

سنتر و بررسی رفتار مغناطیسی نانوکامپوزیت مگنتیت- نانولوله‌های کربنی (Fe_3O_4 -CNTs) به منظور کاربرد در نانو سیالات مغناطیسی بر پایه آب

الهه اسماعیلی*، سید امین رونقی

دانشگاه صنعتی بیرجند، گروه مهندسی مواد، بیرجند، ایران.

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۶/۵/۸، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۶/۹/۱۱، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۶/۹/۲۱

چکیده در این تحقیق، نانوکامپوزیت مگنتیت بر پایه نانولوله‌های کربنی (Fe_3O_4 -CNTs) با استفاده از روش سولوترمال سنتز شد. ساختار نانوکامپوزیت Fe_3O_4 -CNTs توسط آنالیزهای متنوع از جمله میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)، پراش اشعه ایکس (XRD)، اشعه مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR)، مگنتومتر (VSM) و پتانسیل زتا (Zeta Potential) مورد مشخصه‌یابی قرار گرفت. بر اساس نتایج TEM و XRD اندازه ذرات و بلورک‌های مگنتیت، به ترتیب در حدود ۱۵۰-۲۵۰ نانومتر و ۷٫۳ نانومتر به دست آمد که موید به هم پیوستن ذرات ریزتر و تشکیل خوشه‌های بزرگ‌تر در حین سنتز می‌باشد. پس از بررسی نتایج آنالیز VSM، مشخص گردید که نانوکامپوزیت حاصل دارای خواص پارامغناطیس است. در انتها، رفتار حرارتی نانو سیال مغناطیسی Fe_3O_4 -CNTs بر پایه آب در حضور میدان مغناطیسی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج حاکی از افزایش ۳۰ درصدی ضریب انتقال حرارت نانو سیال پس از افزایش شدت میدان مغناطیسی حدود ۲٫۳ mT بود.

کلمات کلیدی: نانوکامپوزیت، سولوترمال، مگنتیت، نانولوله‌های کربنی، انتقال حرارت جابجایی.

The synthesis and investigation of magnetic behavior of magnetite-carbon nanotubes nanocomposite (Fe_3O_4 -CNTs) for water-based convective heat transfer application

Elaheh Esmaeili*, Seyed Amin Rounaghi

Birjand University of Technology, Department of Materials Engineering, Birjand, Iran.

Abstract In the present investigation, the carbon nanotube supported magnetite nanocomposite (Fe_3O_4 -CNTs) was prepared by the use of solvothermal technique. Fe_3O_4 -CNTs nanocomposite was fully characterized by various techniques including TEM, XRD, FTIR, VSM and zeta potential analyses. According to TEM and XRD results, the particle and the crystallite sizes were found to be 150-250 nm and 7.3 nm, respectively which were indicative of the agglomeration and formation of larger clusters. VSM analysis confirmed the paramagnetic characteristic of the resulted nanocomposite. Finally, the effect of magnetic field on the thermal behavior of water-based Fe_3O_4 -CNTs nanofluid was evaluated, showing an enhancement of heat transfer coefficient up to 30% at magnetic field of 2.3 mT.

Keywords: Nanocomposite, Solvothermal, Magnetite, Carbon nanotubes, Convective heat transfer.

۱- مقدمه

که در اثر میدان مغناطیسی متناوب، دست‌خوش نوسانات حرارتی جهت‌دار می‌شوند. این نوسانات حرارتی در اثر چرخش‌های خارجی نانوذرات (حرکات براونی) در سیال حامل و یا چرخش‌های داخلی ممان‌های مغناطیسی نسبت به شبکه بلوری، ایجاد می‌شوند [۲۰، ۲۱]. به‌طور کلی، چرخش‌های داخلی و خارجی در نانوذرات منجر به ایجاد اصطکاک شده و در پی آن، تولید حرارت می‌کنند. در سال‌های اخیر، برخی پژوهش‌های علمی [۱۷، ۲۲، ۲۳]، نقش میدان مغناطیسی بر افزایش عملکرد نانوسیال در پدیده‌های انتقال حرارت مورد بررسی و ارزیابی قرار داده‌اند. اکثر این تحقیقات، تنها به موضوع تاثیر میدان مغناطیسی بر ضریب هدایت حرارتی پرداخته و فقط تعداد نسبی کمی از آن‌ها [۲۴-۲۶]، تاثیر شدت میدان مغناطیسی بر ضریب انتقال حرارت نانوسیال در جریان‌های جابجایی اجباری را مورد بررسی قرار داده‌اند.

با توجه به مطالب فوق، در تحقیق حاضر، سنتز نانوکامپوزیت مگنتیت- نانولوله‌های کربنی به کمک روش سولوترمال مدنظر قرار گرفته است. همچنین، در گام بعدی، رفتار مغناطیسی نانوکامپوزیت سنتز شده بررسی می‌شود و خواص انتقال حرارت جابجایی نانوسیال برپایه این نانوذرات کامپوزیتی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۲- روش تحقیق

۲-۱ مواد اولیه

به‌منظور سنتز نانوکامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-CNTs}$ ، از مواد اولیه شامل کلرید آهن III ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)، اتیلن‌گلیکول ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$)، استات سدیم ($\text{C}_2\text{H}_3\text{NaO}_2$)، پلی‌وینیل‌پیرولیدون (PVP) و نانولوله‌های کربنی (CNTs) استفاده شده است. همه مواد شیمیایی مذکور، از شرکت مرک و نانولوله‌های کربنی نیز از پژوهشگاه صنعت نفت تهیه شدند. کلیه مواد، بدون هرگونه خلص‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۲ سنتز نانوکامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-CNTs}$

جهت سنتز نانوساختارهای مگنتیت بر پایه نانولوله‌های کربنی، از روش سولوترمال استفاده شد. به‌طور خلاصه، ابتدا، ۰/۴۵۴ گرم کلرید آهن III در ۷۰ سی‌سی اتیلن‌گلیکول حل شده و سپس، به این محلول، ۰/۱ گرم نانولوله کربنی اضافه

ترکیب اکسید آهن III (Fe_3O_4) یا مگنتیت از جمله مواد اکسیدی محسوب می‌شود که به‌دلیل رفتار مغناطیسی همواره مورد توجه محققین بوده است. مگنتیت از مواد پرکاربرد در زمینه‌های انتقال انرژی به‌عنوان نانوسیال [۱-۳]، مواد ذخیره‌کننده داده‌های مغناطیسی [۴]، زمینه‌های پزشکی و بیوپزشکی [۵، ۶]، ژئومترومتري [۷] و ... محسوب می‌شود. در سال‌های اخیر، تحقیقات فراوانی به‌ویژه در حوزه نانوفناوری جهت سنتز مگنتیت با شکل‌ها و اندازه‌های متفاوت صورت گرفته است، به‌گونه‌ای که تاکنون اشکال متنوعی نظیر نانوسیم‌ها، نانوکره و نانوساختارهای توخالی [۸-۱۲] توسط محققین سنتز شده و مورد آنالیز قرار گرفته‌اند.

علی‌رغم وجود روش‌های متعدد جهت سنتز مگنتیت، از آنجایی‌که اکثر این روش‌ها با مشکلاتی از جمله استفاده از مواد اولیه گران‌قیمت و سمی، تولید پسماندهای مخرب برای محیط زیست، میزان تولید کم و عدم ایمنی لازم همراه هستند، طراحی یک روش ساده و موثر جهت تولید نانوساختارهای مگنتیت مطلوب می‌باشد. در همین راستا، روش سولوترمال، به‌عنوان گزینه‌ای ارزان، ساده و فاقد خطرات زیست‌محیطی مطرح می‌باشد. به‌عنوان مثال، ژو و همکارانش [۱۳]، از این روش برای تولید نانوساختارهای کروی‌شکل مگنتیت با استفاده از پیش‌ماده کلرید آهن استفاده نموده و از پلی‌وینیل‌پیرولیدون (PVP) به‌عنوان عامل محافظ و از استات سدیم به‌عنوان عامل رسوب‌دهنده نانوساختارهای حاصل استفاده نمودند. برخی از محققین [۱۴، ۱۵] نیز به‌منظور افزایش عملکرد نانوساختارهای کروی‌شکل اکسید آهن از نانوساختارهای کربنی استفاده نموده و بدین‌وسیله، با ایجاد پوشش کربنی روی سطوح کروی مگنتیت، کامپوزیتی از اکسید آهن برپایه کربن تولید نمودند. در همین راستا، نانولوله‌های کربنی به‌عنوان آلوتروپ کربن با خواص جهت‌دار و منحصر به‌فرد در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. به‌صورت خاص، نانوکامپوزیت مگنتیت- نانولوله‌های کربنی ($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-CNTs}$)، دارای خواص چشم‌گیر و کاربرد فراوان در تولید رنگ‌های مغناطیسی [۱۶]، باتری‌های یونی لیتیوم [۱۷، ۱۸] و جوهر پرینت [۱۹] می‌باشند.

نانوذرات مغناطیسی حاوی ممان‌های مغناطیسی هستند

مطابق شکل ۱، سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده، از لوله‌ای مسی به قطر ۸٫۶۵ میلی‌متر و طولی معادل ۱٫۲ متر ساخته شده است. دمای سیال ورودی و خروجی توسط دو ترموکوپل ثبت شده و پنج ترموکوپل قرار گرفته با فواصل یکسان بر روی سطح لوله مسی، وظیفه ثبت دمای سطح لوله را بر عهده دارند. این بخش از سیستم آزمایشگاهی به‌خوبی ایزوله شده و از هدررفت حرارت در این قسمت که اصلی‌ترین بخش سیستم انتقال حرارت به‌شمار می‌رود، جلوگیری شده است. یک المنت حرارتی وظیفه ایجاد شار حرارتی ثابت در این بخش را بر عهده دارد که این شار توسط یک منبع تغذیه جریان متناوب قابل کنترل است. در این پژوهش، شار حرارتی ثابت به میزان ۱۰۰ وات به لوله مسی اعمال شد. نانوسیال پس از خروج از بخش آزمایش، توسط یک سیستم خنک‌کننده سرد شده و دوباره توسط پمپ به بخش آزمایش وارد می‌شود.

ضریب انتقال حرارت نانوسیال با استفاده از رابطه زیر به‌دست می‌آید [۲۷]:

$$h(x) = \frac{q''}{T_s(x) - T_m(x)} \quad (1)$$

در رابطه فوق، $h(x)$ ، ضریب انتقال حرارت موضعی، q'' ، شار انتقال حرارت، $T_s(x)$ ، دمای موضعی سطح لوله مسی و $T_m(x)$ ، دمای موضعی میانگین بالک سیال می‌باشد. دمای موضعی میانگین بالک سیال نیز با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$T_{m,x} = T_{m,i} + \frac{q'' \cdot P}{m \cdot C_p} \quad (2)$$

در رابطه بالا نیز، $T_{m,i}$ ، دمای ورودی نانوسیال به بخش آزمایش، P ، محیط لوله مسی، x ، فاصله از ابتدای بخش آزمایش و m و C_p ، به‌ترتیب، ظرفیت ویژه حرارتی و دبی جرمی نانوسیال می‌باشند.

۳- نتایج و بحث

شکل ۲، الگوی پراش اشعه ایکس نانوکامپوزیت Fe_3O_4 -CNTs را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۲، پیک موجود در $2\theta = 25.8^\circ$ مربوط به صفحات (۰۰۲) شبکه هگزاگونال کربن

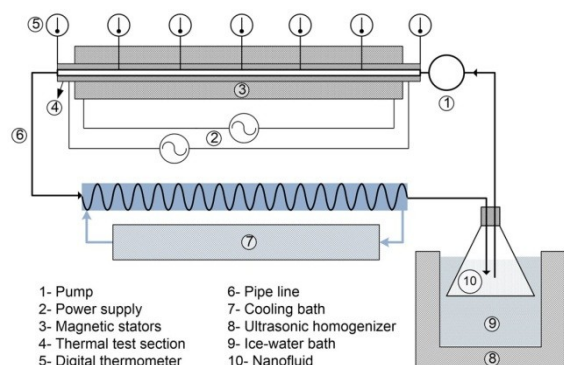
گردید. پس از هم‌زدن کامل مواد به کمک هم‌زن مغناطیسی و رسیدن به توزیع یکنواخت، ۲٫۳ گرم استات‌سدیم به محلول اضافه شد. جهت انجام فرایند سولوترمال، مخلوط نهایی به یک اتوکلاو ۵۰۰ میلی‌لیتری دارای روکشی از تفلون منتقل گردید و برای مدت ۱۶ ساعت تحت دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. پس از آن، محصول باقی‌مانده فیلتر شده و توسط آون خلاء در دمای ۹۰°C خشک گردید.

۲-۳ مشخصه‌یابی مواد

به‌منظور بررسی اندازه و میزان توزیع ذرات مگنتیت از دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مدل CM-FEG-Philips با ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۲۰ keV استفاده شد. آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) با استفاده از دستگاه مدل Philips PW-1840 مجهز به کاتد مسی صورت گرفت. آنالیز FTIR توسط دستگاه PerkinElmer - Frontier در محدوده $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ و به روش تهیه قرص KBr انجام شد. پتانسیل زتا، توسط دستگاه مدل Malvern مورد آنالیز قرار گرفت. علاوه بر این، خواص مغناطیسی نانوساختارهای Fe_3O_4 برپایه نانولوله‌های کربنی با استفاده از دستگاه مگنتومتر (VSM) مدل Lake Shore 7400 اندازه‌گیری شد.

۲-۴ بررسی خواص انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال Fe_3O_4 -CNTs برپایه آب

نانوسیال Fe_3O_4 -CNTs با افزودن ۰٫۰۰۵ درصد وزنی از نانوساختار حاصل به آب مقطر بدون استفاده از سورفکتانت تولید شد و سپس، به کمک سیستم آزمایشگاهی بررسی انتقال حرارت مورد ارزیابی قرار گرفت. تصویر شماتیک سیستم آزمایشگاهی بررسی عملکرد حرارتی نانوسیال در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. سیستم آزمایشگاهی بررسی رفتار حرارتی نانوسیال.

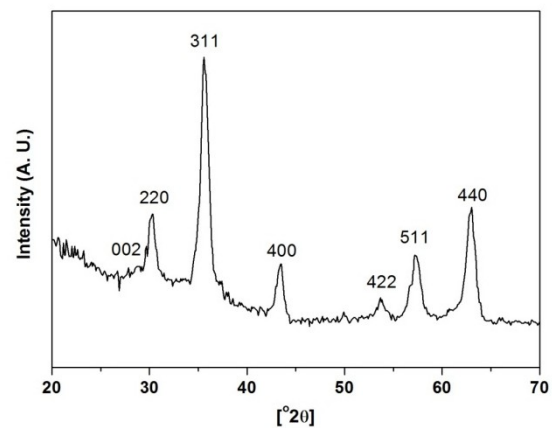
مطابق جدول ۱، پیکهای مشاهده شده در طول موج های 1024 ، 1271 ، 1373 ، 1427 ، 1672 ، 2865 ، 2923 و 2954 مربوط به ناخالصیهای باقی مانده از PVP مورد استفاده در ساختارهای نانوکامپوزیت $Fe_3O_4/CNTs$ می باشد [۳۴، ۳۵]. همچنین، پیکهای موجود در 2360 و 3448 ، به ترتیب، مربوط به جذب دی اکسید کربن محیط و گروههای O-H مربوط به جذب آب روی سطح نانوکامپوزیت می باشند [۳۶].

جدول ۱. مقایسه پیکهای شاخص FTIR نمونه های Fe_3O_4 ، PVP و $Fe_3O_4/CNTs$

PVP	Fe_3O_4	$Fe_3O_4/CNTs$	عنوان پیک
	۴۵۲	۴۴۸	نوسانات پیوند Fe-O
	۵۷۳	۵۸۴	نوسانات پیوند Fe-O
۱۰۱۷	۱۰۳۹	۱۰۲۴	نوسانات پیوند C-C و CH_2
۱۲۸۰	۱۲۷۲	۱۲۷۱	نوسانات کششی C-N و CH_2
۱۳۷۱	۱۳۷۳	۱۳۷۳	نوسانات خمشی C-H
۱۴۳۰	۱۴۲۹	۱۴۲۷	پیوند خمشی CH_2
۱۶۷۴	۱۶۶۳	۱۶۷۲	نوسانات کششی C-N و C-O
۲۸۷۳	۲۸۶۴	۲۸۶۵	نوسانات کششی C-H
۲۹۲۲	۲۹۲۵	۲۹۲۳	نوسانات کششی متقارن گروههای CH_2 خطی
۲۹۵۰	۲۹۵۲	۲۹۵۴	نوسانات کششی نامتقارن گروههای CH_2 در حلقه بنزنی
۳۴۴۶	۳۴۴۷	۳۴۴۸	نوسانات کششی پیوند O-H

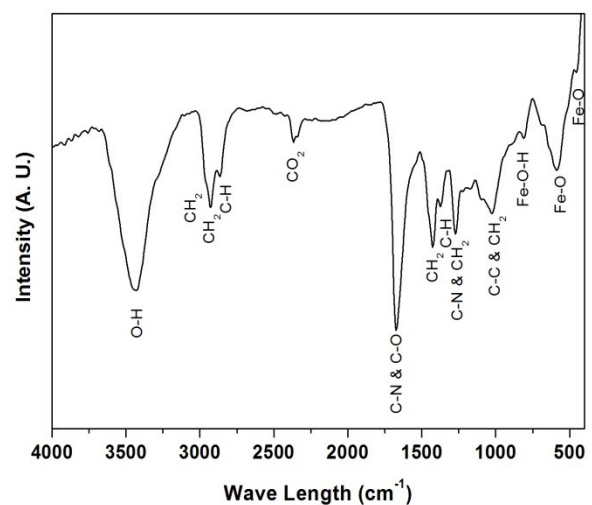
شکل ۴، تصاویر TEM نانوکامپوزیت مگنتیت برپایه نانولوله های کربنی را نشان می دهد. تصاویر ۴ الف و ب، مربوط به نانولوله های کربنی عامل دار شده، پیش از فرآیند سنتز نانوکامپوزیت است. براساس این تصاویر، نانولوله ها دارای قطر متوسط ۴۰ نانومتر بوده و در بخش انتهایی اغلب آنها ذرات ناخالصی (ناشی از کاتالیست کبالت-مولیبدن) مشاهده می شود. این ذرات کاتالیستی طی فرآیند سنتز نانولوله های کربنی مورد استفاده قرار گرفته و در حین اسیدشویی به طور کامل حذف نشده اند [۳۷]. شکل های ۴ ج و د، تصاویر نانوساختارهای کروی شکل Fe_3O_4 برپایه نانولوله های کربنی را نشان می دهد. مطابق تصاویر ذرات مگنتیت، به طور عمده کروی شکل و دارای قطر حدود ۲۵۰-۱۵۰ نانومتر می باشند. با دقت در تصویر

در نانولوله های کربنی می باشد. سایر پیکها که توسط اندیس صفحات بلوری ۲۲۰، ۳۱۱، ۴۰۰، ۴۲۲، ۵۱۱، ۴۴۰، ۶۲۰ و ۶۲۲ مشخص شده اند، متعلق به ساختار ذرات Fe_3O_4 می باشند [۲۸، ۲۹]. اندازه میانگین بلورکهای ذرات مگنتیت براساس معادله شرر در حدود $7/3$ نانومتر محاسبه شده است که حاکی از نانوساختار بودن ذرات مگنتیت سنتز شده است.



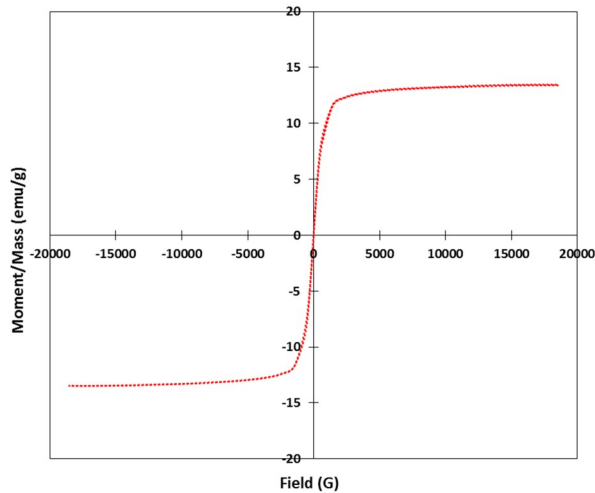
شکل ۲. الگوی پراش اشعه ایکس نانوکامپوزیت Fe_3O_4-CNTs

شکل ۳، تصویر طیف FTIR نانوکامپوزیت Fe_3O_4-CNTs را نشان می دهد. به منظور مقایسه، پیکهای شاخص Fe_3O_4 ، PVP و $Fe_3O_4/CNTs$ در جدول ۱ آمده است. بر اساس نتایج شکل ۳ و جدول ۱، پیک ظاهر شده در طول موج 584 cm^{-1} مربوط به جذب پیوندهای Fe-O می باشد [۳۰، ۳۱]. براساس منابع علمی [۳۲]، پیکهای مشاهده شده در طول موجهای 796 و 864 ، به حضور پیوند Fe-O-H و نوسانات خمشی آن اشاره دارد [۳۳].

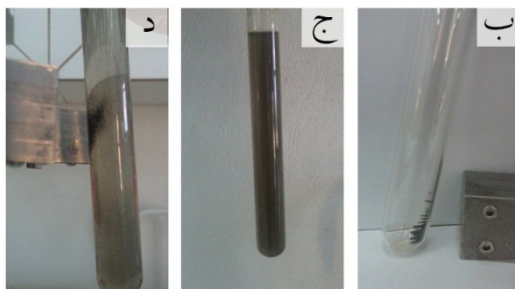
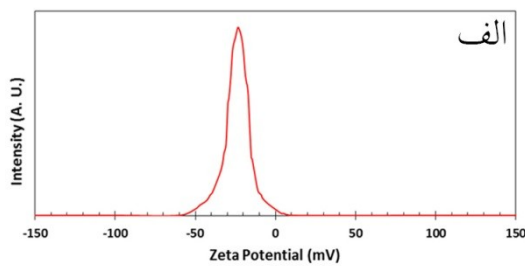


شکل ۳. طیف FTIR نانوکامپوزیتی Fe_3O_4-CNTs

مگنتیت برپایه نانولوله‌های کربنی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که جهت تهیه نانوسیال، از افزودن هر گونه سورفکتانت جهت افزایش پایداری نانوکامپوزیت در آب اجتناب شده است.



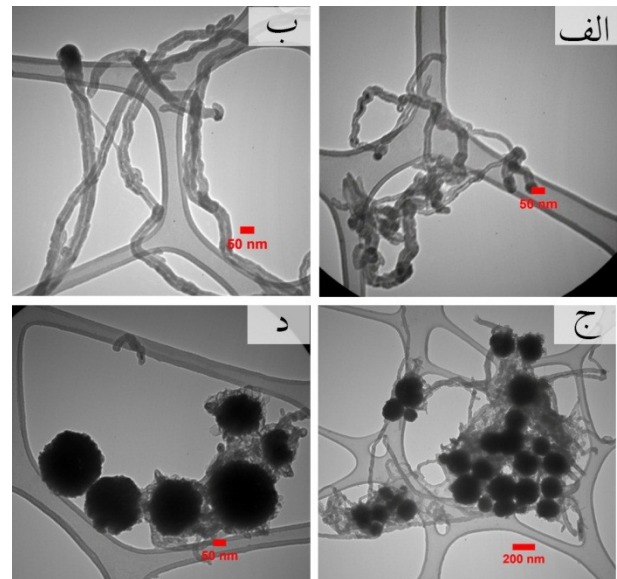
شکل ۵. منحنی مغناطیسی شدن وابسته به میدان نانوکامپوزیت Fe_3O_4 -CNTs.



شکل ۶. منحنی پتانسیل زتای نانوکامپوزیت Fe_3O_4 -CNTs (الف)، رفتار مغناطیسی نانوکامپوزیت Fe_3O_4 -CNTs (ب)، پایداری نانوسیال Fe_3O_4 -CNTs (ج) و رفتار مغناطیسی نانوسیال Fe_3O_4 -CNTs (د).

شکل ۶ ب، تاثیر میدان مغناطیسی را بر جهت‌گیری نانوساختارهای مغناطیسی Fe_3O_4 -CNTs پودری در عدم حضور سیال نشان می‌دهد. به‌منظور بررسی میزان پایداری نانوکامپوزیت در سیال آب، نمونه با درصد مدنظر درون آب پراکنده شده و به مدت حداقل سه ساعت پایدار ماند (شکل ۶ ج). شکل ۶ د، جذب ذرات نانوکامپوزیت را توسط آهن‌ربا پس از تهیه نانوسیال نشان می‌دهد که به‌خوبی بیانگر خواص

TEM کره‌های مگنتیت، به‌خوبی مشخص است که هر کره از نانوذرات کروی بسیار کوچکی تشکیل شده که در طی فرآیند سولوترمال درون اتوکلاو تحت فشار آگلومره شده‌اند.



شکل ۴. تصاویر TEM از نانولوله‌های کربنی اولیه (الف و ب) و نانوکامپوزیت Fe_3O_4 -CNTs (ج و د).

شکل ۵، گراف VSM نانوکامپوزیت Fe_3O_4 -CNTs را نشان می‌دهد. براساس داده‌های شکل ۵، مقدار مغناطیسی شدن اشباع نمونه مورد بررسی در دمای اتاق، برابر 13.48 mu/g می‌باشد. این در حالی است که مغناطش اشباع بالک مگنتیت 92 emu/g است [۱۰]. مقدار وادارندگی (Coercivity) نمونه سنتز شده ناچیز بوده و مقدار آن معادل 10.751 G می‌باشد. براساس شکل ۵، هیچ‌گونه پسماند مغناطیسی در نمودار مورد بررسی مشاهده نمی‌شود که نشان‌دهنده خواص پارامغناطیس در نانوساختارهای سنتز شده می‌باشد [۳۸]. به عبارت دیگر، در مواد پارامغناطیس، ممان‌های مغناطیسی ذرات در پاسخ به میدان مغناطیسی عکس‌العمل نشان داده و در راستای میدان جهت‌گیری می‌کنند [۳۹]. بنابراین، می‌توان انتظار داشت که قرارگیری نانوساختارهای حاصل در معرض میدان مغناطیسی خارجی، منجر به تشکیل دوقطبی‌های هم راستا با جهت میدان شود [۴۰، ۴۱].

شکل ۶ الف، نتیجه آنالیز پتانسیل زتا را برای نانوکامپوزیت Fe_3O_4 -CNTs نشان می‌دهد. مقدار پتانسیل زتا برای این نمونه برابر 23 میلی‌ولت اندازه‌گیری شده است. این مقدار که نشان‌دهنده بار سطحی مناسب ذرات می‌باشد، براساس منابع علمی [۴۲، ۴۳]، پایداری خوب ساختارهای

ذرات می‌باشد که با تجمع ذرات و چسبیدن آنها با یکدیگر همراه است، لذا، از آنجا که سطح انتقال حرارت نانو مواد در نتیجه تجمع آنها کاهش می‌یابد، کاهش خواص حرارتی نانو سیال قابل انتظار است.

۴ - نتیجه گیری

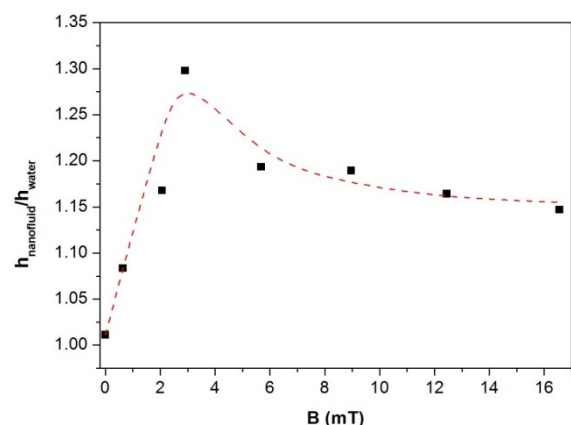
نانوکامپوزیت اکسید آهن بر پایه نانولوله‌های کربنی توسط روش سولوترمال سنتز گردید و با استفاده از روش‌های مختلف مشخصه‌یابی، مورد ارزیابی و آنالیز قرار گرفت. مشاهدات صورت گرفته به کمک TEM حاکی از آگلومره شدن نانوذرات کوچک و ایجاد ذرات کروی Fe_3O_4 با قطر معادل ۲۵۰-۱۵۰ نانومتر بود. همچنین، براساس نتایج XRD، اندازه بلورکها در حدود ۷/۳ نانومتر اندازه‌گیری شد. براساس نتایج VSM، نشان دادن کره‌های مگنتیت بر روی نانولوله‌های کربنی، باعث ایجاد خاصیت مغناطیسی نانوکامپوزیت Fe_3O_4 -CNTs گردیده است. به گونه‌ای که، به خوبی قابل کاربرد در زمینه‌های انتقال انرژی هم‌چون نانوسیالات مغناطیسی می‌باشد. نتایج تحقیق نشان داد که حضور میدان مغناطیسی تا حد قابل ملاحظه‌ای منجر به بهبود عملکرد در فرآیندهای انتقال حرارت جابجایی می‌شود.

مراجع

- Butter, K., Philipse, A.P., Vroege, G.J., Synthesis and Properties of Iron Ferrofluids, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 252 (2002) 1-3.
- Hong, R.Y., Pan, T.T., Li, H.Z., Microwave Synthesis of Magnetic Fe_3O_4 Nanoparticles Used as a Precursor of Nanocomposites and Ferrofluids, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 303 (2006) 60-68.
- Raj, K., Moskowitz, B., Casciari, R., Advances in Ferrofluid Technology, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 149 (1995) 174-180.
- Zeng, H., Li, J., Liu, J.P., Wang, Z.L., Sun, S., Exchange-Coupled Nanocomposite Magnets by Nanoparticle Self-Assembly, *Nature*, 420 (2002) 395-398.
- Zhang, G., Liu, Y., Zhang, C., Hu, W., Xu, W., Li, Z., et al., Aqueous Immune Magnetite Nanoparticles for Immunoassay, *Journal of Nanoparticle Research*, 11 (2009) 441-448.
- Doyle, P.S., Bibette, J., Bancaud, A., Viovy, J.-L., Self-Assembled Magnetic Matrices for DNA Separation Chips, *Science*, 295 (2002) 2237.
- Chiba, H., Chacko, T., Clayton, R.N., Goldsmith, J.R., Oxygen Isotope Fractionations Involving Diopside, Forsterite, Magnetite, and Calcite: Application to Geothermometry, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53 (1989) 2985-2995.
- Zhang, L., Zhang, Y., Fabrication and Magnetic

مغناطیسی نانو سیال تولید شده می‌باشد.

شکل ۷ رفتار حرارتی نانو سیال Fe_3O_4 -CNTs بر پایه آب تحت تاثیر میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد. همان گونه که از نتایج نیز مشخص است، وجود میدان مغناطیسی و تغییر شدت آن بر عملکرد حرارتی نانو سیال تاثیر بسزایی دارد، به طوری که، پس از اعمال میدان مغناطیسی حدود ۲/۳ mT، ضریب انتقال حرارت نانو سیال افزایشی حدود ۳۰٪ را نشان می‌دهد، این در حالی است که افزایش بیشتر شدت میدان، با کاهش خواص انتقال حرارت نانو سیال همراه است. بنابر آنچه پیش از این نیز بیان شد، از آنجا که نانو ساختارهای Fe_3O_4 -CNTs دارای رفتار پارامغناطیس می‌باشند، میدان مغناطیسی بر رفتار ممان‌های مغناطیسی تاثیر گذاشته و دوقطبی‌های موجود، در اثر اعمال میدان مغناطیسی متناوب در راستای میدان جهت گیری می‌کنند. لذا، علاوه بر حرکت براونی ذرات، انتظار می‌رود ممان‌های مغناطیسی نیز حرکت نموده و ایجاد حرارت نمایند [۲۰، ۲۱]. بنابراین، حتی در درصدهای پایین نیز، افزایش ولتاژ جریان و به عبارت دیگر، افزایش شدت میدان اعمال شده بر نانو سیال حاصل منجر به افزایش حرارت کلی نانو سیال گردیده و عملکرد نانو سیال را از نظر انتقال حرارت بهبود می‌بخشد. البته، همان طور که در شکل ۷ نیز نشان داده شده است، این افزایش تا جایی که شدت میدان مغناطیسی به ۲/۳ mT می‌رسد، ادامه داشته و پس از آن، به تدریج عملکرد حرارتی نانو سیال کاهش می‌یابد.



شکل ۷. تاثیر وجود میدان مغناطیسی متناوب بر نسبت ضرایب انتقال حرارت نانو سیال Fe_3O_4 -CNTs/water به آب.

در واقع، کاهش انتقال حرارت نانو سیال، علی‌رغم افزایش شدت میدان مغناطیسی به دلیل افزایش حرکات براونی

- al., Experimental Study on Heat Transfer Augmentation of Graphene Based Ferrofluids in Presence of Magnetic Field, *Applied Thermal Engineering*, 114 (2017) 415-427.
25. Amani, P., Amani, M., Mehrali, M., Vajravelu, K., Influence of Quadrupole Magnetic Field on Mass Transfer in an Extraction Column in the Presence of $MnFe_2O_4$ Nanoparticles, *Journal of Molecular Liquids*, 238 (2017) 145-154.
 26. Esmaili, E., Ghazanfar Chaydareh, R., Rounaghi, S.A., The Influence of the Alternating Magnetic Field on the Convective Heat Transfer Properties of Fe_3O_4 -Containing Nanofluids through the Neel and Brownian Mechanisms, *Applied Thermal Engineering*, 110 (2017) 1212-1219.
 27. Amrollahi, A., Rashidi, A.M., Lotfi, R., Emami Meibodi, M., Kashefi, K., Convection Heat Transfer of Functionalized MwnT in Aqueous Fluids in Laminar and Turbulent Flow at the Entrance Region, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37 (2010) 717-723.
 28. Sun, J., Zhou, S., Hou, P., Yang, Y., Weng, J., Li, X., et al., Synthesis and Characterization of Biocompatible Fe_3O_4 Nanoparticles, *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 80 (2007) 333-341.
 29. El Ghandoor, H., Zidan, H., Khalil, M.M., Ismail, M., Synthesis and Some Physical Properties of Magnetite (Fe_3O_4) Nanoparticles, *International Journal of Electrochemical Science*, 7 (2012) 5734-5745.
 30. Ma, M., Zhang, Y., Yu, W., Shen, H.-y., Zhang, H.-q., Gu, N., Preparation and Characterization of Magnetite Nanoparticles Coated by Amino Silane, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 212 (2003) 219-226.
 31. Saif, B., Wang, C., Chuan, D., Shuang, S., Synthesis and Characterization of Fe_3O_4 Coated on APTES as Carriers for Morin-Anticancer Drug, *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, 6 (2015) 267-275.
 32. Vinosel, V.M., PersisAmaliya, A., Vijayalakshmi, S., Pauline, S., Synthesis and Characterization of Fe_3O_4 Nanopowder and Dielectric Studies, *International Journal of Technical Research and Applications*, 38 (2016) 17-19.
 33. Rodes, A., Pastor, E., Iwasita, T., An Ftir Study on the Adsorption of Acetate at the Basal Planes of Platinum Single-Crystal Electrodes, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 376 (1994) 109-118.
 34. Borodko, Y., Habas, S.E., Koebel, M., Yang, P., Frei, H., Somorjai, G.A., Probing the Interaction of Poly(Vinylpyrrolidone) with Platinum Nanocrystals by Uv-Raman and Ftir, *The Journal of Physical Chemistry B*, 110 (2006) 23052-23059.
 35. Haghightat, F., Mokhtary, M., Preparation and Characterization of Polyvinylpyrrolidone/ Magnetite Decorated Carboxylic Acid Functionalized Multi-Walled Carbon Nanotube (PVP/MWCNT- Fe_3O_4) Nanocomposite, *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 27 (2017) 779-787.
 36. Slistan-Grijalva, A., Herrera-Urbina, R., Rivas-Silva, J.F., Ávalos-Borja, M., Castellón-Barraza, F.F., Posada-Amarillas, A., Synthesis of Silver Nanoparticles in a Polyvinylpyrrolidone (PVP) Paste, and Their Optical Properties in a Film and in Ethylene Glycol, *Materials Research Bulletin*, 43 (2008) 90-96.
 37. Esmaili, E., Rashidi, A.M., Khodadadi, A.A., Mortazavi, Y., Rashidzadeh, M., Palladium-Tin Nanocatalysts in High Concentration Acetylene Hydrogenation: A Novel Deactivation Mechanism, *Fuel Processing Technology*, 120 (2014) 113-122.
 - Properties of Fe_3O_4 Nanowire Arrays in Different Diameters, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 321 (2009) L15-L20.
 9. Kovalenko, M.V., Bodnarchuk, M.I., Lechner, R.T., Hesser, G., Schäffler, F., Heiss, W., Fatty Acid Salts as Stabilizers in Size- and Shape-Controlled Nanocrystal Synthesis: The Case of Inverse Spinel Iron Oxide, *Journal of the American Chemical Society*, 129 (2007) 6352-6353.
 10. Sun, Q., Ren, Z., Wang, R., Chen, W., Chen, C., Magnetite Hollow Spheres: Solution Synthesis, Phase Formation and Magnetic Property, *Journal of Nanoparticle Research*, 13 (2011) 213-220.
 11. Feng, L., Jiang, L., Mai, Z., Zhu, D., Polymer-Controlled Synthesis of Fe_3O_4 Single-Crystal Nanorods, *Journal of Colloid and Interface Science*, 278 (2004) 372-375.
 12. Zhong, L.S., Hu, J.S., Liang, H.P., Cao, A.M., Song, W.G., Wan, L.J., Self-Assembled 3D Flowerlike Iron Oxide Nanostructures and Their Application in Water Treatment, *Advanced Materials*, 18 (2006) 2426-2431.
 13. Zhu, M., Diao, G., Synthesis of Porous Fe_3O_4 Nanospheres and Its Application for the Catalytic Degradation of Xylenol Orange, *The Journal of Physical Chemistry C*, 115 (2011) 18923-1834.
 14. Chen, W., Li, X., Xue, G., Wang, Z., Zou, W., Magnetic and Conducting Particles: Preparation of Polypyrrole Layer on Fe_3O_4 Nanospheres, *Applied Surface Science*, 218 (2003) 216-222.
 15. Chen, J.S., Zhang, Y., Lou, X.W., One-Pot Synthesis of Uniform Fe_3O_4 Nanospheres with Carbon Matrix Support for Improved Lithium Storage Capabilities, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 3 (2011) 3276-3279.
 16. Prolongo, S.G., Meliton, B.G., Del Rosario, G., Ureña, A., New Alignment Procedure of Magnetite-Cnt Hybrid Nanofillers on Epoxy Bulk Resin with Permanent Magnets, *Composites Part B: Engineering*, 46 (2013) 166-172.
 17. Guo, Q., Guo, P., Li, J., Yin, H., Liu, J., Xiao, F., et al., Fe_3O_4 -Cnts Nanocomposites: Inorganic Dispersant Assisted Hydrothermal Synthesis and Application in Lithium Ion Batteries, *Journal of Solid State Chemistry*, 213 (2014) 104-109.
 18. He, Y., Huang, L., Cai, J.-S., Zheng, X.-M., Sun, S.-G., Structure and Electrochemical Performance of Nanostructured Fe_3O_4 /Carbon Nanotube Composites as Anodes for Lithium Ion Batteries, *Electrochimica Acta*, 55 (2010) 1140-1144.
 19. Zhou, X., Fang, C., Li, Y., An, N., Lei, W., Preparation and Characterization of Fe_3O_4 -CNTs Magnetic Nanocomposites for Potential Application in Functional Magnetic Printing Ink, *Composites Part B: Engineering*, 89 (2016) 295-302.
 20. Fortin, J.-P., Gazeau, F., Wilhelm, C., Intracellular Heating of Living Cells through Néel Relaxation of Magnetic Nanoparticles, *European Biophysics Journal*, 37 (2008) 223-228.
 21. Hergt, R., Andra, W., d'Ambly, C.G., Hilger, I., Kaiser, W.A., Richter, U., et al., Physical Limits of Hyperthermia Using Magnetite Fine Particles, *IEEE Transactions on Magnetics*, 34 (1998) 3745-3754.
 22. Hong, H., Wright, B., Wensel, J., Jin, S., Ye, X.R., Roy, W., Enhanced Thermal Conductivity by the Magnetic Field in Heat Transfer Nanofluids Containing Carbon Nanotube, *Synthetic Metals*, 157 (2007) 437-440.
 23. John, P., Shima, P.D., Baldev, R., Evidence for Enhanced Thermal Conduction through Percolating Structures in Nanofluids, *Nanotechnology*, 19 (2008) 305706.
 24. Sadeghinezhad, E., Mehrali, M., Akhiani, A.R., Tahan Latibari, S., Dolatshahi-Pirouz, A., Metselaar, H.S.C., et

38. Lu, A.-H., Salabas, E.L., Schüth, F., Magnetic Nanoparticles: Synthesis, Protection, Functionalization, and Application, *Angewandte Chemie International Edition*, 46 (2007) 1222-1244.
39. Nan, A., Craciunescu, I., Turcu, R. Aspects on Fundaments and Applications of Conducting Polymers: A Practical Approach. Kluwer Academic Publishers New York, (1999).
40. Nandwana, V., Elkins, K.E., Poudyal, N., Chaubey, G.S., Yano, K., Liu, J.P., Size and Shape Control of Monodisperse FePt Nanoparticles, *The Journal of Physical Chemistry C*, 111 (2007) 4185-4189.
41. Lopez, J.A., González, F., Bonilla, F.A., Zambrano, G., Gómez, M.E., Synthesis and Characterization of Fe₃O₄ Magnetic Nanofluid, *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 30 (2010) 60-66.
42. Mahendran, V., Philip, J., An Optical Technique for Fast and Ultrasensitive Detection of Ammonia Using Magnetic Nanofluids, *Applied Physics Letters*, 102 (2013) 063107.
43. White, B., Banerjee, S., O'Brien, S., Turro, N.J., Herman, I.P., Zeta-Potential Measurements of Surfactant-Wrapped Individual Single-Walled Carbon Nanotubes, *The Journal of Physical Chemistry C*, 111 (2007) 13684-13690.