

بررسی تجربی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال Fe_3O_4 تحت میدان مغناطیسی متغیر

محمد حسین دیبایی بناب^{۱*}، محمد بهشاد شفیعی^۲ و محمد حسن نوبختی^۱

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۱/۱۲/۰۸، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۲/۰۲/۱۴، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۲/۰۳/۲۸

چکیده

این مقاله یک تحقیق تجربی بر روی انتقال حرارت جابجایی اجباری جریان فروسیال در داخل یک لوله مسی مدور در حضور یک میدان مغناطیسی متناوب را مطالعه می‌کند. جریان از طریق یک لوله تحت شار حرارتی یکنواخت و آرام عبور می‌کند. شدت بخشیدن به انتقال ذرات و آشفتگی در لایه مرزی با استفاده از اثر میدان مغناطیسی بر روی نانوذرات برای افزایش انتقال حرارت بیشتر، هدف اصلی در این کار بوده است. رژیم‌های جابجایی پیچیده ناشی از فعل و انفعالات میان نانوذرات مغناطیسی تحت شرایط مختلف مورد مطالعه قرار گرفتند. فرآیند انتقال حرارت با غلظت‌ها و حجم‌های مختلف، تحت فرکانس‌های مختلف میدان مغناطیسی اعمال شده و بصورت دقیق مورد بررسی قرار گرفتند. ضریب انتقال حرارت جابجایی آب مقطر و فروسیال اندازه‌گیری و تحت شرایط مختلف با یکدیگر مقایسه شدند. اثرات میدان مغناطیسی، غلظت حجمی و عدد رینولدز بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته و شرایط بهینه بدست آمده است. افزایش فرکانس متناوب میدان مغناطیسی و کسر حجمی، منجر به افزایش بهتر انتقال حرارت شده است. اثر میدان مغناطیسی در اعداد رینولدز کم بالاتر بوده، و حداکثر افزایش ۲۷/۶٪ می‌باشد که در انتقال حرارت جابجایی مشاهده گردید.

واژه‌های کلیدی: انتقال حرارت جابجایی، فروسیال، میدان مغناطیسی متناوب.

۱- مقدمه

و غیره به گسترش علم نانو و مهندسی نانو در میان پژوهش‌های دیگر به طور مشهود پرداخته شده است. عوامل پیچیده و گوناگون بسیار زیادی مانع از روند انتقال حرارت وجود دارد. در نتیجه، پایین بودن ضریب انتقال حرارت در بسیاری از زمینه‌های انتقال حرارت مانند سیستم‌های کوچک، منجر به یک نگرانی قابل توجه شده است. خوشبختانه، ظهور نانوسیال و فروسیال در زمینه انتقال حرارت می‌تواند یک راه حل عملی نسبتاً قابل توجه برای مشکلات احتمالی پیش‌رو باشد [۱،۲]. فروسیال‌ها

در دو دهه گذشته، مطالعات پژوهشی نشان داده‌اند که مهندسی نانو و علم نانو، پتانسیل بسیار زیادی را به صورت پویا برای تکامل تکنولوژی در قرن جدید دارا هستند. پیشرفت‌های اخیر در میکرو و سیستم‌های نانو الکترومکانیکی (MEMS و NEMS)، میکروفلوئید، نانوفلوئید و فروسیال نشان دهنده اهمیت بالای این زمینه جدید علمی می‌باشند. خیلی از تحقیقات، مقالات، کتاب‌ها

* عهده‌دار مکاتبات: محمد حسین دیبایی بناب

نشانی: تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا

تلفن: ۰۲۱-۴۴۸۶۵۱۹۳، دورنگار: ۰۲۱-۴۴۸۶۵۱۹۳، پست الکترونیکی: diba_mr60@yahoo.com

استفاده از روش سیم داغ وجود دارد. بسیاری از محققان نانوسیال‌های مختلف را با انواع مختلفی از ذرات مانند نانوذرات مس، نانوذرات طلا، نانولوله‌های کربنی [۸]، نانولوله‌های کربنی چند دیواره، اکسید مس، دی اکسید سیلیکون و نقره [۹] با روش‌های گوناگون سنتز نموده‌اند. علاوه بر این، برخی از تحقیقات در مورد هدایت حرارتی مایعات مغناطیسی و فروفلوئیدها وجود دارد. لی (Li) و همکارانش [۱۰] اندازه‌گیری ویسکوزیته و خاصیت هدایت حرارتی مایعات مغناطیسی را تحت میدان‌های مغناطیسی خارجی بررسی کردند و اثرات غلظت‌های حجمی و سورفکتانت بر روی خواص حرارتی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش قدرت میدان مغناطیسی، افزایش ویسکوزیته و هدایت حرارتی بوجود می‌آید مگر اینکه ذرات مغناطیسی اشباع شده باشند. گاویلی (Gavili) و همکاران [۱۱] اندازه‌گیری رسانایی گرمایی را در زمان حالت اشباع فروسیال تحت نیروهای مختلف میدان مغناطیسی مورد مطالعه قرار دادند و به حداکثر افزایش ۲۰۰ درصدی در هدایت حرارتی رسیدند. علاوه بر این، تحقیقات متعدد تجربی و عددی در افزایش انتقال حرارت جابجایی اجباری جریان‌های آرام و آشفته با موضوعات مختلف مانند اثر نوع ذرات، غلظت ذرات و غیره وجود دارد که نتایج آنها منجر به افزایش قابل توجه در ضریب انتقال حرارت شده است. ژوان (Xuan) و لی (Li) [۱۲] مطالعات تحقیقاتی بر روی انتقال حرارت اجباری نانوسیال تحت شرایط جریان آشفته و اثرات غلظت حجمی و عدد رینولدز برای افزایش انتقال حرارت جابجایی انجام داده‌اند. ژانگ (Jung) و همکارانش [۱۳] به بررسی انتقال حرارت اجباری نانوسیال Al_2O_3 در جریان آرام داخل یک میکروکانال استوانه‌ای پرداختند که نتایج افزایش ۳۲٪ انتقال حرارت جابجایی را نشان داد. آنوپ (Anoop) و همکاران [۱۴] تحقیقاتی درباره اثر اندازه ذرات بر فرآیند انتقال حرارت اجباری در منطقه ورودی انجام دادند. آنها دریافتند که کاهش اندازه نانوذرات منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌شود و این افزایش در منطقه ورودی تاثیر بیشتری در مقایسه با منطقه کاملاً توسعه یافته داشته است. ون (Wen) و دینگ (Ding) [۱۵] با انجام آزمایش در مورد

مایعاتی حاوی نانوذرات تک دامنه (مگنتیت، اکسید آهن، اکسید نیکل، آهن و غیره) با قطر متوسط ۱۰۰-۱ نانومتر می‌باشند. فروسیال‌ها معادلات فروهیدرودینامیک تحت یک میدان مغناطیسی را برآورده می‌کنند. تعاملات بین میدان‌های مغناطیسی و مایعات (نیروهای مغناطیسی و معادلات هیدرودینامیکی) در نتیجه فروهیدرودینامیک است که افق جدیدی را در بسیاری از زمینه‌ها مانند پزشکی و مکانیک با کاربردهای جدید باز کرده است. یکی از این کاربردها می‌تواند بهبود انتقال حرارت باشد. فروسیال‌ها مخلوطی کلئیدی از ذرات مغناطیسی سنتز شده در مایع مخصوص (معمولاً آب یا روغن)، که ۸۵٪ مایع مخصوص، ۱۰٪ سورفکتانت و ۵ درصد ذرات مغناطیسی را تشکیل می‌دهند. به دلیل اثر حرکت براونی، ذرات به طور معلق در مایع مخصوص باقی خواهد ماند و ته‌نشین نخواهند شد. در غیاب یک میدان مغناطیسی، فروسیال‌ها یک سری تعاملات به عنوان حرکت براونی با نانوسیال‌ها دارند. ذرات با سورفکتانت از جمله اسیداولئیک، هیدروکسید تترامتیل آمونیوم و اسیدسیتریک پوشش داده شده و باعث جلوگیری از تجمع ذرات می‌شوند [۳]. به طور کلی، مایعات رسانایی گرمایی پایینی در مقایسه با سوسپانسیون فلز دارا هستند. این واقعیت عمدتاً به دلیل این است که خاصیت هدایت حرارتی جامدات بیشتر از مایعات است. چوی (Choi) و ایستمن (Eastman) [۴] با تعلیق نانوذرات فلزی در آب به افزایش هدایت حرارتی مایعات معمولی دست یافتند. وانگ (Wang) و همکارانش [۵] با استفاده از Al_2O_3 و ذرات CuO پراکنده در آب، افزایش رسانایی گرمایی نانوسیال را مشاهده کردند.

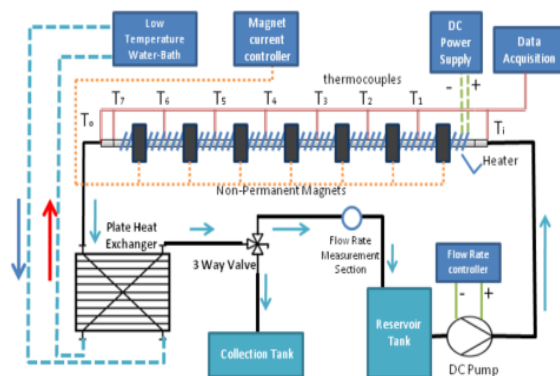
مین شنگ لیو (Min-Sheng Liu) و همکارانش [۶] مطالعات تحقیقاتی بر روی CNT (نانولوله کربنی) با سیالات پایه مختلف انجام دادند که نتایج، حاکی از افزایش قابل توجه در رسانایی گرمایی بود. همچنین، آنها افزایش ۲۲/۴٪ در رسانایی گرمایی اتیلن گلیکول حاوی نانوذرات CuO را مشاهده کردند و نشان دادند که در کسر حجمی کم، رسانایی گرمایی نانوسیال‌ها تقریباً رابطه خطی با کسر حجمی دارند [۷]. تعداد زیادی تحقیقات در مورد افزایش هدایت حرارتی نانوسیال و فروسیال با

و همکاریانش مورد بررسی قرار گرفته است [۲۷]. نتیجه این تحقیق افزایش انتقال حرارت قابل ملاحظه‌ای را نشان داد، اما تعداد این مطالعات محدود است. مطالعات تجربی در مورد انتقال حرارت اجباری فروسیال، تحت یک میدان مغناطیسی متناوب انجام شده، ولی اثرات فرکانس میدان مغناطیسی و غلظت مایع در جریان آرام انتقال حرارت اجباری فروسیال، هنوز نامشخص است و نیاز به مطالعه بیشتر دارد. روند انتقال حرارت فروسیال تحت یک میدان مغناطیسی متناوب، بسیار پیچیده است و یک تحقیق تجربی می‌تواند کمک شایانی به مطالعه این پدیده کند. هدف اصلی از این تحقیق مطالعه انتقال حرارت اجباری فروسیال تحت میدان مغناطیسی متناوب و شناسایی عوامل موثر بر این رفتار پیچیده برای اولین بار می‌باشد.

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- ساختمان دستگاه

ابتدا یک آزمایش اولیه به منظور بررسی رفتار انتقال حرارت جریان آرام در حضور یک میدان مغناطیسی ثابت و متناوب انجام شد. شکل شماتیک دستگاه آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است. در این آزمایش سیال اصلی حدود ۵۰ میلی‌لیتر می‌باشد، اما سیال مورد استفاده بخش خنک کننده حدود ۳۰۰ میلی‌لیتر است. در نتیجه، بیشتر سیال (بخش اعظم سیال) از طریق بخش خنک کننده توزیع شده است. یک پمپ متغیر با هد ۳ متر به مخزن حاوی فروسیال متصل شده، که برای به گردش درآوردن سیال در سیکل مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۱: شکل شماتیک دستگاه آزمایش.

انتقال حرارت اجباری نانوسیال Al_2O_3 به بهبود قابل توجه در انتقال حرارت دست یافتند. همچنین، برخی از محققان دیگر تحقیقات مشابه با نانوسیال‌های گوناگون تحت شرایط جریان آرام انجام داده‌اند و همه به اتفاق، افزایش انتقال حرارت را مشاهده کردند [۲۱-۱۶]. سوندار (Sundar) و همکاریانش [۲۲] آزمایشی در مورد انتقال حرارت اجباری نانوسیال مغناطیسی تحت شرایط جریان آشفته با غلظت‌های مختلف حجمی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که ذرات مغناطیسی باعث افزایش ۳۱٪ انتقال حرارت می‌شوند. مطالعات تحقیقاتی زیادی درباره فروسیال‌ها وجود دارد، اما انتقال حرارت فروسیال‌ها به اندازه کافی مورد بررسی قرار نگرفته است. بررسی عددی در مورد انتقال حرارت فروسیال و عدد ناسلت (Nu) در یک حفره دو بعدی توسط عاشوری و همکاریانش انجام شده و آنها یک رابطه عمومی برای عدد ناسلت به طور کلی معرفی کردند [۲۳].

جریان بین دو سطح موازی در معرض یک منبع میدان قطبی مغناطیسی در زیر آن افزایش انتقال حرارت را نشان داد [۲۴]. همچنین، انتقال حرارت فروسیال‌ها در یک میدان مغناطیسی متناوب به خوبی توسط بلایو (Belayev) و اسموردین (Smorodin) با توجه به فرکانس و قدرت میدان مغناطیسی خارجی و همچنین، ضخامت لایه و درجه حرارت توصیف شده است [۲۵]. لی (Li) و ژوان (Xuan) [۲۶] مطالعات تحقیقاتی در مورد تاثیر میدان‌های مغناطیسی یکنواخت و غیریکنواخت در انتقال حرارت جابجایی فروسیال در اعداد رینولدز پایین انجام دادند.

آنها نتیجه گرفتند که این میدان مغناطیسی می‌تواند فرآیند انتقال حرارت را شدیداً تحت تاثیر قرار دهد. ویژگی‌های فروسیال مانند ویسکوزیته و هدایت را می‌توان در معرض یک میدان مغناطیسی خارجی قرار داد و ویژگی‌های رئولوژیکی آنها را با دقت کنترل کرد. همچنین، همانطور که ذکر شد، فروسیال‌ها قابلیت بهبود انتقال حرارت را دارا هستند. بنابراین، این قابلیت یک موضوع جالب برای بسیاری از افراد بوده است، اما هنوز انتقال حرارت اجباری فروسیال به خوبی مشخص نیست. انتقال حرارت تحت یک میدان مغناطیسی ثابت توسط لاجوردی

هیدروکسید آهن وجود دارد. این هسته U شکل از مواد مغناطیسی مناسب، برای تولید یک میدان مغناطیسی نوسانی، ساخته شده است. برای بدست آوردن یک میدان مغناطیسی حداکثر ۰/۰۲ تسلا در لوله مسی، ۲۰۰۰ دور از سیم مسی شماره ۲۰، در اطراف هسته U شکل پیچیده شده است.

شدت میدان مغناطیسی با تسلا متر (HT201 گاوس متر) با دقت اندازه گیری شده است.

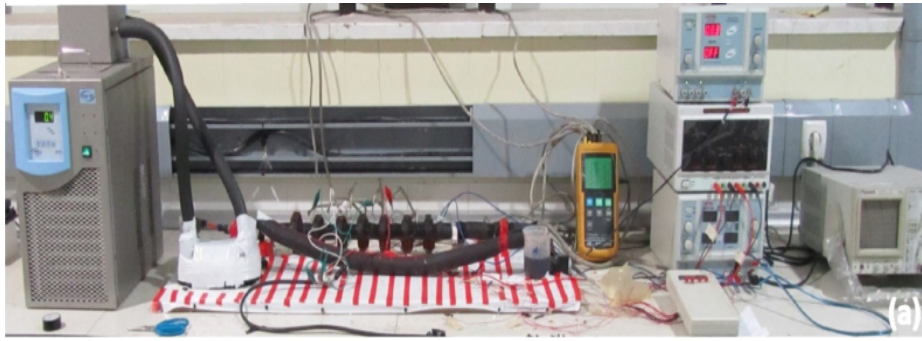
لوله مسی بین دهانه های هسته U شکل واقع شده و هسته U دقیقاً بین دو ترموکوپل قرار دارد. یک مدار دیجیتال برای کنترل جریان هسته مغناطیس طراحی شده است. با برنامه نویسی میکروکنترلر این مدار توانایی تغییر فرکانس و قدرت میدان مغناطیسی را دارد. این مدار مهمترین بخش است که در آن پالس با مدت زمان مشخص و میدان های مغناطیسی متناوب، به منظور بررسی اثرات فرکانس در افزایش انتقال حرارت، تولید و به بخش آزمایش اعمال می شود. 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 ها حل شده است. شکل ۲ شماتیک دستگاه آزمایش را نشان می دهد.

۲-۲- سنتز فروسیال و خواص آن

ذرات مغناطیسی مورد استفاده در این پژوهش توسط روش هم رسوبی [۲۹] سنتز شده اند. روش تولید نانوذرات Fe_3O_4 در حالی صورت می گیرد که به طور همزمان فرآیند گاززدایی با استفاده از گاز N_2 انجام می شود. استفاده از این روش راه حلی برای جلوگیری از واکنش با اکسیژن است. برای تهیه ۱/۵ M هیدروکسید سدیم، ۲۵۰ mL آب مقطر با ۱۵ g هیدروکسید سدیم جامد حل شده است. روش سنتز به عنوان یک راه حل اساسی برای ایجاد یون های منفی به منظور پراکنده کردن ذرات موجود در مایع مورد استفاده قرار گرفت. یک محلول از ۵/۲ گرم از $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ ، ۲ گرم $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ و ۰/۸۵ میلی لیتر هیدروکلراید (هیدروکلراید برای جلوگیری از روند ته نشینی مورد استفاده قرار گرفت) تهیه شد، سپس این

میزان جریان با کنترل کننده ولتاژ که به پمپ متصل شده، قابل تنظیم است. از آنجا که فشار سیستم کم است، ارتباط بین قطعات با اتصال دهنده های پنوماتیک محکم شده است. بخش عمده این آزمایش، در یک لوله مسی مستقیم صاف با قطر داخلی ۹ میلی متر، قطر خارجی ۱۰ میلی متر و طول ۴۹ سانتی متر است. برای کاهش جریان گرما در جهت محوری دو بوش پلی اورتان در ورودی و خروجی لوله مسی تراشکاری شده است. این بوش ها به شیلنگ بخش آزمایش متصل شده و مانع از ذوب احتمالی بخش های دیگر ناشی از دمای شدید هیتر می شود. ۹ عدد ترموکوپل نوع K از سیم فلزی Ni-Cr به نام تجاری کرومل (Chromel) و Ni-Al به نام تجاری آلومل (Alumel) ساخته می شود. این ترموکوپل ارزان قیمت است و یکی از پرکاربردترین ترموکوپل ها می باشد. رنج عملکرد دمایی آن بین ۲۰۰- و ۱۳۵۰+ درجه سانتیگراد است و معمولاً در دماهای بالا مورد استفاده قرار می گیرد. ترموکوپل نوع K بخاطر استفاده از مس خاصیت ضد اکسیداسیون دارد.

برای اندازه گیری دمای دیوار و بقیه قسمت ها وجود دارد. دو ترموکوپل از طریق یک سوراخ به شکلی که مانع از ورود آب به قطعات پلی اورتان شوند، دمای ورودی و خروجی را اندازه گیری می کنند و بقیه ترموکوپل ها بر روی دیواره لوله مسی با درجه حرارت خاص با پلی اورتان عایق کاری و نصب شده اند. فاصله بین هر ترموکوپل ۷ سانتی متر است. یک دستگاه دیتاگیری ۱۲ کاناله برای گرفتن مقادیر درجه حرارت استفاده شده است. مکانیزم تولید شار گرمایی یکنواخت از یک المنت مفتولی تخت و یک منبع تغذیه DC با ماکزیمم خروجی ۳۰۰ وات و همچنین، نوار نسوز و فوم الاستومری برای عایق بندی لوله تشکیل شده است. یک المنت مفتولی تخت برای پوشش تمام سطح لوله مورد استفاده قرار گرفته است، این سیم حاوی هیچ مواد آهنی نیست که میدان مغناطیسی داخل لوله را منحرف کند. بعد از قسمت آزمایش، یک حمام آب خنک کننده ۱۸۰۰ وات با گردش داخلی وجود دارد که مستقیماً به یک مبدل حرارتی صفحه ای متصل می شود که سبب کاهش دمای خروجی جریان و بدست آوردن شرایط حالت پایدار جریان برای بخش آزمایش می شود. هفت آهنربای U شکل غیردائم با پوشش هسته



شکل ۲: عکس دستگاه آزمایش و تجهیزات مربوطه.

$$C_{p,ff} = \frac{\varphi(\rho_p C_{p,p}) + (1-\varphi)(\rho_w C_{p,w})}{\varphi\rho_p + (1-\varphi)\rho_w} \quad (2)$$

که در آن m جرم اندازه‌گیری شده در یک حجم خاص، ρ دانسیته، C_p گرمای ویژه در درجه حرارت متوسط بالک است. ویسکوزیته را می‌توان از حل معادله انیشتین، (معادله ۳) تخمین زد، زیرا غلظت حجمی کمتر از ۲٪ است و فعل و انفعالات ذرات ناچیز است. برای اطمینان بیشتر، با استفاده از معادله هایگن پوزوله و ویسکومتر گرانروی را برای ۳ غلظت حجمی مختلف فروسیال در دمای اتاق (27°C) بدست آوردیم. شکل ۴ مقایسه بین معادله انیشتین و مقادیر تجربی را نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان از این معادله را برای ارزیابی ویسکوزیته فروسیال نشان می‌دهد.

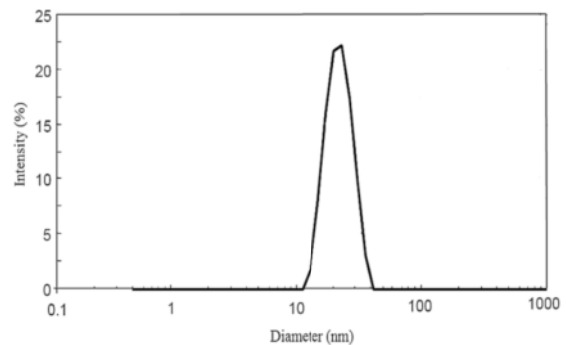
$$\mu_{ff} = \mu_w (1 + 2.5\varphi) \quad (3)$$

که در آن μ_{ff} ویسکوزیته فروسیال، μ_w ویسکوزیته آب در درجه حرارت متوسط بالک، φ کسر حجمی بدست آمده توسط رابطه ۲ است.

اما تغییر ویسکوزیته فروسیال، تحت یک میدان مغناطیسی [۱۰] و تخمین ویسکوزیته تحت یک میدان مغناطیسی متناوب امکان‌پذیر نیست.

علاوه بر این، تغییر هدایت حرارتی فروسیال در حضور یک میدان مغناطیسی [۱۰، ۱۱] و تعیین یک مقدار خاص برای هدایت حرارتی تحت یک میدان مغناطیسی متناوب، اعتبار کمی دارد.

محلول به تدریج به هیدروکسید سدیم اضافه شده تا کاملاً حل شود این فرآیند حدود ۳۰ دقیقه ادامه داشت تا زمانیکه یک محلول فشرده سیاه رنگ بدست آمد. در نهایت محلول سیاه را در معرض یک آهنربای قوی قرار دادیم تا میل به ته‌نشینی نانوذرات مغناطیسی کم شود و این ذرات به طور ناخواسته از HCl و NaOH جدا شوند. سپس ۸ میلی‌لیتر از هیدروکسید تترامیل آمونیوم ۲۵٪ به عنوان یک سورفکتانت در حالی که همگن‌کننده با دور ۱۰۰۰ rpm کار می‌کرد به محلول اضافه کردیم. محلول بدست آمده مخلوط پایدار از ذرات مغناطیسی با قطر متوسط ۲۵ nm می‌باشد (شکل ۳).

شکل ۳: توزیع قطر سنتز نانوذرات Fe_3O_4 .

غلظت حجمی و گرمای ویژه از معادلات ۱ و ۲ بدست آمده است.

$$\varphi = \frac{\left(\frac{m_p}{\rho_p}\right)}{\left(\frac{m_p}{\rho_p}\right) + \left(\frac{m_w}{\rho_w}\right)} \quad (1)$$

که در آن \dot{m} دبی جرمی و q جریان گرما و $T_{ff,i}$ دمای ورودی بالک است که از داده‌های تجربی بدست آمده است. به منظور بررسی اثر میدان مغناطیسی متناوب در افزایش انتقال حرارت، ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط و درصد افزایش انتقال حرارت متوسط در مقایسه با یکدیگر در نظر گرفته شده است که این مقادیر از فرمول‌های زیر بدست آمده است:

$$\bar{h} = \frac{\sum_i h_i}{i} = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_6 + h_7}{7} \quad (8)$$

$$\eta = \frac{\bar{h}_{ff} + \bar{h}_w}{\bar{h}_w} \times 100 \quad (9)$$

که در آن h_i ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی نسبت به اعداد ترموکوپل نشان داده شده در شکل ۱ است. همچنین، عدد رینولدز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu_{ff}} \quad (10)$$

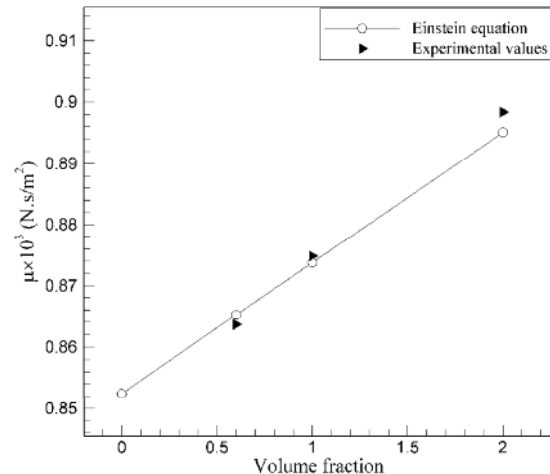
فرکانس میدان مغناطیسی متناوب به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f = \frac{1}{\tau} \quad (11)$$

که در آن τ زمان قطع و وصل (هر دو با هم برابر هستند) میدان مغناطیسی متناوب است.

۴-۲- ارزیابی دستگاه

قبل از بررسی کامل، قابلیت اطمینان و دقت سیستم تایید و با معادله شاه برای جریان آرام، تحت شرایط مرزی شار ثابت با آب مقطر (سیال عامل) مقایسه شد. نتایج در شکل ۵ مطابقت خوبی را با پیش‌بینی معادله شاه در دو عدد رینولدز نشان می‌دهد، که این قابل اعتماد بودن اطلاعات بدست آمده از دستگاه را نشان می‌دهد.



شکل ۴: مقایسه بین معادله اینشتین و مقادیر تجربی برای ویسکوزیته فروسیال.

۳-۲- پردازش داده‌ها

برای تجزیه و تحلیل انتقال حرارت، ضریب انتقال حرارت جابجایی (h) و عدد ناسلت (عدد ناسلت فقط برای آب مقطر و ارزیابی سیستم) مورد نیاز، با داده‌های تجربی به شرح زیر محاسبه شده است.

$$h(x) = \frac{q''}{T_s(x) - T_{ff}(x)} \quad (4)$$

$$Nu(x) = \frac{h(x)D}{k} \quad (5)$$

که در آن T_s دمای دیوار و T_{ff} درجه حرارت فروسیال، D قطر داخلی لوله، k رسانایی گرمایی مایع، x فاصله محوری از ورود به بخش آزمون است، و q'' شار حرارتی ثابت است که از روابط زیر بدست می‌آید:

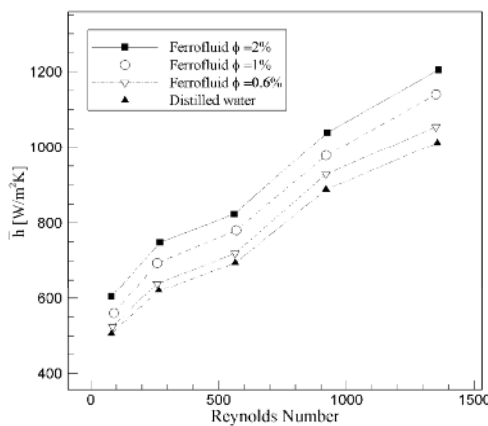
$$q'' = \frac{q}{\pi DL} = \frac{VI}{\pi DL} \quad (6)$$

از معادله بقای انرژی $T_{ff,i}$ بدست می‌آید:

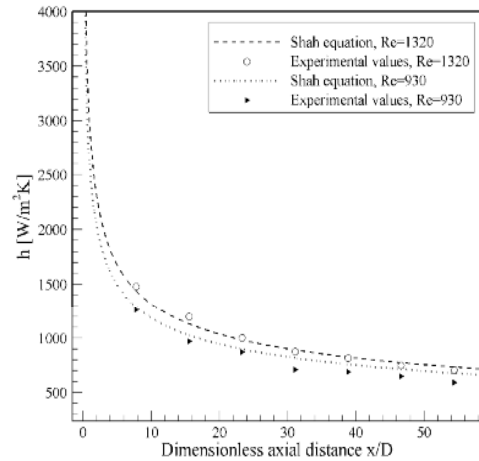
$$T_{ff} = \frac{q}{L} \times \frac{x}{\dot{m}C_{p,ff}} + T_{ff,i} \quad (7)$$

است که دلیل آن ممکن است مربوط به شکل ذرات و پایین بودن هدایت حرارتی نانوذرات استفاده شده باشد. برخی از مکانیسم‌ها، مانند انتقال ذره، گردادیان ویسکوزیته و حرکت براونی، به عنوان یک دلیل برای افزایش انتقال حرارت در نانوفلوئیدها در نظر گرفته می‌شود [۱۵-۱۸]. آشفته‌گی در لایه مرزی حرارتی و افزایش ضریب هدایت حرارتی از دلایل اصلی برای بهبود انتقال حرارت از نانوفلوئیدها هستند. در نتیجه، عوامل ذکر شده دلایل افزایش انتقال حرارت در فروسیال‌ها، در غیاب یک میدان مغناطیسی هستند.

$$Nu = \begin{cases} 4.36 + 0.0722 Re Pr \frac{D}{x}, & Re Pr \frac{D}{x} < 33.3 \\ 1.953 (Re Pr \frac{D}{x})^{\frac{1}{3}}, & Re Pr \frac{D}{x} \geq 33.3 \end{cases} \quad (12)$$



شکل ۶: تغییرات انتقال حرارت جابجایی متوسط فروسیال و آب مقطر با عدد رینولدز و غلظت حجمی.



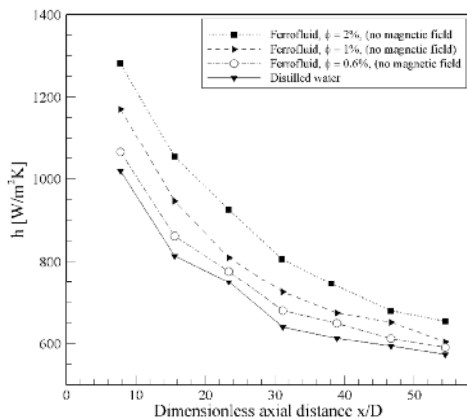
شکل ۵: ارزیابی داده‌های تجربی با معادله شاه در امتداد محور با استفاده از آب مقطر.

۳- نتایج و بحث

بعد از ارزیابی سیستم آزمایشی با آب مقطر، آزمایش‌های زیر، با شرایط مختلف انجام شد. تحلیل نتایج بدست آمده در این بخش ارائه شده است.

۳-۱- افزایش h بدون حضور میدان مغناطیسی

ابتدا، آزمایش با ۵ عدد رینولدز مختلف ($80 < Re < 1350$) و ۳ غلظت حجمی مختلف ($0 < \phi < 2\%$) انجام داده شد. شکل ۶ نمودار ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط را در برابر عدد رینولدز نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از فروسیال انتقال حرارت جابجایی را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، می‌توان از نتایج اینگونه استنباط کرد که افزایش غلظت حجمی منجر به بهبود در انتقال حرارت جابجایی می‌شود. شکل ۷ نمودار ضریب انتقال جابجایی محلی در برابر فاصله محوری بعد از ورودی، در $Re = 560$ را نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که در فاصله‌های کوتاه محوری از ورودی، افزایش انتقال حرارت نسبتاً بهتر از فواصل بزرگتر است که دارای آشفته‌گی لایه مرزی حرارتی هستند. در مقایسه با سایر مطالعات تحقیقاتی [۱۵، ۱۷]، افزایش انتقال حرارت کمتر

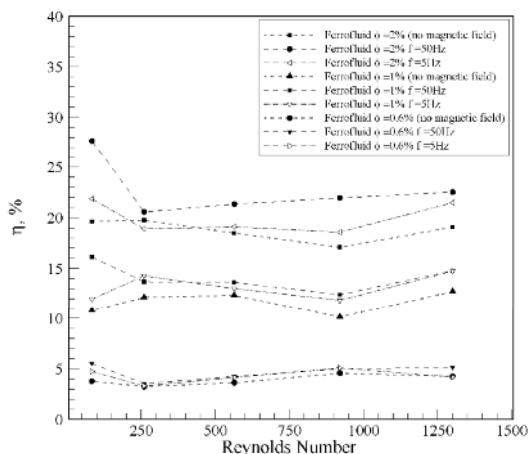


شکل ۷: ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی محوری برای جریان فروسیال با $Re = 560$.

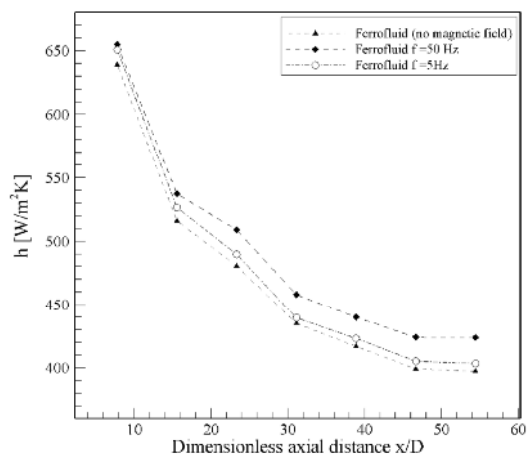
۳-۲- افزایش h با میدان مغناطیسی متناوب

استفاده از یک میدان مغناطیسی ثابت در فواصل بزرگ محوری از ورودی بخش آزمون، افزایش قابل توجهی را

محوری بعد از ورودی به اندازه کافی موثر است. اثر میدان مغناطیسی متناوب در فواصل دورتر از ورودی با افزایش ضخامت لایه مرزی حرارتی، کاملاً مشهود است. اما در امتداد جهت محوری با افزایش عدد رینولدز، در $\phi = 2\%$ ، با میدان مغناطیسی متناوب منجر به افزایش تقریبی ثابتی می‌شود (شکل ۱۱). شکل ۱۲ و ۱۳ اثر میدان مغناطیسی متناوب، غلظت حجمی و عدد رینولدز را بر روی ضریب انتقال حرارت محلی در امتداد فاصله محوری نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است، در غلظت‌های حجمی کم، با تغییر مقادیر فرکانس میدان مغناطیسی متناوب، h تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند. همچنین، در $\phi = 6\%$ ، میدان مغناطیسی متناوب نسبت به کسرهای حجمی بالا تاثیر کمتری دارد.

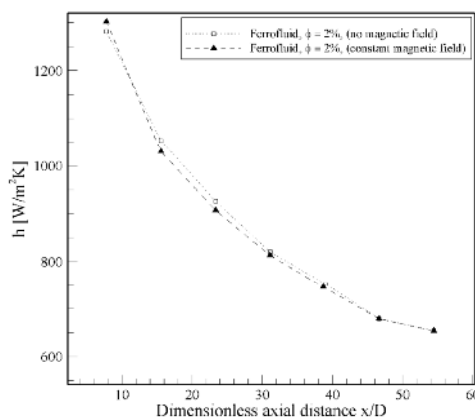


شکل ۹: درصد تغییرات افزایش انتقال حرارت متوسط فروسیال با عدد رینولدز، غلظت حجم و فرکانس میدان مغناطیسی.



شکل ۱۰: تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی با فرکانس میدان مغناطیسی در امتداد فاصله محوری $(\phi = 2\%$ و $Re = 80$).

نشان نداد و در برخی از مناطق، تحت تاثیر میدان مغناطیسی ثابت انتقال حرارت همرفتی منفی را نشان داد (شکل ۸). احتمالاً دلیل این کاهش، القافت فشار ثابت است که مانع عبور جریان از طریق لوله می‌شود.



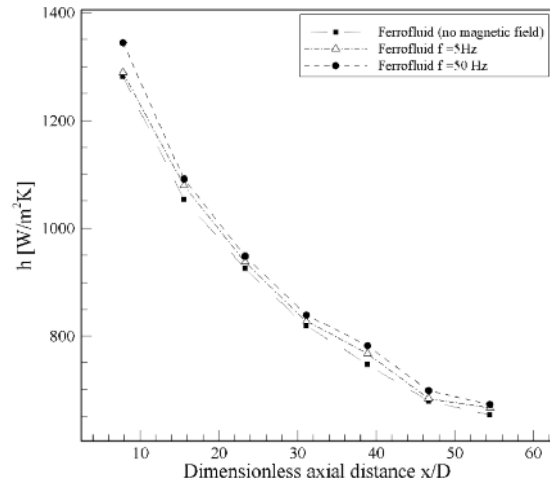
شکل ۸: اثر یک میدان مغناطیسی ثابت بر روند انتقال حرارت در $(Re = 560$ و $\phi = 2\%$).

در این آزمایش یک میدان مغناطیسی متناوب استفاده شده است. مدت زمان قطع و وصل این میدان مغناطیسی برابر و پیروید قطع و وصل فرکانس مغناطیسی معکوس بوده است. شکل ۹ نمودار درصد افزایش انتقال حرارت متوسط (η) را در حضور یک میدان مغناطیسی متناوب با دو فرکانس مختلف و ماکزیمم میدان مغناطیسی 0.02 تسلا برای ۳ کسر حجمی در برابر عدد رینولدز را نشان می‌دهد. از نتایج بدست آمده می‌توان اینگونه استنباط کرد که یک میدان مغناطیسی متناوب در $Re = 80$ بسیار مؤثر است. با افزایش عدد رینولدز $(Re = 260)$ کاهش ناگهانی در انتقال حرارت جابجایی بوجود می‌آید. از سوی دیگر، در اعداد رینولدز بالا $(Re < 500)$ اثر میدان مغناطیسی متناوب افزایش می‌یابد. همچنین، میدان مغناطیسی متناوب در کسر حجم بالا تاثیر قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با کسر حجمی کم دارد و افزایش میدان مغناطیسی متناوب در کسرهای حجمی کمتر از 0.06% قابل توجه نیست. علاوه بر این، در فرکانس‌های بالا، انتقال حرارت جابجایی افزایش بهتری یافته است. تفاوت بین اثرات فرکانس‌های بالا و پایین در غلظت‌های حجمی کم کاهش می‌یابد. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که میدان مغناطیسی متناوب در اعداد رینولدز پایین، در فاصله کوتاه

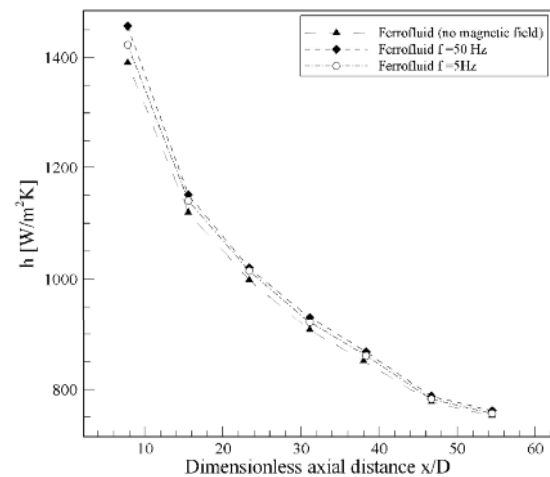
۳-۳- مکانیزم افزایش انتقال حرارت

ضریب انتقال حرارت جابجایی متناسب با k/δ_i است. که در آن k رسانائی گرمایی و δ_i ضخامت لایه مرزی حرارتی است. مایعات دارای هدایت حرارتی کمی بوده، اما سوسپانسیون‌های فلزات دارای هدایت حرارتی بالاتری می‌باشند. همچنین، وقتی تحت یک میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند، هدایت حرارتی را نیز افزایش می‌دهند [۱۰، ۱۱]. برخی از مکانیزم‌ها، مانند انتقال ذره، گرادیان ویسکوزیته و حرکت براونی، دلایلی هستند که برای افزایش انتقال حرارت در نانوسیال‌ها وجود دارد. انتقال ذرات و آشفتگی در لایه مرزی حرارتی از مهم‌ترین عوامل در بهبود انتقال حرارت جابجایی هستند [۱۸-۱۲]. مغناطیس کردن باعث می‌شود تا ذرات مغناطیسی به سمت لایه مرزی حرارتی جذب شوند و روند انتقال ذرات افزایش یابد. با جذب ذرات مغناطیسی لایه مرزی حرارتی، می‌توان سبب آشفتگی لایه مرزی آرام شد. در این پژوهش، به عنوان یک نتیجه، دلیل احتمالی افزایش هدایت حرارتی در حضور یک میدان مغناطیسی متناوب، آشفتگی لایه مرزی حرارتی می‌باشد. میدان مغناطیسی در اعداد رینولدز پایین، بسیار مؤثر است، زیرا ذرات مغناطیسی، شانس بیشتری برای انتقال و آشفتگی در لایه مرزی حرارتی، در سرعت‌های پایین دارند. هنگامی که سرعت جریان افزایش می‌یابد، روند جذب ذرات سخت‌تر خواهد شد، اما این ذرات شتاب بیشتری برای برهم زدن لایه مرزی حرارتی بدست می‌آورند. بدیهی است، حتی در اعداد رینولدز بالا، اگر قدرت میدان مغناطیسی را افزایش دهیم، افزایش انتقال حرارت شدت می‌یابد. علاوه بر این، افزایش در غلظت حجمی در حضور یک میدان مغناطیسی متناوب، سبب افزایش انتقال حرارت خواهد شد زیرا مکانیزم جذب ذرات به سمت دیواره تشدید می‌شود و به عنوان یک نتیجه می‌توان گفت انتقال ذرات و حذف لایه مرزی افزایش خواهد یافت.

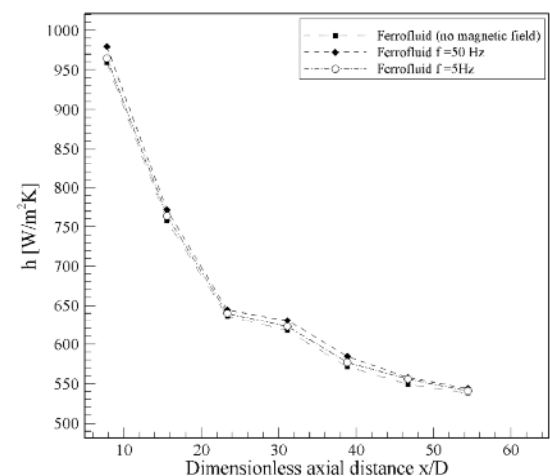
تمامی این مکانیزم‌ها با یکدیگر در رقابت هستند که این روی رفتار انتقال حرارت آنها تاثیر می‌گذارد. وقتی تمام این مکانیزم‌ها همزمان رخ می‌دهند، فرآیند انتقال حرارت پیچیده‌تر خواهد شد. این را باید در نظر گرفت که تنها با یک میدان مغناطیسی متناوب ضعیف و یک غلظت



شکل ۱۱: تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی با فرکانس میدان مغناطیسی در امتداد فاصله محوری (۲٪ ϕ و $Re = 560$).



شکل ۱۲: تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی با فرکانس میدان مغناطیسی در امتداد فاصله محوری (۱٪ ϕ و $Re = 920$).



شکل ۱۳: تغییرات h محلی با فرکانس میدان مغناطیسی در امتداد فاصله محوری (۰/۱۶٪ ϕ و $Re = 260$).

- [4] S.U. Choi, "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles developments and Applications of Non-Newtonian Flows", *FED-231/MD 66, ASME*, New York, 1995.
- [5] X. Wang, X. Xu, S.U. Choi, *Journal of Thermophysics And Heat Transfer*, **13**, 1999, 474.
- [6] M.S. Liu, M. Ching-Cheng Lin, I.T. Huang, C.C. Wang, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **32**, 2005, 1202.
- [7] M.S. Liu, M.C. Lin, I.T. Huang, C.C. Wang, *Chemical Engineering & Technology*, **29**, 2006, 72.
- [8] S. Jana, A. Salehi-Khojin, W.H. Zhong, *Thermochimica Acta*, **462**, 2007, 45.
- [9] Y. Hwang, H.S. Park, J.K. Lee, W.H. Jung, *Current Applied Physics 6, Supplement*, **1**, 2006, 67.
- [10] Q. Li, Y. Xuan, J. Wang, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **30**, 2005, 109.
- [11] A. Gavili, F. Zabihi, T.D. Isfahani, J. Sabbaghzadeh, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **41**, 2012, 94.
- [12] Y. Xuan, Q. Li, *Journal of Heat Transfer*, **125**, 2003, 151.
- [13] J.Y. Jung, H.S. Oh, H.Y. Kwak, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **52**, 2009, 466.
- [14] K.B. Anoop, T. Sundararajan, S.K. Das, *Journal of Heat and Mass Transfer*, **52**, 2009, 2189.
- [15] D. Wen, Y. Ding, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **47**, 2004, 5181.
- [16] S. Zeinali Heris, S.G. Etamad, M. Nasr Esfahany, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **33**, 2006, 529.
- [17] Y. Ding, H. Alias, D. Wen, R.A. Williams, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **49**, 2006, 240.
- [18] D. Kim, Y. Kwon, Y. Cho, C. Li, S. Cheong, Y. Hwang, J. Lee, D. Hong, S. Moon, *Current Applied Physics*, **9**, 2009, 119.
- [19] K.S. Hwang, S.P. Jang, S.U. Choi, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **52**, 2009, 193.
- [20] U. Rea, T. McKrell, L.W. Hu, J. Buongiorno, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **52**, 2009, 2042.
- [21] S. Tahir, M. Mital, *Applied Thermal Engineering*, **39**, 2012, 8.
- [22] L. Syam Sundar, M.T. Naik, K.V. Sharma, M.K. Singh, T.C. Siva Reddy, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **37**, 2012, 65.
- [23] M. Ashouri, B. Ebrahimi, M.B. Shafii, M.H. Saidi, M.S. Saidi, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **322**, 2010, 3607.
- [24] R. Ganguly, S. Sen, I.K. Puri, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **271**, 2004, 63.
- [25] A. Belyaev, B. Smorodin, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, **50**, 2009, 558.
- [26] Q. Li, Y. Xuan, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **33**, 2009, 591.
- [27] M. Lajvardi, J. Moghimi-Rad, I. Hadi, A. Gavili, T. Dallali Isfahani, F. Zabihi, J. Sabbaghzadeh, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **322**, 2010, 3508.
- [28] H. Bagheri, O. Zandi, A. Aghakhani, *Analytica Chimica Acta*, **692**, 2011, 80.
- [29] R.S. Figliola, D.E. Beasley, *Theory and design for mechanical measurements*, John Wiley, 2006.

حجمی کم، افزایش انتقال حرارت را می‌توان بدست آورد. بدیهی است، افزایش قدرت میدان مغناطیسی و غلظت حجمی منجر به افزایش انتقال حرارت قابل توجهی می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

- در غیاب یک میدان مغناطیسی، استفاده از فروسیال منجر به افزایش انتقال حرارت جابجایی متوسط در امتداد لوله مسی تحت شار حرارتی ثابت می‌شود.
- در فواصل کوتاه از منطقه ورودی و غلظت‌های حجمی بالاتر انتقال حرارت محلی بهتر است.
- استفاده از یک میدان مغناطیسی ثابت، بر اساس عدد رینولدز و فاصله محوری از ورودی، تاثیر منفی یا بهبود کمی در انتقال حرارت جابجایی را باعث می‌شود.
- تحت یک میدان مغناطیسی متناوب، افزایش انتقال حرارت در عدد رینولدز ۸۰ همراه با فرکانس‌های بالا ناشی از قطع و وصل میدان مغناطیسی به طور متوسط $1.1/22 \pm 27/6\%$ است. همچنین، میدان مغناطیسی متناوب در فرکانس‌های بالا، موثرتر است، اما تفاوت بین فرکانس‌های بالا و پایین در اعداد رینولدز بالا کاهش می‌یابد.
- اثر میدان مغناطیسی متناوب در غلظت‌های حجمی بالا (2% و 1%) بیشتر است، و اثر میدان مغناطیسی در غلظت‌های حجمی کم ($0.16\% = \phi$)، قابل توجه نیست.

مراجع

- [1] Z. Zhang, "Nano/Microscale Heat Transfer", McGraw Hill, New York, 2007.
- [2] S.K. Das, S.U. Choi, W. Yu, "Nanofluids: Science and Technology", John Wiley & Sons, New Jersey, 2007.
- [3] R.E. Rosensweig, "Ferrohydrodynamics", Dover, New York, 1997.