

صلى الله عليه وسلم



دانشکده مهندسی عمران
پایان نامه دکتری مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی

رساله دکتری

بررسی اثر میدان مغناطیسی بر خواص ترموفیزیکی و جریان نانو سیال
مغناطیسی Fe_3O_4

نگارنده: سمانه ابراهیمی

استاد راهنما:
دکتر سید فضل ا... ساغروانی

بهمن ۱۳۹۶

شماره: ۹۶۳۳/۸
تاریخ: ۹۶، ۱۲، ۸
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره 12: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)
(ویژه دانشجویان ورودی های 94 و ما قبل)

بدینوسیله گواهی می شود آقای/خانم سمانه ابراهیمی دانشجوی دکتری رشته عمران سازمان های هیدرولیکی... به شماره دانشجویی 9216265 ورودی مهر... ماه سال 1392... در تاریخ 96/11/2... از رساله نظری/عملی خود با عنوان: بررسی اثر میدان مغناطیسی بر خواص ترمو فیزیکی و جریان نانو سیال مغناطیسی Fe_3O_4 دفاع و با اخذ نمره 19.82 به درجه ... نائل گردید

<input type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره 19-20	<input checked="" type="checkbox"/> ب) درجه بسیار خوب: نمره 18/99 - 17
<input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره 16/99 - 15	<input type="checkbox"/> د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد
<input type="checkbox"/> ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد	

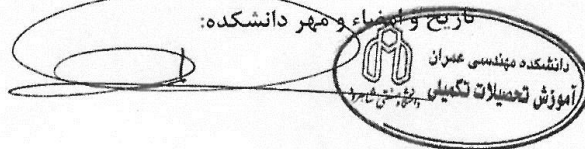
ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
1	دکتر سید فضل ا... ساغروانی	استاد/اساتید راهنما	دانشیار	
2	دکتر مهدی ازدری مقدم	استاد مدعو خارجی	دانشیار	
3	دکتر بهناز دهر آزما	استاد مدعو داخلی	دانشیار	
4	دکتر محمد ابراهیم قاضی	استاد مدعو داخلی	دانشیار	
5	دکتر مهدی عجمی	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده	استادیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای/خانم سمانه ابراهیمی بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: ابراهیمی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم که دعاهایشان همواره بدرقه راهم است.
همسر عزیزم که در تمامی این سال ها با تمام وجود پذیرای همه سختی ها بوده و حامی و پشتیبانم
است.

تشکر و قدردانی

سپاس خدای را که همواره بیش از آنچه از او خواسته ام عطا فرموده است. لازم می دانم از زحمات بسیار ارزنده استاد راهنما جناب آقای دکتر سید فضل ... ساغروانی به خاطر آموزشها، رهنمودها، حمایت‌های پیوسته، تشویق‌ها و دلگرمی‌هایشان در تمامی دوران دانشجویی بویژه انجام رساله دکتری‌ام قدردانی نمایم.

از سرکار خانم دکتر بهناز دهر آزما از گروه عمران دانشگاه شاهرود، جناب آقای دکتر محمد ابراهیم قاضی از گروه فیزیک دانشگاه شاهرود، و جناب آقای دکتر مهدی اژدری مقدم از گروه عمران دانشگاه سیستان و بلوچستان که امر داوری پایان‌نامه را بر عهده داشتند و به خاطر قبول زحمت و شرکت در جلسه دفاعیه و مطالعه و تصحیح پایان‌نامه سپاسگذارم.

از اساتید محترم گروه عمران دانشگاه شاهرود که در تمام طول دوره تحصیلات دانشگاهی خود از رهنمودهای ارزنده شان استفاده برده‌ام کمال تشکر را دارم.

از تمامی کارمندان قسمت اداری بویژه جناب آقای محمدی، جناب آقای احمدی، جناب آقای خسروی و سرکار خانم کیوانلو نیز قدردانی می نمایم.

تعهد نامه

اینجانب سمانه ابراهیمی دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان بررسی اثر میدان مغناطیسی بر خواص ترموفیزیکی و جریان نانو سیال مغناطیسی Fe_3O_4 تحت راهنمایی دکتر سید فضل ا... ساغروانی متعهد می شوم،

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ ۹۷/۲/۳۱
امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی ان اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در این رساله خصوصیات هدایت گرمایی نانو سیال $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CuO}$ بر پایه آب بر حسب پارامترهای مختلفی همچون دما و درصد وزنی بدون حضور میدان مغناطیسی و با حضور میدان مغناطیسی تا $0/2$ تسلا به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. هدایت گرمایی با استفاده از روش سیم داغ مورد اندازه‌گیری واقع شد. نتایج نشان می‌دهد که در غیاب میدان مغناطیسی هدایت گرمایی نسبی نانو سیال Fe_3O_4 در حضور نانو ذرات CuO با غلظت‌های مختلف افزایش پیدا می‌کند و هر چه غلظت CuO بیشتر باشد، هدایت گرمایی هم بیشتر است. علاوه بر این با افزایش دمای نانو سیال از 25 تا 50 درجه سانتی‌گراد، هدایت گرمایی سیستم $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CuO}$ با غلظت‌های مختلف با یک فرم تقریباً خطی با افزایش دما رشد می‌کند. هدایت گرمایی نسبی نانو سیال Fe_3O_4 خالص و مخلوط Fe_3O_4 نانو ذرات CuO در حضور میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد. نرخ افزایش هدایت گرمایی به قدرت میدان مغناطیسی یکنواخت که به سیستم وارد می‌شود وابسته است. جزئیات بیشتر در متن توصیف شده است.

یک مدل عددی با استفاده از روش CFD برای شبیه‌سازی هدایت گرمایی در نانو سیال $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CuO}$ ارائه گردید. یک کانال مستطیلی که دیواره‌های آن در دماهای مختلفی قرار دارند و نانو سیال $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CuO}$ درون آن در جریان است برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که میدان مغناطیسی به‌طور چشمگیری نسبت هدایت گرمایی به انتقال گرما از طریق همرفت را افزایش می‌دهد. این نسبت در قالب عدد پکله در راستای طولی و عرضی کانال مورد مطالعه قرار گرفته است. جزئیات بیشتری از محاسبات و نتایج تجربی درون متن آورده شده است.

کلمات کلیدی: نانوسیال، نانوذره، میدان مغناطیسی، هدایت گرمایی، فریت

فهرست مقالات مستخرج از رساله

- 1- Ebrahimi, S., & Saghravani, S. F. (2017). "Influence of magnetic field on the thermal conductivity of the water based mixed Fe_3O_4/CuO nanofluid". **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 441, PP366-373.
- 2- Ebrahimi, S., & Saghravani, S. F. (2018). "Experimental study of the thermal conductivity features of the water based Fe_3O_4/CuO nanofluid". **Heat and Mass Transfer**, 54(4), PP 999-1008.

۳- ابراهیمی س، ساغروانی س ف. (۱۳۹۶) " مطالعه هدایت گرمایی نانو سیال Fe_3O_4/CuO در حضور میدان مغناطیسی"، هفدهمین کنفرانس دینامیک شاره ها ، شاهرود، ایران

۴- ابراهیمی س، ساغروانی س ف. (۱۳۹۶) " تحلیل عددی میدان مغناطیسی بر هدایت گرمایی جریان نانو سیال Fe_3O_4/CuO " هفدهمین کنفرانس دینامیک شاره ها ، شاهرود، ایران.

فهرست مطالب

عنوان	شماره صفحه
فصل اول.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ اهداف مطالعه حاضر.....	۳
۳-۱ فصل بندی رساله.....	۵
فصل دوم.....	۷
۱-۲ مقدمه‌های بر نانو فناوری.....	۸
۲-۲ تاریخچه نانوفناوری.....	۸
۳-۲ انواع نانوساختارها و نانو مواد صفر بعدی.....	۱۰
۴-۲ مفهوم نانوسیال.....	۱۱
۵-۲ تاریخچه پیدایش نانوسیالات.....	۱۳
۶-۲ نقش ابعاد ذرات در خصوصیات نانوسیالات.....	۱۷
۱-۶-۲ روش تک مرحله‌ای.....	۱۸
۲-۶-۲ روش دومرحله‌ای.....	۱۹
۳-۶-۲ روشهای دیگر.....	۲۰
۷-۲ مرور تحقیقات علمی بر روی خواص انتقال حرارت نانوسیالات.....	۲۰
۸-۲ فواید استفاده از نانوسیالات به عنوان حاملهای انرژی و حرارت.....	۲۲
۱-۸-۲ بهبود فرآیند انتقال انرژی.....	۲۳
۲-۸-۲ پایداری بیشتر و کاهش انسداد مجراها.....	۲۳
۳-۸-۲ کاهش هزینهها.....	۲۳
۹-۲ پایداری نانوسیالات.....	۲۳
۱-۹-۲ کنترل pH واکنش.....	۲۴
۲-۹-۲ استفاده از سورفکتانت.....	۲۴
۳-۹-۲ استفاده از ارتعاشات فراصوت.....	۲۶
۱۰-۲ نانو ذرات مغناطیسی.....	۲۶
۱۱-۲ کاربردهای نانو سیالات مغناطیسی.....	۲۷
۱-۱۱-۲ کاربردهای پزشکی.....	۲۷
۲-۱۱-۲ کاربردهای زیست محیطی.....	۲۷

۲۸	..... کاربرد نانو سیالات در صنعت
۲۸	..... خواص مغناطیسی ذرات مغناطیسی
۲۸	..... منشاء خاصیت مغناطیسی مواد
۲۹	..... میدان مغناطیسی (H)
۲۹	..... القای مغناطیسی (B)
۳۰	..... مغناطش (M)
۳۰	..... حوزه‌های مغناطیسی
۳۰	..... رفتار مغناطیسی مواد
۳۱	..... دیا مغناطیس
۳۲	..... پارا مغناطیس
۳۲	..... فرومغناطیس
۳۳	..... پاد فرومغناطیس
۳۳	..... فریمغناطیس
۳۴	..... فریت‌های مغناطیسی
۳۴	..... تاریخچه فریتها
۳۵	..... کاربرد فریتها
۳۵	..... انواع فریتها
۳۵	..... نانوسیالات بر پایه فریت
۳۷	..... آماده‌سازی نانوسیالات مغناطیسی
۴۰	..... تحقیقات تجربی بر روی هدایت گرمایی
۴۰	..... افزایش هدایت گرمایی در غیاب میدان مغناطیسی
۴۳	..... افزایش هدایت گرمایی و کنترلپذیری در میدان مغناطیسی
۴۶	..... مکانیسم تقویت هدایت حرارتی و مدل‌های نظری
۴۶	..... حرکت براونی
۴۸	..... نانو خوشه‌های فریتها و MNF
۵۲	..... همرفت ترمومغناطیسی
۵۳	..... بررسی تجربی هدایت ترمو مغناطیسی
۵۵	..... مدلسازی عددی
۵۵	..... مدل تک فاز (همگن)
۵۶	..... مدل ترکیبی (مدل دوفازی)
۵۹	..... فصل سوم

۶۰	۱-۳ مقدمه
۶۱	۲-۳ تهیه نانوذرات
۶۱	۱-۲-۳ فرآیندهای حالت بخار
۶۱	۲-۲-۳ فرآیندهای حالت مایع
۶۱	۳-۲-۳ فرآیندهای حالت جامد
۶۲	۴-۲-۳ روش هم‌رسوبی
۶۳	۵-۳ نحوه تهیه نانوذرات Fe_3O_4 در آزمایشگاه
۶۶	۱-۵-۳ تهیه کسر حجمی
۶۷	۶-۳ دستگاه‌های مورد استفاده در مشخصه‌یابی نانو ذرات
۶۸	۱-۶-۳ مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش
۶۸	۲-۶-۳ دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)
۶۹	۳-۶-۳ پراش پرتو X (XRD)
۷۱	۷-۳ مشخصه‌یابی نمونه مورد نظر در آزمایشگاه
۷۲	۱-۷-۳ نتایج پراش پرتو X نانو ذرات (XRD)
۷۴	۲-۷-۳ نتایج ویژگی مغناطیسی Fe_3O_4 با استفاده از دستگاه مغناطیس‌سنج ارتعاشی (VSM)
۷۷	۳-۷-۳ تحلیل نتایج میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)
۷۹	۳-۷-۳ آنالیز تعیین اندازه نانوذرات (DLS)
۸۱	۸-۳ روش سیم داغ گذرا جهت اندازه‌گیری ضریب هدایت گرمایی در آزمایشگاه
۸۳	۹-۳ مدل‌سازی عددی
۸۳	۱-۹-۳ مسیر متداول (مدل تک‌فاز)
۸۷	فصل چهارم
۸۸	۱-۴ بررسی ضریب هدایت گرمایی نانو سیال Fe_3O_4 خالص و Fe_3O_4/CuO بر پایه
۸۸	۱-۱-۴ بررسی وابستگی هدایت گرمایی نسبی Fe_3O_4 خالص با دما
۹۱	۲-۱-۴ بررسی وابستگی هدایت گرمایی درصدهای وزنی مختلف Fe_3O_4 با سه درصد
۹۳	۳-۱-۴ تاثیر دما بر هدایت گرمایی نانو سیال Fe_3O_4 / CuO بر پایه آب
۹۹	۲-۴ محاسبه میزان خطا در نمودارهای درصد رشد
۱۰۰	۳-۴ بررسی ضریب هدایت گرمایی نانو سیال Fe_3O_4 خالص و Fe_3O_4/CuO بر
۱۰۹	۴-۴ محاسبات عددی CFD جهت مطالعه خصوصیات جریان
۱۱۲	۱-۴-۴ مدل‌سازی عددی و نتایج
۱۱۸	فصل پنجم

- شکل ۲-۱ تصویری از جام لیکرگوس ۹
- شکل ۲-۲ نمای خطوط میدان اطراف آهن ربا ۲۹
- شکل ۲-۳ جهت گیری دوقطبی های مغناطیسی در مواد دیا مغناطیس در غیاب میدان مغناطیسی [۶۴] ۳۱
- شکل ۲-۴ جهت گیری دوقطبی های مغناطیسی در مواد پارا مغناطیس [۶۴] ۳۲
- شکل ۲-۵ جهت گیری دوقطبی های مغناطیسی در مواد فرو مغناطیس [۶۴] ۳۲
- شکل ۲-۶ جهت گیری دوقطبی های مغناطیسی در مواد پاد فرو مغناطیس [۶۴] ۳۳
- شکل ۲-۷ جهت گیری دوقطبی های مغناطیسی در مواد فری مغناطیس [۶۴] ۳۳
- شکل ۳-۱ تصویر اسید کلریدریک و آب مقطر ۶۴
- شکل ۳-۲ تصویر نمک های $FeCl_2$ و $FeCl_3$ ۶۴
- شکل ۳-۳ قرار دادن محلول نمک ها روی همزن مغناطیسی ۶۵
- شکل ۳-۴ اضافه کردن آمونیاک ۶۶
- شکل ۳-۵ نانو ذرات مگنت تولید شده ۶۶
- شکل ۳-۶ نمایش الگوی برخورد و انعکاس پرتو ایکس ۶۹
- شکل ۳-۷ نمایی از ساختار مولکولی بلور یخ و پیوندهای بین آنها ۷۱
- شکل ۳-۸ الگوی پراش پرتو ایکس از نمونه پودری نانو ذرات Fe_3O_4 ۷۳
- شکل ۳-۹ طیف پراش پرتو ایکس از نمونه CuO ۷۴
- شکل ۳-۱۰ دستگاه VSM استفاده شده در دانشگاه بیرجند ۷۵
- شکل ۳-۱۱ نتایج نمودار حلقه هستریزیس ناشی بدست آمده از اندازه گیری VSM ۷۷
- شکل ۳-۱۲ تصویر AFM بدست آمده از نانو ذرات Fe_3O_4 جهت تعیین توپولوژی و شکل. (مقیاس اندازه گیری ۵۰ نانومتر است) ۷۸
- شکل ۳-۱۳ تصویر TEM نانو ذرات Fe_3O_4 (a) و CuO (b) (سری دوم آزمایشات بر مبنای زمان ترکیب مواد و مدت التراسونیک) ۷۹
- شکل ۳-۱۴ توزیع اندازه نانو ذرات Fe_3O_4 با استفاده از تکنیک DLS ۸۰
- ۸۰
- شکل ۳-۱۵ توزیع اندازه نانو ذرات CuO با استفاده از تکنیک DL ۸۰
- شکل ۳-۱۶ طرحی از ست آپ آزمایشگاهی روش سیم داغ ۸۱

- شکل ۴-۱ تصویر شماتیک سامانه آزمایشگاهی مورد استفاده ۸۸
- شکل ۴-۲ مقایسه بین نتایج حاضر و نتایج سایر محققین در دمای 30°C ۹۰
- شکل ۴-۳ نسبت ضریب هدایت گرمایی بر حسب دما در درصد های وزنی مختلف Fe_3O_4 ۹۰
- ۴-۴ ضریب هدایت گرمایی نسبی بر حسب درصد های وزنی مختلف CuO ۹۲
- ۴-۵ درصد رشد ضریب هدایت گرمایی نسبی Fe_3O_4 بر حسب درصد های وزنی مختلف CuO ۹۳
- شکل ۴-۶ ضریب هدایت گرمایی نسبی بر حسب دما در $3\text{wt}\% \text{Fe}_3\text{O}_4$ ۹۵
- ۹۵
- شکل ۴-۷ نمودار درصد رشد ضریب هدایت گرمایی نسبی بر حسب دما و $3\text{wt}\% \text{Fe}_3\text{O}_4$ ۹۵
- شکل ۴-۸ ضریب هدایت گرمایی نسبی بر حسب دما در $5\text{wt}\% \text{Fe}_3\text{O}_4$ ۹۶
- شکل ۴-۹ نمودار درصد رشد ضریب هدایت گرمایی نسبی بر حسب دما و $5\text{wt}\% \text{Fe}_3\text{O}_4$ ۹۶
- شکل ۴-۱۰ ضریب هدایت گرمایی نسبی بر حسب دما در $7\text{wt}\% \text{Fe}_3\text{O}_4$ ۹۷
- شکل ۴-۱۱ نمودار درصد رشد ضریب هدایت گرمایی نسبی بر حسب دما و $7\text{wt}\% \text{Fe}_3\text{O}_4$ ۹۷
- شکل ۴-۱۲ نمودار ضریب هدایت گرمایی نسبی Fe_3O_4 بر حسب دما در $3\text{wt}\% \text{CuO(a)}$ ، ۹۸
- $7\text{wt}\% \text{CuO (c)}$ ، $5\text{wt}\% \text{CuO (b)}$ ۹۸
- شکل ۴-۱۳ الگوی بکار رفته در مطالع اثر میدان مغناطیسی بر رفتار نانوسیالات $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CuO}$ ۱۰۱
- شکل ۴-۱۴ ضریب هدایت گرمایی نسبی $3\text{wt}\% \text{(a)}$ ، $5\text{wt}\% \text{(b)}$ ، $7\text{wt}\% \text{(c)}$ نانو سیال Fe_3O_4 ۱۰۱
- خالص بر حسب زمان در میدان های مغناطیسی متفاوت ۱۰۳
- شکل ۴-۱۵ ضریب هدایت گرمایی نسبی $3\text{wt}\% \text{(a)}$ ، $5\text{wt}\% \text{(b)}$ ، $7\text{wt}\% \text{(c)}$ نانو سیال Fe_3O_4 بر حسب زمان در درصد های وزنی مختلف CuO و میدان های مغناطیسی متفاوت ۱۰۵
- شکل ۴-۱۶ نمودار درصد رشد ضریب هدایت گرمایی نسبی $3\text{wt}\% \text{Fe}_3\text{O}_4$ بر حسب زمان در درصد های وزنی مختلف CuO و میدان های مغناطیسی متفاوت ۱۰۶
- شکل ۴-۱۷ نمودار درصد رشد ضریب هدایت گرمایی نسبی $5\text{wt}\% \text{Fe}_3\text{O}_4$ بر حسب زمان در درصد های وزنی مختلف CuO و میدان های مغناطیسی متفاوت ۱۰۷
- ۱۰۸
- شکل ۴-۱۸ نمودار درصد رشد ضریب هدایت گرمایی نسبی $7\text{wt}\% \text{Fe}_3\text{O}_4$ بر حسب زمان در درصد های وزنی مختلف CuO و میدان های مغناطیسی متفاوت ۱۰۸
- شکل ۴-۱۹ تصویر شماتیک ناحیه بندی شده کانال مورد بررسی ۱۰۹
- شکل ۴-۲۰ تصویر مش بندی شده کانال مورد بررسی ۱۱۰

- شکل ۴-۲۱ تصویر شرایط مرزی از کانال مورد مطالعه ۱۱۰
- شکل ۴-۲۲ توزیع سرعت در راستای طولی ۱۱۳
- شکل ۴-۲۳ توزیع سرعت در راستای عرضی ۱۱۳
- شکل ۴-۲۵ تصویر توزیع سرعت ۱۱۴
- شکل ۴-۲۶ توزیع دما در راستای طولی ۱۱۵
- شکل ۴-۲۷ توزیع عدد پکله در راستای طولی، (a) در حضور میدان و (b) بدون حضور میدان ۱۱۶
- شکل ۴-۲۸ توزیع عدد پکله در راستای عرضی، (a) در حضور میدان و (b) بدون حضور میدان ۱۱۷

فهرست جداول

- جدول ۱-۲ خلاصه ای از فرآیند توسعه نانو سیالات در سال های اخیر ۱۶
- جدول ۲-۲ دسته بندی مغناطیسی مواد [۶۴] ۳۱
- جدول ۳-۲ مدل های ارائه شده هدایت گرمایی ۴۷
- جدول ۱-۴ ضرایب برازش تغییرات k بر حسب درصد وزنی wt% ۹۱

فهرست علائم

B	میدان مغناطیسی	ρ	چگالی
μ	ثابت نفوذپذیری مغناطیسی ماده	C_p	ظرفیت گرمایی ویژه
K_B	ثابت بولتزمن	Q	گرما
M_0	مغناطیس خود به خودی تفاوت تراکم بین ذره مغناطیسی و مایع	μ	ویسکوزیته
$\Delta\rho$	حامل	q	آهنگ تولید گرما
g	شتاب گرانشی	γ	ثابت اوپلر
d	ارتفاع نمونه	t	زمان
H	میدان مغناطیسی	r	مقاومت داخلی پل وتستون
μ_0	نفوذ پذیری خلا	l	طول سیم
Ra	عدد رایلی	R_w	مقاومت الکتریکی سیم
λ	طول موج تابش	v	افت ولتاژ
θ	زاویه براگ	T	دما
D_N	اندازه متوسط نانوذرات	u	سرعت
K_f	هدایت گرمایی سیال پایه	α_f	نفوذ گرمایی سیال
K_p	هدایت گرمایی ذرات کروی	ϕ	درصد حجمی
k_{eff}	ضریب هدایت گرمایی نسبی	n	فاکتور شکل
I	جریان الکتریکی	φ	نسبت سطح کره هم حجم با ذره به سطح ذره
		β	نسبت ضخامت نانو لایه به شعاع ذره

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

از آنجایی که سیالات مبادله کننده حرارت نقش بسیار مهمی در صنعت بازی می‌کنند، در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای جهت بهبود عملکرد حرارتی سیالات صورت گرفته است به طوری که که نتیجه آن نسل جدیدی از سیالات مبادله کننده حرارت (نانو سیالات) است. نانوسیالات، سوسپانسیون‌های کلوئیدی از نانو ذرات در سیال پایه می‌باشند که می‌توانند باعث ایجاد سامانه‌هایی با کارایی بالا در انتقال انرژی و حرارت شوند. از آنجایی که نانو سیالات هدایت گرمایی بالایی را از خود نشان می‌دهند، گزینه‌هایی با پتانسیل مناسب برای کاربرد در زمینه‌های مختلف میکروالکترونیک، تهیه انرژی، گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع هستند، به طوری که علاقه پژوهشگران زیادی را در حوزه‌های مختلف به خود جذب کرده اند [۱-۳].

با توجه به اینکه اغلب جامدات هدایت گرمایی بیشتری نسبت به سیالات دارند، اضافه کردن ذرات جامد درون سیال می‌تواند سبب بهبود هدایت حرارتی سیال گردد. انواع گوناگون پودرهای فلزی و غیرفلزی و ذرات پلیمری می‌تواند به سیالات جهت شکل‌گیری محلول سوسپانسیونی اضافه شود. با توجه به اینکه ذرات معلق در ابعاد میکرومتر و میلی‌متر می‌توانند سبب ساییدگی و مسدود شدن مسیر گردند در نتیجه افزودن ذرات بزرگ معلق در عمل، افزایش انتقال حرارت زیادی ایجاد نمی‌کند. از این رو کاربرد نانو ذرات راهی موثر جهت بهبود ویژگی‌ها و مشخصات انتقال حرارتی سیالات است. نانو سیالات، سیالاتی هستند که ذراتی در مقیاس نانو به خوبی در آنها پراکنده شده اند. چوبی اولین کسی بود که از نانو سیالات استفاده کرد [۴].

با توجه به اینکه هدایت گرمایی یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که تاثیر زیادی در فرآیند انتقال گرما دارد، تحقیقات زیادی در زمینه تعیین هدایت گرمایی نانو سیالات صورت گرفته است [۵-۱۷] که بسیاری از آنها بر روی سیالات حاوی نانو ذرات اکسید فلزی بوده است [۱۸-۲۲]. از این تاثیر هدایت گرمایی نانو ذرات، بر روی هدایت گرمایی نانو سیالات در موارد مختلفی مطالعه شده است.

همچنین مطالعات متعددی نشان داده است که دما روی هدایت گرمایی نانو سیالات تاثیر گذار است. به طور کلی افزایش دما سبب افزایش هدایت گرمایی می شود. به طوری که افزایش دمای سیال پایه، انتقال نانو ذرات را در یک مکانیزم حرکت براونی افزایش می دهد و همین عامل سبب افزایش هدایت گرمایی می شود. تا کنون نانوسیالات متعددی بر پایه نانو ذرات فلزی مانند Cu , Ag , Au ساخته شده اند و تاثیر غلظت، دما و پارامترهای دیگر روی آنها مورد مطالعه قرار گرفته است. یکی از مواد شناخته شده و پر کاربرد که تا کنون نانو سیالات مختلفی بر پایه آن ساخته شده است نانو سیال Fe_3O_4 است [۲۳-۲۴]. نانو سیال Fe_3O_4 یک نانو سیال مغناطیسی است که فرو فلئوئید نامیده می شود. فرو فلئوئید محلول کلوئیدی پایداری است که شامل نانو ذرات مغناطیسی بسیار ریز بوده که در سیال پایه پراکنده شده اند [۲۵]. از آنجایی که درصد حجمی نانو ذرات روی هدایت گرمایی نانو سیال تاثیر گذار است پژوهشگران به روش های مختلفی نانو سیال Fe_3O_4 را تهیه کرده و تاثیر درصد حجمی را روی هدایت گرمایی نانو سیال بررسی نمودند در کنار مطالعات صورت گرفته روی ترکیباتی فروفلئوئیدی، دیگر ترکیبات همچون نانو سیالات بر پایه نانوذرات CuO به روش های مختلفی تا کنون ساخته و مورد مطالعه قرار گرفته اند. مطالعات اخیر روی نانو سیالات حاوی نانو ذرات CuO نشان می دهد که هدایت گرمایی آنها می تواند در حدود ۲۰ درصد نسبت به سیال پایه افزایش یابد [۲۶]. چنین تاثیری می تواند در عملکرد انتقال حرارت بسیار تاثیر گذار باشد از این رو این ماده می تواند به عنوان یک نانوذره مناسب برای انتقال حرارت بکار گرفته شود.

۱-۲ اهداف مطالعه حاضر

از آنجا که بر اساس اطلاعات موجود، تا کنون هیچ مطالعه مدون و توسعه یافته ای برای درک نانو سیالی، مخلوط از نانو ذرات CuO و Fe_3O_4 صورت نگرفته است، لذا به منظور درک صحیح رفتار هدایت گرمایی در چنین سیستمی انجام مطالعاتی ضروری است. علی رغم مطالعات پراکنده بر روی بعضی از پارامترهای اساسی و رابطه بین آنها برای نانو سیالات CuO و Fe_3O_4 ، مطالعه جامع تجربی

توام با برآزش داده‌ها می‌تواند جنبه‌های کاربردی نانو سیال متشکل از مخلوط CuO و Fe_3O_4 را نمایان سازد. بخشی از هدف این رساله، مطالعه هدایت گرمایی نانو سیال CuO و Fe_3O_4 بر پایه آب است.

جهت انجام چنین مطالعه ای بهره‌گیری از فناوری نانو و لزوم درک مفاهیم اساسی پایه های این فناوری بسیار مهم است. در سال‌های اخیر، کاربرد توسعه فناوری نانو مواد، به شدت در گستره مهندسی و علوم توسعه یافته است. در میان نانو سیالات، فرولوئیدها می‌توانند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشند زیرا آنها شامل سوسپانسیونی از نانو ذرات مغناطیسی هستند که در یک سیال غیر مغناطیسی حمل می‌شود. بنابراین می‌توانند تحت تاثیر یک میدان مغناطیسی خصوصیات منحصر به -فردی داشته باشد که برای کاربردهای خاص قابلیت تنظیم شدن داشته باشند.

از آنجاکه کنترل و هدایت جریان انرژی در یک سیال مغناطیسی ممکن است با میدان مغناطیسی خارجی ممکن شود، پتانسیل امیدوارکننده‌ای از نانوسیالات مغناطیسی در دهه‌های اخیر جهت کاربردهای هدایت گرمایی گسترش یافته است [۳۰-۳۷]. پارامتری که می‌تواند به طور خاص در رفتار حرارتی یک نانو سیال مغناطیسی از جنبه‌های مختلف مورد بررسی قرار گیرد، تغییرات ضریب هدایت گرمایی یک نانو سیال مغناطیسی در حضور و یا عدم حضور میدان‌های خارجی است. با در نظر گرفتن میدان مغناطیسی برخی از پژوهشگران مطالعات نظری و تجربی متعددی روی خصوصیات ترمو مگنتیت یک نانو سیال مغناطیسی در شکل‌های مختلفی در حضور میدان مغناطیسی خارجی انجام داده‌اند [۳۱-۳۲].

به منظور درک صحیح، رفتار نانو سیال میکس شده $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CuO}$ در غیاب و همچنین حضور میدان مغناطیسی، خصوصیات ترمو فیزیکی آن در این رساله مورد مطالعه قرار گرفت تا زمینه ایجاد فناوری جدید بر پایه این ترکیب فراهم شود.

از آنجا که تاکنون پیشرفت‌های زیادی در مطالعات عددی پیرامون سیالات در قالب CFD صورت گرفته است در این کار بخشی از هدف را "بررسی ویژگی‌های نانوسیالات بررسی شده در تجربه و

شبیه‌سازی رفتار جریان و حرارت " تشکیل می‌دهد. چیزی که می‌تواند به طور خاص رفتار حرارتی یک نانو سیال مغناطیسی را تغییر دهد وابستگی ضریب هدایت گرمایی به میدان مغناطیسی و تغییرات آن در نانو سیال مغناطیسی است.

۱-۳ فصل بندی رساله

در فصل اول چنانچه در بالا اشاره شد مقدمه و اهداف مطالعه ذکر شده است. در فصل دوم کلیات موضوع رساله به همراه مروری بر مطالعات گذشته بر مبنای نانوفناوری و نانوسیالات آورده شده است. محتوی کلی این فصل به مروری بر فناوری نانو، نانوسیالات، نانوسیالات مغناطیسی، کاربردهای نانوسیالات و هدایت گرمایی نانوسیالات به همراه نظریات موجود مرتبط با رفتار آنها تشکیل شده است. در فصل سوم روش‌های تجربی ساخت و تولید نانوسیالات و همچنین مکانیزم اندازه‌گیری هدایت گرمایی نانوسیالات Fe_3O_4 و Fe_3O_4/CuO مورد بحث قرار گرفته است. همچنین اطلاعات کلی از دستگاه‌های مورد استفاده در مشخصه‌یابی ویژگی‌های ساختاری و خصوصیات مغناطیسی نانوسیالات بکار گرفته شده در این رساله آورده شده است. در فصل چهارم نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های هدایت گرمایی نانوسیالات Fe_3O_4 و Fe_3O_4/CuO به همراه تحلیل و ارزیابی نتایج مورد بحث قرار گرفته است. در این فصل ویژگی‌های نانو سیالات Fe_3O_4 و Fe_3O_4/CuO و خصوصیات هدایت گرمایی آنها بر حسب متغیرهایی همچون کسر حجمی، دما و میدان مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل پنجم جمع‌بندی نتایج در قالب مهمترین دستاوردهای رساله و همچنین پیشنهاداتی که می‌تواند در آینده به توسعه این تحقیق کمک نماید ذکر شده است.

فصل دوم

مطالعات پیشین

۱-۲ مقدمه‌ای بر نانو فناوری

پیشوند نانو در کلمه‌ی نانو فناوری به معنای یک میلیاردم (10^{-9}) است. نانو فناوری با ساختارهای متنوعی از مواد سرو کار دارد که ابعادی در محدوده‌ی یک میلیاردم متر دارند. هر چند کلمه‌ی نانو اشاره به فناوری نسبتاً جدیدی است، لیکن ابزارهای مفید و ساختارهایی با ابعاد نانومتری از دیرباز وجود داشته‌اند و در حقیقت قدمت آنها به شروع حیات روی کره‌ی زمین برمی‌گردد. در واقع فناوری نانو توانایی ساخت، کنترل و استفاده ماده در ابعاد نانومتری است. اندازه ذرات در فناوری نانو بسیار مهم است، چرا که در مقیاس نانو، ابعاد و شکل ماده در خصوصیات آن بسیار تأثیرگذار است و خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی تک‌تک اتم‌ها و مولکول‌ها با خواص توده ماده متفاوت است. این اندازه در مورفولوژی‌های مختلف از ماده متفاوت است، اما به طور معمول نانو مواد به موادی که حداقل یکی از ابعاد آنها کوچک‌تر از ۱۰۰ نانومتر باشد گفته می‌شود [۳۳].

۲-۲ تاریخچه نانوفناوری

شروع و توسعه‌ی اولیه فناوری نانو، به طور دقیق مشخص نیست شاید بتوان گفت که اولین توسعه دهندگان فناوری نانو شیشه‌گران قرون وسطایی بوده‌اند که از قالب‌های قدیمی^۱ برای شکل دادن شیشه‌هایشان استفاده می‌کردند. در آن زمان برای ساخت شیشه‌های کلیساهای قرون وسطایی از ذرات نانومتری طلا استفاده می‌شد و شیشه‌های رنگی بسیار جذابی بدست می‌آمد. رنگدانه‌های تزئینی جام مشهور لیکرگوس^۲ در روم باستان (قرن چهارم بعد از میلاد) نمونه‌ای از آنهاست [۳۴].

¹ Medieval Forges

² Lycurgus



شکل ۱-۲ تصویر از جام لیکرگوس

در سال ۱۹۵۹ ریچارد فاینمن^۱ طی یک سخنرانی با عنوان "فضای زیادی در سطوح پایین وجود دارد" ایده فناوری نانو را مطرح ساخت. وی این نظریه را ارائه داد که در آینده‌ای نزدیک می‌توانیم مولکول‌ها و اتم‌ها را به صورت مستقیم دستکاری کنیم. در سال ۱۹۸۶ این واژه توسط اریک درکسلر در کتابی تحت عنوان "موتور آفرینش آغاز دوران فناوری نانو" باز آفرینی و تعریف مجدد شد. وی این واژه را به شکل عمیق‌تری در رساله دکترای خود مورد بررسی قرار داده و بعدها آنرا در کتابی تحت عنوان "نانو سیستم‌ها ماشین‌های مولکولی چگونگی ساخت و محاسبات آنها" توسعه داد [۳۴].

کلمه نانو از nanos در زبان یونانی قدیم به معنای کوتوله گرفته شده است. موارد مختلف در ابعاد نانومتر خواص متفاوت و جالبی را از خود نشان می‌دهند. در واقع نانو متر محدوده‌ای است که انسان می‌تواند با جابجا کردن اتم‌ها و مولکول‌ها و قرار دادن آنها در موقعیت‌های مناسب انواع ترکیبات، وسایل، آلیاژها و ابزارها و بطور کلی سیستم‌های گوناگون را در مقیاس اتمی و مولکولی طراحی نماید. بنابراین می‌توان گفت فناوری‌های نانومتری بر مبنای دستکاری مواد در مقیاس اتم‌ها بوده که شامل قراردادن اتم‌ها در جای خاص خود بوده و اجازه می‌دهد تا موادی سبک‌تر، کمتر، ارزان‌تر و بادقت ابعادی بالاتر ساخته شود. چهار موضوع اساسی در فناوری‌های نانومتری مورد بحث قرار می‌گیرند.

۱- کوچک سازی سیستم‌ها

¹ Richard Feynman

۲- تولید مواد جدید در ابعاد نانومتری

۳- بالابردن کارایی و کنترل سیستم‌ها و تجهیزات

۴- افزایش قابلیت ذخیره اطلاعات

در یک دسته‌بندی کلی، فناوری نانو را می‌توان به سه شاخه اصلی تقسیم‌بندی کرد [۳۵]:

۱- **نانو فناوری تر**: به بررسی زیست محیطی فناوری نانو که اساساً در محیط‌های آبی وجود دارد

می‌پردازد و معمولاً دربرگیرنده علوم دارویی، پزشکی و زیست محیطی است.

۲- **نانو فناوری خشک**: این شاخه، علوم فیزیک و شیمی را شامل شده و روی تشکیل ساختارهای

کربنی، سیلیسی و مواد غیرآلی می‌پردازد.

۳- **نانو فناوری محاسباتی**: این شاخه به مدل سازی و بررسی ساختارهای پیچیده در ابعاد نانو

پرداخته و واسطی میان علوم مهندسی، کامپیوتر و فن آوری‌های نوین است.

۲-۳ انواع نانو ساختارها و نانو مواد صفر بعدی

به طور کلی هر ماده‌ای از سه بعد تشکیل شده است. اگر حداقل یکی از این ابعاد در مقیاس نانو باشد

(بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) به این ماده، یک ماده نانو ساختار گفته می‌شود. همچنین بعدی که در

مقیاس نانو نباشد اصطلاحاً بعد آزاد نام دارد، زیرا هر مقداری می‌تواند داشته باشد. نانو ساختارها بر

اساس تعداد ابعاد آزاد به دسته‌های زیر تقسیم می‌شوند: موادی که در هر سه بعد دارای اندازه‌ی

نانومتری می‌باشند و هیچ بعد آزادی ندارند. بر اساس برخی دسته‌بندی‌ها به این دسته از

نانو ساختارها، نانو ذرات نیز گفته می‌شود. عوامل تاثیرگذار بر خواص نانو ذرات، اندازه و جنس ذرات

هستند. نانو ذرات کاربردهای مختلفی در صنایع مختلف مانند اتومبیل (ضدخس کردن بدنه، ضدبخار

کردن شیشه‌ها، لاستیک‌های مقاوم و...)، پزشکی (ساخت داروهای جدید، تشخیص علائم بیماری‌ها

و...)، تصفیه آب و فاضلاب، الکترونیک، صنایع نظامی و... دارند. نانو ذرات می‌توانند بسته به کاربردها

در اشکال مختلف مانند کروی، بیضوی، مکعبی، منشوری، ستونی و... ساخته شوند نانوذرات می‌توانند به صورت خالص و یا ترکیبی از چند ماده مختلف باشند.

نانو مواد تک بعدی دارای دو بعد در مقیاس نانو و یک بعد آزاد می‌باشند. نانوسیم ها، نانومیله‌ها، نانولوله ها، نانوالیاف همگی جز مواد نانوساختار تک بعدی می‌باشند. عوامل تاثیرگذار روی خواص نانو ساختارهای تک بعدی، جنس و نسبت طول به قطر (L/D) آن می‌باشند. مهم‌ترین ویژگی نانو ساختارهای تک بعدی فلزی هدایت الکتریکی آنها در راستای محور سیم است و کاربردهای زیادی در بخش‌های مختلف مانند ساخت رایانه‌های بسیار کوچک با سرعت بسیار بالا، ساخت لیزرهای بسیار کوچک، تشخیص بیماری‌ها، حافظه‌های مغناطیسی و... دارند.

نانومواد دوبعدی نیز دارای دو بعد آزاد و یک بعد در مقیاس نانو می‌باشند. مواد با دو بعد در مقیاس نانو عمدتاً شامل لایه‌های نازک یا پوشش‌های سطحی می‌باشند. عوامل تاثیرگذار در خواص نانو-پوشش‌ها، جنس و ضخامت آنها است. نانوپوشش‌ها لایه‌هایی با ضخامت نانومتری هستند که به صورت پوشش روی مواد دیگر قرار می‌گیرند و باعث تغییر خواص و ویژگی‌های آنها می‌شوند. لایه‌های نازک نیز می‌توانند به صورت خالص و یا ترکیبی از چند ماده مختلف باشند.

نانومواد سه‌بعدی یعنی هر سه بعد آنها در مقیاس آزاد است. این دسته شامل نانوکامپوزیت‌ها (مواد مرکبی که شامل چند ماده است) و مواد حجیم نانو ساختار (یا مواد توده‌ای نانوساختار) است. مواد حجیم نانوساختار موادی هستند که اندازه واحدهای سازنده مجزای آنها حداقل در یک بعد کمتر از ۱۰۰ نانومتر باشد.

۲-۴ مفهوم نانوسیال

نانوسیال متشکل از یک مایع و ذرات جامد یا حباب‌های سیال در اندازه نانومتری است که در آن امکان واکنش‌های کلوئیدی فراهم باشد. نانو ذراتی که معمولاً در سیال استفاده می‌شوند از مواد

متعدد مانند اکسید فلزی (CuO ، Al_2O_3)، سرامیک نیتريد (SiN ، AlN)، سرامیک کاربید (SiC)، TiC)، فلزات (Au ، Ag ، Cu)، نیمه هادی‌ها (SiC ، TiO_2)، نانولوله‌های کربنی و مواد کامپوزیتی مانند نانوذرات آلیاژی، $\text{Al}_{70}\text{Cu}_{30}$ یا کامپوزیت‌های پوسته هسته‌ای و نانو ذرات پلیمر ایجاد می‌شوند. به علاوه، مواد غیر فلزی، فلزی و دیگر مواد به صورت نانوذره و یا ساختارهای کاملاً جدید نیز ممکن است ویژگی‌های مطلوبی داشته باشند مایعات پایه مشترک شامل آب، اتیلن گلیکول و روغن و سایر سیالات هستند. نانوسیالات دارای خواص جدید متفاوتی از سیالات پایه خود هستند که آنها را به طور بالقوه قابل استفاده در بسیاری از کاربردهای مفید در زمینه انتقال حرارت، میکرو الکترونیک، سلول-های سوختی، فرآیندهای دارویی و موتورهای هیبریدی مجهز، موتور خنک کننده، مدیریت حرارتی خودرو، یخچال و فریزر خانگی، چیلر و ... می‌سازد. چون معمولاً میزان هدایت حرارتی و ضریب انتقال گرمای آنها نسبت به سیال پایه افزایش می‌یابد، آگاهی از مفهوم رفتار نانوسیال‌ها در تصمیم‌گیری در مورد مناسب بودن آنها برای برنامه‌های کاربردی انتقال حرارت حیاتی است. مدل‌های متنوعی در دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) ¹ جهت تجزیه و تحلیل رفتار نانوسیالات مانند وجود دارند که در آن نانو سیالات می‌توانند به صورت تک فاز یا دو فاز تعریف شوند. گاهی نظریه کلاسیک مایعات تک فاز نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، به شرطی که خواص فیزیکی نانوسیال‌ها به عنوان خواص کلی سیستم شامل هر دو پارامتر نوع ماده و غلظت آنها در مدل استفاده شود. البته این رویکردی جایگزین برای شبیه‌سازی نانوسیالات، جهت اجتناب از پیچیدگی‌های استفاده از مدل دو فازی است.

جایگزینی نانو سیالات به جای سیالات با ذرات جامد معلق می‌تواند کارایی سامانه‌های حرارتی را بالا ببرد. به منظور ارزیابی کارایی نانوسیالات، تعیین خواص فیزیکی آنها ضروری است. نه تنها به دلیل کاربرد های متنوع و قابل ملاحظه نانو سیالات بلکه به خاطر اهمیت علمی و صنعتی آنها تمایل گسترده‌ای برای پژوهش در زمینه خواص مختلف نانو سیالات وجود دارد. در این میان نانو سیالات

¹ Computational Fluid Dynamic

مغناطیسی که به خاطر برخی از ویژگی‌های منحصر به فردشان به عنوان یک مایع هوشمند رفتار می‌کنند از اهمیت بیشتری برخوردارند.

۲-۵ تاریخچه پیدایش نانوسیالات

بر مبنای تعریفی که از نانو سیال ارائه گردید، نانوسیال، سیالی است که شامل مخلوطی از نانو ذرات است. این سیال، سوسپانسیون کلوئیدی از ذرات نانو متری در یک فاز پایه است. تلاش برای تقویت هدایت حرارتی مایعات، مفاهیم اولیه نانو سیالات و مدلسازی ذرات معلق را در بیش از یک قرن پیش ایجاد کرده است. هدایت حرارتی کم در جریان انتقال حرارت معمولی^۱ (HTFs) یک محدودیت جدی در بهبود عملکرد و فشرده سازی تجهیزات مهندسی است. مفهوم ذرات که می‌تواند از میلی‌متر تا میکرومتر باشد در اواخر قرن نوزدهم به بخشی از ماجراجویی مدرن در قلمرو جدید بسیار کوچک‌ها (دنیای نانو ذرات) تبدیل شد. به ویژه در مورد نانوسیالات که یک کلاس جدید ارزشمند از سیستم‌های انتقال گرما بر مبنای فناوری نانو هستند و توسط ثابت نگه داشتن مقدار کمی از ماده به صورت ۵٪ حجم یا کمتر، جریان مهندسی شده‌ای از انتقال حرارت را ایجاد می‌کند. در واقع نتیجه خواص جمعی قابل توجه بیش از مجموع اثرات فردی مواد بکار رفته، کلید موفقیت نانو مواد است. وجود یک مجموعه از برهم‌کنش‌های ناشی از کوچک‌سازی، خواص حرارتی قابل توجه‌ای را پدید می‌آورد به طوری که در پژوهشگران و دانشمندان و مهندسان انگیزه به چالش کشیدن ویژگی‌های این مواد را برانگیخته است. امروزه در صنعت مسأله انتقال حرارت، جرم و جریان الکتریکی توسط سیالات بسیار مهم است. با افزایش رقابت جهانی در تکنولوژی جدید، و نقش انرژی در هزینه-های تولید، صنایع مدرن به سمت سیالاتی با شاخص‌های انتقال قابل کنترل‌تر حرکت می‌کنند. با استفاده از فناوری نانو و تولید ذرات فلزی با ابعاد بسیار کوچک نانومتری اولین بار در سال ۱۹۹۳

¹ Heat Transfer Fluids

استفاده این ذرات در داخل سیالات حامل انرژی مانند آب و اتیلن گلیکول استفاده شد. واژه نانوسیال اولین بار در سال ۱۹۹۵ در آزمایشگاه ملی آرگون^۱ آمریکا، توسط دکتر چوی^۲ به سیالی اطلاق شد که حاوی نانو ذرات معلق و پایدار با ابعاد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر بود [۳۶]. نانو سیال به طور کلی شامل دو جزء اصلی زیر است :

۱- **سیال پایه** : مایعی است که نانو ذرات در آن پراکنده شده اند. سیال پایه متداول که امروزه در صنعت کاربرد دارند آب، اتیلن گلیکول، روغن موتور و... است.

۲- **نانو ذرات** : که می‌توانند فلزی، اکسید فلزات یا کربن و... باشند و به شکل های کروی، لوله‌ای، فلورن^۳ و... باشند.

برای بهبود خواص انتقال گرما، فعالیت های زیادی انجام می‌شود. به خوبی مشخص شده است که بسیاری از مواد جامد فلزی و غیر فلزی دارای هدایت حرارتی بسیار بالاتر از HTF معمولی دارند. بنابراین، این ایده نوآورانه که از سوی ماکسول مطرح شد، تلاشی برای تقویت هدایت حرارتی سیالات با افزودن ذرات جامد به HTF ها است [۳۷]. در ابتدا، حتی از ذرات جامد بزرگتر در مقیاس میکرومتر، یا حتی میلیمتر، در سیال برای ایجاد سوسپانسیون استفاده شد ولی این ذرات جامد بزرگ باعث مشکلاتی مانند سایش سطحی، مسدود کردن میکرو کانال‌ها، فرسایش خط لوله و تورم یا افت فشار، که عمدتاً کاربردهای عملی را محدود می‌کند، گردید. در واقع، معلق سازی ذرات در مایع در درجه اول تنها درمان نظری و منفعت بخشی بود که در مطالعات بعدی توسط سایر پژوهشگران دنبال شد و موفقیت بی نظیری را به دست آورد. اندازه بزرگ ذرات و مشکل تولید ذرات کوچک، چالش‌های قابل توجهی را در مطالعات ایجاد می‌کنند. این وضعیت هنگامی که چویی و ایستمن^۴ در آزمایشگاه

¹ Argon

² Choi

³ Fullerene

⁴ Eastman

ملی آرگون موفق شدند با این ایده نوآورانه از ذرات نانومقیاس فلزی و واکنش نانولوله‌های کربنی استفاده شد، مطرح گردید. آنها با نانوذرات مختلف فلزی و اکسید فلزی مختلف در فازهای پایه مختلف آزمایش کرده اند و نتایج امیدوار کننده‌ای بدست آوردند، با این وجود بسیاری از مشکلات باقی مانده از این سوسپانسیون همچنان بدون بحث باقی مانده است. بازدهی انتقال حرارت نانو سیالات به عنوان یک بحث جدی در انتقال حرارت گرمای نانومقیاس در مایعات به طور مستقیم با روندهای کوچک سازی و فناوری نانو ارتباط دارد. سابقه کوتاهی از آزمایشگاه ملی^۱ نانو فناوری نشان می دهد که برنامه وسیعی جهت گسترش نانو فناوری در این آزمایشگاه در حال برنامه‌ریزی و پیاده‌سازی است. در جدول شماره (۱-۲)، خلاصه کوتاهی از فرآیند پیدایش و توسعه نانو سیالات ذکر شده است.

در حقیقت، مفهوم نانو قرن‌ها پیش توسعه یافته است. از آن تاریخ می توان به این نتیجه رسید که هنرپیشگان قرون وسطی از نانوذرات طلا برای زیبا سازی پنجره‌هایشان استفاده می کردند تا بدون نگرانی فضای شخصی خود را با رنگ قرمز تزئین کنند.

¹ Argonne National Laboratory ANL

جدول ۱-۲ خلاصه ای از فرآیند توسعه نانو سیالات در سال‌های اخیر

1981	D.B Tuckerman familiarizes microchannel technology
1985	Argonne national laboratory initiated a scheme to establish advanced fluids
1991	In Argonne laboratory, Choi progresses a microchannel heat exchanger for the settled photon source
1992	Argonne national fluid program starts to work from micro to nano with funding cut.
1993	Thus, research of nanofluids technology came in to being 12 years after Tuckermans introduction of micro channel technology. In May Choi submits first nanofluids proposal and second proposal with Eastman later on.
1994	Third proposal of nanofluids submits.
1995	Choi presents a semical paper on the concept of nanofluids at the American society Mechanical engineers winter annual meeting, San Francisco, CA, Nov, 12-17.
1998-Present	Argonne nanofluids research funded by U.S. department of energy office of basic energy science and office of transportation technologies to works on both fundamental and applications of nanofluids.
1999	Lee's group publishes the first SCI article on nanofluids
2000	President William Jefferson Bill Clinton announces the United states national nanotechnology initiative (NNI) at Caltech in January. Choi serves as a proposal reviewer for DOE/BES and national science foundation. Also he works on the first nano scale science. engineering and technology proposal under the NNI>
2001	Choi's group with Eastman publishes two papers in Applied physics letter
2002-2003	The nanofluids research achieved a top position by DOE's office of basic energy sciences in both 2002 and 2003.
2007	The first single-theme conference on nanofluids was held. Nanofluids: fundamentals and applications, copper mountain, CO, Sept. 16.20. 2007, the engineering conferences international. The first book on nano fluids, nanofluids; science and technology.
2008-Ongoing	Scientists all over the world are attempting to reach at an agreement by publishing their theoretical and experimental investigations so that the use of nanofluids will be effective as it was predicted before.

در قرن پانزدهم در ایتالیا، سرامیک سازان از فلزات پراکنده شده در یک مایع به منظور سفالگری استفاده کردند و بدین ترتیب نخستین نانوسیالات پایه‌ریزی شدند [۳۸]. این هنرمندان از اندازه المان-ها آگاه نبودند، اما از آنها برای رنگ و لعاب استفاده می‌کردند. علی‌رغم برخی از تفاوت‌های مهم بین کلوئید و نانو سیال می‌توان گفت که به طور کلی نانوسیال‌ها دارای نوعی پراکندگی کلوئیدی هستند ولی ذرات، فاز، خواص فیزیکی، مراحل اولیه ساخت و کاربردهای اصلی از پراکندگی های کلوئیدی متمایز هستند.

۲-۶ نقش ابعاد ذرات در خصوصیات نانوسیالات

قبل از ورود به خصوصیات حرارتی انتقال گرما بر اساس فناوری نانو به بحث در مورد اندازه ذرات در ایجاد نانو سیالات اشاره می‌شود. برخی از دلایل افزایش اندازه ذرات در ویژگی های فازهای پایه آنها نهفته است. اول از همه، ذرات در ساختار نانو سیالات می‌بایست پایدار باشند. نانوذرات چگال را می‌توان در مایعات تعلیق کرد، زیرا ذرات دارای نسبت بسیار بالای سطح به حجم هستند بنابراین برهمکنش سطح ذرات با مایعات به اندازه کافی قوی است تا بتواند بر تفاوت‌های ناشی از چگالی غلبه کند. علاوه بر این، نانوذرات می‌توانند در سیال پایه قطبیده شوند و بنابراین تعامل بین ذره‌ای مجاز تحت تاثیر قطبش می‌تواند جاذبه‌ای یا دافعه‌ای باشد. بطورکلی تغییرات اندازه نانو ذرات با خواص جدیدی همراه است. مقادیر کوچکی از ذرات می‌تواند مکانیسم‌های انتقال در مقیاس نانو را تحت تاثیر قرار دهد. به عنوان مثال، از آنجا که اندازه نانوذرات شبیه مولکول‌های زیستی است، نانوسیالات می‌توانند در برنامه های کاربردی پزشکی مانند انتقال و آزاد سازی دارو و کنترل صفات بیولوژیکی استفاده شوند. پراکندگی نانو ذرات به طور یکنواخت و ثابت نگه داشتن آنها در سیال پایه در تولید نانو سیال با کیفیت بالا حیاتی است. پراکندگی خوب و تعلیق پایدار، پیش نیاز مطالعات خواص نانوسیال و کاربرد شیوه استفاده از آنها است. بسیاری از فرآیندهای یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای فیزیکی و

شیمیایی برای ساخت نانو ذرات تک‌سایز توسعه یافته است. این فرآیندها را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد.

۲-۶-۱ روش تک مرحله‌ای

روش تک مرحله‌ای، فرآیند ترکیب و آماده سازی نانوذرات برای سنتز نانو سیالات است که در طی آن نانوذرات به طور مستقیم توسط روش رسوب بخار فیزیکی یا روش شیمیایی ساخته می‌شوند. در این روش از فرآیندهای ذخیره سازی، هدایت و توزیع گسسته نانوذرات اجتناب می‌شود، بنابراین تجمع نانوذرات کاهش می‌یابد و ثبات جریان‌ها تقویت می‌شود. سنتز و پراکندگی نانو ذرات در فاز پایه به طور همزمان در فرآیند تک مرحله‌ای انجام می‌شود. به عنوان مثال در آزمایشگاه آرگون یک سیستم تولید نانو سیال یک مرحله‌ای ایجاد شد که در آن بخارهای نانومقیاس از مواد فلزی می‌توانند مستقیماً به صورت بخار کم فشار پراکنده شوند. این فرآیند یک مرحله‌ای برای غلبه بر نیروهای وان در والس بین نانوذرات و جهت تولید سوسپانسیون‌های پایدار از نانوذرات Cu امتحان شد. یکی دیگر از فرآیندهای فیزیکی یک مرحله‌ای، تکنولوژی آسیاب کردن مرطوب با ابزارهای مهره‌ای است. روش مبتنی بر آسیاب به دلیل هزینه‌های بالا نمی‌تواند جهت سنتز نانو سیالات در مقیاس وسیع استفاده شود و بنابراین روش شیمیایی یک مرحله‌ای به سرعت در حال توسعه است. زو^۱ و همکاران [۳۹]، لیو^۲ و همکاران. [۴۰] با استفاده از یک روش اصلاح شیمیایی یک مرحله تولید نانو سیالات پایدار فلزی را انجام دادند. همچنین، فوک^۳ و همکاران [۴۱] تولید نانو سیالات Ag را بر پایه آب با استفاده از لیزر نوری به صورت تک مرحله‌ای در مایع تولید کردند. مزیت اصلی فرآیند یک مرحله‌ای این است که نانوذرات نسبتاً خالص و دارای اندازه‌ی یکنواخت هستند. معایبی نیز در روش یک مرحله‌ای وجود

¹ Zhou

² Liu

³ Phuoc

دارد که مهمترین آن باقی ماندن واکنش دهنده‌ها یا تثبیت کننده‌ها در نانو ذرات به دلیل واکنش ناکامل است که می‌توانند روی خصوصیات کلی نانو سیال تاثیر بگذارند.

۲-۶-۲ روش دومرحله‌ای

در روش دو مرحله‌ای، نانو ذرات در ابتدا به صورت پودر خشک با روش‌های فیزیکی و شیمیایی مانند رسوب گاز خنثی و بخار شیمیایی تولید می‌شوند. از دهه ۱۹۳۰، تکنیک تراکم و تبخیر در یک گاز بی اثر (نانو ذرات از طریق ایجاد یک منبع فلزی در یک گاز خنثی ایجاد می‌شوند) به طور گسترده جهت سنتز ذرات فلزی استفاده شده است. در روش اولیه شیمیایی برای ساخت نانوذرات، داشتن برخی از ترکیبات، به طور معمول یک هالید، حاوی اتم فلزی و همچنین یک عامل کاهش دهنده لازم است. مرحله بعد با پراکندگی پودر در مایع همراه است. مزیت اصلی فرآیند دو مرحله‌ای این است که نانوذرات را می‌توان به طور جداگانه با یک روش صنعتی تولید کرد که امکان تولید عظیم و ارزان را می‌دهد. این فرآیند برای نانوذرات و برای نانوذرات اکسیدهای فلزی خوب است. مشکل اصلی فرآیند دو مرحله‌ای، تجمع و به هم پیوستگی نانو ذرات است. کوک^۱ و همکاران [۴۲] نشان دادند که ذرات قبل از پراکندگی به شدت تجمع یافته و پس از پراکندگی در اتیلن گلیکول با ۹ ساعت ماندگاری با یکدیگر ترکیب شده‌اند. اکثر محققان نانو ذرات را در شکل پودری خریداری کرده و با پایه فلزی مخلوط می‌کنند. با این حال، این نانو سیالات پایدار نیستند، اگرچه پایداری را می‌توان با کنترل pH و افزودن سورفکتانت افزایش داد. برخی از محققان نانو سیالات تجاری را استفاده می‌کنند. اما این نانوذرات حاوی ناخالصی و نانوذرات دیگری نیز هستند که اندازه آنها متفاوت از مشخصات تولیدکننده است. بنابراین قبل از بکارگیری نانو ذرات باید اصول مشخصه‌یابی و اطمینان از ویژگی‌های محصول خریداری شده را رعایت و آزمایش‌های لازم را انجام داد.

¹ Kwak

۲-۶-۳ روش‌های دیگر

روش‌های متفاوت و بدیعی جهت ایجاد نانوسیالات توسعه یافته است. از جمله آن یو^۱ و همکاران [۴۳] یک میکرو راکتور میکرو فلورید برای تولید پیوسته نانوسیالات مس ایجاد کردند. با استفاده از این روش، می‌توان نانوسیالات مس را به طور مداوم سنتز کرد و خواص آنها را با تنظیم پارامترهای مانند کنترل واکنش‌دهنده، سرعت جریان و افزودنی‌ها تغییر داد. زو^۲ و همکاران [۴۴] نشان دادند که نانو سیالات کروم با کسر حجمی (تا ۱۰ درصد حجمی) می‌تواند از طریق یک روش تحول یافته جدید با کمک امواج فراصوتی و مایکروویو ایجاد شود. چن و وانگ^۳ [۴۵] نشان دادند که روش انتقال فاز نیز یک روش آسان برای به دست آوردن کلوئیدهای متنوع است.

۲-۷ مرور تحقیقات علمی بر روی خواص انتقال حرارت نانوسیالات

طبق تحقیقات صورت گرفته عوامل گوناگونی همچون اندازه، جنس، شکل و غلظت ذره، دما، نوع سیال پایه، نوع رژیم جریان، ترکیبات نگهدارنده نانو سیال و بسیاری عوامل دیگر در تعیین ویژگی‌های نانوسیال و میزان انتقال حرارت آنها موثرند. متاسفانه تاکنون معادلات جامع و دقیقی برای پیش‌بینی و تعیین ویژگی‌های فیزیکی نانو سیالات بدست نیامده است. تمامی روابط موجود به صورت تجربی و آزمایشگاهی است و با تغییر خصوصیات آن از قبیل جنس نانو مواد یا غلظت آن، نانوسیال خواص متفاوتی را از خود بروز می‌دهد.

¹ Yu

² Zhu

³ Chen and Wang

یک آزمون کاربردی توسط اهوچا^۱[۴۶] و لی یو^۲[۴۷] انجام گرفته بود که در آن بار ناشی از غلظت، ذرات، اندازه و نرخ جریان روی افت فشار این ماده دوغاب شکل و رفتار انتقال حرارتی آن مورد تحقیق قرار گرفت. در موارد گذشته ذرات معلق در ابعاد میکرومتر و یا حتی میلی‌متر بودند. چنین ذرات درشتی می‌توانند باعث مشکلات جدی همچون ساییدگی و مسدود کردن مسیر شوند، در نتیجه افزودن ذرات بزرگ معلق، در عمل افزایش انتقال حرارت زیادی ایجاد نمی‌کند. کاربرد نانو ذرات راهی موثر جهت بهبود ویژگی‌ها و مشخصات انتقال حرارتی سیالات است.

برخی محققین تلاش کردند نانوذرات را درون سیال معلق کنند تا سیالی با قابلیت انتقال حرارت موثر بالا ایجاد کنند. نتایج برخی آزمایشات اولیه مثلاً ایستمن^۳[۴۸] نشان داد که نانوسیالات شامل آب و نانوذرات اکسیدمس با درصد حجمی ۰.۵٪، افزایشی حدود ۶۰٪ در هدایت حرارتی قابل دستیابی است. یکی از دلایلی که باعث افزایش قابل توجه هدایت حرارتی می‌شود، وجود ذرات معلق در نانو سیالات است. هدایت حرارتی نانوسیال شدیداً به درصد حجمی نانو ذرات بستگی دارد. تا کنون تعدادی رابطه نیمه تجربی جهت محاسبه هدایت ظاهری مخلوط دو فازی مطرح شده است. به عنوان نمونه هامیلتون^۴ و همکاران [۴۹] یک مدل برای مخلوط‌های جامد مایع پیشنهاد کردند که در آن رابطه نسبت هدایت مخلوط دو فازی را ارائه کردند. و سپ^۵ [۵۰] برای محاسبه هدایت حرارتی مخلوط‌های جامد-مایع پیشنهاد دیگری ارائه کرد. در واقع مدل وی یک حالت ویژه از مدل هامیلتون بود. هر دوی روابط برای مخلوط‌های دو فازی که شامل ذرات با قطر میکرومتر و حتی میلی‌متر هستند قابل اجرا است.

¹ Ahuja

² Liu

³ Eastman

⁴ Hamilton

⁵ Wasp

به منظور تعیین هدایت حرارتی نانوسیالات یافته‌های تجربی و آزمایشگاهی مورد نیاز است. در روش سیم داغ گذرا یک سیم بسیار بلند و عمودی منبع خطی گرما است که دارای ظرفیت حرارتی صفر و هدایت حرارتی نامحدود فرض می‌شود. ویکهلم^۱ [۵۱۲۵] رابطه بین افزایش دمای سیم و هدایت حرارتی را در این روش پیشنهاد نمود. همچنین این روش توسط ماسودا^۲ [۵۲] برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی سیال حاوی ذرات بسیار کوچک به کار گرفته شده بود. مرشد^۳ و همکاران [۵۳]، زانگ^۴ و همکاران [۵۴]، هانگ^۵ و همکاران [۵۵]، لی^۶ و همکاران [۵۶]... برای اندازه‌گیری انتقال حرارت از روش سیم داغ استفاده کرده‌اند.

پتانسیل عظیم نانوسیالات در زمینه افزایش انتقال حرارت به معنای فرصت و همچنین چالشی بزرگ در علم گرما و مهندسی است. جنبه‌های حرکتی ذرات بسیار ریز، به طور مثال تراکم و توده شدن ذرات ممکن است در طی فرآیند حرکت سیال یا شکل‌گیری نانوسیال رخ دهد. این توده ذرات ممکن است در جریان نانوسیال شکل یابند. همه این حرکات نامنظم نانوذرات در نحوه توزیع و جابجایی ذرات و بازدهی انتقال حرارت نانو سیال تاثیر خواهد گذاشت.

۲-۸ فواید استفاده از نانوسیالات به عنوان حامل‌های انرژی و حرارت

¹ Wakehem

² Masuda

³ Morshed

⁴ Zhang

⁵ Hang

⁶ Li

۲-۸-۱ بهبود فرآیند انتقال انرژی

با کاهش اندازه ذرات یک جامد، مقدار آنها در واحد جرم بیشتر شده در نتیجه سطح مخصوص افزایش یافته، و از آنجایی که سطح ذرات در انتقال انرژی نقش بسیار مهمی دارد، در نتیجه استفاده از نانوسیال موجب افزایش انتقال انرژی می شود [۵۷]. از طرف دیگر، هر چه ابعاد ذرات کوچکتر باشد، جابجایی آنها، انتقال بار و جرم آسان تر می گردد.

۲-۸-۲ پایداری بیشتر و کاهش انسداد مجراها

افزودن ذراتی، با ابعاد میکرومتر به سیالات می تواند سبب ته نشینی سریع گردد. این موضوع سبب می شود که سوسپانسیون حاصل، پایداری مطلوب را نداشته باشد و همچنین بزرگی ذرات موجب بسته شدن مجاری انتقال و یکسره کانال ها می شود. استفاده از ذرات با ابعاد نانو تا حد زیادی این مشکلات را برطرف می سازد. با توجه به قابلیت های بالای نانو سیالات فرآیند انتقال می توان با استفاده از این مواد، سیستم های انتقال را کوچکتر کرد در حالی که کارایی این سیستم تغییری نکند.

۲-۸-۳ کاهش هزینه ها

با جایگزینی نانو سیالات به جای سیالات مورد استفاده متداول، با کاهش توان مصرفی پمپ های انتقال و کاهش اندازه و وزن تجهیزات مورد استفاده می توان در هزینه های سرمایه گذاری و عملیاتی تا حد زیادی صرفه جویی نمود.

۲-۹ پایداری نانوسیالات

آماده‌سازی یک سوسپانسیون یکنواخت، چالشی فنی است، چرا که برهمکنش‌های قوی و واندروالسی بین نانو ذرات تمایل دارند که ذرات به صورت توده‌ای باقی بمانند. این مسأله علاوه بر ته‌نشینی، فرآیند انتقال جرم، حرارت و الکتریسیته را نیز کاهش می‌دهد. بنابراین جهت پایدارسازی نانو سیالات روش‌های فیزیکی و شیمیایی مختلف وجود دارد که می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. روش‌های فیزیکی مثل: استفاده از ارتعاشات فراصوت^۱ و روش‌های شیمیایی مثل کنترل pH واکنش و استفاده از سورفکتانت یا ماده فعال کننده سطحی هستند [۵۸].

۲-۹-۱ کنترل pH واکنش

هنگامی که نانو ذرات در سیال پایه پراکنده شوند، رفتار کلی برهمکنش سیال - ذره به خواص سطح ذره وابسته خواهد بود. طبق آزمایشات می‌توان گفت، نیروهای دافعه بین ذرات هر سوسپانسیون در یک pH خاص صفر است در نتیجه ذرات به هم پیوسته و کلوخه‌هایی از ذرات تشکیل می‌شوند که این pH خاص را نقطه ایزوالکتریک می‌گویند. با افزایش اختلاف pH سوسپانسیون با pH نقطه ایزوالکتریک، نانو سیال ناپایدارتر می‌شود [۵۹]. در نتیجه تحرک ذرات در سیال پایه راحت‌تر شده و فرآیند انتقال بار، جرم یا حرارت راحت‌تر صورت می‌گیرد.

۲-۹-۲ استفاده از سورفکتانت

یک روش پایدار سازی سوسپانسیون‌های حاوی نانو ذرات، استفاده از پایدار کننده‌های شیمیایی است. این مواد باید دارای ویژگی‌های زیر باشند:

¹ ultrasonic vibration

- سازگاری شیمیایی با سیال پایه (پایدار کننده آبی برای سیالات آبی و پایدار کننده آلی برای سیالات پایه آلی)
- عدم ایجاد محیطی خورنده
- سازگاری شیمیایی با نانو ذرات
- تغییر ندادن pH

علاوه بر موارد فوق، اندازه، نوع و غلظت نانو ذرات در سیال پایه و نیز ماهیت شیمیایی سیال پایه روی میزان پایداری سوسپانسیون تاثیر زیادی دارد. این مواد در محلول های آبی، سطوح آب گریز نانو ذرات را اصلاح کرده و آبدوست کرده و برای محلول های بدون آب برعکس عمل می کنند [۵۹]. یون-های ماده فعال سطحی به سطح نانو ذرات چسبیده و یک لایه دو گانه یا چند گانه الکتریکی ایجاد می کنند و سبب ایجاد یک نیروی دافعه کولونی بین ذرات می شوند. همچنین این مواد به دلیل جرم حجمی کمتری که نسبت به ذرات مغناطیسی دارند، موجب می شوند که جرم حجمی متوسط ذرات دارای پوشش از جرم حجمی ذرات مغناطیسی بدون پوشش کمتر شده و تعلیق در سیال پایه به نحو بهتری صورت گیرد. از جمله سورفکتانت های متداول می توان به^۱ SDS^۲, SDBS^۳, PVP^۴, TAMH... اشاره کرد.

¹ Tetramethyl Ammonium Hydroxide

² Sodium Dodecyl Sulfate

³ Salt and Oleic Acid

⁴ Poly Vinyl Pyrrolidone

۲-۹-۳ استفاده از ارتعاشات فراصوت

در دو روش قبل، برای رسیدن به بک سوسپانسیون پایدار و جلوگیری از خوشه‌ای شدن ذرات، خواص سطحی ذرات تغییر داده می‌شود، اما ارتعاشات فراصوت وسیله‌ای قدرتمند برای پردازش و یکنواخت شدن ذرات درون سیال پایه است که از آن برای شکستن ذرات کلوخه شده و دستیابی به نانو_سیالی همگن استفاده می‌شود [۵۸]. آنچه در این روش مهم است زمان واکنش و شدت نوسانات اعمالی است. چرا که افزایش زمان نوسان از حد مشخص می‌تواند سبب تسریع پدیده کلوخه شدن ذرات گردد [۶۰].

۲-۱۰ نانو ذرات مغناطیسی

می‌دانیم که همه مواد در مقیاس نانو، خواصی متفاوت از خود بروز می‌دهند. مواد مغناطیسی نیز از این قاعده مستثنی نیستند. در واقع، خاصیت مغناطیسی از جمله خواصی است که به مقدار بسیار زیادی به اندازه ذره وابسته است. هر ماده مغناطیسی در حالت توده، از حوزه‌های مغناطیسی تشکیل شده است. هر حوزه حاوی هزاران اتم است که در آن چرخش الکترون‌ها یکسان و گشتاورهای مغناطیسی به صورت موازی جهت یافته‌اند. اما جهت گشتاور کلی هر حوزه با حوزه‌های دیگر متفاوت است. هر گاه یک میدان مغناطیسی بزرگ، تمام حوزه‌های مغناطیسی را هم جهت کند، تغییر فاز مغناطیسی رخ داده و مغناطش به حد اشباع می‌رسد. هر چه تعداد حوزه‌ها کمتر باشد، نیرو و میدان کمتری نیز برای هم جهت ساختن حوزه‌ها مورد نیاز است، و چنانچه ماده‌ای تنها دارای یک حوزه باشد، بنابراین نیازی به هم جهت کردن آن با دیگر حوزه‌ها نخواهد بود. از آنجا که قطر این حوزه‌ها در محدوده یک تا چند هزار نانو متر است، هر ذره‌ای که شامل یک حوزه باشد، می‌تواند نانو ذره به شمار رود. نانوذره دارای تعداد حوزه‌های کمی هستند و مغناطش آنها ساده‌تر است.

از طرف دیگر، بر اساس قانون دوم ترمودینامیک، بی‌نظمی در یک سیستم منزوی، در یک فرآیند خود بخودی افزایش می‌یابد. بنابراین موادی که از حالت طبیعی خارج می‌شوند، تمایل شدیدی برای

برگشت به وضعیت طبیعی خود دارند و مغناطش مثالی در این مورد است. اما چون نانو ذرات مغناطیسی نیاز به نیروی زیادی برای مغناطش ندارند، خیلی از حالت طبیعی فاصله نمی‌گیرند و پس از مغناطیس شدن تمایل چندانی برای از دست دادن خاصیت مغناطیسی و بازگشت به وضعیت اولیه را ندارند. به عنوان مثال، در مواد فرو مغناطیس وقتی اندازه ذره‌ای از یک حوزه مغناطیسی کوچک‌تر گردد، پدیده سوپر پارا مغناطیس به وقوع می‌پیوندد.

۱۱-۲ کاربردهای نانو سیالات مغناطیسی

۱-۱۱-۲ کاربردهای پزشکی

استفاده از فروفلوئیدها در گرما درمانی^۱ از اولین کاربردهای پزشکی این مواد بود. بن لادن و همکارانش در سال ۲۰۰۷ از جمله محققینی بودند که از نانو ذرات مگنتیت جهت استفاده در داروهای ضدسرطانی استفاده کردند. از نانو سیالات مغناطیسی برای وضوح بیشتر تصاویر مغناطیسی (MRI) هم استفاده می‌شود.

۲-۱۱-۲ کاربردهای زیست محیطی

با توجه به اینکه برخی از نانو سیالات مغناطیسی با سیستم بدن و محیط زندگی بشر سازگاری خوبی دارند. محققین در بسیاری از گیاهان از این مواد به عنوان عامل جهت بهبود شرایط محیطی و درونی رشد گیاه استفاده کردند. مگنتیت یکی از نانو سیالات مغناطیسی بوده که دوستدار محیط زیست است. به عنوان مثال پینتیلیه^۲ و همکارانش [۶۱] تاثیر سیال مغناطیسی Fe_3O_4 را بر آنزیم‌های گیاه ذرت بررسی کردند و متعاقباً افزایش میزان رشد را در گونه‌های مورد بررسی مشاهده کردند.

¹ Hyper thermia

² Pintilie

۲-۱۱-۳ کاربرد نانو سیالات در صنعت

از اولین کاربردهای فروفلوئیدها در فناوری‌های نوین، استفاده از آنها به عنوان درزگیری‌های دینامیکی مثل هارد دیسک کامپیوتر است. استفاده دیگر نانو سیالات مغناطیس در بهبود کیفیت بلندگوها، کمک فنر ماشین و کاهش لرزش‌های موتور ماشین، رنگ کردن هواپیماها را نام برد.

۲-۱۲ خواص مغناطیسی ذرات مغناطیسی

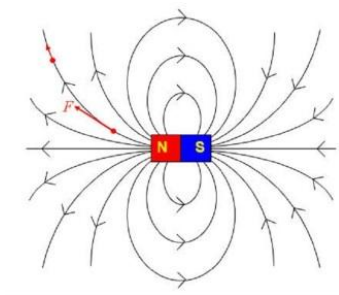
ویژگی‌های مغناطیسی اساساً از حرکت الکترون‌ها یعنی حرکت اوربیتالی و حرکت اسپینی ناشی می‌شود. همه مواد با میدان مغناطیسی بر همکنش می‌کنند. در این برهمکنش، مواد مختلف به صورت‌های متفاوتی عمل می‌کنند. گروهی مانند مواد پارامغناطیس و فرومغناطیس به سمت یک قطب مغناطیسی جذب می‌شوند و گروهی نیز همانند مواد دیامغناطیس از خود دافعه اندکی نشان می‌دهند. اعمال میدان مغناطیسی H به نمونه، مغناطش M را در آن بوجود می‌آورد که از طریق ابزارهای مغناطیس‌سنج قابل اندازه‌گیری است.

۲-۱۲-۱ منشاء خاصیت مغناطیسی مواد

منشاء خاصیت مغناطیسی جامدها، الکترون‌های متحرک هستند. هر الکترون در یک اتم دارای گشتاور مغناطیسی است، که از دو منبع، یکی حرکت مداری الکترون دور هسته و دیگری حرکت اسپینی به دور محور خودش ایجاد می‌شود. بنابراین هر الکترون در یک اتم با گشتاورهای مغناطیسی مداری و اسپینی می‌تواند به طور دائم مانند آهنربای کوچکی عمل نماید و میدان مغناطیسی تولید کند [۶۲].

۲-۱۲-۲ میدان مغناطیسی (H)

یکی از اساسی‌ترین مفاهیم در مغناطیس، میدان مغناطیسی است. این میدان بوسیله حرکت ذره باردار یا توسط یک آهنربای دائمی ایجاد می‌شود. میدان مغناطیسی کمیتی برداری است و شدت میدان مغناطیسی را با نماد H نمایش می‌دهند. در آهنربای دائمی هیچ جریان الکتریکی وجود ندارد، اما حرکت اسپینی و مداری الکترون‌ها در داخل آهنربا است که منجر به مغناطش ماده و ایجاد میدان مغناطیسی در اطراف آن می‌شود [۶۲]. خطوط میدان اطراف آهنربا در شکل (۲-۲) نشان داده شده است.



شکل ۲-۲ نمای خطوط میدان اطراف آهنربا

۳-۱۲-۲ القای مغناطیسی (B)

اگر ماده‌ای در حضور میدان خارجی قرار گیرد، شدت میدان مغناطیسی در درون آن تغییر خواهد کرد، این شدت که به تراوایی مغناطیسی آن ربط دارد، با القای مغناطیسی بیان می‌شود و بر حسب T (تسلا) بیان می‌گردد. (در سیستم CGS بر حسب گوس بیان می‌شود). در واقع اعمال میدان با شدت H ، القای مغناطیسی یا شار مغناطیسی یا چگالی شار ایجاد می‌کند و با نماد B نمایش داده می‌شود. در برخی مواد، B تابعی خطی از H است و در خلا بین این دو پارامتر رابطه زیر برقرار است:

$$B = \mu_0 H \quad (۱-۲)$$

که μ_0 ثابت نفوذپذیری مغناطیسی خلا و برابر با $4\pi \times 10^{-7}(\text{T.m/A})$ است. در برخی مواد بویژه مواد فرومغناطیس، B تابع خطی از H نیست.

$$B = \mu H \quad (2-2)$$

μ ثابت نفوذپذیری مغناطیسی ماده

در واقع گشتاورهای مغناطیسی درون یک ماده تمایل دارند تا با میدان خارجی هم‌راستا شوند [۶۳].

۲-۱۲-۴ مغناطش (M)

به مقدار میانگین مجموع گشتاورهای مغناطیسی ماده در واحد حجم آن می‌گویند، که معیار سنجش میزان مغناطیسی شدن یک جسم است. و واحد آن در سیستم SI، A/m است.

$$M = \frac{\sum m}{V} \quad (3-2)$$

که m گشتاور مغناطیسی و V حجم ماده است.

۲-۱۲-۵ حوزه‌های مغناطیسی

برای به حداقل رساندن انرژی برهمکنش مغناطیسی، مواد فرومغناطیس به حوزه‌هایی از گشتاورهای مغناطیسی موازی تقسیم شده‌اند. در هر حوزه، گشتاورهای مغناطیسی در یک راستا جهت‌گیری می‌کنند، در حالی که صفبندی اسپین‌ها در حوزه‌های همسایه معمولاً با آنها موازی نیست. این نحوه آرایش حوزه‌ها بوسیله دیواره حوزه از یکدیگر تفکیک می‌شوند.

۲-۱۳ رفتار مغناطیسی مواد

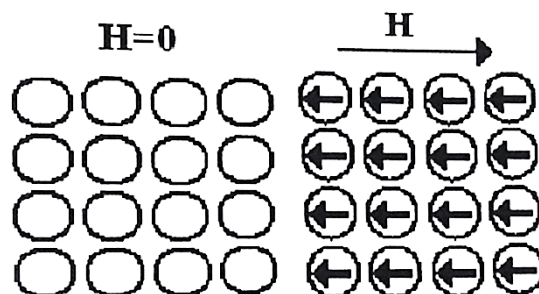
مواد مختلف بر اساس خاصیتی که در میدان مغناطیسی از خود نشان می‌دهند به چند گروه اصلی دیامغناطیس، پارامغناطیس، فرومغناطیس، فری‌مغناطیس و پادفرومغناطیس تقسیم‌بندی می‌شوند. نمونه‌ای از این مواد در جدول (۲-۲) آمده است.

جدول ۲-۲ دسته بندی مغناطیسی مواد [۶۴]

نوع ماده مغناطیسی	مثال
دیا مغناطیس	Bi, H, He, NaCl, Au, Cu, Si, Ge
پارا مغناطیس	K, O
فری مغناطیس	Fe ₃ O ₄ , NiFe ₂ O ₄
آنتی فرمغناطیس	MnO, Nip, Fes, CoCl ₂
سوپر پارا مغناطیس	ذرات فرومغناطیسی پراکنده شده در زمینه غیر مغناطیسی

۲-۱۳-۱ دیا مغناطیس

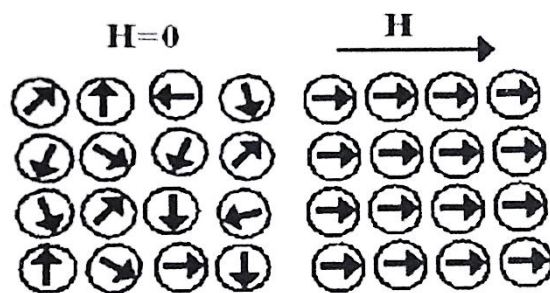
این مواد فاقد گشتاور مغناطیس ذاتی هستند، در غیاب میدان هیچ خاصیت مغناطیسی از خود بروز نداده‌اند. جهت جریان‌های بنیادی در دیامغناطیس واقع در میدان مغناطیسی خارجی چنان است که میدان مغناطیسی آنها مخالف میدان خارجی است یعنی این مواد با آهنربا دفع می‌شوند.



شکل ۲-۳ جهت گیری دو قطبی های مغناطیسی در مواد دیا مغناطیس در غیاب میدان مغناطیسی [۶۴]

۲-۱۳-۲ پارامغناطیس

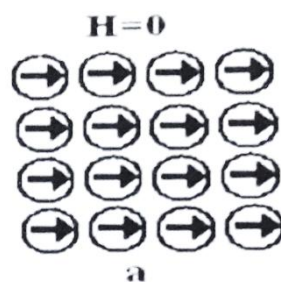
این مواد دارای گشتاور مغناطیسی ذاتی هستند ولی گشتاورها دارای جهت‌گیری تصادفی بوده و در نتیجه مغناطش نمونه صفر است. این مواد نیز در غیاب میدان خاصیت مغناطیسی ندارند ولی اعمال میدان موجب همسو شدگی گشتاورهای ذاتی شده و در نتیجه مغناطش خالص را در پی خواهد داشت. طبیعتاً هر چه میدان خارجی قوی‌تر باشد و نیز دما کمتر باشد (دما باعث جنبش گشتاورها و در نتیجه عدم همسو شدگی می‌شود) مغناطش قوی‌تری حاصل خواهد شد.



شکل ۲-۴ جهت‌گیری دو قطبی‌های مغناطیسی در مواد پارامغناطیس [۶۴]

۲-۱۳-۳ فرومغناطیس

این حالت به پدیده ایجاد گشتاور مغناطیس موازی و در نتیجه مغناطش خودبه‌خودی گفته می‌شود. این مواد شامل تعدادی حوزه هستند که در غیاب میدان خارجی متقابلاً مغناطش همدیگر را خنثی می‌کنند. می‌توان گفت فرومغناطیس سازوکاری است که توسط آن مواد خاص مانند آهن، شکل آهنربایی دائم پیدا می‌کند و یا به آهنربا جذب می‌شود. این مواد بیشتر فلز هستند.



شکل ۲-۵ جهت‌گیری دو قطبی‌های مغناطیسی در مواد فرومغناطیس [۶۴].

۲-۱۳-۴ پاد فرومغناطیس

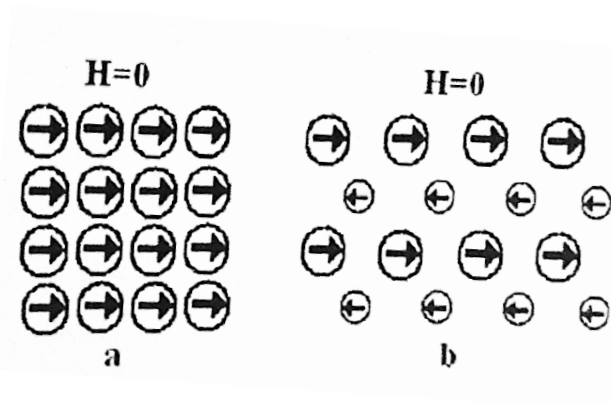
این مواد دارای دو زیر شبکه متمایز هستند که در هر زیر شبکه گشتاورهای مغناطیسی با هم موازی اما نسبت به زیر شبکه دیگر پاد موازی هستند. این مواد در حالت عادی مغناطش صفر دارند.



شکل ۲-۶ جهت‌گیری دو قطبی‌های مغناطیسی در مواد پاد فرومغناطیس [۶۴].

۲-۱۳-۵ فری مغناطیس

در این مواد هم دو زیر شبکه داریم، ولی آنها معادل نیستند. این مواد بیشتر نیمه‌رسانا یا عایق هستند.



شکل ۲-۷ جهت‌گیری دو قطبی‌های مغناطیسی در مواد فری مغناطیس [۶۴].

۲-۱۴ فریت‌های مغناطیسی

به دسته‌ای از مواد فرومغناطیس که بخش اصلی تشکیل دهنده آن اکسید آهن است، فریت گفته می‌شود. در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی بر روی فریت‌ها صورت گرفته که سبب پیدایش کاربردهای جالب این مواد مغناطیسی در صنعت و الکترونیک شده است. فریت‌ها نمونه‌ای بارز از مواد فری-مغناطیس هستند [۶۲].

۲-۱۴-۱ تاریخچه فریت‌ها

تحقیقات علمی در مورد فریت‌ها از اواسط قرن نوزدهم آغاز گردید. سپس توسط دو دانشمند ژاپنی به نام‌های تاکشی^۱ پدر علم فریت و یوگور^۲ جهت کاربردهای صنعتی دنبال گردید. پس از جنگ جهانی دوم در سال ۱۹۴۶ اسنوک^۳ وجود ماده ای مغناطیسی از نوع سرامیک (فریت) را با خاصیت نفوذناپذیری مغناطیسی بالا، مقاومت الکتریکی خوب و تلفات هدایتی کم، جهت استفاده در رادارها کشف کرد. در سال ۱۹۴۸ شخصی به نام نیل^۴ تئوری بر مبنای فری مغناطیس ارائه کرد. پس از آن تحقیقات مغناطیس براساس فریت‌ها گسترش پیدا کرد و محققین دیگری هم توانستند ترکیبات مختلفی از مخلوط‌های اکسید آهن، نیکل، روی و منگنز را بررسی کرده و به نتایج مطلوبی از نظر مقاومت الکتریکی بالا در مقایسه با فلزات دست یابند [۶۵].

¹ Takeshi

²Yogor

³ Snoek

⁴ Neel

۲-۱۴-۲ کاربرد فریت‌ها

فریت‌ها از نظر صنعتی اهمیت بالایی دارند و مغناطش اشباع نسبتاً زیادی برخوردارند. به همین علت در هسته‌ی مغناطیسی ترانسفورماتورها، سلف‌ها، مولدها و تجهیزات الکتریکی بزرگ کاربرد دارند. فریت‌ها از لحاظ رسانندگی الکتریکی ضعیف بوده و مقاومت ویژه الکتریکی بالایی دارند. بنابراین در صنایع برق و وسایل الکترونیکی کاربرد دارند. این مواد با توجه به ویژگی‌های منحصر به فردشان در مخابرات، پزشکی، کامپیوتر و ذخیره اطلاعات و... کاربرد دارند [۶۵].

۲-۱۴-۳ انواع فریت‌ها

فریت‌ها به دو دسته فریت‌های نرم و سخت طبقه‌بندی می‌شوند. فریت‌های نرم دسته‌ای از اکسیدهای مغناطیسی با فرمول عمومی MeFe_3O_4 هستند که در حضور میدان مغناطیسی، مغناطیس موقت دارند. فریت‌های سخت دسته‌ای از اکسیدهای مغناطیسی با فرمول عمومی $\text{M Fe}_{12}\text{O}_{19}$ بوده که به صورت اکسید هستند و جزو مواد سرامیکی طبقه‌بندی می‌شوند، از لحاظ مکانیکی سخت بوده و مغناطش دائمی نیز دارند [۶۵-۶۶].

۲-۱۵ نانوسیالات بر پایه فریت

پراکندگی نانو مواد مختلف به شکل ذره در انواع مختلف مانند فلزی و اکسید فلزی و غیره در یک مایع حامل شناخته شده به عنوان نانوسیال، موضوع تحقیقات چشمگیری در طول یک دهه به علت کاربرد بالقوه در انتقال حرارت و خنک کننده‌های الکترونیکی بوده است [۶۷-۶۹]. نانو سیالات مغناطیسی (یا فروفلوئید)، که شامل مخلوط کلئیدی نانوذرات فوق‌العاده مغناطیسی تعلیق شده در یک مایع حامل غیرمغناطیسی هستند، یک کلاس خاصی از مواد مغناطیسی و سیالات هوشمند را تشکیل می‌دهند [۷۰-۷۲]. برای جلوگیری از تجمع ذرات (با توجه به برهمکنش لندن-ون-دروالس و

تعامل مغناطیسی بین ذرات)، نانو ذرات معلق با یک لایه سورفکتانت مانند اسید اولئیک [۷۳-۷۵]، هیدروکسید تتراماتیم [۴۳] و غیره پوشش داده می‌شوند. برهمکنش واندروالس بین اجسام کروی با شعاع R_1 و R_2 تابعی است از فاصله بین آنها و به صورت زیر توصیف می‌شود:

$$F_{vw}(v) = -\frac{AR_1R_2}{(R_1+R_2)6r^2} \quad (۴-۲)$$

که در آن A یک ضریب است که به خصوصیات ماده بستگی داشته و مقدار آن 10^{-19} تا 10^{-20} ژول متغیر است و r فاصله بین مرکز کره‌ها می‌باشد. طیف وسیعی از مایعات را می‌توان به عنوان حامل مورد استفاده قرار داد و هر چند برخی از نانوسیالات مغناطیسی به صورت تجاری در دسترس هستند تا در مسائل مختلف مورد استفاده قرار گیرند [۷۷]. به لحاظ نظری، باید بتوان ذرات را به خوبی درون حامل پراکنده کرد به طوری که شرایط لازم مانند ویسکوزیته، تنش سطحی، درجه حرارت و پایداری اکسیداتیو، فشار بخار و ثبات در محیط‌های فعال را تنظیم نمود [۷۸]. با این حال، انتخاب یک مایع حامل به عنوان MNF^۱ مناسب برای انتقال حرارت نیاز به برخی از الزامات اضافی مانند هدایت بالا، ظرفیت گرمایی بالا، ضریب انبساط حرارتی بالا و غیره دارد. سیالات انتقال گرما متعارف (مانند آب، روغن، اتیلن گلیکول، و غیره) می‌توانند یک گزینه مناسب برای تحقیقات در حال توسعه باشد. نانوذرات مغناطیسی که به عنوان نانوسیالات مغناطیسی استفاده می‌شوند معمولاً در اندازه‌های مختلف و مورفولوژی از مواد فلزی (مواد فرومغناطیسی) مانند آهن، کبالت، نیکل و اکسیدهای آنها (مواد فرومغناطیسی) مانند مگنتیت (Fe_3O_4)، فریت‌ها نوع اسپینل و غیره به عنوان MNF برای قرار دادن کلئیدها در بخش خاصی از دستگاهها با استفاده از نیروهای مغناطیسی استفاده شده‌اند. به همین دلیل، جنبه‌های اصلی این تحقیقات شامل افزایش مغناطش مایع، خواص ویژه سطوح نانو

¹ Magnetit nano fluid

فلزهای مغناطیسی در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی و اثرات مغناطیسی می‌شود. به طوری که استفاده از MNF به عنوان حامل‌های هدایت گرمایی در برنامه‌های علمی اهمیت ویژه‌ای یافته است [۷۹-۸۱].

به طور خاص، امکان ایجاد و کنترل فرآیند انتقال حرارت و جریان سیال با استفاده از یک میدان مغناطیسی خارجی، یک رویکرد جدید را برای اهداف تکنولوژیکی افزایش انتقال حرارت برای خنک-کننده برق بالای ترانسفورماتورها و انتقال حرارت سیستم‌های مغناطیسی در سیستم‌های تبدیل انرژی ایجاد نموده است [۷۸]. استفاده از MNF در حضور میدان مغناطیسی می‌تواند به عنوان یک تکنیک انتقال گرمای ترکیبی با افزودنی‌های جدید (به عنوان مثال نانو ذرات مغناطیسی) و یک میدان مغناطیسی خارجی برای افزایش فرآیند انتقال حرارت در نظر گرفته شود. در مقایسه با نانوسیم‌های معمولی (نانومواد غیرمغناطیسی) استفاده از MNF تحت تاثیر میدان مغناطیسی خارجی برای افزایش انتقال حرارت مزایای زیر را در بر دارد:

الف) عدم وجود هر بخش متحرک مکانیکی برای ترک سیال در دستگاه‌های تبدیل انرژی معمولی و خنک‌کننده‌ها به طوری که جریان MNF بوسیله اختلاف دما و میدان مغناطیسی غیریکنواخت ایجاد می‌شود و می‌تواند با استفاده از یک سیستم مغناطیسی دائمی کنترل شود. پیکربندی این سیستم جهت و نوع جریان سیال را تعیین می‌کند. در نتیجه، انتقال گرمای مغناطیسی به راحتی انجام می‌شود.

ب) امکان تنظیم خواص ترموفیزیکی (هدایت حرارتی و ویسکوزیته) MNF با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی وجود دارد [۸۲-۸۳].

۲-۱۶ آماده‌سازی نانوسیالات مغناطیسی

نانوسیالات مغناطیسی از طریق پراکندگی ذرات سوپراپارامغناطیسی که درون یک مایع حامل غیرمغناطیسی از قبیل آب، اتیلن گلیکول، روغن هیدروکربن و غیره پخش شده است تهیه می‌شوند

[۸۴]. MNF مورد استفاده در برنامه‌های انتقال حرارت تحت تاثیر میدان مغناطیسی، گرادیان میدان مغناطیسی و یا میدان گرانشی قرار می‌گیرد که ممکن است در رسوب‌گذاری ذرات در مایع نقش داشته باشد. از آنجا که محدوده بر همکنش نانوذرات مغناطیسی در زمینه‌های کاربردی به طور مستقیم به توزیع اندازه ذرات نانوذرات مغناطیسی مربوط می‌شود [۸۲]، واضح است که اندازه نقش مهمی در رسوب‌گذاری ذرات بازی می‌کند و بنابراین بر پایداری MNF تأثیر می‌گذارد. ثبات در برابر رسوب‌گذاری ذرات ممکن است هنگامی که انرژی حرارتی ذرات بزرگتر از انرژی‌های مغناطیسی و گرانشی باشد، حاصل شود. حداکثر اندازه ذرات توسط ادنباخ^۱ [۸۲] تعیین شده است به طوری که برای نانوسیالات در حضور میدان مغناطیسی:

$$d < \left(\frac{6k_B T}{\mu_0 M_0 T H} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (۵-۲)$$

است و در حضور میدان گرانشی

$$d < \left(\frac{6k_B T}{\Delta \rho g h T} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (۶-۲)$$

به طوری که k_B ، T ، M_0 ، $\Delta \rho$ ، g ، d ، H و μ_0 به ترتیب عبارتند از: ثابت بولتزمن^۲، دما، مغناطیس خودبه‌خودی، تفاوت تراکم بین ذره مغناطیسی و مایع حامل، شتاب گرانشی، ارتفاع نمونه، میدان مغناطیسی و نفوذ پذیری خلاء. علاوه بر این، از تجمع نانوذرات مغناطیسی در طول سنتز باید اجتناب شود. در اصل، تجمع ذرات، قطر فعال آنها را افزایش می‌دهد و بنابراین باعث عدم کنترل در تعادل سیستم می‌شود. حداکثر قطر ذرات (d) در این مورد به صورت $d < \left(\frac{144k_B T}{\mu_0 M_0^2} \right)^{\frac{1}{3}}$ تخمین زده شده است که مربوط به حداکثر انرژی است که دو ذره متقابل در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند [۸۲].

¹ Odenbach

² Boltzman

اخیرا تلاش‌هایی برای ساخت نانوذرات مغناطیسی فلز و اکسیدفلزی با توزیع اندازه مناسب انجام شده است [۸۳و۸۴]. نانوذرات فلزی مانند نیکل، آهن و کروم از طریق تکنیک‌هایی مانند کاهش ساده نمک‌های فلزی، کاهش فاز گازی فلزات، ترمولیز کامپوزیت‌های فلزی-پلیمر، تجزیه حرارتی کمپلکس های فلزی-کربنی و سیستم سنتز قوس الکتریکی نانو ذرات ساخته شده‌اند [۸۴-۸۵]. نانوذرات مغناطیسی از اکسیدفلزی مانند $g\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ، Fe_3O_4 و فریت‌های نوع اسپینل فرمول MFe_2O_4 (با $\text{M} = \text{Mn}, \text{Co}, \text{Zn}, \text{Ni}$ و غیره) بیشتر در MNF به دلیل پایداری شیمیایی آنها استفاده می‌شود. نانوذرات مغناطیسی اکسیدفلزی معمولاً توسط هم‌رسوبی شیمیایی، میکرو امولسیون و تکنیک انتقال فاز تهیه می‌شوند [۷۷، ۸۴، ۸۶].

گزارشات نشان می‌دهد که استفاده از ذره های سوپر پارامغناطیسی مورد نیاز در MNF یک مورد حتمی برای پایداری مغناطیسی نانو سیالات نیست [۷۰]. تعلیق نانوذرات مغناطیسی در مایعات حامل با توجه به حضور نیروی واندروالس و نیروهای مغناطیسی پایدار نخواهد بود، به گونه‌ای که منجر به تجمع غیرقابل برگشت ذرات و رسوبات بعدی آنها خواهد شد. بنابراین آماده‌سازی MNF پایدار نیازمند درک نیروهای بین نانو ذرات مغناطیسی برای مقابله با نیروی واندروالس و تعاملات مغناطیسی دوقطبی دوقطبی است. مکانیزم دافعه بین ذرات می‌تواند با پوشاندن ذرات با سورفاکتانت پلیمری که منجر به دافعه آنتروپی می‌شود و یا با شارژ کردن سطح ذرات، تولید دافعه کولونی فراهم گردد [۷۰، ۷۶]. جالب توجه است که انتخاب مکانیزم مورد استفاده به طور عمده وابسته به خواص مایعات حامل و ذرات است. فرآیند پراکندگی معمولاً در حضور یک سورفاکتانت پلیمری با تجهیزات اولتراسونیک و یا یک هموژنایزر با سرعت بالا انجام می‌شود.

۲-۱۶-۱ تحقیقات تجربی بر روی هدایت گرمایی

تحقیقات تجربی در مورد هدایت حرارتی MNF عمدتاً در دمای اتاق با روش های معمول برای نانو سیالات معمولی (غیرمغناطیسی) انجام می‌شود [۸۷]. تکنیک‌های اغلب استفاده شده برای MNF عبارتند از تکنیک سیم داغ [۸۸-۹۰] و تکنیک‌های آنالیز کننده‌های ثابت حرارتی [۹۱-۹۲]. پل^۱ و همکاران [۸۷] اطلاعات دقیق مربوط به این دو تکنیک و همچنین مزایا و معایب آنها را ارائه دادند.

۲-۱۶-۲ افزایش هدایت گرمایی در غیاب میدان مغناطیسی

تحقیقات تجربی بر روی هدایت حرارتی MNF در غیاب میدان مغناطیسی نشان می‌دهد که افزایش هدایت حرارتی به طور عمده توسط پارامترهای مختلف تحت تاثیر قرار می‌گیرد، به عنوان مثال، مقدار نانو ذرات مغناطیسی، اندازه ذرات، توزیع اندازه ذرات، ترکیب شیمیایی نانو ذرات مغناطیسی، لایه پوشش ذرات، و غیره. برخی از کارها بر روی اثر کسر حجم ذرات نشان می‌دهد که هدایت حرارتی MNF با افزایش حجم ذرات افزایش می‌یابد [۹۱، ۸۵، ۷۶]. ابارشی^۲ و همکاران [۷۶] هدایت حرارتی نانوسیال مغناطیسی بر پایه آب را به عنوان عملکرد کسر حجمی ذرات در دماهای مختلف اندازه‌گیری کردند. هدایت حرارتی با افزایش میزان ذرات و درجه حرارت افزایش می‌یابد. بالاترین میزان هدایت حرارتی در دماهای مختلف در ۳ درصد کسر حجمی و در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد مشاهده شد. داده‌های تجربی آنها یک توافق نسبتاً خوبی با نتایج شبیه‌سازی شده توسط مدل مرشد^۳ نشان داد (جدول ۱-۲). لی^۴ و همکاران بررسی اثرات کسر حجم ذرات، سورفکتانت‌ها و میدان مغناطیسی بر

¹ Pol

² Abarashi

³ Murshed

⁴ Li

خواص انتقال حرارت یک نانوسیال مغناطیسی بر پایه آب را بررسی کردند [۹۱]. آنها مشاهده نمودند که افزایش هدایت حرارتی MNF با افزایش مقدار ذرات جامد با یا بدون میدان مغناطیسی مشاهده می‌شود. نتایج آنها همچنین نشان داد که ویسکوزیته MNF با درصد حجم نانو ذرات مغناطیسی معلق و سورفکتانت‌ها افزایش می‌یابد. یو^۱ و همکاران [۹۳] اثر کسر حجم ذره بر روی هدایت حرارتی یک نانو فلز مغناطیسی Fe₃O₄ مبتنی بر نفت را بررسی کرد که از طریق یک روش انتقال فازی ساخته شده است. نسبت هدایت حرارتی به طور خطی با افزایش حجم افزایش یافته و درجه حرارت مقدار آن در ۱.۳۴٪ درصد بود. برای بررسی بیشتر اثرات دما بر افزایش هدایت حرارتی، اندازه گیری‌ها در محدوده دما از ۱۰ تا ۶۰ درجه سانتیگراد صورت گرفته است به طوری که نتایج نشان می‌دهد، هدایت مطلق حرارتی با افزایش دما افزایش می‌یابد، درحالی که نسبت هدایت حرارتی تقریباً ثابت است و هدایت حرارتی MNF از مایع حامل ردیابی می‌شود. فیلیپ^۲ و همکاران [۹۲] کار را بر روی هدایت حرارتی MNF انجام دادند که از طریق پراکندگی نانو ذرات مگنتیت در آب، اتیلن گلیکول و نفت سفید به ترتیب به عنوان مایعات حامل انجام شد. نتایج آنها نشان داد که نسبت هدایت حرارتی با افزایش درصد ذرات افزایش یافته است، اما افزایش هدایت گرمایی برای MNF با کسر حجمی ۰.۷۱٪ دارای ۰.۰۳۵ بود و بیشترین میزان هدایت حرارتی در ۷.۸٪ و حجم ۲۳٪ بوده است. هنگ^۳ و همکاران [۹۴-۹۵] افزایش هدایت حرارتی یک نانوسیال مغناطیسی سیال پایه اتیلن- گلیکول بر اساس Fe را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که نسبت هدایت حرارتی با افزایش کسر حجمی به طور غیرخطی افزایش می‌یابد. نتایج آنها تأیید افزایش هدایت حرارتی با تنظیم کسر حجم ذرات را تأیید کرد. در مقایسه نانوذرات مس و آهن پراکنده شده در اتیلن گلیکول، افزایش هدایت حرارتی در نانو سیال آهن بالاتر از نانو سیالات مسی است. افزایش هدایت حرارتی مشاهده شده به

¹ Yu

² Phillip

³ Hang

این واقعیت مربوط است به این که نانو ذرات در مایعات با ضرایب کسر حجمی بالاتر، خوشه‌های نانو ذرات را با نرخ بالاتر تشکیل می‌دهند. ¹ زو¹ و همکاران [۳۹] یک نانوسیال مغناطیسی Fe_3O_4 بر پایه آب مقطر تهیه کردند و اثر کسر حجمی بر افزایش هدایت حرارتی MNF را مورد بررسی قرار دادند. گوتیرز^۲ [۸۹] هدایت حرارتی نانو سیالات مغناطیسی فریت اسپینل را که با نانوذرات مغناطیسی $Mn_xZn(1-x)Fe_2O_4$ تهیه شده (با 0.3، 0.7، 1) تهیه شده است را بررسی کردند. تجزیه و تحلیل وابستگی کسر حجمی به هدایت حرارتی نشان می‌دهد که هدایت حرارتی نسبی به طور خطی با افزایش میزان کسر حجمی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، بررسی اثرات ترکیب ذرات نشان می‌دهد که هدایت حرارتی نسبی به ترکیب شیمیایی نانو ذرات مغناطیسی وابسته نیست. افزایش هدایت حرارتی به اثرات اندازه ذرات و کسر حجم نانو ذرات مغناطیسی مربوط می‌شود. تجزیه و تحلیل اثرات مایع حامل نشان می‌دهد که نسبت هدایت حرارتی برای یک مایع حامل با هدایت حرارتی کمتر به اندازه $k=0.12-0.14$ بالاتر است. باین‌حال، هدایت مطلق حرارتی برای MNF بیشتر است. به عنوان مثال، هدایت مطلق حرارتی برای نانوسیالات مغناطیسی آب پایه ($k=0.801$ W/Km) سه برابر بیشتر از یک روغن پایه ($K=0.255$ W/Km) برای بالاترین غلظت حجمی هر دو مایع گزارش شده است. هولوتسکو^۳ و همکاران [۹۶]، یک معادله نیمه تجربی برای هدایت حرارتی مؤثر را از طریق از تجزیه و تحلیل مغناطیسی و گرآنولومتری برای ارزیابی هدایت حرارتی نانوسیال های مغناطیسی مگنتیت مبتنی بر روغن ترانسفورماتور گزارش کرده است. در تجزیه و تحلیل این معادله نیمه تجربی برای هدایت حرارتی مؤثر مدل Holotescu-Stoian [۹۷] که با استفاده از نتایج تجربی به دست آمده است توزیع اندازه از وابستگی مغناطیسی گرآنولومتری و مقایسه با مقادیر اندازه گیری مؤثر هدایت حرارتی از طریق روش توپ گرم انجام شده است.

¹Zhou

² Gutierrez

³ Holotescue

۲-۱۶-۳ افزایش هدایت گرمایی و کنترل پذیری در میدان مغناطیسی

در حضور میدان‌های مغناطیسی علاوه بر پارامترهای ذکر شده بر روی هدایت حرارتی MNF بدون میدان مغناطیسی، هدایت حرارتی MNF توسط جهت‌گیری و شدت میدان مغناطیسی تحت‌تاثیر قرار می‌گیرد. اندازه‌گیری هدایت حرارتی در حضور میدان مغناطیسی معمولاً در دمای اتاق با استفاده از تکنیک‌های مشابه که در غیاب میدان مغناطیسی استفاده می‌شود، انجام می‌شود. میدان مغناطیسی توسط الکترومگنت یا آهنرباهای دائمی تولید می‌شود. ریچلر^۱ و همکاران [۹۸] اثر ساختاری میدان مغناطیسی بر روی جریان گرما در MNF ها بر اساس اندازه‌گیری‌های هدایت حرارتی در تنوع نحوه اعمال میدان مغناطیسی خارجی مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور، یک ابزار اندازه‌گیری توسعه یافته بر اساس یک منبع حرارت گرمای شناور و متغیر به جای روش سیم‌کشی استاندارد برای فعال-کردن هر دو جهت موازی و عمود میدان مغناطیسی و شار گرما استفاده می‌شود. اندازه‌گیری‌های هدایت حرارتی در تغییر شدت و جهت یک میدان مغناطیسی خارجی نسبت به شار حرارت انجام می‌گردد.

لی^۲ و همکاران [۸۸] در مورد تاثیر قدرت میدان مغناطیسی خواص انتقال MNF تحقیقات مفصلی انجام داده‌اند. آنها دریافته‌اند که یک میدان مغناطیسی خارجی اثرات قابل توجهی بر هدایت حرارتی و ویسکوزیته MNF دارد. صرف‌نظر از قدرت میدان مغناطیسی اعمال شده و کسر حجم ذرات، تغییر کوچکی در هدایت حرارتی MNF در میدان مغناطیسی عمود بر گرادیان درجه حرارت مشاهده می‌شود. هدایت حرارتی MNF با قدرت میدان مغناطیسی اعمال شده موازی با گرادیان درجه حرارت افزایش می‌یابد. علت این افزایش تغییرات ریزساختارها ناشی از میدان مغناطیسی خارجی در MNF ها است. آنها بیشتر توضیح دادند که زمانی که میدان مغناطیسی موازی با گرادیان درجه حرارت است، زنجیره ذرات تشکیل شده، پل‌های مؤثرتری را برای انتقال انرژی درون MNF در امتداد

¹ Krichler

² Li

گرادیان درجه حرارت فراهم می‌کند و فرآیند حرارتی را در MNF افزایش می‌دهد. معلوم شده است ویسکوزیته در درجه اول با میدان مغناطیسی افزایش یافته و در نهایت با ثابت شدن مغناطیسی مایع مغناطیسی یک حالت اشباع را به دست می‌آورد. این رفتار همچنین با وجود ساختارهای زنجیره‌ای در MNF با توجه به تاثیر میدان مغناطیسی توضیح داده شده است.

فیلیپ^۱ و همکاران [۹۲-۸۳] افزایش قابل توجهی از هدایت حرارتی تا $K / K_f = 40$ (300 %) در نانوسیالات بر پایه مگنتیت، تحت تاثیر میدان مغناطیسی اعمال شده در امتداد جریان جریان گرما را، گزارش کرده‌اند. افزایش هدایت حرارتی گزارش شده در مقدار پیش‌بینی شده برای هدایت حالت موازی با میدان است. کاهش در K پس از مقدار بحرانی میدان مغناطیسی توسط "اتصال زنجیره‌ای" نانوذرات توضیح داده شد. آنها معتقد بودند که مورفولوژی و توزیع خوشه هر دو می‌تواند بر افزایش هدایت حرارتی تأثیر بگذارد و حمل گرما را از طریق دانه‌های ایجاد شده فراهم سازد. در گزارش آنها، یک نانوسیال مغناطیسی قطبش پذیر (مغناطیسی نانو) می‌تواند به عنوان یک مایع حرارتی قابلیت سوئیچینگ و برگشت‌پذیری، عمل کند. رایت^۲ و همکاران [۹۹] یک مفهوم نوآورانه برای ادغام اکسید فلزی یا فلزات حساس به مغناطیسی در مایع با نانولوله‌های کربن را برای افزایش هدایت حرارتی مایع گزارش کردند. در کار آنها نشان داده شده است که هدایت گرمایی MNF با نانولوله‌های تک دیواره پوشش داده شده با نیکل در حضور میدان مغناطیسی به طور قابل توجهی افزایش یافته است. افزایش هدایت حرارتی مشاهده شده به نفوذ میدان مغناطیسی بر ریزساختار مایع منجر شده است. مشخص شده است که در میدان مغناطیسی اعمال شده، نانولوله‌های پوشش داده شده با نیکل می‌توانند زنجیره‌های تراز شده‌ای را ایجاد کنند که برای اتصال نانولوله‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند و باعث بهبود تماس می‌شود. ونسل^۳ و همکاران [۱۰۰] هدایت حرارتی نانوسیالات با نانوذرات اکسید فلزی

¹ Philip

² Wright

³ Wensel

(MgO و Fe_3O_4) و نانولوله‌های کربن را در حضور میدان مغناطیسی بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که حداکثر رسانایی حرارتی می‌تواند تا ۱۰٪ در جرم ذرات کوچکتر از ۰.۰۲٪ وزنی افزایش یابد. توضیح احتمالی این نتایج جالب، جمع‌آوری ذرات اکسید فلزی روی سطح نانولوله‌ها با جذب الکترواستاتیک و تشکیل ساختار زنجیره‌ای در طول نانولوله‌ها است. در کار آنها پیشنهاد شده است که نانوسیال‌های مورد بررسی را می‌توان برای کاربردهای خنک‌کننده استفاده کرد، زیرا ویسکوزیته آنها مشابه آب است.

کوریکیم فوراً^۱ و همکاران [۹۱] تأثیر اندازه ذرات و درصد ذرات را بر افزایش هدایت حرارتی یک نانوسیال مغناطیسی در یک میدان مغناطیسی بررسی کردند. در کار آنها نشان داده شد که هدایت حرارتی می‌تواند با ذرات کوچکتر مگنتیت که در نانوسیال‌ها با یک درصد حجم ذره افزایش یابد. علاوه بر این، افزایش هدایت حرارتی به میدان مغناطیسی موازی با گرادیان درجه حرارت بستگی دارد. آنها تجزیه و تحلیل کردند که افزایش میزان هدایت حرارتی به علت ساختارهای زنجیره‌ای شکل گرفته در MNF تحت تأثیر میدان مغناطیسی است. افزایش هدایت حرارتی برای ذرات کوچکتر مشاهده شده توسط رفتار سوپر پارامغناطیس ذرات کوچکتر و تأثیر آنها بر شکل‌گیری دانه‌ها توضیح داده شده است. اگرچه میدان مغناطیسی موازی با گرادیان دما اثر مثبتی بر هدایت حرارتی MNF نشان داد، میدان مغناطیسی بالا تأثیر منفی بر دیگر خواص ترموفیزیکی مایع مانند خواص هدایت حرارتی دارد [۹۱-۹۲]. علت آن این است که به علت تجمع نامطلوب، زیپ زنجیره‌ای تحت تأثیر میدان‌های مغناطیسی بالا ایجاد می‌گردد. هنگامی که هدایت حرارتی و اثرات مغناطیسی در نظر گرفته می‌شود، وابستگی خصوصیات ترموفیزیکی می‌تواند با نسبت هدایت حرارتی به ویسکوزیته مشخص شود. فیلیپ^۲ و همکاران [۹۲] این مسئله را مطرح کردند و پیشنهاد کردند تنظیم نسبت K/Z به جای هدایت حرارتی به تنهایی ارائه گردد. گزارش آنها اختصاص داده شده به تعیین و مشخص نمودن

¹ Nkurikiyimfura

² Philip

ویسکوزیته و افزایش هدایت حرارتی در یک نانوسیال مغناطیسی پایدار با اندازه ذرات کمتر از ۱۰ نانومتر به عنوان عملکرد کسر حجمی، سرعت برشی، میدان مغناطیسی و زمان اختصاص یافته است. نتایج آنها نشان داد که بدون هیچ میدان مغناطیسی، افزایش ویسکوزیته MNF بسیار بیشتر از افزایش هدایت حرارتی است. آنها همچنین اشاره کردند که نسبت K/Z در حجم 0.078% می تواند با کنترل میدان کاربردی از 0.725 به 2.35 تغییر کند.

۲-۱۷ مکانیسم تقویت هدایت حرارتی و مدل های نظری

اگرچه هدایت حرارتی MNF موضوع برخی از تحقیقات بوده است، مکانیسم تفسیر داده های تجربی هم در غیاب و هم در حضور میدان مغناطیسی کاربردی مورد نیاز است. در میان مکانیسم های پیشنهاد شده برای نانوسیم های معمولی، حرکت براونی و خوشه بندی ساختار ذرات دو مکانیسمی هستند که بسیار مورد بحث واقع شده اند [۹۹].

۲-۱۷-۱ حرکت براونی

حرکت براونی به حرکت ظاهری تصادفی ذرات معلق در مایع یا گاز گفته می شود و حرکت به دلیل برخورد با مولکول های مایع پایه، باعث می شود که ذرات حرکتی تصادفی را انجام دهند [۱۰۳-۱۰۱]. حرکت براونی می تواند به دو صورت به افزایش هدایت حرارتی کمک کند؛ یعنی سهم مستقیم از طریق حرکت نانوذرات که انتقال گرما را برعهده دارند (انتشار نانوذرات) و سهم غیر مستقیم را به صورت میکروهرفت در مایع احاطه کننده نانو ساختارها [102-103]. پیش بینی ها تخمین می زدند که که اثر دوم می تواند جریان انتقال حرارت بین نانوذرات و مایع حامل را ایجاد کند و هدایت حرارتی نانوسیالات را افزایش می دهد. هر چند مطالعات اخیر این فرضیه را رد می کند و نشان می دهد که

افزایش هدایت حرارتی MNF می‌تواند توسط خوشه‌بندی ذرات توضیح داده شود [۱۰۳]. فیلیپ^۱ و همکاران [۱۰۴] نشان داد که میکروهمرفت محیط مایع در اطراف نانوذرات متحرک به صورت تصادفی، هدایت حرارتی یک نانوساختار را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد و مدل میکرو همرفت ارزش هدایت حرارتی را فراتر از واقعیت توصیف می‌کند. حرکت براونی در انتشار نانوذرات مغناطیسی در یک کسر حجمی کم در حدود $\phi < 0.2\%$ نقش مهمی ایفا می‌کند به طوری که می‌تواند به وسیله تئوری موثر (ماکسول) توضیح داده شود. تاسی^۲ و همکاران [۱۰۵-۱۰۶] نیز اثر ویسکوزیته را بر هدایت حرارتی نانوسیالات مگنتیت گزارش کردند. آنها اشاره کردند که هدایت گرمایی اندازه‌گیری شده از نانوسیالات مقادیر پیش‌بینی شده را بصورت تابعی افزایشی از ویسکوزیته و به کمک معادله ماکسول توصیف می‌کند. نتایج آنها شواهدی از اثر ویسکوزیته MNF بر هدایت حرارتی است. انتشار نانو ذرات مغناطیسی می‌تواند عامل مهمی است که هدایت حرارتی را افزایش می‌دهد. پیشنهاد شد که هدایت حرارتی MNF در غیاب میدان مغناطیسی می‌تواند با مدل‌های ترکیبی پیش‌بینی شود [۱۰۷-۱۰۹] که در آن بخش هدایت می‌تواند از پیش‌بینی توسط معادلات ماکسول بدست آید.

جدول ۲-۳ مدل‌های ارائه شده هدایت گرمایی

پژوهشگر	فرمول ارائه شده
Maxwell(1973)	$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\phi}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)\phi}$
Hamilton-Crosser(1962)	$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_p + (n-1)k_f - \phi(n-1)(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \phi(k_f - k_p)}$
Bruggeman model(1970)	$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{1}{4} \left[(3\phi - 1) \frac{k_p}{k_f} + (2 - 3\phi) + \frac{k_f}{4} \sqrt{\Delta} \right]$

¹ Phillip

² Tasi

$$\text{Hui, X. Zhang (1999)} \quad \frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2\phi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \phi(k_f - k_p)}$$

$$\text{Wasp model Xuan and li (2000)} \quad \Delta = \left[\left[(3\phi - 1)^2 \left[\frac{k_p}{k_f} \right]^2 + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi^2) \left[\frac{k_p}{k_f} \right] \right] \right]$$

نمونه‌ای از روابط بدست آمده از مدل‌های کلاسیک

$$\text{Maxwell-Garnett's (MG Model) (1973)} \quad \frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{(1 - \phi)(k_p + 2k_f) + 3\phi k_p}{(1 - \phi)(k_p + 2k_f) + 3\phi k_f}$$

$$\text{Murshed, et al., (2009)} \quad k_{eff} = \left[(k_p - k_{tr})\phi k_{tr} [2\gamma_1^3 - \gamma^3 + 1] + (k_p + 2k_{tr})\gamma_1^3 [\phi\gamma^3(k_{tr} - k_f) + k_f] \right] \left[(k_p + 2k_{tr})\gamma_1^3 - (k_p - k_{tr})\phi[\gamma_1^3 + \gamma^3 - 1] \right]$$

۲-۱۸ نانو خوشه‌ای فریت‌ها و MNF

جمع شدن ذرات به شکل خوشه‌های کوچک و یا به طور ایده آل به صورت زنجیره‌های خطی و تاثیر آن بر خواص نانوسیالات اخیرا مورد توجه قرار گرفته است و انتظار می‌رود که عامل اصلی هدایت گرمایی در نانوسیالات باشد [۱۱۳-۱۰۹]. حضور خوشه‌های ذره در یک نانوسیال باعث می‌شود مسیرهای توسعه یافته و بسیار جهت‌دار به منظور هدایت جریان گرما فراهم شود و به این ترتیب به انتقال سریع گرما در فواصل طولانی کمک کند زیرا گرما را می‌توان با ذرات جامد بسیار سریع‌تر نسبت به مایعات حمل کرد [۱۰۹]. بیاش^۱ و همکاران [۱۱۴] برهمکنش‌های متفاوتی را که از تجمع ذرات مغناطیسی و در مقیاس آنها وجود دارد را مورد بررسی قرار دادند. نشان داده شد که حتی بدون اثر میدان مغناطیسی خارجی، تجمع ناشی از برهمکنش‌های مغناطیسی در MNF ممکن است سبب تغییرات شدیدی در خصوصیات سیال شود. ساختار تجمع ذرات مغناطیسی هدایت گرما را در MNF

¹ Bishop

کنترل می‌کند. در غیاب یک میدان مغناطیسی خارجی، توزیع ذرات در MNF ایجاد می‌شود به-طوری که هدایت حرارتی MNF همسانگرد است. هنگامی که نانوذرات مغناطیسی تجمیع می‌شوند، تمایل دارند جهت‌گیری مغناطیسی خود را در جهت میدان مغناطیسی منطقه‌ای با توجه به ذرات همسایه یا میدان‌های اعمال شده هماهنگ کنند [۱۱۶-۱۱۵]. این امر موجب ایجاد بی‌نظمی متقابل می‌شود که نانوذرات مغناطیسی را قادر می‌سازد تا زنجیره‌ای از سیم‌ها، حلقه‌ها، دانه‌های دو بعدی یا حتی سوپر شبکه‌های سه بعدی را ایجاد کنند. درک مکانیسم‌های تشکیل جامدها، مورفولوژی توزیع و توزیع آنها با میدان مغناطیسی خارجی، پیش‌نیاز درک مکانیسم هدایت حرارتی در MNF است. هنگ^۱ و همکاران [۹۴] اثر خوشه‌بندی نانوذرات مغناطیسی برای یک نانوسیال مغناطیسی آهن بدون اعمال میدان مغناطیسی را در اتیلن گلیکول مورد بررسی قرار دادند.

هدایت حرارتی همچنین به عنوان تابعی از مدت زمان استفاده از ارتعاش اولتراسونیک است به گونه-ای که از ۰ دقیقه (یعنی بدون ارتعاش اعمال شده) تا ۷۰ دقیقه ارتعاش اولتراسونیک می‌تواند تاثیر چشمگیری در رفتار سیال داشته باشد.

علاوه براین، تغییر هدایت حرارتی با زمان پس از اعمال ارتعاش مورد بررسی قرار گرفته است و مشخص شده است که هدایت حرارتی با گذشت زمان کاهش می‌یابد. تغییر اندازه متوسط خوشه‌ها نیز به عنوان تابع زمان پس از اعمال ارتعاش تعیین شده است و اندازه خوشه‌ها با افزایش زمان افزایش می‌یابد. در نتیجه، اندازه خوشه‌های تشکیل شده توسط نانوذرات تاثیر عمده‌ای بر هدایت حرارتی دارد. اثر خوشه‌بندی ذرات بر هدایت حرارتی نیز توسط زو^۲ و همکاران بحث شده است. [۳۹]. آنها دریافتند که خوشه‌بندی و همبستگی نانوذرات عمدتاً برای افزایش هدایت حرارتی غیرمستقیم است. جیانگ و همکاران [۱۱۷] یک MNF را با یک مرحله انتقال فاز آماده کردند و اثر تجمع را در افزایش هدایت حرارتی MNF بررسی کردند. میکروساختار MNF با روش دینامیک نوری مورد تجزیه و

¹ Hang

² Zhou

تحلیل قرار گرفته است به طوری که تغییرات پیکربندی ذرات تجمع شده با غلظت و زمان را به نمایش می‌گذارد. تجزیه و تحلیل برای مکانیزم احتمالی شکل‌گیری ترکیب زنجیره‌ای نانوذرات در MNF در میدان مغناطیسی صفر نشان می‌دهد که لایه‌های پوشش ذرات نیز در تشکیل خوشه اهمیت دارند. هدایت حرارتی MNF را می‌توان برای برخی از نانوسیالات با تغییر یک تثبیت‌کننده استفاده کرد و بنابراین ساختار آنها را کنترل کرد. فیلیپ^۱ و همکاران [۸۳] یک آزمایش برای اثبات هدایت حرارتی افزایش‌یافته از طریق ساختارهای متخلخل در MNF انجام دادند.

برخی از مطالعات به مدلسازی نظری و ریاضی افزایش هدایت حرارتی MNF در غیاب و حضور میدان مغناطیسی پرداخته‌اند. جدول (۱-۲) به طور خلاصه مدل‌های مورد استفاده برای اعتبارسنجی به نتایج تجربی است. فنگ^۲ و همکاران [۱۱۸] تلاش کردند تا هدایت حرارتی MNF را در حضور میدان مغناطیسی مدل کنند. مدل آنها شامل مدل ماکسول-گانت اصلاح شده با معرفی یک ثابت ناهمسانگردی بود که معرف میکروساختار مایع تحت میدان مغناطیسی اعمال شده است. مدل به دست آمده به صورت:

$$\frac{k_x}{k_f} = \frac{k_f + 2k_p + 2\phi_x(k_p - k_f)}{k_p + 2k_f - 2\phi_x(k_p - k_f)} \quad (7-2)$$

است که در آن k_x ضریب هدایت گرمایی سیال در حضور میدان در راستای x و k_f ضریب هدایت گرمایی سیال می‌باشند و

$$\phi_x = (1 + C_x) \quad (8-2)$$

است که C_x در واقع نمایشگر ناهمسانگردی ساختاری در راستای x است به طوری که مقدار آن از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$C_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j>1}^N C_{ij}^x \quad (9-2)$$

¹ Philip

² Fang

$$C_{ij}^x = [(n_x \cdot e_{ij})^2 - 0.25] \left(\frac{d}{r_{ij}}\right)^3 \quad (10-2)$$

است.

در بالا اندیسه‌های i, j شمارنده ذرات هستند، d قطر ذرات و r_{ij} فاصله ذرات از یکدیگر را نمایش می‌دهد. n_x بردار پایه در راستای محور x است و e_{ij} بردار واحدی است که جهت اتصال دو ذره را به یکدیگر متمایز می‌سازد.

هنگامی که ساختار زنجیره‌ای در جهت x بیشتر رشد می‌کند، مقدار پارامتر ساختار ناهمسانگرد نیز (C_x) بیشتر می‌شود. پارامتر ساختار انحصاری C_x به خوبی توزیع ذرات در طول جهت x را مشخص می‌کند. توجه داشته باشید که همان روش را می‌توان برای محاسبه هدایت حرارتی MNF در جهت‌های y و z استفاده کرد. هدایت حرارتی غیرمخرب MNF محاسبه شده با فرمول اصلاح شده ماکسول-گانت در توافق با روش‌هایی است که با روش‌های عددی محاسبه می‌شود.

فوئل¹ و همکاران [۱۱۹] مطالعات نظری را در مورد تانسور هدایت حرارتی مؤثر برای MNFs با استفاده از روش همگن‌سازی دو مرحله‌ای توسعه دادند. تئوری محیط دیفرانسیل مؤثر برای تعیین هدایت گرما معادل زنجیره‌های نانوذرات مغناطیسی استفاده شد و سپس تئوری برای یک ساختار مؤثر بر ناهمسانگرد تعمیم داده شد تا تانسورهای رسانایی مؤثر نانوسیالات مغناطیسی را بررسی کند. نتایج عددی نشان داد که نسبت ابعاد زنجیره‌ای خوشه‌های تجمعی نقش مهمی در افزایش هدایت حرارتی ناهمسانگرد ایفا می‌کند. علاوه بر این، نتایج نظری در مورد عناصر هدایت حرارتی موازی با رشته‌ها و عمود بر زمینه‌ها هماهنگ خوبی با داده‌های تجربی است. نتایج آنها علاوه بر تایید گزارش‌های تجربی، وابستگی هدایت حرارتی مؤثر بر قدرت میدان مغناطیسی غیریکنواخت را تایید می‌کند.

¹ Fu HI

کوریکیم فوراً^۱ و همکاران [۱۲۰] اثر زنجیره مغناطیسی نانوذرات مغناطیسی بر هدایت حرارتی نانوسیالات مغناطیسی (MNFs) در میدان مغناطیسی را از طریق یک مدل پیشنهادی هدایت حرارتی MNF ها مورد بررسی قرار دادند. در کار آنها ویژگی ناهمسانگردی سیال از نسبت هدایت حرارتی بر اساس دانه‌های نانو ذرات مغناطیسی ناشی از زنجیره تولید در MNF ها پیش‌بینی شده است. مشخص شده است که برای یک میدان مغناطیسی موازی با گرادیان درجه حرارت، مولفه هدایت حرارتی در امتداد میدان مغناطیسی به دلیل ایجاد نانو زنجیره‌های از نانوذرات مغناطیسی به-طور قابل توجهی افزایش یافته است. داده‌های آزمایشی تقویت هدایت حرارتی در امتداد جهت میدان مغناطیسی مشابه آنچه که پیش‌بینی شده توسط مدل پیشنهاد شده است را تایید می‌کنند.

۲-۱۹ همرفت ترمومغناطیسی

همرفت ترمومغناطیسی به همرفتی اشاره می‌کند که از طریق گرادیان ایجاد شده در اثر حضور میدان مغناطیسی و تغییرات دما در نانوسیال مغناطیسی ایجاد می‌شود [۱۲۱-۱۲۳]. وقتی که یک نانوسیال مغناطیسی در حضور یک میدان غیریکنواخت قرار می‌گیرد با وجود یک میدان گرمایی و همرفت ناشی از نیروی حجمی گرانشی، تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی در نتیجه یک میدان غیریکنواخت، نیرویی را بوجود می‌آورد که به نیروی جسمی کلون معروف است و با استفاده از رابطه :

$$f_m = \mu_0 \cdot (\mu \cdot \nabla) B \quad (11-2)$$

بیان می‌شود که μ در واقع پذیرفتاری مغناطیسی در خلا است و μ گشتاور مغناطیسی و B میدان مغناطیسی اعمال شده است [۱۲۴]. در چنین حالتی مغناطیس متعادل با سیستم متناسب است با میدان مغناطیسی اعمال شده و چگالی و مغناطیس موضعی ذرات. در واقع نیروی جسمی کلون یک

¹ Nkurikiyimfura

میدان فشار استاتیک را در سیال ایجاد می‌کند که سبب ایجاد میدان‌های چرخشی می‌شود. چنین میدان‌هایی نمی‌توانند جریان سیال را اصلاح کنند و از این‌رو نمی‌توانند سبب افزایش همرفت شوند. شرایط جهت یک همرفت آزاد در اثر نیروی جسمی کلون بصورت زیر است:

$$\nabla \times f = \nabla T \times \left[B_T \rho g \pm \mu_0 B_m \frac{X_0 H}{2} \nabla^2 H \right] \neq 0 \quad (12-2)$$

که f به نیروی کل جسمی کلون اشاره می‌کند. علامت \pm نیز به موازی و غیرموازی بودن جهت میدان با گرادیان دما اشاره می‌کند، به گونه‌ای که B_m معرف ضریب پیرو مغناطیس سنجی سیال، B_T معرف ضریب بسط حجمی نسبی سیال است.

شدت انتقال حرارت با استفاده از عدد Ra (ریلی) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Ra = Ra_{aT} + Ra_{aT} + Ra_{am} = \frac{\rho C_a l^4}{\mu k} \frac{dT}{dz} \left(B + \rho g + B_m \mu \frac{dH}{dz} \right) \quad (13-2)$$

بر طبق آنالیز عددی صورت گرفته Ra و Ra_m در حدود $10^5 - 10^6$ هستند.

۲۰-۲ بررسی تجربی هدایت ترمو مغناطیسی

شوشیا^۱ و همکاران [۱۲۵] اثر موقعیت میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت و راندمان مخلوط MNF با یک مایع آلی حامل را در دستگاه انتقال حرارت بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که وقتی میدان مغناطیسی بر روی ورودی منطقه گرم شد اعمال می‌شود، توانایی انتقال حرارت و نیروی حرکتی مغناطیسی توسط میدان مغناطیسی بهبود می‌یابد. بلامز^۲ و همکاران [۱۲۶] انتقال حرارت از یک سیلندر غیرمغناطیسی به یک نانوسیال مغناطیسی حساس به دمای $Tredecane Fe_2O_4 Mn_x Zn$

¹ Shuchia

² Blums

$(1-x) \text{Fe}_2\text{O}_4$ را تحت تأثیر آزادی عرضی در حضور میدان‌های مغناطیسی یکنواخت و غیریکنواخت را در محور سیلندر بررسی کردند. نتایج آنها اثرات گرمای مغناطیسی بر شدت انتقال گرما را در فرو فلوئیدها تایید کرد به طوری که افزایش انتقال حرارت MNF را بر حسب افزایش گرادیان میدان مغناطیسی نتیجه داد. آنها دریافتند که در صورت افزایش گرادیان میدان مغناطیسی، تعداد زنجیره-های مغناطیسی و انتقال گرما بیشتر می‌شود. زابولوسکی^۱ و همکاران [۱۲۷] تحقیقات آزمایشی و عددی از گرما مغناطیسی را در یک سیلندر گرم تحت میدان مغناطیسی در یک سلونوئید انجام دادند. آنها دریافتند که انتقال حرارت تحت یک میدان مغناطیسی می‌تواند افزایش یابد. با این حال، نشان داده شده است که استفاده از سلونوئید برای تولید میدان مغناطیسی قوی غیرکاربردی است. یاماگوچی^۲ و همکاران [۱۲۸] تحقیق در مورد نانوسیالات مغناطیسی مبتنی بر آلکالین نفتالین Mn-Zn در حفره مکعبی را بررسی کردند. میدان مغناطیسی و مغناطش تحت تأثیر دما قرار گرفتند و مغناطش‌شدگی بیشتر و نیروهای مغناطیسی در مناطق نزدیک دیواره فوقانی و مرکز داخل حفره به جای آن در ناحیه نزدیک دیواره‌های پایین و دیواره جانبی مشاهده شد. یاماگوچی و همکاران [۱۲۸] نیز مطالعات عددی و تجربی مربوط به ویژگی‌های انتقال حرارت یک نانوسیال مغناطیسی پر شده در یک مخزن مکعبی را با یک سیلندر مربع گرما انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که بدون در نظر گرفتن اندازه المان‌های گرما، ویژگی انتقال حرارت از MNF در هنگام استفاده از میدان مغناطیسی افزایش یافته است. داده‌های تجربی بوسیله برخی از کارهای قبلی بر روی هم‌افزایی بین میدان مغناطیسی و گرادیان دما متمرکز شده است و گرمای مغناطیسی بدون در نظر گرفتن اثر میدان مغناطیسی بر خواص ترموفیزیکی MNF مورد بحث قرار گرفته است. با این حال، مطالعات اخیر نشان داده است که ویژگی‌های ترمومغناطیسی می‌تواند به شدت توسط میدان مغناطیسی خارجی اعمال شده و از طریق تنظیم خواص ترموفیزیکی مایع کنترل شود [۱۲۹].

¹ Zablockis

² Yamaguchi

۲-۲۱ مدل سازی عددی

مطالعات متعدد عددی جهت محاسبه هدایت گرمایی نانوسیالات بر روی هندسه‌های مختلف مانند پیکربندی رایلی-برنارد، محوطه مستطیلی، سیلندر، مکعب، حفره ی تقسیم شده و غیره انجام شده است [۱۲۹-۱۳۰] فرآیند انتقال حرارت و جریان سیال در این هندسه در حضور میدان مغناطیسی استاتیک و اخیرا در میدان مغناطیسی متغیر و قابل کنترل شبیه سازی شده است. مدل های رایج استفاده شده از لحاظ ریاضی می توانند به دو دسته تقسیم شوند.

۲-۲۱-۱ مدل تک فاز (همگن)

MNF ترکیبی چند فاز از نانوذرات مغناطیسی و مایع حامل است. با این حال، با توجه به اندازه محدود نانوذرات مغناطیسی، فرضیه های مبتنی بر شرایط تعادل حرارتی و حرکت لغزشی ناچیز بین ذرات، MNF ها معمولا به عنوان یک مایع تک فاز معمولی با خواص فیزیکی میانگین بین سیال پایه و سیال مخلوط همگن که رفتار مغناطیسی را نشان می دهد محسوب می گردند. در این حالت، معادلات هیدرودینامیکی معمولی می تواند برای نیروی جسمی کلونین، معادلات هیدرودینامیکی، و همراه با معادلات مغناطیسی و معادلات ماکسول که برای مدل سازی و مشخص کردن جریان سیال و فرآیندهای انتقال حرارت استفاده می شود، اصلاح شوند. محمودی^۱ و همکاران [۱۳۰] ترکیب طبیعی برای یک محفظه مثلثی دوبعدی را با بخشی از دیوار شیب دار گرم و پر از نانو سیال در حضور میدان مغناطیسی گرم مورد بررسی قرار داد. معادلات حاکم با روش حجم محدود حل شد. الگوی جریان، همدمای و عدد میانگین ناسلت برای $0 < \phi < 0.05$, $10^4 < Ra < 10^7$, $0 < Ha < 100$ که با منبع گرما متمایز بودند در این کار نتیجه شده است. نتایج نشان داد که در حضور میدان مغناطیسی جریان تا حدودی

¹ Mahmoudi

کند شده و انتقال حرارت کاهش می‌یابد. علاوه براین، مشاهده شد که حداکثر کاهش عدد میانگین ناسلت^۱ در مقدار بالای میدان مغناطیسی در زمان $Ra=10^6$ رخ می‌دهد. شیخ‌الاسلامی^۲ و همکاران [۱۳۱] با استفاده از روش شبکه بولتزن، جابجایی طبیعی در یک حلقه متمرکز بین یک میدان سرد و سیلندر دایره‌ای داخلی گرم را در حضور میدان مغناطیسی شعاعی استاتیک مورد بررسی قرار دادند. سیلندر داخلی و خارجی در دمای یکنواخت ثابت نگه داشته شد و فرض شده است که تمام دیوارها می‌توانند میدان مغناطیسی را عایق‌بندی کنند. تحقیقات عددی برای پارامترهای مختلف حاکم، به عنوان مثال، عدد هارتمن، کسر حجم نانو ذرات و عدد رینولدز انجام شده است. همچنین هدایت مؤثر گرما و ویسکوزیته سیالات به ترتیب با استفاده از مدل های ماکسول-گرنیت (M-G) و برینکمن بررسی شده است. همچنین مدل توابع چندمتغیره (MDF) برای شبیه‌سازی اثرات میدان مغناطیسی واحد استفاده شده است. نتایج نشان داد که میانگین عدد ناسلت، تابعی افزایشی و متاثر از کسر حجم نانو ذرات و همچنین عدد رینولدز است، در حالی که تابعی کاهش‌یافته از عدد هارتمن بود.

۲-۲۱-۲ مدل ترکیبی (مدل دوفازی)

مدل مخلوط از یک رویکرد میانی بین تقریب تک فاز و مجموعه کامل معادلات حاکم بر جریان سیالات بهره می‌برد [۱۳۲]. به همین دلیل برخی از عوامل مانند اصطکاک بین نانو ذرات مغناطیسی و مایع حامل، انتشار براونی، رسوب‌گذاری و پراکندگی در مدل گنجانده شده است. در نظر گرفتن این عوامل در مدل، امکان درک عملکرد هر فاز در فرآیند انتقال گرما و مشکل مربوط به ثبات MNF ناشی از دو نیروی مغناطیسی و گرانشی را فراهم می‌کند [۱۳۳-۱۳۴]. موسوی^۳ [۱۳۵] از تکنیک-

¹ Nusselt

² Sheikholeslami

³ Mousavi

های CFD برای بررسی اثرات تقریب تک‌فاز و مدل مخلوط دوفازی بر رفتار جریان و انتقال حرارت یک نانومایع مغناطیسی بر پایه نفت در هندسه استوانه استفاده کرده است. مشخص شده است که در حضور ذرات بزرگ، روش مدل مخلوط موثرتر از رویکرد تک‌فاز است، و روش تک‌فاز برای مطالعه اثرات تجمع و اندازه ذرات بر روی هیدرودینامیک سیستم مناسب است. با استفاده از مدل مخلوط، و ذرات مغناطیسی مشخص می‌شود که، انتقال حرارت می‌تواند کاهش یابد. ژان^۱ و همکاران [۱۳۶] جریان و فرآیندهای حرارتی MNF را که از طریق یک میکرو کانال جریان دارد، با تغییر جهت و قدرت یک میدان مغناطیسی خارجی بررسی کردند. آنها دریافتند که اثر شدت میدان مغناطیسی خارجی بسته به مقدار آن، ارتباط مستقیم با جریان اصلی و گرادیان دمایی دارد. آنها نتیجه گرفتند که به منظور تقویت انتقال حرارت زمانی که جهت گرادیان میدان مغناطیسی با جریان ورودی موازی باشد، اثر قابل توجهی می‌تواند به دست آید. آنها تجزیه و تحلیل کردند که یک میدان مغناطیسی در مقابل جریان اصلی، انتقال حرارت بین MNF و سطح جامد را خنثی می‌کند. جعفری و همکاران [۱۳۷] از مدل مخلوط برای شبیه‌سازی پدیده انتقال حرارت در یک نانو سیال مغناطیسی مبتنی بر نفت استفاده کردند که در هندسه استوانه‌ای جریان دارد. مشخص شد که افزایش اندازه نانو ذرات مغناطیسی می‌تواند باعث تولید کلئید در سیستم شود که تأثیر مخربی بر انتقال حرارت سیستم دارد. جعفری و همکاران [۱۳۷] اثرات پارامتری بر روی انتقال مغناطیسی با استفاده از روش تاگوچی مورد بررسی قرار دادند. بررسی پارامترهای حرارتی مغناطیسی در هندسه استوانه‌ای به برخی از موارد مانند قطر ذره، کسر حجم ذرات، تفاوت دما در لایه نانوسیال مغناطیسی، میدان مغناطیسی به صورت موازی با گرادیان درجه حرارت و نسبت ابعاد هندسه بستگی دارد. آنها گزارش دادند که اثر میدان مغناطیسی می‌تواند بزرگتر از حد معمول باشد و قدرت آن به اندازه میدان مغناطیسی بستگی دارد. نتایج آنها با داده‌های آزمایشی وولکر و همکاران [۱۳۸] و امین فر [۱۳۹] که از مدل دو فاز مخلوط و

¹ Xuan

روش حجم کنترل برای بررسی خصوصیات آب هیدرولیکی نانو فلئوئید مگنتیت آب موجود در مجرای مستطیلی استفاده کردند تطابق دارد.

نتایج نشان داد که استفاده از میدان مغناطیسی باعث افزایش عدد ناسلت و فاکتور اصطکاک می‌شود و همچنین یک جفت گرداب را ایجاد می‌کند که انتقال حرارت را افزایش می‌دهد و از رسوب نانو ذرات جلوگیری می‌کند.

عاشوری^۱ و همکاران [۱۴۰] انتقال حرارتی ترمومغناطیسی در یک حفره مربع دو بعدی را با یک روش حجم محدود نیمه ضمنی بررسی کردند. در تحقیقات خود، دیوارهای جانبی حفره در دماهای مختلف گرم شدند، دیوارهای بالا و پایین جدا شدند و یک آهنربای دائمی در نزدیکی دیوار پایین قرار داشت. آنها بیان کردند که در غیاب میدان مغناطیسی، انتقال حرارت تنها توسط ضریب هدایت استاتیک سیال تأثیر می‌پذیرد. با این‌وجود جریان گرما و انتقال گرما با افزایش شدت میدان مغناطیسی در هنگام استفاده از یک میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد. مروجی^۲ و همکاران [۱۴۱] روش دینامیکی سیالات محاسباتی (CFD) با یک رویکرد تک فاز را برای تعیین اثرات غلظت نانو ذرات و جریان جرم بر روی انتقال حرارت و اصطکاک نانو سیال مگنتیت آب پایه که از طریق یک لوله مس مس در جریان رژیم آشفته و با اعداد مختلف رینولدز مطالعه نمودند.

¹ Ashouri

² Moraveji

فصل سوم

مواد و روش ها

در این فصل به روش ساخت نانو سیال در آزمایشگاه پرداخته می‌شود و سپس مشخصه‌یابی و بررسی جزئیات اندازه‌گیری هدایت گرمایی نانو سیالات $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CuO}$ بیان می‌گردد.

همانطور که پیش از این بحث شد تا کنون مطالعات فراوان روی نانو سیالات مغناطیسی صورت گرفته است. فرو فلئوئیدها یا نانو سیالات مغناطیسی سیستم های کلئیدی مغناطیسی پایداری هستند که از نانو ذرات با ابعاد ۱-۵۰ نانومتر تشکیل شده‌اند و در یک مایع حامل پراکنده شده‌اند. به تازگی نانو سیالات مغناطیسی به خاطر خواص نامتعارف خود در زمینه‌های انتقال حرارت و انرژی به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند. بسیاری از خواص فروفلئوئیدها با اعمال میدان مغناطیسی می‌تواند تغییر کند و از این رو شرایط کنترل‌پذیری را می‌توان روی آنها اعمال کرد. ویژگی خاص فرو فلئوئید ترکیبی از رفتار مایع طبیعی با خواص سوپر پارامغناطیسی نانوذرات موجود در آن است. گفته می‌شود که آنها سوپر پارامغناطیسی هستند، به این معنی که توسط یک میدان مغناطیسی به شدت فعال می‌شوند اما پس از حذف میدان مغناطیسی، مغناطیس درون این سیستم‌ها حفظ نمی‌شوند. با توجه به اندازه کوچک و رفتار پارامغناطیسی، نانوسیالات مغناطیسی می‌توانند به عنوان یک طبقه جدید از مواد مغناطیسی با کاربرد بالقوه فن‌آوری در زیست‌پزشکی و فناوری نانو مورد توجه قرار گیرند. امروزه این مواد موردنیاز برای تشخیص سرطان و درمان آن هستند.

روش‌های مختلفی برای تهیه نانو ذرات مگنتیت در ابعاد نانومتری وجود دارد که این تنوع به علت کاربردهای متفاوت و توسعه فناوری‌های جدید بوجود آمده است. در این بخش، نانو سیال‌های مغناطیسی Fe_3O_4 بر پایه آب تولید شده‌اند. خواص مغناطیسی نانوذرات فلزی و اندازه بلورین آنها به شکل پودر به ترتیب از طریق یک مغناطیس نمونه ارتعاشی (VSM) و پراش اشعه ایکس (XRD) با استفاده از تقریب شرر مورد بررسی قرار گرفت. میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) برای تعیین مورفولوژی نانوذرات و اندازه‌گیری قطر آنها و میکروسکوپ TEM برای بررسی کلی شکل نانوذرات Fe_3O_4 مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۳ تهیه نانو ذرات

در ابتدا به بررسی برخی از روش‌های کلی برای تهیه نانو ذرات Fe_3O_4 پرداخته می‌شود. برای تولید نانو مواد روش‌های زیادی ابداع و توسعه یافته است. در یک دسته‌بندی کلی می‌توان این روش‌ها را به فرآیندهای حالت بخار، مایع و جامد تقسیم‌بندی کرد.

۱-۲-۳ فرآیندهای حالت بخار

این روش خود به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شود:

- رسوب‌گیری فیزیکی بخار
- رسوب‌گیری شیمیایی بخار
- چگالش گاز خنثی

۲-۲-۳ فرآیندهای حالت مایع

به هر فرآیندی که در طول آن مواد در حالت مایع یا محلول از طریق واکنش یا تراکم به حالت جامد تبدیل شوند، فرآیندهای حالت مایع گفته می‌شود. از آنجایی که این روش دارای سادگی، تنوع و تطبیق پذیری خوبی بوده و برای انواع مختلف نانو ذرات قابل کاربرد است، در صنعت بیشتر مورد استفاده پیدا کرده است.

۳-۲-۳ فرآیندهای حالت جامد

در این روش نانو ذرات به روش پودر کردن و آسیاب کردن تهیه می‌شوند. این روش در مواقعی که تهیه نانو ذرات از دو روش فوق امکان‌پذیر نباشد کاربرد دارد. با نگاهی دقیق‌تر می‌توان روش‌های ساخت

نانو مواد را می‌توان به دو گروه کلی فرآیندهای از پایین به بالا (Bottom-Up) و از بالا به پایین (Top-Down) تقسیم‌بندی کرد. در روش بالا به پایین ماده موردنظر را که به صورت توده‌ای در دسترس است، ماشین کاری کرده تا به شکل و اندازه مورد نظر درآید. در سنتز مواد به این روش از تکنیک‌هایی چون لیتوگرافی^۱، قلم‌زنی^۲، آسیاب‌کاری^۳ و... استفاده می‌گردد. روش پایین - بالا برای ساخت برخی از مواد پایه، یعنی ساخت مواد از اتم‌ها و مولکول‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله روش‌های پایین - بالا می‌توان به فناوری سل - ژل^۴، الکتروانباشت کردن^۵، سایش لیزری^۶، هم-رسوبی^۷ و... را نام برد. از آنجایی که در این تحقیق از روش هم‌رسوبی شیمیایی جهت تهیه نانو ذرات استفاده شده در ادامه این روش به اختصار شرح داده می‌شود.

۳-۲-۴ روش هم‌رسوبی

در سنتز نانو ذرات، روش غالب، فرآیند هم‌رسوبی در محلول‌های آبی و تجزیه حرارتی برای ایجاد محصولات اکسیدی بعدی است. این روش از سه فرآیند همزمان هسته‌زایی، رشد و کلوخه شدن تشکیل شده است. رسوب‌گیری از نمک‌های محلول و تجزیه گرمایی آنها به مواد اکسیدی، که سبب دانه‌بندی و خالص‌سازی این اکسیدها می‌گردد، جهت تهیه سرامیک‌های اکسیدی به کار برده می‌شود. در این روش، محلول‌هایی از نمک یون‌های معین تهیه شده و با افزودن آن به یک محیط بازی با pH

¹ Lithographic

² Etching

³ Milling

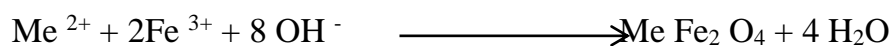
⁴ Sol-gel technology

⁵ Electro deposition

⁶ Laser ablation

⁷ Co-precipitation

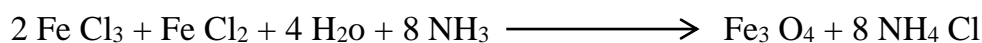
مشخص هم‌رسوبی انجام می‌شود. در این واکنش‌ها، صورت‌بندی ذرات از طریق رشد حاصل می‌شود و این رشد تا زمانی که ذرات جهت ته‌نشینی در خارج از محلول به اندازه کافی بزرگ باشند ادامه دارد. در روش هم‌رسوبی می‌توان ذرات کوچکی به ابعاد بین ۵ تا ۱۲ نانومتر را نیز تولید کرد. با این روش سنتز در صورت ثابت بودن شرایط سنتز، کیفیت نانو ذرات تولید شده قابل تکرار خواهد بود. معمولاً اکسیدهای مغناطیسی $\text{Me Fe}_2 \text{O}_4$ با اضافه کردن یک باز به مخلوط آبی از کلرید فلز II و نیترات یا کلراید آهن III با نسبت مولی ۲:۱ تهیه می‌شود. صورت کلی واکنش به صورت زیر است :



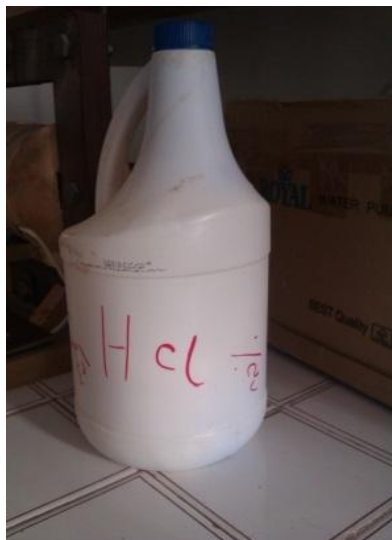
در این واکنش با نسبت مولی ۱ به ۲ از Me^{2+} به Fe^{3+} و محیطی عاری از اکسیژن، رسوب کاملی از $\text{Me Fe}_2 \text{O}_4$ در PH بین ۱۲ تا ۱۳ تشکیل می‌شود.

از مزایای روش هم‌رسوبی همگن بودن بالای ذرات، واکنش‌پذیری بالا، خلوص بسیار بالا و اندازه ریز ذرات اشاره نمود و از معایب آن کنترل دشوار اندازه ذرات، شکل و توزیع آنها نام برد. اما می‌توان با تغییر اتمسفر، کنترل pH و زمان واکنش تا حد زیادی این مشکلات را مرتفع نمود. روش هم‌رسوبی، در فاز مایع در دمای اتاق و گاهی تحت اتمسفر دلخواه انجام می‌شود و نمک فلزات تحت هم‌زدن رسوب ایجاد می‌شوند. در این روش نانو ذرات مستقیم بدست نمی‌آیند بلکه ابتدا نمک فلزات به یک پیش ماده و سپس بعد از حرارت دادن به تشکیل اکسید فلزی درمی‌آیند. حالت فوق اشباع موجب شکل‌گیری ذرات و رشد آنها شده تا هنگامی که ذرات به منظور خروج از رسوب محلول به قدر کافی بزرگ شوند.

۳-۵ نحوه تهیه نانوذرات $\text{Fe}_3 \text{O}_4$ در آزمایشگاه

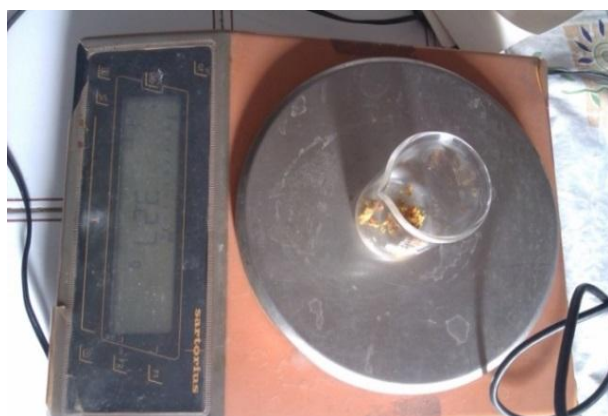


طبق واکنش فوق می توان نانو ذرات مگنتیت را تهیه کرد، لذا برای تهیه این نانو ذرات ابتدا HCl خالص با آب مقطر دیونیزه شده رقیق گردیده تا اسید کلریدریک ۱ مولار حاصل گردد شکل (۱-۳).



شکل ۱-۳ تصویر اسید کلریدریک و آب مقطر

سپس از نمک‌های $FeCl_2$ و $FeCl_3$ هر کدام به ترتیب $3/246\text{ gr}$ و $1/194\text{ gr}$ در 12ml و 3ml از اسید کلریدریک حل شدند (شکل ۲-۳).



شکل ۲-۳ تصویر نمک های $FeCl_2$ و $FeCl_3$

محلول‌های حاصل با یکدیگر ترکیب شده و بشر محتوی مواد روی همزن مغناطیسی قرار گرفت شکل



(۳-۳)

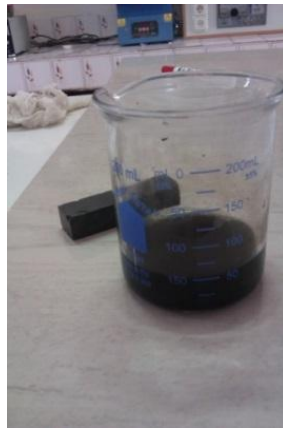
شکل ۳-۳ قرار دادن محلول نمک‌ها روی همزن مغناطیسی

سپس یک آهنربای کوچک درون بشر قرار داده شد و مایع با یک سرعت یکنواخت و در جهتی معین هم زده شد. سپس 15ml محلول آمونیاک ۱ مولار با استفاده از قیف جداکننده به تدریج به محلول اضافه گردید. باید دقت شود که شکل و اندازه ذرات حاصل در این مرحله به مقدار و سرعت اضافه کردن قطرات آمونیاک بستگی دارد و افزودن آن باید کاملاً یکنواخت صورت گیرد شکل (۳-۴).



شکل ۳-۴ اضافه کردن آمونیاک

در انتها رسوب سیاه رنگی ایجاد می‌شود که همان نانو ذرات مگنتیت است و با نزدیک شدن آهنربا



جذب آن می‌شوند شکل (۳-۵).

شکل ۳-۵ نانو ذرات مگنت تولید شده

به منظور ته‌نشینی نانو ذرات می‌توان یک آهنربا را زیر بشر حاوی مواد قرار داد. با این کار مایع اضافی را می‌توان جدا نمود. در انتها با استفاده از آب دوبار تقطیر و طی سه مرحله شستشو می‌توان نمک‌های اضافی تولید شده در طول واکنش در آب مقطر حل شده و از نانو ذرات جدا نمود.

۳-۵-۱ تهیه کسر حجمی

از آنجایی که در این تحقیق از آب به عنوان سیال پایه استفاده شده است، بعد از تهیه نانو ذرات مگنتیت در محیط آبی، کسر حجمی های مختلفی از سوسپانسیون می‌بایست تهیه شود. منظور از کسر حجمی نسبت حجم نانو ذرات به حجم نانو سیال است.

$$\varphi = \frac{V_{magnetite}}{V_t} \quad (1-3)$$

در این رابطه φ کسر حجمی، $V_{magnetite}$ حجمی از نانوذرات که در سیال پایه پراکنده شده و V_t حجم کل نانوسیال است. مرحله بعد تفکیک ذرات کلوخه شده از هم خواهد بود. برای این منظور باید،

هر کدام از کسر حجمی‌ها به مدت ۵ دقیقه تحت امواج فراصوت قرار بگیرند. علاوه بر آن برای پایدار-سازی نانوسیال مقادیر مشخصی از تترامتیل‌آمونیم‌هیدروکسید به عنوان ماده فعال‌کننده سطحی به هر یک از کسر حجمی‌ها اضافه می‌شود. در زمان اضافه شدن باید با استفاده از یک همزن مکانیکی، نانوسیال با سرعتی یکنواخت هم‌زده شود. با اضافه کردن ماده فعال سطحی، نانوذرات مغناطیسی با یون‌های هیدروکسی تترامتیل پوشیده می‌شوند. این پوشش سطحی باعث ایجاد یک دافعه الکترو-استاتیکی می‌شود، که بر جاذبه مغناطیسی و واندرالسی نانوذرات غلبه کرده و مانع رسوب ذرات در سیال پایه می‌گردد. و نهایتاً موجب تشکیل سوسپانسیون نسبتاً پایدار از نانوذرات مغناطیسی مگنتیت در سیال پایه آب خواهد شد [۱۴۲ و ۱۴۳].

پس از ساخت نمونه‌ای نانوسیال بر پایه‌های مختلف و درصدهای متفاوتی از غلظت نانوذرات مغناطیسی مرحله تنظیم و راه‌اندازی دستگاه اندازه‌گیری است. نانوسیال مغناطیسی می‌بایست از درون میدان مغناطیسی عبور کند. در این جا دو چالش وجود دارد. یک اینکه میدان مغناطیسی می‌بایست یکنواخت باشد تا بتوان تاثیر شدت آن را بر روی نمونه در لحظه‌های زمانی متفاوت اندازه‌گیری کرد. دوم اینکه مقدار آن تا حد چشم‌گیری قابل افزایش باشد تا در میدان‌های مختلف بتوانیم پارامترهای سیال را مورد بررسی قرار دهیم.

۳-۶ دستگاه‌های مورد استفاده در مشخصه‌یابی نانو ذرات

دستگاه‌های مختلفی جهت بررسی و مشخصه‌یابی نانوذرات وجود دارد که ما در این تحقیق از دستگاه‌های مغناطش‌سنج نمونه مرتعش (VSM)، میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) و پراش پرتو X (XRD) و میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) استفاده کردیم که به طور خلاصه به بررسی عملکرد هر کدام می‌پردازیم.

۳-۶-۱ مغناطش سنج نمونه مرتعش^۱

VSM دستگاهی است که از آن برای تعیین خصوصیات مواد مغناطیسی مختلف از جمله نانو مواد مغناطیسی استفاده می‌شود. این دستگاه براساس قانون القای فارادی طراحی شده است. این دستگاه از یک جفت سیم پیچ القاگر که مابین دو قطب آهنربا قرار دارد، تشکیل شده است. نمونه در فضای بین دو قطب آهنربا قرار می‌گیرد، برای اطمینان از اینکه تمام قسمت‌های نمونه، تحت میدان مغناطیسی یکنواخت قرار گرفته باید چرخش نمونه بصورت عمودی و حول محور خودش انجام گیرد. قطب‌های آهنربا میدان مغناطیسی خارجی یکنواخت را ایجاد کرده که به وسیله القاگر به نمونه داده شده و سبب مغناطیده شدن نمونه می‌گردد. چرخش نمونه در فضای بین القاگر، موجب تغییر میدان در فضای بین سیم‌پیچ‌ها شده و در نتیجه سیگنال‌های القاگر اندازه‌گیری می‌شوند. در این تحقیق برای اندازه‌گیری مغناطش نانو ذرات سنتز شده از دستگاه مغناطش‌سنج نمونه مرتعش (VSM) دانشگاه کاشان و بیرجند استفاده شد. در مورد این کار، اندازه‌گیری در در دمای اتاق و در میدان‌های تا حدود $13 \text{ KOe} \pm$ صورت گرفت.

۳-۶-۲ دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)

اصول ساختمان میکروسکوپ‌های الکترونی عبوری مشابه میکروسکوپ نوری است. اما به جای نور در آنها از پرتوی الکترونی پراورزی استفاده می‌شود و چون طول موج الکترون می‌تواند خیلی کوتاه در حد چند آنگستروم باشد لذا با این میکروسکوپ‌ها می‌توان به بزرگنمایی بسیار بالایی دست پیدا کرد. (در برخی از آنها در حدود یک میلیون برابر). این میکروسکوپ‌ها بر اساس قوانین امواج الکترو مغناطیس کار کرده و از لنزهای چشمی و شیء تشکیل شده‌اند. این دستگاه از پرکاربردترین وسایل اندازه‌گیری در تحقیقات مربوط به خواص نانو ساختارها است که جهت تعیین اندازه و شکل نانوذرات از

¹ Vibrating sample magnetometer

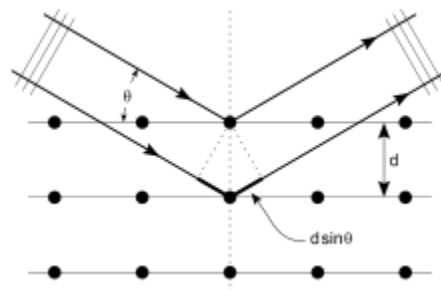
میکروسکوپ الکترونی استفاده می‌شود. به کمک این میکروسکوپ شکل و اندازه نانو ذرات با دقتی در حدود چند ده نانومتر بدست می‌آید که به نوع ماده و دستگاه مورد استفاده بستگی دارد. در این تحقیق از دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مدل PHILIPS – CMIZO شرکت لعاب مشهد به منظور بررسی خواص ساختاری ماده استفاده شد.

۳-۶-۳ پراش پرتو X (XRD)

از دستگاه XRD به منظور تشخیص فازهای موجود در نمونه برای رسیدن به فاز مطلوب همچنین تشخیص ساختار ماده و ثابت‌های شبکه در مواد بلوری استفاده می‌شود. اشعه X در طیف الکترومغناطیس، در محدوده بین پرتوی فرابنفش و پرتو گاما قرار دارد. به علت کوچک بودن طول موجش، شبکه جسم مانند توری پراش برای آن عمل می‌کند و به دلیل داشتن انرژی بالا در جسم نفوذ می‌کند. در نتیجه اشعه پراشیده و با استفاده از قوانین پراش و قانون براگ^۱ می‌توان فاصله صفحات اتمی را تعیین نمود. قانون براگ به صورت:

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (۲-۳)$$

است که در آن d فاصله بین صفحات و θ زاویه برخورد پرتو X به سطح نانو ساختار و λ طول موج پرتو X است (شکل ۶-۳).



شکل ۶-۳ نمایش الگوی برخورد و انعکاس پرتو ایکس

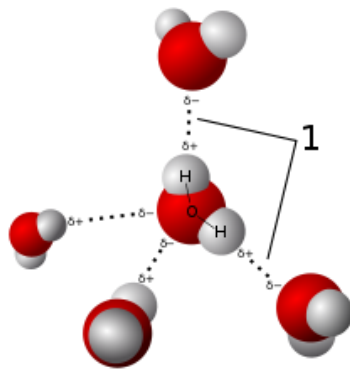
¹ Bragg

بلورشناسی اشعه ایکس یک تکنیک است که برای تعیین ساختار اتمی و مولکولی یک بلور استفاده می‌شود. با اندازه گیری زاویه‌ها و شدت این پرتوهای پراکنده، یک بلورشناس می‌تواند یک تصویر سه بعدی از چگالی الکترون‌ها درون بلور ایجاد کند. از این چگالی الکترونی، موقعیت‌های میانگین اتم‌ها در بلور می‌تواند تعیین شود، همچنین پیوندهای شیمیایی آنها، اختلال آنها و سایر اطلاعات دیگر است.

از آنجا که بسیاری از مواد می‌توانند بلورهایی مانند نمک، فلزات، مواد معدنی، نیمه هادی‌ها و همچنین مولکول‌های غیر معدنی، ارگانیک و بیولوژیکی را تشکیل دهند. بلورشناسی نقش اشعه ایکس در پیشرفت بسیاری از زمینه‌های علمی بنیادین بوده است. در دهه اول استفاده از این روش، اشعه ایکس اندازه اتم‌ها، طول و نوع مواد شیمیایی و تفاوت‌های مقیاس اتمی در مواد مختلف، به ویژه مواد معدنی و آلیاژها را تعیین کرد. این روش همچنین ساختار و عملکرد بسیاری از مولکول‌های بیولوژیکی، از جمله ویتامین‌ها، داروها، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک مانند DNA را نشان داد. کریستالوگرافی اشعه ایکس هنوز روش اصلی برای توصیف ساختار اتمی مواد جدید و مواد محرمانه است که با آزمایش‌های دیگر مشابه هستند. ساختارهای بلوری اشعه ایکس همچنین می‌توانند ویژگی‌های غیر معمول الکترونیک یا الاستیک یک ماده را دربر داشته باشند، نور را در اثر تعاملات شیمیایی و فرآیندها، یا به عنوان پایه‌ای برای طراحی داروها در برابر بیماری‌ها، ارائه دهند.

در اندازه‌گیری پراش اشعه X یک کریستال بر روی زاویه‌سنج نصب می‌شود. زاویه‌سنج برای تغییر موقعیت کریستال در جهت‌های انتخاب شده استفاده می‌شود. کریستال با یک پرتو تک رنگ از اشعه ایکس مورد تابش قرار می‌گیرد و یک الگوی پراش را تولید می‌کند. تصاویر دو بعدی گرفته شده در جهت‌های مختلف به یک مدل سه‌بعدی از چگالی الکترون درون کریستال تبدیل می‌شوند، با استفاده از روش ریاضی تبدیل فوریه همراه با داده‌های شیمیایی شناخته شده برای نمونه، آرایش داخلی اتم‌ها در مواد تعیین می‌گردد. کریستالوگرافی اشعه ایکس با چندین روش دیگر برای تعیین ساختارهای

اتمی مرتبط است. الگوهای پراش مشابهی می‌توانند توسط الکترون‌های پراکنده یا نوترون تولید شوند که به همان ترتیب توسط تبدیل فوریه تفسیر می‌شوند. اگر صفحات به صورت متقارن با فواصل جدایش d مرتب شوند، امواج کروی سازنده‌ای در جهت‌هایی که فاصله آنها در طول مسیر $2d \sin \theta$ برابر یک عدد صحیح از طول موج λ است ایجاد خواهد شد. در این حالت، بخشی از پرتو ورودی توسط یک زاویه 2θ ، یک نقطه انعکاسی در الگوی پراش کریستالوگرافی اشعه ایکس را نشان می‌دهد. ترتیب مولکول‌های آب در یخ، نشان‌دهنده پیوندهای هیدروژنی که جامد را با هم نگه می‌دارند (شکل ۷-۳).



شکل ۷-۳ نمایی از ساختار مولکولی بلور یخ و پیوندهای بین آنها

در این تحقیق برای بررسی ساختار بلوری، تعیین فاز و تخمین اندازه نانو ذرات، از دستگاه پراش‌سنج XRD مدل Bruker / D8 Advansee آزمایشگاه تحقیقاتی حالت جامد دانشگاه دامغان با تابش $\text{Cu-K}\alpha$ و طول موج $1/5406 \text{ \AA}$ در گستره 2θ برابر ۲۰ تا ۸۰ درجه و با گام $0/06$ درجه استفاده شد.

۷-۳ مشخصه‌یابی نمونه مورد نظر در آزمایشگاه

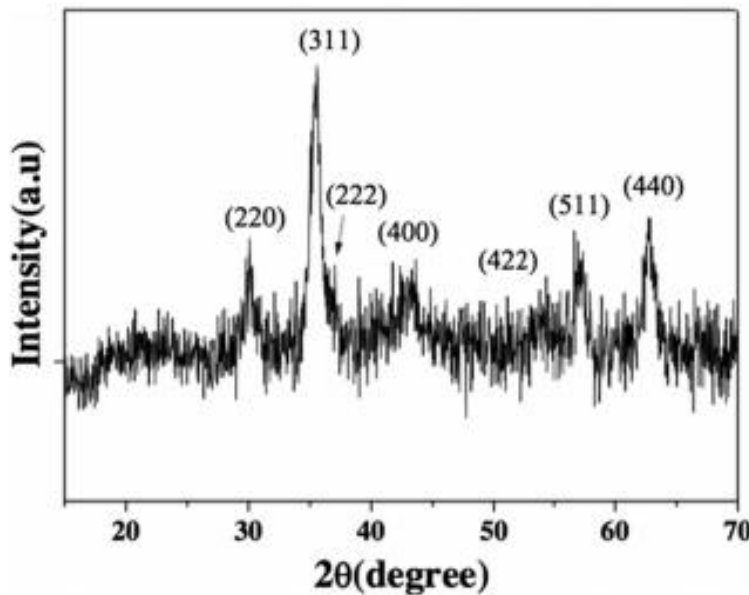
در تحقیق انجام گرفته، نانو ذرات مگنیت به روش هم‌رسوبی شیمیایی تهیه گردید. نانو ذرات CuO با درصد حجمی‌های مختلف با نانو ذرات Fe_3O_4 ترکیب شد. ساختار بلوری، درصد خلوص فاز و میانگین اندازه نانو ذرات با استفاده از پراش پرتو X (XRD) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) بررسی شد. همچنین با کمک دستگاه مغناطش‌سنج نمونه مرتعش (VSM)، خواص مغناطیسی نانو ذرات مطالعه شد. و در نهایت بعد از تأیید ساختار مگنیتیت، هدایت گرمایی آن با درصدهای وزنی مختلف و همچنین ترکیب نانو ذرات مگنیتیت و مس با درصدهای حجمی مختلف با استفاده از روش سیم داغ گذرا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از اندازه‌گیری به شرح زیر است.

۳-۷-۱ نتایج پراش پرتو X نانو ذرات (XRD)

نانوذرات استفاده شده اعم از Fe_3O_4 و CuO توسط XRD برای تعیین ساختار و تخمین اندازه بلورک‌های آنها مورد مشخصه‌یابی قرار گرفتند. الگوی پراش پودر اشعه ایکس نمونه بر روی یک diffractometer Advance Bruker D8 با استفاده از تابش $CuK\alpha$ (1.5406 \AA) در دمای اتاق در محدوده ۱۰ تا ۸۰ درجه صورت گرفته است. به طور کلی، XRD را می‌توان برای مشخص کردن ساختار کریستالی نانوذرات و همچنین قطر نانوذرات متوسط استفاده کرد. ثابت شبکه که نشان‌دهنده ساختار بلور است برابر 8.39 \AA بود که با پارامتر شبکه برای مگنیتیت 8.39 \AA گزارش شده برابر است. در نهایت، تجزیه و تحلیل الگوی پراکندگی نشان می‌دهد که نمونه یک ساختار اسپینل مکعبی دارد زیرا قوی‌ترین انعکاسی که از صفحه حاصل می‌شود صفحه (۳۱۱) است که انعکاس مشخصه‌ی چنین فازی است. قله‌هایی که بیانگر صفحات بلورین (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۴۰۰)، (۴۲۲)، (۵۱۱) و (۴۴۰) می‌باشد، مربوط به یک سلول واحد مکعبی است که مشخصه ساختار اسپینل مکعبی است. بنابراین، تأیید شد که ساختار بلوری نانوذرات مغناطیسی به دست آمده، با ساختار یک اکسید نوع اسپینل توافق دارد. اندازه نانو بلورک‌ها با استفاده از عرض قله‌ها در نیم حداکثر شدت (FWHM) قوی‌ترین انعکاس از صفحه (۳۱۱) و با استفاده از تقریب شرر بدست آمد و به صورت:

$$D_N = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (3-3)$$

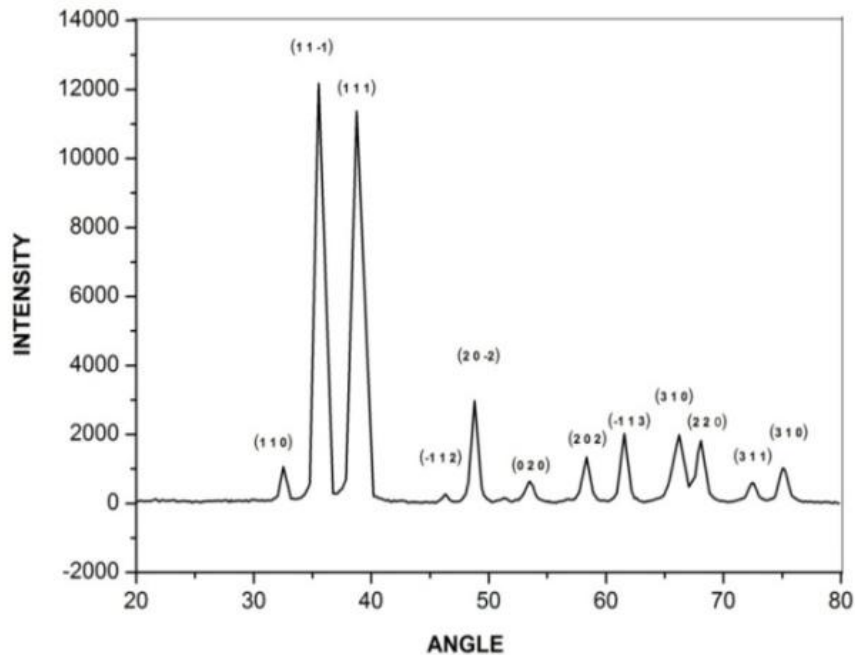
است. در اینجا، D_N اندازه متوسط نانوذرات است، k یک تابع شکل است که برای آن مقدار ۰.۹ استفاده می‌شود، λ طول موج تابش، β عرض کامل در نیم‌حداکثر (FWHM) در رادیان و θ زاویه براگ. اندازه نانوذرات بر مبنای تابش پرتو ایکس در حدود (۲۵-۳۵nm) است. با توجه به خطوط الگوی پراش پهن، می‌توان گفت که ذرات دارای اندازه نانومتر هستند. بنابراین با استفاده از ذرات در این محدوده اندازه‌گیری، نانوسیال‌ها به راحتی می‌توانند آماده شوند و مطابق با رابطه $d < \left(\frac{6k_B T}{\mu_0 M_0 T H}\right)^{\frac{1}{3}}$ ادنباخ می‌توانند شرط استفاده در میدان مغناطیسی را برآورده سازند و سیال پایداری را ایجاد نمایند. به طوری که با توجه به شرط بالا برای دمای های تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد و میدان‌هایی در حدود ۱۰ کیلو ارستد نانوذرات مگنتیت تا حدود ۵۰ نانومتر شرایط پایداری سیستم را فراهم می‌سازند.



شکل ۳-۸ الگوی پراش پرتو ایکس از نمونه پودری نانوذرات Fe_3O_4

تفسیر اشعه X مربوط به نانو ذرات CuO بیانگر این است که نانو ذرات خریداری شده مطابق استاندارد هستند و با دقت 99% با نتایج دیگران هم‌خوانی دارد. بر طبق نتایج بدست آمده دو انعکاس

در 2θ های $۸/۳۸.۰۶/۳۵$ معدل با صفحات بلورین (۰۲۲) و (۱۱۱) هستند که بیانگر ساختار مونوکلینیک این ترکیب است.



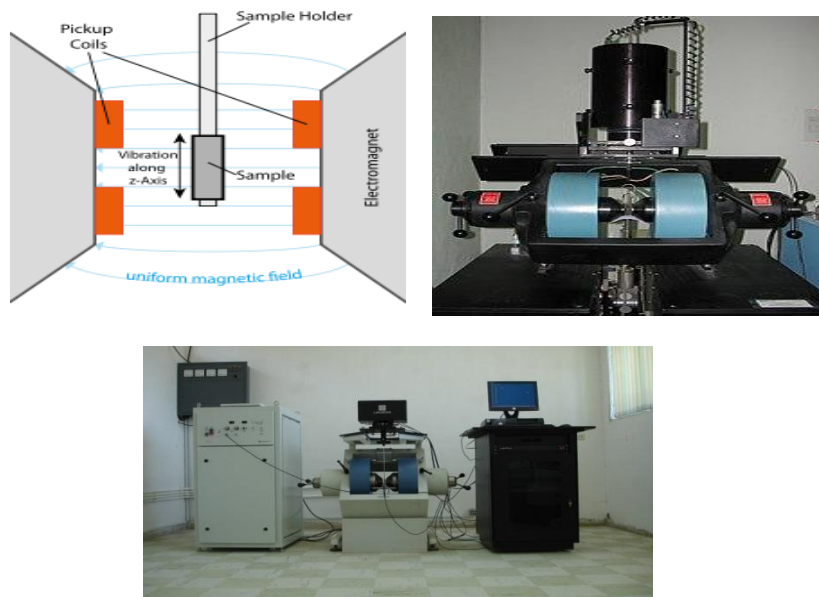
شکل ۳-۹ طیف پراش پرتو ایکس از نمونه CuO

۳-۷-۲ نتایج ویژگی مغناطیسی Fe_3O_4 با استفاده از دستگاه مغناطیس سنج ارتعاشی

(VSM)

خصوصیات مغناطیسی نانوذرات با استفاده از دستگاه مغناطیسی نمونه ارتعاشی (VSM) ، در دمای اتاق، با یک میدان مغناطیسی در محدوده -۱۳۰۰۰ تا ۱۳۰۰۰ ارستد انجام شد، در حالی که پارامترهایی مانند مغناطش اشباع (Ms) و میدان واگردان (Hc) مورد ارزیابی قرار گرفتند. رفتار نانو سیالها به طور عمده توسط خواص مغناطیسی آنها تعیین می شود. یک مغناطیس سنج نمونه ارتعاشی (VSM) یک ابزار علمی است که خواص مغناطیسی را اندازه گیری می کند. این دستگاه در آزمایشگاه

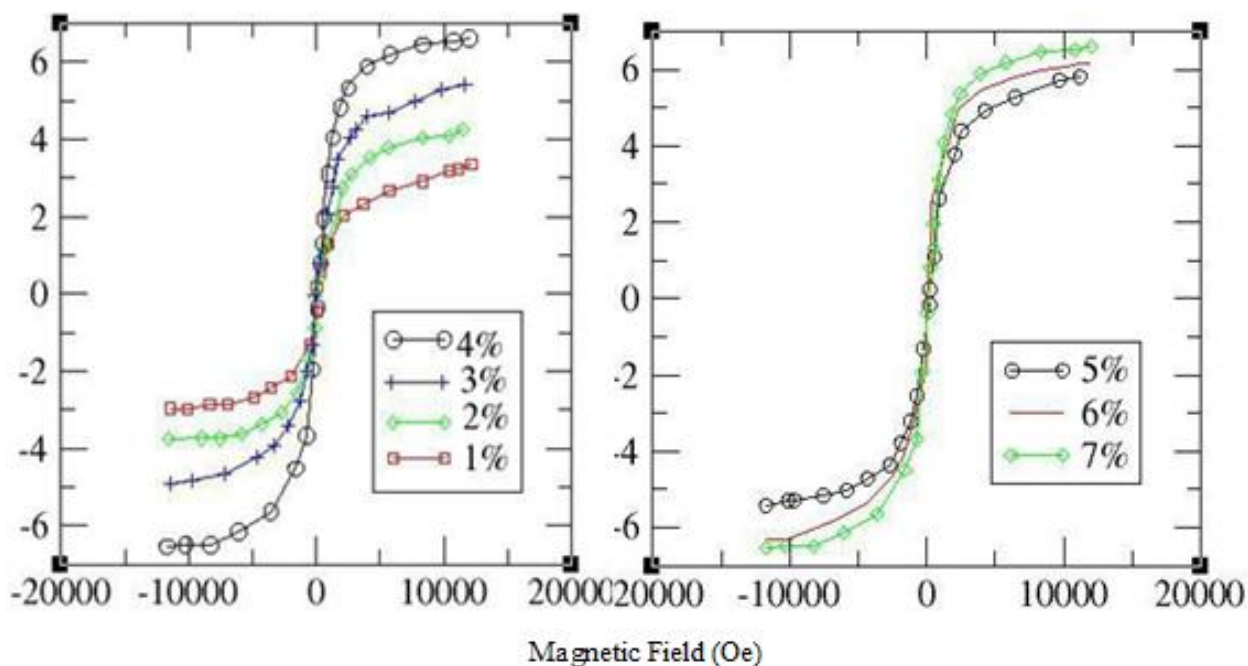
لینکلن MIT VSM را در سال ۱۹۵۵ اختراع گردید و در سال ۱۹۵۹ آن را گزارش کرد. نمونه ابتدا در میدان مغناطیسی یکنواخت مغناطیسی قرار داده می‌شود. پس از آن به طور معمول از طریق استفاده از مواد پیزوالکتریک به صورت سینوسی مرتعش می‌شود. در شکل (۳-۱۰) نمونه‌ای از دستگاه VSM و نمونه مستقر در دانشگاه بیرجند که در آزمایشگاه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است نمایش داده شده است.



شکل ۳-۱۰ دستگاه VSM استفاده شده در دانشگاه بیرجند

فرو فلوئیدها معمولاً رفتار سوپرپارامغناطیسی را نشان می‌دهند، زیرا هر یک از ذرات را می‌توان به عنوان یک آهنربای دائمی حرارتی در مایع حامل مورد استفاده قرار داد. در حضور یک میدان مغناطیسی H ، گشتاور مغناطیسی (m) ذرات سعی خواهند کرد تا با جهت میدان مغناطیسی هماهنگ شوند، که منجر به مغناطش ماکروسکوپی مایع می‌شود. مگنتیت مایع مثل مغناطش یک سیستم سوپر پارامغناطیس رفتار می‌کند، علاوه بر این چنین موادی اغلب حلقه‌های هیستریزس (منحنی های $M-H$) را نشان می‌دهد که بصورت برگشت‌ناپذیری در فرآیند مغناطیسی که به جفت

شدگی دیواره‌های حوزه مغناطیسی در ناخالصی‌ها یا مرزهای دانه درون مواد مرتبط است، ایجاد می‌گردد. شکل این حلقه‌ها، به طور جزئی، با اندازه ذرات تعیین می‌شود. حتی در اندازه‌های کوچک (حدود دهم نانومتر یا کمتر)، رفتار سوپر پارا مغناطیسی دیده می‌شود، به طوری که انرژی مغناطیسی ذره به صورت تمام و کمال می‌تواند در واکنش به انرژی حرارتی آزاد شود. منحنی M-H برای نمونه‌های مگنتیت با کسرهای حجمی متفاوت از ۱ تا ۷٪ کسر حجمی به ترتیب در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده است. مغناطش اشباع (Ms) در دمای اتاق به ترتیب برای نانوسیال‌های مغناطیسی Fe_3O_4 با کسرهای حجمی مختلف بین ۳ تا ۷ emu/gr برای کسرهای حجمی ۱ تا ۴٪ بین ۳ تا ۷ emu/gr و برای ۵ تا ۷٪ کسر حجمی بین ۵ تا ۷ emu/gr است. یک نکته قابل توجه این است که با افزایش کسر حجمی مقدار مغناطش اشباع نیز افزایش می‌یابد که بیانگر تقویت ساختار مغناطیسی سیال با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزوده شده به سیال پایه است. یک نکته قابل ذکر این است که مغناطش نانو ذرات مگنتیت در حضور میدان‌های خارجی تا حدود $KOe 13 \pm$ و در دمای اتاق به دست آمد و این محدودیت به خاطر عدم توانمندی دستگاه در ارائه خدمات در دماهای بالاتر است که سبب گردید وابستگی مغناطیس‌پذیری نانوسیال در دماهای بالاتر تا حدودی نامعین باقی بماند هر چند تجربه نشان می‌دهد که رفتار مغناطیسی نانوذرات مغناطیسی در دماهای بسیار پایین‌تر از دمای اتاق می‌تواند سبب تغییر در فاز مغناطیسی آنها گردد و در دماهای معمولی و نزدیک به دمای اتاق (۲۵-۳۰) درجه شاهد تغییر رفتار مغناطیسی ویژه‌ای نیستیم. یک نتیجه قابل تامل تاثیرپذیری متفاوت نانوسیال مغناطیسی با کسرهای حجمی متفاوت Fe_3O_4 در حضور میدان مغناطیسی است. همانطور که در شکل مشخص است با افزایش کسر حجمی مغناطش اشباع این ترکیبات نیز افزایش می‌یابد. رفتار نانو سیالات نشان‌دهنده رفتار سوپر پارامغناطیسی آنها است به گونه‌ای که در میدان صفر، سیالات مغناطیسی مانده‌ای در سیستم از خود نشان نمی‌دهند.



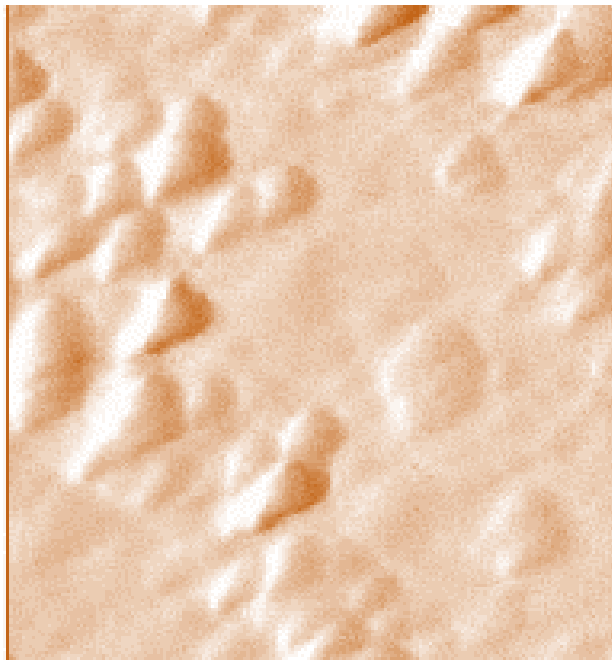
شکل ۳-۱۱ نتایج نمودار حلقه هستریزیس بدست آمده از اندازه گیری VSM

۳-۷-۳ تحلیل نتایج میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)

AFM یک نوع میکروسکوپ پروب اسکن (SPM) است که با وضوح توپولوژی ساختار را نشان می-دهد دقت وضوح تقریباً یک نانومتر است و بیش از ۱۰۰۰ بار بهتر از حد پراش نوری است. اطلاعات توسط لمس سطح با یک پروب مکانیکی جمع آوری می-شود. عناصر پیزوالکتریک که حرکات کوچک، اما دقیق را در فرمان (الکترونیکی) تسهیل می-کنند، اسکن دقیق را امکان پذیر می-سازد. AFM سه توانایی عمده دارد: اندازه گیری نیرو، تصویربرداری و دستکاری. در اندازه گیری نیرو، AFM ها می-توانند برای اندازه گیری نیرو بین پروب و نمونه به صورت تابعی از فاصله متقابل سطح و پروب بکار روند. این دیدگاه و ابزار را می-توان برای انجام طیفسنجی نیرو، برای اندازه گیری خواص مکانیکی نمونه، مانند مدول یانگ نمونه، اندازه گیری سختی استفاده کرد.

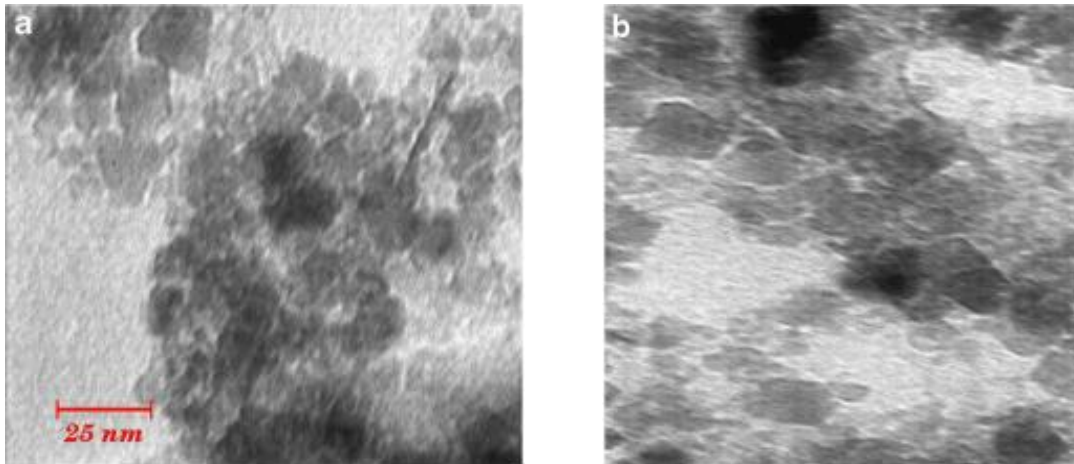
واکنش پروب به نیروهایی که از سطح نمونه بر روی آن اعمال می‌شود، می‌تواند برای شکل دادن به شکل سه‌بعدی (توپوگرافی) سطح نمونه با وضوح بالا استفاده شود. به وسیله اسکن موقعیت‌های مکانی روی نمونه و با توجه به ارتفاع نوک و تنظیم پروب توپوگرافی سطح به طور معمول به صورت یک طرح رنگی با کنتراست‌های مختلف که بیانگر ارتفاع است نمایش داده می‌شود.

توپولوژی نانوذرات Fe_3O_4 در تصویر توپوگرافی، با استفاده از AFM به دست آمده و در شکل (۳-۱۲) نشان داده شد است. نتایج بیانگر شکل تقریباً کروی نانوذرات است به طوری که ابعاد آنها در حدود ۲۰ تا ۳۵ نانومتر و در تایید نتایج حاصل از طیف پرتو ایکس است. در شکل (۳-۱۳) تصویر TEM مربوط به نانوذرات CuO نشان داده شده است که موید ابعاد نسبتاً مساوی با نانوذرات Fe_3O_4 و شکل تقریباً کروی آنها است.



شکل ۳-۱۲ تصویر AFM بدست آمده از نانو ذرات Fe_3O_4 جهت تعیین توپولوژی و شکل. (مقیاس اندازه-

گیری ۵۰ نانومتر است)

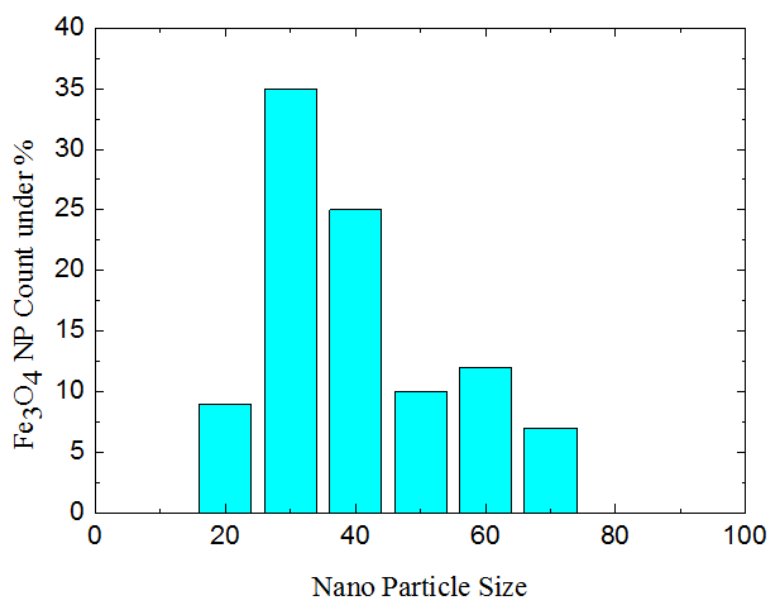


شکل ۳-۱۳ تصویر TEM نانو ذرات Fe_3O_4 (a) و CuO (b) (سری دوم آزمایشات بر مبنای زمان ترکیب

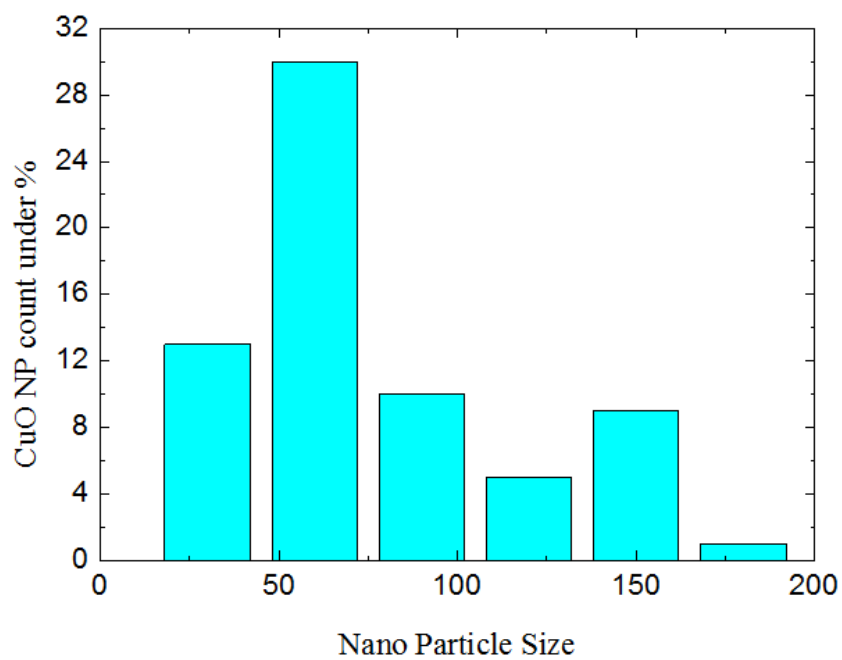
مواد و مدت التراسونیک)

۳-۷-۳ آنالیز تعیین اندازه نانوذرات (DLS)

جهت بررسی دقیق اندازه نانو ذرات و با توجه به اهمیت آنها با استفاده از دستگاه تحلیل کننده اندازه ذرات ابعاد میانگین نانو ذرات بکار گرفته شده مورد بررسی قرار گرفت. اندازه نانو ذرات Fe_3O_4 تا 35nm و نانو ذرات CuO تا 30nm با استفاده از تکنیک DLS اندازه گیری شد. توزیع اندازه ذرات در شکل های (۳-۱۴) و (۳-۱۵) آمده است. همانطور که در شکل مشخص است توزیع ذرات در محدوده ۲۵ تا ۳۰ نانومتر دارای پیک است که بایانگر قطر نانوذرت ساخته شده در نانوسیال است.



شکل ۳-۱۴ توزیع اندازه نانو ذرات Fe₃O₄ با استفاده از تکنیک DLS



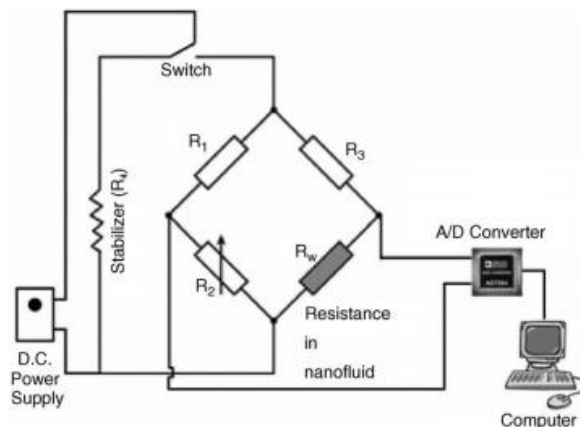
شکل ۳-۱۵ توزیع اندازه نانو ذرات CuO با استفاده از تکنیک DLS

۸-۳ روش سیم داغ گذرا^۱ جهت اندازه‌گیری ضریب هدایت گرمایی در آزمایشگاه

این روش، روشی قابل اعتماد، دقیق و محکم جهت بدست آوردن ضریب هدایت گرمایی است. در این روش هدایت گرمایی نانو سیال با اندازه‌گیری سرعتی که در آن دمای یک سیم نازک پلاتین یا تتانالیوم با قطر (5-80 μm) بعد از تغییر یک واحدی در ولتاژی که بر آن اعمال می‌شود، با زمان افزایش می‌یابد. سیم مانند ترمومتر عمل کرده و بصورت عمودی وارد نانو سیال می‌شود. دمای سیم با اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی آن که با دما رابطه دارد به دست می‌آید. برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی سیم (R_w) از یک پل و تسنون استفاده می‌شود. مقاومت الکتریکی پتانسیومتر R_3 ، زمانی که گالوانومتر G جریان صفر را نشان می‌دهد، تنظیم می‌شود. هنگامی که پل با جریان صفر گالوانومتر بالانس می‌شود، مقدار R_w می‌تواند با توجه به مقادیر معلوم R_1 , R_2 , R_3 تعیین گردد.

$$R_w = \frac{R_1 R_2}{R_3} \quad (۴-۳)$$

چون نانوسیال‌ها، هادی جریان الکتریکی هستند، برای جلوگیری از ایجاد مسائلی همچون ایجاد جریان الکتریکی در سیال که موجب مبهم شدن تولید گرما در سیم می‌شود، از یک لایه عایق الکتریکی نازک برای پوشاندن سیم پلاتینی استفاده می‌شود (شکل ۳-۱۶).



شکل ۳-۱۶ طرحی از ست آپ آزمایشگاهی روش سیم داغ

¹ Modified Transient Hot Wire Method

ماگاسا و ناگاشیما اول بار این روش را که به روش سیم داغ موسوم است استفاده کردند آنها یک لایه چسب، سیم را پوشش دادند.

به علت قطر کم سیم پلاتینی و هدایت الکتریکی بالای آن، می توان آن را به عنوان یک منبع خطی در یک محیط نامحدود استوانه‌ای در نظر گرفت. سرعت تولید گرما به ازای واحد طول سیم پلاتینی برابر است با :

$$q_i = \frac{tv}{l} \quad (5-3)$$

که در آن i جریان الکتریکی سیم و v افت ولتاژ در طول سیم است. معادله دمایی به فرم زیر در می آید [۵۱]:

$$\frac{r^4}{64\alpha^3 t^3} + \frac{r^6}{64\alpha^5 t^5} - \dots - T = \frac{q}{4\pi k} E_t \left(\frac{r^2}{4\alpha t} \right) = \frac{q}{4\pi k} \left[-\gamma + \ln \left(\frac{4\alpha t}{r^2} \right) + \frac{r^2}{4\alpha t} \right] \quad (6-3)$$

که Ei تابع انتگرال نمایی بوده و $\gamma = \text{Ln}(\sigma) = 0.5772156649$ ثابت اولر است. برای یک منبع خطی که داخل یک محیط استوانه ای نامحدود قرار گرفته باشد از این تقریب می توان استفاده کرد:

$$\frac{r^2}{4x\alpha t} \leq 1 \quad (7-3)$$

بنابراین معادله به فرم زیر در می آید:

$$T \approx \frac{q}{4\pi k} \left[-\gamma + \ln \left(\frac{4\alpha t}{r^2} \right) \right] \quad (8-3)$$

برای دو زمان مختلف داریم:

$$(T_2 - T_1) \approx \frac{tV}{4\pi kl} \left[\ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \right] \quad (9-3)$$

بعد از ساده کردن. جاگذاری معادله خواهیم داشت:

$$k \approx \frac{tV}{4\pi(T_2 - T_1)l} \left[\ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \right] \quad (10-3)$$

که در این معادله k ضریب هدایت گرمایی، t زمان، T دما، v ولتاژ می‌باشند. با استفاده از این روش، ضریب هدایت گرمایی دقیق و سریع محاسبه می‌شود و در عین حال اثرات ناخواسته انتقال حرارت نیز کاهش می‌یابد. اساس اندازه‌گیری هدایت گرمایی و نفوذ گرمایی در این روش، معادله انرژی برای هدایت است.

۹-۳ مدل سازی عددی

۹-۳-۱ مسیر متداول (مدل تک فاز)

نانو سیالات مورد استفاده در این روش به منظور افزایش انتقال حرارت، معمولاً مخلوط‌های رقیق شده مایع- جامد هستند که ذرات جامد بسیار ریز با قطری کمتر از 100nm بوده و به راحتی در سیال مخلوط شده و رفتار آنها را می‌توان مانند مایع در نظر گرفت. با این فرض که در حرکت بین فاز گسسته ذرات ریز پراکنده شده و سیال هیچ انحرافی وجود ندارد و تعادل حرارتی موضعی بین سیال و نانو ذرات وجود ندارد، می‌توان با این سیال همانند یک سیال خالص معمولی رفتار کرد. به طوری که همه معادلات پیوستگی، حرکت و انرژی برای سیال خالص، مستقیماً برای نانو سیال نیز تعمیم می‌یابد. برخی فرمول‌های موجود که برای پیش‌بینی هدایت حرارتی سوسپانسیون‌های جامد به مایع با ذرات نسبتاً بزرگ به کار می‌رود و می‌توانند مقدار ضریب هدایت گرمایی را به صورت تقریبی برای نانو سیالات تخمین بزنند. بنابراین تمام معادلات پیوستگی، حرکت و انرژی که در سیال خالص کاربرد

دارد، می تواند برای نانو سیال هم استفاده شود. معادله انرژی برای جریان غیرقابل تراکم و بدون اتلاف ویسکوزیته، با ثابت فرض کردن ویژگی های حرارتی، به صورت زیر است :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot uT = \nabla \cdot (\alpha_f \nabla T) \quad (11-3)$$

معادله فوق برای توصیف انتقال حرارت نانو سیال نیز مناسب است. در صورتی که این معادله برای نانوسیال استفاده شود باید خواص حرارتی نانو سیال در آن قرار گیرد. اساسا با توجه به اینکه رابطه تئوری برای محاسبه هدایت گرمایی نانو سیال وجود ندارد. تنها تعدادی روابط برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی مخلوط های دوتایی با ذرات درشت در ابعاد میکرومتر و میلی متر ارائه شده است که در آن روابط هدایت گرمایی سوسپانسیون فقط به درصد حجمی و شکل نانو ذرات بستگی دارد و به سایز و نحوه توزیع ذرات وابسته نیست. یکی از این روابط، رابطه ماکسول است [۱۴۴] :

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2\phi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \phi(k_f - k_p)} \quad (12-3)$$

که K_p و K_f به ترتیب هدایت گرمایی سیال پایه و ذرات کروی شکل، k_{eff} ضریب هدایت گرمایی نسبی و ϕ درصد حجمی است.

هامیلتون - کراسه [۱۴۵] رابطه زیر را برای مخلوط های جامد - مایع که در آن نسبت هدایت دو فاز بزرگتر از ۱۰۰ بوده را پیشنهاد کردند. آنها انحراف از کروی بودن ذرات را نیز در نظر گرفتند :

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_p + (n-1)k_f - \phi(n-1)(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \phi(k_f - k_p)} \quad (13-3)$$

که در آن n فاکتور شکل تجربی، ϕ به صورت نسبت سطح کره هم حجم با ذره به سطح ذره است. همچنین یو و چویی مدل دیگری برای محاسبه K_{eff} به صورت زیر را پیشنهاد کردند.

$$k_{eff} = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)(1 + \beta)^2 \varphi}{k_p + 2k_f + (k_p - k_f)(1 + \beta)^3 \varphi} k_f \quad (14-3)$$

که در آن β نسبت ضخامت نانو لایه به شعاع ذره است. این تعریف، زمانی که قطر ذره کمتر از 10 nm باشد مناسب است.

در این رساله به منظور مدل سازی عددی از نرم افزار COMSOL MULTIPHYSICS استفاده شد که یک نرم افزار طراحی شده بر پایه حل معادلات دیفرانسیل به روش Finite Element است و قابلیت پردازش موازی و استفاد از تکنیک های مختلف حل عددی را دارا می-باشد [https://www.comsol.com/].

در این شبیه سازی از مدل تک فاز استفاده گردید به گونه ای که خواص بدست آمده برای k مبتنی بر دیدگاه میدان میانگین به شرایط مرزی سیستم تحمیل شد. نانوسیال به صورت نیوتنی و غیر قابل تراکم و رژیم جریان به صورت آرام فرض گردید.

معادله پیوستگی و مومنوم در حالت جریان آرام به صورت زیر در نظر گرفته می شود :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (u) = 0 \quad (15-3)$$

$$(16-3)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho (u \cdot \nabla) u = \nabla \cdot [-pI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)] + F$$

به طوری که معادله انتقال گرما به صورت:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (17-3)$$

و معادله ویسکوزیته مخلوط به صورت زیر است:

$$\mu_{nf} = \mu_f \frac{1}{(1 - \varphi)^{2.5}} \quad (18-3)$$

در معادلات بالا پارامترهای ρ (SI unit: kg/m³) چگالی ، C_p (SI unit: J/(kg·K)) ظرفیت گرمایی در فشار ثابت k (SI unit: W/(m·K)) ضریب هدایت گرمایی، U میدان سرعت، Q منبع

گرما و μ ویسکوزیته است.

معادله چگالی مخلوط نانوسیال با در نظر گرفتن چگالی سیال پایه و چگالی نانوذرات مورد استفاده به صورت:

$$(\rho)_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi \cdot \rho_p \quad (۱۹-۳)$$

تعیین می گردد که در آن ρ_p جمع چگالی هر دو نانوساختار در سیستم مورد مطالعه است. معادله گرمای ویژه مخلوط نیز مطابق رابطه زیر در نظر گرفته می شود:

$$(c_p)_{nf} = \frac{(1-\varphi)(\rho \cdot c_p)_f + \varphi(\rho \cdot c_p)_p}{(1-\varphi)\rho_f + \varphi\rho_p} \quad (۲۰-۳)$$

با استفاده از رابطه زیر می توان مقدار چگالی و گرمای ویژه مخلوط را به طور همزمان محاسبه نمود چنانکه:

$$(\rho \cdot c_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho \cdot c_p)_f + \varphi(\rho \cdot c_p)_p \quad (۲۱-۳)$$

فصل چهارم

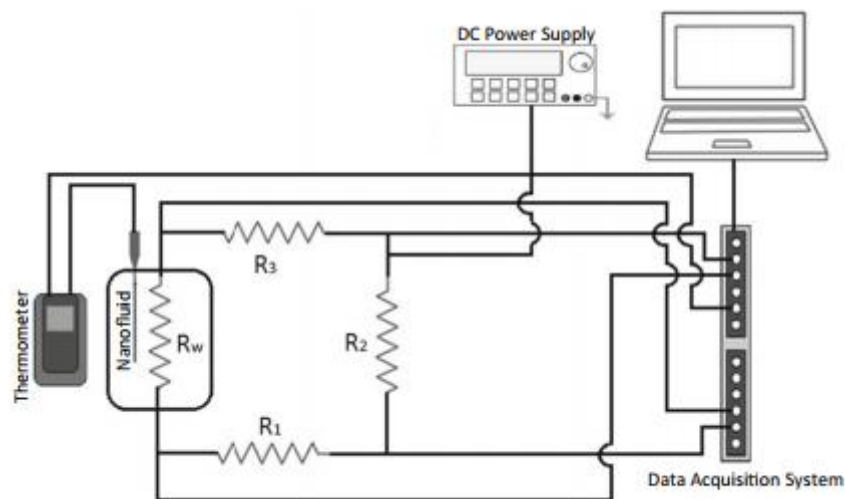
نتایج و بحث

۱-۴ بررسی ضریب هدایت گرمایی نانو سیال Fe_3O_4 خالص و Fe_3O_4/CuO بر پایه آب با

درصدهای وزنی مختلف، بدون حضور میدان مغناطیسی

در این فصل نتایج حاصل از مطالعات و آزمایش‌های صورت گرفته ارائه و به تحلیل و توصیف آنها پرداخته می‌شود.

در این مرحله ضریب هدایت گرمایی برای شرایط و حالت‌های مختلف با استفاده از روش سیم داغ مورد بررسی قرار گرفت. تصویر شماتیک ست‌آپ آزمایشگاهی در شکل (۱-۴) نشان داده شده است.

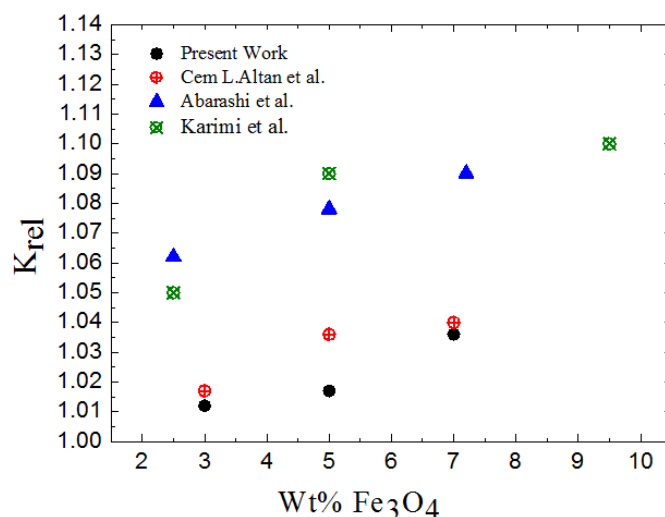


شکل ۱-۴ تصویر شماتیک سامانه آزمایشگاهی مورد استفاده

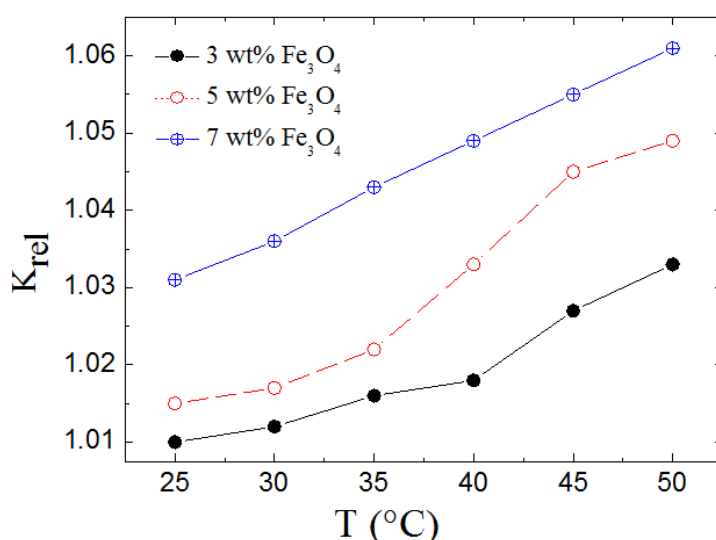
۱-۱-۴ بررسی وابستگی هدایت گرمایی نسبی Fe_3O_4 خالص با دما

نتایج به صورت ضریب هدایت گرمایی نسبی (ضریب هدایت گرمایی نانوسیال به ضریب هدایت گرمایی آب) در نمودارها آورده شده است. یک تاثیر مستقیم افزایش غلظت نانو ذرات Fe_3O_4 ، افزایش هدایت گرمایی است. به طوری که با افزایش غلظت ذرات، از ۳ به ۷ درصد، هدایت گرمایی به اندازه ۲.۳۷٪ افزایش می‌یابد.

یک تاثیر عمیق با افزایش درصد بین بازه ۵ تا ۷ درصد، مشاهده می‌شود به گونه‌ای که هدایت گرمایی نسبی از مقدار 1/015 به مقدار 1/03 افزایش می‌یابد. هر چند با افزایش دما رفتار نمودار ۵ درصد و ۷ درصد وزنی Fe_3O_4 به یکدیگر نزدیک می‌شود. به صورت خیلی کلی چنین نتیجه‌ای در مطالعات پیشین که توسط ابارشی و آلتان و کریمی و همکاران [۱۴۷،۱۴۶،۷۶] در دمای ۳۰ درجه سانتی-گراد مشاهده می‌گردد. هر چند اختلاف ناچیزی بین k حاضر و آلتان وجود دارد که این اختلاف به علت تغییر بعضی از پارامترهای نانو سیال مانند سیال پایه و ابعاد نانو ذرات (۱۰ نانومتر) است. در مورد کار ابارشی و همکاران [۷۶]، اندازه نانوذرات (کمتر از ۲۵ نانومتر) اختلاف و فاصله بین پارامترهای نانو سیالات بیش از پیش افزایش یافته، بنابراین هدایت گرمایی تفاوت چشمگیری دارد. در شکل (۴-۲)، رفتار هدایت گرمایی نسبی با افزایش غلظت و همچنین مقایسه آن با کارهای پیشین نشان داده شده است. در یک تحقیق مشابه کریمی و همکاران [۱۴۷]، هدایت گرمایی نسبی Fe_3O_4 را اندازه گرفتند. آنها تغییرات مشابهی را در رشد هدایت گرمایی نسبی با افزایش غلظت Fe_3O_4 مشاهده کردند. در شکل (۴-۳)، وابستگی همزمان هدایت گرمایی نسبی نانو سیال خالص Fe_3O_4 با درصدهای وزنی ۳ و ۵ درصد به دما نشان داده شده است. در محدوده درصدهای وزنی ۳ تا ۷ درصد با افزایش دما، هدایت گرمایی نسبی افزایش می‌یابد به طوری که برای نمونه ۳٪ با تغییر دما از ۲۵ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد هدایت گرمایی نسبی به اندازه 2/27% افزایش یافته و برای نمونه‌های ۵٪ و ۷٪ نیز افزایش هدایت گرمایی نسبی با دما به ترتیب 3/35% و 2/9% می‌باشد. در نمونه‌های با غلظت کم ۳ و ۵ درصد، یک شکل تقریباً سهمی‌گون از افزایش ضریب هدایت گرمایی بر حسب دما وجود دارد. در حالیکه با افزایش غلظت تغییرات هدایت گرمایی بر حسب دما تقریباً خطی می‌شود (نمونه ۷ درصد وزنی). یک ناحیه گذار در محدوده دمای بین ۳۵ تا ۴۰ درجه برای نمونه‌های با غلظت کم مشاهده می‌شود که در آن هدایت گرمایی نسبی در یک بازه تغییر دمایی ۵ درجه به اندازه 0/19% و 1/067% رشد دارد.



شکل ۲-۴ مقایسه بین نتایج حاضر و نتایج سایر محققین در دمای 30°C



شکل ۳-۴ نسبت ضریب هدایت گرمایی بر حسب دما در درصد‌های وزنی مختلف Fe₃O₄

برای نمونه‌های ۳ و ۵ درصد به ترتیب افزایش ناگهانی می‌یابد. به طوری که چنین شیئی از افزایش در جای دیگری از نمودار مشاهده نمی‌شود. بطور کلی افزایش هدایت گرمایی بر حسب دما توسط پژوهشگران دیگر نیز گزارش شده است [۱۴۷، ۱۴۶، ۷۶].

ضرایب برازش نقاط با استفاده از چند جمله ای مرتبه دو به صورت:

$$k = k_0 + \alpha T + \beta T^2 \quad (1-4)$$

برای سه نمونه با درصد‌های وزنی مختلف در دمای بین ۲۵ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد در جدول (۱-۴) نشان داده شده است.

جدول ۴-۱ ضرایب برازش تغییرات k بر حسب درصد وزنی wt%

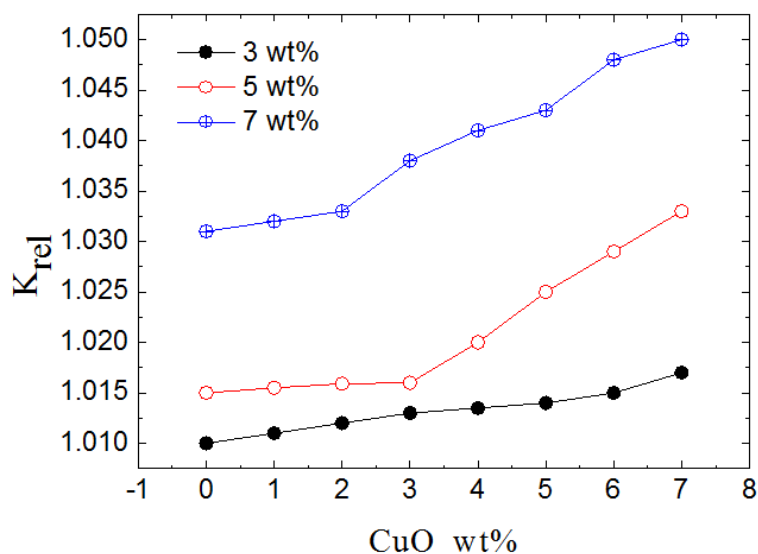
نمونه	K_0	α	β
3%	1.022	-0.0012	$2.85 \times 10E-5$
5%	1.00957	$4 \times 10E-5$ -۵.۲۱-	$2.71 \times 10E-5$
7%	1.00114	0.00116	$7 \times 10E-7$

۴-۱-۲ بررسی وابستگی هدایت گرمایی درصدهای وزنی مختلف Fe_3O_4 با سه درصد

وزنی CuO بر حسب دما

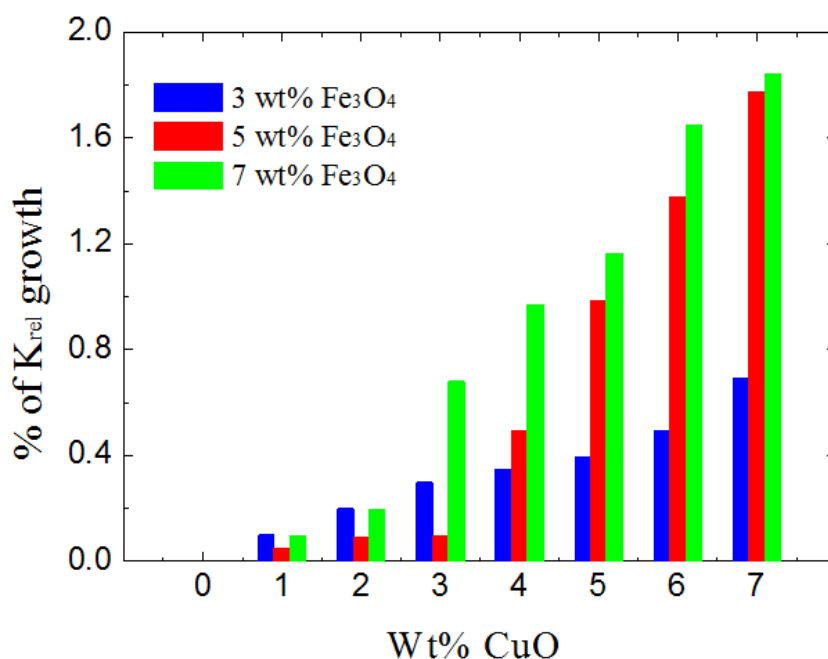
به عنوان یک هدف اصلی از انجام این تحقیق، تاثیر غلظت نانو ذرات CuO را در هدایت گرمایی سیال پایه Fe_3O_4 مورد مطالعه قرار گرفته است. یک سوال اساسی این است که اگر در غلظت‌های مختلفی از Fe_3O_4 به عنوان سیال پایه، غلظت‌های مختلفی از نانو ذرات CuO وارد شود چه تاثیری بر هدایت گرمایی آن خواهد گذاشت. با توجه به اینکه مطالعات پیشین بر روی نانوذرات CuO نشان داده است که با افزایش نانوذرات CuO در آب هدایت گرمایی نسبی آن افزایش می‌یابد. انتظار می‌رود که یک تاثیر نسبی در هدایت گرمایی نانو ذرات Fe_3O_4 ایجاد شود.

در شکل (۴-۴) نمودار هدایت گرمایی نسبی نانو سیال Fe_3O_4 در حضور نانو ذرات CuO با غلظت‌های مختلف نشان داده شده است. غلظت نانو سیال CuO بین صفر تا ۷ درصد در سیال پایه Fe_3O_4 با غلظت‌های ۳ و ۵ و ۷ درصد به ترتیب مورد مطالعه قرار گرفته است.



۴-۴ ضریب هدایت گرمایی نسبی بر حسب درصدهای وزنی مختلف CuO.

همان‌طور که در شکل (۴-۴) ملاحظه می‌شود، با افزایش غلظت CuO هدایت گرمایی نسبی افزایش پیدا کرده است. و هر چه غلظت CuO بیشتر شده، هدایت گرمایی هم بیشتر شده است. در واقع یک رابطه مستقیم بین افزایش غلظت CuO و افزایش هدایت گرمایی وجود دارد. در غلظت‌های پایین Fe₃O₄ افزایش غلظت CuO تا ۷ درصد تاثیر ناچیزی داشته است و با افزایش غلظت Fe₃O₄ اثر نانو ذرات CuO در افزایش هدایت گرمایی تاثیر بیشتر خود را نشان می‌دهد. در واقع چنین رفتاری می‌تواند بیانگر یک همبستگی بین ذرات CuO و Fe₃O₄ در افزایش سهم انتقال هدایت گرمایی از سیال باشد. چنین رفتاری در شکل (۴-۵) به خوبی نشان داده شده است. جایی که در آن درصد رشد هدایت گرمایی با غلظت نانو ذرات CuO ترسیم شده است.



۴-۵ درصد رشد ضریب هدایت گرمایی نسبی Fe₃O₄ بر حسب درصدهای وزنی مختلف CuO.

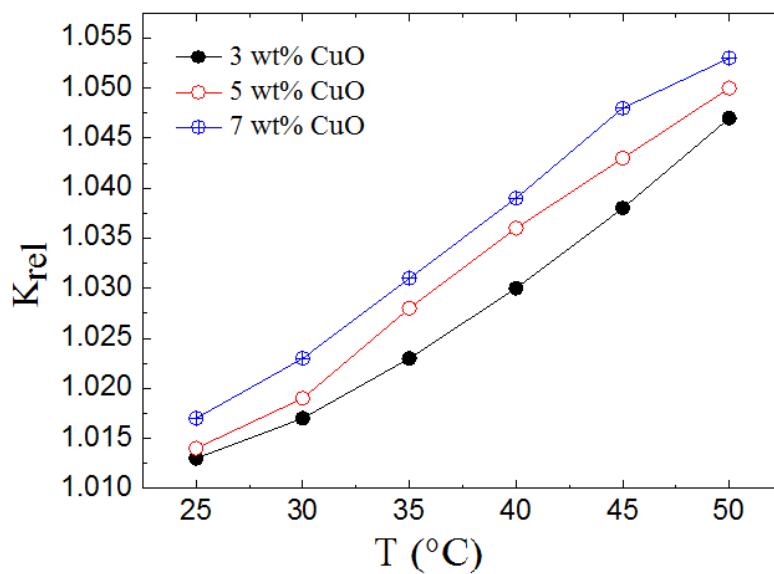
همانطور که در شکل مشخص است در نانو سیال ۳٪ Fe₃O₄، هدایت گرمایی با تزریق نانو ذرات CuO تا هفت درصد، رشدی در حدود ۰.۷٪ را ایجاد می‌کند. در حالی که در نمونه‌های ۵ تا ۷ درصد تزریق نانو ذرات CuO می‌تواند تا ۰.۲٪ باعث افزایش هدایت گرمایی نانو سیال شود. یک نقطه قابل مشاهده در شکل (۴-۴) افزایش چشمگیر هدایت گرمایی در غلظت‌های بیش از ۳٪ CuO است. به طوری که در غلظت‌های پایین‌تر، افزایش CuO تاثیر چشمگیری در هدایت گرمایی ندارد. چنین رفتاری در (غلظت‌های بالای ۳٪ CuO) پیش از این توسط هایتو زو [۴۴] برای نانوسیال CuO بر پایه آب گزارش شده است.

۴-۱-۳ تاثیر دما بر هدایت گرمایی نانو سیال Fe₃O₄ / CuO بر پایه آب

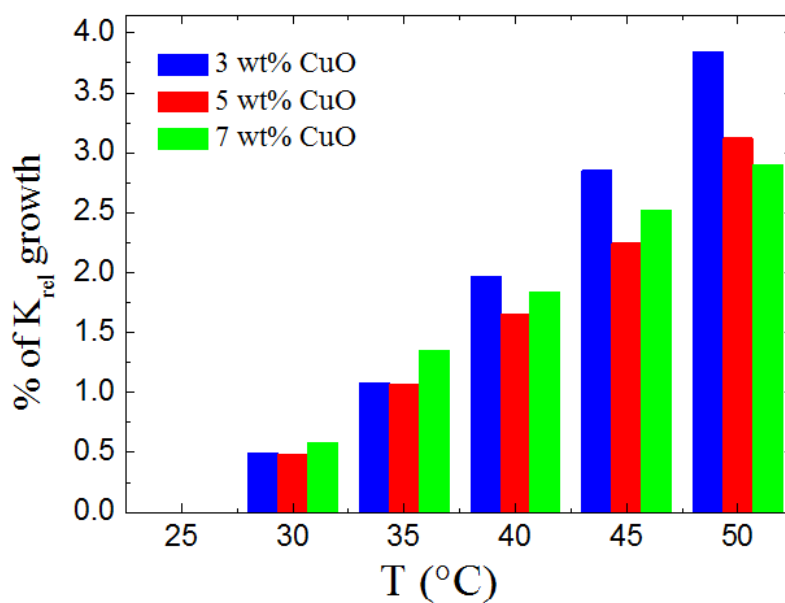
به منظور درک درست رفتار نانو سیال Fe₃O₄ / CuO در دماهای مختلف، هدایت گرمایی آن مورد مطالعه قرار گرفت. به طوری که غلظت‌های Fe₃O₄، CuO نیز به عنوان پارامترهای مورد مطالعه در نظر گرفته شد. در شکل (۴-۶) تاثیر افزایش دما از ۲۵ درجه سانتی‌گراد تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد روی

هدایت گرمایی نانو سیال $3\% \text{Fe}_3\text{O}_4 / \text{CuO}$ با غلظت‌های مختلف CuO (۳ و ۵ و ۷ درصد) نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود در هر سه حالت از غلظت‌های نانو ذرات CuO با یک فرم تقریباً خطی با افزایش دما، هدایت گرمایی افزایش می‌یابد. در شکل (۴-۷) آهنگ رشد هدایت گرمایی نسبی در نمونه $3\% \text{Fe}_3\text{O}_4$ ، با افزایش غلظت CuO نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود در هر سه مورد با افزایش دما هدایت گرمایی تقریباً تا ۳ درصد در دمای ۵۰ درجه رشد داشته است. و آهنگ رشد تقریباً در این حالت، با یکدیگر برابر است و تفاوت اندکی دارد. با افزایش غلظت Fe_3O_4 به ۵٪، شکل (۴-۸)، تقریباً نمودار به صورت خطی آهنگ رشد هدایت گرمایی نسبی حفظ می‌شود. با این تفاوت که در نمونه‌های با غلظت کمتری از CuO ، اثر گرما در افزایش هدایت گرمایی بیشتر از نمونه‌های دیگر خود را نشان می‌دهد. چنین رفتاری برای نمونه $7\% \text{Fe}_3\text{O}_4$ ، واضح‌تر در شکل (۴-۱۰) نشان داده شده است. به طوری که آهنگ رشد هدایت گرمایی در نمونه $3\% \text{CuO}$ فاصله چشمگیری با آهنگ رشد نمونه‌های دیگر دارد. هر چند بر طبق نمودار هدایت گرمایی نسبی بر حسب دما تغییرات هدایت گرمایی تقریباً غیرخطی است. (برای نمونه‌های $3\% \text{CuO}$ و $5\% \text{CuO}$).

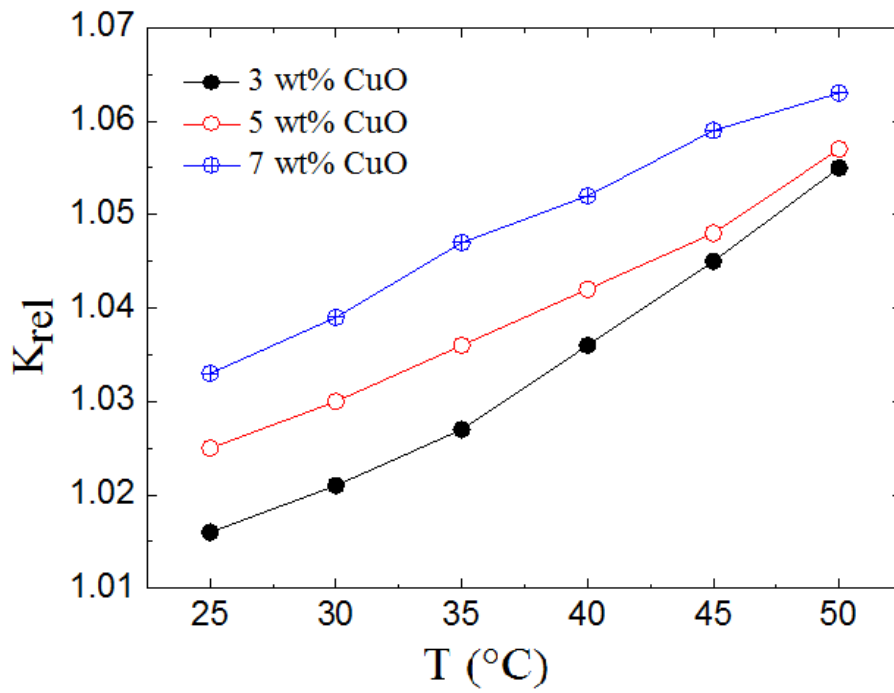
نحوه تغییرات هدایت گرمایی نسبی Fe_3O_4 در سه درصد وزنی مختلف (۳ و ۵ و ۷ درصد) CuO بر حسب دما در نمودارهای شکل (۴-۱۲) نشان داده شده است. همانطور که مشخص است با افزایش دما و نیز افزایش غلظت نانو ذرات Fe_3O_4 ضریب هدایت گرمایی نسبی بیشتر شده و با افزایش درصد CuO نمودارها به حالت خطی نزدیک می‌شوند.



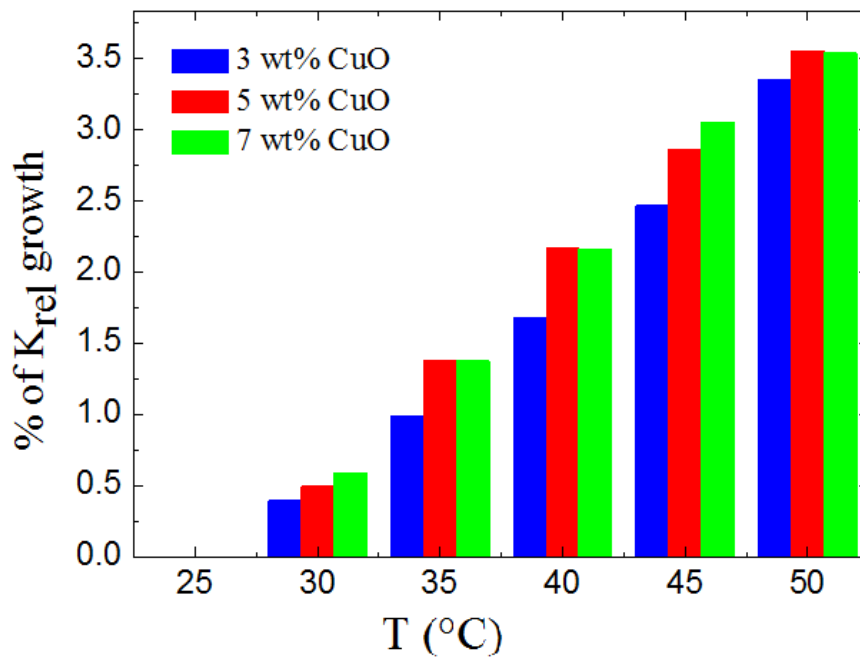
شکل ۴-۶ ضریب هدایت گرمایی نسبی بر حسب دما در 3wt% Fe_3O_4



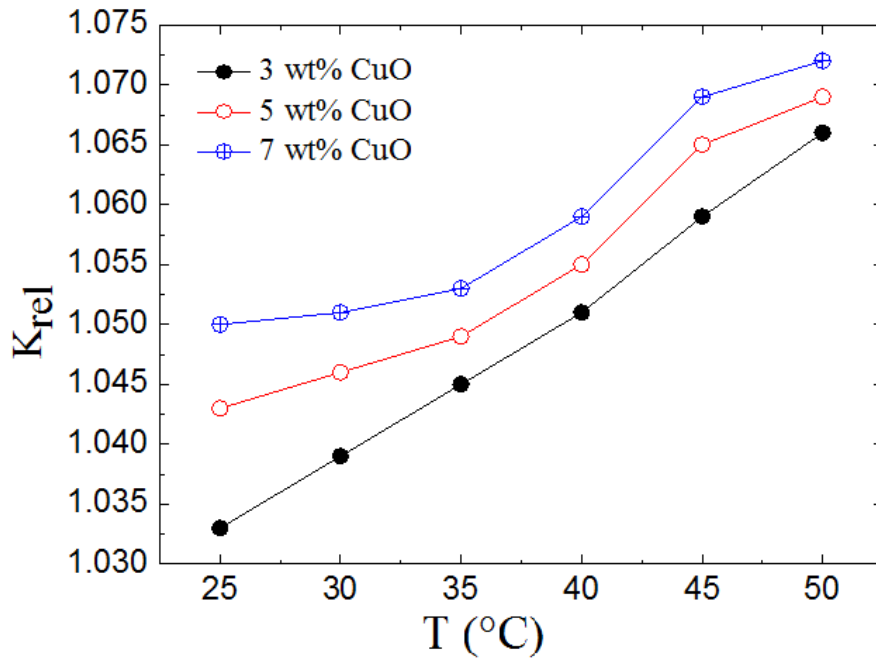
شکل ۴-۷ نمودار درصد رشد ضریب هدایت گرمایی نسبی بر حسب دما و 3wt% Fe_3O_4



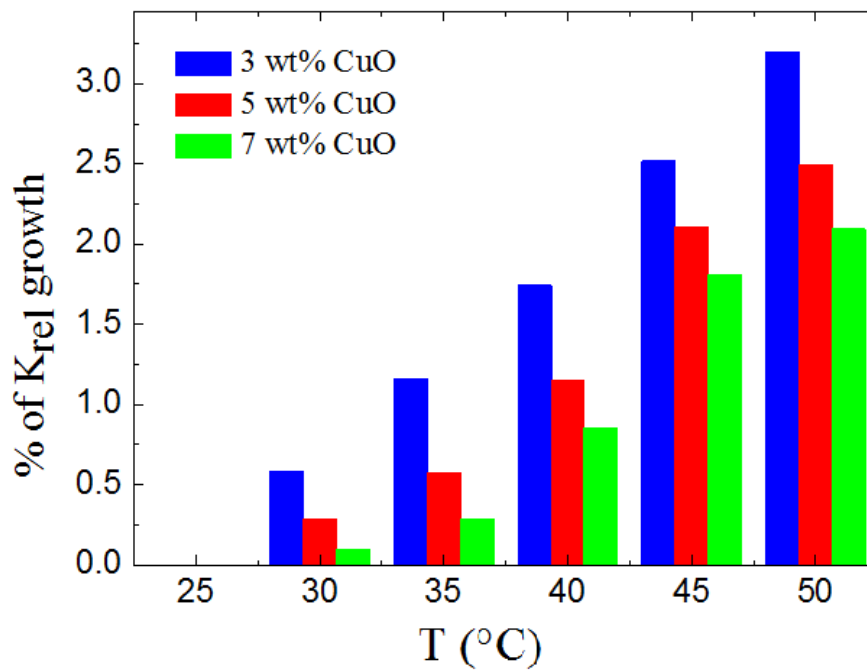
شکل ۴-۸ ضریب هدایت گرمایی نسبی بر حسب دما در 5wt% Fe_3O_4



شکل ۴-۹ نمودار درصد رشد ضریب هدایت گرمایی نسبی بر حسب دما و 5wt% Fe_3O_4

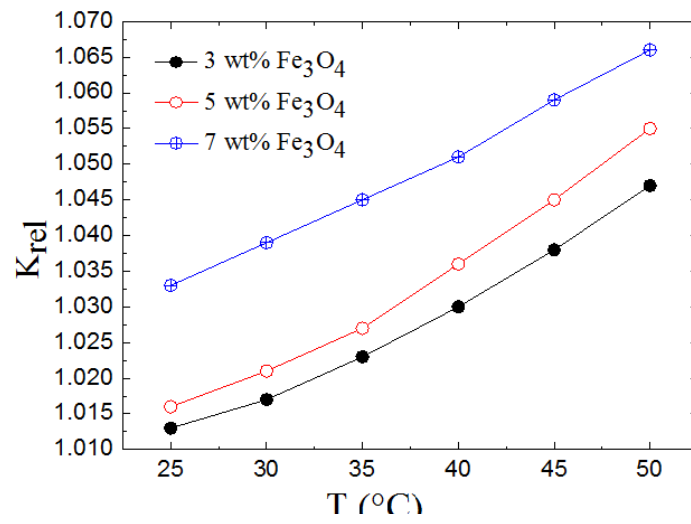


شکل ۴-۱۰ ضریب هدایت گرمایی نسبی بر حسب دما در 7wt% Fe_3O_4

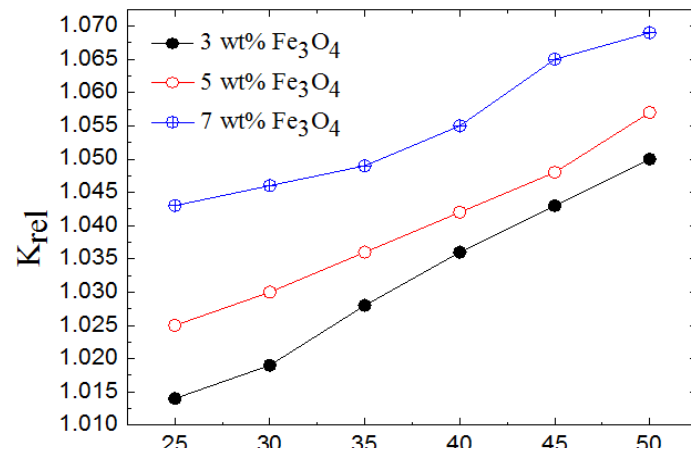


شکل ۴-۱۱ نمودار درصد رشد ضریب هدایت گرمایی نسبی بر حسب دما و 7wt% Fe_3O_4

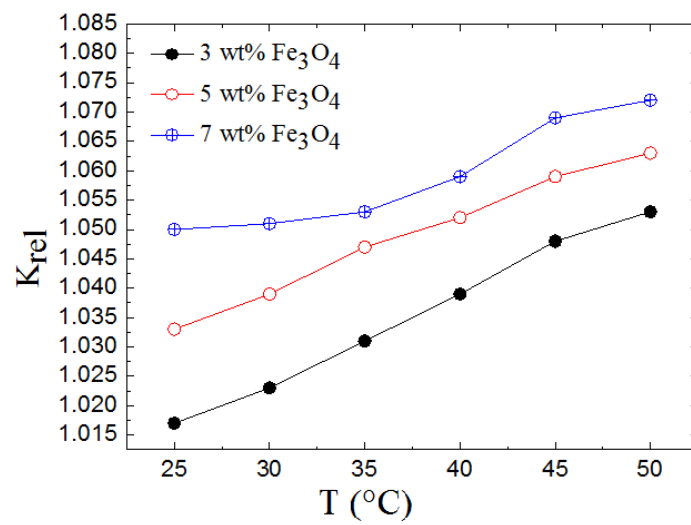
(a)



(b)



(c)



شکل ۴-۱۲ نمودار ضریب هدایت گرمایی نسبی Fe_3O_4 بر حسب دما در

7wt% CuO (c) .5wt% CuO (b) .3wt% CuO(a)

۲-۴ محاسبه میزان خطا در نمودارهای درصد رشد

روش سیم داغ بر پایه مدل فوریه از هدایت گرمایی توسعه یافته است که یک روش دقیق برای اندازه-گیری هدایت گرمایی گستره وسیعی از مواد و همچنین نانو سیالات است. با فرض داشتن یک سیال پایه کلئیدی، به روش سیم داغ یک روش استاندارد جهت بررسی هدایت گرمایی سیال به حساب می‌آید. برای اندازه‌گیری بر اساس قانون فوریه داریم:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha_f} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (۲-۴)$$

که T و α_f به ترتیب دما و ضرایب سنجش سیال هستند.

شرایط مرزی و مقادیر اولیه جهت آنالیز داده‌ها به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{cases} t = 0, r = 0 \rightarrow \lim \left\{ r \left[\frac{\partial T}{\partial r} \right] \right\} = -\frac{q}{2\pi k_f} \\ t \geq 0, r = \infty \rightarrow \lim \{ \Delta T(r, t) \} = 0 \end{cases} \quad (۳-۴)$$

که q آهنگ تولید گرما در واحد طول سیم است. تغییرات در فواصل مختلف از سیم به صورت:

$$T(r, t) - T_0 = \frac{q}{4\pi k_f} \ln \frac{4\alpha_f}{r^2} e^{-\gamma} + \frac{q}{4\pi k_f} \ln(t) \quad (۴-۴)$$

است. که γ ثابت اویلر است. برای بدست آوردن هدایت گرمایی می‌توانیم رابطه بالا را به صورت:

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi k_f} \ln \left[\frac{t_2}{t_1} \right] \quad (۵-۴)$$

استفاده نماییم. که t_2 مدت زمان لازم جهت گرم کردن سیستم و t_1 مساوی $\frac{a^2 C}{4k}$ است. و k_f هدایت

گرمایی نانو سیال است. ضریب C برابر (e^γ) است و مساوی ۱.۷۸ است.

$$k_f = \frac{I^3}{4\pi l} \frac{dR_w}{dT} \frac{R_w S}{R_w + S} \left(\frac{d\Delta V}{d \ln t} \right)^{-1} \quad (۶-۴)$$

که r شعاع، S مقاومت داخلی پل و تستون، l طول سیم و $\frac{dR_w}{dT}$ ضریب دمایی مقاومت سیم است. ΔV و

I ولتاژ و جریان درون سیم است. خطای پردازش داده‌ها جهت محاسبه هدایت گرمایی از رابطه زیر

بدست آورد:

$$\frac{dk_f}{k_f} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta\left(\frac{dR_w}{dT}\right)}{\frac{dR_w}{dT}} + \frac{\Delta s}{s} + \frac{\Delta R_w}{R_w} + \frac{\Delta(R_w+s)}{R_w+s} + \quad (7-4)$$

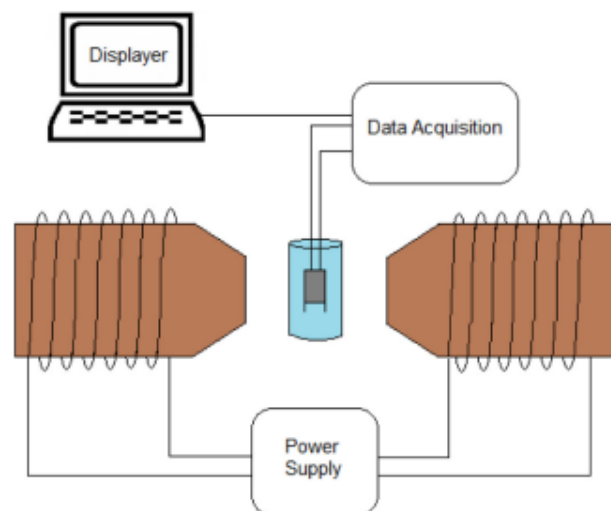
$$\frac{3\Delta I}{I} + \frac{\delta\left(\frac{d\Delta V}{d Lnt}\right)}{\frac{d\Delta V}{d Lnt}}$$

به طوری که خطای مربوط به کار انجام شده برای $\frac{\Delta l}{l}$ در حدود ۰٫۰۳٪ و برای $\frac{dR_w}{dT}$ در حدود ۰٫۰۹٪ اندازه گیری شد. دقت $d\Delta V$ در حدود ۰٫۲۱٪ اندازه گیری گردید بازه دقت اندازه گیری سایر ضرایب بین ۰٫۳ تا ۰٫۵ تعیین گردید. در نتیجه اعمال خطاهای فوق دقت اندازه گیری ضریب هدایت گرمایی در حدود ۰٫۹٪ تعیین می شود که از لحاظ فنی تاثیر چشمگیری در رفتار کلی نمودارهای اندازه گیری شده نخواهد داشت.

۳-۴ بررسی ضریب هدایت گرمایی نانو سیال Fe_3O_4 خالص و Fe_3O_4/CuO بر پایه آب با

درصدهای وزنی مختلف، با حضور میدان مغناطیسی

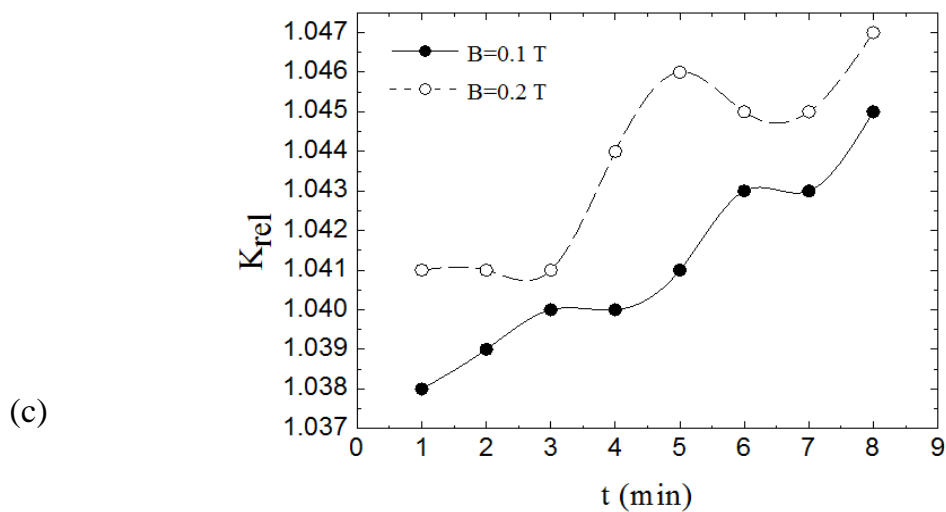
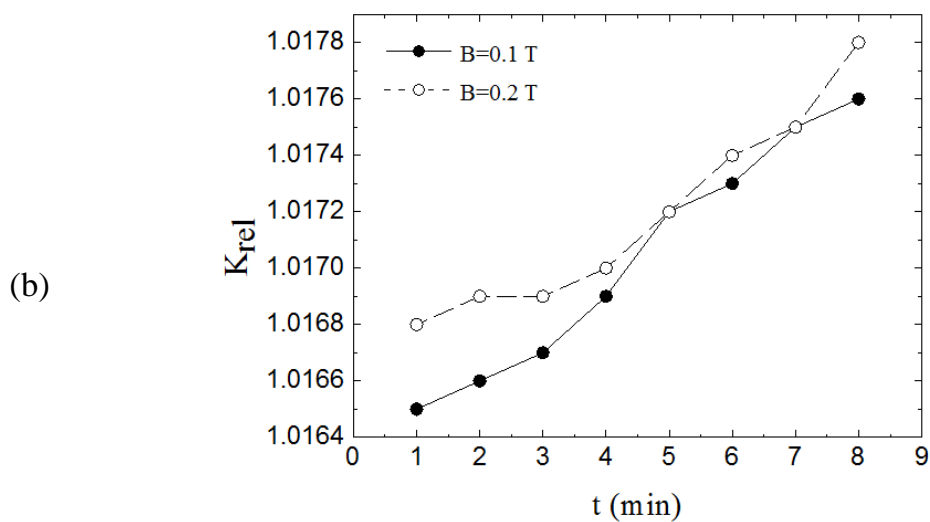
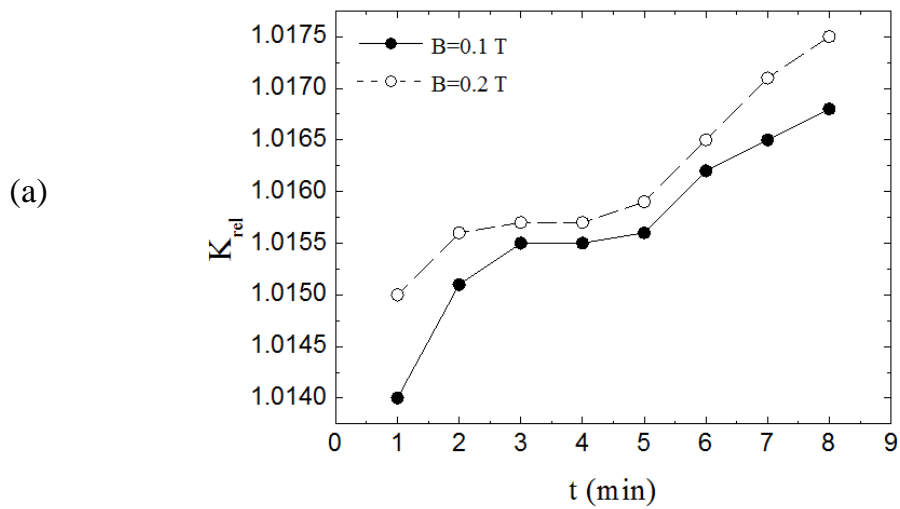
میدان مغناطیسی توسط یک مگنت DC، تا ۰٫۲ تسلا ایجاد شد و ظرف حاوی نانو سیال در یک فاصله مشخصی از الکترو مگنتها قرار داده شده است. میدان مغناطیسی اعمال شده عمود بر تجهیزات سیم داغ که در اندازه گیری هدایت گرمایی مورد استفاده قرار گرفت، اعمال شد. الکترومگنت به یک منبع تغذیه DC جهت ایجاد یک جریان پایدار وصل گردید و شیشه حاوی نانوسیال در یک فاصله ۵ سانتی متری در جلوی هسته قرار داده شد. در شکل (۴-۱۳) تصویر شماتیک سامانه مورد استفاده نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۳ الگوی بکار رفته در مطالعه اثر میدان مغناطیسی بر رفتار نانوسیلات $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CuO}$

به منظور درک صحیح نانو ذرات مغناطیسی، نانو سیال مورد مطالعه $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CuO}$ ابتدا نانو سیال خالص Fe_3O_4 را در میدان مغناطیسی مورد مطالعه قرار می‌دهیم تا زمینه لازم برای مقایسه رفتار ایجاد شود. میدان مغناطیسی به کار گرفته شده روی نمونه‌های فرولوئید به مدت ۳۰ دقیقه اعمال شد و هدایت گرمایی در مدت ۹ دقیقه مورد ارزیابی قرار گرفت. مشاهده می‌شود که هدایت گرمایی برای نانو سیال Fe_3O_4 خالص با درصدهای وزنی مختلف مطابق شکل (۴-۱۴) (a-c) تغییر می‌کند که در آن شکل‌های a, b, c به ترتیب نمونه‌های نانو سیال Fe_3O_4 با غلظت‌های ۳ و ۵ و ۷ درصد را نمایش می‌دهند. همان‌طور که در شکل مشخص است میدان مغناطیسی سبب افزایش هدایت گرمایی نانو سیال Fe_3O_4 خالص می‌شود. به طوری که با افزایش شدت میدان مغناطیسی ضریب هدایت گرمایی به صورت کلی یک افزایش محسوس دارد. افزایش ضریب هدایت گرمایی در نمونه‌های Fe_3O_4 خالص هر چند با افزایش همراه است اما این افزایش با یک نرخ یکسان همراه نیست و دارای فراز و فرودهای متعددی است. افزایش هدایت گرمایی در نانو سیال، مورفولوژی و توزیع خوشه‌های زنجیره‌ای شکل نانو ذرات مغناطیسی ارتباط دارد در چنین نانو سیالاتی یک جاذبه موثر بین نانو ذرات فرومغناطیسی که وابسته به میدان مغناطیسی است و سبب بوجود آمدن زنجیره‌هایی از نانو ذرات می‌شود. در غیاب

میدان مغناطیسی انرژی گرمایی بیش از جاذبه مغناطیسی است. به صورتی که باعث حرکت مجزای نانو ذرات در غالب حرکت براونی می شود. هنگامی که میدان مغناطیسی اعمال می شود، میدان مغناطیسی بر انرژی گرمایی غلبه می یابد و جاذبه مغناطیسی زنجیره های دوتایی، سه تایی و یا کوتاه تر از ذرات مغناطیسی را در راستای میدان مغناطیسی ایجاد می کند چنین رفتاری پیش از این توسط فیلیپس [۹۲] توصیف شده است که به خوبی با نتایج بدست آمده در این کار در توافق است. وقتی که نانوسیال تحت تاثیر میدان مغناطیسی قرار می گیرد با افزایش مدت زمان اعمال شده، طول زنجیره های مغناطیسی بوجود آمده گسترش می یابد. و از این رو هدایت گرمایی دستخوش تغییر می شود. با افزایش شدت میدان مغناطیسی، در مدت زمان کوتاه تری زنجیره های نانوذرات ایجاد می شوند و از این رو ضریب هدایت گرمایی سریع تر افزایش می یابد.



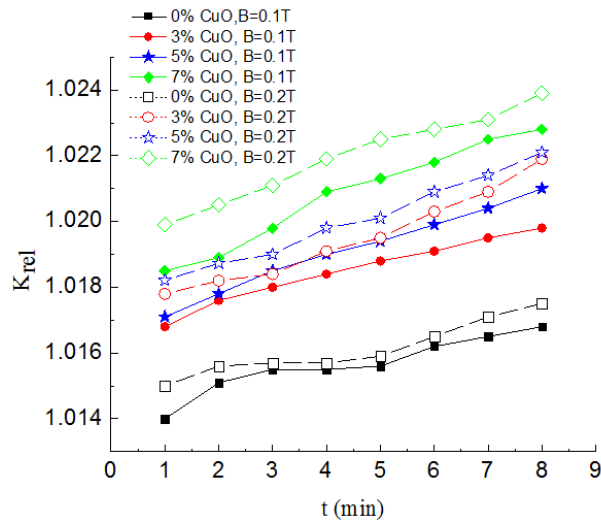
شکل ۴-۱۴ ضریب هدایت گرمایی نسبی ۳wt% (a) ۵wt% (b) ۷wt% (c) نانو سیال Fe₃O₄ خالص بر

حسب زمان در میدان‌های مغناطیسی متفاوت

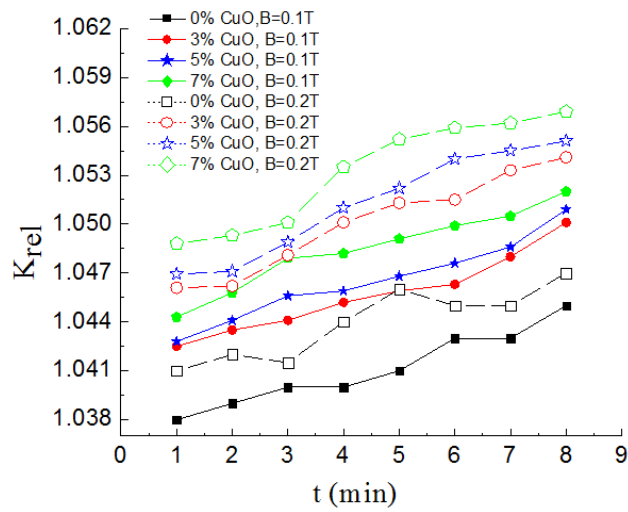
چنین دیدگاهی کاملاً در تطابق با نتایج بدست آمده است.

در اشکال (۴-۱۵) نانو سیال 3% Fe_3O_4 در حضور میدان مغناطیسی نشان داده شده است. همانطور که انتظار می‌رود غلظت نانوذرات یک پارامتر بسیار مهم در هدایت گرمایی نانو سیالات Fe_3O_4 است. با افزایش غلظت (درصد وزنی)، زنجیره‌های بیشتری در میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود. بنابراین هدایت گرمایی در میان این زنجیره‌ها افزایش می‌یابد. فراز و فرودهای بوجود آمده ناشی از تغییرات پیوسته، در سیمای زنجیره‌های نانو ذرات Fe_3O_4 محلول در آب است. همانطور که در شکل نشان داده شده است.

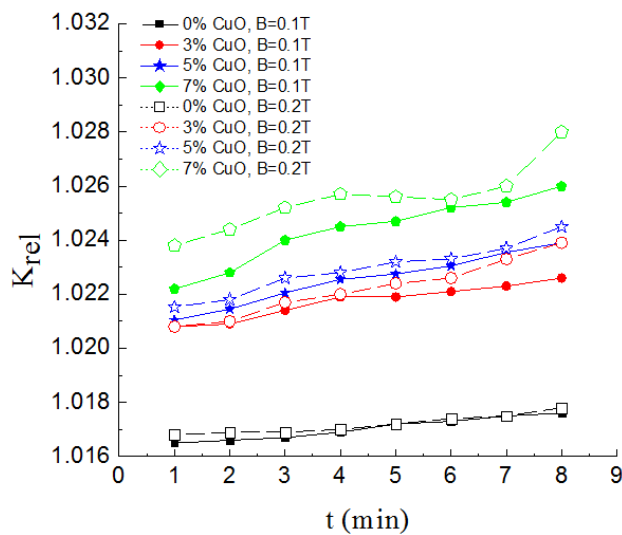
با توجه به اینکه اثر غلظت در انتقال حرارت یک امر تایید شده است به نحوی که با افزایش غلظت ضریب هدایت گرمایی تغییر می‌کند، جهت مطالعه نقش CuO ، در تغییر ضریب هدایت گرمایی نانو سیالات Fe_3O_4 با غلظت‌های مختلف به صورت مجزا با غلظت‌های مختلفی از نانو ذرات CuO ترکیب و در حضور میدان مغناطیسی ضریب هدایت مورد مطالعه قرار گرفت. در اشکال (۴-۱۶)، تغییرات ضریب هدایت گرمایی نانو سیال Fe_3O_4 ، تحت تاثیر میدان مغناطیسی با شدت‌های 0.1, 0.2 تسلا و در غلظت‌های مختلفی از $CuO(3,5,7\%)$ ، نشان داده شده است. برای مقایسه نمودار ضریب هدایت گرمایی نانو سیال Fe_3O_4 خالص در شکل گنجانده شده است. همانطور که در شکل مشخص است افزایش CuO به نانو سیال Fe_3O_4 ، باعث یک جهش در رشد ضریب هدایت گرمایی شده است.



(a)



(b)

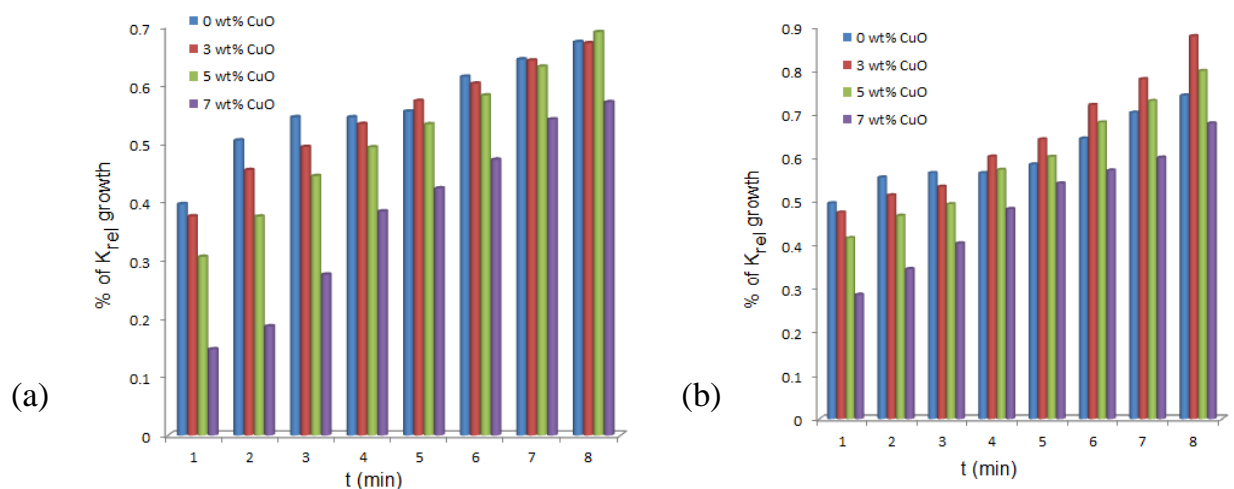


(c)

شکل ۴-۱۵ ضریب هدایت گرمایی نسبی ۳wt% (a) ۵wt% (b) ۷wt% (c) نانو سیال Fe_3O_4 بر حسب زمان

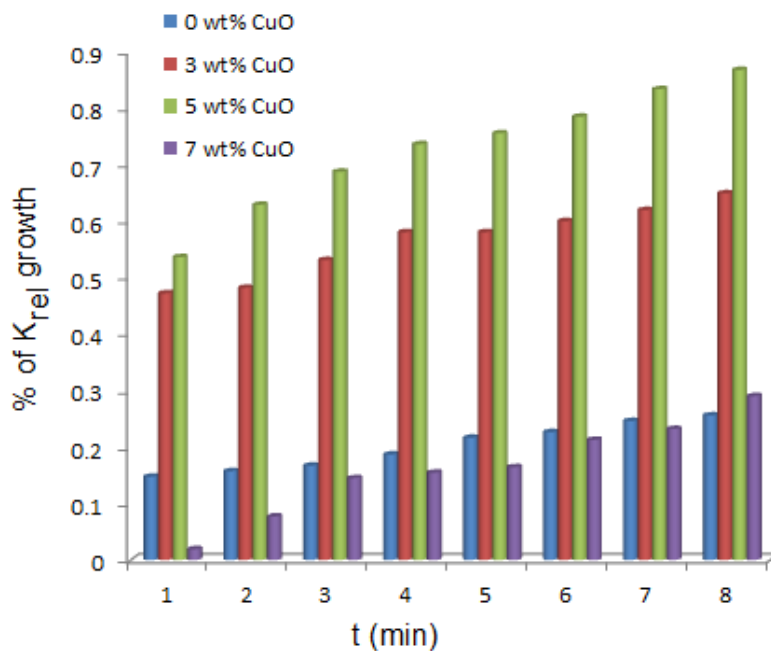
در درصد های وزنی مختلف CuO و میدان های مغناطیسی متفاوت

در شکل های (۴-۱۶) تا (۴-۱۸) نمودار درصد رشد، ضریب هدایت گرمایی نسبی، در زمان های مختلف برای غلظت های مختلف در حضور میدان مغناطیسی با شدت های مختلف ترسیم شده است. با توجه به شکل، آهنگ تغییرات ضریب هدایت گرمایی در میدان ۰٫۱ و ۰٫۲ تسلا تفاوت چشمگیری با یکدیگر دارند. به طوری که برای نمونه های با غلظت های مختلف CuO در میدان ۰٫۱ تسلا بر حسب زمان، تغییرات رو به افزایش است. و به طور کلی نمونه با غلظت 7% CuO، در میدان مغناطیسی ضریب هدایت آن شیب کمتری دارد. چیزی که در نمونه 7% Fe₃O₄ نانوسیالات با غلظت CuO 5%، کمترین آهنگ رشد در میدان مغناطیسی ۰٫۱ تسلا را دارند. ولی با افزایش میدان رفتار آن مشابه نمونه های پیشین می گردد.

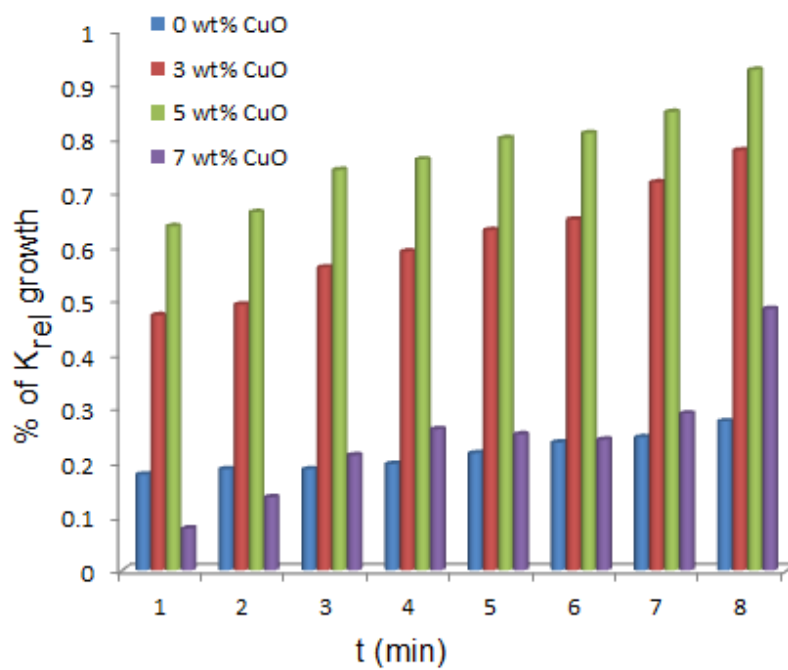


شکل ۴-۱۶ نمودار درصد رشد ضریب هدایت گرمایی نسبی 3wt%Fe₃O₄ بر حسب زمان در درصدهای وزنی مختلف CuO و میدان های مغناطیسی متفاوت.

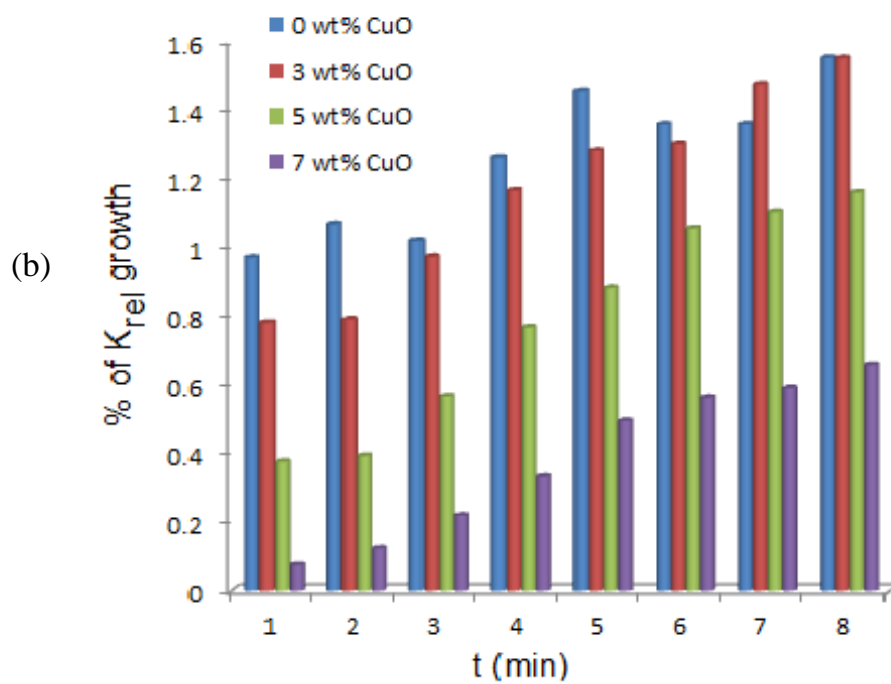
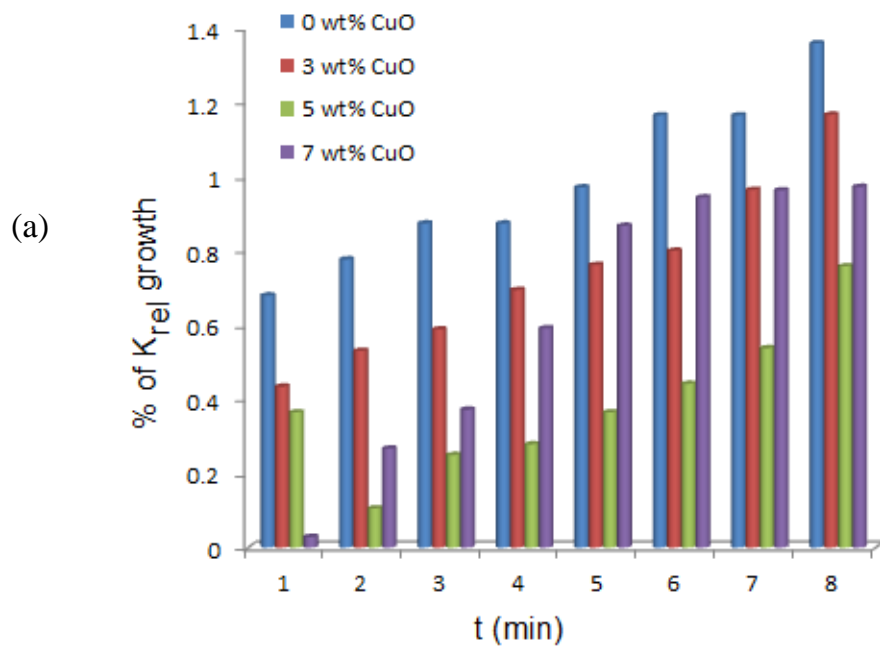
(a)



(b)



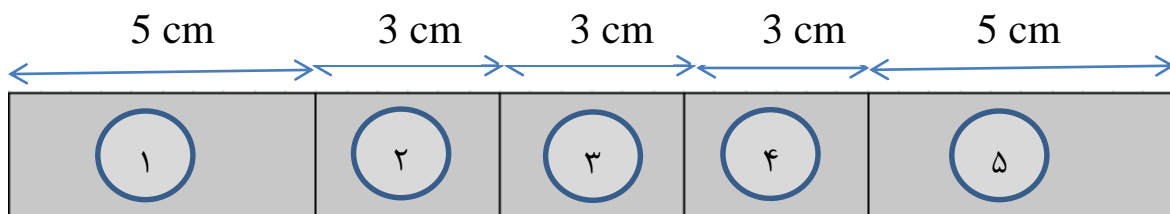
شکل ۴-۱۷ نمودار درصد رشد ضریب هدایت گرمایی نسبی $5\text{wt}\%\text{Fe}_3\text{O}_4$ بر حسب زمان در درصدهای وزنی مختلف CuO و میدان‌های مغناطیسی متفاوت.



شکل ۴-۱۸ نمودار درصد رشد ضریب هدایت گرمایی نسبی $7\text{wt}\% \text{Fe}_3\text{O}_4$ بر حسب زمان در درصدهای وزنی مختلف CuO و میدان‌های مغناطیسی متفاوت.

۴-۴ محاسبات عددی CFD جهت مطالعه خصوصیات جریان نانوسیالات Fe_3O_4/CuO

با توجه به تعیین خواص کلی هدایت گرمایی نانوسیالات Fe_3O_4/CuO شرایط لازم جهت مطالعه خصوصیات جریان و رفتار کلی این نانوسیالات در سازه‌های هیدرولیکی جهت هدایت گرما و انرژی گرمایی فراهم می‌گردد. از این رو در ادامه به مطالعه موردی یک نمونه می‌پردازیم که در آن با اعمال میدان مغناطیسی بر نانوسیال هدایت شده Fe_3O_4/CuO در یک کانال مستطیلی رفتار جریان با استفاده از تکنیک CFD^1 ارزیابی می‌گردد. یک کانال مستطیلی مستقیم به طول L (19 cm) و عرض H (2 cm)، به صورت شکل (۴-۱۹) در نظر گرفته شد.

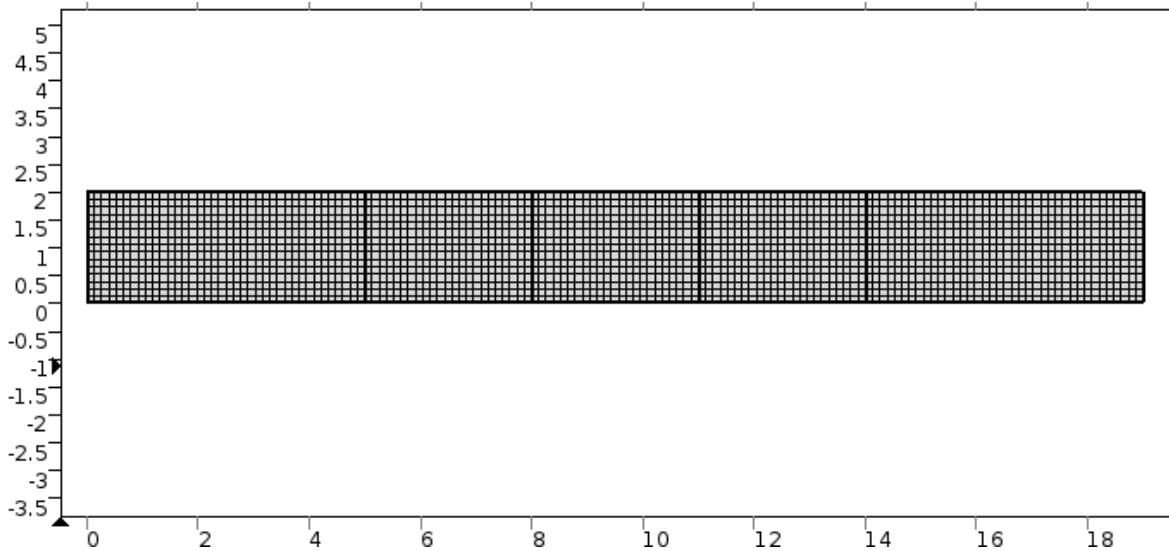


شکل ۴-۱۹ تصویر شماتیک ناحیه‌بندی شده کانال مورد بررسی

که میدان مغناطیسی به صورت عمودی در منطقه میانه آن اعمال می‌شود. با توجه به این که میدان کاملاً یکنواخت نیست جهت مدل‌سازی دقیق‌تر تغییرات میدان در ناحیه مرکزی با تقسیم‌بندی به نواحی مختلف جهت تعیین شرایط مرزی مختلف صورت گرفت به طوری که میدان اعمالی در نواحی ۱ و ۵ صفر و در نواحی ۲ و ۴ متقارن و مساوی یکدیگر است. در ناحیه مرکزی (ناحیه ۳) شدت میدان متفاوت و برابر است با مقدار میانگین میدان تجربی اعمال شده در آزمایشگاه است. منبع گرمایی مطابق شکل (۴-۲۰) تعبیه گردید و رفتار نانو سیال و ویژگی‌های جریان مورد مطالعه قرار گرفت.

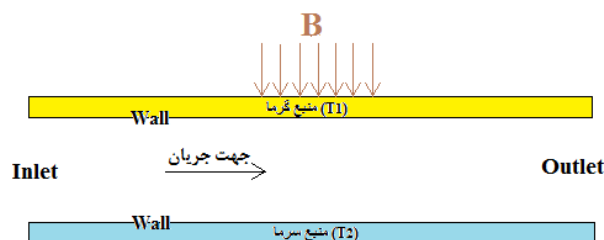
¹ Computational Fluid Dynamic

برای حل معادلات به روش المان محدود سیستم مورد ارزیابی با استفاده از تابع نرمال مش بندی مربعی گردید به طوری که ساختار مورد بحث به ۴۹۲۲ المان منطقه ای و ۵۶۶ المان مرزی تقسیم گردید.



شکل ۴-۲۰ تصویر مش بندی شده کانال مورد بررسی.

در این شبیه سازی از مدل تک فاز استفاده می گردد به گونه ای که خواص بدست آمده برای k مبتنی بر دیدگاه میدان میانگین به شرایط مرزی سیستم تحمیل می گردد. نانوسیال به صورت نیوتنی و غیر قابل تراکم و رژیم جریان به صورت آرام فرض شده است. همچنین فرض گردید که نانو ذرات مطابق نمونه تجربی کاملاً در سیال حل شده و سوسپانسیون یکنواختی را ایجاد کرده است. در روش تک فاز، فرض شده است که سیال پایه و نانو ذرات در تعادل گرمایی با یکدیگر قرار دارند.



شکل ۴-۲۱ تصویر شرایط مرزی از کانال مورد مطالعه.

شرایط مرزی برای کانال مورد بررسی به صورت زیر در نظر گرفته شد:

Inlet

$$X=0, 0 \leq Y \leq H \quad U=U_{in} \quad V=0$$

Outlet

$$X=L, 0 \leq Y \leq H \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

Top wall

$$0 \leq X \leq L, Y=H \quad U=V \quad T=T_1$$

Bottom wall

$$0 \leq X \leq L, Y=0 \quad U=V \quad T=T_2$$

که در آن T_1 و T_2 به ترتیب ۲۹۸ و ۳۲۳ درجه کلون و $U=0.01$ m/s است. در واقع چنین سازه‌ای می‌تواند گرما را بین منبع گرم و سرد از طریق یک میدان محرک گرمایی ناشی از گرادیان دما جابه‌جا کند که در این بین جریان نانوسیال به عنوان یک حامل انرژی می‌تواند نقش ایفا نماید. مطالعه موردی صورت گرفته برای کسر حجمی Fe_3O_4 (5%) و CuO (5%) صورت گرفته است به طوری که میدان مغناطیسی اعمال شده برابر ۰.۲ تسلا می‌باشد. وابستگی K به دما بر طبق نتایج تجربی و بصورت هم‌زمان در معادلات اعمال گردید.

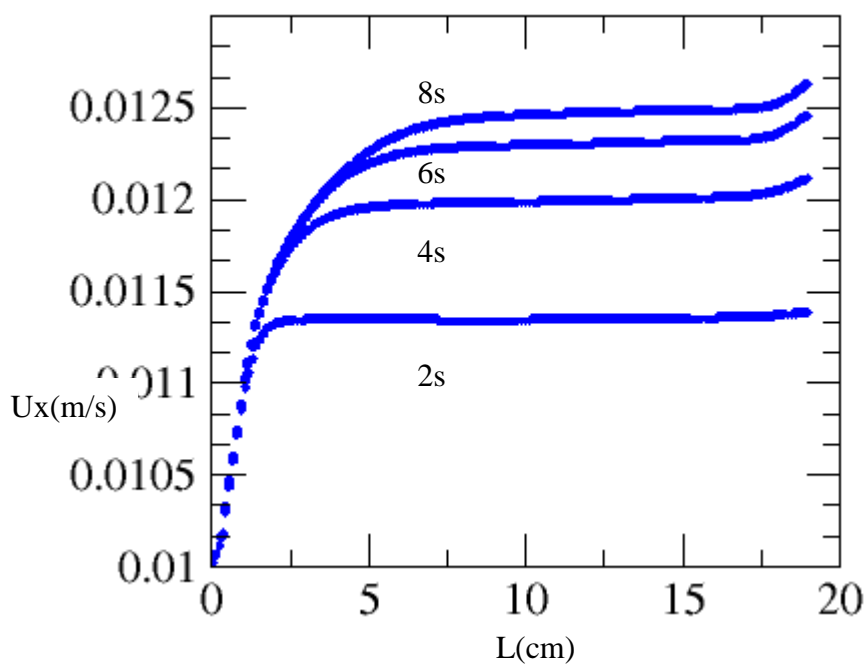
۴-۴-۱ مدل سازی عددی و نتایج

در این بخش رفتار هدایت گرمایی نانو سیلات $\text{Fe}_3\text{O}_4 / \text{CuO}$ را در حضور میدان مغناطیسی ۰.۲ تسلا در کانال مستطیلی ذکر شده مورد بررسی قرار می‌دهیم. فرض شده است که منبع گرمایی در بالا و پایین این کانال قرار دارند. کمیت‌های مورد مطالعه جهت بررسی و اعتبارسنجی عبارتند از گرادیان دما در امتداد محور X,Y و میدان سرعت U و همچنین عدد پکلت است. در واقع عدد Peclet برای جریان گرمایی به صورت:

$$Pe = \frac{\rho C_p v l}{k} \quad (۸-۴)$$

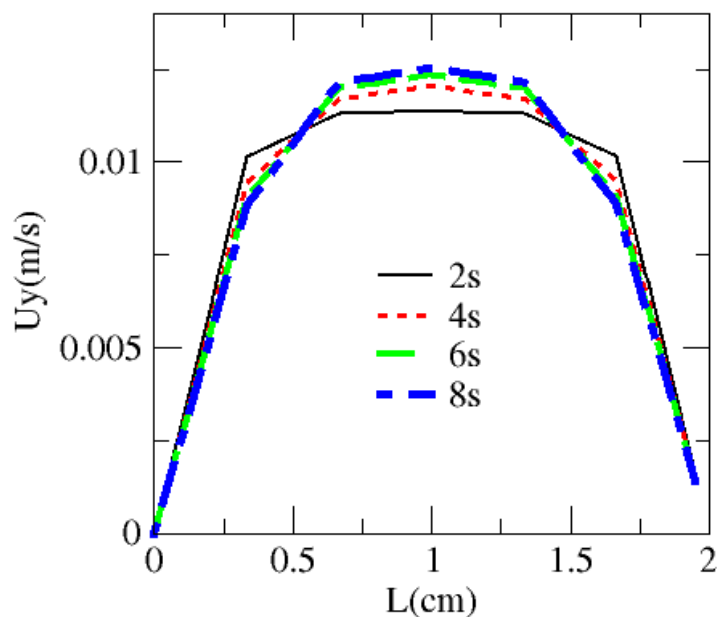
تعریف می‌شود، به صورتی که v سرعت مشخصه، ρ چگالی سیال، L طول مشخصه برای مساله مورد نظر، C_p گرمای ویژه در فشار ثابت و k ضریب هدایت گرمایی می‌باشند. در واقع عدد Peclet، به نسبت هدایت گرمایی از طریق همرفت به رسانش در یک سیال اشاره می‌کند اگر عدد Peclet کوچک باشد، رسانش اهمیت یافته و در چنین حالتی سهم اصلی در هدایت گرمایی از طریق رسانش صورت می‌گیرد.

در ابتدا میدان سرعت و خصوصیت جریان را در مدل مورد بررسی قرار می‌دهیم. در شکل (۴-۲۲)، نمودار توزیع سرعت نانوسیال را در امتداد محور X و در طول کانال در زمان‌های ۰.۲، ۰.۴، ۰.۶ و ۰.۸ ثانیه مشاهده می‌شود. همانطور که در شکل مشخص است با توجه به سرعت ورودی که معادل ۰.۰۱ متر بر ثانیه می‌باشد سرعت در امتداد کانال افزایش می‌باید و مقدار آن پس از گذشت ۰.۸ ثانیه سرعت جریان به مقدار ۰.۰۱۲۵ متر بر ثانیه همگرا می‌گردد.



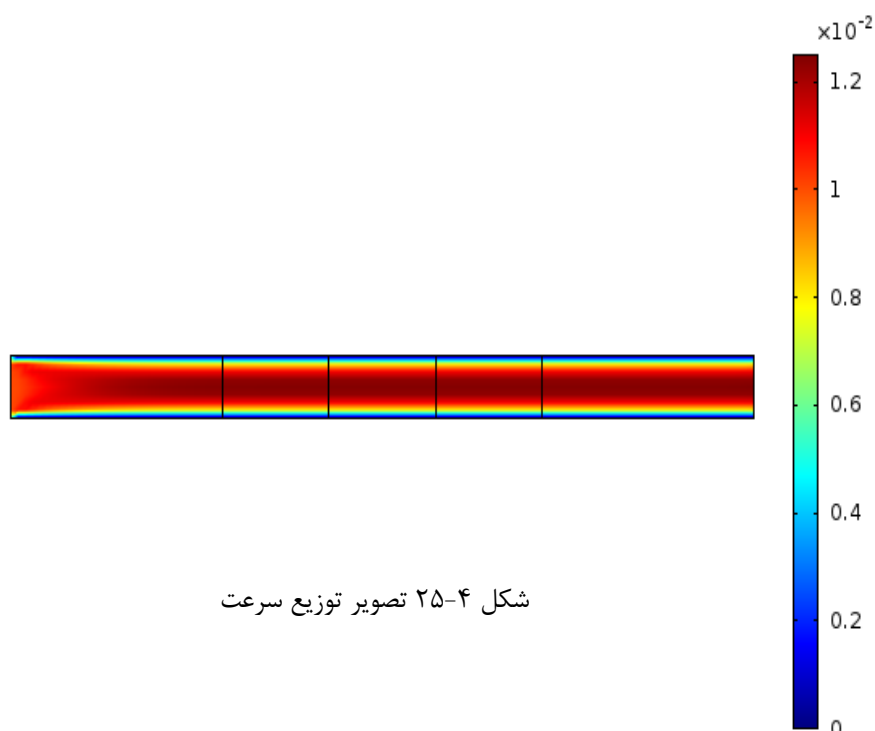
شکل ۲۲-۴ توزیع سرعت در راستای طولی.

به منظور درک صحیح رفتار جریان میدان جریان در امتداد عرضی و مطالعه تغییرات آن در ناحیه مرکزی که میدان اعمال می‌گردد می‌تواند مفید باشد. در شکل (۴-۲۳)، سرعت در عرض کانال و در ناحیه 3 ترسیم شده است.



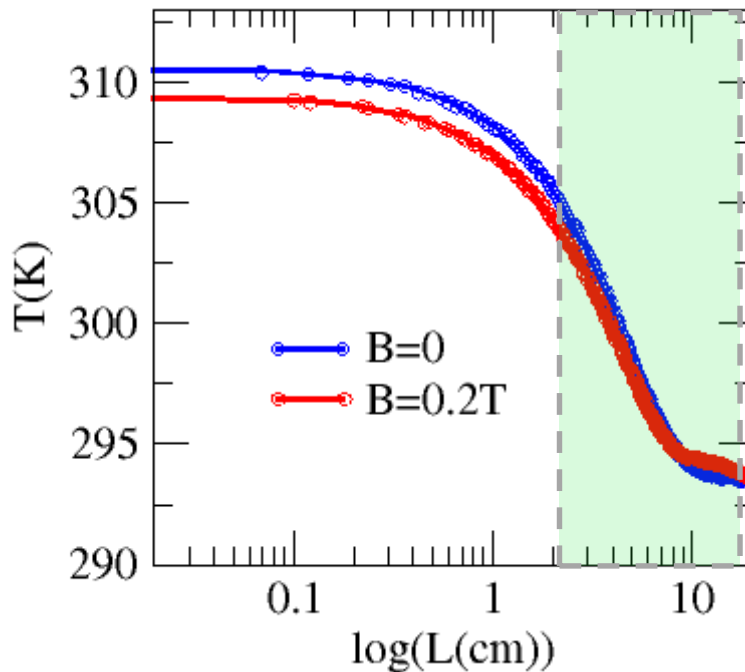
شکل ۲۳-۴ توزیع سرعت در راستای عرضی

مشخص می‌گردد که جریان در فاصله 0.5 از دیواره‌ها افت شدیدی دارد هر چند در نواحی مرکزی مقدار آن یکنواخت می‌گردد. در شکل (۴-۲۵) نمودار توزیع سرعت در کانال به صورت surface نمایش داده شده است. همانطور که در نمودار نشان داده شده است سرعت توزیع جریان در اطراف لبه‌ها بسیار کم‌تر از ناحیه میانی است.



شکل ۴-۲۵ تصویر توزیع سرعت

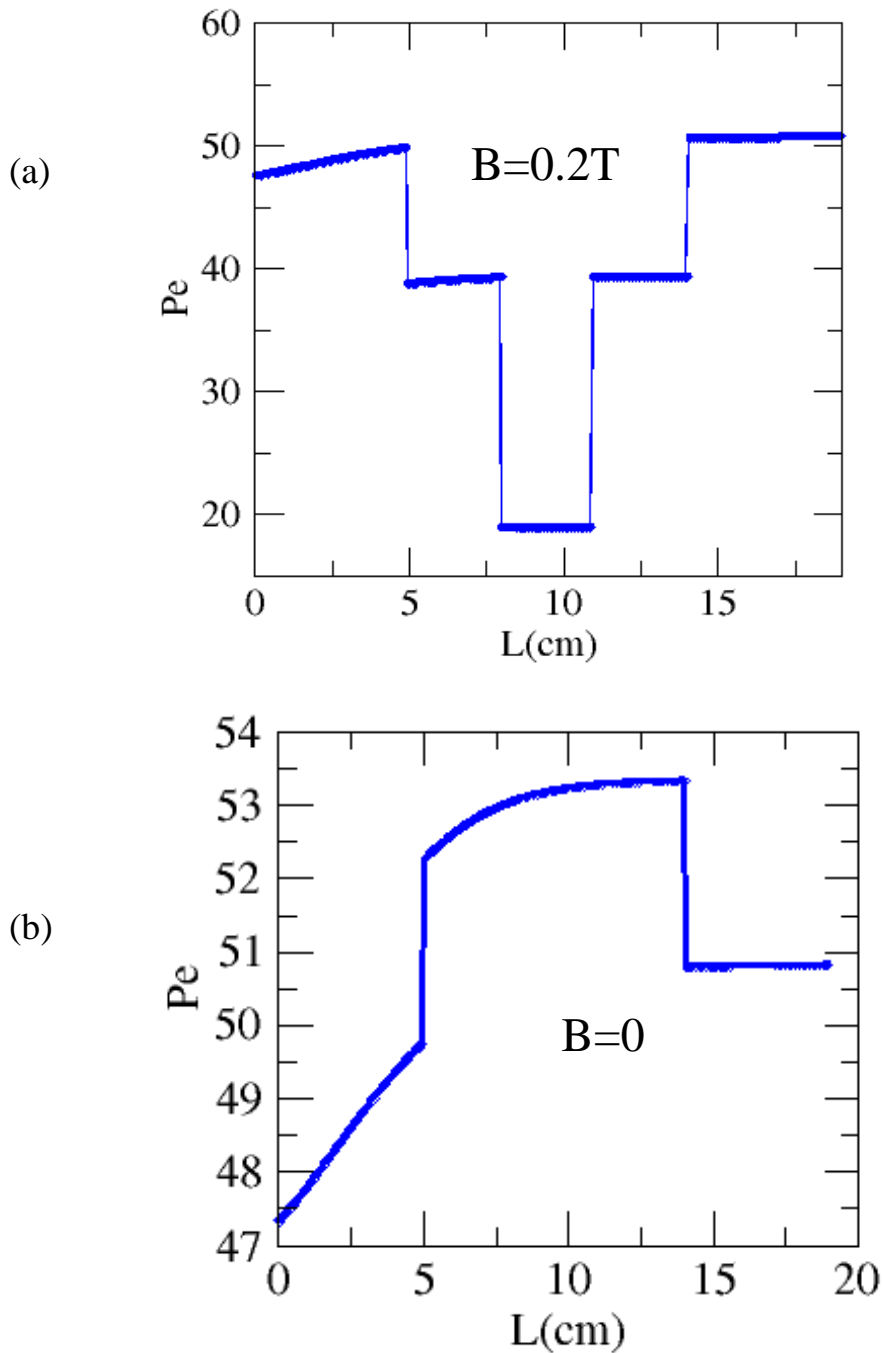
در ادامه به تاثیر میدان مغناطیسی بر رفتار و خصوصیات گرمایی سیستم مورد بحث می‌پردازیم. در ابتدا دمای سیستم بس از گذشت ۸ ثانیه را در حالت بدون حضور میدان و در حضور میدان در شکل (۴-۲۶) نشان داده‌ایم. همانطور که در شکل مشخص است در ناحیه هاشورخورده که محل اعمال میدان مغناطیسی است در حضور میدان شاهد افت سریع‌تر میدان مغناطیسی هستیم و این امر نشان می‌دهد که میدان مغناطیس سبب می‌گردد رفتار دما در نواحی ۱ و ۴ نیز تغییر نماید به طوری که در سیستم با حضور میدان دما در ناحیه ۱ کاهش و در ناحیه ۴ در مقایسه با سیستم بدون حضور میدان افزایش نسبی دارد.



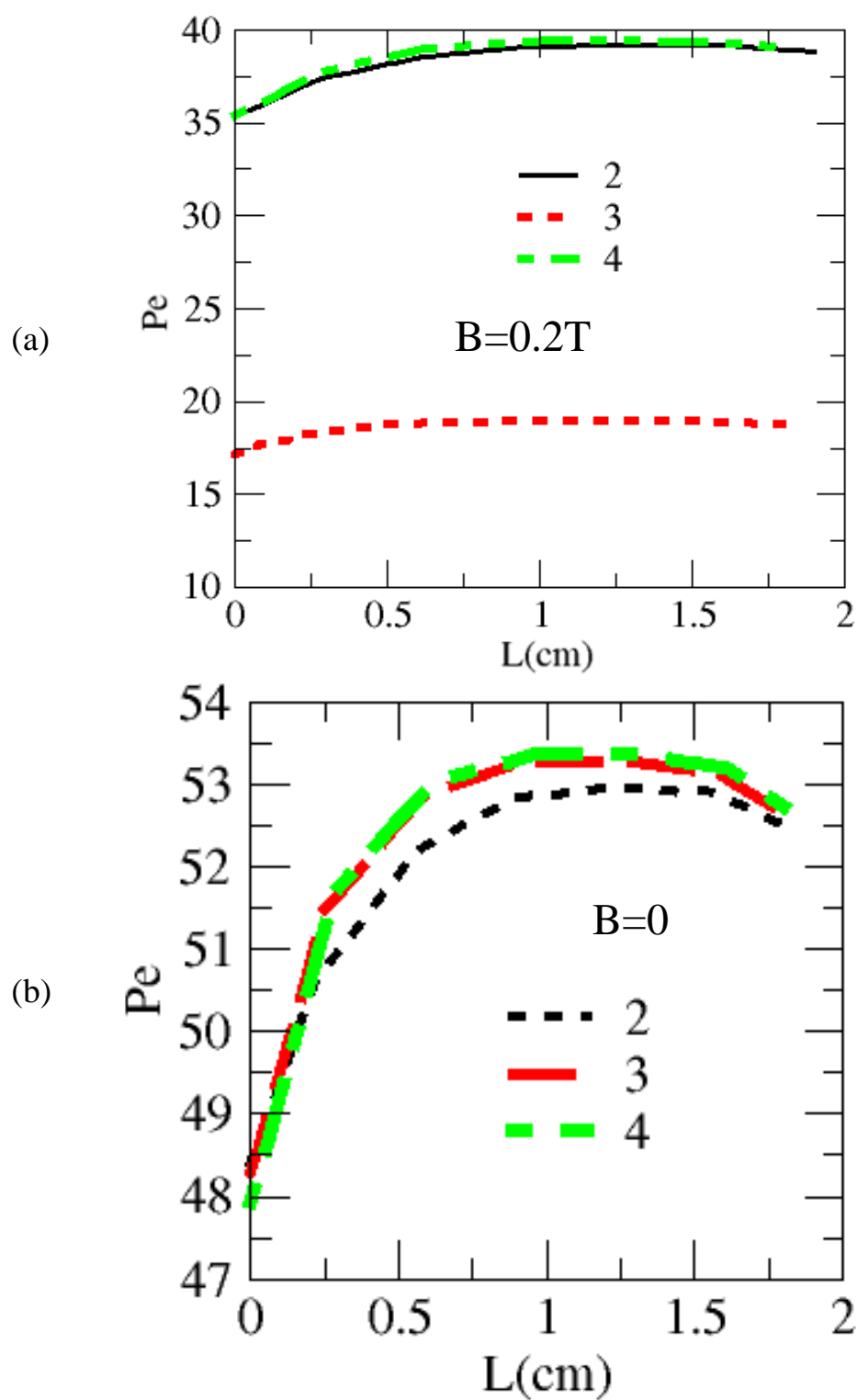
شکل ۴-۲۶ توزیع دما در راستای طولی.

یک موضوع مهم در بررسی نقش میدان مغناطیسی تاثیر آن بر رفتار رسانش گرمایی و نسبت آن به همرفت گرمایی است. همانطور که پیش از این اشاره شد عدد $peclet$ می‌تواند این مفهوم را مشخص نماید به طوری که در شرایطی که رسانش گرمایی غالب است عدد پکله کاهش و در شرایطی - که همرفت گرمایی غالب می‌گردد عدد پکله افزایش می‌یابد. در شکل (۴-۲۷) و (۴-۲۸)، نمودار پکله طولی و عرضی برای حالت‌های عدم و حضور میدان مغناطیسی نشان داده شده است. بطور کلی در نواحی ۲ تا ۴ اعمال میدان مغناطیسی سبب کاهش عدد پکله شده است که بیانگر رشد رسانش گرمایی نسبت به همرفت است چنانکه عدد پکله در ناحیه مرکزی نزدیک به ۶۰٪ کاهش یافته و این به معنی افزایش ۶۰٪ درصدی هدایت گرمایی از طریق رسانش است. به صورت مشابه عدد پکله برای تغییرات عرضی نیز در شکل (۴-۲۸) نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص شده است تغییر عدد پکله در نواحی ۲ تا ۴ در عدم حضور میدان تقریباً مشابه است و هر چه از منبع گرما بیشتر فاصله ایجاد می‌شود نقش رسانش گرمایی در انتقال حرارت کاهش می‌یابد. در حضور میدان عدد پکله

در عرض کانال و در ناحیه ۳ بیشتر متاثر از رسانش گرمایی است و از این رو می توان استنتاج کرد که میدان مغناطیسی سبب می گردد رسانش گرمایی تقویت گردد و نقش پررنگ تری در انتقال حرارت ایفا نماید.



شکل ۴-۲۷ توزیع عدد پکله در راستای طولی، (a) در حضور میدان و (b) بدون حضور میدان.



شکل ۴-۲۸ توزیع عدد پکله در راستای عرضی، (a) در حضور میدان و (b) بدون حضور میدان.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

این فصل به برخی از نتایج قابل توجه بدست آمده از تحقیق حاضر اختصاص دارد. در ابتدا به سیستمی از نانوسیال بکار گرفته شده می‌پردازیم که در آن نانوسیال مورد مطالعه تحت تاثیر تغییرات پارامترهای همچون غلظت، دمای سیال پایه مورد ارزیابی قرار گرفته است. یک مطالعه جامع تجربی روی هدایت گرمایی نسبی سیستم نانو سیال $Fe_3O_4:CuO$ بر پایه آب انجام گردید. اثر غلظت نانوذرات تشکیل دهنده اعم از Fe_3O_4 و CuO و همچنین دما رو تغییرات هدایت گرمایی نسبی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج زیر بدست آمد:

- زمانی که نانو سیال Fe_3O_4 مورد آزمایش قرار می‌گیرد، با افزایش غلظت نانو ذرات Fe_3O_4 از ۳ به ۷ درصد، هدایت گرمایی نسبی به اندازه ۲۱/۳۷٪ افزایش می‌یابد.
- در نانو سیال Fe_3O_4 محدوده درصد های وزنی ۳ تا ۷ درصد با افزایش دما، هدایت گرمایی نسبی افزایش می‌یابد به طوری که برای نمونه ۳٪ با تغییر دما از ۲۵ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد هدایت گرمایی نسبی به اندازه ۲۱/۲۷٪ افزایش یافته و برای نمونه های ۵٪ و ۷٪ نیز افزایش هدایت گرمایی نسبی با دما به ترتیب ۳/۳۵٪ و ۲/۹٪ می‌باشد.
- هدایت گرمایی نسبی نانو سیال Fe_3O_4 در حضور نانو ذرات CuO با غلظت‌های مختلف افزایش پیدا کرده است. و هر چه غلظت CuO بیشتر شده، هدایت گرمایی هم بیشتر شده است. در واقع یک رابطه مستقیم بین افزایش غلظت CuO و افزایش هدایت گرمایی وجود دارد.
- در غلظت‌های پایین Fe_3O_4 افزایش غلظت CuO تا ۷ درصد تاثیر ناچیزی داشته است و با افزایش غلظت Fe_3O_4 اثر نانو ذرات CuO در افزایش هدایت گرمایی بیشتر خود را نشان می‌دهد.
- در نانو سیال ۳٪ Fe_3O_4 ، هدایت گرمایی با تزریق نانو ذرات CuO تا هفت درصد، رشدی در حدود ۰/۷٪ را ایجاد می‌کند. در حالی که در نمونه‌های ۵ تا ۷ درصد تزریق نانو ذرات CuO می‌تواند تا ۲٪ باعث افزایش هدایت گرمایی نانو سیال شود.

- افزایش چشمگیر هدایت گرمایی در غلظت‌های بیش از ۳٪ CuO است.
 - تاثیر افزایش دما از ۲۵ درجه سانتی‌گراد تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد روی هدایت گرمایی نانو سیال Fe_3O_4 3%/CuO با غلظت‌های مختلف CuO (۳ و ۷ درصد) در هر سه حالت از غلظت‌های نانو ذرات CuO با یک فرم تقریباً خطی با افزایش دما، هدایت گرمایی افزایش می‌یابد. در هر سه مورد با افزایش دما هدایت گرمایی تقریباً تا ۳ درصد در دمای ۵۰ درجه رشد داشته است.
 - با افزایش غلظت Fe_3O_4 به ۵٪، تقریباً نمودار به صورت خطی آهنگ رشد هدایت گرمایی نسبی حفظ می‌شود. با این تفاوت که در نمونه‌های با غلظت کمتری از CuO، اثر گرما در افزایش هدایت گرمایی بیشتر از نمونه‌های دیگر خود را نشان می‌دهد.
- چنین رفتاری برای نمونه ۷٪ Fe_3O_4 ، واضح‌تر است. به طوری که آهنگ رشد هدایت گرمایی در نمونه 3% CuO فاصله چشمگیری با آهنگ رشد نمونه‌های دیگر دارد. هر چند بر طبق نمودار هدایت گرمایی نسبی بر حسب دما تغییرات هدایت گرمایی تقریباً غیرخطی است. (برای نمونه‌های 3% CuO و 5% CuO).

در ادامه نتایج حاصل از مطالعه بر روی هدایت گرمایی نانو سیال Fe_3O_4 /CuO بر پایه آب بر حسب پارامترهای مختلف دما و درصد وزنی بدون حضور میدان مغناطیسی و با حضور میدان مغناطیسی ۰/۱ و ۰/۲ تسلا را بطور خلاصه بیان می‌کنیم.

نانو سیال در آزمایشگاه و به روش هم‌رسوبی با درصدهای وزنی مختلفی از نانو ذرات Fe_3O_4 و CuO تهیه گردید. هدایت گرمایی با استفاده از روش سیم داغ مورد اندازه‌گیری واقع شد. در غیاب میدان مغناطیسی هدایت گرمایی نسبی بر حسب درصدهای وزنی مختلف نانو سیال Fe_3O_4 با کارهای انجام شده پیشین مقایسه گردید. همچنین هدایت گرمایی نسبی بر حسب

تغییرات دما بین ۲۵ تا ۵۰ درجه سانتی گراد بر حسب درصد های وزنی مختلف Fe_3O_4 اندازه-گیری و مقایسه شد. همچنین ضریب هدایت گرمایی نسبی در حضور نانو ذرات CuO با غلظت-های مختلف و درصدهای وزنی مختلف Fe_3O_4 اندازه گیری شد. بعد از اعمال میدان مغناطیسی ضریب هدایت گرمایی نسبی در حضور میدان های ۰/۱ و ۰/۲ تسلا با درصدهای وزنی مختلف نانو ذرات CuO اندازه گیری شد. خلاصه نتایج به شرح زیر است:

- با افزایش غلظت نانو ذرات Fe_3O_4 ، از ۳ به ۷ درصد، هدایت گرمایی به اندازه ۲/۳۷٪ افزایش می یابد.
- میدان مغناطیسی سبب افزایش هدایت گرمایی نانو سیال Fe_3O_4 خالص می شود. به طوری که با افزایش شدت میدان مغناطیسی ضریب هدایت گرمایی به صورت کلی یک افزایش محسوس دارد.
- به علت جاذبه مغناطیسی نانوذرات، زنجیره هایی از نانوذرات ایجاد می شود که در میدان مغناطیسی طول آنها افزایش یافته و سبب افزایش ضریب هدایت گرمایی نانوسیال می گردد.
- افزایش CuO به نانو سیال 3 wt% Fe_3O_4 ، باعث یک جهش در رشد ضریب هدایت گرمایی می شود.

بطور کلی خصوصیات هدایت گرمایی نانو سیال Fe_3O_4 / CuO بر پایه آب بر حسب پارامتر های مختلف دما و درصد وزنی در حضور میدان مغناطیسی مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج تجربی نشان می دهد که میدان مغناطیسی می تواند ضریب هدایت گرمایی نانو سیال Fe_3O_4 / CuO را افزایش دهد، که این افزایش به خاطر نظم مغناطیسی موجود در سیستم و تشکیل زنجیره هایی از نانو ذرات محلول در آب است.

نتایج مدل‌سازی عددی جهت بررسی ابعاد کاربردی این نانو سیال نیز حاوی نتایج قابل توجهی است. نتایج تجربی تاکید می‌کنند که میدان مغناطیسی می‌تواند ضریب هدایت گرمایی را به شدت تحت تاثیر قرار دهد به طوری که هدایت گرما از طریق رسانش و یا همرفت در حضور میدان دستخوش تغییر می‌گردد. یک شاخص مهم جهت ارزیابی اثر میدان مغناطیسی بر هدایت گرمایی عدد پکله است که در واقع نسبت هدایت گرمایی از طریق همرفت به رسانش است. نتایج محاسبات عددی نشان می‌دهد که عدد پکله در حضور میدان مغناطیسی 0.2 تسلا در حدود 60% کاهش می‌یابد که بیانگر رشد هدایت گرمایی از طریق رسانش در حضور میدان مغناطیسی است.

با توجه به جمع‌بندی صورت گرفته در بالا می‌توان پیشنهادات زیر را جهت توسعه کار ارائه کرد:

- مطالعه تجربی یک سازه هیدرولیکی حامل نانوسیال Fe_3O_4/CuO جهت بررسی انتقال حرارت و انرژی در حضور و یا عدم حضور میدان مغناطیسی.
- استفاده از مدل دوفازی جهت شبیه‌سازی ویژگی‌های جریان و هدایت گرمایی نانوسیالات Fe_3O_4/CuO
- بررسی نتایج تجربی بدست آمده با مدل‌های کلاسیک موجود و تخمین عملکرد مدل‌ها در مقیاس‌های مختلفی از کسر حجمی، دمای سیال پایه و ویسکوزیته نانوسیال.
- تولید نانوسیالات هوشمند دوگانه بر پایه Fe_3O_4 و تعیین خصوصیات آنها مانند Fe_3O_4/Al_2O_3
- شبیه‌سازی دینامیک مولکولی جهت بررسی دقیق برهمکنش‌های درون‌سیالی و اعمال برهمکنش‌های مغناطیسی جهت ایجاد یک الگوی جدید برای نانوسیالات مغناطیسی با توجه به فقدان این دیدگاه در مدل‌های موجود.
- مطالعه خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیالات Fe_3O_4/CuO بر حسب تغییرات دینامیک گرانشی و تعیین ضریب هدایت گرمایی به صورت تابعی از K/Z

فهرست منابع

- [1] Kim SH, Choi SR, Kim D. (2007) “Thermal conductivity of metal-oxide nanofluids: particle size dependence and effect of laser irradiation”. **Journal of Heat Transfer**, 1;129(3),pp298-307.
- [2] Krishnamurthy S, Bhattacharya P, Phelan PE, Prasher RS (2006) “ Enhanced mass transport in nanofluids. **Nano letters**, 8;6(3),pp419-23.
- [3] Wang XQ, Mujumdar AS. (2007) “Heat transfer characteristics of nanofluids: a review”. **International journal of thermal sciences**. Jan 31;46(1)pp1-9.
- [4] Chol SU. (1995), “Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles” ,**ASME-Publications-Fed**. 12;231,pp99-106.
- [5] Assael MJ, Metaxa IN, Arvanitidis J, Christofilos D, Lioutas C. (2005) “Thermal conductivity enhancement in aqueous suspensions of carbon multi-walled and double-walled nanotubes in the presence of two different dispersants”. **International Journal of Thermophysics**. 1;26(3)pp647-64.
- [6] Patel HE, Das SK, Sundararajan T, Nair AS, George B, Pradeep T. (2003), “Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle based nanofluid Manifestation of anomalous enhancement and chemical effects”. **Applied Physics Letters**. 6;83(14)pp2931-3.
- [7] Eastman JA, Choi SU, Li S, Yu W, Thompson LJ. (2001), “ Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles”. **Applied physics letters**. 5;78(6) ,pp718-20.
- [8] Xuan Y, Li Q. (2000), “Heat transfer enhancement of nanofluids”. **International Journal of heat and fluid flow**. 29;21(1), pp58-64.
- [10] Wang X, Xu X, S. Choi SU,(1999). “Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture”. **Journal of thermophysics and heat transfer**;13(4), pp474-80.
- [11] Pak BC, Cho YI. (1998), “Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles”. **Experimental Heat Transfer an International Journal**. 1;11(2), pp151-70.
- [13] Keblinski P, Phillpot SR, Choi SU, Eastman JA. (2002), “Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids)”. **International journal of heat and mass transfer**. 28;45(4), pp855-63.

- [14] Yu W, France DM, Routbort JL, Choi SU. (2008),” Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements”. **Heat Transfer Engineering**. 1;29(5),pp432-60.
- [15] Kakac S, Pramuanjaroenkij A. (2009), “Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids”. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 30;52(13),pp3187-96.
- [16] Godson L, Raja B, Lal DM, Wongwises S. (2010) “Enhancement of heat transfer using nanofluids—an overview” **Renewable and sustainable energy reviews**. 28;14(2),pp629-41.
- [17] Zhang, Y., L. Li, H.B. Ma and M. Yang, (2009). “Effect of nanoparticles on nonequilibrium heat conduction in a nanofluid layer with periodic heat flux, Numer” **Heat Transfer A Appl.**, 56(4),pp325- 341.
- [18] Lee S, Choi SS, Li SA, Eastman JA. (1999) ” Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles” **Journal of Heat transfer**. 1;121(2),pp280-9.
- [19] Xie H, Wang J, Xi T, Liu Y, Ai F. (2002) “ Dependence of the thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture on the base fluid” **Journal of Materials Science Letters**. 1;21(19),pp1469-71.
- [20] Xie H, Wang J, Xi T, Liu Y, Ai F, Wu Q. (2002) “Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles” **Journal of Applied Physics**. Apr 1;91(7),pp4568-72.
- [21] Das SK, Putra N, Thiesen P, Roetzel W. (2003) “Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids” **Journal of heat transfer**. 1;125(4),pp567-74.
- [22] Murshed SM, Leong KC, Yang C. (2005) “Enhanced thermal conductivity of TiO₂water based nanofluids”. **International Journal of thermal sciences**. 30;44(4), pp367-73.
- [23] Li Q, Xuan Y, Wang J, **Exp. Therm. Fluid Sci.** 30, 109 (2005). doi:10.1016/j.expthermflusci.2005. 03.021.
- [24] Parekh K, Lee HS. (2010) “Magnetic field induced enhancement in thermal conductivity of magnetite nanofluid”. **Journal of Applied Physics**. 1;107(9), pp09A310.

[25] Viota JL, González-Caballero F, Durán JD, Delgado AV. (2007) "Study of the colloidal stability of concentrated bimodal magnetic fluids". **Journal of colloid and interface science**. 1;309(1),pp135-9.

[26] Oztop HF, Abu-Nada E. (2008), "Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosures filled with nanofluids". **International Journal of Heat and Fluid Flow**. 31;29(5),pp1326-36.

[27] Blums E. (2002) "Heat and mass transfer phenomena". **Springer Berlin Heidelberg In Ferrofluids**, pp. 124-139

[28] Shuchi S, Sakatani K, Yamaguchi H. (2005) "An application of a binary mixture of magnetic fluid for heat transport devices". **Journal of magnetism and magnetic materials**. 31;289,pp257-9.

[29] Kikura H, Sawada T, Tanahashi T. (1993) "Natural convection of a magnetic fluid in a cubic enclosure" **Journal of magnetism and magnetic materials**. Apr 30;122(1), pp315-8.

[30] Yamaguchi H, Kobori I, Uehata Y, Shimada K. (1999) "Natural convection of magnetic fluid in a rectangular box". **Journal of Magnetism and Magnetic materials**. 31;201(1),pp264-7.

[31] Krakov MS, Nikiforov IV. (2002) "To the influence of uniform magnetic field on thermomagnetic convection in square cavity" **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**. 30;252, pp209-11.

[32] Yamaguchi H, Zhang Z, Shuchi S, Shimada K. (2002) "Heat transfer characteristics of magnetic fluid in a partitioned rectangular box" **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**. 30;252,pp203-5.

[۳۳] ملکی ثانیم، (۱۳۸۶) گنانو تکنولوژی نظامی، دانشگاه عالی دفاع ملی

[۳۴] چارلز پی پی، فرانک جی ا، (۱۳۸۷) مقدمه ای بر نانو فناوریگ، موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف

[۳۵] دوستی، م. (۱۳۸۶) "اصول نانو تکنولوژی سیستم های میکرو الکترو دینامیکی" دیباگران، تهران

[36] Choi S. U. S. (1995) "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, in developments and applications of non-Newtonian flows", **D. A. Signer**, 231 - 66,pp 99-105,.

[37] Maxwell J. C. I. (1873) ,**A treatise on electricity and magnetism**, Vol I, II, Oxford: Clarendon Press,.

[38] Padovani S., Sada C., Mazzoldi P., Brunetti B., Borgia I., Sgamellotti A., Giulivi A., D'Acapito F. and Battaglin G. (2003) “Copper in glazes of renaissance luster pottery: nanoparticles, ions, and local environment” **J. Appl. Phys.** 93(12), pp10058-10063,.

[39] Zhu H, Zhang C, Liu S, Tang Y, Yin Y. (2006) “Effects of nanoparticle clustering and alignment on thermal conductivities of Fe₃O₄ aqueous nanofluids”. **Applied Physics Letters**. 10;89(2),pp23123-.

[40] Liu,K.V., Choi, U.S.,Kasza,K. E., (1988) “ Measurements of pressure drop and heat transfer in turbulent pipe flows of particulate slurries”. **Argonne National Laboratory Report**, ANL-8815-,

[41] Phuoc T. X., Soong Y. and Chyu M. K., (2007) “Synthesis of Ag-deionized water nanofluids using multi-beam laser ablation in liquids”. **Lasers Eng.** 45, pp1099-1106,.

[42] Kwak K. and Kim C., (2005) “Viscosity and thermal conductivity of copper oxide nanofluid dispersed in ethylene glycol”, **Korea-Aust. Rheol. J.** 17 (2), pp35-40,.

[43] W. Yu, H. Xie, Xin. Wang and Xia. Wang, (2011) “Highly efficient method for preparing homogeneous and stable colloids containing graphene oxide”. **Nanoscale Res. Lett.** pp6, 47,.

[44] Zhu H. T., Zhang C. Y., Tang Y. M. and Wang J. X., (2007) “Novel synthesis and thermal conductivity of CuO nanofluid”. **J. Phys. Chem. C.** 111(4), pp1646-1650,.

[45] Y. Chen and X. Wang, (2008) “Novel phase-transfer preparation of monodisperse silver and gold nanoparticles at room temperature”. **Mater. Lett.** 62(15),pp 2215-2218,.

[46] Ahuja, A.S., (1975) “augmentation of heat transfer in laminar flow of polystyrene suspensions”. **J.Appl.Phys.**46,pp34083425,

- [47] Liu, K. V., Choi, U. S., Kasza, K. E., (1988) “Measurements of pressure drop and heat transfer in turbulent pipe flows of particulate slurries”. **Argonne National Laboratory Report**, ANL-8815-
- [48] Eastman, J. A., Choi, U. S., Li, S., Thompson, L. J., & Lee, S. (1996). “Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids”. **MRS Online Proceedings Library Archive**, 457.
- [49] Hamilton, R. L., & Crosser, O. K. (1962). “Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems”. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**, 1(3), PP 187-191.
- [50] Wasp, E. J., Kenny, J. P., & Gandhi, R. L. (1977). “Solid-liquid flow: slurry pipeline transportation”. **Pumps, valves, mechanical equipment, economics**. Ser, PP 1(4).
- [51] Wakeham, W. A., Nagashima, A., & Sengers, J. V. (1991). “Measurement of the transport properties of fluids “(Vol. 3). **Blackwell Science Inc**.
- [52] Masuda, H., Ebata, A., Teramae, K., Hishinuma, N., (1993) “Alternation of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles”. **Netsu Bussei(Japan)**, 4(4), 227-233.
- [53] Zhang X, Gu H, Fujii M. (2007) “Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles”. **Exp Therm Fluid Sci**; 31, pp593-9.
- [54] Lee J. H, Hwang KS, Jang SP, Lee BH, Kim JH, Choi SUS, et al. (2008) “Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al₂O₃ nanoparticles”. **Int J Heat Mass Transfer**; 51, pp2651-6.
- [55] Nemati H., Farhadi M., Sedighi K., Ashorynejad H.R., Fattahi E., (2012) “Magnetic field effects on natural convection flow of nanofluid in a rectangular cavity using the Lattice Boltzmann model”, **Scientia Iranica B** 19 (2), pp303-310,
- [56] Aihara T., Kim J., Okuyama K., (1993) “Controllability of convective heat transfer of magnetic fluid in a circular tube”, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, Vol. 122, pp. 297-300.
- [57] Choi S.U.S., (1998) “Nanofluid technology: current status and future research’, Second Korean-american scientists and engineers association research

tend study project review and Korea-US". **Technical conference on strategic technologies**, Vienna VA

[58] S. U. S. Choi ,(2012) "Two are better than one in nanofluids", **Argonne national laboratory**12.

[59] Ghadimi A., Saidur R., Metselaar H. S. C., (2011)" A review of nanofluid stability properties and charectrization in stat ionary conditions', **International Journal of Heat and Mass Transfer** 544051.

[60 Tu] W., Liu H., (2000) "Continuous sunthesis of colloidal metal nanoclusters by microwave irradiation", **chem.mater.** PP12564

[61] Pintiliel M., Oprica L., Sureleac M., Dragut C. Ivan, Creanga D. E., Artenie V., (2006)" Enzyme Activity in plants Treated with Magnetic liquid', **Rom. Journ. Phys.**, Vol. 51, pp 1-2, 239

[62] Mohn P., (1956) "Magnetism in solid state" springer series in solid state science

[63] Naseri M., (2004) " Crystallization in spinel ferrite nanoparticles",Kluwer Academic Publisher

[۶۴] رزنيک ر.، هالیدی د.، "فيزيک جلد سوم" ، مرکز نشر دانشگاهی، تهران، (۱۳۸۱)

[۶۵] Goldman A., (2006). " Modern Ferrites Technology' , Springer

[۶۶] Smith J., Wigin H.P.J., (1995) " Ferrites' , Philips technical libray

[67] Das SK, Choi SUS, Yu W, Pradeep T. Nanofluids. (2009)Wiley Interscience ed. Hoboken. New Jersey, USA: John Wiley&Sons, Inc.;

[68] Ozerinc S, Kakac S, Guvenc A, Yazıcıoglu Y. (2010) "Enhanced thermal conductivity of nanofluids: a state-of-the-art review". **Microfluid Nanofluid**;8,pp 145–70.

[69] Wen D, Lin G, Vafaei S, zhang K. (2008) "Review of nanofluids for heat transfer applications". **Particulorogy**;7pp141–50.

[70] Erb RM, Yellen BB. (2009) "Magnetic manipulation of colloidal particles. In: Liu JP, Fullerton E, Gutfleisch O, Sellmyer DJ, editors. Nanoscale Magnetic Materials and Applications. Dordrecht Heidelberg, London New York: Springer Science&Business Media;

- [71] Odenbach S. (2004) “Recent progress in magnetic fluid research”. **Journal of Physics**,16 pp1135–50.
- [72] Ganguly R, Sen S, Puri IK. (2004) “Thermomagnetic convection in a square enclosure using a line dipole”, **Physics of Fluids** 1;16(7), pp2228-36.
- [73] Wang CY, Hong JM, Chen G, Zhang Y, Gu N. (2010) “Facile method to synthesize oleic acid-capped magnetite nanoparticles”. **Chinese Chemical Letters**;21, pp179–82.
- [74] Zhang L, He R, Gu H-C. (2006) “Oleic acid coating on the monodisperse magnetite nanoparticles” . **Applied Surface Science**;253, pp2611–7.
- [75] Li D, Jiang D, Chen M, Xie J. (2010), “An easy fabrication of monodisperse oleic acidcoated Fe₃O₄ nanoparticles”. **Materials Letters**;64, pp2462–4.
- [76] Abarashi, Maryam, et al. (2010) “Fabrication, characterization and measurement of thermal conductivity of Fe₃O₄ nanofluids”. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 322.24, pp 3895-3901.
- [77] Charles, S. W. (2002). “The preparation of magnetic fluids. In FerrofluidsSpringer, **Berlin, Heidelberg**. ” pp. 3-18
- [78] Blums E. Heat and mass transfer phenomena. In: Odenbach S, editor. **Ferrofluids: Magnetically Controllable Fluids and Their Applications**. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag; 2002.
- [79] Odenbach, S. (Ed.). (2009).” Colloidal magnetic fluids: basics, development and application of ferrofluids” , **Springer.**, Vol. 763
- [80] Alexiou, C., Schmid, R., Jurgons, R., Bergemann, C., Arnold, W., & Parak, F. G. (2002). “Targeted tumor therapy with “magnetic drug targeting”: Therapeutic efficacy of ferrofluid bound mitoxantrone In Ferrofluids”. **Springer**, Berlin, Heidelberg. pp. 233-255
- [81] Trahms L. Biomedical applications of magnetic nanoparticles. In: Odenbach S, editor. (2009) **Colloidal Magnetic Fluids: Basics, Development and Application of Ferrofluids**. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag;.
- [82] Odenbach S. (2002) “Magnetoviscous effects in ferrofluids”. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlang;.

- [83] Philip J, Shima P, Raj B. (2008) “Evidence for enhanced thermal conduction through percolating structures in nanofluids”. **Nanotechnology**;19:305706.
- [84] Kolesnichenko VL. (2009) “Synthesis of nanoparticulate magnetic materials. In: Gubin SP, editor. Magnetic Nanoparticles. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA;.
- [85] Lo C-H, Tsung T-T, Chen L-C. (2005) “Ni nano-magnetic fluids prepared by Submerged Arc Nano Synthesis System (SANSS)”. *JSME International Journal*;48:750–5.
- [86] VEKA S L, Bica D, Avdeev MV. (2007) “Magnetic nanoparticles and concentrated magnetic nanofluids: synthesis, properties and some applications”. **China Particuology**;5:PP43–9.
- [87] Paul G, Chopkar M, Manna I, Das PK. (2010) “Techniques for measuring the thermal conductivity of nanofluids a review”. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**;14, pp1913–24.
- [88] Li Q, Xuan Y, Wang J. (2005) “Experimental investigations on transport properties of magnetic fluids”. **Experimental Thermal and Fluid Science**;30, pp109–16.
- [89] Gutierrez JR. (2007) “Analysis of thermal conductivity of ferrofluids”. Mayaguez: University of Puerto Rico;.
- [90] Djurek I, Znidarsic A, Kosac A, Djurek D. (2007) “Thermal conductivity measurements of the CoFe_2O_4 and $\text{g-Fe}_2\text{O}_3$ based nanoparticle ferrofluids”. **Croatia Chemica Acta**;80, pp529–32.
- [91] Nkurikiyimfura I, Wang Y, Pan Z, Hu D. (2011) “Thermal conductivity enhancement of magnetic nanofluid in magnetic field”. In: Proceedings of the international conference on materials for renewable energy & environment (ICMREE). Shanghai, China: IEEE, pp. 1333–7.
- [92] Philip J, Shima PD, Raj B. (2007) “Enhancement of thermal conductivity in magnetite based nanofluid due to chainlike structures”. **Applied Physics Letters**. 12;91(20), pp203108.
- [93] Yu W, Xie H, Chen L, Li Y. (2010) “Enhancement of thermal conductivity of kerosene-based Fe_3O_4 nanofluids prepared via phase-transfer method. Colloids and Surfaces A”: **Physicochemical and Engineering Aspects**;355, pp109–13.

- [94] Hong RY, Zhang SZ, Han YP, Li HZ, Ding J, Zheng Y. (2006) “Preparation, characterization and application of bilayer surfactant-stabilized ferrofluids”. **Powder Technology**;170, pp1–11.
- [95] Hong T-K, Yang H-S, Choi CJ. (2005) “Study of the enhanced thermal conductivity of Fe nanofluids”. **Journal of Applied Physics**;97, pp064311.
- [96] Holotescu S, Stoian FD, Marinica O, Kubicar L, Kopcansky P, Timko M. (2011) “Utilization of the magnetogrulometric analysis to estimate the thermal conductivity of magnetic fluids”. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**;323, pp1343–7.
- [97] Holotescu S, Stoian FD. (2009) “Evaluation of the effective thermal conductivity for composite polymers by considering the filler size distribution law”. **Journal of Zhejiang University of Science A**;10, pp704–9.
- [98] Krichler M, Odenbach S. (2013) “Thermal conductivity measurements on ferrofluids with special reference to measuring arrangement”. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**;326, pp85–90.
- [99] Wright B, Thomas D, Hong H, Groven L, Puszynski J, Duke E, et al. (2007) “Magnetic field enhanced thermal conductivity in heat transfer nanofluids containing Ni coated single wall carbon nanotubes”. **Applied Physics Letters**;91, pp173116–9.
- [100] Wensel J, Wright B, Thomas D, Douglas W, Mannhalter B, Cross W, et al. (2008) “Enhanced thermal conductivity by aggregation in heat transfer nanofluids containing metal oxide nanoparticles and carbon nanotubes”. **Applied Physics Letters**;92, pp023110–3.
- [101] Nsofor EC. (2008) Recent patents on nanofluids (nanoparticles in liquids) heat transfer, 1. **Bentham Science Publishers Ltd.**; [p. 190–7].
- [102] Eapen J, Rusconi R, Piazza R, Yip S. (2010) “The classical nature of thermal conduction in nanofluids”. **Journal of Heat Transfer—Transactions of AMSE**;132,pp102402.
- [103] Ding Y, Chen H, wang L, Yang C-y, He Y, Yang W, et al. (2007) “Heat transfer intensification using nanofluids”. **Kona**;25, pp23–37.
- [104] Philip J, Shima PD, Raj B. (2008) “Nanofluid with tunable thermal properties”. **Applied Physics Letters**;92, pp2838307–10.

[105] Tsai T-H, Kuo L-S, Chen P-H, Yang C-T. (2008) “Effect of viscosity of base fluid on thermal conductivity of nanofluids”. **Applied Physics Letters**;93, pp 233121.

[106] Tsai T-H, Kuo L-S, Chen P-H, Yang C-T. (2009) “Thermal conductivity of nanofluid with magnetic nanoparticles”. **Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS) Proceedings**. Beijing, China;.

[107] Murugesan C, Sivan S. (2010) “Limits of the thermal conductivity of nanofluids”. **Thermal Science**;14, pp65–71.

[108] Patel HE, Sundararajan T, Das SK. (2008) “A cell model approach for thermal conductivity of nanofluids”. **Journal of Nanoparticle Research**;10, pp 87–97.

[109] Prasher R, Evans W, Meakin P, Fish J, Phelan P, Keblinski P. (2006) “Effect of aggregation on thermal conduction in colloidal nanofluids”. **Applied Physics Letters**;89, pp143119.

[110] Tillman P, Hill JMA. (2006) “New model for thermal conductivity in nanofluids”. In: Proceedings of the ICONN: IEEE

[111] Wang B-X, Sheng W-Y, Peng X-FA. (2009) “Novel statistical clustering model for predicting thermal conductivity of nanofluid”. **International Journal of Thermophysics**;30, pp1992–8.

[112] Tillman P, Hill JM. (2010) “Modeling the thermal conductivity of nanofluids. In: al. YBe, editor. IUTAM symposium on mechanical behavior and micromechanics of nanostructured materials”: Springer;. pP. 111–118. 560

[113] Wang L, Fan J. (2011) “Toward nanofluids of ultra-high thermal conductivity”. **Nanoscale Research Letters**;6, pp153–9.

[114] Bishop KJM, Wilmer CE, Soh S, Grzybowski BA. (2009) “Nanoscale forces and their uses in self-assembly”. **Small**;5, pp1600–30.

[115] Mendeleev VS, Ivanov AO. (2004) “Ferrofluid aggregation in chains under the influence of a magnetic field”. **Physical Review E**;70, pp051502–12.

[116] Holm C, Weis J-J. (2005) “The structure of ferrofluids: a status report. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*”;10: PP133–40.

[117] Jiang W, Wang L. (2010) “Monodisperse magnetite nanofluids: synthesis, aggregation, and thermal conductivity” . **Journal of Applied Physics**;108, pp114311–22.

- [118] Fang X, Xuan Y, Li Q. (2009) “Anisotropic thermal conductivity of magnetic fluids”. **Progress in Natural Science**;19, pp205–11.
- [119] Fu HL, Gao L. (2011) “Theory for anisotropic thermal conductivity of magnetic nanofluids” . **Physics Letters A**;375, pp3588–92.
- [120] Nkurikiyimfura I, Wang Y, Pan Z. (2013) “Effect of chain-like magnetite nanoparticle aggregates on thermal conductivity of magnetic nanofluid in magnetic field”. **Experimental Thermal and Fluid Science**;44, pp607–12.
- [121] Finlayson BA. (1970) “Convective instability of ferromagnetic fluids”. **Journal of Fluid Mechanics**;40, pp753–67.
- [122] Yamaguchi H. (2008) “Engineering fluids mechanics”. **Springer Science & Business Media B.V.**;
- [123] Rosensweig RE. (1987) “Magnetic fluids. Annual Reviews of Fluids Mechanics” ;19, pp437–63.
- [124] Mukhopadhyay A, Ganguly R, Sen S, Puri IK. (2005) “A scaling analysis to characterize thermomagnetic convection”. **International Journal of Heat and Mass Transfer**;48, pp3485–92.
- [125] Shuchia S, Sakatanib K, Yamaguchi H. (2005) “An application of a binary mixture of magnetic fluid for heat transport devices. In: Proceedings of the 10th international conference on magnetic fluids”, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials** ,p p. 257–9.
- [126] Blums E, Mezulis A, Kronkalns G. (2008) “Magnetoconvective heat transfer from a cylinder under the influence of a nonuniform magnetic field”. **Journal of Physics: Condensed Matter**;20, pp204128–33.
- [127] Zablockis D, Frishfelds V, Blums E. (2008) “Numerical investigation of thermomagnetic convection in a heated cylinder under the magnetic field of a solenoid”. **Journal of Physics: Condensed Matter**;20, pp204134.
- [128] Yamaguchi H, Niu X-D, Zhang X-R, Keisuke Yoshikawa. (2009) “Experimental and numerical investigation of natural convection of magnetic fluids in a cubic cavity”. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**;321, pp3665–70.
- [129] Engler H, Borin D, Odenbach S. (2009) “Thermomagnetic convection influenced by the magnetoviscous effect. In: Proceedings of the 11th conference

on electrorheological fluids and magnetorheological suspensions”: **Journal of Physics: Conference Series**;

[130]] Mahmoudi AH, Pop I, Shahi M. (2012) “Effect of magnetic field on natural convection in a triangular enclosure filled with nanofluid”. **International Journal of Thermal Sciences**;59:, pp126–40.

[131] Sheikholeslami M, Gorji-Bandpay M, Ganji DD. (2012) “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**;39, pp978–86.

[132] Tynjala T. (2005) “Theoretical and numerical study of thermomagnetic convection in magnetic fluids”. Lappeenranta, Finland: Lappeenranta University of Technology;

[133] Jafari A, Mousavi SM, Tynjala T, Sarkomaa PCFD. (2009) “Simulation of gravitational sedimentation and clustering effects on heat transfer of a nano-ferrofluid”. In: PIERs Proceedings Beijing, China;

[134] Jafari A, Tynjala T, Mousavi SM, Sarkomaa PCFD. (2008) “Simulation and evaluation of controllable parameters effect on thermomagnetic convection in ferrofluids using Taguchi technique”. **Computers & Fluids**;37, pp1344–53.

[135] Mousavi M. (2009) “Investigation of single phase approximation and mixture model on flow behaviour and heat transfer of ferrofluid using CFD simulation. *Advances in Computational Algorithms and Data Analysis*”. **Springer Science+Business Media B.V.**;

[136] Xuan Y, Li Q, Ye M. (2007) “Investigations of convective heat transfer in ferrofluid microflows using lattice-Boltzmann approach”. **International Journal of Thermal Sciences**;46, pp105–11.

[137] Jafari A, Tynjala T, Mousavi SM, Sarkomaa P. (2008) “Simulation of heat transfer in a ferrofluid using computational fluid dynamics technique”. **International Journal of Heat and Fluid Flow**;29, pp1197–202.

[138] Volker T, Blums E, (2007) “Odenbach S. Heat and mass transfer phenomena in magnetic fluids”. *GAMM-Mitteilungen*;30, pp185–94.

[139] Aminfar H, Mohammadpourfard M, Zonouzi SA. (2013) “Numerical study of the ferrofluid flow and heat transfer through a rectangular duct in the presence of a non-uniform transverse magnetic field”. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**;327, pp31–42.

[140] Ashouri M, Ebrahimi B, Shafii MB, Saidi MH, Saidi MS. (2010) “Correlation for Nusselt number in pure magnetic convection ferrofluid flow in a square cavity by a numerical investigation”. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**;322, pp3607–13.

[141] Moraveji MK, Hejazian M. (2012) “Modeling of turbulent forced convective heat transfer and friction factor in a tube for Fe₃O₄ magnetic nanofluid with computational fluid dynamics”. **International Communications in Heat and Mass Transfer**;39, pp1293–6.

[۱۴۲] Golzar M, Saghravani SF, Azhdari Moghaddam M. (2014) “Experimental study and numerical solution of poly acrylic acid supported magnetite nanoparticles transport in a one-dimensional porous media”. **Advances in Materials Science and Engineering**.

[۱۴۳] Golzar, M, Saghravani, S. F., (2014) “ Investigation on stability and transport of Iron oxide nanoparticles (Fe₃O₄) stabilized with polyacrylic acid in one-dimensional porous media”, **Fresenius Environmental Bulletin**. 23(10A), pp2594-2601.

[۱۴۴] Maxwel, G. J. C., (1904) “colours in metal glasses and in metallic films, Philosophical transactions of the royal society of London”. Series A, containing papers of a mathematical or physical character, 203, 385420,.

[۱۴۵] Hamilton, R. L., Crosser, O, K., (1962) “Thermal conductivity of Heterogeneous two component systems”, **Industrial and engineering chemistry fundamentals**, 1, 187191,.

[۱۴۶] Altan CL, Elkatmis A, Yüksel M, Aslan N, Bucak S. (2011) “ Enhancement of thermal conductivity upon application of magnetic field to Fe₃O₄ nanofluids”. **Journal of Applied Physics**. 1;110(9), pp093917.

[۱۴۷] Karimi A, Afghahi SS, Shariatmadar H, Ashjaee M. (2014) “Experimental investigation on thermal conductivity of MFe₂O₄ (M= Fe and Co) magnetic nanofluids under influence of magnetic field”. **Thermochimica Acta**.;598, pp59-67.

Abstract

The properties of thermal conductivity of water based Fe₃O₄/CuO nanofluid with respect to different parameters such as temperature and weight percent of forming nanoparticles were empirically investigated. The thermal conductivity was measured using hot wire method. According to the results, the thermal conductivity of the Fe₃O₄ nanofluid in the presence of different concentrations of CuO nanoparticles increases significantly. A linear relationship between increasing the concentrations of CuO nanoparticles and the growth of thermal conductivity of Fe₃O₄ nanofluid in the temperature range of 25 to 50 °C was observed.

The mixed Fe₃O₄/CuO nanofluid was selected and the role of external magnetic field effects with strength up to 0.2 T was determined on the thermal conductivity of the considered nanofluid with different basic parameters such as nanoparticle concentration and base fluid temperature. Thermal conductivity was measured using hot wire technique and the magnetic field applied uniformly to the nanofluid system with different situation of the field strength and weight percent of the both containing Fe₃O₄ and CuO nanoparticles. We have found that the thermal conductivity of the pure and the mixed Fe₃O₄ with CuO nanoparticle has significant enhancement at presence of the external magnetic field. However the rate of the thermal conductivity growth is strongly correlated with the magnetic field strength which is applied uniformly to the system.

Keywords: nanofluid, nanoparticle, ferrite, magnetic field.



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

PhD Thesis

**Investigation of the magnetic field effects on thermophysical and fluid flow
properties of magnetic Fe₃O₄ nanofluid**

By:
Samaneh Ebrahimi

Supervisor:
Dr. Seyed Fazlollah Sahravani

January, 2018