



مقاله کامل پژوهشی

ساخت مبدل انرژی ارتعاشی به الکتریکی با به کارگیری فروسیال Fe_3O_4 مرضیه اثنا عشری^۱، بابک هاشمی^{۲*}^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، فارس، ایران^۲ دانشیار، بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، فارس، ایران

تاریخچه مقاله:

ثبت اولیه: ۱۳۹۸/۰۳/۲۲

دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۹/۰۷/۱۳

پذیرش قطعی: ۱۴۰۰/۰۴/۰۶

کلیدواژه‌ها:

مگنتایت،

هم‌رسوبی،

اولئیک اسید،

فروسیال،

مبدل انرژی

چکیده از دیرباز، مبدل‌های انرژی الکترومغناطیس، به‌عنوان تأمین‌کننده انرژی الکتریکی، مورد استفاده قرار می‌گرفتند. طراحی و کاربرد این مبدل‌ها، به دلیل به کارگیری مغناطیس‌های جامد، جهت القای مغناطیسی در شکل‌ها و بسامدهای محیطی مختلف، محدود شده است. اخیراً، سیال‌های مغناطیسی به‌عنوان جایگزین مغناطیس جامد، برای کاربرد این مبدل‌ها در محدوده بسامدی پایین و طراحی‌های متفاوت، مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، هدف بر آن بوده است که مبدلی ساده، با استفاده از فروسیال مگنتایت، ساخته شود. برای این منظور، نانوذرات مگنتایت، به روش هم‌رسوبی شیمیایی، سنتز و سپس، اصلاح سطحی آن‌ها، با اولئیک اسید (روغن آفتابگردان)، انجام شد. برای بررسی ویژگی‌های ذرات سنتز شده، از روش‌های شناسایی XRD، FTIR، VSM و SEM استفاده شد. متوسط اندازه ذرات، حدود ۷۰ نانومتر و مغناطش اشباع آن‌ها، ۴۱/۶۳ emu/gr بود. سه نوع سیال آب، نفت سفید و روغن ترمز، به منظور ساخت فروسیال پایدار مگنتایت، استفاده شد. پایدارترین فروسیال، فروسیال بر پایه روغن ترمز بود. تبدیل نوسانات مکانیکی به ولتاژ القایی، توسط مبدل طراحی شده، انجام شد و نتایج نشان داد ولتاژ القاء شده در مبدل، با افزایش بسامد نوسانات و میدان مغناطیسی اعمالی، افزایش می‌یابد.

<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.178254.1019>URL: http://www.jamt.ir/article_126427.html

Original Research Article

Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT): Vol. 10, No. 1, (Spring 2021), 65-74

Fabrication of a Converter for Converting of Vibrational Energy to Electrical Energy Using Fe_3O_4 FerrofluidMarzieh Asna Ashary¹, Babak Hashemi^{2*}¹ M. Sc. Student, Materials Science and Engineering Department, School of Engineering, Shiraz University, Shiraz, Fars, Iran² Associate Professor, Materials Science and Engineering Department, School of Engineering, Shiraz University, Shiraz, Fars, Iran

Paper History:

Received: 2019-06-12

Revised in revised form: 2020-10-04

Accepted: 2021-06-27

Abstract Electromagnetic energy converters have been used as electrical energy suppliers. The use of solid magnets in these devices, for producing of magnetic induction, has produced difficulties for the design and application of these systems in various forms and frequencies. Magnetic fluids as a substitute for solid magnets have recently been considered for the use of these devices in low frequency ranges and different

*عهده دار مکاتبات

نشانی: ایران، فارس، شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی، بخش مهندسی مواد، تلفن: ۰۷۱-۳۲۳۰۷۲۹۳، دورنگار: ۰۷۱-۳۲۳۰۷۲۹۳

پیام نگار: hashemib@shirazu.ac.ir

Please cite this article as: Asna Ashary, M., Hashemi, B., "Fabrication of a converter for converting of vibrational energy to electrical energy using Fe_3O_4 ferrofluid", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 10, No. 1, (2021), 65-74. (<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.178254.1019>).

2783-0829/© 2021 The Author(s). Published by MERC.

This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Keywords:

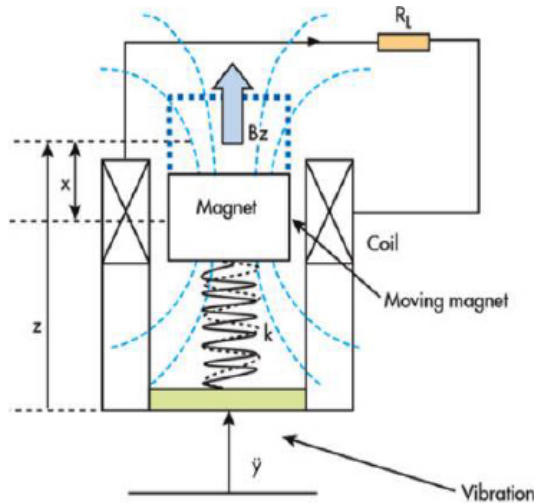
Magnetite,
Co-Precipitation,
Oleic Acid,
Ferrofluid,
Energy Harvester

designs. In this study, a simple vibrational energy converter was designed using magnetite ferrofluid. For this purpose, the nanoparticles of magnetite were synthesized by co-precipitation method and surface modified by oleic acid. The XRD, FTIR, VSM testes and SEM studies were done to investigate properties of the samples. The nano magnetite particles had the average size of 70 nm and the saturation magnetization of 41.63 emu/gr. Three types of fluid including water, kerosene and brake oil were used to make magnetite stable ferrofluid. The most stable ferrofluid was brake oil based ferrofluid. The fabricated energy converter converted mechanical vibrations to induction voltage and voltage increased with frequency of vibration and applied magnetic field.

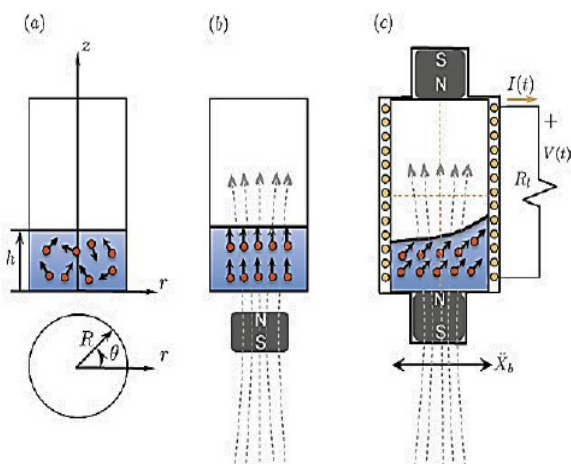


<https://doi.org/10.30501/jamt.2021.178254.1019>

URL: http://www.jamt.ir/article_126427.html



شکل ۱. طرح کلی سازوکار مبدل انرژی الکترومغناطیسی با استفاده از مغناطیس جامد [۴]



شکل ۲. تصویر طرح‌واره از به‌کارگیری فروسیال به‌جای مغناطیس جامد وسط سیم‌پیچ، (a) محفظه حاوی فروسیال، (b) جهت‌گیری نانوذرات در معرض میدان مغناطیسی خارجی و (c) محفظه احاطه شده با سیم‌پیچ و القاء ولتاژ در سیم‌پیچ در اثر نوسان فروسیال در جهت x [۵]

فروسیال‌ها، محلول‌های کلونیدی پایدار، حاوی ذرات مغناطیسی با ابعاد نانو که در سیال حامل، پراکنده شده‌اند، هستند و مایع حامل، نقش فاز پیوسته و جاری‌شونده را ایفاء

۱- مقدمه

امروزه، تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر، به‌شدت مورد توجه قرار گرفته است و یکی از راهکارهای ارائه‌شده برای این منظور، تبدیل انرژی‌های طبیعی، مانند انرژی باد، آب و ارتعاشات محیطی، به انرژی الکتریکی است. انرژی ارتعاشات محیطی را می‌توان به کمک مبدل‌های الکترومغناطیسی، به انرژی الکتریکی، تبدیل کرد. این فرایند، بر پایه تغییر در شار مغناطیسی (Φ) داخل یک سیم‌پیچ، انجام می‌شود [۱ و ۲]. زمانی که یک سیم‌پیچ، در معرض یک میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، می‌تواند در آن، القای الکترومغناطیسی، اتفاق افتد. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، حرکت یا نوسان مغناطیس جامد درون سیم‌پیچ، تغییر در شار مغناطیسی (Φ) درون سیم‌پیچ را به دنبال خواهد داشت که طبق رابطه (۱)، تغییر شار، سبب ایجاد ولتاژ^۱ (emf) در سیم‌پیچ می‌شود [۳].

$$\text{emf} = -N \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (1)$$

در تحقیقات جدید، به‌جای مغناطیس جامد، از یک فروسیال در داخل سیم‌پیچ استفاده شده است (شکل ۲). با توجه به شکل (۲)، نانوذرات مغناطیسی درون سیال، با اعمال میدان مغناطیسی خارجی، مطابق با شار میدان، منظم می‌شوند؛ اما هنگامی که دستگاه در معرض نوسان قرار می‌گیرد، نانوذرات، از موقعیت خود جابه‌جا می‌شوند؛ بنابراین، تغییر شار، درون سیم‌پیچ، اتفاق می‌افتد که نتیجه آن، القاء ولتاژ در سیم‌پیچ اطراف محفظه فروسیال است. چنین طراحی می‌تواند قابلیت‌های کاربردی این سیستم را افزایش دهد.

¹ Electromotive Force

به‌کارگیری آن در مبدل طراحی‌شده، تبدیل انرژی ارتعاشی به الکتریکی و تأثیر بعضی از متغیرهای مؤثر بر این تبدیل، مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش، برای سنتز نانوذرات مغناطیسی مگنتایت، از روش هم‌رسوبی، استفاده شد. فهرست مواد اولیه به‌کاربرده شده در این پژوهش، در جدول (۱)، ارائه شده است.

جدول ۱. مواد مورد استفاده در سنتز ذرات مگنتایت

کاربرد	درصد خلوص	فرمول شیمیایی	مواد
پیش‌ماده	۹۹/۹ (مرک)	FeCl ₂ .6H ₂ O	کلرید آهن ۶ آبه
پیش‌ماده	۹۹/۹ (مرک)	Fe(NO ₃) ₃ .9H ₂ O	نیترات آهن ۹ آبه
تهیه محلول قلیایی	۹۹/۹ (مرک)	NH ₄ OH	هیدروکسید آمونیوم
حلال	-	-	آب دیونیزه
اصلاح سطح	-	حاوی اولئیک اسید با درصد بالا	روغن آفتابگردان
تنظیم pH	۹۹/۹ (مرک)	HCl	هیدروکلریک اسید

با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده و نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش برای رسیدن به بهترین نتیجه، ۰/۰۵۶ مولار از محلول نمک‌های آهن (با نسبت مولی Fe(NO₃)₃.9H₂O به FeCl₂.6H₂O برابر با ۱/۷)، در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه، حل شد. سپس، بشر، روی هیتر همزن مغناطیسی با دمای ۸۰ درجه سلسیوس، قرار گرفت. pH محلول، پیش از اضافه کردن محلول قلیایی، عدد ۴ را نشان می‌داد. پس از آن، هیدروکسید آمونیوم، قطره‌قطره، به محلول، اضافه شد و با افزایش pH به عدد ۱۱، تغییر رنگ محلول از قهوه‌ای به سیاه، صورت گرفت. از آنجاکه سرعت هم‌زدن محلول، بر اندازه ذرات مگنتایت و خواص مغناطیسی آن اثرگذار است؛ بنابراین، سعی شد هم‌زدن، در سرعت‌های بالا (۵۰۰ دور در دقیقه)، انجام شود [۱۶] و [۱۷]. پس از ۳۰ دقیقه که محلول هم‌زده شد، pH محلول، با هیدروکلریک اسید، به ۷-۸ رسید و سپس، رسوب سیاه، از محلول، جدا شد. رسوب جداشده، چندبار متوالی، به ترتیب با

می‌کند. از انواع این مایعات، می‌توان به آب، روغن‌های معدنی، روغن پارافین، روغن‌های سفید، روغن‌های هیدرولیک و روغن هیدروکربنی، اشاره کرد. فروسیال‌ها، علاوه بر سیالیت و شکل‌پذیری، به‌علت حضور ذرات مغناطیسی، خواص منحصربه‌فردی از خود، نشان می‌دهند. خواص فروسیال، به نوع سیال، شکل و اندازه ذرات مغناطیسی، پایداری و قابلیت پراکنده‌شوندگی ذرات در سیال، بستگی دارد [۸-۶]. فروسیال‌ها، در زمینه‌های مختلفی، مانند خنک‌کنندگی [۹]، حافظه‌های مغناطیسی [۱۰]، عکس‌برداری رزونانس^۱ مغناطیسی، انتقال دارو، گرم‌درمانی یا هایپرترمیای^۲ [۱۱]، به‌کار گرفته شده‌اند.

مگنتایت (Fe₃O₄)، بین اکسیدهای آهن، با مغناطش اشباع^۱ Am²Kg⁻¹ ۹۰-۱۰۰، بیشترین مغناطیس‌شوندگی را دارد و همچنین، به‌علت پایداری شیمیایی و مغناطش اشباع نسبتاً بالایی که دارد، می‌تواند گزینه مناسبی برای ساخت فروسیال‌ها باشد [۱۲]. خواص نانوذرات Fe₃O₄، از جمله مغناطیس‌شوندگی، سوپرپارامغناطیس و قابلیت پراکنده‌شوندگی این ذرات در سیال، به‌شدت وابسته به اندازه دانه، ریخت‌شناسی و روش سنتز آن‌هاست. علاوه‌براین، به‌علت نسبت سطح به حجم بالای نانوذرات، تمایل به آگلومره^۳ و کلوخه شدن در این ذرات، بسیار بالاست؛ بنابراین، ایجاد لایه مناسب روی سطح این ذرات، به‌منظور جلوگیری از آگلومره شدن آن‌ها، ضروری است.

تاکنون، تحقیقات متعددی در خصوص طراحی و ساخت مبدل‌های انرژی، انجام شده است [۱۳-۱۵]. هدف در این پژوهش، آن بود که در مقایسه با سایر تحقیقات، مبدلی ساده، با به‌کارگیری ساده‌ترین روش‌ها و امکانات در دسترس، طراحی و ساخته شود؛ بنابراین، در سنتز نانوذرات Fe₃O₄، از روش هم‌رسوبی شیمیایی، به‌عنوان روشی مرسوم و شناخته‌شده با بازدهی بالا و قابلیت کنترل اندازه مناسب و شکل ذرات، استفاده شد. سپس، با استفاده از روغن آفتابگردان، به عنوان ماده فعال سطحی (سورفکتانت)^۴ و روغن ترمز، به‌عنوان سیال حامل، فروسیال مربوطه تهیه شد و در نهایت، با

¹ Resonance

² Hyperthermia Therapy

³ Agglomeration

⁴ Surfactant

۲-۱- آزمون‌های شناسایی و مشخصه‌یابی ذرات سنتز شده برای تعیین فاز و خواص فیزیکی مواد بلوری و همچنین، مطالعه ریزساختار و ریخت‌شناسی نمونه‌های پودری سنتز شده، به ترتیب از آزمون پراش‌سنجی پرتو ایکس با اشعه Cu(K α) (دستگاه Bruke D8 Advance) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (مدل Tescan-Vega3)، استفاده شد. آزمون FTIR²، توسط دستگاه Bruker-Tensor II، برای اطمینان از ایجاد لایه سطحی روی سطح ذرات، به کار برده شد. سرانجام، خواص مغناطیسی نمونه‌ها و فروسیال‌های سنتز شده، با استفاده از دستگاه مغناطش‌سنج ارتعاشی³ (VSM) (مدل JDAW-2000D)، در شدت میدان ۱۰^۴- تا ۱۰^۴ اورستد^۴ Cu(K α) (Oe) مورد بررسی قرار گرفت.

۲-۲- آماده‌سازی فروسیال

فروسیال‌ها، معمولاً شامل فاز مایع حامل و ذرات مغناطیسی هستند. در مایع حامل، باید چند ویژگی مهم، از جمله: ویسکوزیته، دانسیته و pH سیال، در نظر گرفته شود. در جدول (۲)، مشخصات چهار نوع سیال استفاده شده در این پژوهش، آمده است. روغن ترمز^۵ مورد استفاده، گلیکول اتر^۶ و دارای استاندارد DOT 3 بود. نفت سفید یا کروزن^۷، یک سیال هیدروکربنی غیرقطبی است که ترکیب آن حاوی زنجیره‌های کربنی است.

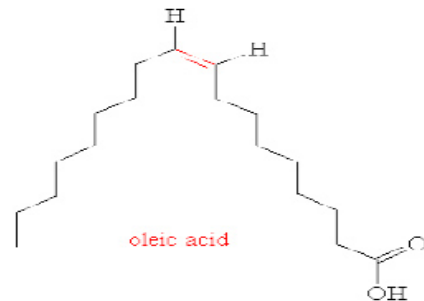
جدول ۲. مشخصات سیال‌های حامل مورد استفاده

نمونه	سیال حامل	ویسکوزیته* (میلی‌متر مربع بر ثانیه)	دانسیته سیال* (گرم بر سانتی‌متر مربع)	pH
FFw	آب	۰/۸۹	۱	۵
FFb	روغن ترمز (DOT 3)	۱۴	۱/۰۳	۱۰
FFk	نفت سفید	۲/۵	۰/۷۸	۸

* مشخصات گزارش شده در دمای محیط است.

استون و آب مقطر، شستشو داده شد و پس از آن، در دمای محیط، به مدت ۲۴ ساعت، خشک شد.

به منظور اصلاح سطح ذرات و جلوگیری از آگلومره شدن و قابلیت پخش هرچه بهتر آن‌ها در سیال حامل، از روغن آفتابگردان حاوی اولئیک اسید (اسید چرب) بالا، برای ایجاد لایه سطحی، استفاده شد. همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده، در یک سر اولئیک اسید، گروه کربوکسیل (-COOH) وجود دارد که قابلیت جذب شدن روی سطح ذرات را آسان می‌کند. این گروه، از طریق پیوند هیدروژنی، جذب نانوذرات می‌شود [۱۸].



شکل ۳. ساختار اولئیک اسید در شکل (cis) موجود در روغن آفتابگردان

برای ایجاد لایه سطحی، ۴ گرم پودر مگنتایت سنتز شده، در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر، در دمای ۵۵ درجه سلسیوس، به مدت ۱ ساعت، توسط همگن‌ساز فراصوت، به طور کامل، پخش شد. پس از آن، pH محلول، با استفاده از هیدروکسید آمونیوم، به ۱۰ رسید. سپس، ۸ میلی‌لیتر روغن آفتابگردان حل شده در اتانول، قطره‌قطره، به محلول، اضافه شد. با اضافه کردن روغن حاوی اولئیک اسید، ترکیب آمونیوم اولئات، در محلول، تشکیل می‌شود که یونی بوده و در ساختار آن، دو بخش مثبت (آمونیا) و منفی (اولئات)، وجود دارد. پس از کاهش دما و سرد شدن محلول، برای رساندن pH محلول به حدود ۵، از هیدروکلریک اسید (HCl)، استفاده شد. سطح ذرات، در pH اسیدی، دارای بار مثبت شده و یون‌های منفی اولئات را جذب می‌کنند.

² Fourier-Transform Infrared Spectroscopy

³ Vibrating Sample Magnetometer

⁴ Oersted

⁵ Brake Fluid

⁶ Glycol Ether

⁷ Kerosene

^۱ اسیدهای چرب اشباع‌نشده، بر اساس شکل فضایی خود، دارای دو شکل سیس (cis) و ترانس (trans) هستند. شکل cis، قطبی است.

القائه شده در سیم پیچ، توسط مولتی متر (شکل ۵)، اندازه گیری شد. برای ایجاد میدان مغناطیسی یکنواخت در داخل محفظه، از هسته فلزی در مرکز آهن ربای حلقه‌ای، استفاده شد. همچنین، با قرار دادن قطعه فلزی در پشت آهن ربا، پراکندگی خطوط میدان مغناطیسی، کم تر شده و توزیع یکنواخت تری حاصل شد. برای اندازه گیری شدت میدان مغناطیسی در حدفاصل بین دو آهن ربا، از گاوس متر، استفاده شد.



شکل ۵. سیستم به کاررفته برای تبدیل انرژی ارتعاشی به الکتریکی

۳- نتایج و بحث

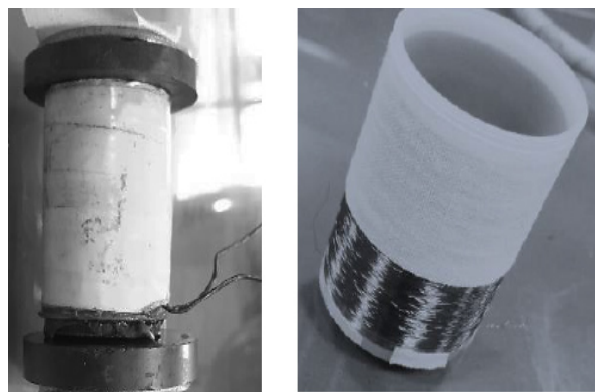
در شکل (۶)، الگوی پراش مربوط به ذرات سنتز شده به روش هم رسوبی، مشاهده می شود. با مقایسه الگوی پراش با الگوهای مرجع و عدم مشاهده خطوط اضافی، تشکیل فاز مگنتایت، تأیید می شود. با استفاده از فرمول شرر^۱، میانگین اندازه ذرات بلور، محاسبه شد. برای به حداقل رساندن خطای اندازه گیری، پیک هایی که زاویه آن ها بین ۳۰ تا ۵۰ درجه است، در محاسبات فرمول شرر، اعمال شدند [۱۹]. اندازه متوسط بلورها، برای نمونه های سنتز شده، حدود ۵۰ نانومتر، به دست آمد.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)^۲ نمونه های سنتز شده، در شکل (۷)، نشان داده شده است. همان طور که در تصویر مشخص است، ذرات، کروی شکل بوده و متوسط اندازه ذرات، حدود ۷۰ نانومتر، برآورد شد. معمولاً در روش هم رسوبی، ذرات کروی شکل هستند. کروی شکل

فروسیال های ساخته شده، دارای ۱۰ درصد حجمی پودر مغناطیسی اصلاح شده بودند. برای آماده سازی آن ها، ۰/۶۸ گرم پودر سنتز شده، با دانسیته ۱/۱۳۲ گرم بر میلی لیتر، به ۶ میلی لیتر سیال پایه، اضافه شده و به مدت ۴ ساعت، در دستگاه اولتراسونیک، هم زده شدند.

۲-۳- ساخت دستگاه مبدل انرژی

برای تبدیل انرژی ارتعاشی به الکتریکی، دستگاهی ساده، طراحی و ساخته شد. مطابق شکل (۴)، سیستم طراحی شده، یک محفظه پلاستیکی استوانه ای شکل، به قطر ۳ سانتی متر و ارتفاع ۵ سانتی متر و ضخامت حدود ۱ میلی متر بود که سیم نازک مسی، به ضخامت حدود ۰/۵ میلی متر، به تعداد ۲۴۰۰ دور، به دور آن پیچیده شده بود و در دو طرف این محفظه، آهن ربای حلقه ای شکل، با قدرت میدان های متفاوت (از ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ اورستد)، به منظور ایجاد میدان مغناطیسی، در امتداد محور استوانه، قرار گرفتند. آهن ربای پایین، توسط یک صفحه پلاستیکی به ضخامت ۲ سانتی متر، از کف محفظه، فاصله داده شد تا مانع ته نشینی و چسبیدن ذرات مغناطیسی به کف محفظه شود. دو سر سیم پیچ نیز، به یک مولتی متر متصل شد.



ب

الف

شکل ۴. الف) محفظه طراحی شده برای قرار گرفتن فروسیال در آن، ب) نحوه قرار گرفتن مغناطیس در دو طرف محفظه به منظور ایجاد میدان مغناطیسی در امتداد محور عمودی

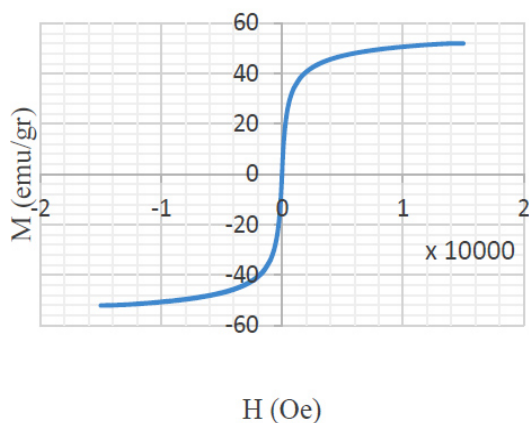
محفظه استوانه ای، تا ارتفاع ۲/۵ سانتی متر، از فروسیال، پر شد. سپس، با قرار دادن محفظه روی دستگاه نوسانگر و اعمال نوساناتی در بازه بسامدی ۵-۱ هرتز، تغییرات ولتاژ

¹ Scherrer Equation

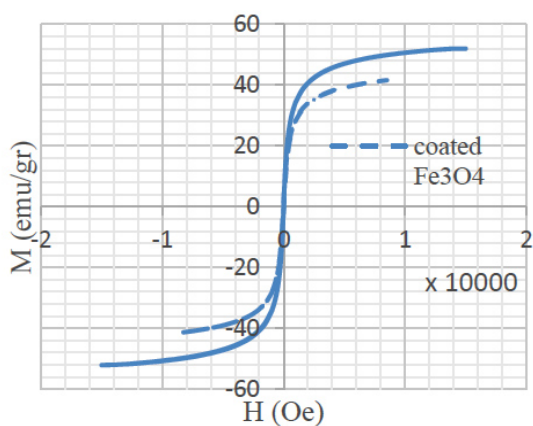
² Scanning Electron Microscopy

است که قابل صرف نظر است. مقدار مغناطیس‌پذیری، (χ) ۰/۱۱۱ محاسبه شد.

در شکل (۹)، منحنی پسماند دو نمونه مگنتایت و مگنتایت اصلاح شده با اولئیک اسید، مقایسه شده است. کاهش مغناطش اشباع تا $۴۱/۶۳ \text{ emu/gr}$ ، به علت حضور زنجیره‌های اولئیک اسید روی سطح ذرات است که اندازه شعاع هیدرودینامیکی ذرات را افزایش داده است.



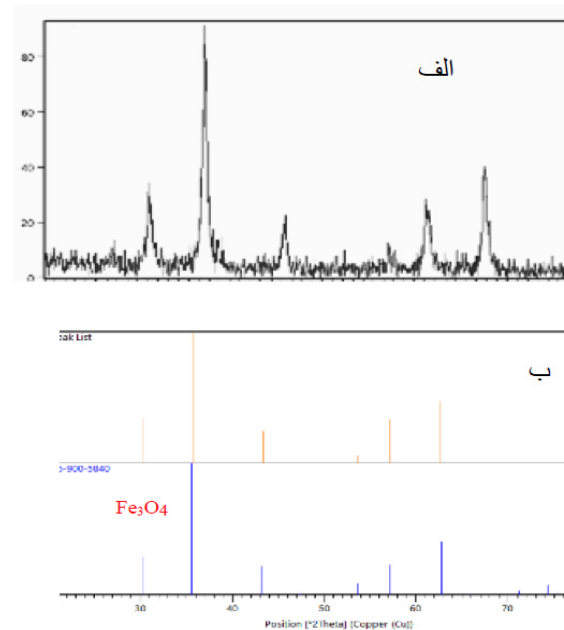
شکل ۸. آنالیز ذرات مگنتایت سنتز شده



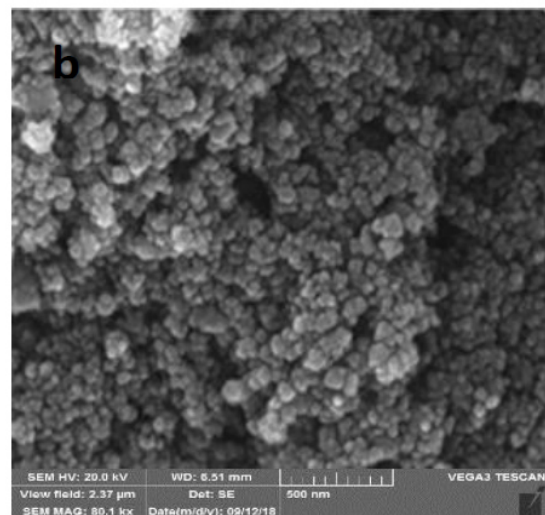
شکل ۹. مقایسه نمودار پسماند پودر Fe_3O_4 پوشش‌دار و بدون پوشش

در شکل (۱۰)، نمودار پسماند فروسیال Fe_3O_4 پایه آبی و پایه روغن ترمز، با هم مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، فروسیال‌ها، به علت وجود سیال در اطراف ذرات مغناطیسی، مغناطش اشباع به مراتب کوچک‌تری، نسبت به ذرات مگنتایت اصلاح شده دارند. همچنین، فروسیال پایه آبی می‌تواند به علت آنکه آب، نفوذپذیری نسبی کمتری نسبت به روغن ترمز دارد و یک ماده پارامغناطیس محسوب می‌شود،

بودن ذرات مغناطیسی، باعث می‌شود که اثر ناهمسانگردی شکلی را نداشته باشند، همچنین، اندازه ذرات در محدوده‌ای است که می‌تواند دارای رفتار تک‌حوزه مغناطیسی باشد.



شکل ۶. الف) الگوی پراش نمونه سنتز شده به روش هم‌رسوبی، ب) مقایسه آن با الگوی پراش نمونه مرجع مگنتایت

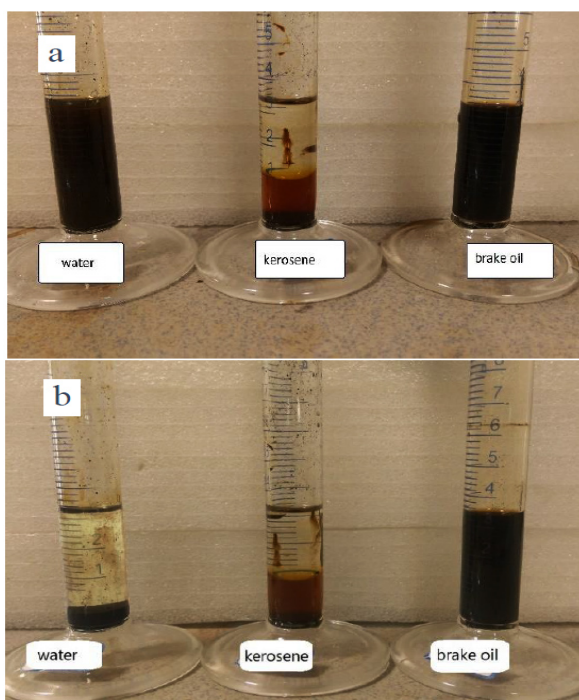


شکل ۷. تصویر SEM از پودر سنتز شده

منحنی پسماند^۱ پودر مگنتایت سنتز شده، در شکل (۸) گزارش شده است. میزان مغناطش اشباع به دست آمده برای این نمونه، $۵۴/۱۳ \text{ emu/gr}$ و میدان پسماندزای آن، ۰/۰۱ اورستد

^۱ Hysteresis Curve

پایداری فروسیال‌های تهیه‌شده با سیال‌های متفاوت، به‌وسیله آزمون رسوب‌گذاری، پس از ۷۲ ساعت و یک هفته، با یکدیگر، مقایسه شدند. شکل (۱۲)، پایداری ذرات اصلاح‌شده بعد از مدت‌زمان ۷۲ ساعت را در سیال‌های مختلف، نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ذرات مغناطیسی در نفت سفید، ته‌نشین شده و جدایش فازی، اتفاق افتاده است؛ این در حالی است که پس از ۷۲ ساعت، در سیال‌های با پایه روغن ترمز و آب، همچنان پایدار باقی مانده‌اند. پس از گذشت یک هفته، سیال آب نیز، دوفازی شده و ته‌نشینی ذرات، مشاهده می‌شود. در فروسیال با پایه روغن ترمز، حتی پس از ۱۰ روز، هیچ‌گونه ته‌نشینی، رخ نداد و حالت پایدار خود را حفظ نمود.



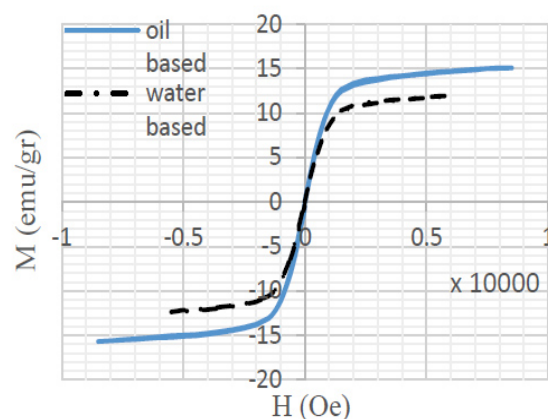
شکل ۱۲. مقایسه پایداری فروسیال‌ها، (a) پس از ۷۲ ساعت و (b) پس از یک هفته

پایداری فروسیال با پایه روغن ترمز، نسبت به دیگر سیال‌ها، می‌تواند ناشی از سه عامل باشد:

۱. قطبی نبودن ساختار آن در مقایسه با آب
۲. ویسکوزیته بالاتر آن نسبت به نفت سفید [۲۲]
۳. پایداری فروسیال با توجه به pH بازی سیال روغن ترمز [۲۳].

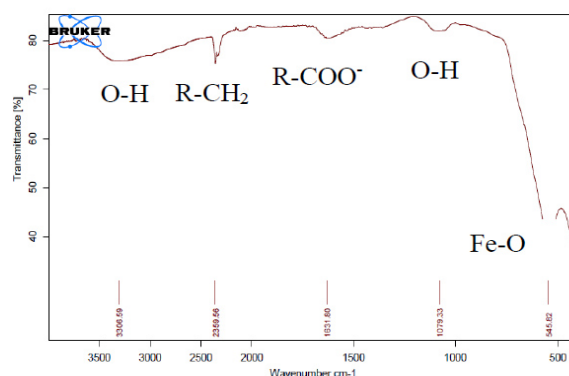
در محیط‌های بازی یا اسیدی، به‌علت افزایش بار سطحی و دفعه الکترواستاتیک، پخش‌شوندگی ذرات، بهتر

مغناطش اشباع کوچک‌تری نسبت به فروسیال پایه روغن ترمز داشته باشد.



شکل ۱۰. مقایسه خاصیت مغناطیسی در فروسیال Fe_3O_4 پایه آبی و پایه روغن ترمز

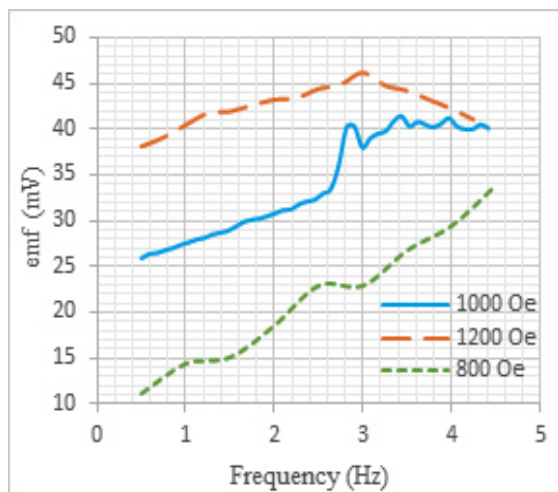
نتیجه آزمون طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون‌قرمز (FTIR) برای پودر Fe_3O_4 پوشش داده‌شده با اولئیک اسید، در شکل (۱۱) نشان داده شده است. حضور باند ارتعاشی در طول موج 2359 cm^{-1} ، مربوط به گروه $R-CH_2$ بوده و گروه کربوکسیلاتی $R-COO^-$ که در طول موج 1661 cm^{-1} ارتعاش می‌کند، به طول‌موج‌های کوتاه‌تر، انتقال پیدا کرده است؛ بنابراین، در مقایسه با نتایج سایر تحقیقات، پیوند زنجیره اولئیک اسید به سطح نانوذرات، تأیید می‌شود [۲۰]. پیک موجود در 1063 cm^{-1} ، مربوط به OH^- است و احتمالاً می‌تواند به‌علت آب باقی‌مانده در پودر مگنتایت پس از خشک کردن باشد [۲۱]. همچنین، پیک جذب موجود در 545 cm^{-1} نشان دهنده پیوند $Fe-O$ در ساختار مگنتایت و پیک جذب در 3306 cm^{-1} ، مربوط به عامل $O-H$ است.



شکل ۱۱. الگوی FTIR نمونه مگنتایت پوشش داده‌شده با اولئیک اسید

دستگاه، می‌توان رفتار فروسیال را از دو لحاظ ماکرو و میکرو، بررسی کرد:

۱. رفتار ماکرو: ولتاژ القایی یا خروجی، حاصل حرکت موجی کل فروسیال است؛ بنابراین، ابعاد و شکل محفظه و نسبت ارتفاع به عرض فروسیال، متغیرهای مهمی هستند.
۲. رفتار میکرو: چرخش و حرکت ذرات مغناطیسی درون سیال برای هم‌جهت شدن با میدان مغناطیسی اعمالی که به آن Brownian relaxation گفته می‌شود، باعث القاء یا ایجاد نیروی emf در سیم‌پیچ می‌شود؛ بنابراین، رفتار ذرات در ابعاد میکرو و پایداری و توزیع ذرات در سیال، متغیر مهمی محسوب می‌شوند. همچنین باید در نظر داشت که نفوذپذیری مغناطیسی سیال نیز، بر رفتار ذرات و مغناطیس‌شوندگی آن‌ها، اثرگذار است [۲۴].



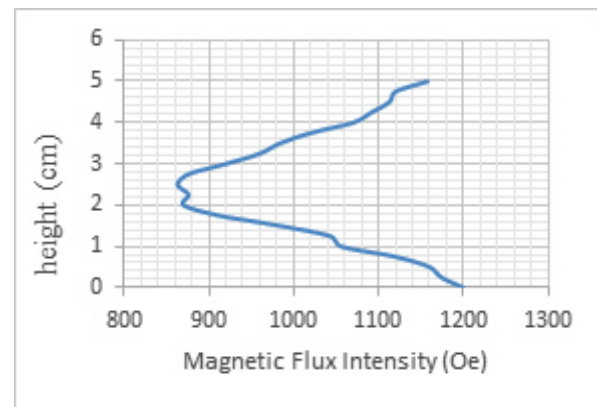
شکل ۱۴. مقایسه نتایج ولتاژ خروجی از سیم‌پیچ اطراف محفظه حاوی فروسیال برحسب بسامد در سه شدت میدان مختلف

در شکل (۱۴)، مشاهده می‌شود که در میدان مغناطیسی اعمالی ۱۲۰۰ اورستد، ولتاژ القاء شده، به مقدار بیشینه‌ای رسیده و سپس کاهش می‌یابد؛ به عبارتی، دارای یک پیک به ازاء یک بسامد نوسانی خاص است. این رفتار که بر اثر حالت تشدید یا رزونانس اتفاق می‌افتد را می‌توان طبق رابطه (۲) که نشان دهنده ارتباط بسامد تشدید یا رزونانس (ω) حرکت موجی فروسیال با متغیرهای ساختاری سیستم و همچنین، خواص مغناطیسی فروسیال است، توضیح داد [۲۵].

$$\omega_L = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g^*}{2a} \tanh\left(\frac{\pi h}{2a}\right)} \quad (2)$$

خواهد بود؛ بنابراین، در فروسیال با پایه روغن ترمز، به دلیل pH بالا و خاصیت بازی، انتظار می‌رود پایداری، بیشتر باشد.

با توجه به نتایج پایداری فروسیال‌ها، فروسیال Fe_3O_4 با پایه روغن ترمز، به‌عنوان فروسیال مناسب، انتخاب شد و آزمایش تبدیل انرژی ارتعاشی به الکتریکی، روی آن، در سه میدان مغناطیسی با شدت‌های مختلف، انجام شد. در ابتدا، توزیع شار مغناطیسی در طول محفظه استوانه، با استفاده از گاوس‌متر، اندازه‌گیری شد. شکل (۱۳)، توزیع شار میدان مغناطیسی را در راستای ارتفاع (Z)، به ازای مغناطیسی با قدرت ۱۲۰۰ اورستد، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین شار، در مجاورت آهن‌رباها، ایجاد می‌شود.



شکل ۱۳. توزیع شار میدان مغناطیسی در حدفاصل بین دو آهن‌ربا با قدرت ۱۲۰۰ اورستد

نمودار ولتاژ القاء شده در سیم‌پیچ اطراف محفظه، به‌واسطه نوسانات دستگاه در بسامدها و تحت شدت میدان‌های مغناطیسی مختلف، در شکل (۱۴) نشان داده شده است. نتایج، نشان می‌دهد با افزایش بسامد، ولتاژ القاء شده، افزایش یافته است. در واقع، با افزایش بسامد، انحراف از حالت تعادل ذرات مگنتایت که در معرض میدان مغناطیسی آهن‌رباهای دو طرف محفظه هستند، بیشتر شده و طبق رابطه (۱)، با تغییر هرچه بیشتر شار مغناطیسی داخل سیم‌پیچ، ولتاژ القایی یا خروجی از سیم‌پیچ نیز، بیشتر می‌شود.

همچنین، مقایسه نتایج، نشان می‌دهد، با افزایش شدت میدان مغناطیسی دو طرف محفظه، ولتاژ القاء شده نیز، افزایش داشته است؛ زیرا با افزایش شدت میدان مغناطیسی، شار داخل محفظه حاوی فروسیال هم، افزایش یافته و در نتیجه نوسان محفظه، تغییر شار بیشتری، حاصل می‌شود. به‌طورکلی، در این

۵- سپاسگزاری

بدین‌وسیله از همکاری آزمایشگاه‌های بخش مواد و دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز دانشگاه شیراز تقدیر و تشکر بعمل می‌آید.

مراجع

- Beeby, S. P., Torah, R. N., Tudor, M. J., Glynne-Jones, P., O'Donnell, T., Saha, C. R., Roy, S., "A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 17, No. 7, (2007), 1257. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/17/7/007>
- Zhu, D., Tudor, M. J., Beeby, S. P., "Strategies for increasing the operating frequency range of vibration energy harvesters: A review", *Measurement Science and Technology*, Vol. 21, No. 2, (2009), 022001. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/2/022001>
- Alazemi, S. F., Bibo, A., Daqaq, M. F., "A ferrofluid-based energy harvester: An experimental investigation involving internally-resonant sloshing modes", *The European Physical Journal Special Topics*, Vol. 224, No. 14-15, (2015), 2993-3004. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2015-02602-9>
- Elvin, N. G., Elvin, A. A., "An experimentally validated electromagnetic energy harvester", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 330, No. 10, (2011), 2314-2324. <https://doi.org/10.1177/1045389X117754263>
- Bibo, A., "Electromagnetic ferrofluid-based energy harvester", *Physics Letters A*, Vol. 376, No. 32, (2012), 2163-2166. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2012.05.033>
- Khairul, M., "Experimental study on fundamental mechanisms of ferro-fluidics for an electromagnetic energy harvester", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 55, No. 48, (2016), 12491-12501. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b03161>
- Raj, K., Aziz, L. M., Rosensweig, R. E., *Method for manufacturing oil-based ferrofluid*, Google Patents, (2000).
- Raj, K., Aziz, L. M., *Low cost method for manufacturing ferrofluid*, Google Patents, (1999).
- Imran, M., "Ferrofluid synthesis using oleic acid coated Fe₃O₄ nanoparticles dispersed in mineral oil for heat transfer applications", *Materials Research Express*, Vol. 5, No. 3, (2018), 036108. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aab4d7>
- Narayanan, T., "Ferrofluids based in magnetic nanostructures", *Chaos and Complexity Letters*, Vol. 7, No. 1/2, (2013), 121.
- Zhang, L. Y., Gu, H. C., Wang, X. M., "Magnetite ferrofluid with high specific absorption rate for application in hyperthermia", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 311, No. 1, (2007), 228-233. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2006.11.179>
- Karimi, Z., Karimi, L., Shokrollahi, H., "Nano-magnetic particles used in biomedicine: Core and coating materials", *Materials Science and Engineering: C*, Vol. 33, No. 5, (2013), 2465-2475. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2013.01.045>
- Oh, D. W., "Analysis of electromotive force characteristics and device implementation for ferrofluid based energy harvesting system", In *Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 17th IEEE International Conference, (2014). <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2014.7013820>
- Seol, M. L., "Ferrofluid-based triboelectric-electromagnetic hybrid generator for sensitive and sustainable vibration energy harvesting", *Nano Energy*, Vol. 31, (2017), 233-238. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.11.038>
- Liu, Q., Alazemi, S. F., Daqaq, M. F., Li, G., "A ferrofluid based energy harvester: Computational modeling, analysis, and experimental validation", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 449, (2019), 105-118. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.09.064>
- Valenzuela, R., Fuentes, M. C., Parra, C., Baeza, J., Duran, N., Sharma, S. K., Knobel, M., Freer, J., "Influence of stirring velocity on the synthesis of magnetite nanoparticles (Fe₃O₄) by

در این رابطه، h ، ارتفاع سیال، a ، شعاع محفظه و g^* ، شتاب گرانشی مؤثر است که طبق رابطه (۳)، محاسبه می‌شود.

$$g^* = (g - \frac{\chi}{\rho\mu_0} \frac{dB(z)}{dz} B(z))_{z=h} \quad (3)$$

همان‌طور که در رابطه (۳) مشخص است، تغییرات شدت میدان مغناطیسی (B)، در امتداد ارتفاع (z) و قابلیت مغناطیس‌شوندگی سیال (χ)، بر بسامد تشدید فروسیال تحت لرزش، اثرگذار است. هنگامی حالت تشدید یا رزونانس، اتفاق می‌افتد که بسامد طول‌موج حرکت ایجادشده در فروسیال، ضریب صحیحی از طول‌موج بسامد ارتعاش خروجی باشد. در چنین شرایطی، بیشترین ولتاژ القایی در سیم‌پیچ، ایجاد می‌شود. در شکل (۱۴)، به‌ازاء میدان‌های مغناطیسی (B) کمتر از ۱۲۰۰ اورستد، مطابق رابطه (۳)، مقدار g^* ، مقدار بزرگی می‌شود و بر طبق رابطه (۲)، باید حالت تشدید، در بسامدهای بالا اتفاق افتد که چون بسامد دستگاه نوسانگر به‌کاررفته در این تحقیق، کمتر از ۵ هرتز است، حالت تشدید، به‌ازاء این میدان‌ها، دیده نمی‌شود؛ ولی در میدان مغناطیسی ۱۲۰۰ اورستد، حالت تشدید با توجه به خصوصیات محفظه طراحی شده در بسامد ۳ هرتز، اتفاق افتاده است.

۴- نتیجه‌گیری

سنتز نانوذرات Fe₃O₄، به‌روش هم‌رسوبی و اصلاح سطحی آن‌ها با اولئیک اسید موجود در روغن آفتابگردان، انجام شد. فروسیال مگنتایت پوشش داده‌شده با اولئیک اسید، در سیال با پایه روغن ترمز یا گلیکول اتر، حتی پس از ۱۰ روز، پایداری مطلوبی را از خود نشان داد. سیستم طراحی‌شده برای تبدیل انرژی نوسانی به الکتریکی، بر اساس به‌کارگیری نوسانات یک فروسیال تحت میدان مغناطیسی ثابت، توانست تبدیل انرژی نوسانی به ولتاژ و جریان الکتریکی را انجام دهد. نتایج، نشان داد با افزایش بسامد نوسانات تا یک بسامد بهینه و با اعمال میدان‌های مغناطیسی بزرگ‌تر بر فروسیال، می‌توان ولتاژ القایی را افزایش داد. در این تحقیق، بیشترین ولتاژ القاء شده (۴۵ میلی‌ولت)، به‌ازای شدت میدان مغناطیسی ۱۲۰۰ اورستد و در بسامد نوسانات ۳ هرتز، به‌دست آمد.

- Corrosion Science*, Vol. 50, No. 9, (2008), 2493-2497. <http://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.06.034>
22. Savitha, S., Iyengar, S. S., Ananthamurthy, S., Bhattacharya, S., "Studying effect of carrier fluid viscosity in magnetite based ferrofluids using optical tweezers", In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, (2018). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/310/1/012098>
 23. Vasilescu, C., "High concentration aqueous magnetic fluids: Structure, colloidal stability, magnetic and flow properties", *Soft Matter*, Vol. 14, No. 32, (2018), 6648-6666. <https://doi.org/10.1039/c7sm02417>
 24. Alazemi, S. F., Xu, Y., Daqaq, M. F., "Harvesting energy from the sloshing motion of ferrofluids in an externally excited container: Analytical modeling and experimental validation", *Physics of Fluids*, Vol. 28, No. 7, (2016), 077101. <https://doi.org/10.1063/1.4954787>
 25. Alazemi, S. F., Daqaq, M. F., "Ferrofluids for concurrent vibration absorption and energy harvesting", In *ASME Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, American Society of Mechanical Engineers, (2013).
 - the co-precipitation method", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 488, No. 1, (2009), 227-231. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.08.087>
 17. Ramimoghdam, D., "Statistical optimization of effective parameters on saturation magnetization of nanomagnetite particles", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 393, (2015), 30-35. <http://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.05.047>
 18. Silvério Neto, W., Simões Dutra, G. V., Thyago Jensen, A., Alves Araújo, O., Garg, V., de Oliveira, A. C., Fonseca Valadares, L., de Souza Jr., F. G., Machado, F., "Superparamagnetic nanoparticles stabilized with free-radical polymerizable oleic acid-based coating", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 739, (2018), 1025-1036. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.338>
 19. Smith, W. H., *Digital array scanned interferometer*, Google Patents, (1990).
 20. Mahdavi, M., "Synthesis, surface modification and characterisation of biocompatible magnetic iron oxide nanoparticles for biomedical applications", *Molecules*, Vol. 18, No. 7, (2013), 7533-7548. <https://doi.org/10.3390/molecules18077533>
 21. Namduri, H., Nasrazadani, S., "Quantitative analysis of iron oxides using Fourier transform infrared spectrophotometry",