فصلنامه‌ی علمی پژوهشی

علم و مهندسی سرامیک

دوره‌ی ۶، شماره‌ی ۴، زمستان ۱۳۹۶

سنتز و مشخصه‌یابی ذرات مغناطیسی فریت کلسیم پوشش داده شده با پلی اتیلن گلایکول برای گرمادرمانی

عباس خردمند[۱]، امید وحیدی[۱*]، سید مرتضی مسعودپناه[۲]

[۱] دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت ایران

[۲] دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

* ovahidi@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۱۶ اردیبهشت ۱۳۹۷

پذیرش: ۱۳ خرداد ۱۳۹۷

کلید واژه:

فریت کلسیم، پوشش پلی اتیلن گلایکول، سولوترمال، هایپرترمیای مغناطیسی

چکیده:

در این پژوهش، سنتز ذرات مغناطیسی فریت کلسیم تک فاز که با پلی اتیلن گلایکول با استفاده از روش سولوترمال پوشش داده شده است، تشریح شده است. بدین منظور، سه نمونه با پوشش پلی اتیلن گلایکول در مقادیر مختلف و یک نمونه بدون پوشش در محیط اتیلن گلایکول سنتز شده است. ترکیب فازی و توزیع کاتیونی نمونه‌های سنتز شده با استفاده از دستگاه پراش پرتو ایکس و اندازه و شکل ذرات با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی بررسی شده است. نتایج آزمون پراش پرتو ایکس نشان می‌دهد که ساختار کریستالی تمامی نمونه‌ها از نوع مکعبی اسپینل با ساختار معکوس جزئی است. تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی نشان می‌دهد که با افزایش درصد پلی اتیلن گلایکول، اندازه ذرات کاهش می‌یابد. نتایج آزمون طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس حضور عناصر کلسیم، آهن و اکسیژن را در نمونه سنتز شده فریت کلسیم بدون پوشش تایید می‌کند. حضور پلی اتیلن گلایکول بر روی نمونه‌های پوشش داده شده توسط آزمایش ترموگراویمتری نشان داده شده است. خواص مغناطیسی نمونه‌ها با دستگاه مغناطیس سنج نمونه مرتعش بررسی و میزان مغناطش اشباع حداکثر ۵۱/۲ emu/g و حداقل ۲۴/۹ emu/g به ترتیب برای نمونه بدون پوشش و برای نمونه با حداکثر میزان پوشش بدست آمده است. همچنین، وجود پلی اتیلن گلایکول بر روی ذرات پوشش یافته توسط کاهش یافتن خاصیت مغناطیسی مواد متناسب با مقدار پوشش مجددا تایید شده است. با استفاده از روش هایپرترمیای مغناطیسی، توانایی تولید گرما توسط ذرات مغناطیسی سنتز شده که تحت یک میدان مغناطیسی متناوب قرار گرفته بودند، بررسی شده و نتایج نشان می‌دهدکه ذرات سنتز شده بدون پوشش و با حداکثر پوشش به ترتیب دارای میزان اتلاف مغناطیسی ۱/۱۲ W/g و ۰/۵۶ W/g هستند.

۱- مقدمه

استفاده از مواد مغناطیسی در کاربردهای مختلف مهندسی پزشکی تحقیقات گسترده‌ای را به خود اختصاص داده است [۱, ۲] و در میان آنها، ذرات فریت‌های مغناطیسی با ساختار اسپینل و با فرمول شیمیایی کلی به صورت MFe_2O_4 (که

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.4.7.0]

در این فرمول عنصر M شامل فلزات مختلفی نظیر آهن، کبالت، نیکل، کلسیم، منیزیوم و غیره است) به علت دارا بودن خواص فیزیکی و شیمیایی منحصربفرد مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند [۳]. شکل فضایی سلول واحد فریت‌های اسپینل بصورت مکعبی وجوه مرکزپر از اتم های اکسیژن و شامل ۳۲ موقعیت بین نشین هشت‌وجهی و ۶۴ موقعیت بین نشین چهاروجهی با کاتیون‌های دو و سه ظرفیتی فلزی می‌باشد.

تا بحال پژوهش‌های گسترده‌ای در مورد فریت‌های اسپینل حاوی فلزات واسطه مانند آهن، کبالت، نیکل، روی، منگنز و غیره همراه با انواع پوشش‌ها در کاربردهای گرمادرمانی صورت گرفته است اما پژوهش‌های محدودی در مورد فریت‌های اسپینل شامل فلزات قلیایی خاکی مانند فریت کلسیم و منیزیوم انجام شده است. از آنجایی که بسیاری از کاتیون‌های فلزی همانند کبالت، نیکل و منگنز بصورت ذاتی دارای سمیت برای محیطهای زیستی هستند و از آن طرف، کلسیم طبیعت زیست سازگار دارد، فریت کلسیم می‌تواند در کاربردهای بیولوژیکی نقش موثری را در بین فریت‌های فلزی ایفا کند [۳, ۴]. به علاوه، یکی از روش‌هایی که می‌توان از آن برای ارتقای زیست‌سازگاری مواد استفاده کرد، استفاده از پوشش‌های زیست‌سازگار بر روی ذرات تولید شده است [۵]. همچنین، استفاده از پوشش‌ها می‌تواند به ارتقای سطح پایداری کلوئیدی ذرات در محیطهای آبی نیز کمک کند [۶]. بدین منظور، از پلیمرهای طبیعی و مصنوعی متنوعی در پوشش‌دهی ذرات مغناطیسی استفاده شده است که میتوان به پوشش‌های دکستران [۷]، کیتوسان [۸]، گلیسیرهیزیک اسید [۹]، فولیک اسید [۱۰]، پلی لاکتیک کو گلایکولیک (PLGA) [۱۱]، پلی اتیلن گلایکول (PEG) [۱۲] و غیره اشاره کرد.

از جمله کاربردهای ذرات مغناطیسی، استفاده از آنها در درمان سرطان به روش هایپرترمیای مغناطیسی است. البته این روش معمولا در ترکیب با دیگر روش‌های درمان سرطان نظیر شیمی‌درمانی انجام می‌شود [۱۳]. در روش هایپرترمیای مغناطیسی، سیال حاوی ذرات مغناطیسی به بافت سرطانی مورد نظر تزریق می‌شود و بعد از قرار گرفتن بافت در مجاورت یک میدان مغناطیسی متناوب، دمای بافت بصورت موضعی بواسطه رفتار مغناطیسی ذرات مغناطیسی تزریق شده (از طریق پدیده‌های چون پسماند مغناطیسی، آسایش نیلز و آسایش براون) بالا می‌رود که این امر سبب از بین رفتن سلول‌های سرطانی می‌شود [۱۴]. بدین منظور، ذرات مغناطیسی سنتز شده باید دارای خواص مغناطیسی مناسب و دارای زیست‌سازگاری به اندازه کافی باشند تا بتوانند در این روش درمانی بطور موثرتری مورد استفاده قرار گیرند. به عنوان نمونه، آقای لی و همکاران [۱۵] با سنتز نانوذرات مغناطیسی فریت‌های آهن، کبالت و منگنز و آزمایش آنها بر موش‌های سرطانی، توانستند بافت تومووری موجود را با استفاده از روش گرمادرمانی از بین ببرند. در پژوهش دیگری که توسط سعیدی و همکاران انجام شد [۱۶]، توسط نانوذرات مغناطیسی مگنتایت (Fe_3O_4) پوشش داده شده با گلیسیرهیزیک اسید و روش هایپرترمیای مغناطیسی، روند رشد سلول‌های سرطانی فیبروبلاست L929 موجود در محیط کشت RPMI-1640 معکوس و سبب مرگ سلولی آنها شد.

در پژوهش حاضر، ذرات مغناطیسی فریت اسپنل کلسیم با

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.4.7.0]

مقادیر مختلف پوشش پلی اتیلن گلایکول توسط روش سولوترمال در محیط اتیلن گلایکول سنتز شده‌اند. خواص فیزیکی و شیمیایی ذرات سنتز شده، توسط روش‌هایی چون XRD، VSM، TG، EDX و FESEM بر روی ذرات مغناطیسی سنتز شده بررسی شدند. جهت بررسی امکان استفاده از ذرات برای تولید گرما در میدان مغناطیسی متناوب، آزمایش هایپرترمیای مغناطیسی بر روی ذرات سنتز شده صورت گرفته است.

۲- فعالیت‌های تجربی

مواد $Fe(NO_3)_3.9H_2O$، $Ca(NO_3)_2.4H_2O$، پلی اتیلن گلایکول، اتیلن گلایکول، هیدروکسید سدیم و اسید کلریدریک به عنوان مواد اولیه سنتز به روش سولوترمال از شرکت Merck تهیه شده‌اند و بدون هیچگونه فرآوری ثانوی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

برای سنتز ذرات مغناطیسی فریت کلسیم پوشش‌دار، در ابتدا ۲/۵ میلی‌مول $Ca(NO_3)_2.4H_2O$ (معادل ۵۹۰ میلی‌گرم) همراه با ۵ میلی‌مول $Fe(NO_3)_3.9H_2O$ (معادل ۲۰۱۹ میلی‌گرم) به ظرف حاوی ۴۰ میلی لیتر اتیلن گلایکول، اضافه می‌شود. در این حالت رنگ محلول به نارنجی تبدیل می‌شود. سپس مقادیر ۱/۱۴۸ g، ۱/۹۱۵ g و ۳/۹۶ g پلی‌اتیلن گلایکول برای سنتز سه نمونه پوشش‌دار با میزان پوشش ۶۸، ۷۸ و ۸۸ درصد وزنی (به ترتیب نمونه‌های S2، S3 و S4) به محلول حاصل اضافه می‌شود و همزدن در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به محلول شفاف نارنجی رنگ ادامه پیدا می‌کند. در این مرحله، بدون متوقف کردن فرآیند همزدن، مقدار ۷/۲ گرم سدیم‌استات به محلول اضافه می‌شود. با اضافه شدن استات سدیم به محلول، محلول به رنگ قهوه‌ای در می‌آید و بعد از گذشت حدود ۵ دقیقه، محلول بصورت کف‌مانند تبدیل می‌شود. با ادامه همزدن محلول به مدت ۳۰ دقیقه، یک سل غلیظ بدست می‌آید. محتویات ظرف به یک اتوکلاو ۱۰۰ میلی‌لیتری انتقال و اتوکلاو به مدت ۲۲ ساعت در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد در داخل یک گرم‌کن قرار داده می‌شود. رسوب سیاه رنگ با استفاده از آهنربای نئودیمیوم از محلول جدا می‌گردد و توسط اتانول و آب مقطر در چندین مرتبه شستشو داده می‌شود. نهایتا رسوب شسته شده در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶ ساعت در درون گرم‌کن خلأ خشک می‌شود. سنتز فریت کلسیم بدون پوشش (نمونه S1) نیز همانند سنتز ذرات پوشش‌دار است با این تفاوت که تنها پلی اتیلن گلایکول به محلول در حین سنتز اضافه نمی‌شود.

برای ارزیابی فازی نمونه‌های سنتز شده، از دستگاه Philips X'pert پراش پرتو ایکس (XRD) با استفاده از تابش تک‌رنگ CuKα (λ=1.5418Å) استفاده شده است. از نتایج بدست آمده از آزمون پراش پرتو ایکس، اندازه متوسط کریستالی نمونه‌ها از عرض پیک (۳۱۱) با استفاده از معادله شرر محاسبه شده‌اند. برای آنالیز ساختار کریستالی و دستیابی به توزیع کاتیونی، از پالایش ریتولد با استفاده از نرم افزار MAUD استفاده شده است. وجود عناصر کلسیم، آهن و اکسیژن در نمونه بدون پوشش و عدم وجود عناصر دیگر توسط آزمون طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس (EDX) نشان داده شده است. حضور پلی اتیلن گلایکول بر روی نمونه‌های سنتز شده توسط آزمایش ترموگراویمتری مورد بررسی قرار گرفته است. برای تعیین مورفولوژی و

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.4.7.0]

ساختار میکروسکوپی ذرات از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدان (FE-SEM) (TESCAN Vega II) استفاده شده است و از عکس‌های گرفته شده، توزیع اندازه ذرات از طریق برنامه Digimizer و Origion بر روی ۱۰۰ ذره که به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند، بدست آمده است. برای اندازه‌گیری خواص مغناطیسی مواد سنتز شده در دمای اتاق، از مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش (VSM) (شرکت مغناطیس دقیق کویر، ایران) استفاده شده است.

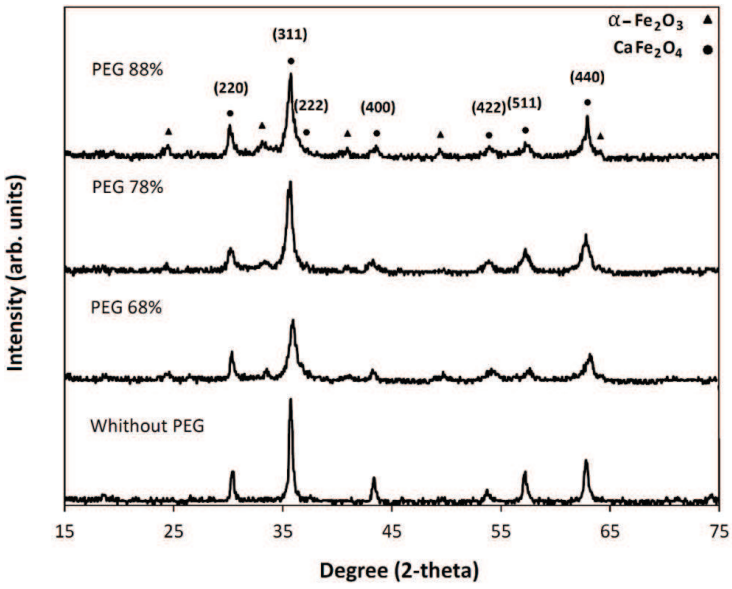
آزمایش هایپرترمیای مغناطیسی برای سوسپانسیون ذرات سنتز شده در آب با غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر توسط یک القاگر مغناطیسی متناوب فرکانس بالا (HF-H-ST 45 شرکت صدر صنعت دانش) در فرکانس ۳۰۰ کیلوهرتز و در شدت میدان مغناطیسی ۱۰ kA/m انجام شده است. برای انجام آزمایش هایپرترمیای مغناطیسی در شرایط ذکر شده، بعد از تهیه سوسپانسیون با غلظت بیان شده، آن‌را داخل ظرف مک‌کارتی ریخته و در داخل کویل مغناطیسی قرار داده می‌شود. سپس آمپر و ولتاژ دستگاه در مقادیر مشخص تنظیم و به مدت ۳۰ دقیقه، دمای نمونه هر ۵ دقیقه اندازه گرفته می‌شود و نمودار تغییرات دمای سوسپانسیون بر حسب زمان رسم می‌گردد می‌شود. با استفاده از نمودار حاصله، میزان اتلاف مغناطیسی (SLP) توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$SLP = C_P . \frac{m_f}{m_m} . (\frac{\partial T}{\partial t})_{t=0} \qquad (۱$$

که در این رابطه، C_P ظرفیت گرمایی ویژه سوسپانسیون ((۴/۱۸ J/(g °C))، m_f جرم سوسپانسیون، m_m جرم ذرات مغناطیسی موجود در سوسپانسیون و $(\frac{\partial T}{\partial t})_{t=0}$ شیب منحنی تغییرات دما بر حسب زمان در لحظه صفر است.

۳- نتایج و بحث

نمودار الگوی پراش پرتو ایکس برای نمونه‌های فریت کلسیم بودن پوشش و پوشش دار با پلی اتیلن گلایکول در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- الگوهای پراش پرتو ایکس برای نمونه $CaFe_2O_4$ در درصدهای مختلف پلی اتیلن گلایکول

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.4.7.0]

پیک‌های اندیس گذاری شده بر شکل (۲۲۰، ۳۱۱، ۲۲۲، ۴۰۰، ۴۲۲، ۵۱۱ و ۴۴۰) مربوط به ساختار اسپینل فریت کلسیم برای همه نمونه‌ها هستند. همانطور که از الگوی پراش پرتو ایکس معلوم است، افزوده شدن پلی‌اتیلن گلایکول سبب ایجاد ناخالصی α-Fe_2O_3 همراه با فریت اسپینل کلسیم در نمونه‌های پوشش‌دار می‌شود. همچنین با افزایش مقدار PEG پیک‌های الگوی پراش پهن‌تر می‌شود. پهن‌شدگی می‌تواند به دلیل کمتر شدن اندازه بلورک ذرات سنتز شده باشد. با استفاده از رابطه شرر، اندازه بلورک‌های ذرات سنتز شده محاسبه و در جدول ۱ ارائه شده‌اند. همانطور که ملاحظه می‌شود، پوشش‌دهی ذرات با پلی اتیلن گلایکول سبب کاهش اندازه بلورک ذرات شده است. علت این مساله را می‌توان کند شدن سرعت رشد ذرات بواسطه احاطه شدن آنها توسط پلی اتیلن گلایکول بیان کرد [۱۷]. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش میزان پلی اتیلن گلایکول سبب تغییر چندانی در اندازه بلورک ذرات سنتز شده نمی‌شود.

جدول ۱- اندازه محاسبه شده بلور و توزیع کاتیونی

نمونه	اندازه بلور (nm)	توزیع کاتیونی
S1	۳۵/۷	$(Ca_{0.11}Fe_{0.89})_A[Ca_{0.89}Fe_{1.11}]_BO_4$
S2	۲۹/۷	$(Ca_{0.10}Fe_{0.90})_A[Ca_{090}Fe_{1.10}]_BO_4$
S3	۲۹/۷	$(Ca_{0.08}Fe_{0.92})_A[Ca_{0.92}Fe_{1.08}]_BO_4$
S4	۲۹/۶	$(Ca_{0.07}Fe_{0.93})_A[Ca_{0.93}Fe_{1.07}]_BO$

توزیع کاتیونی بدست آمده از پالایش ریتولد که در جدول ۱ ارائه شده‌اند نشان می‌دهند که فریت کلسیم دارای ساختار جزئا معکوس است که در آن کاتیون‌های کلسیم بین مکان‌های چهار وجهی و هشت وجهی توزیع شده‌اند. اشغال مکان‌های بین‌نشین توسط کاتیون‌ها به عوامل شعاع یونی، میدان بلوری، آرایش الکترونی و قطبش یونی وابسته است. وجود کلسیم در مکان‌های بین‌نشین هشت وجهی به دلیل شعاع یونی بزرگ آن است که این مکان را برای آن مرجح می‌سازد. در اثر اعمال پوشش ضریب وارونگی که بصورت کسری از کاتیون‌های آهن در مکان‌های بین‌نشین چهار وجهی تعریف می‌شود تغییر چندانی نمی‌کند.

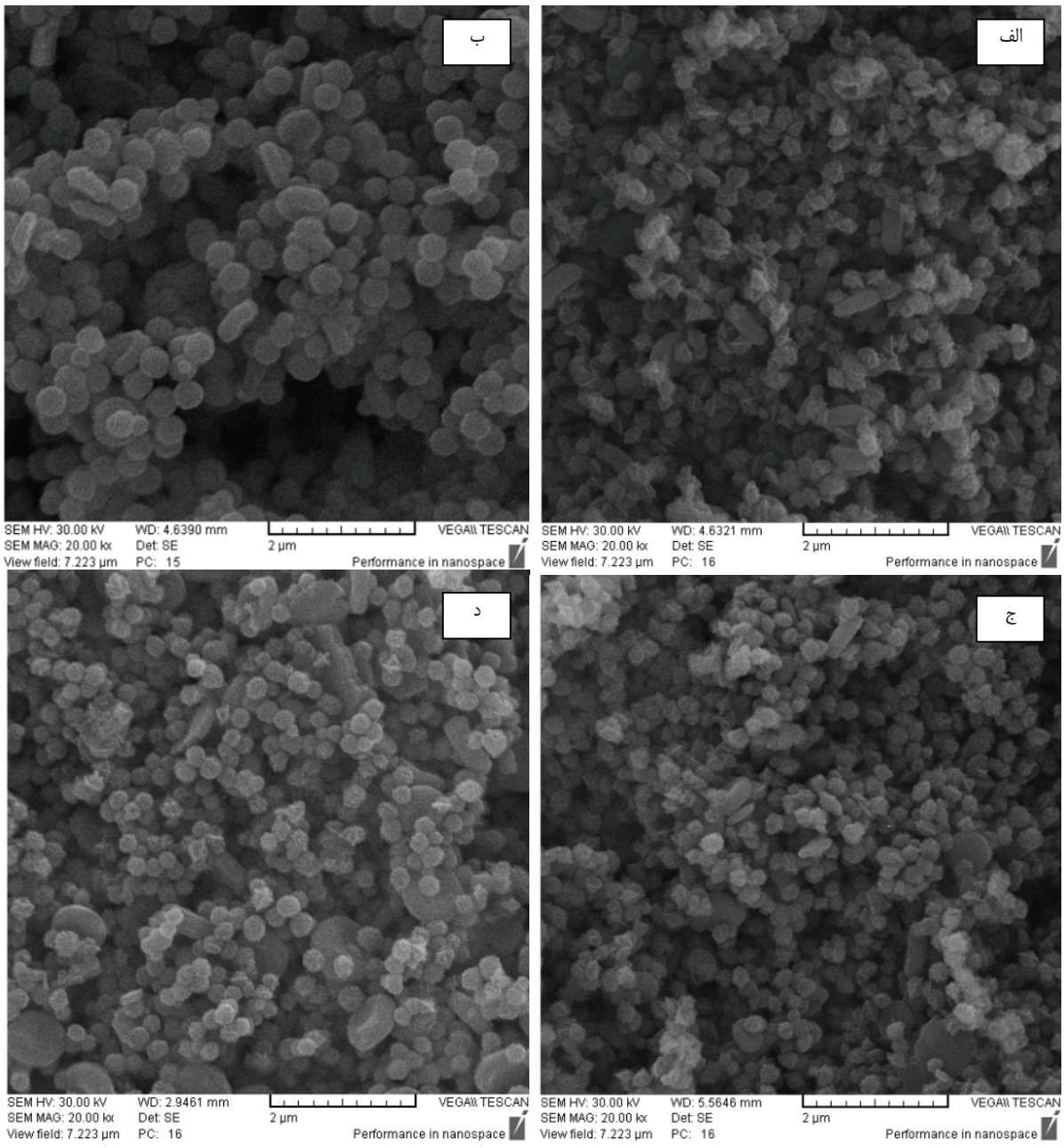
تصاویر ریزساختاری ذرات سنتز شده که توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی گرفته شده است در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. همانطور که ملاحظه می‌شود، ذرات سنتز شده بدون پوشش دارای شکل کروی، در حالی‌که ذرات حاوی پوشش به شکل شبه کروی هستند. با انتخاب تعدادی از ذرات توزیع اندازه ذرات بدست آمده‌اند (شکل ۳) و با استفاده از آنها، اندازه متوسط ذرات محاسبه و بر روی شکل ۳ نشان داده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که اندازه ذرات سنتز شده، با پوشش‌دهی کاهش پیدا کرده است و از مقدار متوسط ۳۹۴/۱ nm برای نمونه بدون پوشش به مقدار ۲۹۱/۱ nm، ۲۶۶/۳ nm و ۲۴۰/۵ nm به ترتیب برای نمونه‌های S2، S3 و S4 رسیده است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که افزودن میزان پلی اتیلن گلایکول، سبب کوچکتر شدن اندازه متوسط ذرات شده‌اند.

به دلیل شباهت ساختار کریستالی فریت‌های اسپینل، برای تائید بیشتر تشکیل فریت کلسیم لازم عناصر موجود در آن آنالیز شوند. شکل ۴ طیف پراکندگی انرژی پرتو ایکس (EDX) نمونه فریت کلسیم بدون پوشش را نشان می‌دهد.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.4.7.0]

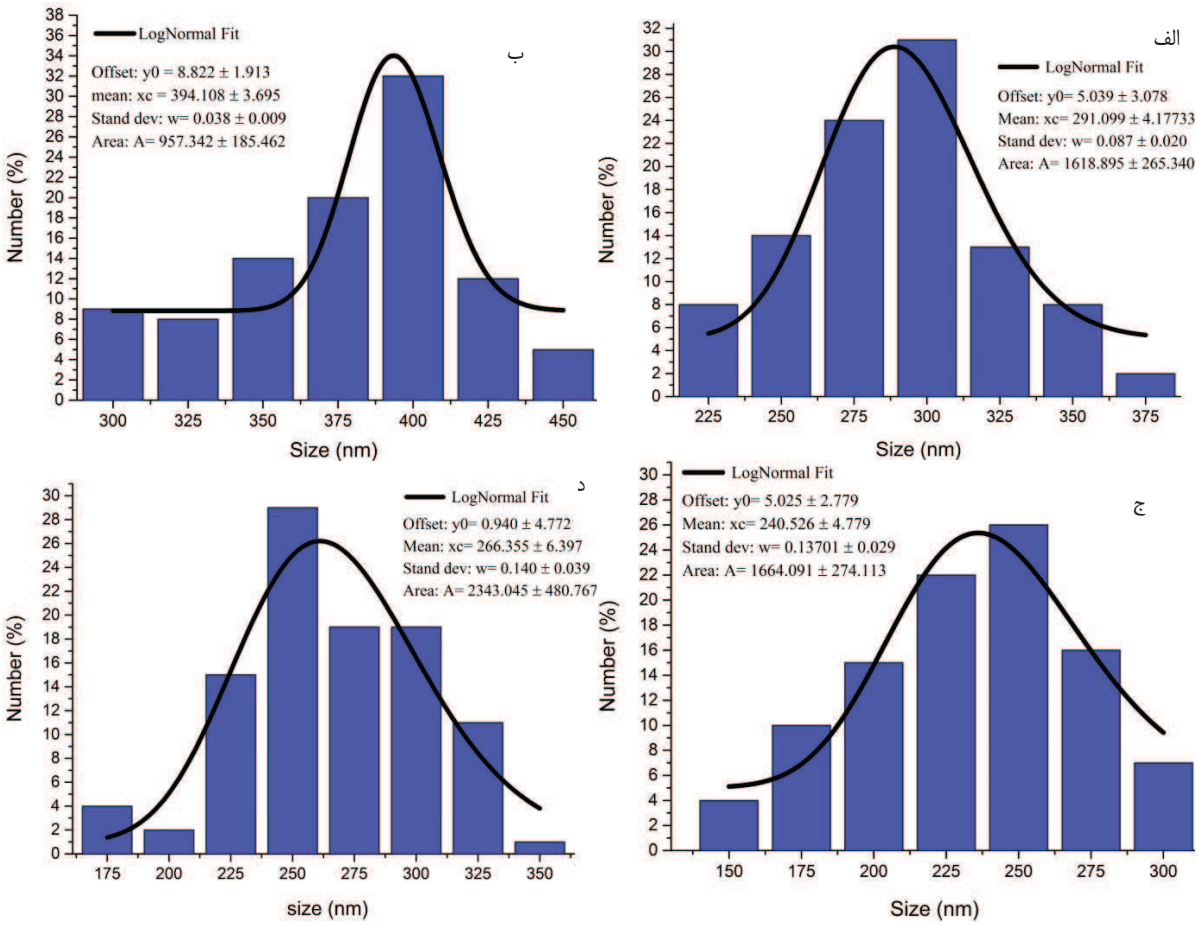
همانطور که در شکل مشخص است، تنها عناصر اکسیژن (O)، آهن (Fe) و کلسیم (Ca) در ساختار ذرات سنتز شده وجود دارند و هیچگونه ناخالصی در این ذرات موجود نیست.



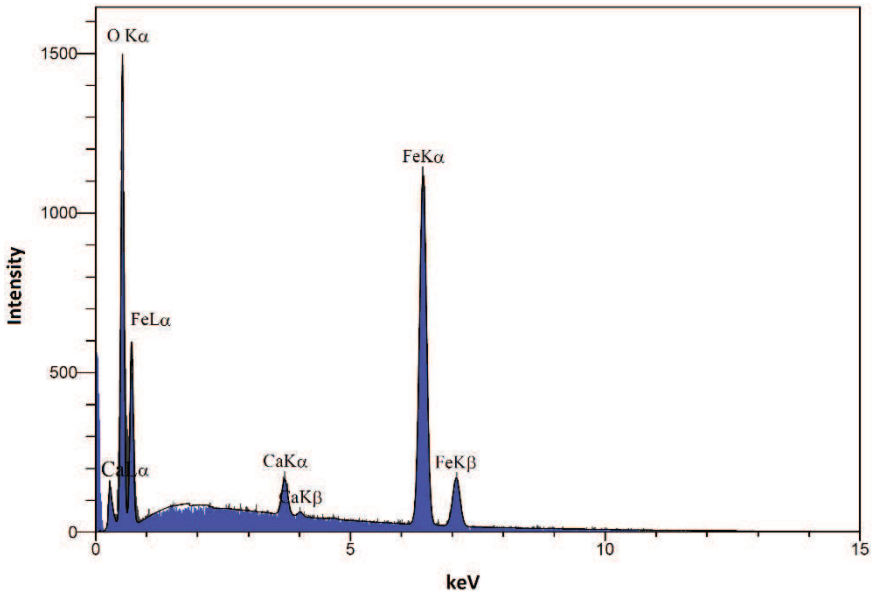
شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی روبشی نشر میدان از نمونه‌های سنتز شده، (الف) نمونه S1، (ب) نمونه S2، (ج) نمونه S3 و (د) نمونه S4

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.4.7.0]



شکل ۳- توزیع اندازه ذرات برای نمونه‌های سنتز شده، (الف) نمونه S1، (ب) نمونه S2، (ج) نمونه S3 و (د) نمونه S4



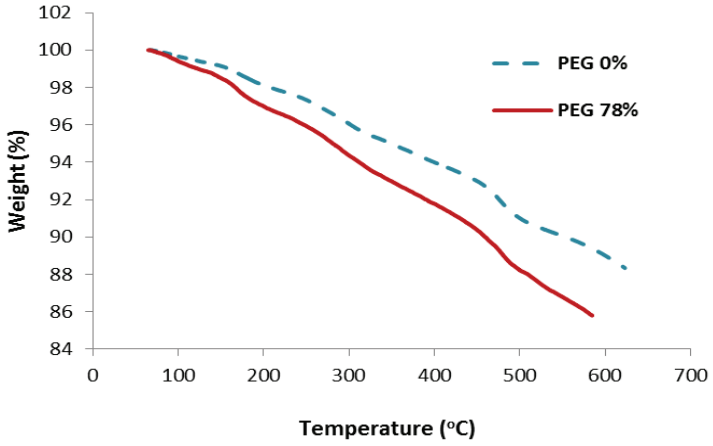
شکل ۴- طیف پراکندگی انرژی پرتو ایکس (EDX) ذرات مغناطیسی فریت کلسیم بدون پوشش

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-31]

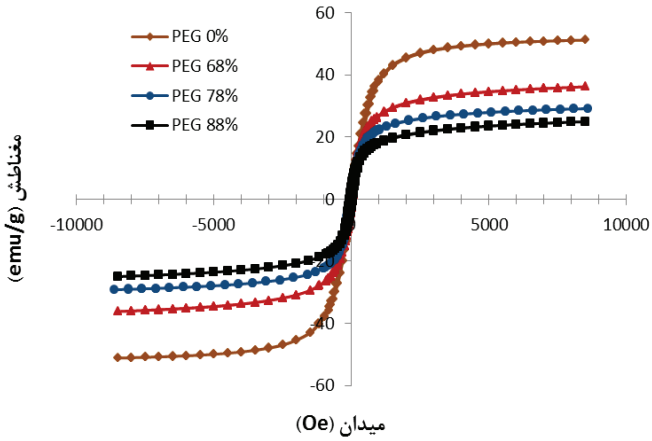
[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.4.7.0]

منحنی‌های آزمایش ترموگراویمتری برای نمونه بدون پوشش (S1) و نمونه با پوشش پلی اتیلن گلایکول (S3) و در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. همانطور که ملاحظه می‌شود، میزان افت وزنی بیشتر بواسطه حرارت دادن به نمونه‌های پوشش دار تائید بر حضور پوشش می باشد.

منحنی‌های هیسترزیس نمونه‌های سنتز شده در شکل ۶ و مقادیر مغناطش اشباع و پسماندزدای مغناطیسی (H_c) در جدول ۲ ارائه شده اند. همانطور که مشاهده می‌شود، مغناطش اشباع نمونه‌ها با افزایش درصد پلی اتیلن گلایکول، کاهش می‌یابد و از مقدار حدود ۵۱/۲ emu/g برای نمونه فریت کلسیم بدون پوشش، به حدود ۲۴/۹ emu/g برای نمونه فریت کلسیم با ۸۸ درصد پوشش پلی اتیلن گلایکول تقلیل می‌یابد. همچنین، افزایش بیشتر مقدار پلی اتیلن گلایکول، سبب کاهش بیشتر مقدار مغناطش اشباع می‌شود. این کاهش به دلیل افزایش میزان ماده غیرمغناطیسی پلی اتیلن گلایکول در نمونه‌ها می‌باشد [۹] که حضور پلی اتیلن گلایکول در نمونه‌های را مجددا تایید می‌کند. علاوه بر این، همانطور که نتایج آزمون پراش پرتو ایکس نشان داد، حضور پلی اتیلن گلایکول سبب ایجاد ماده آنتی فرومغناطیس α-Fe_2O_3 می‌شود که منجر به کاهش بیشتر مغناطش اشباع نمونه‌های پوشش‌دار می‌شود.



شکل ۵- نتایج آزمایش ترموگراویمتری بر روی نمونه‌های بدون پوشش (S1) و نمونه با ۷۸٪ پوشش پلی اتیلن گلایکول (S3)



شکل ۶- نمودار مغناطش نمونه‌های سنتز شده بر اساس میزان پلی اتیلن گلایکول موجود در نمونه

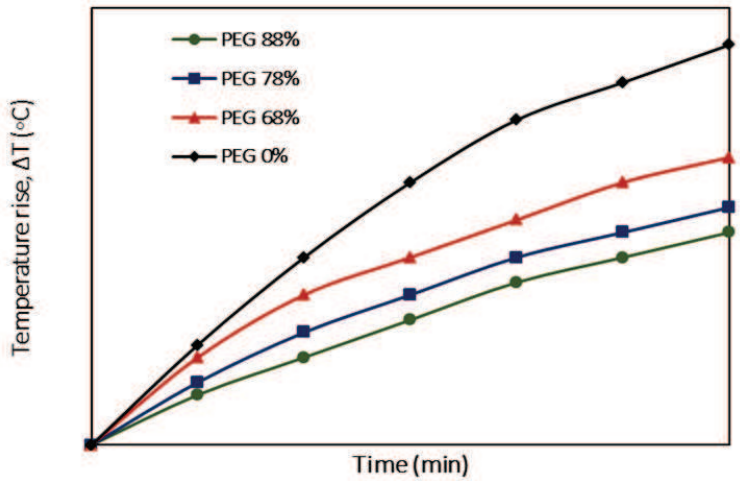
[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.4.7.0]

جدول ۲- مقادیر مغناطش اشباع، پسماندزدای مغناطیسی و میزان اتلاف مغناطیسی نمونه‌های سنتز شده

نمونه	مغناطش اشباع (emu/g)	پسماندزدای مغناطیسی (Oe)	اتلاف مغناطیسی (W/g)
S1	۵۱/۲	۵۱/۱	۱/۱۲
S2	۳۶/۲	۵۵/۴	۰/۹۸
S3	۲۹/۲	۶۰/۸	۰/۷۰
S4	۲۴/۹	۵۷/۶	۰/۵۶

نتایج هایپرترمیای مغناطیسی بواسطه اعمال میدان مغناطیسی متناوب با فرکانس ۳۰۰ kHz و شدت میدان مغناطیسی ۱۰ kA/m بر سوسپانسیون ذرات سنتز شده فریت کلسیم پوشش‌دار و بدون پوشش در شکل ۷ نشان داده شده است. با استفاده از این منحنی‌ها و معادله (۱)، میزان اتلاف مغناطیسی (SLP) نمونه‌ها محاسبه و در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۷- تغییرات دمایی سوسپانسیون ذرات سنتز شده در فرآیند هایپرترمیای مغناطیسی

همانطور که ملاحظه می‌شود، طبق نتایج بدست آمده از آزمایش مغناطیس‌سنج نمونه لرزان، نمونه‌های با اشباع مغناطیسی بالاتر، توانایی بالا بردن دمای سوسپانسیون را به مقداری بیشتر در شرایط یکسان میدان متناوب مغناطیسی دارند و به همین ترتیب، میزان بالاتری از اتلاف مغناطیسی را دارا می‌باشند. علت این مساله را این‌گونه می‌توان بیان کرد که مکانیسم موثر در تولید گرما توسط مواد مغناطیسی قرار داده شده در میدان مغناطیسی متناوب در شرایط آزمایشی این تحقیق، توسط مکانیسم افت هیسترزیس می‌باشد چراکه مکانیسم‌های دیگر ایجاد گرمای مغناطیسی که عبارتند از تولید گرما توسط جریان‌های گردابی و توسط آسایش‌های نیلز و براونی، نمی‌توانند در شرایط عملیاتی حاضر در آزمایشات موثر باشند. تولید گرما توسط ایجاد جریان‌های گردابی، در اندازه ذرات بزرگتر از سانتی‌متر و

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.4.7.0]

تولید گرما توسط آسایش‌های نیلز و براونی، در اندازه ذرات کمتر از ۱۰۰ نانومتر صورت می‌پذیرد [۱۸] و با توجه به اینکه اندازه عمده ذرات مورد آزمایش در این تحقیق در محدوده ۲۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر قرار گرفته‌اند، مکانیسم افت هیسترزیس عامل ایجاد حرارت می‌باشد. از آنجایی‌که مقدار گرمای حاصله از افت هیسترزیس با مساحت سطح حلقه هیسترزیس رابطه مستقیم دارد [۱۹]، میزان گرمای تولیدی توسط ذراتی که مساحت حلقه هیسترزیس بالاتری را دارند، بیشتر خواهد بود. با توجه به اینکه مقدار پسماندزادی مغناطیسی نمونه‌های تولید شده تفاوت قابل ملاحظه‌ای با یکدیگر ندارند (جدول ۲)، مساحت سطح حلقه هیسترزیس ذراتی که اشباع مغناطیسی بالاتری دارند، بیشتر می‌باشد و بنابراین، نمونه بدون پوشش دارای بالاترین مقدار اتلاف مغناطیسی و نمونه با ۸۸ درصد وزنی پلی اتیلن گلایکول، دارای کمترین مقدار اتلاف مغناطیسی می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ذرات مغناطیسی فریت کلسیم بدون پوشش و پوشش‌دار با مقادیر مختلف پلی اتیلن گلایکول به روش سولوترمال در محیط اتیلن گلایکول سنتز شد. ذرات سنتز شده بصورت تک فاز و با توزیع کاتیونی جزئا معکوس برای تمامی نمونه‌ها بود و میزان توزیع با تغییر مقدار پوشش، تغییر قابل توجهی نداشت. مقایسه ذرات بدون پوشش با پوشش‌دار نشان داد که پوشش پلی اتیلن گلایکول، اندازه ذرات سنتز شده را کاهش قابل توجهی می‌دهد و با افزایش مقدار پوشش، اندازه ذرات سنتز شده کاهش می‌یابد. بسته به میزان پوشش، مغناطش اشباع نمونه‌ها از ۵۱/۲ emu/g برای نمونه بدون پوشش تا ۲۴/۹ emu/g برای نمونه با حداکثر پوشش بدست آمد. با استفاده از مکانیسم هیسترسیس برای تولید گرما، سوسپانسیون ذرات سنتز شده افزایش دمایی معادل حداکثر ^{o}C ۳/۵ و حداقل ^{o}C ۲ با اتلاف مغناطیسی حداکثر W/g ۱/۱۲ و حداقل W/g ۰/۵۶ به ترتیب برای نمونه‌های بدون پوشش و با حداکثر پوشش در میدان مغناطیسی متناوب به همراه داشتند.

مراجع

[1] J. Estelrich, M. J. Sánchez-Martín, and M. A. Busquets, "Nanoparticles in magnetic resonance imaging: From simple to dual contrast agents," International Journal of Nanomedicine, vol. 10, pp. 1727-1741, 2015.

[2] M. Saeedi, O. Vahidi, V. Goodarzi, M. R. Saeb, L. Izadi, and M. Mozafari, "A new prospect in magnetic nanoparticle-based cancer therapy: Taking credit from mathematical tissue-mimicking phantom brain models," Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine, vol. 13, pp. 2405-2414, 2017.

[3] A. Kheradmand, O. Vahidi, and S. M. Masoudpanah, "Magnetic, hyperthermic and structural properties of zn substituted CaFe2O4 powders," Applied Physics A, vol. 124, p. 255, 2018.

[4] L. Khanna and N. K. Verma, "Synthesis, characterization and in vitro cytotoxicity study of calcium ferrite nanoparticles," Materials Science in Semiconductor Processing, vol. 16, pp. 1842-1848, 2013.

[5] M. Mahdavi, M. Ahmad, M. Haron, F. Namvar, B. Nadi, M. Rahman, et al., "Synthesis, Surface Modification and Characterisation of Biocompatible Magnetic Iron Oxide Nanoparticles for Biomedical Applications," Molecules, vol. 18, p. 7533, 2013.

[6] W. Wu, Q. He, and C. Jiang, "Magnetic Iron Oxide Nanoparticles: Synthesis and Surface Functionalization Strategies," Nanoscale Research Letters, vol. 3, p. 397, 2008.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.4.7.0]

[7] C. Tassa, S. Y. Shaw, and R. Weissleder, "Dextran-Coated Iron Oxide Nanoparticles: a Versatile Platform for Targeted Molecular Imaging, Molecular Diagnostics and Therapy," Accounts of chemical research, vol. 44, pp. 842-852, 2011.
[8] V. Zamora-Mora, M. Fernández-Gutiérrez, Á. González-Gómez, B. Sanz, J. S. Román, G. F. Goya, et al., "Chitosan nanoparticles for combined drug delivery and magnetic hyperthermia: From preparation to in vitro studies," Carbohydrate Polymers, vol. 157, pp. 361-370, 2017.
[9] M. Saeedi and O. Vahidi, "Preparation and characterization of magnetic core–shell iron oxide@glycyrrhizic acid nanoparticles in ethanol–water mixed solvent," Applied Physics A, vol. 124, p. 431, 2018.
[10] S. Rana, N. G. Shetake, K. C. Barick, B. N. Pandey, H. G. Salunke, and P. A. Hassan, "Folic acid conjugated Fe3O4 magnetic nanoparticles for targeted delivery of doxorubicin," Dalton Trans, vol. 45, pp. 17401-17408, 2016.
[11] Z. Hajikarimi, S. Khoei, S. Khoee, and S. R. Mahdavi, "Evaluation of the cytotoxic effects of PLGA coated iron oxide nanoparticles as a carrier of 5- fluorouracil and mega-voltage X-ray radiation in DU145 prostate cancer cell line," IEEE Trans Nanobioscience, vol. 13, pp. 403-8, 2014.
[12] C. Yue-Jian, T. Juan, X. Fei, Z. Jia-Bi, G. Ning, Z. Yi-Hua, et al., "Synthesis, self-assembly, and characterization of PEG-coated iron oxide nanoparticles as potential MRI contrast agent," Drug Dev Ind Pharm, vol. 36, pp. 1235-44, 2010.
[13] A. Makridis, K. Topouridou, M. Tziomaki, D. Sakellari, K. Simeonidis, M. Angelakeris, et al., "In vitro application of Mn-ferrite nanoparticles as novel magnetic hyperthermia agents," Journal of Materials Chemistry B, vol. 2, pp. 8390-8398, 2014.
[14] M. Saeedi and O. Vahidi, "Induced tissue cell death by magnetic nanoparticle hyperthermia for cancer treatment: an in silico study," Iranian Journal of Chemical Engineering(IJChE), vol. 14, pp. 59-79, 2017.
[15] J. H. Lee, J. T. Jang, J. S. Choi, S. H. Moon, S. H. Noh, J. W. Kim, et al., "Exchange-coupled magnetic nanoparticles for efficient heat induction," Nat Nanotechnol, vol. 6, pp. 418-22, 2011.
[16] M. Saeedi, O. Vahidi, and S. Bonakdar, "Synthesis and characterization of glycyrrhizic acid coated iron oxide nanoparticles for hyperthermia applications," Materials Science and Engineering: C, vol. 77, pp. 1060-1067, 2017.
[17] S. Akbari, S. M. Masoudpanah, S. M. Mirkazemi, and N. Aliyan, "PVA assisted coprecipitation synthesis and characterization of MgFe2O4 nanoparticles," Ceramics International, vol. 43, pp. 6263-6267, 2017.
[18] L. Rakhsha, S. M. Masoudpanah, and M. Tamizifar, "Magnetic and heating rate properties of Mn1-xCoxFe2O4 nanoparticles synthesized by coprecipitation method," Iranian Journal of Ceramic Science & Engineering, vol. 6, pp. 67-78, 2017.
[19] S.-h. Noh, W. Na, J.-t. Jang, J.-H. Lee, E. J. Lee, S. H. Moon, et al., "Nanoscale Magnetism Control via Surface and Exchange Anisotropy for Optimized Ferrimagnetic Hysteresis," Nano Letters, vol. 12, pp. 3716-3721, 2012.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1396.6.4.7.0]