

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

سنتز تک مرحله‌ای نانو ذرات اکسید آهن سوپر پارامغناطیسی دوپ شده با کاتیون‌های فلز روی و پوشیده شده با ساکاریدها
برای کاربردهای زیست پزشکی

مصطفی آقازاده^{۱*}، حمزه فراتی‌راد^۲

۱- دانشیار، پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای ایران، تهران، ایران.

۲- استادیار، پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای ایران، تهران، ایران.

maghazadeh@aeoi.org.ir*

مقاله پژوهشی

چکیده

در این مقاله، سنتز سه نوع نانو ذرات اکسید آهن (IONS) سوپر پارامغناطیس شامل نانو ذرات اکسید آهن دوپ شده با Zn^{2+} و پوشیده شده با گلوکز (گلوکز/ Zn -IONS)، نانو ذرات اکسید آهن دوپ شده با Zn^{2+} و پوشیده شده با ساکارز (ساکارز/ Zn -IONS) و نانو ذرات اکسید آهن دوپ شده با Zn^{2+} و پوشیده شده با نشاسته (نشاسته/ Zn -IONS) گزارش شده است. این نانو ذرات اکسید آهن با سنتز الکتروشیمیایی از طریق رسوب‌دهی کاتدی تهیه شدند. به طوری که، طی یک مرحله سنتزی و هم‌زمان با درج شدن کاتیون‌های فلز روی (Zn^{2+}) درون ساختار بلوری مگنتیت، پوشش لایه ساکاریدی نیز روی سطح IONS انجام می‌شود. دوپه شدن کاتیون‌های Zn^{2+} در ساختار مگنتیت با روش‌های طیف‌سنجی تبدیل فوریه (FT-IR)، میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) و پراش انرژی ایکس (EDX) تأیید شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی نشان دادند که مورفولوژی ذرات سنتز شده به صورت کروی است. آنالیزها ساختار بلوری سوپر پارامغناطیس نمونه‌های آماده شده با ۱۰ درصد دوپنت روی را تأیید کردند. ارزیابی مغناطیس با مغناطیس سنج نمونه مرتعش (VSM) رفتار سوپر پارامغناطیس را برای نمونه‌های ساخته شده تأیید کرد و مقادیر وادارندگی (Hci) و پسماند مغناطیسی (Mr) کوچکی مشاهده شد. مقدار وادارندگی برای گلوکز/ Zn -IONS، ساکارز/ Zn -IONS و نشاسته/ Zn -IONS به ترتیب ۳/۶، ۸/۹ و ۹/۲ Oe اندازه‌گیری شد. همچنین مقدار پسماند مغناطیسی نیز برای همین نمونه‌ها به ترتیب برابر با ۰/۲۴، ۰/۰۹ و ۰/۲۸ emu g^{-1} تعیین شدند.

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۷

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۱

کلید واژگان:

نانو ذرات

سنتز الکتروشیمیایی

اکسید آهن

ساکاریدها

مغناطیس

One-Step Synthesis of Super paramagnetic Iron Oxide Nanoparticles Doped with Zinc Cations and Coated with Saccharides for Biomedical Applications

Mustafa Aghazadeh^{1*}, Hamzeh Foratirad²

۱- Associate Professor, Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI, Tehran, Iran.

۲- Assistant Professor, Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI, Tehran, Iran.

* maghazadeh@aeoi.org.ir

Article Information

Original Research Paper

Dor:

۲۰.۱۰۰۱.۲۴۲۳۳۲۶.۱۴۰۲.۱۷.۲.۴.۰

Abstract

In this paper, three-types of metal-cations doped superparamagnetic iron oxide nanoparticles (IONS) including glucose-grafted Zn^{2+} -doped MNPs (glucose/ Zn -IONS), sucrose-grafted Zn^{2+} -doped IONS (sucrose/ Zn -IONS) and starch-grafted Zn^{2+} -doped IONS (starch/ Zn -IONS) are

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Mustafa Aghazadeh, Hamzeh Foratirad, One-Step Synthesis of Super paramagnetic Iron Oxide Nanoparticles Doped with Zinc Cations and Coated with Saccharides for Biomedical Applications, New Process in Material Engineering, ۲۰۲۳, ۱۷(۲), ۵۳-۶۵.

Keywords:

Nanoparticles
Electrochemical Synthesis
Iron Oxide
Saccharides
Magnetism

۱- مقدمه

نانو ذرات اکسید آهن^۱ (IONs) سوپر پارامغناطیس به علت ویژگی های مغناطیسی قابل تنظیم آن ها و عملکرد نانومقیاس منحصر به فردشان به صورت گسترده ای برای کاربردهای زیستی- پزشکی مورد مطالعه قرار گرفته اند [۱-۲]. در سال- های اخیر، نانو ذرات اکسید آهن به عنوان کاندیداهای بالقوه در زمینه های تشخیصی مانند تصویربرداری رزونانس مغناطیسی^۲، بیحرک سازی آنزیم^۳، سنجش زیستی^۴ و علامت- گذاری سلولی^۵ و سیستم های دارورسانی^۶، تشخیص باکتری- ها، جداسازی مغناطیسی و گرمادرمانی^۷ (افزایش دما در بافت سرطانی) معرفی شده اند [۳-۶]. همچنین، این نانو ذرات سوپر پارامغناطیسی به صورت وسیعی برای کاربردهای ذخیره بار، جاذب و کاتالیست مورد توجه قرار گرفته اند که به حالت های اکسیداسیونی مختلف، سنتز سریع، قیمت پایین، عامل دار سازی آسان و برخی ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و حرارتی آن ها مرتبط می باشد [۷-۱۱].

ویژگی های اصلی نانو ذرات اکسید آهن که منجر به کاربرد زیست- پزشکی به خصوص برای استفاده درون تنی آن ها شده است عبارت اند از: بار سطحی، شکل، اندازه، انرژی و ویژگی های مغناطیسی [۱۲]. برای مثال، بار سطحی نانو ذرات اکسید آهن نقش مهمی را در برهمکنش آن ها با محیط های بیولوژیکی نظیر بسیاری از اجزای بدن، سیستم ایمنی، ماتریس های خارج سلولی، پروتئین های پلاسما و سلول های غیر هدفمند ایفا می کند [۱۳]. همچنین، اندازه IONs در ابر پارامغناطیسی بودن آن ها نقش تعیین کننده ای دارد که این خاصیت را در حضور میدان اعمالی و نیز در شرایط حذف میدان بروز می دهند. نانو ذرات اکسید آهن با بار سطحی مثبت بازده جذب سلولی بالاتری را در سلول های سرطانی پستان در مقایسه با نانو ذرات اکسید آهن با بار سطحی منفی

نشان می دهند اما هیچ تفاوتی در جذب در سلول های اندوتلیال ورید ناف انسان (HUVECs) ندارند [۱۴]. شکل نانو ذرات اکسید آهن نیز ویژگی های سوپر پارامغناطیسی، زمان گردش خون و توزیع زیستی آن ها را تحت تأثیر قرار می دهد [۱۳-۱۴].

علاوه بر اندازه، بار سطحی و شکل نانو ذرات اکسید آهن، دستکاری سطح نانو ذرات اکسید آهن فاکتور بسیار تأثیرگذاری در برهمکنش این ذرات با اعضای درون تنی و سازگاری زیستی آن ها می باشد. درحالی که IONs بدون پوشش سطحی، سازگاری زیستی و تجزیه پذیری زیستی ضعیف و ناپایداری شیمیایی در محیط بیولوژیکی دارند [۱۵]. به همین جهت، پوشش دهی سطحی می تواند به صورت مؤثری در پایداری کلئیدی، گردش خون طولانی تر، کاهش سمیت سلولی و جلوگیری از اکسیداسیون IONs تأثیرگذار باشد. در این مورد، پوشش دهی نانو ذرات اکسید آهن با پلیمرهای مختلف، لایه های آلی و غیر آلی شامل کیتوسان، پلی اتیلن گلیکول، اسید اولئیک، دکستران، اسید آمینه ها، ساکارز مورد بررسی قرار گرفته است [۱۶-۲۰].

نانو ذرات مغناطیسی مگنتیت به دلیل داشتن سطح ویژه بالا بسیار واکنش پذیر می باشند. وجود نیروهای واندروالس و نیروی مغناطیسی در میان نانو ذرات منجر به کلوخه ای شدن آن ها می شود زیست عمل گرا کردن نانو ذرات مغناطیسی نوعی اینکپسوله کردن نانو ذرات با بیومولکول ها است که از کلوخه ای شدن و اکسید شدن آن ها در معرض هوا جلوگیری می کند [۲۱]. همچنین، نانو ذرات مغناطیسی ذاتاً آبدوست هستند و همین امر از پراکنده شدن آن ها در آب جلوگیری می کند و باعث می شود آن ها به دور هم جمع شده و آگلومره شوند. با قرار گرفتن لایه ساکاریدی بر سطح نانو ذرات مغناطیسی، نانو ذرات در آب پراکنده می شوند. پوشش

سنتز نانو ذرات اکسید آهن خالص و دوپ شده با کاتیون‌های فلزات نیز گزارش شده است [۳۲-۳۳].

در این پژوهش، سنتز تک مرحله‌ای نانو ذرات اکسید آهن ابر پارامغناطیس دوپ شده با کاتیون‌های Zn^{2+} و پوشیده شده با برخی ساکاریدها (از جمله گلوکز، ساکارز و نشاسته) به روش الکتروشیمیایی انجام شده است. نمونه‌های تهیه شده عبارت‌اند از گلوکز/ Zn -IONs، ساکارز/ Zn -IONs و نشاسته/ Zn -IONs که با آنالیزهای ساختاری، مغناطیسی و مورفولوژیکی (XRD، FT-IR، FE-SEM، EDS و VSM) مشخصه‌یابی شده‌اند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

در این پژوهش، مواد شیمیایی شامل کلرید آهن (II) چهار آبه با خلوص ۹۹/۵٪ و فرمول شیمیایی $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ با کد ۱۰-۹-۱۳۴۷۸، نترات آهن (III) نه آبه با خلوص ۹۹/۹٪ به فرمول شیمیایی $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ با کد ۶-۶۱-۷۷۸۲، کلرید روی (II) چهار آبه با خلوص ۹۹/۵٪ و فرمول شیمیایی $ZnCl_2 \cdot 4H_2O$ با کد ۷-۷-۸۵-۷۶۴۶، اتانول ۹۶٪ به فرمول شیمیایی C_2H_5OH با کد ۵-۱۷-۶۴، گلوکز به فرمول مولکولی $C_6H_{12}O_6$ با وزن مولکولی g/mol ۱۸۰/۱۶ و کد ۷-۹۹-۵۰، ساکارز به فرمول مولکولی $C_{12}H_{22}O_{11}$ با وزن مولکولی g/mol ۳۴۲/۳ و کد ۱-۵۰-۵۷ و نشاسته با فرمول مولکولی $(C_6H_{10}O_5)_n$ و کد ۶-۶۷۹-۲۳۲ از کمپانی سیگما خریداری و مورد استفاده قرار گرفتند. ورقه گرافیت و فولاد زنگ نزن (۳۱۶L) نیز خریداری و به عنوان الکترودهای آندی و کاتدی بکار برده شدند.

۲-۲- آماده‌سازی نمونه

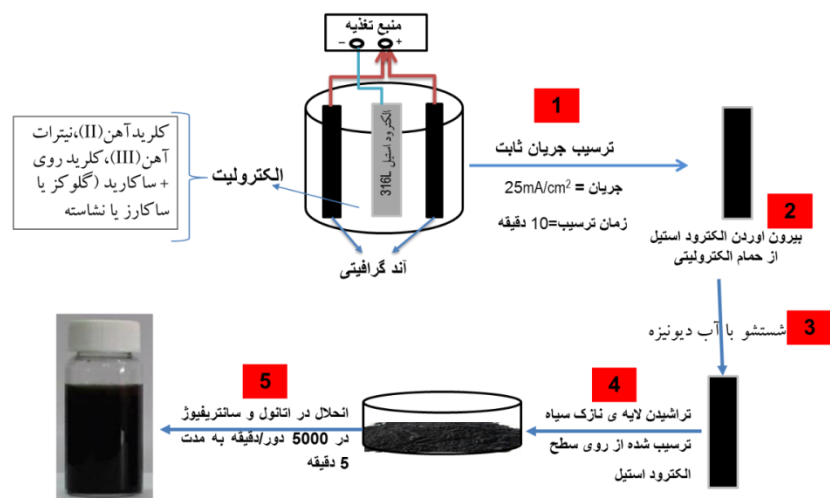
در این پژوهش، روش رسوب‌دهی الکتروشیمیایی کاتدی برای تهیه نانو ذرات اکسید آهن مورد استفاده قرار گرفت. فلوجارت مراحل تهیه نمونه‌ها در شکل (۱) ارائه شده است. سلول الکتروشیمیایی، یک بشر یک لیتری حاوی حمام

ساکاریدی از نانو ذرات مغناطیسی در برابر اکسیداسیون محافظت به عمل می‌آورد و پایداری کلونیدی آن‌ها را تقویت می‌کند و همچنین از ذرات هنگامی که در معرض سیستم بیولوژیکی قرار می‌گیرند محافظت می‌کند. به عبارتی دقیق‌تر، اصلاح سطوح نانو ذرات مغناطیسی با لایه ساکاریدی نه تنها از آگلومره شدن و اکسیداسیون آن‌ها ممانعت می‌کند بلکه آن‌ها را زیست سازگار نیز می‌کند [۲۴-۲۲]. برای مثال، تأثیر پوشش نشاسته بر میزان زیست سازگاری نانو ذرات مغناطیسی آهن بر رده سلولی MDA-MB-۲۳۱ توسط قاسم‌پور و همکارانش بررسی شده و ارزیابی سلولی آن‌ها نشان داده که نانو ذرات مغناطیسی اکسید آهن در غلظت $30 \mu g/ml$ و نانو ذرات زیست سازگار شده با پوشش نشاسته در غلظت $50 \mu g/ml$ در زمان ۲۴ ساعت باعث مرگ ۵۰٪ از سلول‌های رده سلولی MDA-MB-۲۳۱ می‌شوند. لذا نتیجه گرفتند در حضور پوشش زیست سازگار نشاسته، سمیت نانو ذرات مغناطیسی کم شده و می‌توان به مقدار بیشتری از آن‌ها به بدن وارد کرده و اثربخشی بهتر روش‌های پیرتریا (گرمادرمانی) درمان سرطان سینه را نتیجه گرفت [۲۵]. علاوه بر اصلاح سطح نانو ذرات مغناطیسی، دوپ کردن نانو ذرات اکسید آهن با کاتیون‌های فلزات واسطه و لاتانیدی به عنوان یکی از کارآمدترین و ساده‌ترین روش‌ها برای دستیابی به خواص چند منظوره بهینه IONs گزارش شده است [۲۶-۲۷]. اکسیدهای آهن دوپ شده عملکرد بسیار بهبود یافته‌ای را برای طیف گسترده‌ای از کاربردهای زیست پزشکی، از جمله هایپرترمی مغناطیسی و تصویربرداری رزونانس مغناطیسی (MRI)، در مقایسه با اکسید آهن خالص نشان داده‌اند [۲۸-۲۹].

تاکنون مسیرهای شیمیایی مختلفی مانند هم رسوبی، هیدروترمال، میکرومولسیون، سل-ژل، تجزیه حرارتی و حلال گرمایی برای تهیه نانو ذرات اکسید آهن خلوص بالا و زیست سازگار برای اهداف زیست-پزشکی به کار گرفته شده است [۳۰-۳۱]. علاوه بر این روش‌های سنتزی گزارش شده، مسیر الکتروشیمیایی به عنوان یک روش کارآمد برای

تغییر نوع ساکارید حل شده در حمام الکترولیتی انجام شد. بعد از هر مرحله رسوب‌دهی، چهار مرحله خالص‌سازی به شرح انجام شد که در شکل (۱) به‌طور شماتیکی نشان داده شده است: ابتدا، ورقه‌های فولادی از حمام الکترولیتی بیرون آورده و چندین مرتبه با آب دیونیزه شستشو داده شد. در مرحله دوم، لایه‌های نازک سیاه ترسیب شده از روی سطح ورقه‌های فولادی تراشیده شدند و در ۵۰۰ cc اتانول حل شدند. در مرحله سوم، محلول‌ها به‌منظور حذف ساکاریدهای آزاد، در دور ۵۰۰۰ rpm و به مدت ۵ min سانتریفیوژ شدند. در مرحله چهارم، پودرهای سیاه رنگ با استفاده از یک آهن‌ربا از محلول خارج شدند و در یک آون خلأ در دمای 80°C و به مدت ۵ ساعت خشک شدند. پودرهای خشک شده با توجه به ترکیب الکترولیت (که حاوی گلوکز، ساکارز و نشاسته بود) به ترتیب نمونه‌های گلوکز/ Zn-IONS ، ساکارز/ Zn-IONS و نشاسته/ Zn-IONS نام‌گذاری شدند (شکل ۱).

الکترولیتی می‌باشد و دو صفحه‌ی گرافیتی موازی در ابعاد $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ به عنوان آند و یک ورقه فولاد زن نزن 316L با ابعاد $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ که در مرکز سلول الکتروشیمیایی قرار می‌گرفت، به عنوان کاتد بکار برده شدند. ترکیب الکترولیت شامل 500 mg سی‌سی‌سی آب دیونیزه حاوی 0.75 g کلرید آهن (II)، $1/5\text{ g}$ نیترات آهن (III)، 0.25 g کلرید روی و 0.25 g ساکارید (یعنی گلوکز، ساکارز یا نشاسته) بود. الکترودهای کاتد و آند به یک منبع تغذیه DC (PROVA 8000) به عنوان منبع اعمال جریان ثابت متصل شدند (شکل ۱). رسوب‌دهی الکتروشیمیایی نانو ذرات اکسید آهن دوپه شده با Zn^{2+} و بدون پوشش، در دانسیته جریان 25 mA cm^{-2} به مدت ۱۰ دقیقه انجام و یک رسوب سیاه رنگ روی سطح کاتد فولاد 316L تشکیل گردید که این نمونه Zn-IONS نام‌گذاری شد. برای سنتز نمونه‌های گلوکز/ Zn-IONS ، ساکارز/ Zn-IONS و نشاسته/ Zn-IONS سه آزمایش رسوب‌دهی الکتروشیمیایی در سه حمام الکترولیتی مشابه و فقط با





شکل (۱): فلوجارت مراحل تهیه نمونه‌ها.

۲-۳- تکنیک‌های مشخصه‌یابی

الگوهای پراش پرتوایکس (XRD) نمونه‌های گلوکز-/Zn-IONs، ساکارز-/Zn-IONs و نشاسته-/Zn-IONs با استفاده از دیفرکتومتر Phillips PW-1800 با لامپ مسی ثبت گردیدند. اندازه دانه و مورفولوژی نمونه‌ها با تجهیز FE-SEM (مدل Mira 3-XMU و ولتاژ شتاب‌دهنده 10.0 kV) آنالیز شدند. ترکیب عنصری نمونه‌های آماده شده با استفاده از دکتور آنالیز پراش انرژی ایکس دستگاه FE-SEM تعیین شد. طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FT-IR) نمونه‌ها با دستگاه بروکر مدل ۲۲ Vector انجام شد. ارزیابی مغناطیسی نمونه‌ها با دستگاه مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش (مدل Lakeshore ۷۴۱۰) در دمای اتاق و با ثبت مغناطیس‌پذیری برحسب میدان اعمالی در محدوده ۲۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ Oe انجام شد.

۳- نتایج و بحث

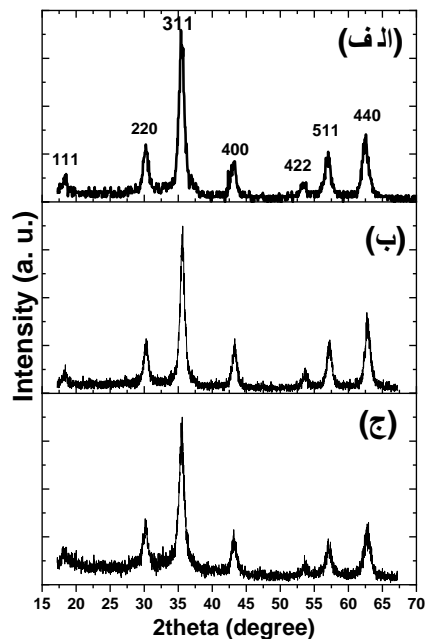
۳-۱- ساختار بلوری

الگوهای پراش پرتوایکس نمونه‌های گلوکز-/Zn-IONs، ساکارز-/Zn-IONs و نشاسته-/Zn-IONs در شکل (۲) نشان داده شده است. تمامی پیک‌های مشاهده شده در الگوهای پراش هر سه نمونه مشابه با پیک‌های الگوی پراش استاندارد با شماره کارت JCPDS ۸۵-۱۴۳۶ بوده و متعلق به فاز مگنتیت اکسید آهن (Fe_3O_4) است. در حقیقت، در همه

الگوهای XRD، پیک‌های مشخصی در موقعیت‌های دو تنای ۱۸، ۳۰، ۳۵، ۴۳، ۵۴، ۵۷ و ۶۴ وجود دارند که به ترتیب با صفحات بلوری فاز مگنتیت با اندیس‌های میلر (۱۱۱)، (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۴۰۰)، (۴۲۲)، (۵۱۱) و (۴۴۰) مطابقت دارند. همچنین این الگوها مشابه الگوهای گزارش شده برای نانو ذرات Fe_3O_4 در مقالات منتشر شده هستند [۳۰-۳۲]. میانگین اندازه بلوری نانو ذرات با استفاده از روش دبی-شرر و رابطه $D = \lambda / \beta \cos \theta$ قابل محاسبه است که در این رابطه D میانگین اندازه بلورینه‌ها، λ طول موج تابشی، β پهنای پیک در نصف ارتفاع پیک و θ زاویه پراش هستند. با استفاده از اطلاعات پیک (۳۱۱)، میانگین اندازه دانه اکسید آهن برای نمونه‌های گلوکز-/Zn-IONs، ساکارز-/Zn-IONs و نشاسته-/Zn-IONs به ترتیب برابر با ۶/۲، ۷/۴ و ۶/۷ نانومتر محاسبه شد. نتایج آنالیز XRD موارد زیر را تأیید می‌کند: الف) دوپ شدن کاتیون‌های Zn^{2+} در ساختار اکسید آهن، نوع فاز کریستالی آن را تغییر نمی‌دهد که مبین این نکته است که برخی کاتیون‌های آهن (II) در موقعیت‌های هشت وجهی (اکتاهدرال) با کاتیون‌های Zn^{2+} جایگزین شده‌اند به طوری که ساختار اسپینل معکوس اکسید آهن حفظ شده است. ب) در حضور ساکاریدها تأثیری بر نوع فاز اکسید آهن رسوب‌دهی شده ندارد ولی اندکی بر اندازه دانه‌بندی اکسید آهن تشکیل شده در سطح کاند تأثیر گذار می‌باشد.

برای گروه‌های CH_2 در طول موج 1275 cm^{-1} ، ارتعاش کششی برای پیوندهای C-O در طول موج 1166 cm^{-1} ، ارتعاش خمشی برای پیوندهای C-C در طول موج 1051 cm^{-1} ، ارتعاش کششی برای باندهای C-O-H حلقه گلوکز در طول موج 1014 cm^{-1} ، ارتعاش کششی برای گروه‌های OH- در طول موج 970 cm^{-1} و برای گروه‌های CH_2 در طول موج 872 cm^{-1} ؛ بنابراین، این داده‌های FT-IR کاملاً مربوط به پیوندهای شیمیایی موجود در ساختار گلوکز بوده و در نتیجه وجود لایه پوششی گلوکزی را در سطح Zn-IONS را تأیید می‌کند.

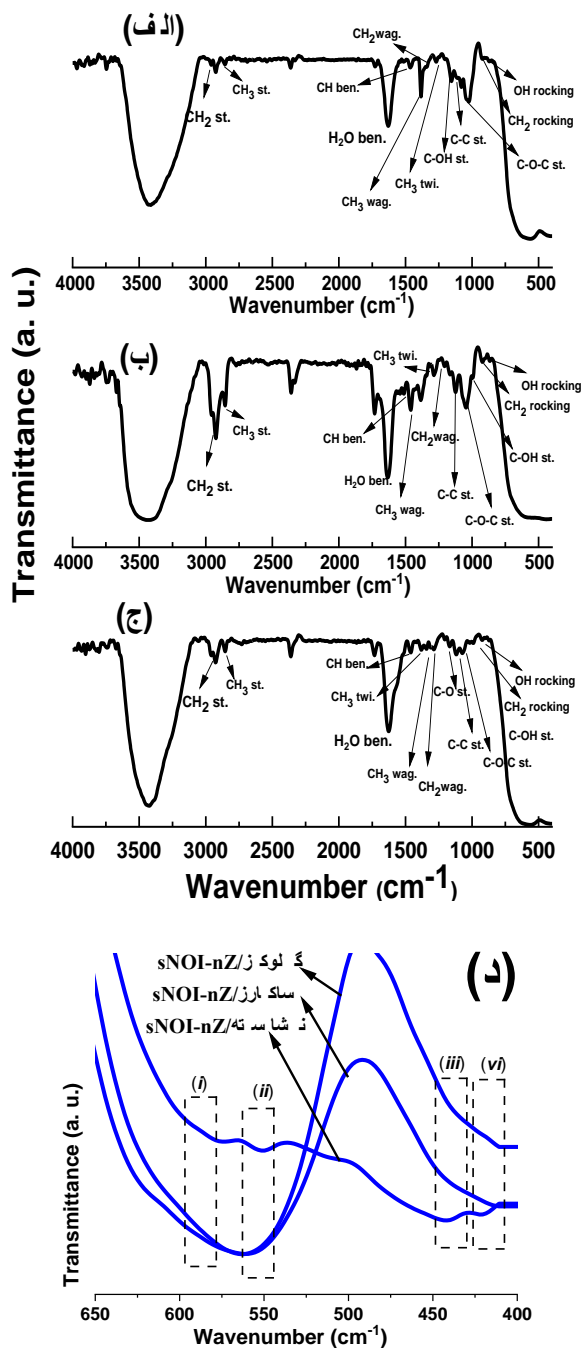
برای نمونه ساکارز/Zn-IONS، جذب‌هایی در طول موج‌های مختلف (شکل ۳-ب) مشاهده می‌شود که متعلق به ارتعاش باندهای شیمیایی ذکر شده در ادامه است [۳۵-۳۸]: ارتعاش‌های کششی گروه‌های O-H در $3400-3500 \text{ cm}^{-1}$ ، ارتعاش‌های کششی نامتقارن برای گروه‌های CH_2 در 2941 cm^{-1} ، ارتعاش‌های کششی متقارن برای گروه‌های CH_2 در 2884 cm^{-1} ، ارتعاش‌های خمشی مولکول‌های آب در 1644 cm^{-1} ، ارتعاشات خمشی باندهای C-H در 1465 cm^{-1} ، ارتعاش جنبانه‌ای برای گروه‌های CH_3 در طول موج 1381 cm^{-1} ، ارتعاش پیچشی برای گروه‌های CH_3 در طول موج 1441 cm^{-1} ، ارتعاش جنبانه‌ای برای گروه‌های CH_2 در طول موج 1384 cm^{-1} ، ارتعاش برشی برای گروه‌های CH_2 در طول موج 1268 cm^{-1} ، ارتعاش کششی برای پیوندهای C-C در طول موج 1109 cm^{-1} ، ارتعاش کششی پیوندهای C-O گروه‌های C-O-H در طول موج 1034 cm^{-1} ، ارتعاش کششی برای باندهای C-O-C حلقه ساکارز در طول موج 1021 cm^{-1} ، ارتعاش عرضی برای گروه‌های OH- در طول موج 979 cm^{-1} و برای گروه‌های CH_2 در طول موج 876 cm^{-1} [۳۸-۴۱]. جذب‌های مادون قرمز ذکر شده در بالا تمامی ارتعاشات باندهای شیمیایی مرتبط با ساکارز را شامل می‌شود و از این رو پوشش‌دهی ساکارز روی نانو ذرات IONS تأیید می‌گردد.



شکل (۲): الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه‌های (الف) گلوکز/Zn-IONS، (ب) ساکارز/Zn-IONS و (ج) نشاسته/Zn-IONS

۳-۲- طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه

به منظور تأیید وجود لایه ساکاریدی در سطح نانو ذرات اکسید آهن سنتز شده، نمونه‌های گلوکز/Zn-IONS، ساکارز/Zn-IONS و نشاسته/Zn-IONS با طیف‌سنج مادون قرمز تبدیل فوریه آنالیز شدند. شکل ۳ طیف مادون قرمز نمونه‌های سنتز شده را نشان می‌دهد. برای نمونه‌ی گلوکز/Zn-IONS، پیک‌های جذبی در محدوده‌ی طول‌موج‌های $3000-700 \text{ cm}^{-1}$ (شکل ۳-الف) مشاهده می‌شود که متعلق به ارتعاش پیوندهای شیمیایی ذکر شده زیر است [۳۴-۳۶]: ارتعاش کششی گروه‌های OH- در طول موج 3460 cm^{-1} ، ارتعاش کششی نامتقارن گروه‌های CH_2 در طول موج 2945 cm^{-1} ، ارتعاش کششی و متقارن گروه‌های CH_2 در طول موج 2884 cm^{-1} ، ارتعاش خمشی برای مولکول‌های آب (که به صورت فیزیکی به نانو ذرات اکسید آهن دوپ شده چسبیده شده‌اند) در طول موج 1643 cm^{-1} ، ارتعاش خمشی پیوندهای C-H در طول موج 1469 cm^{-1} ، ارتعاش پیچشی گروه‌های CH_3 در طول موج 1437 cm^{-1} ، ارتعاش جنبانه‌ای برای گروه‌های CH_3 در طول موج 1384 cm^{-1} ، ارتعاش جنبانه‌ای



شکل (۳): طیف مادون قرمز نمونه‌های (الف) گلوکز/Zn-IONs، (ب) ساکارز/Zn-IONs، (ج) نشاسته/Zn-IONs و (د) منطقه بزرگ‌نمایی شده (محدوده زیر 700 cm^{-1}).

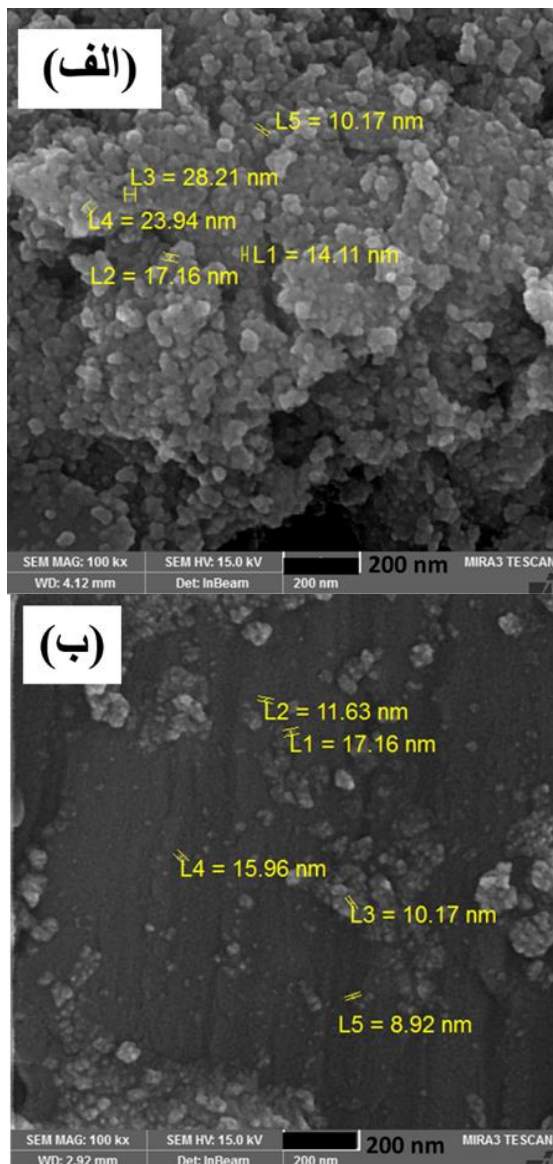
۳-۳- مشخصه‌یابی مورفولوژیکی

مورفولوژی سطحی نمونه‌های Zn-IONs سنتر شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی ارزیابی شد.

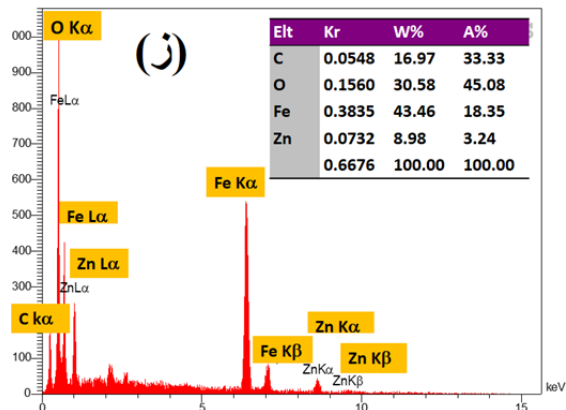
نمونه‌ی نشاسته/Zn-IONs نیز دارای پیک‌های جذبی مختلفی در طیف مادون قرمز است (شکل ۳-ج) که دلیل وجود آن‌ها به ارتعاشات زیر برمی‌گردد: ارتعاش کششی O-H، ارتعاشات کششی متقارن و نامتقارن CH₂، ارتعاش پیوند مولکول‌های آب، ارتعاشات خمشی پیوندهای C-H، نوسانات جنبانه‌ای و پیچشی CH₂، ارتعاش جنبانه‌ای و عرضی CH₂، ارتعاشات عرضی کششی پیوندهای C-C، C-O و C-O-C و ارتعاشات عرضی پیوندهای O-H و C-H [۳۷-۴۱]؛ بنابراین وجود لایه ساکاریدی مربوط به نشاسته در سطح نانو ذرات Zn-IONs تأیید می‌گردد.

شکل (۳-د) طیف مادون قرمز تمامی نمونه‌ها در طول موج‌های پایین (در محدوده $400-700 \text{ cm}^{-1}$) را نشان می‌دهد. اساساً پیک‌های مربوط به ارتعاشات پیوند فلز-اکسیژن-فلز در این طول‌موج‌ها مشاهده می‌شود [۴۱-۴۲]. برای نمونه‌های سنتر شده، چهار نوع ارتعاش به‌وضوح در محدوده $400-700 \text{ cm}^{-1}$ دیده می‌شود (که به‌وسیله خطوط نقطه‌چین نشان داده شده است) که عبارت‌اند از: (i) یک جذب مادون قرمز در $575-600 \text{ cm}^{-1}$ و (ii) ارتعاشات باندهای شیمیایی $\text{Fe}^{2+}-\text{O}^{2-}$ در $540-560 \text{ cm}^{-1}$ [۳۹ و ۴۳]، (iii) پیک جذبی مادون قرمز در $430-445 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاش باندهای شیمیایی $\text{Fe}^{3+}-\text{O}^{2-}$ [۳۹ و ۴۳]، (iv) پیک جذبی مربوط به مد نوسانی باندهای شیمیایی $\text{Zn}^{2+}-\text{O}^{2-}$ در ناحیه $415-425 \text{ cm}^{-1}$ [۳۹ و ۴۳]. این جذب‌های مادون قرمز مشاهده شده در طیف IR نمونه‌های گلوکز/Zn-IONs، ساکارز/Zn-IONs و نشاسته/Zn-IONs، تأیید می‌کند که هسته مغناطیسی IONs و نشاسته/Zn-IONs، تأیید می‌کند که هسته مغناطیسی نمونه‌های سنتر شده دارای ساختار مگنتیت (Fe_3O_4) دوپ شده با کاتیون‌های Zn^{2+} می‌باشد.

می‌باشد که نشان می‌دهد لایه پوششی تأثیری در روند دوپ شده کاتیون‌های Zn^{2+} در طول رسوب‌دهی الکتروشیمیایی ندارد.



مورفولوژی سطحی نمونه‌های تهیه شده در شکل‌های (۴ الف-ج) نشان داده شده است. تمامی نمونه‌ها، مورفولوژی ذره-ای/دانه‌ای با شکل‌های کروی را نشان دادند. قطر میانگین نانو ذرات مشاهده شده برای گلوکز/ Zn -IONS، ساکارز/ Zn -IONS، نشاسته/ Zn -IONS به ترتیب برابر با ۳۰، ۱۵ و ۲۵ نانومتر تخمین زده شد (جدول ۱). نتایج آنالیز پراش انرژی پرتوایکس و اطلاعات مربوطه برای تمامی نمونه‌ها در شکل (۴ د-ز) نشان داده شده است. داده‌های مربوط به ترکیب عنصری هر نمونه در جدول (۱) آورده شده است. برای نمونه گلوکز/ Zn -IONS (شکل ۴-د) عناصر کربن، اکسیژن، آهن و روی با درصد‌های وزنی به ترتیب ۱۳/۸۸، ۲۷/۰۶، ۵۰/۰۵ و ۹/۰۲ شناسایی شدند (جدول ۱). این اطلاعات تأیید می‌کنند که Zn -IONS ترسیب شده با فرایند سنتز الکتروشیمیایی حاوی ۹ درصد وزنی Zn^{2+} بوده و به عبارتی دوپ شده هستند. همچنین حضور ۱۳/۸۸ درصد وزنی عنصر کربن در ترکیب شیمیایی نمونه Zn -IONS پوشش‌دهی سطحی با گلوکز را مورد تأیید قرار می‌دهد. همان‌طوری که در شکل (۴-ر) دیده می‌شود، نمونه ساکارز/ Zn -IONS ترکیب شیمیایی معادل wt% ۱۳/۶۴ کربن، wt% ۲۸/۵۵ اکسیژن، wt% ۴۹/۱۵ آهن و wt% ۸/۶۶ روی را نشان می‌دهد (جدول ۱). این اطلاعات، دوپ شدن کاتیون فلز Zn^{2+} در ساختار IONS سنتز شده و تشکیل Zn -IONS با پوشش سطحی ساکارز را آشکار می‌سازد. برای نمونه نشاسته/ Zn -IONS، حضور wt% ۱۶/۹۷ کربن، wt% ۳۰/۵۸ اکسیژن، wt% ۴۳/۴۶ آهن و wt% ۸/۹۸ روی با آنالیز عنصری پراش انرژی پرتوایکس تأیید می‌گردد (شکل ۴-ز و جدول ۱). این یافته‌ها نشان می‌دهد در طی فرایند سنتز الکتروشیمیایی نانو ذرات، با حفظ ساختار اسپینل معکوس اکسید آهن اکسید آهن تقریباً ۹ درصد کاتیون‌های Fe^{2+} در موقعیت‌های هشت‌وجهی (اکتاهدرال) با کاتیون‌های Zn^{2+} جایگزین شده‌اند و سطح نانو ذرات Zn -IONS تشکیل شده با لایه‌ی ساکاریدی پوشیده شده است. همچنین، میزان دوپ شدن نمونه‌های Zn -IONS بین ۸-۹ درصد وزنی



شکل (۴): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و اطلاعات آنالیز عنصری پراش انرژی ایکس برای نمونه‌های (الف، د) گلوکز- Zn-IONs، (ب، ر) ساکارز/ Zn-IONs، (ج، ز) نشاسته/ Zn-IONs

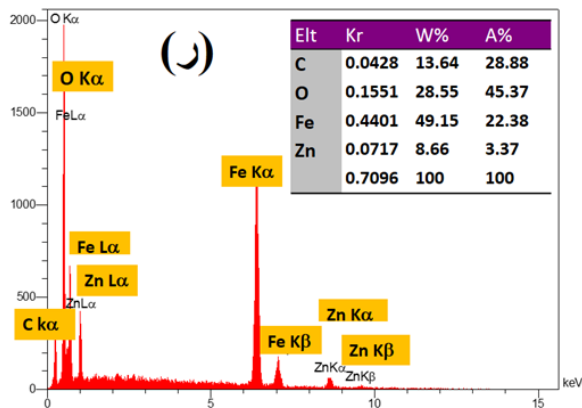
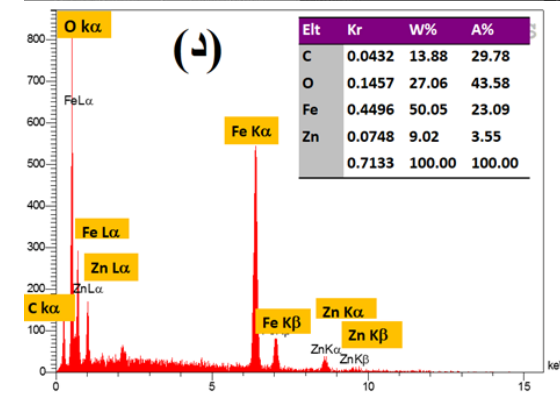
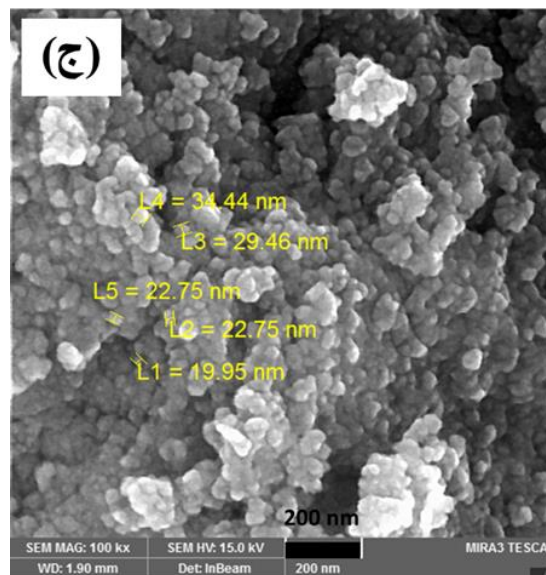
جدول (۱): اطلاعات مربوط به مشخصات مورفولوژیکی و آنالیز عنصری

نمونه‌های سنتز شده

ردیف	نام نمونه	اندازه ذرات (نانومتر)	تولید عنصری نمونه‌ها	کربن (%)	اکسیژن (%)	آهن (%)	روی (%)
۱	گلوکز- Zn-IONs	۳۰	۱۳/۸۸	۲۷/۰۶	۵۰/۰۵	۹/۰۲	
۲	ساکارز- Zn-IONs	۱۵	۱۳/۶۴	۲۸/۵۵	۴۹/۱۵	۸/۶۶	
۳	نشاسته- Zn-IONs	۲۵	۱۶/۹۷	۳۰/۵۸	۴۳/۴۶	۸/۹۸	

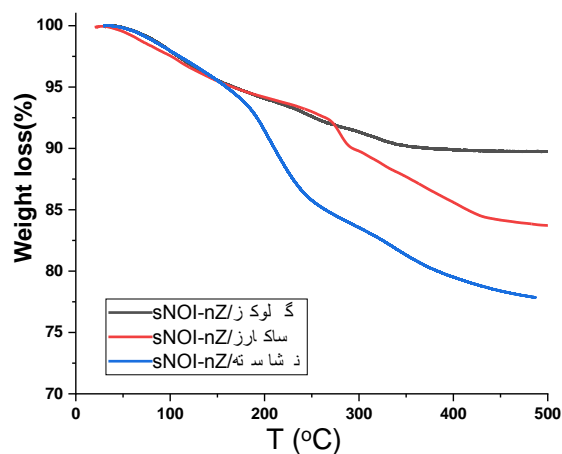
۳-۴- آنالیز ترموگراویمتری

شکل ۵ منحنی ترموگراویمتری برای نمونه‌های گلوکز- Zn-IONs، ساکارز/ Zn-IONs و نشاسته/ Zn-IONs را نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشخص است با افزایش دما به صورت تدریجی با یک شیب ثابت وزن نمونه‌ها کاهش می‌یابد که ناشی از تجزیه و حذف لایه ساکاریدی از نمونه‌ها است. با حذف لایه ساکاریدی از روی سطح نمونه از دمای حدوداً ۴۵۰°C به بعد تغییرات وزنی شرایط نسبتاً پایداری را تجربه می‌کند. طبق شکل ۵، کاهش/افت وزنی کلی برای نمونه‌های گلوکز- Zn-IONs، ساکارز/ Zn-IONs، نشاسته/ Zn-IONs به ترتیب برابر با ۱۰/۲۵، ۱۶/۲۸ و ۲۲/۱۵ درصد وزنی مشاهده شد. از این مقادیر افت وزنی کلی نمونه‌های گلوکز- Zn-IONs



پایین در شکل (۶-ب) نشان داده شده است. برای تمامی نمونه‌های سنتز شده، ماهیت ابر پارامغناطیسی از منحنی‌های پسماند مغناطیسی برگشت پذیر آشکار است. با توجه به شکل (۶-الف)، مقادیر اشباع مغناطیسی (M_s) برای نمونه‌های گلوکز/ Zn -IONS، ساکارز/ Zn -IONS و نشاسته/ Zn -IONS به ترتیب برابر با $29/7$ ، $34/8$ و $35/7$ $emu\ g^{-1}$ بود. این مقادیر اشباع مغناطیسی نشان می‌دهد که نمونه نشاسته/ Zn -IONS دارای M_s بزرگ‌تری در مقایسه با دو نمونه دیگر دارد. همچنین این مقادیر خیلی کوچک‌تر از مقدار اشباع مغناطیسی گزارش شده برای اکسید آهن بالک ($M_s=92\ emu\ g^{-1}$) می‌باشد. کاهش مقدار M_s در نمونه‌های گلوکز/ Zn -IONS، ساکارز/ Zn -IONS و نشاسته/ Zn -IONS را می‌توان به وجود لایه ساکاریدی در سطح نانو ذرات IONS نسبت داد [۴۴-۴۵]. لازم به ذکر است دلیل ذاتی کاهش M_s نانو ذرات مغناطیسی به بی‌نظمی در اسپین‌های مغناطیسی در سطح نانو ذرات برمی‌گردد، اگرچه ذرات به‌خوبی کریستالی هم باشند. درصد چرخش‌های نامنظم کاهش اندازه ذرات را به دلیل افزایش نسبت سطح به حجم افزایش می‌دهد [۳۰، ۴۳-۴۷]. مقادیر اشباع مغناطیسی (M_s) برای نمونه‌های گلوکز/ Zn -IONS، ساکارز/ Zn -IONS و نشاسته/ Zn -IONS برای اهداف هایپرترمیا (گرمادرمانی) و تشخیصی قابل قبول است [۲۸ و ۳۵]. دیگر پارامترهای مغناطیسی مانند پایداری مغناطیسی (M_r)، پایداری مغناطیسی مثبت و منفی، وادارندگی (H_{ci})، وادارندگی مثبت و منفی از شکل (۶-ب) استخراج شد. داده مغناطیسی به‌دست آمده از منحنی‌های VSM برای نمونه‌های Zn -IONS در جدول (۲) لیست شده است. مقادیر M_r و M_s نمونه‌های پوشش داده با لایه ساکاریدی، عملکرد ابر پارامغناطیسی آن‌ها را تأیید می‌کنند. همان‌طور که در جدول (۲) دیده می‌شود هر سه نمونه مقادیر پایداری و وادارندگی ناچیزی را نشان می‌دهند که رفتار ابر پارامغناطیسی مناسبی برای کاربردهای زیست پزشکی تأیید می‌کند. همچنین، رفتارهای ابر پارامغناطیسی نمونه‌ها با مقادیر گزارش شده برای

IONS ساکارز/ Zn -IONS، نشاسته/ Zn -IONS، به ترتیب مقادیر $2/06$ ، $2/35$ و $2/05$ درصد وزنی در دماهای زیر $150^\circ C$ اتفاق می‌افتد که مربوط به حذف آب سطحی/ساختاری از این نمونه‌ها می‌باشد. لذا، بقیه کاهش وزنی مشاهده شده در منحنی ترموگراویمتری این نمونه‌ها، مربوط به حذف پوشش ساکاریدی از لایه سطحی نانو ذرات اکسید آهن سنتز شده می‌باشد [۳۰-۳۲]. طبق شکل (۵)، کاهش وزنی مربوط به لایه ساکاریدی برای نمونه‌های گلوکز/ Zn -IONS، ساکارز/ Zn -IONS، نشاسته/ Zn -IONS به ترتیب برابر با $8/19$ ، $13/93$ و $20/1$ درصد وزنی می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که کاهش وزنی مربوط به نمونه‌ی ساکارز/ Zn -IONS نسبت به دو نمونه‌ی دیگر حاوی پوشش گلوکز و ساکارز بیشتر می‌باشد که دلیل این امر مربوط به وزن مولکولی بالاتر نشاسته در مقایسه با ساکارز و گلوکز می‌باشد.

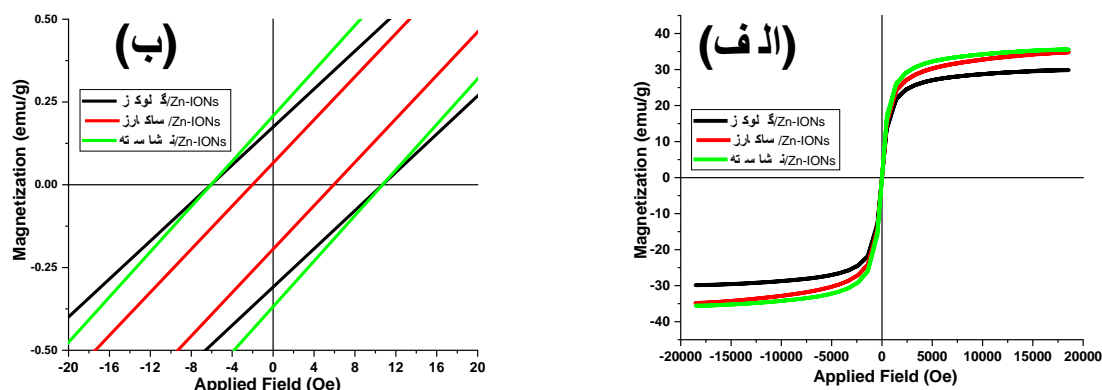


شکل (۵): منحنی TG برای نمونه‌های گلوکز/ Zn -IONS، ساکارز/ Zn -IONS، نشاسته/ Zn -IONS

۳-۵- آنالیز مغناطیسی

ویژگی‌های مغناطیسی نمونه‌های Zn -IONS آماده شده با روش مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش از طریق ثبت مقادیر مغناطیس پذیری برحسب میدان اعمالی در محدوده 20000 تا G + 20000 مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج منحنی‌های VSM برای هر سه نمونه در شکل (۶-الف) نشان داده شده است. همچنین رفتار ابر پارامغناطیسی نمونه‌ها در میدان‌های اعمالی

نانو ذرات مگنتیت پوشش سطحی شده در مقالات قابل مقایسه است. نمونه ساکارز/Zn-IONS در مقایسه با دو نمونه دیگر مقدار پسماند مغناطیسی کوچک‌تری ارائه می‌دهد که دلیل آن به بلورینگی کوچک‌تر (۴/۷ نانومتر محاسبه شده از الگوی XRD) و همچنین اندازه ذرات کوچک‌تر (۱۵ نانومتر) این نمونه مربوط می‌باشد. هر چه قدر اندازه ذرات مغناطیسی کوچک‌تر باشند تعداد تک حوضه‌های مغناطیسی تشکیل شده بیشتر بوده و عملکرد مغناطیسی مطلوبی در اثر میدان ظاهر خواهد شد [۴۵-۴۶]. مقایسه مقادیر Hci در جدول ۲ نشان می‌دهد که نمونه Zn-IONS پوشش داده شده با ساکارز کمترین مقدار وادارندگی مغناطیسی را دارد که به اندازه کوچک‌تر نانو ذرات این نمونه (۱۵ نانومتر، جدول ۱) در مقایسه با دو نمونه دیگر با اندازه ذرات ۲۵-۳۰ نانومتر مرتبط می‌شود. وادارندگی مغناطیسی با کاهش اندازه نانو ذرات Zn-IONS کاهش می‌یابد چراکه با کاهش اندازه نانو ذرات، تک حوضه‌های مغناطیسی تشکیل شده و عملکرد سوپر پارامغناطیسی تقویت می‌شود [۴۶-۴۸].



شکل (۶): (الف) منحنی‌های M-H و (ب) پسماند در میدان $0 \leftarrow$ برای نمونه‌های سنتر شده.

جدول (۲): داده‌های مغناطیسی نمونه‌های سنتر شده

ردیف	نام نمونه	اشباع مغناطیسی (Ms, emu/g)	پسماند مغناطیسی (Mr, emu/g)	Mr مثبت (emu/g)	Mr منفی (emu/g)	وادارندگی (Hci, Oe)	وادارندگی مثبت (Oe)	وادارندگی منفی (Oe)
۱	Zn-IONs/گلوز	۲۹/۷	۰/۲۴	+۰/۱۴	-۰/۳۴	+۸/۹	+۱۰/۵	-۷/۴
۲	Zn-IONs/ساکارز	۳۹/۸	۰/۰۹	+۰/۰۸	-۰/۲۱	+۳/۶	+۶/۲	-۳/۸
۳	Zn-IONs/نشاسته	۳۵/۷	۰/۲۸	+۰/۲۲	-۰/۳۴	+۹/۲	+۱۰/۹	-۸/۱

مغناطیسی $39/8 \text{ emu g}^{-1}$ ، پسماند مغناطیسی $39/8 \text{ emu g}^{-1}$ و وادارندگی $3/6 \text{ Oe}$ دارد که این نانو ذرات می‌توانند به‌عنوان پایه مغناطیسی با عامل‌های تشخیصی-درمانی متنوع بارگذاری شده و به‌عنوان عوامل ترانوسیتیک در کاربردهایی زیست پزشکی نظیر هدف‌گیری مغناطیسی، تصویربرداری رزونانسی مغناطیسی، شیمی‌درمانی، هایپرترمیا، زیست جداسازی، ژن‌درمانی، تثبیت آنزیم‌ها و رهایش کنترل شده دارو بکار برده شوند.

۵- مراجع

- [۱] A. V. Samrota, C. S. Sahithy, J. Selvarani A, S. K. Purayil & P. Ponnaiah, "A review on synthesis, characterization and potential biological applications of superparamagnetic iron oxide nanoparticles", Current Research in Green and Sustainable Chemistry. vol. ۴, p. ۱۰۰۰۴۲, ۲۰۲۱.
- [۲] F. Reyes-Ortega, Á. V. Delgado, & G. R. Iglesias, "Modulation of the Magnetic Hyperthermia Response Using Different Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticle Morphologies", Nanomaterials. vol. ۱۱, no. ۳, p. ۶۲۷, ۲۰۲۱.

۴- نتیجه‌گیری

به‌صورت خلاصه، نانو ذرات اکسید آهن ابر پارامغناطیسی پوشش داده شده با ساکاریدها (اعم از گلوکز، ساکارز و نشاسته) با استفاده از فرایند رسوب‌گذاری الکتروشیمیایی ساده و تک مرحله‌ای سنتر شدند. اطلاعات پراش اشعه ایکس نشان داد که نمونه‌های گلوکز/Zn-IONs، ساکارز/Zn-IONs و نشاسته/Zn-IONs دارای ساختار بلوری مگنتیت بوده و به ترتیب بلورینهایی برابر با $6/2$ ، $4/7$ و $7/6$ نانومتر دارند. مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی نشان داد که برای تمامی نمونه‌ها میانگین اندازه ذرات در حدود ۲۰ نانومتر می‌باشد. ارزیابی‌های VSM تأیید کرد که نمونه‌های گلوکز/Zn-IONs، ساکارز/Zn-IONs و نشاسته/Zn-IONs تهیه شده ماهیت ابر پارامغناطیسی مناسب با مقادیر پسماند مغناطیسی ناچیز را نشان می‌دهند. نتایج آنالیزهای ساختاری-مورفولوژیکی-مغناطیسی نشان داد که نمونه‌های Zn-IONs سنتر شده دارای خصوصیات فیزیکوشیمیایی و مغناطیسی مطلوبی برای کاربردهای زیست پزشکی هستند. از بین نمونه‌های سنتر شده، نمونه‌ی ساکارز/Zn-IONs بهترین عملکرد ابرمغناطیسی با بروز اشباع

- capacitive and super-paramagnetic performances of Co^{2+} doped Fe_3O_4 ultra-fine particles", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. vol. 29, no. 24, p.2291, 2018.
- [12] E. Russell, V. Dunne, B. Russell, H. Mohamud, M. Ghita, S.J. McMahon, K.T. Butterworth, G. Schettino, C.K. McGarry, K. M. Prise, "Impact of superparamagnetic iron oxide nanoparticles on in vitro and in vivo radiosensitisation of cancer cells", *Radiation Oncology*. vol. 16, p.104, 2021.
- [13] D. M Diaz-Diestra, T. Palacios-Hernandez, Y. Liu, D. E. Smith, A.K. Nguyen, T. Todorov, P.J. Gray, J. Zheng, S.A. Skoog, P.L. Goering, "mpact of Surface Chemistry of Ultrasmall Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles on Protein Corona Formation and Endothelial Cell Uptake, Toxicity, and Barrier Function", *Toxicological Sciences*. vol. 188, p.261, 2022.
- [14] N. Elahi, M. Rizwan, " Progress and prospects of magnetic iron oxide nanoparticles in biomedical applications: A review", *Artificial Organs*. vol. 45, p.1272, 2021.
- [15] R. Wei, Y. Liu, J. Gao, V.W. Yong, M. Xue, " Small functionalized iron oxide nanoparticles for dual brain magnetic resonance imaging and fluorescence imaging", *RSC Advances*. vol. 11, p.12867, 2021.
- [16] I. Karimzadeh, H. Rezagholipour Dizaji, M. Aghazadeh, " Preparation, characterization and PEGylation of superparamagnetic Fe_3O_4 nanoparticles from ethanol medium via cathodic electrochemical deposition (CED) method", *materials Research Express*. vol. 3, no. 9, p.95022, 2016.
- [17] J.H. Juang, J.J. Wang, C.R. Shen, C.Y. Chen, C.W. Kao, C.L. Chen, S.H. Lin, S.T. Wu, W.C. Li, Z.T. Tsai, " Magnetic Resonance Imaging of Transplanted Porcine Neonatal Pancreatic Cell Clusters Labeled with Chitosan-Coated
- [3] E. Álvarez, M. Estévez, A. Gallo-Cordova, B. González, R. R. Castillo, M. Del Puerto Morales, M. Colilla, I. Izquierdo-Barba & M. Vallet-Regí, "Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles Decorated Mesoporous Silica Nanosystem for Combined Antibiofilm Therapy", *Pharmaceutics*. vol. 14, no. 1, p.163, 2020.
- [4] Y. Wu, R. Zhang, H.D. N. Tran, N.D. Kurniawan, S.S. Moonshi, A.K. Whittaker, H.T. Ta, "Chitosan Nanococktails Containing Both Ceria and Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles for Reactive Oxygen Species-Related Theranostics", *ACS Appl. Nano Material*. vol. 4, no. 4, p.3604, 2021.
- [6] Z. Zhuo, J. Wang, Y. Luo, R. Zeng, C. Zhang, W. Zhou, K. Guo, H. Wu, W. Sha, H. Chen, " Targeted extracellular vesicle delivery systems employing superparamagnetic iron oxide nanoparticles", *Acta Biomaterialia*. vol. 134, p.13, 2021.
- [7] C. Chen, J. Ge, Y. Gao, L. Chen, J. Cui, J. Zeng, M. Gap, "Revisiting the Role of Physical Confinement and Chemical Regulation of ^2D Hosts for Dendrite-Free Li Metal Anode", *WIREs Volume* 14, Issue 1 (2022) e1740.
- [8] M. Aghazadeh, M.R. Ganjali, " Enhancing the Supercapacitive and Superparamagnetic Performances of Iron Oxide Nanoparticles through Yttrium Cations Electro-chemical Doping", *Journal of Materials Science*. vol. 53, p.295, 2018.
- [9] M. Hosseini, M. Aghazadeh, M.R. Ganjali, " Electrochemical Sensor Based on Carbon Nanotubes Decorated with ZnFe_2O_4 Nanoparticles Incorporated Carbon Paste Electrode for Determination of Metoclopramide and Indomethacin", *Chemistry Select*. vol. 4, no. 25, p.7616, 2019.
- [10] M. Aghazadeh, I. Karimzadeh, M.R. Ganjali, " Improvement of supercapacitive and superparamagnetic capabilities of iron oxide through electrochemically grown La^{3+} doped Fe_3O_4 nanoparticles", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. vol. 28, no. 24, p.19061, 2017.
- [11] M. Aghazadeh, M.R. Ganjali, " One-pot electrochemical synthesis and assessment of super-

- [۲۵] ف. مهدوی و ب. هاشمی، "سنتز فروسیال فریت روی و بررسی خواص مغناطیسی و رئولوژیکی آن"، فصلنامه فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۱۶، شماره ۱، صفحه ۹۲-۷۷، ۱۴۰۱.
- [۲۶] X. Xu, H. Xiang, Z. Wang, C. Wu, C. Lu, " Doping engineering and functionalization of iron oxide nanoclusters for biomedical applications", Journal of Alloys and Compounds. vol. ۹۲۳, p.۱۶۶۴۵۹, ۲۰۲۲.
- [۲۷] S. S. Laha, N.D. Thorat, G. Singh, C. I. Sathish, J. Yi, A. Dixit, A. Vinu, " Rare-Earth Doped Iron Oxide Nanostructures for Cancer Theranostics: Magnetic Hyperthermia and Magnetic Resonance Imaging", Small. vol. ۱۸, p.۲۱۰۴۸۵۵, ۲۰۲۲.
- [۲۸] H. Du, O.U. Akakuru, C. Yao, F. Yang, A. Wu, " Transition metal ion-doped ferrites nanoparticles for bioimaging and cancer therapy", Translational Oncology. vol. ۱۵, p.۱۰۱۲۶۴, ۲۰۲۲.
- [۲۹] H. Du, C.Y. Yao, H. Peng, B. Jiang, S.X. Li, J. L. Yao, F. Zheng, F. Yang, A.G. Wu, "Applications of Transition Metal-doped Iron-based Nanoparticles in Biomedicine", Chinese Journal of Applied Chemistry. vol. ۳۹, no. ۳, p.۳۹۱, ۲۰۲۲.
- [۳۰] R. Yadwade, S. Kirtiwar, B. Ankamwar, "A Review on Green Synthesis and Applications of Iron Oxide Nanoparticles", Journal of Nanoscience and Nanotechnology, Vol. ۲۱, no. ۱۲, p.۵۸۱۲, ۲۰۲۱.
- [۳۱] O. Abu Noqta, A. Abdul Aziz, I. Adamu Usman, M. Bououdina, "Recent Advances in Iron Oxide Nanoparticles (IONPs): Synthesis and Surface Modification for Biomedical Applications", Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. vol. ۳۲, p. ۷۷۹, ۲۰۱۹.
- [۳۲] M. Aghazadeh, M.R. Ganjali, " Enhancing the Supercapacitive and Superparamagnetic Performances of Iron Oxide Nanoparticles through Yttrium Cations Electro-chemical Doping", Ceramic International, vol. ۴۴, p.۵۲۰, ۲۰۱۸.
- Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles in Mice", Polymers. vol. ۱۳, no. ۸, p.۱۲۳۸, ۲۰۲۱.
- [۱۸] D. Barbaro, L. Di Bari, V. Gandin, C. Marzano, A. Ciaramella, M. Malventi, C. Evangelisti, " Glucose-coated superparamagnetic iron oxide nanoparticles prepared by metal vapor synthesis can target GLUT¹ overexpressing tumors: In vitro tests and in vivo preliminary assessment", Plos One. ۲۰۲۲. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0269633>.
- [۱۹] L.M. Ngema, S.A. Adeyemi, T. Marimuthu, P. Ubanako, D. Wamwangi, Y.E. Choonara, " Synthesis of Novel Conjugated Linoleic Acid (CLA)-Coated Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles (SPIONs) for the Delivery of Paclitaxel with Enhanced In Vitro Anti-Proliferative Activity on A⁵⁴⁹ Lung Cancer Cells ", Pharmaceutics. vol. ۱۴, no. ۴, p.۸۲۹, ۲۰۲۲.
- [۲۰] M. Aghazadeh, I. Karimzadeh, M.R. Ganjali, M. Mohebi Morad, "A novel preparation method for surface coated superparamagnetic Fe³O₄ nanoparticles with vitamin C and sucrose", Materials Letter. vol. ۱۹۶, p.۳۹۲, ۲۰۱۷.
- [۲۱] ف. حیدری، ر. بازرگان لاری و م. ا. بحر العلوم، "ساخت و بررسی خواص نانوکامپوزیت طبیعی و زیست سازگار کایتوسن/مگنتیت"، فصلنامه فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۹، شماره ۳، صفحه ۲۵۶-۲۴۷، ۱۳۹۴.
- [۲۲] م. محمدعلیزاده هنجنی، ا. قاسمی و ا. منشی، "تأثیر دمای سنتز بر ویژگی‌های نانو ذرات مغناطیسی اکسید آهن در روش هم‌رسوبی"، فصلنامه فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۶، شماره ۳، صفحه ۸۹-۱۳۹۱، ۷۷.
- [۲۳] ع. جوانی و ف. جوادی زرنقی، "اثرات مونوساکاریدها و دی ساکاریدها بر نانو ذرات طلا در ساخت زیست حسگرهای تشخیصی"، مجله دانشگاه علوم پزشکی شهرکرد، دوره ۲۰، شماره ۵، صفحه ۱۲-۱، ۱۳۹۷.
- [۲۴] ز. حسن‌زاده، ق. عمو عابدینی، م. م. اوجی و ع. ا. سیف‌کردی، "زیست عمل‌گرا کردن نانو ذرات مغناطیسی با پلیمر نشاسته"، اولین همایش ملی تکنولوژی‌های نوین در شیمی و پتروشیمی، تهران، ۱۳۹۳.

- [۳۹] F. Chen, W. Bu, C. Lu, G. Chen, M. Chen, X. Shen, R. Liu, J. Shi, " Hydrothermal Synthesis of a Highly Sensitive T₂-Weighted MRI Contrast Agent: Zinc-Doped Superparamagnetic Iron Oxide Nanocrystals", *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. vol. ۱۱, no. ۱۲, p.۱۰۴۳۸, ۲۰۱۱.
- [۴۰] D.K. Kim, M. Mikhaylova, F.H. Wang, J. Kehr, B. Bjelke, Y. Zhang, T. Tsakalakos, Muhammed, " Starch-Coated Superparamagnetic Nanoparticles as MR Contrast Agents", *Chemistry of Materials*. vol. ۱۵, p.۴۳۴۳, ۲۰۰۳.
- [۴۱] C. Chen, X. Jiang, Y. Kaneti, A. Yu, " Design and construction of polymerized-glucose coated Fe₃O₄ magnetic nanoparticles for delivery of aspirin", *Power Technology*. vol. ۲۳۶, p.۱۵۷, ۲۰۱۳.
- [۴۲] X. Sun, C. Zheng, F. Zhang, Y. Yang, G. Wu, A. Yu, N. Guan, " Size-Controlled Synthesis of Magnetite (Fe₃O₄) Nanoparticles Coated with Glucose and Gluconic Acid from a Single Fe(III) Precursor by a Sucrose Bifunctional Hydrothermal Method", *The Journal of Physical Chemistry*. vol. ۱۱۳, no. ۳۶, p.۱۶۰۰۲, ۲۰۰۹.
- [۴۳] M. Aghazadeh, "Zn-doped magnetite nanoparticles: development of novel preparation method and evaluation of magnetic and electrochemical capacitance performances", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. vol. ۲۸, p.۱۸۷۵۵, ۲۰۱۷.
- [۴۴] ز. حسن‌زاده، ق. عمو عابدینی، ع. ا. سیف کردی و ع. وزیر، "بررسی تولید نانو ذرات مغناطیسی زیست عمل‌گرا شده با پوشش نشاسته در مقایسه با نانو ذرات مغناطیسی بدون پوشش"، *مجله تازه‌های بیوتکنولوژی سلولی و مولکولی*، دوره ۵، شماره ۱۸، صفحه ۷۴-۶۹، ۱۳۹۴.
- [۴۵] م. نظری، ع. ا. روحانی و ص. ع. منافی، "سنتز نانو ذرات سوپر پارامغناطیسی اکسید آهن به روش رسوب‌دهی شیمیایی و بررسی پارامترهای مؤثر بر آن"، *مجله تحقیقات مواد نانو کامپوزیتی*، دوره ۲، شماره ۵، صفحه ۴۹-۴۳، ۱۳۸۹.
- [۴۶] ا. تعاونی گیلان، "سنتز و مشخصه‌یابی نانو ذرات مغناطیسی اکسید آهن اصلاح شده با مخلوط پلیمری نشاسته/کربوکسی متیل سلولز برای
- [۳۳] M. Aghazadeh, " Cathodic Electrochemical Deposition of Nanostructured Metal Oxides/Hydroxides and their Composites for Supercapacitor Applications: A Review", *Analltical and Bioanalytical Electrochemistry*, vol. ۱۱, no. ۲, p.۲۱۱, ۲۰۱۹.
- [۳۴] D. Sivakumar, M. Mohamed Rafi, B. Sathyaseelan, K.M. Prem Nazeer, A.M. Ayisha Begam, " Saccharide-capped Superparamagnetic Copper Cations-doped Magnetite Nanoparticles for Biomedical Applications: A Novel and Simple Synthesis Procedure, In-situ Surface Engineering and Characterization", *International Journal of Nano Dimension*, vol. ۸, no. ۳, p.۲۵۷, ۲۰۱۷.
- [۳۵] W. Chen, Y. Xu, D. Yang, P. Wang, Y. Xu, J. Zhu, D. Cui, " Preparation of Liposomes Coated Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles for Targeting and Imaging Brain Glioma", *Nano Biomedicine and Engineering*. vol. ۱۴, no. ۱, p.۷۱, ۲۰۲۲.
- [۳۶] D.D. Herea, H. Lupu, N. Grigoras, M. Stoian, G. Stoica, B.A. Petreusb, "Study on iron oxide nanoparticles coated with glucose-derived polymers for biomedical applications", *Applied Surface Science*. vol. ۳۲۵, p.۱۱۷, ۲۰۱۵.
- [۳۷] B. Ates, A. Ulu, S. Koytepe, S. Abbas Ali Nom, V. S. Kolatb, T. Izgi, " Magnetic-propelled Fe₃O₄-chitosan carriers enhance l-asparaginase catalytic activity: a promising strategy for enzyme immobilization", *RSC Advances*. vol. ۸, p.۳۶۰۶۳, ۲۰۱۸.
- [۳۸] D. Sivakumar, M. Mohamed Rafi, B. Sathyaseelan, K.M. Prem Nazeer, A.M. Ayisha Begam, " Saccharide-capped Superparamagnetic Copper Cations-doped Magnetite Nanoparticles for Biomedical Applications: A Novel and Simple Synthesis Procedure, In-situ Surface Engineering and Characterization", *International Journal of Nano Dimension*. Vol. ۸, p.۲۵۷, ۲۰۱۷.

بررسی رهاسازی هدفمند داروی ضد ویروس آسیکلوویر"، نانو مواد، سال دهم، شماره ۳۳، صفحه ۲۱-۱۱، ۱۳۹۷.

۶- پی‌نوشت

[۱] Iron Oxide Nanoparticles (IONS)

[۲] Magnetic Resonance Imaging

[۳] Enzyme Immobilization

[۴] Bio-Sensing

[۵] Cell Labeling

[۶] Drug Delivery

[۷] Hyperthermia Agents

[۴۷] م. جزیره پور هرمزی، م. ح. شمس، "سنتز و مشخصه یابی نانو میله‌های $Fe_2O_3/BaFe_{12}O_{19}$ و بررسی خواص مغناطیسی آنها"، فصلنامه فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۱۱، شماره ۱، صفحه ۱۴۸-۱۳۹۶.

[۴۸] ر. احمدی و م. ح. شاعری، "تولید و کاربرد نانو ذرات اکسید آهن با پوشش یددار برای تصویربرداری پزشکی دوگانه CT-MRI"، نانو مواد، سال نهم، شماره ۳۰، صفحه ۱۲۹-۱۲۱، ۱۳۹۶.