

## مقاله پژوهشی

# سنتز الکتروشیمیایی نانوذرات اکسید آهن دوپه شده با کبالت (Co-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) و دارای پوشش سطحی پلی وینیل پیرولیدون (PVP) و بررسی خواص مغناطیسی آن‌ها

عیسی کریمزاده\*

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۹/۰۴/۲۴، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۹/۰۶/۲۷، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۹/۰۷/۰۵

## چکیده

در این مقاله، نانوذرات مگنتیت سوپراپارامغناطیس سطح پوشش داده شده با پلی وینیل پیرولیدون (PVP) و ساختار دوپه شده با کبالت (II)، (Co-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>(CFO) با توزیع خوبی گزارش شده است. پودر نانوذرات با استفاده از روش رسوب دهی الکتروشیمیایی کاتدی سنتز شده است و ساختار، مورفولوژی و خواص مغناطیسی این نانوذرات به صورت سیستماتیک مورد بررسی قرار گرفته است. با اعمال دانسیته جریان ثابت ۱ A در یک سیستم الکتروشیمیایی دو الکترودی، نانوذراتی با قطر تقریباً ۱۵-۱۰ nm با ساختار کروی تهیه شدند. در نمونه سوپراپارامغناطیس که با استفاده از روش‌های ساختاری و مغناطیسی تهیه شده است، با استفاده از XRD، FE-SEM و FT-IR اندازه و مورفولوژی و ساختار کریستالی آن‌ها تعیین شده است. نتایج نشان دهنده وجود یک رفتار سوپراپارامغناطیس در دمای اتاق برای اندازه گیری پیش رونده به عنوان یک تابع از میدان مغناطیسی است. نتایج منحنی حلقه پسماند، مغناطش و پذیرفتاری مغناطیسی نمونه بیانگر نقش مؤثر PVP روی بهبود ویژگی‌های مغناطیسی نانوذرات فریت می‌باشد که مقدار اشباع مغناطیسی تقریباً ۳۴/۳۴ emu/g بدست آمده است. مشاهدات IR به وضوح نشان داد که سطح نانوذرات Co-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> بوسیله PVP پوشانیده شده است. بر اساس این نتایج، روش الکتروشیمیایی استفاده شده را می‌توان به عنوان یک روش مصنوعی کارآمد و کم هزینه برای ساختن نانوذرات اکسید آهن دوپ شده با کبالت بکار گرفت.

**واژه‌های کلیدی:** نانوذرات مغناطیسی، سنتز الکتروشیمیایی، مگنتیت، سوپراپارامغناطیس.

## ۱- مقدمه

معمول، فریت‌ها را می‌توان به علت داشتن ساختارهای کریستالی مختلف به انواع زیر، یعنی: (۱) اسپینل فریت، (۲) گارنت، (۳) ارتو فریت و (۴) فریت شش ضلعی (هگزا فریت)، تقسیم کرد. فریت‌ها با ساختارهای متفاوت در

در چند دهه گذشته، فریت‌ها به دلیل خواص مغناطیسی و کاربردهای بطور ویژه مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱]. بطور

\* عهده‌دار مکاتبات: عیسی کریمزاده

نشانی: گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی

تلفن: ۰۲۱-۴۴۳۵۶۶۳۹، دورنگار: ۰۲۱-۴۴۳۵۶۶۳۹، پست الکترونیکی: isa.karimzadeh@gmail.com

با توجه به اهمیت و قابلیت کاربرد بسیار بالای نانو ساختارهای مغناطیسی بر پایه اکسید آهن در عرصه‌های علمی و صنعتی، در سال‌های اخیر شمار زیادی از پژوهشگران تحقیقات خود را بر روی روش‌های مختلف ساخت و مشخصه‌یابی این نانوذرات متمرکز نموده‌اند. از جمله روش‌های مورد استفاده در ساخت نانوذرات اکسید آهن می‌توان به آسیاب کردن مکانیکی [۹]، روش تجزیه حرارتی [۱۰]، هم‌رسوبی [۱۱]، هیدروترمال [۱۲]، روش حلالی-حرارتی [۱۳]، روش الکتروشیمیایی [۱۴] و روش سونوشیمیایی [۱۵] اشاره کرد. با وجود تحقیقات گسترده فراوان در این زمینه، محققین همچنان به دنبال یافتن روش‌هایی هستند که چالش‌های موجود بر سر راه تولید آن‌ها را کمتر کرده و فرآیند ساخت این نانو ساختارها ساده‌تر و کارآمدتر باشد. از بین روش‌های مختلف ارائه شده برای ساخت نانوذرات اکسید آهن، روش الکتروشیمیایی مبتنی بر فرآیند الکترواکسیداسیون آهن، به عنوان روشی توانمند و کارآمد مطرح می‌باشد که تاکنون گزارش‌های معدودی در مورد آن ارائه شده است [۱۶].

نانوذرات مگنتیت به دلیل دارا بودن خاصیت مغناطیسی بالا تمایل به جذب همدیگر و در نتیجه آگلومره شدن دارند. بطوریکه در اکثر تحقیقات انجام شده در مورد سنتز و بررسی کاربرد اکسید آهن، آگلومره شدن نانوذرات اکسید آهن به عنوان اصلی‌ترین چالش در مقابل کاربرد این نانوذرات است. چرا که در نتیجه آگلومره شدن سطح ویژه نانوذرات اکسید آهن کاهش یافته و همچنین خاصیت مغناطیسی آن‌ها متاثر از این پدیده می‌شود، بطوریکه در حضور میدان مغناطیسی عملکرد آن‌ها افت قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند. این کاهش عملکرد در میدان مغناطیسی کاربرد آن‌ها در زمینه‌های بیوپزشکی بخصوص هایپرترما با مشکل مواجه می‌کند. همچنین کاهش سطح ویژه نانوذرات مگنتیت در اثر بهم چسبیدن آن‌ها، میزان بارگذرای ماده موثره در کاربردهای جذب فلزات سنگین و همچنین کاتالیستی را به شدت کاهش داده و در نتیجه چشم‌انداز کاربردی عملی آن‌ها را کم

زمینه پزشکی، صنعت، سنسورهای مغناطیسی، حافظه‌های مغناطیسی و آهنرباهای دائمی کاربرد دارند [۲]. این کاربردها بر مبنای پارامترهای مختلفی نظیر اشباع مغناطش، مقاومت الکتریکی و پایداری شیمیایی است [۳]. کاهش اندازه دانه باعث می‌شود تا با توجه به محدوده وسیع کاربرد مواد مغناطیسی، مواد جدیدی با خواص بهبود یافته تولید شوند، بطوریکه از نانوفناوری در علم مغناطیس برای بهینه کردن خواص مغناطیسی در کاربردهایی چون ساخت موتورهای الکتریکی قوی‌تر و کوچکتر، حسگرها، حافظه‌های مغناطیسی استفاده می‌شود [۴].

کاربردهای پزشکی (تشخیص و درمان) نیز با پیشرفت علم مغناطیس طوری تحت تاثیر قرار گرفته و پیشرفت کرده‌اند، که بدون استفاده از نانوفناوری عملاً این تحولات ناممکن بود. برای فهم تاثیر نانوفناوری بر خواص مغناطیسی لازم است تا ابتدا علت خواص مغناطیسی مواد و پارامترهایی که خواص را توصیف می‌کنند، مشخص شود، سپس با کمک آن‌ها تاثیر نانوفناوری بر این علل مشخص شود [۵]. نانوذرات مغناطیسی با قابلیت هدایت بوسیله میدان‌های مغناطیسی دارای توانایی بالایی به عنوان حامل‌های دارویی و بنابراین در درمان بیماری‌های مختلف و بخصوص بیماری‌های مربوط به سرطان هستند. استفاده از نانوذرات مغناطیسی به عنوان عوامل افزایش دهنده کنتراست در روش مرسوم تصویربرداری تشدید مغناطیسی و همچنین به عنوان حامل‌های مناسب دارویی برای انتقال هدفمند دارو در سیستم‌های نوین دارورسانی مورد توجه دانشمندان این حوزه قرار گرفته است [۶،۷]. به عنوان مثال، پورجوادی و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی توانایی حامل مغناطیسی شامل نانوذرات اکسید آهن@اکسید سیلیسیم قرار گرفته بر روی بستر پلیمری برای انتقال هدفمند داروی دوگسی ربوسین که از مهم‌ترین داروها در درمان سرطان‌های مختلف و مخصوصاً سرطان سینه است، پرداختند. این سیستم طراحی شده حساس به حرارت و pH می‌باشد که برای درمان سرطان پیشنهاد شده است [۸].

## ۲- فعالیت‌های تجربی

### ۲-۱- انتخاب مواد اولیه

کلیه مواد شیمیایی استفاده شده در این پژوهش از جمله کلرید آهن (II) چهار آبه (FeCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O, 99.5%) نیترات آهن (III) نه آبه (Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O, 99.9%)، کلرید کبالت شش آبه (CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, 99.5%) و پلی‌وینیل پیرولیدون (PVP) به عنوان اصلاح کننده سطحی، از نمایندگی شرکت مرک آلمان خریداری شدند.

### ۲-۲- سنتز نانوذرات مغناطیسی

ابتدا یک گرم پلیمر پلی‌وینیل پیرولیدون (PVP) را در یک لیتر آب دو بار تقطیر شده حل نموده، سپس یک گرم کلرید آهن FeCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O، دو گرم نیترات آهن Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O (Fe<sup>2+</sup>:Fe<sup>3+</sup>=1:2) و سه گرم کلرید کبالت CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O به این محلول اضافه کرده و به مدت نیم ساعت با مگنت بهم زده شد تا کاملاً حل شوند.

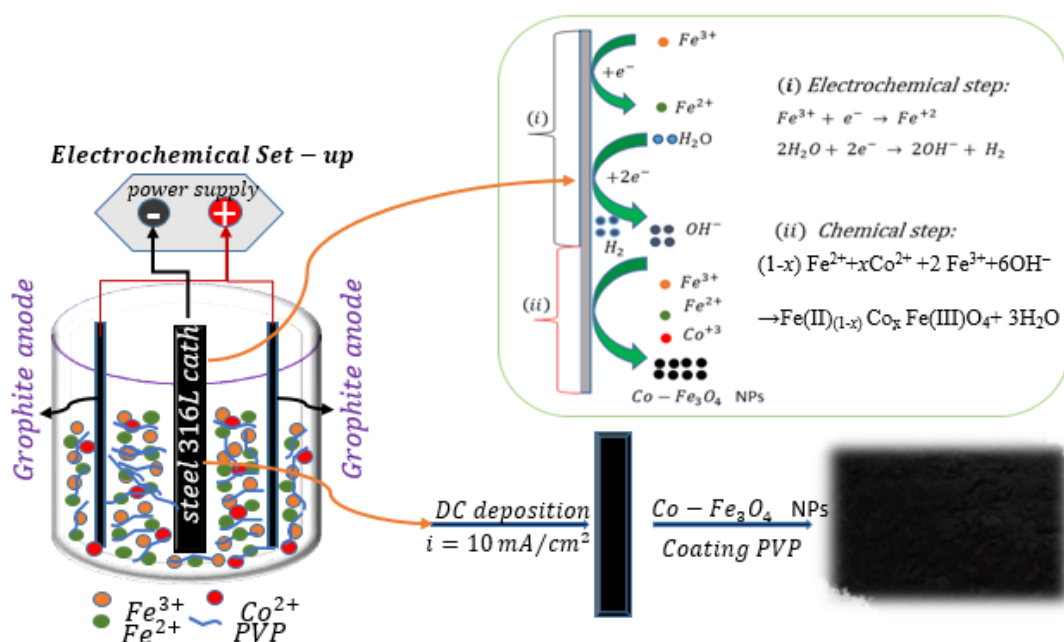
فرآیند ترسیب از محلول با اعمال دانسیته جریانی نیم آمپر بر سانتیمتر مربع و دمای ۲۵ °C در هر دو طرف کاتد ورق استیل 316L (با ابعاد: ۱۰ cm در ۵ cm در ۳ mm) در مد گالوانواستات انجام شد. سپس بسترهای کاتدی که محصول اکسید آهن روی آن ترسیب شده بود از الکترولیت خارج و در دمای آزمایشگاه خشک شدند، در ادامه رسوبات اکسید آهن از سطح استیل تراش داده شد که در شکل (۱) به صورت شماتیک نشان داده شده است [۶].

در محیط آبی تشکیل Co-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> روی سطح کاتد طی یک مکانیسم دو مرحله ای الکتروشیمیایی-شیمیایی اتفاق می افتد: مرحله الکتروشیمیایی: در این مرحله در اثر واکنش های کاتدی، باز (OH<sup>-</sup>) در سطح کاتد تولید می شود:



رنگ تر می کند. برای رفع این مشکلات می توان از راه حل های مختلفی استفاده کرد.

یکی از این راهکارها، پوشش دهی سطح نانوذرات با پلیمرهای زیست سازگار می باشد که این فرآیند پوشش دهی دو امکان عدم بهم چسبیدن و همچنین عامل دارسازی بعدی نانوذرات برای کاربردهای هدف را بر احتی فراهم می کند. یکی دیگر از راهکارها دوپ کردن مگنتیت با عناصر هم ردیف آهن در جدول تناوبی است این فرآیند نیز خاصیت مغناطش را پایین تر آورده و در نتیجه تمایل نانوذرات را در بهم چسبیدن کمتر می کند. در اکثر مقالات هر کدام از این راهکارها به تنهایی مورد نظر بوده و تحقیقات مربوط به آن شده است. در این مقاله، سعی شده است که با ارائه یک روش سنتزی کارآمد و جدید بتوان دو فرآیند دوپ کردن نانوذرات و پوشش دهی آن ها را تک مرحله ای انجام داد. نقطه قوت اینکار بر این فرض استوار هست که به محض تشکیل نانوذرات مگنتیت سطح آن ها با پلیمر پوشش داده می شود و در نتیجه آن ها زمان کافی برای بهم چسبیدن نخواهند داشت. در این مقاله، نانوذرات مگنتیت با استفاده از روش الکتروشیمیایی کاتدی سنتز شده است. روش های رایج سنتز این دسته از مواد با مشکل توده ای شدن ذرات مواجه هستند [۱۷]، از طرف دیگر روش سنتز الکتروشیمیایی با اعمال چگالی جریان اکسیداسیون و یا پتانسیل بر سیستم قابلیت کنترل اندازه نانوذرات، را فراهم می آورد [۱۸]. به منظور افزایش نانوذرات می توان از پوشش دهی آن ها توسط پلیمرهای استفاده کرد. این پوشش دهی سبب افزایش پایداری کلوئیدی آن ها خواهد شد. در این زمینه از پلیمرهای مختلفی استفاده شده است که از جمله می توان به چیتوسان، دکستران، پلی اتیلن اکسید، PVA، PAG و ... اشاره کرد که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارا می باشند [۱۹]. همچنین در حضور پلی وینیل پیرولیدون (PVP) امکان اجتناب از پدیده توده ای شدن نیز وجود دارد [۲۰].



شکل ۱: طرحواره مراحل الکتروشیمیایی و شیمیایی.

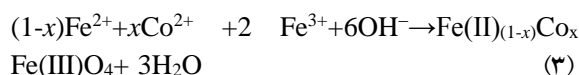
## ۲-۳- مشخصه یابی نمونه های سنتزی

برای تهیه الگوهای پراش اشعه X از دستگاه Philips X-ray Diffraction مدل PW-1800 با منبع تابش تک رنگ  $CuK\alpha$  و توان ۴۰ kV و با طول موج  $\lambda = 1.542$  آنگستروم استفاده شده است. سرعت روبش ۵ degree/min بوده و مقادیر پراش در محدوده زاویه پراش  $2\theta$  از ۱۰ تا ۸۰ ثبت شد. آنالیز IR بهترین تکنیک برای تعیین نوع پوشش پلیمری در سطح نانوذرات اکسید آهن می باشد به همین جهت طیف های تبدیل فوریه فروسرخ (FT-IR) با استفاده از اسپکتروفتومتر Bruker Vector 22 FT-IR بدست آمد. طیف های FT-IR در محدوده عدد موجی ۴۰۰ تا  $4000 \text{ cm}^{-1}$  با استفاده از آشکارساز DTGS ثبت شدند. برای تهیه تصاویر به جای میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM از میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی FE-SEM استفاده شد زیرا به دلیل مغناطیسی بودن نمونه ها امکان تهیه تصاویر شفاف و واضح با SEM های معمولی امکان پذیر نبود.

واکنش های کاتدی موجب افزایش محلی pH در سطح الکتروود می شوند، در حقیقت این دو واکنش احیا با تولید  $OH^-$  موجب افزایش pH الکتروولیت در سطح مشترک الکتروود-الکتروولیت می شوند. این واکنش ها با واکنش احیای فلز در رقابت هستند:



مرحله شیمیایی: در این مرحله  $OH^-$  تولید شده در سطح کاتد با کاتیون های فلزی واکنش داده و رسوب تشکیل می شود:



طرحواره مراحل الکتروشیمیایی و شیمیایی در شکل (۱) نشان داده شده است [۲۰].

اندازه بلورکها (D) با معادله شرر (۴) که در آن  $\lambda$  طول موج پرتوی ایکس، ثابت شبکه (a) از معادله (۵) که در آن d فاصله صفحه های موازی با شاخص های میلر h، k و l محاسبه شد [۲۲].

$$D_{XRD} = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (4)$$

$$a = d_{hkl} (h^2 + k^2 + l^2)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

که در آن h، k و l شاخص میلر هستند و  $d_{hkl}$  فاصله بین لایه های متوالی صفحات بلوری که از رابطه برآگ:

$$d_{hkl} = \frac{\lambda}{2 \sin\theta} \quad (6)$$

بدست می آید [۲۳] مقادیر محاسبه شده در جدول (۱) نشان داده شده اند.

جدول ۱: پارامترهای ساختاری  $Fe_3O_4$ -PVP  
بدست آمده از الگوی XRD.

(hkl)	2θ (deg.)	FWHM (2θ)	$D_{XRD}$ (nm)	a (Å)	$D_{hkl}$ (Å)
(311)	۳۵/۴۳	۱/۲۵۵۳	~۸	۸/۴۰	۲/۵۳
(400)	۴۳/۲۱۴	۱/۷۸۶۹	~۷	۸/۳۷۵۰	۲/۰۹

### ۳-۲- نتایج و تحلیل طیف های مادون قرمز (FTIR)

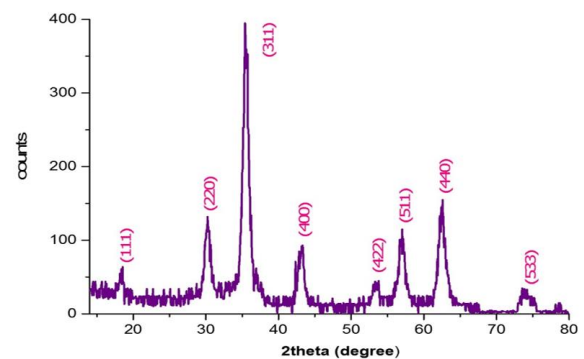
برای شناسایی و مشخصه یابی بهتر ترکیب ساختاری اکسیدی سنتز شده در محدوده  $400 \text{ cm}^{-1}$  تا  $4000 \text{ cm}^{-1}$  طیف FT-IR گرفته شد. FTIR یک روش مناسب برای بررسی جذب شیمیایی یا تعامل شیمیایی است. در این تحقیق، مطالعات FTIR از نانوذرات  $Co-Fe_3O_4$  با پوشش PVP تهیه شده به منظور تجزیه و تحلیل خواص سطح نانوذرات انجام شد. طیف های FT-IR از نانوذرات  $Co-Fe_3O_4$  با پوشش PVP در شکل (۳) نشان داده شده است.

از دستگاه میکروسکوپ گسیل میدانی مدل Mira 3-XMU با ویژگی محفظه بسیار بزرگ و سرعت خلاء بالا استفاده شد. یکی از مهمترین ویژگی های مواد، خاصیت مغناطیسی آنها است. بنابراین برای بررسی خواص مغناطیسی مواد، دستگاه هایی برای اندازه گیری خواص مغناطیسی آنها نیاز است که یکی از مهمترین آنها مغناطیس سنج با نمونه نوسانی (VSM) می باشد.

### ۳- نتایج و بحث

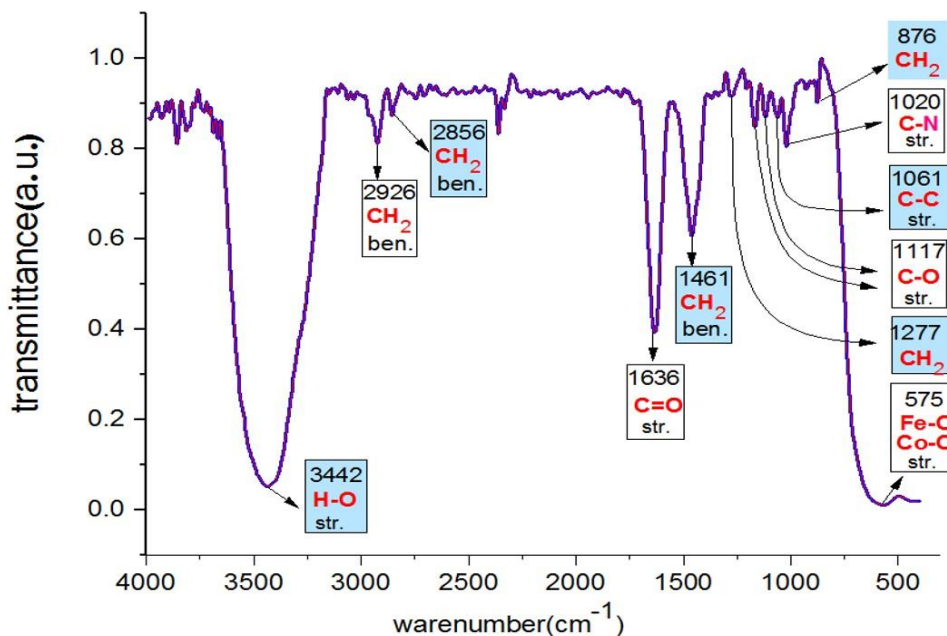
#### ۳-۱- تحلیل الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD)

الگوی پراش پرتوی ایکس به کمک نرم افزار X-Pert بررسی شد و شاخص گذاری خطوط پراش پرتوی ایکس انجام گرفت، که در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: الگوی اشعه ایکس نمونه سنتز شده.

الگوی پراش اشعه X نمونه ها با کارت JCPDS به شماره ۰۳۱۵-۰۸۸-۰۱ که مربوط به مگنتیت کاملاً مطابقت داشت. در این الگوها هیچ قله اضافی مبنی بر حضور ناخالصی مشاهده نشد [۲۱]. پیک های موجود در الگوی پراش پرتوی ایکس به صفحات بلوری (۱۱۱)، (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۴۰۰)، (۴۲۲)، (۵۱۱)، (۴۴۰) و (۵۳۳)، که به راحتی قابل مشاهده است، به ساختار اسپینل معکوس مکعبی تک فاز کریستالی  $Co-Fe_3O_4$  مربوط می شوند.



شکل ۳: طیف FT-IR.

می‌توان به فعل و انفعالات مختلف همانند نیروی واندروالس، پیوند هیدروژن و برهمکنش‌های الکتروستاتیک اشاره کرد [۲۸-۳۰].

### ۳-۳- خاصیت مغناطیسی پودر سنتز شده با VSM

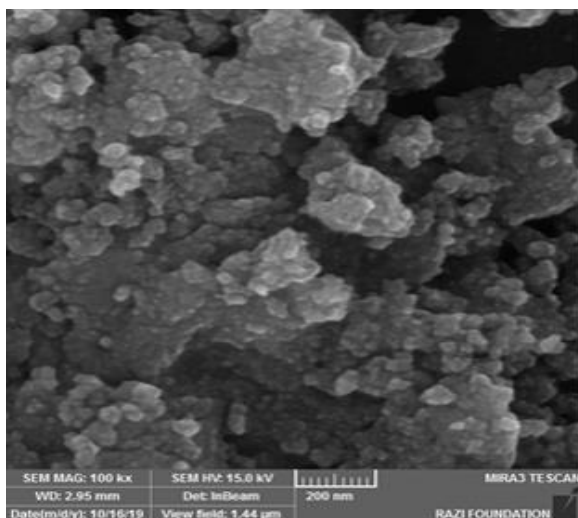
شکل (۴) نمودار مغناطیسی نانوذرات مگنتیت را که در آن اشباع مغناطیسی در میدان خارجی اتفاق افتاده است را نشان می‌دهد. خواص مغناطیسی نانوذرات در حالت پودر توسط VSM در میدان‌های ۲۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ Oe رسم گردید. این منحنی به خوبی نشان می‌دهد که هیستریزس تقریباً ناچیز و میدان وادارندگی و پسماند مغناطیسی بسیار کوچک است. این منحنی از نظر تغییرات آهنربایش، رفتاری مشابه رفتار مواد سوپرپارامغناطیس را نمایش می‌دهد [۳۱]. با استفاده از این منحنی می‌توان اندازه متوسط نانوذرات مغناطیسی را برآورد کرد، که این اندازه متوسط در اتصالات شیب مغناطیسی در نزدیکی ناحیه میدان صفر از منحنی مغناطیس محاسبه می‌شود،

باند جذب در اطراف طول موج  $575 \text{ cm}^{-1}$  در نانوذرات مغناطیسی با پوشش PVP مشاهده می‌شود، که این باند مربوط به ارتعاش کششی Fe-O و C-O در  $\text{Co-Fe}_3\text{O}_4$  می‌باشد [۲۴]. باند جذبی در محدوده عدد موج (WN)  $3442 \text{ cm}^{-1}$  ناشی از ارتعاش کششی قوی مربوط به پیوند هیدروژنی ایجاد شده با گروه‌های هیدروکسیل OH است که توسط نمونه از محیط جذب شده است. طیف  $\text{Co-Fe}_3\text{O}_4$  با پوشش PVP دارای چند باند IR اضافی از جمله گروه‌های  $\text{CH}_2$  ارتعاشات مختلف (در ۸۷۶، ۱۲۷۷، ۱۴۶۱، ۲۸۵۶،  $2926 \text{ cm}^{-1}$  [۲۴])، ارتعاش حالت کششی پیوند C-N در  $1020 \text{ cm}^{-1}$ ، ارتعاش حالت کششی پیوند C-C در  $1061 \text{ cm}^{-1}$ ، ارتعاش کششی گروه C=O در  $1636 \text{ cm}^{-1}$  می‌باشد [۲۴]. باندهای چسبان طیف‌های IR که در شکل ۳ مشاهده می‌شوند، اصلی‌ترین باند جذب نسبت به PVP هستند که به وضوح نشان می‌دهند سطح نانوذرات  $\text{Co-Fe}_3\text{O}_4$  با PVP پوشانیده شده است [۲۵-۲۹] که از دلایلی که می‌تواند PVP را بر روی سطح نانوذرات  $\text{Co-Fe}_3\text{O}_4$  نگه دارد،

زیادی مغناطیده می‌شوند که این مغناطش دائمی نیست و با حذف میدان از بین می‌رود. به کمک این رفتار مغناطیسی نانوذرات از طریق حمل عوامل درمانی و تحت اعمال یک میدان مغناطیسی می‌توانند توانایی دارورسانی را بدون انحراف مسیر در بدن اصلاح کنند. یکی از مهمترین کاربردهای پودر سنتز شده می‌تواند ذخیره اطلاعات در کارت‌های اعتباری باشد. در این محیط‌ها، پودر سنتز شده به صورت ذرات ریزی که به سختی آهنربا می‌شوند و به سختی هم خاصیت آهنربایی خود را از دست می‌دهند، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

### ۳-۴- مورفولوژی و اندازه ذرات با FE-SEM

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (FE-SEM) در شکل (۵) نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که مورفولوژی نانوذرات سنتز شده  $\text{Co-Fe}_3\text{O}_4$  با پوشش PVP دارای شکل کروی و با پراکندگی تقریباً خوبی هستند. همچنین میانگین قطر ذرات پوشش دار با پلیمر PVP با توجه به تصویر FE-SEM اندازه تقریبی آن‌ها در حد ۱۵ nm تخمین زده می‌شود. در واقع، می‌توان گفت که پوشش با پلیمر PVP مانع از تجمع ذرات می‌شود، که این مطلب با توجه به شکل ۵ کاملاً واضح است.

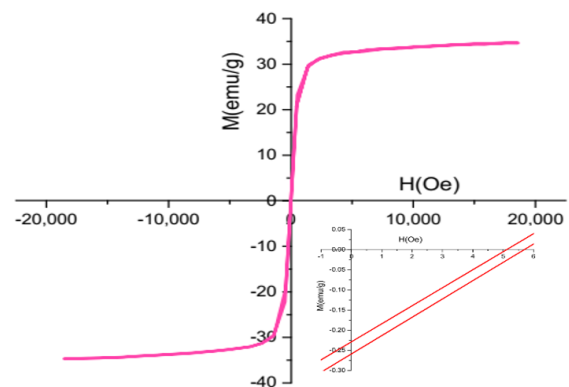


شکل ۵: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (FE-SEM).

که در آن سهم عمده اندازه نانوذرات مغناطیسی متعلق به ذرات بزرگتر است. با استفاده از  $X_i$  اندازه نانوذرات مغناطیسی ( $D_m$ ) و به کمک فرمول لانگوین که به صورت زیر است، محاسبه گردید [۳۲].

$$D_m = \left( \frac{18k_B T \chi_i}{\pi \rho M_s^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

در این رابطه،  $k_B$  ثابت بولتزمن ( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K)،  $T$  دما (۳۰۰ K)،  $\rho$  چگالی ماده  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ( $5.18 \text{ g/cm}^3$ )،  $X_i$  پذیرفتاری مغناطیسی در شدت میدان ضعیف و  $M_s$  اشباع مغناطیسی است، اندازه گیری اندازه نانوذرات  $\text{Co-Fe}_3\text{O}_4$  با پوشش PVP تقریباً ۹/۶ nm است [۳۳، ۳۴]. مقدار اشباع مغناطیسی تقریباً ۳۴/۳۴ emu/g و لسی در مقایسه با مقدار اشباع مغناطیسی بدنه مگنتیت (حالت بالک) که حدود ۹۲ emu/g است، کمتر می‌باشد. علت این تفاوت به عواملی مانند اندازه ذرات، غلظت، وجود اکسیژن‌های جذب شده بر روی سطح نانوذرات و وجود لایه غیر مغناطیسی بر سطح آن‌ها نسبت داده شده است [۳۱].



شکل ۴: منحنی هیستریزس VSM.

ذرات نانومتری  $\text{Co-Fe}_3\text{O}_4$  با پوشش PVP در دمای اتاق رفتاری سوپراپارامغناطیسی از خود نشان می‌دهند. به عبارت دیگر، آن‌ها تحت یک میدان مغناطیسی تا حد

## ۴- نتیجه گیری

نانوذرات اکسید آهن دوپه شده با کبالت با فاز مگنتیت و پوشش سطحی پلی وینیل پیرولیدون (PVP) در محلول الکترولیت آبی از طریق یک رسوب الکتروشیمیایی کاتدی یک مرحله‌ای بدون استفاده از هیچگونه الکترولیت‌های پشتیبانی تهیه شدند. مشاهدات مورفولوژیکی از طریق FE-SEM نشان داد که نانوذرات  $\text{Co-Fe}_3\text{O}_4$  به خوبی پراکنده شده‌اند، و میانگین قطر اندازه ذرات تقریباً ۱۰-۱۵ را تایید می‌کند. نانوذرات اکسید آهن دوپه شده با کبالت رفتار سوپرپارامغناطیسی مناسب که با مقدار اشباع مغناطیسی تقریباً ۳۴/۳۴ emu/g را به نمایش گذاشتند. نتایج حاصل از آنالیزهای FT-IR و XRD تشکیل نانوذرات اصلاح شده با پلیمر PVP را تایید کرد. نانوذرات تهیه شده از نظر اندازه و خاصیت مغناطیسی مناسب برای کاربردهای پزشکی هستند. نتایج حاصل از آنالیزهای مختلف نشان داد که روش رسوب الکتروشیمیایی کاتدی می‌تواند به عنوان یک روش جدید برای آماده‌سازی مؤثر نانوذرات  $\text{Co-Fe}_3\text{O}_4$  پوشش داده شده با PVP بکار گرفته شود.

## مراجع

- [8] A. Pourjavadi, M. Kohestanian, C. Streb, *Materials Science and Engineering: C*, **108**, 2020, 110418.
- [9] M.H. Ehsani, S. Esmacili, M. Aghazadeh, P. Kameli, I. Karimzadeh, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, **32**, 2019, 2021
- [10] S. Tanaka, Y.V. Kaneti, N.L.W. Septiani, S.X. Dou, Y. Bando, M. Shahriar, A. Hossain, J. Kim, Y. Yamauchi, *Small Methods*, **3**, 2019, 1800512.
- [11] O.M. Rodriguez-Narvaez, J. Manuel Peralta-Hernandez, A. Goonetilleke, E.R. Bandala, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **78**, 2019, 21.
- [12] Y. Liu, P. Liu, Z. Su, F. Li, F. Wen, *Applied Surface Science*, **255**, 2008, 2020.
- [13] E. Teeman, C. Shasha, J.E. Evans, K.M. Krishnan, *Nanoscale*, **11**, 2019, 7771.
- [14] L. Cabrera, *Electrochimica Acta*, **53**, 2008, 3436.
- [15] I. Karimzadeh, M. Aghazadeh, M.R. Ganjali, T. Doroudi, P.H. Kolivand, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **433**, 2017, 148.
- [16] M. Aghazadeh, I. Karimzadeh, M.R. Ganjali, *Journal of Nanostructure*, **9**, 2019, 531.
- [17] N. Rezaei, M. Aghazadeh, I. Karimzadeh, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, **31**, 2018, 2139.
- [18] M. Chang, Y. Shih, *Journal of Environmental Management*, **224**, 2018, 235.
- [19] A. Miri, M. Khatami, M. Sarani, *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, **30**, 2020, 767.
- [20] A. Mukhopadhyay, N. Joshi, K. Chattopadhyay, G. De, *ACS Applied Materials & Interfaces*, **4**, 2011, 142.
- [21] I. Karimzadeh, M. Aghazadeh, M.R. Ganjali, A. Behzad, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **28**, 2017, 18121.
- [22] M. Ibrahim, K.G. Serrano, L. Noea, C. Garcia, M. Verelst, *Electrochimica Acta*, **55**, 2009, 155.
- [23] G.C. Papaefthymiou, *Nano Today*, **4**, 2009, 438.
- [24] D.K. Kim, Y. Zhang, K.V. Rao, M. Muhammed, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **225**, 2001, 30.
- [25] I. Karimzadeh, H. Rezagolipour Dizaji, M. Aghazadeh, *Materials Research Express*, **3**, 2016, 095022.
- [26] M. Zhang, Y. Cao, L. Wang, Y. Ma, X. Tu, Z. Zhang, *ACS Applied Materials & Interfaces*, **7**, 2015, 13714.
- [27] M. Khalkhali, S. Sadighian, K. Rostamizadeh, F. Khoeini, M. Naghibi, N. Bayat, M. Habibzadeh, M. Hamidi, *Bioimpacts*, **5**, 2015, 141.
- [28] M. Peng, H. Li, Z. Luo, J. Kong, Y. Wan, L. Zheng, Q. Zhang, H. Niu, A. Vermorken, W. Van de Ven, C. Chen, X. Zhang, F. Li, L. Guo, Y. Cui, *Nanoscale*, **7**, 2015, 11155.
- [29] D. Jinmori, Y. Masubuchi, S. Kikkawa, *Materials Research Bulletin*, **88**, 2017, 214.
- [30] B. Yang, X. Yang, X. Li, Y. Cao, R. Yu, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **405**, 2016, 22.
- [31] M. Aghazadeh, I. Karimzadeh, M.R. Ganjali, *Current Nanoscience*, **15**, 2019, 169.
- [32] M.T. Lopez-Lopez, J.D.G. Duran, A.V. Delgado, F. Gonzalez-Caballero, *Journal Colloid and Interface Science*, **291**, 2005, 144.
- [33] P. Guardia, B. Batlle-Brugal, A.G. Roca, O. Iglesias, M.P. Morales, C.J. Serna, A. Labarta, X. Batlle, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **316**, 2007, 756.
- [34] M. Aghazadeh, I. Karimzadeh, M.R. Ganjali, *Materials Letters*, **228**, 2018, 137.
- [1] G. Asab, E.A. Zereffa, M. Sivakumar, T.A. Seghne, *International Journal of Biomaterials*, **2020**, 2020, 11.
- [2] D. Basandrai, R. Bedi, A. Dhami, J. Sharma, S. Narang, K. Pubby, A. Srivastava, *Chinese Physics Letters*, **34**, 2017, 044101.
- [3] K. Zhang, X. Gao, Q. Zhang, H. Chen, X. Chen, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **452**, 2018, 55.
- [4] A.V. Trukhanov, S.V. Trukhanov, L.V. Panina, V.G. Kostishyn, *Ceramics International*, **43**, 2017, 5635.
- [5] M. Aghazadeh, I. Karimzadeh, M.R. Ganjali, *Current Nanoscience*, **15**, 2019, 169.
- [6] A. Singh, S.K. Sahoo, *Drug Discovery Today*, **19**, 2014, 474.
- [7] P. Kucheryavy, J. He, V.T. John, P. Maharjan, L. Spinu, G.Z. Goloverda, V.L. Kolesnichenko, *Langmuir*, **29**, 2013, 710.