

بررسی تاثیر پوشش های پلی اتیلن ایمین و دکستران بر خواص ساختاری و مغناطیسی نانوذرات مگنتیت

حسین نیک منش^{۱*}، فاطمه دریانی داریونی^۲، عباس بچاچری^۱، و امیرحسین احمدی^۲

^۱ گروه فیزیک، دانشکده علوم و فناوری نانو وزیستی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

^۲ گروه زیست شناسی، دانشکده علوم و فناوری نانو وزیستی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

پست الکترونیکی: h.nikmanesh@yahoo.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۰۵؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۴/۰۵/۰۲)

چکیده:

در این پژوهش، با استفاده از روش هم رسوبی، اثرات پلیمرهای پلی اتیلن ایمین و دکستران به عنوان پوشش پلیمری روی خواص ساختاری، ریخت شناسی و مغناطیسی نانوذرات اکسید آهن مگنتیت مطالعه شد. نمونه ها با استفاده از روش های استاندارد تهیه شدند و ویژگی های ساختاری و مغناطیسی آن ها با کمک تحلیل هایی نظیر پراش پرتو ایکس، میکروسکوپ الکترونی عبوری با قدرت تفکیک بالا، میکروسکوپ الکترونی روبشی میدان تابشی، پراکندگی انرژی ناحیه گزینشی، مغناطیس سنج نمونه ارتعاشی مورد بررسی قرار گرفتند. یافته های این پژوهش نشان می دهد که هر دو پوشش ساختار اسپینل Fe_3O_4 را حفظ می کنند، اما پوشش های پلیمری تفاوت هایی در کج شدگی اسپین سطحی و ناهمسانگردی مغناطیسی متفاوت ایجاد می کنند. نتایج حاصل نشان می دهد که نانوذرات پوشش دار با پلی اتیلن ایمین به صورت قابل توجهی نسبت به نانوذرات مگنتیت خالص و پوشش دار با دکستران اندازه بزرگتری داشته، کلوخه گی کمتری نشان می دهند و پایداری بالاتری دارند. در حالی که پوشش دکستران به دلیل لایه های آلی نازک تر، تجمع ذرات بیشتری دارند و دارای مغناطش اشباع بالاتری هستند. در حقیقت نانوذرات حاوی پوشش دکستران مانعی فضایی ایجاد می کنند که منجر به رفتارهای تجمعی متفاوت می شود.

واژه های کلیدی: نانوذرات مگنتیت Fe_3O_4 ، پوشش دکستران، پلی اتیلن ایمین، ویژگی های ساختاری و مغناطیسی

۱. مقدمه

اغلب با چالش هایی مانند تجمع، اکسیداسیون و پایداری کلوئیدی ناکافی در محیط های فیزیولوژیی مواجهه است. برای غلبه بر این محدودیت ها، اصلاح سطح با پوشش های آلی یا پلیمری به عنوان یک راهبرد کلیدی برای بهبود پایداری، زیست سازگاری و عملکرد چندگانه مطرح شده است [۱-۶].

در میان مواد مختلف برای پوشش دهی، پلی اتیلن ایمین (PEI) و دکستران (DEX) به دلیل خواص فیزیک و شیمیایی متمایز خود، از امیدبخش ترین گزینه ها به شمار می روند [۷]. PEI به عنوان یک پلیمر کاتیونی با چگالی بالای گروه های آمینی، اتصال الکترواستاتیک قوی به سطح منفی نانوذرات مگنتیت

نانوذرات مگنتیت (Fe_3O_4) به دلیل خواص مغناطیسی منحصر به فرد، زیست سازگاری و کاربردهای گسترده در حوزه های پزشکی، کاتالیزور و پالایش محیطی مورد توجه ویژه ای قرار گرفته اند. رفتار ابرپارامغناطیس ذاتی، مغناطش اشباع بالا و پایداری شیمیایی این نانوذرات، آنها را به گزینه ای آرمانی برای کاربردهایی مانند رهایش هدفمند دارو، گرمادرمانی مغناطیسی و بهبود کنتراست در تصویربرداری تشدید مغناطیسی (MRI) تبدیل کرده است. با این حال، استفاده عملی از این نانوذرات

ایجاد می‌کند که منجر به بهبود پراکندگی و امکان اتصال بیشتر به بیومولکول‌ها می‌شود [۸]. از سوی دیگر، دکستران به عنوان یک پلی‌ساکارید خنثی، آب‌دوستی عالی، ویژگی‌های استتاری در برابر شناسایی ایمنی و زمان گردش طولانی‌تر در سامانه‌های زیستی را فراهم می‌کند. این بینش‌ها برای طراحی هدفمند نانوذرات مگنتیت اصلاح شده برای کاربردهای خاص بسیار مهم هستند [۹]. به عنوان مثال، نانوذرات پوشش‌دار با دکستران ممکن است برای کاربردهای درون تنی که نیاز به زمان گردش طولانی دارند مناسب‌تر باشند، در حالی که سامانه‌های پوشش‌دار با PEI می‌توانند پاسخ مغناطیسی بهینه‌ای در زیرساخت‌های تشخیصی یا درمانی ایجاد کنند. این تحقیق با روشن‌سازی ارتباط بین شیمی پوشش و عملکرد مغناطیسی، گامی در جهت طراحی منطقی نانوذرات Fe_3O_4 برای کاربردهای پزشکی و فناوری برمی‌دارد.

نانوذرات مگنتیت را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف سنتز کرد، که هم‌رسوبی شگردی است که اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش اغلب شامل استفاده از نمک‌های آهن مانند کلرید فریک و سولفات آهن به عنوان پیش ماده‌ها است. روش هم‌رسوبی و همچنین روش‌های احتراق، موفقیت‌آمیز بوده‌اند. اصلاح‌کننده‌هایی مانند سیترات سدیم و اسید اولئیک گاهی اوقات در طول سنتز برای تأثیرگذاری بر خواص نانوذرات حاصل استفاده می‌شوند. این روش‌ها نانوذرات مغناطیسی مگنتیت مناسب برای کاربردهای مختلف را تولید می‌کنند [۱-۳ و ۱۰].

خواص ساختاری و مغناطیسی نانوذرات Fe_3O_4 به شدت تحت تأثیر ماهیت ماده پوشش‌دهنده قرار دارند. از دیدگاه ساختاری، این مواد دارای شبکه بلوری مکعبی با گروه فضایی $Fd3m$ هستند که در آن یون‌های فلزی بین زیرشبکه‌های چهاروجهی (A) و هشت‌وجهی (B) توزیع می‌شوند. مطالعات نشان می‌دهند که پوشش‌های پلیمری می‌توانند بلورینگی، اندازه ذرات، مغناطش اشباع و برهم‌کنش‌های بین ذره‌ای را تغییر دهند که نهایتاً بر عملکرد ساختاری و مغناطیسی تأثیر می‌گذارد. برای مثال، لایه‌های ضخیم پلیمری ممکن است برهم‌کنش‌های دوقطبی را کاهش دهند، اما می‌توانند هسته

مغناطیسی را نیز پوشانده و منجر به کاهش مغناطش اشباع شوند [۱۰-۱۲].

از طرفی، بررسی‌های مغناطیسی نشان می‌دهد که اندازه نانوذرات تأثیر قابل توجهی بر رفتار مغناطیسی این مواد دارد، به‌طوری که با کاهش اندازه ذرات به زیر ۲۰ نانومتر، پدیده ابرپارامغناطیس در هر دو سامانه مشاهده می‌شود. مطالعات ساختاری با استفاده از روش‌هایی مانند پراش پرتو ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) تأیید می‌کند که پارامترهای سنتز مانند دما و زمان کلسیناسیون می‌توانند بر درجه بلورینگی، اندازه ذرات و توزیع کاتیونی تأثیر بگذارند که این عوامل به نوبه خود خواص مغناطیسی ماده را کنترل می‌کنند [۱۳-۱۵].

این مطالعه با هدف بررسی تأثیر پوشش‌های PEI و DEX بر خواص ساختاری و مغناطیسی نانوذرات Fe_3O_4 سنتز شده به روش هم‌رسوبی انجام شده است و با به‌کارگیری ترکیبی از روش‌های پیشرفته مشخصه‌یابی شامل پراش پرتو ایکس همراه با تحلیل ریتولد، میکروسکوپ الکترونی عبوری با وضوح بالا، میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی، به بررسی نظام‌مند این خواص پرداخته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که انتخاب پوشش تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی نانوذرات دارد و به طور ویژه نوع پوشش باعث تغییر در اندازه نانوذرات می‌شود. در نتیجه، می‌توان با بهینه‌سازی شرایط ساخت نانوذرات، نانوذراتی با برهم‌کنش‌های کنترل‌شده برای کاربردهای زیست‌پزشکی مانند دارورسانی هدفمند و گرمادرمانی و یا نانوذراتی با مغناطش اشباع بالا برای کاربردهای زیست فناوری مانند، تصفیه آب و فاضلاب و MRI تولید کرد.

۲. مواد و روش آزمایش

در این مطالعه، برای سنتز نانوذرات Fe_3O_4 از روش هم‌رسوبی استفاده شد. مقدار مشخصی از مواد اولیه $FeCl_3$ و $FeCl_4$ را با ترازو وزن کرده و به صورت جداگانه در ۲۰ میلی لیتر آب دو بار تقطیر حل شد و درون هر دو بشر مگنت قرارداده و روی همزن مغناطیسی گذاشته شد تا به صورت

۳. نتایج و بحث

۳.۱. الگوی پراش پرتوی ایکس (XRD)

شکل ۱، الگوهای XRD مگنتیت خالص، مگنتیت با پوشش دکستران و مگنتیت با پوشش پلی اتیلن ایمین را نشان می‌دهد. استفاده از نرم‌افزار MAUD برازش ریتولد برای هر سه نمونه انجام شده که ساختار اسپینل بدون هیچ گونه ناخالصی را در الگوهای XRD تایید می‌کند. قله‌های مربوط به صفحات (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۲۲۲)، (۴۰۰)، (۴۲۲)، (۶۱۱)، (۴۴۰)، (۶۲۰)، (۵۳۳) و (۴۴۴) برای مگنتیت خالص در شکل ۱. الف نشان دهنده تشکیل فاز اسپینل با گروه فضایی $Fd\bar{3}m$ است [۱۳ و ۱۴]. همچنین الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به نمونه‌های نانوذرات مگنتیت با پوشش های دکستران و پلی اتیلن ایمین که در شکل های ۱. ب و ج دیده می شوند که مجدداً نشان دهنده تشکیل فاز اسپینل بدون هرگونه ناخالصی است و با کارت استاندارد JCPDS شماره ۰۱-۰۸۱-۷۲۴۹ در تطابق اند. همان گونه که به وضوح در شکل ۱ دیده می‌شود، پس از فرایند پوشش دهی مگنتیت با مواد پلیمری شدت قله های مربوط به صفحات بلوری کاهش یافته که به خاطر وجود یک فاز غیربلوری به عنوان پوشش روی بلورهای مگنتیت است. علاوه بر آن، طبق جدول ۱ اگرچه بلورینگی نمونه ها با افزودن پوشش کاهش یافته اما پهنای قله ها در نصف بیشینه ارتفاع (FWHM) که معیاری از اندازه نانوذرات است کاهش یافته که نشان دهنده افزایش اندازه نانوذرات طی مرحله پوشش دهی است [۱۴ و ۱۵].

جدول ۱ پارامتر sig، ثابت شبکه تجربی (a)، اندازه ذرات (D)، کرنش شبکه (ε) که از تحلیل ریتولد و توسط نرم افزار MAUD به دست آمده اند را نشان می‌دهد. پارامتر sig خوبی برازش را نشان می‌دهد [۱۶]. هرچه این پارامتر به ۱ نزدیک تر باشد، تطابق داده تجربی و نظری در برازش ریتولد بهتر بوده است. مقدار بدست آمده برای sig نشان دهنده تطابق خوب داده تجربی و نظری است. مقدار کرنش شبکه نیز در نمونه های با پوشش افزایش یافته که به خاطر افزودن یک لایه پلیمری آمورف روی نانوذرات بلوری است.

همگن حل شود. سپس محلول درون هر دو بشر در یک بالن دو دهانه ریخته شد. بالن روی همزن مغناطیسی با دمای ۸۰ درجه قرار گرفت و با نصب بادکنک حاوی گاز نیتروژن بر گردنه آن، محتویات بالن تحت جو نیتروژن قرار گرفت. سپس مقداری از NaOH را در ۱۰۰ میلی لیتر آب دو بار تقطیر حل شد. محلول ۱/۵ مولار سود به دست آمده با سرنگ به صورت قطره قطره در طی سه ساعت به محلول آهن کلرید اضافه شد. بعد از گذشت سه ساعت محلول سیاه رنگ حاصل از بالن خارج و درون یک بشر ریخته شد و سپس با کمک آهنربا رسوب سیاه رنگ را جدا کرده و سه بار با آب دو بار تقطیر و اتانول شسته شده و در خشک کن خلاء با دمای ۸۰ درجه سانتیگراد خشک شد.

در مرحله پوشش دهی به کمک پلی اتیلن ایمین با فرمول شیمیایی C_2H_5N ، مقدار مشخصی از نانوذرات مگنتیت ساخته شده را وزن کرده و با ۳۰۰ میکرولیتر پلی اتیلن ایمین، درون یک بالن حجمی کوچک ریخته و ۱۰ میلی لیتر آب دوبار تقطیر به آن اضافه شد. سپس یک مگنت کوچک درون بالن قرارداده شد. سر بالن بسته شد و به مدت ۲۴ ساعت بر روی همزن مغناطیسی قرار گرفت. پس از این مدت، بالن برداشته شد و بعد از رسوب دهی ماده با آهنربا، سه بار با آب دیونیزه شستشو داده شد. در انتها نانوذره پوشش دار حاصل در خشک کن تحت دمای مشخص قرار گرفت تا خشک شود.

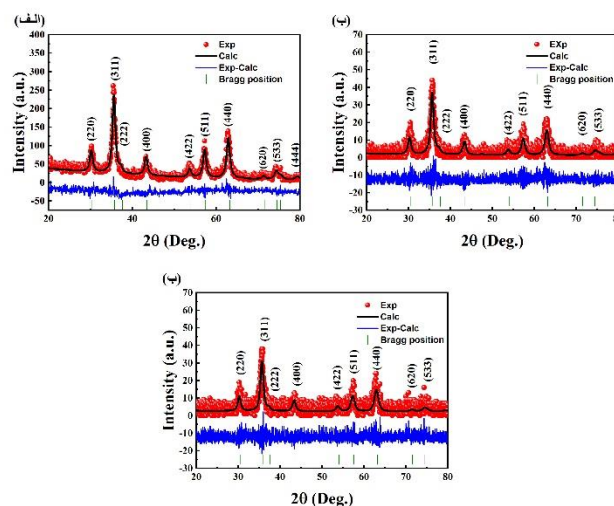
برای پوشش دهی با استفاده از دکستران $H(C_6H_{10}O_5)xOH$ ، پس از ساخت نانوذرات مگنتیت، یک گرم از پوشش دکستران را وزن کرده و در یک بالن ریخته و به آن ۱۰۰ میلی لیتر آب دوبار تقطیر اضافه شد. سپس محلول را روی همزن مغناطیسی قرار داده تا به دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد برسد. به محض رسیدن به دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد مقدار یک گرم از نانوذره مگنتیت را وزن کرده و به محتویات بالن اضافه کرده و برای مدت زمان یک ساعت این دما حفظ شد. بعد از گذشت یک ساعت بالن از روی همزن مغناطیسی برداشته و در دمای آزمایشگاه سرد شد و پس از آن به وسیله آهنربا رسوب را از مایع رویی جدا کرده و رسوب با متانول شسته شد و برای خشک کردن در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد در خشک کن خلاء قرار گرفت.

نانوذرات این برهم کنش ها تا حدودی کاهش یافته و از حالت کلوخه‌ای نانو ذرات کاسته شده است [۱۸].

شکل های ۳، تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری و ضوح بالا (HRTEM) را نشان می دهد. در تصویر ۳. الف، نانوذرات نمونه مگنتیت خالص با توزیع یکنواخت را نشان می دهد که شکل کروی به خوبی در این تصاویر قابل مشاهده است. از طرفی در تصویر ۳. ب، نانوذرات نمونه مگنتیت با پوشش دکستران دیده می شود که این پوشش دهی باعث شده کمی از یکنواختی توزیع نانوذرات کاسته شود و شکل ذرات نیز کاملاً کروی نیست. در حقیقت پوشش دکستران مانعی فضایی ایجاد می کند که منجر به رفتارهای تجمعی بیشتری می شود [۲۰]. در نهایت تصویر ۳. ج، نانوذرات مگنتیت با پوشش پلی اتیلن ایمین مشاهده می شود که دارای توزیع غیر یکنواخت و شکل هایی که عموماً به صورت هسته-پوسته هستند که ناشی از یک فرایند هسته-پوسته با هسته مغناطیسی مگنتیت به همراه یک پوسته پلیمری پلی اتیلن ایمین است. این فرایند پوشش دهی در نمونه آخر تقریباً باعث بزرگتر شدن اندازه ذرات تا حدود دوبرابر شده است.

تصویر الگوی پراش الکترونی ناحیه گزینشی (SAED) نمونه های مگنتیت خالص و مگنتیت با پوشش های دکستران و پلی اتیلن ایمین در شکل ۴ به ترتیب قرار گرفته است.

این الگوها مجموعه ای از نقاط و حلقه های دبی را نشان می دهند که مربوط به صفحات hkl ساختار اسپینل هستند. پخش شدگی این نقاط و سپس تبدیل به حلقه های دبی، در حالی که هیچ حلقه پراش دیگری دیده نمی شود، تشکیل ساختار اسپینل با بلورینگی متفاوت در مقیاس نانو را تأیید می کند. به عبارت دیگر هر چه پهن شدگی بیشتر باشد از میزان بلورینگی کاسته شده و به سمت آمورف بودن پیش می رود [۱۵ و ۲۰]. تصویر ۴. الف، مربوط به مگنتیت خالص است که مشاهده می شود نقاط درخشان در شعاع های مشخصی وجود دارند که نشان دهنده تشکیل ساختار اسپینل با بلورینگی بالا است و در نمونه های دیگر تعداد این نقاط درخشان کاهش یافته و دایره های هم مرکز تشکیل شده است.



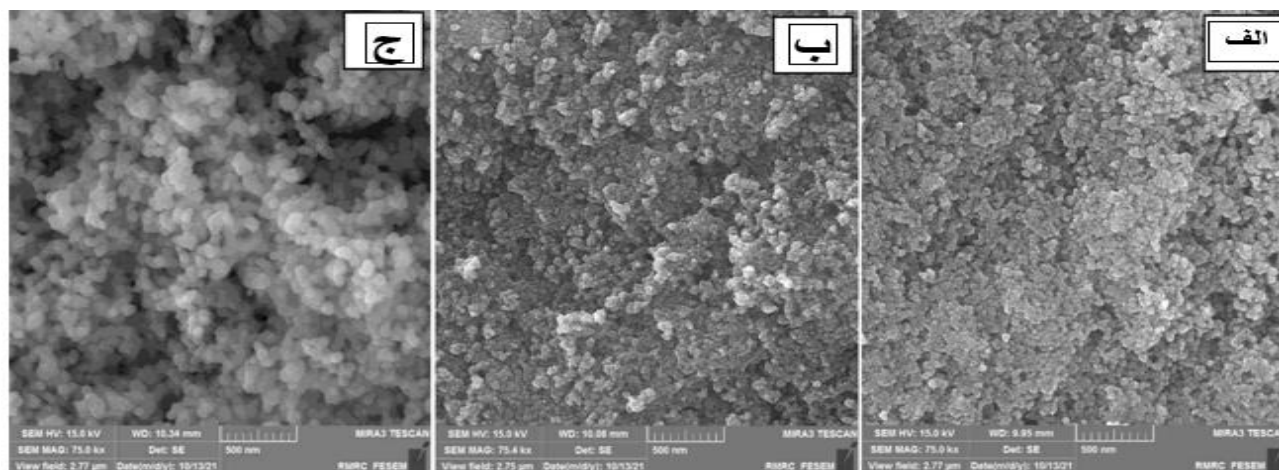
شکل ۱. الگوی پراش (الف) مگنتیت (ب) مگنتیت با پوشش دکستران (ج) مگنتیت با پوشش پلی اتیلن ایمین به همراه نمودار برزاش شده به وسیله نرم افزار MAUD.

۳.۲. ریخت شناسی

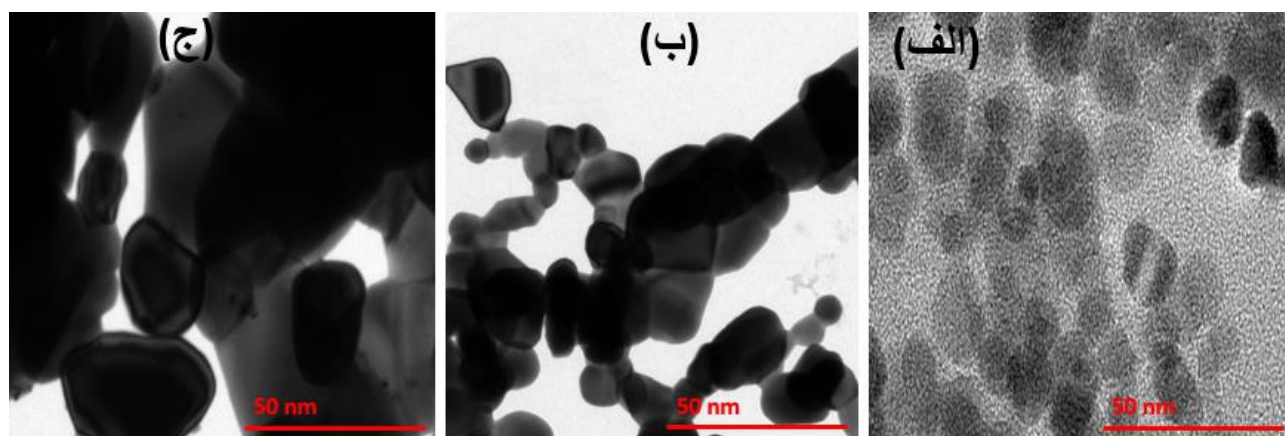
تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) نمونه های مگنتیت خالص و مگنتیت با پوشش های دکستران و پلی اتیلن ایمین در شکل ۲ نشان داده شده اند. در تصویر ۲. الف، ذرات کروی شکل نمونه مگنتیت کاملاً یکنواخت را نشان می دهد که به صورت کلوخه ای در آمده اند که میانگین اندازه ذرات حدود ۱۸ نانومتر است. تصویر ۲. ب، ذرات مگنتیت با پوشش دکستران دیده می شود که نسبت به نانوذرات مگنتیت خالص کمی بزرگتر (میانگین حدود ۲۵ نانومتر) اما همچنان کروی شکل و نسبتاً یکنواخت هستند اما میزان کلوخه شدن ذرات کمتر شده است. از طرفی تصویر ۲. ج، ذرات مگنتیت با پوشش پلی اتیلن ایمین دیده می شود که نسبت به نانوذرات مگنتیت خالص و هم چنین نانوذرات با پوشش پلی اتیلن ایمین به صورت قابل توجهی بزرگتر هستند و اندازه میانگین ذرات به حدود ۳۳ نانومتر رسیده است و با وجود کروی شکل بودن، آن ها حالت کلوخه ای ندارند که این می تواند به خاطر پوشش پلیمری روی نانوذرات باشد [۱۵-۱۹]. در حقیقت، کلوخه شدن ذرات، در نمونه ها، می تواند به دلیل حضور یک برهم کنش مغناطیسی در بین ذرات باشد و با افزودن لایه پلیمری روی

جدول ۱. پارامتر sig ثابت شبکه تجربی (a)، اندازه ذرات (D)، و کرنش شبکه (ε)

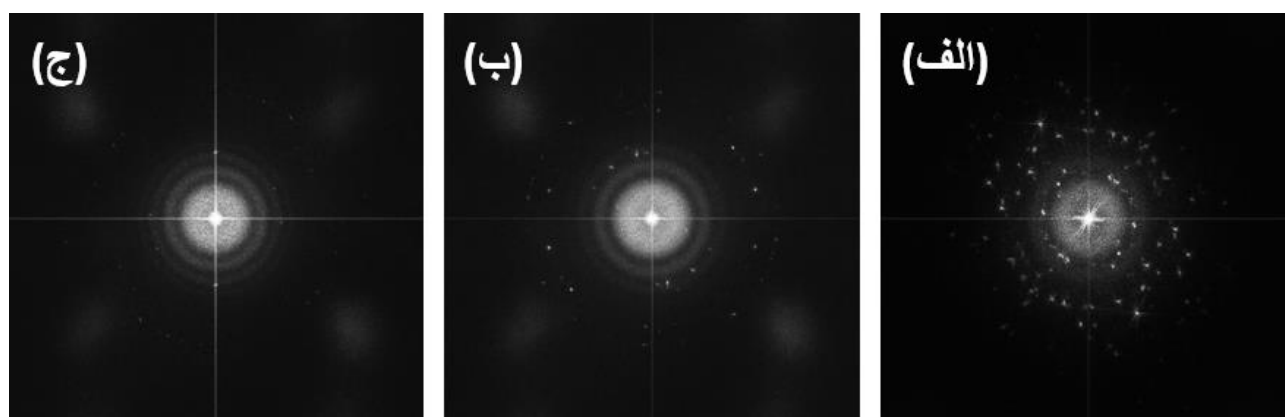
ε (%)	D (nm)	a (Å)	FWHM	sig	
۰/۰۰۴	۱۳/۶۰	۸/۳۶۰	۰/۴۹۲	۱/۲۲	Fe_3O_4
۰/۱۹۷	۱۳/۹۴	۸/۳۴۲	۰/۴۷۲	۰/۹۱	$Fe_3O_4@DEX$
۰/۳۵۲	۱۴/۵۵	۸/۳۵۰	۰/۴۶۱	۱/۰۲	$Fe_3O_4@PEI$



شکل ۲. تصاویر FESEM (a) مگنتیت خالص (b) مگنتیت با پوشش دکستران و (c) مگنتیت با پوشش پلی اتیلن ایمین.



شکل ۳. تصاویر HRTEM (الف) مگنتیت خالص (ب) با پوشش دکستران و (ج) با پوشش پلی اتیلن ایمین.



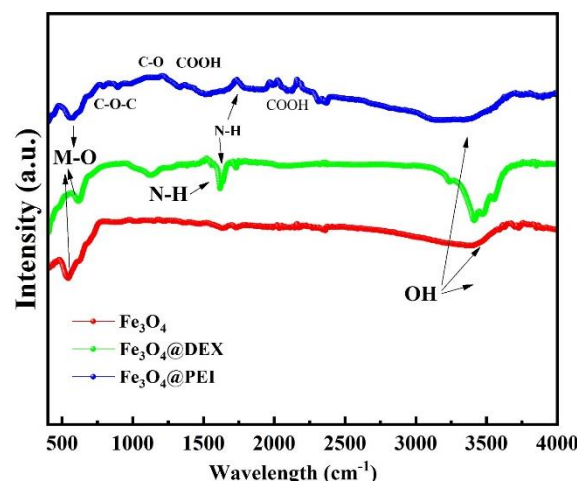
شکل ۴. تصاویر SAED (الف) مگنتیت خالص (ب) با پوشش دکستران و (ج) با پوشش پلی اتیلن ایمین.

به نانوذرات با پوشش پلی اتیلن ایمین را نشان می‌دهند. همان‌طور که در همه طیف‌ها دیده می‌شود، قله‌ها در گستره بین $500-600\text{ cm}^{-1}$ ، مربوط به ارتعاش کششی پیوند فلز - اکسیژن (Fe-O) در هسته مغناطیسی Fe_3O_4 است و نشان می‌دهد که پوشش به‌خوبی بر روی نانوذرات قرار گرفته است [۱۴-۱۶]. همچنین قله‌ها در گستره حدوداً 3400 cm^{-1} در همه طیف‌ها تکرار شده‌اند که ارتعاش کششی پیوند (H-O) در مولکول‌های آب است. در طیف نانوذرات با پوشش دکستران علاوه بر پیوند کششی H-O مولکول‌های آب، پیوندهای N-H و C-O دیده می‌شوند که به ترتیب مربوط به قله‌هایی در گستره 1200 cm^{-1} و 2850 cm^{-1} است که مربوط به گروه‌های عاملی پوشش دکستران هستند [۲۱]. در طیف آبی رنگ مربوط به نانوذرات مگنتیت با پوشش پلی اتیلن ایمین، نوار مشاهده‌شده در $1620-1400\text{ cm}^{-1}$ است و نوار حدود 2150 cm^{-1} بیانگر ارتعاش گروه کربوکسیل ناشی از پوشش پلی اتیلن ایمین نانوذرات است. نوار پهن در ناحیه 3400 cm^{-1} نشان دهنده ارتعاش کششی مربوط به پیوند O-H در مولکول آب است. در ادامه، قله‌های مشخص شده N-H و C-N نشان دهنده قرار گرفتن پلی اتیلن ایمین روی نانوذره است [۲۲].

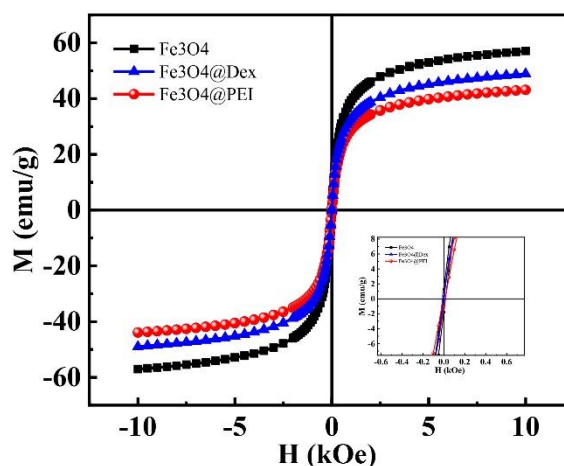
۴.۳. تحلیل مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش (VSM)

حلقه پسماند مغناطیسی از نمونه‌های مگنتیت خالص و مگنتیت با پوشش‌های دکستران و پلی اتیلن ایمین به دست آمده و در شکل ۶ نمایش داده شده است.

به‌طور کلی اشباع در مغناطش زمانی اتفاق می‌افتد که مغناطش یک ماده متوقف شود یا وقتی یک میدان مغناطیسی خارجی بسیار بزرگ اعمال می‌شود، بسیار آهسته افزایش یابد. این رفتار منحنی مغناطش اغلب قانون نزدیک شدن به اشباع (LAS) نامیده می‌شود که در شکل ۷ داده‌های برازش شده به روش LSA را نشان می‌دهند [۱۴]. به صورت تجربی تأیید شده است که مواد فرومغناطیس از قانون LSA زیر پیروی می‌کنند که در آن M_s مغناطش اشباع و a ، b و χ ثابت هستند [۱۴].



شکل ۵. تصاویر از FTIR نانو ذرات مگنتیت خالص و نانوذرات مگنتیت با پوشش دکستران و با پوشش پلی اتیلن ایمین.

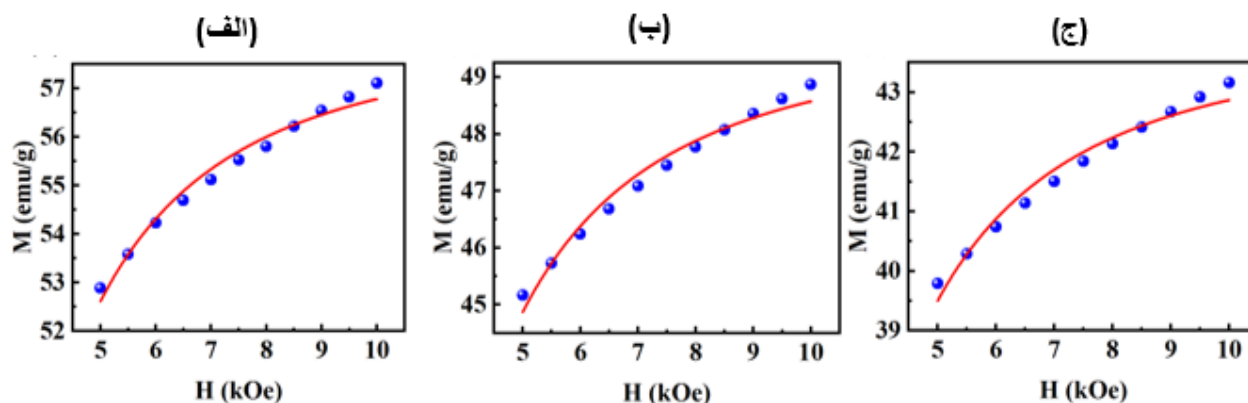


شکل ۶. نمودار حلقه پسماند مگنتیت خالص و مگنتیت همراه با پوشش‌های دکستران و پلی اتیلن ایمین.

این کاهش نقاط و به دنبال آن تشکیل دایره‌های هم‌مرکز حاکی از کاسته شدن بلورینگی نمونه‌ها است و ناشی از افزودن پوشش‌های پلیمری آمورف دکستران و پلی اتیلن ایمین روی لایه مغناطیسی و کاملاً بلوری مگنتیت است.

۳.۳. تحلیل فوریه مادون قرمز (FTIR)

برای شناسایی گروه‌های عاملی و پیوندهای شیمیایی از ساخت نانوذره Fe_3O_4 همراه با پوشش‌ها تحلیل FTIR انجام شد و مجموعه طیف‌ها در شکل ۵ آورده شده‌اند. طیف قرمز رنگ نانوذرات Fe_3O_4 را قبل از پوشش‌دهی نشان می‌دهد و طیف سبزرنگ نانوذرات با پوشش دکستران و طیف سبزرنگ مربوط



شکل ۷. داده های برازش شده به روش LSA از (الف) مگنتیت خالص (ب) با پوشش دکستران و (ج) با پوشش پلی اتیلن ایمین.

۴. نتیجه گیری

در این مطالعه، تاثیر پلیمرهای پلی اتیلن ایمین و دکستران به عنوان پوشش پلیمری روی خواص ساختاری، ریخت شناسی و مغناطیسی نانوذرات مگنتیت با استفاده از روش هم رسوبی، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج تحلیل های FTIR, XRD و VSM نشان می دهد که هر دو پوشش ساختار اسپینل Fe_3O_4 را حفظ می کنند، اما پوشش های پلیمری تفاوت هایی در کج شدگی اسپین سطحی و ناهمسانگردی مغناطیسی متفاوت ایجاد می کنند. نتایج حاصل از ریخت شناسی های FESEM و SAED, HRTEM نشان می دهد نانوذرات پوشش دار با پلی اتیلن ایمین به صورت قابل توجهی نسبت به نانوذرات مگنتیت خالص و مگنتیت با پوشش دکستران اندازه بزرگتری دارند، و هم چنین از میزان کلوخه ای بودن آن ها کاسته شده است. علاوه بر این، نتایج بررسی های مغناطیسی نشان داد که نمونه مگنتیت خالص یک ماده مغناطیسی با میدان وادارندگی تقریباً برابر با صفر و مغناطش اشباع متوسط $58/17$ emu/g است و با توجه به میزان وادارندگی صفر به عنوان یک ماده ابرپارامگناطیس محسوب می شود. درحالی که نمونه مگنتیت با پوشش های دکستران و پلی اتیلن ایمین یک ماده مغناطیسی نرم با وادارندگی صفر و به ترتیب مغناطش اشباع متوسط $49/80$ emu/g و $43/99$ هستند.

$$M = Ms \left(1 - \frac{a}{H} - \frac{b}{H^2} \right) + \chi H \quad (1)$$

همان طور که از این دو شکل قابل مشاهده است، نمونه مگنتیت خالص یک ماده مغناطیسی با میدان وادارندگی تقریباً برابر با صفر و مغناطش اشباع متوسط $58/17$ emu/g است و با توجه به میزان وادارندگی صفر به عنوان یک ماده ابرپارامگناطیس محسوب می شود. درحالی که نمونه مگنتیت با پوشش های دکستران و پلی اتیلن ایمین یک ماده مغناطیسی نرم با وادارندگی صفر و به ترتیب مغناطش اشباع متوسط $49/80$ و $43/99$ emu/g است که در مقایسه با مگنتیت خالص دارای مغناطش اشباع کمتری هستند که ناشی از حضور لایه پلیمری غیرمغناطیسی روی یک هسته خالص مغناطیسی هستند. پوشش های پلیمری تفاوت هایی در کج شدگی اسپین سطحی و ناهمسانگردی مغناطیسی متفاوت ایجاد می کنند [۱۸-۱۹]. نانوذرات با پوشش دکستران در مقایسه با پوشش پلی اتیلن ایمین دارای مغناطش اشباع بالاتری هستند که می تواند به این دلیل باشد که نانوذرات حاوی پوشش دکستران اندازه کوچک تر و همچنین لایه پلیمری نازکتری دارند و باعث می شود مغناطش اشباع بالاتری نسبت به پوشش پلی اتیلن ایمین داشته باشد.

۵. مراجع

1. S Amiri and H Shokrollahi, *Mat. Res. Bull.* **48** (2013) 14.
2. W Wu, Z Wu, T Yu, C Jiang and W S Kim, *Sci. Technol. Adv. Mater.* **16** (2015) 023501.
3. S Laurent, D Forge, M Port, A Roch, C Robic, L Vander Elst and R N Muller, *Chem. Rev.* **108** (2008) 2064.

4. M Mahmoudi, S Sant, B Wang, S Laurent and T Sen, *Adv. Drug Deliv. Rev.* **63** (2011) 24.
5. A K Gupta and M Gupta, *Biomaterials* **26** (2005) 3995.
6. N A Frey, S Peng, K Cheng and S Sun, *Chem. Soc. Rev.* **38** (2009) 2532.
7. F M Kievit and M Zhang, *Acc. Chem. Res.* **44** (2011) 853.
8. C R Thomas, D P Ferris, J H Lee, E Choi, M H Cho, J S Kim and J S Shin, *J. Am. Chem. Soc.* **132** (2010) 10623.
9. A J Cole, V C Yang and A E David, *Trends Biotechnol.* **29** (2011) 323.
10. P Tartaj, M P Morales, S Veintemillas-Verdaguer, T González-Carreño and C J Serna, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **36** (2003) R182.
11. C Sun, J S Lee and M Zhang, *Adv. Drug Deliv. Rev.* **60** (2008) 1252.
12. J H Lee, Y M Huh, Y W Jun, J W Seo, J T Jang, H T Song and J Cheon, *Nat. Med.* **13** (2007) 95.
13. H Nikmanesh and M Eshraghi, *J. Magn. Magn. Mater.* **471** (2019) 294.
14. E Mohammadbagheri, E Jaberolansar, P Kameli and H Nikmanesh, *Mater. Chem. Phys.* **301** (2023) 127551.
15. H Nikmanesh, M Moradi, P Kameli and G H Bordbar, *J. Electron. Mater.* **46** (2017) 5933.
16. S Bid, P Sahu and S K Pradhan, *Physica E* **39** (2007) 175.
17. S Debnath, A Das and R Das, *Ceram. Int.* **47** (2021) 16467.
18. V Singh, V Srinivas, M Ranot, S Angappane and J G Park, *Phys. Rev. B* **82** (2010) 054417.
19. L F Cótica, I A Santos, E M Giroto, E V Ferri and A A Coelho, *J. Appl. Phys.* **108** (2010) 063924.
20. Z Shaterabadi, G Nabiyouni and M Soleymani, *Mater. Sci. Eng. C* **75** (2017) 947.
21. A V Humbe, J S Kounsalye, S B Somvanshi, A Kumar and K M Jadhav, *Mater. Adv.* **1** (2020) 880.
22. B Steitz, H Hofmann, S W Kamau, P O Hassa, M O Hottiger, B von Rechenberg and A Petri-Fink, *J. Magn. Magn. Mater.* **311** (2007) 300.