



شکل ۹- تغییرات ضریب انتقال گرمای جابجایی در حضور میدان مغناطیسی نوسانی در فرکانس‌های مختلف برای جریان نانو سیال ۲ درصد حجمی در لوله U-شکل، Re=1984

جدول ۴- تأثیر گذاری درصد افزایش (h) میدان مغناطیسی نوسانی در فرکانس‌های مختلف نسبت به حالت بدون میدان مغناطیسی در نواحی

مختلف لوله در رینولدز ۱۹۸۴			
فرکانس	در حسگر T_2 دمایی	در حسگر T_6 دمایی	در حسگر T_8 دمایی
F=10Hz	۰/۴۸٪	۰٪	۰/۱۲٪
F=30Hz	۰/۴۹٪	۰٪	۰/۱۳٪
F=50Hz	۰/۵۰٪	۰٪	۰/۱۴٪

۳-۳- تأثیر حضور میدان مغناطیسی نوسانی با افزایش عدد رینولدز بر ضریب انتقال گرمای جابجایی

در شکل‌های ۸ و ۹ اثرگذاری میدان مغناطیسی نوسانی بر ضریب انتقال گرمای جابجایی را در تغییرات عدد رینولدز نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، اثرگذاری میدان مغناطیسی نوسانی نسبت به حالت بدون میدان مغناطیسی از ابتدای لوله تا فاصله حدود ۸۰۰ میلی‌متری در محدوده قرارگیری حسگر T_2 در رینولدز ۵۵۹ در فرکانس‌های مختلف به مراتب بیشتر از اثرگذاری آن در رینولدز ۱۹۸۴ می‌باشد. این در حالی است که با شروع جریان‌های ثانویه و پیچشی در محدوده انحنای لوله جایی که حسگر T_6 در آنجا قرار داده شده است در هر دو اعداد رینولدز ۵۵۹ و ۱۹۸۴ عملاً تأثیرگذاری میدان مغناطیسی به شدت کاهش می‌یابد، زیرا جریان‌های ثانویه فرایند جذب ذرات را توسط میدان مغناطیسی با مشکل مواجه می‌کند. با ادامه جریان بعد از انحنای لوله در جایی که حسگر T_8 در آن قرار داده شده است. مجدداً با کم‌رنگ‌تر شدن جریان‌های ثانویه تأثیر میدان مغناطیسی نوسانی در رینولدز ۵۵۹ نسبت به رینولدز ۱۹۸۴ بیشتر می‌گردد. این‌رو تأثیرات میدان مغناطیسی در اعداد رینولدز پایین مشاهده می‌شود. به طوری که در اعداد رینولدز بالا تقریباً می‌توان گفت

۳-۴- مکانیزم افزایش انتقال گرما

انتقال ذرات، آشفنگی در لایه مرزی حرارتی، حرکت براونی، ایجاد جریان‌های ثانویه و پیچشی، افزایش هدایت گرمایی سیال با افزایش غلظت نانو سیال و ایجاد میدان مغناطیسی نوسانی از مهم‌ترین عوامل در بهبود انتقال گرمای جابجایی هستند. تمامی این مکانیزم‌ها با یکدیگر در رقابت هستند. وقتی تمام این مکانیزم‌ها هم‌زمان رخ می‌دهند، فرایند انتقال گرما پیچیده‌تر خواهد شد. با توجه به اینکه هدف این مقاله بررسی عوامل تأثیرگذار بر روی اثر قدرت میدان مغناطیسی در افزایش انتقال گرمای جابجایی اجباری می‌باشد به تحلیل و نحوه عملکرد آن‌ها بر روی میدان مغناطیسی پرداخته می‌شود. مایعات دارای رسانای گرمایی کمی بوده، اما سوسپانسیون‌های فلزی دارای هدایت حرارتی بالاتری می‌باشند. استفاده از سوسپانسیون نانو ذرات مغناطیسی در سیال پایه آب منجر به بهبود انتقال حرارت می‌شود. مهم‌ترین عامل این بهبود، خواص حرارتی بهتر فرو سیال‌ها و سوسپانسیون‌ها نسبت به سیال پایه آن‌ها به‌ویژه ضریب رسانای گرمایی می‌باشد. به‌طور کلی رسانایی گرمایی جامدات در مقایسه با سیالات بیشتر است و نتایج تجربی و مدل‌های ریاضی ارائه شده تاکنون نیز بیانگر این موضوع می‌باشند. [۲۰] از آنجاکه ضریب انتقال گرمای جابجایی متناسب با $\frac{k}{\delta_T}$ است که در آن k رسانایی گرمایی و δ_T ضخامت لایه مرزی گرمایی است. افزایش رسانایی گرمایی موجب افزایش انتقال گرمای جابجایی می‌شود. عامل دیگری که ممکن است منجر به این بهبود شود حرکت آشفته ذرات فوق‌ریز می‌باشد که فرایند تبادل گرما را شتاب می‌دهند که با افزایش درصد حجمی ذرات فرو بهبود بیشتری در انتقال گرمای جابجایی مشاهده می‌شود. [۱۰] همچنین وقتی تحت یک میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند، رسانایی گرمایی را نیز افزایش می‌دهند. مغناطیسی کردن باعث می‌شود تا ذرات مغناطیسی به سمت لایه مرزی گرمایی جذب شوند و روند انتقال ذرات افزایش یابد. با جذب ذرات مغناطیسی لایه مرزی گرمایی، می‌توان سبب آشفنگی لایه مرزی لایه‌ای شد. علاوه بر این، افزایش در غلظت حجمی در حضور یک میدان مغناطیسی متناسب، سبب افزایش انتقال گرما خواهد شد زیرا مکانیزم جذب ذرات به سمت دیواره تشدید می‌شود. همچنین ممکن است که توده‌هایی در سیال تشکیل شوند که مانند ذراتی با ابعاد بزرگ‌تر عمل کنند. که افزایش اندازه نانو ذرات منجر به افزایش رسانایی گرمایی و در نتیجه بهبود انتقال گرمای جابجایی می‌شود. بنابراین تشکیل توده‌ها که حکم افزایش اندازه ذرات را دارند نیز می‌تواند به‌عنوان عاملی برای بهبود انتقال گرما معرفی کرد. تغییر فرکانس نوسان به‌جز مقداری ناچیز در رینولدزهای پایین و درصدهای حجمی بالا تأثیری بر انتقال گرمایی جابجایی ندارد. از طرفی ایجاد جریان‌های ثانویه در انحنای لوله و افزایش عدد رینولدز تأثیرات حضور میدان مغناطیسی را کمتر نمایان می‌کنند. زیرا ذرات مغناطیسی، شانس بیشتری برای انتقال و آشفنگی در لایه مرزی گرمایی، در سرعت‌های پایین دارند. لذا پیش‌بینی می‌گردد از بین پارامترهای تأثیرگذار بر روی میدان مغناطیسی در افزایش ضریب انتقال گرمای جابجایی، تأثیرگذاری غلظت حجمی در شرایطی که مقدار عدد رینولدز پایین بوده و جاهایی از لوله U -شکل که جریان‌های ثانویه کمتر تأثیرگذار بوده مشهودتر است.

۴- نتیجه‌گیری

در این قسمت نتایج آزمایش‌ها مربوط به انتقال گرما برای لوله U -شکل در شار گرمایی ثابت و رینولدزهای مختلف، برای نانو سیال با غلظت‌های متفاوت برای یک میدان مغناطیسی نوسانی در فرکانس‌های مختلف ارائه شده است که در مجموع نتایج زیر به دست آمده است.

۱. اثرات ناشی از میدان مغناطیسی نوسانی بر روی افزایش ضریب انتقال گرما در درصدهای حجمی بالاتر بیشتر است؛ زیرا مکانیزم جذب ذرات توسط میدان مغناطیسی نوسانی تشدید می‌گردد. به طوری که بیشترین درصد افزایش در ناحیه لوله مستقیم ورودی برای درصد حجمی ۲٪، در فرکانس ۵۰ هرتز، به میزان ۸/۸٪ بوده است.
۲. استفاده از لوله U -شکل به‌طور قابل‌توجهی ضریب انتقال گرمای جابجایی را افزایش داده است. این امر ناشی از ایجاد جریان ثانویه و تغییر پروفیل سرعت و دما در این لوله‌ها هست. ولیکن این امر بر روی تأثیر میدان مغناطیسی بر ضریب انتقال گرمای جابجایی اثر منفی داشته به طوری که هر جا جریان‌های ثانویه اثرگذاری داشته‌اند تأثیر میدان مغناطیسی بر ضریب انتقال گرمای جابجایی کم‌رنگ شده است.
- ۳- جریان ثانویه به شدت تأثیرگذاری میدان مغناطیسی نوسانی را بر افزایش ضریب انتقال گرمای جابجایی کاهش می‌دهد. درصد این کاهش ابتدا در قسمت انحنای محل ایجاد جریان ثانویه بوده و بعد در قسمت لوله مستقیم خروجی، که آن به دلیل هم‌جهت بودن سیال با جریان‌های ثانویه ایجاد شده، در مسیر جریان به سمت جلو بوده، می‌باشد. که در نهایت بیشترین تأثیرگذاری میدان مغناطیسی در قسمت لوله مستقیم ورودی به علت حضور کم جریان‌های پیچشی می‌باشد.
- ۴- اعمال میدان مغناطیسی ثابت منجر به افزایش لزجت سیال شده و مانع جریان سیال می‌شود. این پدیده حرکت سیال را کند می‌کند و موجب کاهش انتقال گرمای جابجایی می‌شود.
- ۵- تغییر فرکانس نوسانی به‌جز مقدار ناچیز در رینولدزهای پایین و درصدهای حجمی بالا، تأثیری بر انتقال گرمای جابجایی ندارد.

۵- مراجع

- [1] Choi S.U., Enhancement thermal conductivity of fluids with nanoparticles, 1995.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Xuan Y and Li Q., Heat transfer enhancement of nanofluids. International Journal of heat and fluid flow, Vol.21, No.1, pp.58-64, 2000.
- [5] Sundar L.S., 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.
- [6] 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.
- [7] Einstein A., Eine neue bestimmung der molekul dimensionen; Annalen Der physic, vol.324, pp.289-306, 1906
- [8] Brinkman H., the viscosity of concentrated suspensions and solutions. The journal of chemical physics, vol.20, pp.571-571, 2004
- [9] Heyhat- MM., Know sary f., Rashidi AM., Momen Pourmu.,

- International Journal of Thermal Sciences;146:106110,2019.
- [26] Farnam M., Khoshvaght-Aliabadi M., Asadollahzadeh MJ. 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.
- [27] 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.
- [28] Fu Y., Wen J., Tao Z., Xu G., Huang H., Experimental research on convective heat transfer of supercritical hydrocarbon fuel flowing through U-tube tubes. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 116, No.1, pp. 43-55,2017.
- [29] 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*,1;83:101723,2020.
- [30] Tashtoush B., Magableh A., Magnetic field effect on heat transfer and fluid flow characteristics of blood flow in multi-stenosis arteries. *Heat and Mass transfer*, Vol. 44, No.3, pp. 297-304,2008.
- [31] Pirmohammadi M., Ghassemi M., Effect of magnetic field on convection heat transfer inside a tilted square enclosure. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, No.7, pp. 776-780,2009.
- [32] Ashouri M., Ebrahimi B., Shafii MB., Saidi MH., Saidi MS., Correlation for Nusselt number in pure magnetic convection ferrofluid flow in a square cavity by a numerical investigation. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 322, No.22, pp. 3607-3613,2010.
- [33] Hojjat M., Etemad SG., Bagheri R., Thibault J. Convective heat transfer of non-Newtonian nanofluids through a uniformly heated circular tube. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, No.4, pp. 525-531,2011.
- Amrollahi A., Experimental investigation of laminar convective heat transfer and pressure drop of water- based Al2O3 Nano fluids in fully developed flow regime. *Expterm fluid SCi* , Vol. 44, pp. 483-486,2012.
- [10] Xuan Y., Li Q., Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids. *J. Heat transfer*, Vol. 125, No.1, pp. 151-155,2003.
- [1] Krichler M., Odenbach S., Thermal conductivity measurements on ferrofluids with special reference to measuring arrangement. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 326, No.1, pp. 85-90,2013.
- [12] Özerinç S., Yazıcıoğlu AG., Kakaç S.. Numerical analysis of laminar forced convection with temperature-dependent thermal conductivity of nanofluids and thermal dispersion. *International journal of thermal sciences*, Vol. 62, No.1, pp. 138-148,2012.
- [13] Jung JY., Oh HS., Kwak HY., Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels. *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 52, No.1, pp. 466-472,2009.
- [14] Yarahmadi M., Goudarzi HM., Shafii MB., Experimental investigation into laminar forced convective heat transfer of ferrofluids under constant and oscillating magnetic field with different magnetic field arrangements and oscillation modes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 68, No.1, pp. 601-611,2015.
- [15] Lajvardi M., Moghimi-Rad J., Hadi I., Gavili A., Isfahani TD., Zabihi F., Sabbaghzadeh J., Experimental investigation for enhanced ferrofluid heat transfer under magnetic field effect. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 322, No.21, pp. 3508-3513,2010.
- [16] Shakiba A., Gorji M., Numerical investigation of ferrofluid flow and heat transfer characteristics through a double pipe heat exchanger. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No.2, pp. 41-52,2015.
- [17] Sheikholeslami M., Gorji-Bandpay M., Ganji DD., Magnetic field effects on natural convection around a horizontal circular cylinder inside a square enclosure filled with nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No.7, pp. 978-986,2012.
- [18] Mahmoudi AH., Abu-Nada E., Combined effect of magnetic field and nanofluid variable properties on heat transfer enhancement in natural convection. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, Vol. 63, No.6, pp. 452-472,2013.
- [19] Altan CL., Elkatmis A., Yüksel M., Aslan N., Bucak S., Enhancement of thermal conductivity upon application of magnetic field to Fe3O4 nanofluids. *Journal of Applied Physics* , Vol. 110, No.9:093917,2011.
- [20] Gavili A., Zabihi F., Isfahani TD., Sabbaghzadeh J., The thermal conductivity of water base ferrofluids under magnetic field. *Experimental Thermal and Fluid Science* , Vol. 41, No.1, pp. 94-98,2012.
- [21] 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*, Vol. 99, No.1, pp. 113-124,2016.
- [22] Malekzadeh A., Heydarinasab A., Jahangiri M., Magnetic field effect on laminar heat transfer in a pipe for thermal entry region. *Journal of mechanical science and technology*, Vol. 25, No.4, pp. 877-884,2011 .
- [23] 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.
- [24] Abadeh A., Sardarabadi M., Abedi M., Pourramezan M., Passandideh-Fard M., Maghrebi MJ., 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.
- [25] Ahmadvpour MM., Akhavan-Behabadi MA., Experimental investigation of heat transfer during flow condensation of HC-R600a based nano-refrigerant inside a horizontal U-shaped tube.