

مقاله پژوهشی

هدایت الکتریکی فروسیالات $MnFe_2O_4$ با دو پایه آب و اتیلن گلیکولحسن خندان فدافن^{۱*}، مریم ابارشی^۲ و مصطفی دولتی^۳

۱- گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

۲- گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۳- گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۴۰۳/۰۵/۱۱، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۴۰۳/۰۷/۲۸، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۴۰۳/۰۸/۱۵

چکیده

در این پژوهش، هدایت الکتریکی فروسیالات حاوی نانوذرات مغناطیسی $MnFe_2O_4$ در دو سیال پایه آب و اتیلن گلیکول مورد بررسی قرار گرفت. نانوذرات به روش هم‌رسوبی شیمیایی سنتز و ویژگی‌های ساختاری و فیزیکی آن‌ها با تکنیک‌های گوناگون ارزیابی شدند. نتایج شناسایی ساختاری به کمک XRD نشان داد نانوذرات بدون هرگونه فاز ناخالصی و با کیفیت بلوری مطلوب در ساختار اسپینلی و با ابعاد نانومتری ساخته شده‌اند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) نشان‌دهنده توزیع یکنواخت نانوذرات با اندازه میانگین حدود ۲۳/۷ nm بود. طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR) تشکیل پیوندهای Mn-O و Fe-O را تایید کرد. بررسی خواص مغناطیسی نانوذرات به کمک VSM، رفتار شبه سوپرپارامغناطیسی نانوذرات را با مغناطش مانده و میدان واگردان ناچیز و مغناطش اشباعی ۴۶/۹ emu/g نتیجه داد. اندازه‌گیری هدایت الکتریکی فروسیالات در گستره دمایی ۲۰ تا ۷۰ °C و برای کسر حجمی‌های ۰ تا ۱٪ اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد افزایش دما و کسر حجمی بطور قابل توجهی هدایت الکتریکی را به‌ویژه در فروسیال حاوی اتیلن گلیکول افزایش می‌دهند و در هر دو سیال پایه اثر کسر حجمی، بیشتر از دما است. طبق این نتایج در دمای ۷۰ °C و با افزایش کسر حجمی ۰ تا ۱٪، هدایت الکتریکی فروسیال $MnFe_2O_4$ -آب به میزان ۵۰ برابر و هدایت الکتریکی فروسیال $MnFe_2O_4$ -اتیلن گلیکول به میزان ۱۷۰ برابر افزایش یافت. همچنین، در کسر حجمی ۱٪، به ازای افزایش دما از ۲۰ به ۷۰ °C، هدایت الکتریکی فروسیال $MnFe_2O_4$ -آب به میزان ۱/۸ برابر و فروسیال $MnFe_2O_4$ -اتیلن گلیکول به میزان ۴/۵ برابر افزایش نشان داد. مقایسه نتایج با مدل شن و همکارانش، سازگاری قابل توجهی را به‌ویژه در دماها و کسر حجمی‌های کمتر نشان داد و این مدل توانست به‌خوبی رفتار هدایت الکتریکی فروسیالات مورد تحقیق را پیش‌بینی کند. یافته‌های پژوهش حاضر نشان‌دهنده قابلیت بالای این نانوسیالات در کاربردهایی مانند بیوالکترودها و دارورسانی هدفمند مغناطیسی است.

واژه‌های کلیدی: فروسیالات، نانوسیالات مغناطیسی، فریت منگنز، سیال پایه آب، اتیلن گلیکول، هدایت الکتریکی.

۱- مقدمه

پایه پراکنده شده‌اند. این نانوسیالات به دلیل داشتن خواص فیزیکی خاص و متنوع مانند خواص مغناطیسی، هدایت گرمایی، ویسکوزیته و هدایت الکتریکی بهبود یافته، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند [۱، ۲]. از جمله موادی که در

فروسیالات یا نانوسیالات مغناطیسی ترکیباتی هستند که در آن‌ها نانوذرات مغناطیسی به صورت پایدار در حجم سیال

* عهده‌دار مکاتبات: حسن خندان فدافن

نشانی: گرگان، دانشگاه گلستان، دانشکده علوم، گروه فیزیک

تلفن: ۰۱۷-۳۸۷۳۴۱۰۰، دورنگار: ۰۱۷-۳۲۲۴۵۸۸۲، پست الکترونیکی: h.khandan@gu.ac.ir

نانوسیالات مغناطیسی بکار می‌روند، فریت‌های اسپینلی با فرمول عمومی AFe_2O_4 هستند که در آن A می‌تواند یکی از عناصر Ni ، Mn ، Co و Zn ... باشد. در این بین، نانوفریت منگنز (MnFe_2O_4) با دمای کوری مطلوب، نفوذپذیری مغناطیسی بهینه و پایداری شیمیایی بالا، برای کاربردهای پیشرفته‌ای در فناوری‌های مغناطیسی و پزشکی مناسب شناخته شده است [۳،۴].

از سوی دیگر، هدایت الکتریکی بالا و ویژگی‌های بهبودیافته نانو سیالات، آن‌ها را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای نظیر خنک‌کننده‌های الکترونیکی، بیوالکترودها و حسگرهای زیستی تبدیل می‌کند [۵،۶]. از آنجا که خواص الکتریکی نانو سیالات به شدت تحت تأثیر عواملی نظیر دما و کسر حجمی نانوذرات قرار دارند، بررسی دقیق این اثرات می‌تواند نقش به سزایی در بهبود عملکرد و کارایی این نانو سیالات در کاربردهای واقعی داشته باشد [۷،۸].

در سال‌های اخیر، تحقیقات متعددی به بررسی خواص الکتریکی نانو سیالات با توجه به عواملی نظیر دما و کسر حجمی نانوذرات پرداخته‌اند. به عنوان مثال، تحقیق اخیر دولتی و همکاران (۲۰۲۴) نشان داد که هدایت الکتریکی نانو سیالات NiFe_2O_4 تحت تأثیر دما و کسر حجمی بطور قابل توجهی افزایش می‌یابد [۸]. طبق این تحقیق در دمای 70°C ، هدایت الکتریکی نانو سیالات NiFe_2O_4 -آب تا 1100% و نانو سیالات NiFe_2O_4 -اتیلن گلیکول تا 1235% افزایش یافت. علاوه بر این، تحقیقاتی توسط Alrashed و همکاران (۲۰۱۸) در مورد فروسیالات مبتنی بر $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{SiO}_2$ انجام شده است که طی آن به بررسی خواص الکتریکی و ترموفیزیکی این نانو سیالات پرداخته‌اند [۹]. این مطالعه بر روی نانوذرات فریت مس که با سیلیکا پوشش داده شده‌اند، نشان داد که با افزایش دما، ویسکوزیته کاهش و هدایت الکتریکی به آرامی افزایش می‌یابد. در تحقیق دیگری روی نانو سیالات NiFe_2O_4 توسط Kharat و همکاران (۲۰۱۷)، افزایش هدایت الکتریکی و چگالی در نتیجه افزایش کسر حجمی گزارش شد [۱۰]. از سوی دیگر،

Anu و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند که فروسیالات حاوی نانوفریت کبالت-روی ($\text{Zn}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$) نیز بطور قابل توجهی افزایش هدایت الکتریکی را نشان می‌دهند که ناشی از تشکیل لایه دوگانه الکتریکی و اثرات دما است [۱۱]. همچنین، در مطالعه‌ای دیگر توسط باقلی و همکاران (۲۰۱۵)، هدایت الکتریکی فروسیالات مگنتیت (Fe_3O_4) تحت شرایط مختلف کسر حجمی و دما بررسی و نتایج با یک مدل تحلیلی مقایسه گردید [۱۲]. تحقیق آنان نیز بهبودهای قابل توجهی در هدایت الکتریکی فروسیالات مگنتیت را نشان داد.

مطالعات پیشین نشان می‌دهند که هدایت الکتریکی نانو سیالات به ویژه در کاربردهایی که نیاز به انتقال سریع الکترون‌ها یا یون‌ها دارند، بسیار اهمیت دارد. تاکنون پژوهش جامعی که اثرات هم‌زمان دما و کسر حجمی نانوذرات MnFe_2O_4 در سیالات پایه متفاوت (آب و اتیلن گلیکول) را بر هدایت الکتریکی مورد مطالعه قرار دهد، انجام نشده است. به همین دلیل، تحقیق حاضر با هدف پر کردن این خلاء علمی، داده‌های دقیق و کاربردی از اثرات دما و کسر حجمی بر هدایت الکتریکی نانو سیالات حاوی MnFe_2O_4 ارائه می‌دهد. نوآوری این مطالعه نه تنها در بررسی هم‌زمان این عوامل در دو سیال پایه متفاوت است، بلکه همچنین شامل مقایسه نتایج تجربی با مدل تحلیلی شناخته شده‌ای است که رفتار هدایت الکتریکی نانو سیالات را توصیف می‌کند. این مقایسه تحلیلی بطور ویژه می‌تواند به توسعه و بهینه‌سازی نانو سیالات برای کاربردهای نوین صنعتی و زیستی کمک شایانی نماید.

در این پژوهش، هدایت الکتریکی فروسیالات حاوی MnFe_2O_4 با سیالات پایه آب و اتیلن گلیکول به عنوان تابعی از دما و کسر حجمی نانوذرات مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج بدست آمده با مدل‌های نظری موجود نظیر مدل ارائه شده توسط شن (Shen) و همکارانش [۱۳] مقایسه شد. به کمک این مدل رفتار هدایت الکتریکی نانو سیالات بر حسب دما و کسر حجمی، با در نظر گرفتن مدل قدیمی ماکسول

حجمی‌های ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۴۵، ۰/۷ و ۱ درصد تهیه شد. کسر حجمی نانوسیال (φ) برحسب حجم نانوذرات (V_p) و حجم نانوسیال (V_{nf}) بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varphi (\%) = \frac{V_p}{V_{nf}} \times 100 \quad (1)$$

$$V_p = \frac{m_p}{\rho_p} \quad (2)$$

در این رابطه m_p جرم نانوذرات و ρ_p چگالی نانوذرات است که از داده‌های پراش پرتو X تعیین می‌شود. شناسایی ساختار نانوذرات به روش پراش پرتو X (XRD) به کمک دستگاه پراش سنج پرتو X، مدل PHILIPS PW1730 با تابش $\text{Cu-K}\alpha$ (طول موج $1.5406 \text{ \AA}$) انجام شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مدل TESCAN MIRAI با تهیه شد. طیف‌سنجی تبدیل فوریه فروسرخ (FTIR) با دستگاه Perkin Elmer مدل RX1 انجام گرفت. برای شناسایی خواص مغناطیسی نانوذرات از دستگاه مغناطیس سنج نمونه نوسانی (VSM) با میدان مغناطیسی اعمالی در گستره $\pm 12 \text{ kOe}$ در دمای اتاق استفاده شد. اندازه‌گیری هدایت الکتریکی فروسیالات در هر کسر حجمی، با استفاده از دستگاه هدایت سنج Wagtech مدل Con11 در گستره دمایی 20°C تا 70°C انجام شد.

۳- نتایج و بحث

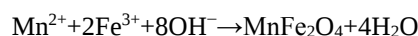
الگوی XRD نانوذرات MnFe_2O_4 در شکل ۱(a) نشان داده شده است. خطوط استاندارد کارت مرکز بین‌المللی داده‌های پراش (ICDD) با شماره ۰۵۸۶-۲۳۰-۹۶ که متناظر با ساختار اسپینلی ترکیب MnFe_2O_4 است نیز جهت مقایسه در شکل ارائه شده است. شاخص‌های میلر مربوط به دسته صفحات این ساختار در محل خطوط متناظر درج شده‌اند. مقایسه قله‌ها با خطوط استاندارد، ساختار بلوری اسپینلی و خلوص فازی نانوذرات سنتز شده را تایید می‌کند. علاوه بر این، مشاهده می‌شود تمام قله‌ها تیز و دارای شدت بالا هستند که نشان دهنده درجه خلوص بالا و کیفیت مطلوب بلوری نمونه است.

[۱۴]، حرکت براونی و حرکت الکتروفورزی نانوذرات باردار پیش‌بینی می‌شود. نتایج این مطالعه می‌تواند افق‌های جدیدی را در جهت درک بهتر و توسعه کاربردهای نانوسیالات مغناطیسی در صنایع پیشرفته و فناوری‌های نوین فراهم کند.

۲- فعالیت‌های تجربی

مواد اولیه مورد استفاده در سنتز نانوذرات MnFe_2O_4 شامل منگنز کلرید ($\text{MnCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)، آهن نیترات ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)، سدیم هیدروکسید (NaOH)، تترامتیل آمونیوم هیدروکسید ($\text{N}(\text{CH}_3)_4\text{OH}$)، آب یون‌زدا شده و اتیلن گلیکول ($\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$) بودند.

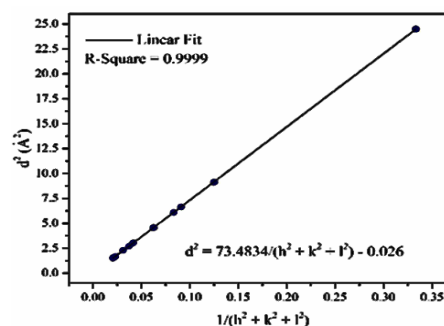
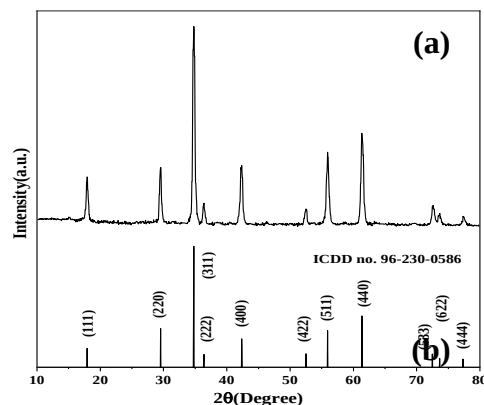
ابتدا محلولی حاوی یون‌های Fe^{3+} با غلظت 2 M و Mn^{2+} با غلظت 1 M تهیه شد. سپس محلول NaOH با غلظت 1 M به تدریج به این محلول اضافه شد تا محصول نهایی رسوب کند. مخلوط به مدت ۲ ساعت در دمای 80°C گرم شد. رسوب حاصل پس از جدا کردن و شستشوی چند باره با آب برای جدا شدن نمک‌های حاصل، به مدت ۱۲ ساعت در دمای 100°C در یک کوره الکتریکی حرارت داده شد تا کاملاً خشک شود. در نهایت، نانوپودرها برای بهبود بلورینگی در کوره با دمای 900°C به مدت ۲ ساعت بازپخت شدند. واکنش کلی سنتز به صورت زیر است:



مولارته‌های انتخاب شده بر اساس استوکیومتری این واکنش تنظیم شده‌اند. نسبت $2:1$ یون‌های Fe^{3+} به Mn^{2+} و غلظت OH^- برای ایجاد ترکیب مناسب MnFe_2O_4 و دستیابی به ساختار بلوری موردنظر با خواص مغناطیسی مطلوب ضروری است [۱۵]. به منظور تهیه فروسیالات، نانوذرات تهیه شده به طور یکنواخت در آب یون‌زدا شده و اتیلن گلیکول پراکنده شد. برای دستیابی به فروسیالات پایدار و جلوگیری از انباشتگی نانوذرات، از تترامتیل آمونیوم هیدروکسید به عنوان عامل پراکنده کننده (سورفکتانت) و نیز امواج فراصوت استفاده شد. به ازای هر سیال پایه، پنج نمونه فروسیال با کسر

شکل ۲ طیف FTIR نانوذرات MnFe_2O_4 را نشان می‌دهد. قله‌های مشاهده شده در $477/69 \text{ cm}^{-1}$ و $590/07 \text{ cm}^{-1}$ به ترتیب مربوط به ارتعاشات کششی Mn-O و Fe-O هستند که بیانگر تشکیل ساختار اسپینلی فریت منگنز است [۱۶]. قله موجود در $1448/27 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاشات کششی پیوند CO_2 [۱۷] و قله‌های موجود در $2855/58$ و $2922/46 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاشات کششی C-H هستند [۱۸]. همچنین قله‌های موجود در $1632/44 \text{ cm}^{-1}$ و $3408/78 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاشات کششی O-H هستند که ناشی از وجود آب در نمونه به علت جذب آن توسط ماده KBr در هنگام تهیه قرص برای گرفتن طیف می‌باشد [۱۹]. این نتایج بطور مؤثری تأیید می‌کنند که نمونه‌ها با خلوص کافی از ترکیبات مورد نظر تهیه شده‌اند.

شکل ۳ تصویر FESEM نانوذرات (شکل ۳(a) به همراه نمودار توزیع اندازه ذرات (شکل ۳(b)) و همچنین طیف EDS نانوذرات (شکل ۳(c)) را نشان می‌دهد. تصویر FESEM نمایانگر ریخت‌شناسی تقریباً یکنواخت نانوذرات با شکلی نسبتاً کروی و یا شبه کروی است. اندازه نانوذرات در محدوده ۲۰ تا ۳۰ نانومتر قرار دارد که این مقدار برای بسیاری از نانوذرات مغناطیسی بهینه است و می‌تواند ویژگی‌های مغناطیسی مطلوبی از جمله مغناطیس‌پذیری بالا را فراهم کند. در این اندازه، نانوذرات ممکن است در محدوده اندازه بحرانی برای خاصیت ابرپارامغناطیسی قرار بگیرند که این ویژگی برای کاربردهای زیست‌پزشکی، نظیر تصویربرداری MRI، بسیار اهمیت دارد. نانوذرات مشاهده شده در این تصویر بطور واضح دچار انباشتگی شده‌اند که دلیل آن می‌تواند برهم‌کنش‌های مغناطیسی میان ذرات باشد [۲۰]. نانوذرات مغناطیسی به دلیل نیروهای جاذبه مغناطیسی قوی بین دوقطبی‌های مغناطیسی خود، تمایل زیادی به تجمع و تشکیل خوشه‌ها دارند. این انباشتگی اغلب در نانوذرات فریتی که دارای خاصیت مغناطیسی هستند، به‌طور واضح دیده می‌شود. علاوه بر این، برهم‌کنش‌های سطحی قوی میان نانوذرات به دلیل نسبت بالای سطح به



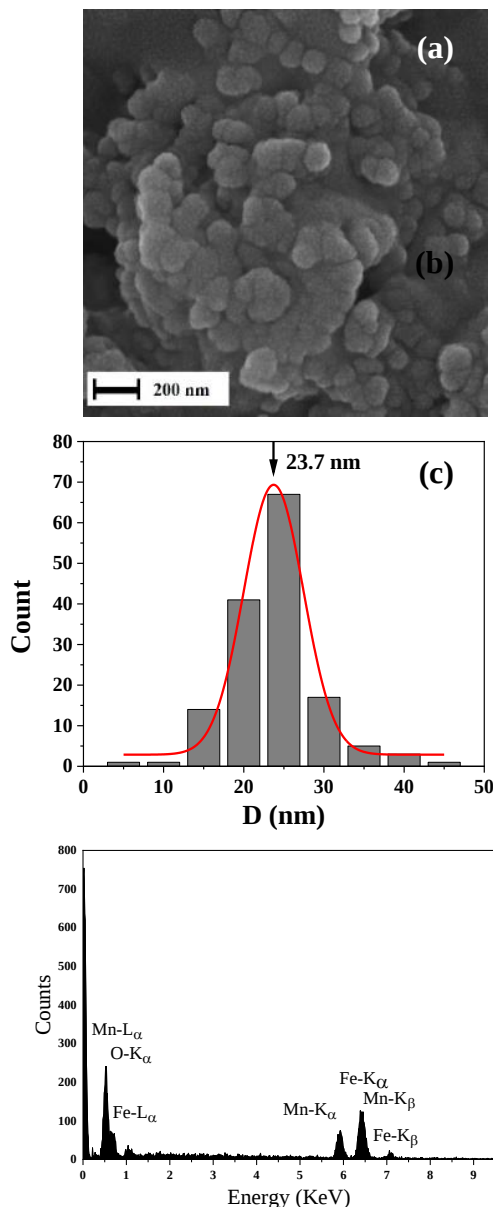
شکل ۱: (a) الگوی XRD نانوذرات MnFe_2O_4 به همراه خطوط استاندارد کارت ICDD شماره ۹۶-۲۳۰-۰۵۸۶ متناظر با آن، (b) برازش خطی داده‌های XRD به منظور تعیین ثابت شبکه.

ثابت شبکه (a)، از داده‌های XRD با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$a = d\sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (3)$$

در این رابطه d فاصله دسته صفحات و h, k, l شاخص‌های میلر صفحات بلوری هستند. با توجه به رابطه (۳)، ثابت شبکه از شیب نمودار d^2 برحسب $\frac{1}{h^2 + k^2 + l^2}$ تعیین می‌شود. شکل ۱(b) برازش خطی این نمودار را نشان می‌دهد. ثابت شبکه از این ترسیم برابر با $8.5722 \text{ \AA}$ تعیین شد. چگالی نانوذرات (ρ_{XRD}) با استفاده از ثابت شبکه، از رابطه زیر تعیین شد که در آن Z تعداد واحد فرمول در یک یاخته یک، M جرم مولکولی و N_A عدد آووگادرو است:

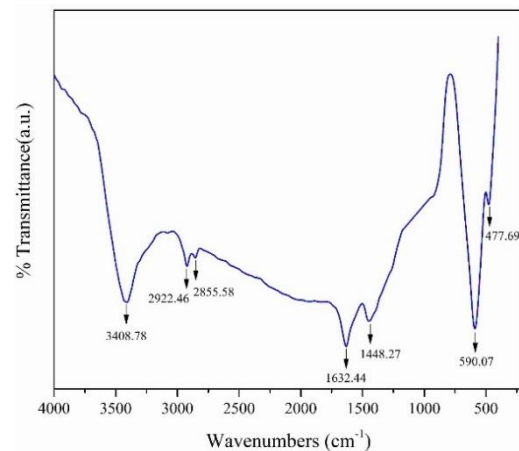
$$\rho_{\text{XRD}} = \frac{ZM}{N_A a^3} \quad (4)$$



شکل ۳: (a) تصویر FESEM، (b) نمودار توزیع اندازه نانوذرات به همراه تاج گوسی برازش شده با آن، و (c) EDS نانوذرات MnFe_2O_4 .

طیف EDS نانوذرات در شکل (c)، ترکیب عنصری نانوذرات را نشان می‌دهد که شامل عناصر منگنز (Mn)، آهن (Fe) و اکسیژن (O) است. مقادیر دقیق درصدی هر عنصر در جدول ۱ ارائه شده است. مطابق جدول، نسبت‌های مولی منگنز و آهن تقریباً بطور دقیق با نسبت استوکیومتری MnFe_2O_4 مطابقت دارد، که نشان‌دهنده کنترل دقیق فرآیند سنتز و تأییدکننده ترکیب شیمیایی موردنظر است. عدم وجود قله‌های اضافی در طیف EDS تأییدی بر خلوص بالای

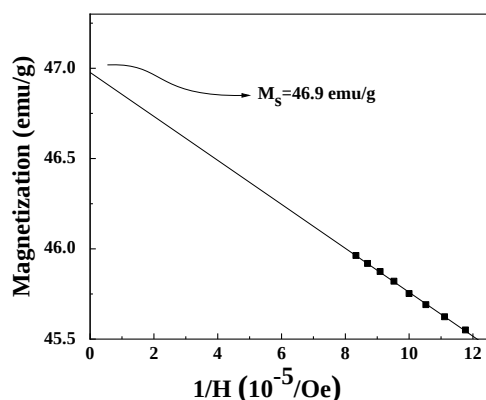
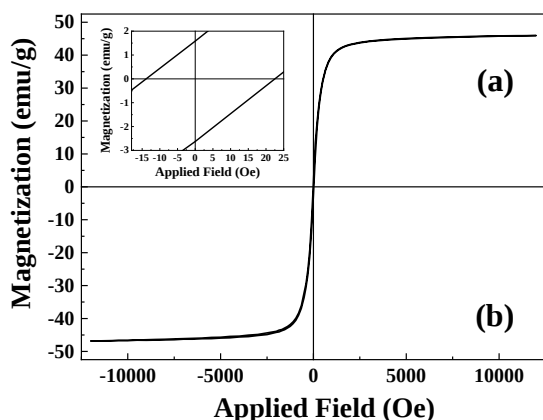
حجم، احتمالاً منجر به پیوستگی آن‌ها و تشکیل شبکه‌ای از ذرات متصل می‌شود.



شکل ۴: طیف FTIR نانوذرات MnFe_2O_4 قله‌های جذب مرتبط در شکل مشخص شده‌اند.

نمودار توزیع اندازه ذرات در شکل (b) با استفاده از داده‌های تصویر FESEM و نرم‌افزار تحلیل تصاویر بدست آمده و اندازه‌گیری‌ها نشان‌دهنده توزیع اندازه نسبتاً باریک با میانگین اندازه 23.7 nm است. توزیع باریک مشاهده شده، نشانه‌ای از یکنواختی نسبی اندازه ذرات در فرآیند سنتز است. برای تعیین یکنواختی توزیع اندازه ذرات، یک منحنی گوسی بر نمودار توزیع اندازه انطباق داده شده است. این انطباق نشان می‌دهد که فرآیند هم‌رسوبی بکار رفته قادر بوده است تا اندازه ذرات را با کنترل خوبی در محدوده کوچکی توزیع کند. یکنواختی اندازه ذرات اهمیت زیادی دارد زیرا توزیع غیریکنواخت می‌تواند باعث تغییرات در ویژگی‌های مغناطیسی و کاهش کارایی نانوذرات در کاربردهای عملی شود. این نتایج همچنین با نتایج XRD که میانگین اندازه بلورک‌ها را در محدوده‌ای مشابه نشان می‌دهد، سازگاری دارد. بطور کلی، نتایج FESEM نشان می‌دهد که روش هم‌رسوبی شیمیایی به کار رفته در این پژوهش قادر بوده است نانوذراتی با ریخت‌شناسی یکنواخت، اندازه ریز و توزیع اندازه باریک تولید کند. این خصوصیات نانوذرات تولیدی را به‌ویژه برای کاربردهای مغناطیسی و زیست‌پزشکی مناسب می‌سازد.

نیاز به میدان مغناطیسی بیشتری برای غلبه بر بی نظمی‌های سطحی وجود دارد.



شکل ۴: (a) حلقه پسماند مغناطیسی نانوذرات MnFe_2O_4 در دمای اتاق. تصویر داخل: بازترسیم منحنی در مقیاس بزرگتر برای تعیین مقادیر M_r و H_c . (b) رسم نمودار مغناطش برحسب عکس میدان و برونیایی به ناحیه میدان قوی برای تعیین M_s .

جدول ۲: مقادیر مغناطش مانده (M_r)، میدان واگردان (H_c) و مغناطش اشباعی (M_s) نانوذرات، مستخرج از شکل ۴(a).

M_r (emu/g)	H_c (Oe)	M_s (emu/g)
۲٫۱	۱۸٫۲	۴۶٫۹

در شکل ۵، هدایت الکتریکی فروسیالات با دو پایه آب و اتیلن گلیکول به عنوان تابعی از کسر حجمی در دماهای مختلف نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که هدایت الکتریکی هر دو فروسیال با افزایش کسر حجمی افزایش می‌یابد. این روند افزایشی قبلاً نیز توسط سایر محققان برای انواع مختلف نانوسیالات مشاهده شده است. بعنوان مثال فروسیال‌های فریت نیکل [۸] و مگنتیت [۱۲] و همچنین

نانوذرات است، و این موضوع به‌ویژه برای کاربردهای مغناطیسی و زیست‌پزشکی که نیازمند خلوص بالای نانوذرات هستند، اهمیت دارد.

جدول ۱: عنصرسنجی نانوذرات MnFe_2O_4 از طیف EDS.

عنصر	درصد وزنی (%)	درصد اتمی (%)
Mn-K α	۲۰٫۹۸	۱۱٫۵۴
Fe-K α	۴۵٫۰۹	۲۴٫۳۹
O-K α	۳۳٫۹۳	۶۴٫۰۷
کل	۱۰۰	۱۰۰

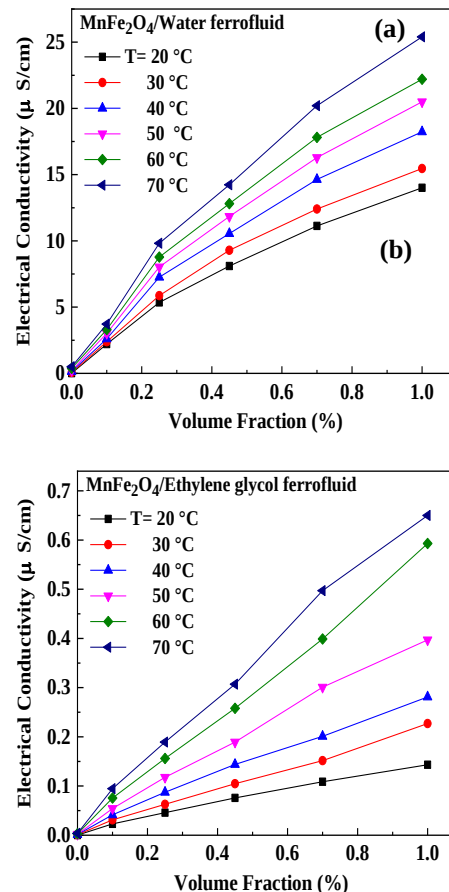
شکل ۴ حلقه پسماند مغناطیسی نانوفریت MnFe_2O_4 را در دمای اتاق نشان می‌دهد. به منظور تعیین مقدار دقیق مغناطش مانده (M_r) و میدان واگردان (H_c)، منحنی با مقیاسی بزرگتر بازترسیم و در داخل شکل نمایش داده شده است. مقدار مغناطش اشباعی (M_s) نمونه از برون‌یابی منحنی M برحسب عکس میدان ($1/H$) به ناحیه میدان مغناطیسی قوی ($1/H \rightarrow 0$) تعیین می‌شود.

مقادیر مغناطش اشباعی، مغناطش مانده و میدان واگردان مستخرج از حلقه پسماند در جدول ۲ ارائه شده‌اند. ملاحظه می‌شود مغناطش مانده و میدان واگردان دارای مقادیر ناچیزی هستند که باعث می‌شوند نانوفریت ساخته شده دارای ویژگی شبه سوپراپارامغناطیسی باشد. این ویژگی نانوفریت موردتحقیق را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای فروسیالات تبدیل می‌کند. با توجه به شکل ۴(a)، عدم رسیدن مغناطش به مقدار اشباعی در میدان‌های بالا (تا حدود 10 kOe) می‌تواند به دلیل اثرات سطحی قابل توجهی باشد که در مقیاس نانومتری ذرات مشاهده می‌شود. با کاهش اندازه ذرات به ابعاد نانومتری، نسبت اتم‌های سطحی به اتم‌های داخلی افزایش می‌یابد و در نتیجه این اتم‌ها که معمولاً نظم مغناطیسی کمتری دارند، می‌توانند بر رفتار کلی مغناطیسی تاثیر بگذارند. در واقع، این اثرات سطحی می‌توانند باعث کاهش مغناطش اشباعی شوند، زیرا جهت‌گیری گشتاورهای مغناطیسی سطحی در مقیاس نانو به راحتی تغییر نمی‌کند و

عامل افزایش حرکت براونی نانوذرات و کاهش ویسکوزیته سیالات با افزایش دما نسبت داده می‌شود [۸،۲۱،۲۲]. همچنین با توجه به شکل، شیب متفاوت افزایش هدایت الکتریکی به ازای یک کسر حجمی یکسان در دو سیال پایه قابل مشاهده است، بطوریکه شیب افزایش برای سیال پایه اتیلن گلیکول بیشتر است. رفتار مشابهی در فروسیالات فریت نیکل، اخیراً گزارش شده است [۸]. دلیل این تفاوت شیب در دو سیال پایه را می‌توان به ایجاد لایه دوگانه الکتریکی (EDL) در سطح نانوذرات نسبت داد [۱]. افزودن نانوذرات فریت منگنز به سیالات آب و اتیلن گلیکول منجر به تشکیل لایه دوگانه الکتریکی در مرز بین سیال و نانوذرات می‌شود. این لایه به عنوان مرزی برای انتقال یون‌ها و الکترون‌ها عمل می‌کند و هدایت الکتریکی سیال را افزایش می‌دهد. انتظار می‌رود دو سیال پایه متفاوت لایه دوگانه الکتریکی متفاوتی را در سطح نانوذرات ایجاد کنند که موجب بروز تفاوت در شیب تغییرات هدایت الکتریکی برحسب کسر حجمی می‌شود [۲۳،۲۴].

مقایسه تغییرات هدایت الکتریکی در دو شکل ۵ و ۶ نشان می‌دهد تاثیر کسر حجمی بر افزایش هدایت الکتریکی فروسیالات برای هر دو سیال پایه بیشتر از تاثیر دما است. برای مثال، در دمای 70°C ، هدایت الکتریکی فروسیال MnFe_2O_4 -آب به ازای تغییر کسر حجمی از ۰ به ۱٪ تا ۵۱۰۰٪ افزایش یافته است. این در حالی است که در کسر حجمی ۱٪ به ازای تغییر دما از 20°C به 70°C ، افزایش هدایت الکتریکی ۸۰٪ است. این افزایش برای فروسیال MnFe_2O_4 -اتیلن گلیکول در دمای 70°C ، به ازای تغییر کسر حجمی از ۰ به ۱٪ برابر با ۱۷۰۰٪ و در کسر حجمی ۱٪ به ازای تغییر دمای 20°C تا 70°C برابر با ۳۶۴٪ مشاهده می‌شود. رفتار افزایش قابل توجه هدایت الکتریکی با دما و کسر حجمی قبلاً برای نانوسیالات مختلف گزارش شده است [۸،۲۲،۲۵-۲۸]. به عنوان مثال در تحقیق اخیر دولتی و همکاران [۸] که بررسی مشابهی روی فروسیال NiFe_2O_4 با دو سیال پایه آب و اتیلن گلیکول انجام داده‌اند، مشاهده شد در دمای 70°C در

نانوسیالات حاوی انواع اکسیدهای فلزی [۷] افزایش هدایت الکتریکی نانوسیال را برحسب کسر حجمی نشان داده‌اند.



شکل ۵: هدایت الکتریکی فروسیالات MnFe_2O_4 با سیال پایه آب (a) و اتیلن گلیکول (b) به عنوان تابعی از کسر حجمی در دماهای مختلف.

یکی از دلایل افزایش هدایت الکتریکی، این است که نانوذرات فریت منگنز به عنوان حامل‌های بار الکتریکی عمل کرده و از آنجا که هدایت الکتریکی با چگالی حامل‌های بار الکتریکی رابطه خطی دارد، افزایش کسر حجمی منجر به افزایش هدایت الکتریکی سیالات آب و اتیلن گلیکول بصورت تقریباً خطی می‌شود [۱۰،۱۲،۱۳]. هدایت الکتریکی فروسیالات برحسب دما در شکل ۶ رسم شده است. ملاحظه می‌شود در هر دو فروسیال، هدایت الکتریکی با افزایش دما بطور تقریباً خطی افزایش می‌یابد و شیب افزایش بشدت به کسر حجمی و سیال پایه بستگی دارد. این مشاهدات به دو

اجزای کروی مجزا به صورت تصادفی در سیال توزیع شده‌اند. هدایت الکتریکی نانوسیال در مدل ماکسول (σ_M)، به عنوان تابعی از کسر حجمی نانوذرات به صورت زیر بیان می‌شود که در آن σ_0 هدایت الکتریکی سیال پایه و $\alpha = \sigma_P / \sigma_0$ نسبت هدایت الکتریکی نانوذرات به هدایت الکتریکی سیال پایه است.

$$\sigma_M = \sigma_0 \left(1 + \frac{3(\alpha-1)\varphi}{(\alpha+2) - (\alpha-1)\varphi} \right) \quad (5)$$

در مورد نانوسیالات مورد تحقیق، از آنجا که هدایت الکتریکی نانوذرات از هدایت الکتریکی سیالات پایه خیلی بزرگتر است ($\alpha \gg 1$)، هدایت الکتریکی نانوسیالات در مدل ماکسول به ازای کسر حجمی‌های کوچک بصورت زیر ساده می‌شود:

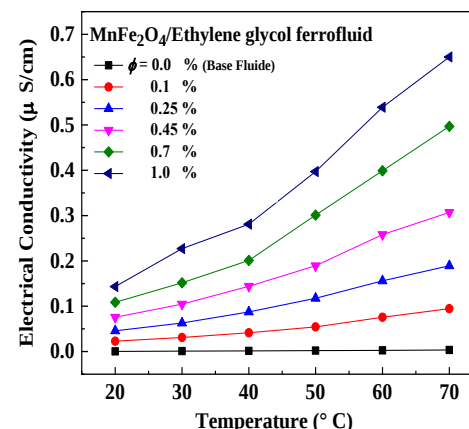
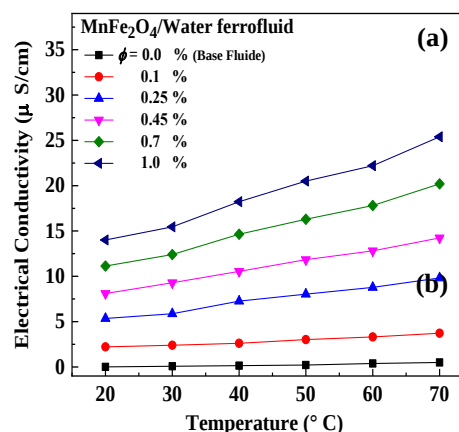
$$\sigma_M = \sigma_0 (1 + 3\varphi) \quad (6)$$

مدل ماکسول در پیش‌بینی رفتار هدایت الکتریکی نانوسیالات ناکام است، زیرا به عنوان یک مدل استاتیک، تاثیرات حرکت یون‌ها در محیط مایع و تغییرات دما را در نظر نمی‌گیرد [۱۳]. شن و همکارانش با در نظر گرفتن هدایت الکتریکی نانوسیال ناشی از الکتروفورز (σ_E)، و حرکت براونی نانوذرات (σ_B) مدل ماکسول را به صورت زیر تکمیل کردند تا اثر دما و کسر حجمی را بطور هم‌زمان در بر داشته باشد:

$$\sigma = \sigma_M + \sigma_E + \sigma_B = \sigma_0 (1 + 3\varphi) + \frac{2\varphi \varepsilon_r^2 \varepsilon_0^2 U_0^2}{\rho \nu (1 + 2.5\varphi + 6.25\varphi^2) r^2} e^{\lambda(T-T_0)} + \frac{3\varphi \varepsilon_r \varepsilon_0 U_0}{r^{\frac{3}{2}}} \left(\frac{RT}{L} \frac{e^{\lambda(T-T_0)}}{3\pi \rho \nu (1 + 2.5\varphi + 6.25\varphi^2)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

در این رابطه ε_0 ثابت دی‌الکتریک خلاء، ε_r ثابت دی‌الکتریک نسبی سیال پایه، U_0 پتانسیل زتا، T دما بر

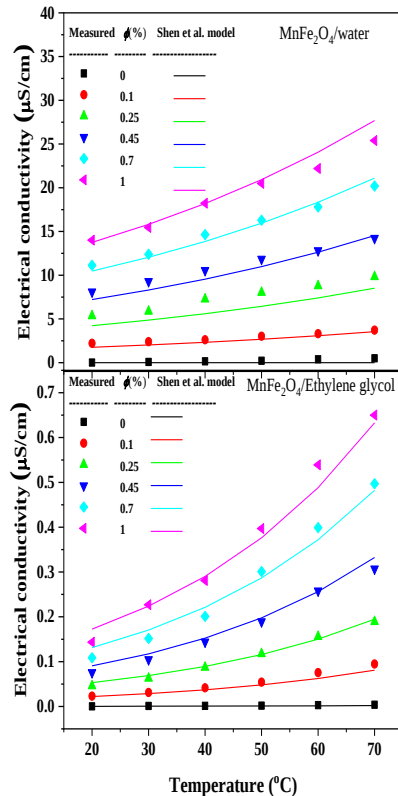
محدوده کسر حجمی ۰ تا ۱٪، رسانایی الکتریکی فروسیال با سیال پایه آب و فروسیال با سیال پایه اتیلن گلیکول به ترتیب به اندازه ۱۱۰۰٪ و ۱۲۳۵٪ افزایش یافته است. به‌طور مشابه، در کسر حجمی ۱٪ و در محدوده دمایی ۲۰ تا ۷۰ °C، رسانایی الکتریکی فروسیالات فریت نیکل با پایه آب و اتیلن گلیکول به ترتیب ۱۳۶٪ و ۳۷۰٪ افزایش داشته است.



شکل ۶: هدایت الکتریکی MnFe_2O_4 با سیال پایه آب (a) و اتیلن گلیکول (b) به عنوان تابعی از دما در کسر حجمی‌های مشخص شده.

به منظور مقایسه نتایج تجربی با مدل‌های موجود، مدل شن و همکارانش [۱۳] در نظر گرفته شد. این مدل در پیش‌بینی رفتار هدایت الکتریکی نانوسیالات، از مدل استاتیکی ماکسول [۱۴] استفاده می‌کند. مدل ماکسول اولین توضیح نظری در مورد هدایت الکتریکی در سوسپانسیون‌های مایع-جامد است. در این مدل، که بر اساس تحلیل آماری است،

می تواند عوامل دیگر تاثیر گذار بر هدایت الکتریکی باشند که در این مدل در نظر گرفته نشده اند. از جمله این عوامل می توان به شکل، و انباشتگی نانوذرات اشاره کرد [۸، ۱۲، ۱۳]. شکل نانوذرات بر نحوه تعامل آن ها با یکدیگر و با سیال پایه اثر گذار است و ویژگی هایی همچون پایداری، هدایت الکتریکی و هدایت گرمایی را تحت تاثیر قرار می دهد.



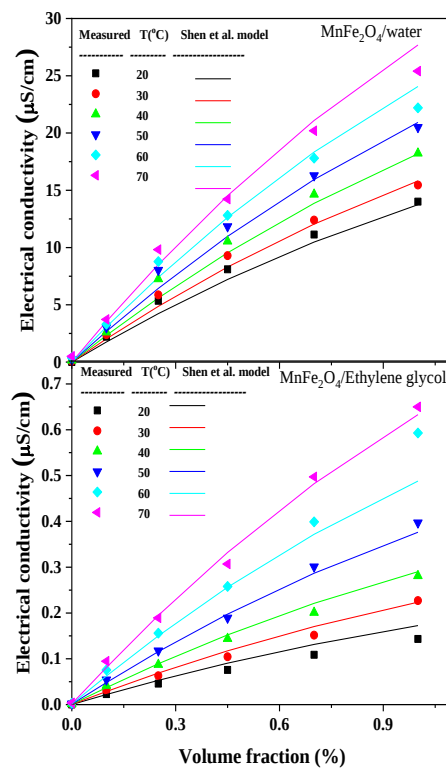
شکل ۸: مقایسه نتایج تجربی تغییرات هدایت الکتریکی بر حسب دما با مدل شن و همکاران برای MnFe_2O_4 -آب و MnFe_2O_4 -اتیلن گلیکول.

تحقیقات نشان می دهد که نانوذرات با شکل های غیر کروی، مانند میله ای یا ساختارهای پیچیده، تمایل به ایجاد شبکه های تجمعی دارند که می تواند ویسکوزیته سیال را افزایش داده و باعث رفتار غیر نیوتنی شود [۲۹]. این تجمعات بر مسیرهای هدایت بار الکتریکی در سیال اثر می گذارند و در نتیجه هدایت الکتریکی نانوسیال را تغییر می دهند [۳۰].

علاوه بر این، توزیع اندازه نانوذرات نیز بر پایداری و خواص الکتریکی نانوسیالات تاثیر دارد. نانوذرات کوچکتر معمولاً سطح بیشتری برای تعامل با سیال پایه ایجاد می کنند و با

حسب کلونین، L ثابت آوگادرو، R ثابت ترمودینامیکی، ρ و ν به ترتیب چگالی و ویسکوزیته سینماتیکی سیال در دمای T_0 ، شعاع میانگین نانوذرات و λ ضریب ویسکوزیته سیال است.

نتایج مقایسه داده های تجربی با این مدل بر حسب کسر حجمی در شکل ۷ و بر حسب دما در شکل ۸ ارائه شده اند. در این شکل ها نتایج محاسباتی بر اساس مدل بکار رفته (معادله ۷) با خطوط پیوسته، و داده های تجربی با نمادها نشان داده شده اند.



شکل ۷: مقایسه نتایج تجربی هدایت الکتریکی با مدل شن و همکاران به عنوان تابعی از کسر حجمی برای فروسیالات MnFe_2O_4 -آب و MnFe_2O_4 -اتیلن گلیکول.

همانطور که در این دو شکل مشاهده می شود، مدل شن و همکارانش توضیح قابل قبولی برای هدایت الکتریکی فروسیالات در این مطالعه ارائه داده و در تقریباً تمامی کسر حجمی ها و دماها تطابق خوبی را نشان می دهد. با این حال، عدم انطباق داده های تجربی با مدل در برخی از دماها و کسر حجمی ها (به ویژه در دماها و کسر حجمی های بیشتر) در هر دو شکل ۷ و ۸ قابل مشاهده است. دلیل این ناسازگاری

تشکیل لایه دو گانه الکتریکی در اطراف خود، هدایت الکتریکی را بهبود می‌بخشد [۳۰]. این در حالی است که توزیع اندازه گسترده می‌تواند منجر به انباشتگی بیشتر و ته‌نشینی نانوذرات شود که کارایی نانوسیال را کاهش می‌دهد [۲۹]. مطالعات نشان می‌دهد که نانوذرات با توزیع اندازه باریکتر تمایل به تشکیل نانوسیالات پایدارتر دارند و به بهبود پایداری و افزایش هدایت الکتریکی در بلندمدت کمک می‌کنند [۳۰]. بنابراین، کنترل شکل و توزیع اندازه نانوذرات برای بهینه‌سازی پایداری و هدایت الکتریکی نانوسیالات ضروری است.

مدل تجربی استفاده شده در این مطالعه برای پیش‌بینی رفتار هدایت الکتریکی، قابلیت‌های مهمی در کاربردهای مرتبط با خواص الکتریکی نانوسیالات دارد. در بخش انرژی، این مدل می‌تواند در بهینه‌سازی نانوسیالات برای باتری‌ها و ابرخازن‌ها بکار رود و با افزایش سرعت شارژ و دشارژ، بازده انرژی را بهبود بخشد. در میکروالکترونیک، این مدل امکان فرمول‌بندی دقیق نانوسیالات را فراهم می‌کند تا عملکرد الکتریکی پایدار و مطمئن در قطعات الکترونیکی حاصل شود. همچنین در صنعت خودرو، به‌ویژه برای خودروهای الکتریکی و هیبریدی، این مدل می‌تواند به توسعه نانوسیالاتی کمک کند که کارایی الکتریکی سیستم‌های باتری را افزایش دهند. بطور کلی، این قابلیت پیش‌بینی‌کننده مدل را به ابزاری ارزشمند برای تنظیم خواص الکتریکی نانوسیالات حاوی فریت منگنز در کاربردهای صنعتی مختلف تبدیل می‌کند [۸].

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه اثرات دما و کسر حجمی نانوذرات بر رسانایی الکتریکی نانوسیالات MnFe_2O_4 بر پایه آب و اتیلن گلیکول بررسی شد. نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات به سیال پایه، هدایت الکتریکی را بطور چشمگیری افزایش می‌دهد. این افزایش به دلیل نقش نانوذرات به عنوان حامل‌های بار الکتریکی و ایجاد لایه دو گانه الکتریکی در سطح نانوذرات

است. همچنین، مشاهده شد که افزایش دما موجب افزایش هدایت الکتریکی می‌شود، اما تاثیر کسر حجمی نانوذرات بیشتر از تاثیر دما است. مقایسه رفتار هدایت الکتریکی نانوسیالات مورد مطالعه با دو سیال پایه نشان می‌دهد که نانوسیال MnFe_2O_4 -اتیلن گلیکول دارای پتانسیل بیشتری برای بهبود رسانایی الکتریکی نسبت به نانوسیال MnFe_2O_4 -آب است. نتایج تجربی مطالعه حاضر با مدل‌شن و همکارانش مقایسه شد و تطابق خوبی را نشان داد. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از نانوسیالات با کسر حجمی مناسب نانوذرات و کنترل دمای سیال، می‌تواند بهبود قابل توجهی در کاربردهای مرتبط با هدایت الکتریکی از جمله خنک‌کننده‌های پیشرفته و حسگرهای زیستی به همراه داشته باشد. به طور کلی، این مطالعه نشان‌دهنده اهمیت انتخاب سیال پایه، دما و کسر حجمی مناسب در بهینه‌سازی خواص الکتریکی نانوسیالات مورد تحقیق است. نتایج این تحقیق به پژوهش‌های بیشتر در زمینه کاربردهای مختلف نانوسیالات و بهبود فرآیندهای صنعتی کمک می‌کند.

مراجع

- [1] A.A. Minea, E.I. Chereches, "Nanofluids for electrical applications", Elsevier, 2024.
- [2] M.M. Selim, S. El-Safty, A. Tounsi, M. Shenashen, *Alexandria Engineering Journal*, **76**, 2023, 75.
- [3] K. Sharma, N. Aggarwal, N. Kumar, A. Sharma, *Materials Today: Proceedings*, **1**, 2023, 125.
- [4] R.E. El-Shater, H. El Shimy, S.A. Saafan, M.A. Darwish, D. Zhou, A.V. Trukhanov, S.V. Trukhanov, F. Fakhry, *Journal of Alloys and Compounds*, **928**, 2022, 166954.
- [5] A. Ibiyemi, O. Akinrinola, G. Yusuf, S. Olaniyan, J. Lawal, M. Orojo, B. Osuporu, *Journal of the Nigerian Society of Physical Sciences*, **2**, 2024, 1897.
- [6] G.K. Poongavanam, S. Duraisamy, V. Vigneswaran, V. Ramalingam, *Materials Today: Proceedings*, **39**, 2021, 1532.
- [7] A.A. Minea, *Nanomaterials*, **9**, 2019, 1592.
- [8] M. Dolati, H. Khandan Fadafan, M. Abareshi, *Nano-Structures & Nano-Objects*, **39**, 2024, 101266.
- [9] A.A. Alrashed, A. Karimipour, S.A. Bagherzadeh, M.R. Safaei, M. Afrand, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **127**, 2018, 925.
- [10] P.B. Kharat, M. Shisode, S. Birajdar, D. Bhoyar, K. Jadhav, "Synthesis and characterization of water based NiFe_2O_4 ferrofluid". AIP Conference Proceedings, 2017.
- [11] K. Anu, J. Hemalatha, *Journal of Molecular Liquids*, **284**, 2019, 445.
- [12] S. Bagheli, H.K. Fadafan, R.L. Orimi, M. Ghaemi, *Powder Technology*, **274**, 2015, 426.
- [13] L. Shen, H. Wang, M. Dong, Z. Ma, H. Wang, *Physics Letters A*, **376**, 2012, 1053.

- [22] M.M. Heyhat, A. Irannezhad, *Journal of Molecular Liquids*, **268**, 2018, 169.
- [23] I. Zakaria, W. Mohamed, W. Azmi, A. Mamat, R. Mamat, W. Daud, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **119**, 2018, 460.
- [24] K.K. Sarojini, S.V. Manoj, P.K. Singh, T. Pradeep, S.K. Das, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **417**, 2013, 39.
- [25] Y. Guo, T. Zhang, D. Zhang, Q. Wang, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **117**, 2018, 280.
- [26] S. Sikdar, S. Basu, S. Ganguly, *International Journal of Nanoparticles*, **4**, 2011, 336.
- [27] S. Ganguly, S. Sikdar, S. Basu, *Powder Technology*, **196**, 2009, 326.
- [28] T. Iglesias, M. Rivas, R. Iglesias, J.C.R. Reis, F. Cohelho, *The Journal of Chemical Thermodynamics*, **66**, 2013, 123.
- [29] P. Jamilpanah, H. Pahlavanzadeh, A. Kheradmand, *Heat and Mass Transfer*, **53**, 2017, 1343.
- [30] M. Zawrah, R. Khattab, L. Girgis, H. El Daidamony, R.E.A. Aziz, *HBRC Journal*, **12**, 2016, 227.
- [14] J.C. Maxwell, "A treatise on electricity and magnetism", Clarendon press, 1873.
- [15] S. Gulati, S. Gokhale, V. Luthra, *International Journal of Materials Research*, **115**, 2024, 266.
- [16] A. Silambarasu, A. Manikandan, K. Balakrishnan, S.K. Jaganathan, E. Manikandan, J.S. Aanand, *Journal of nanoscience and nanotechnology*, **18**, 2018, 3523.
- [17] S. Maensiri, C. Masingboon, B. Boonchom, S. Seraphin, *Scripta materialia*, **56**, 2007, 797.
- [18] A. Mary Jacintha, A. Manikandan, K. Chinnaraj, P. Neeraja, *Journal of nanoscience and nanotechnology*, **15**, 2015, 9732.
- [19] W.E. Pottker, R. Ono, M.A. Cobos, A. Hernando, J.F. Araujo, A.C. Bruno, S.A. Lourenço, E. Longo, F.A. La Porta, *Ceramics International*, **44**, 2018, 17290.
- [20] F. boluki, H. Khandan Fadafan, R. Lotfi Orimi, *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, **2**, 2015, 285.
- [21] G. Ramalingam, R. Vignesh, C. Ragupathi, C.M. Magdalane, K. Kaviyarasu, J. Kennedy, *Surfaces and Interfaces*, **19**, 2020, 100475.