انجمن بیوشیمی فیزیک ایران
ISOBC
دانشگاه هرمزگان
University of Hormozgan

هجدهمین همایش ملی و سومین همایش بین المللی بیوشیمی فیزیک ایران
18th National and 3rd International Conference of Iranian Biophysical chemistry

۶-۵ دی ماه ۱۴۰۳، دانشگاه هرمزگان
25-26 Des, 2024, University of Hormozgan

تولید نانوذرات مگنتیت (Fe_3O_4) از بازیافت باطله های صنعت شکل‌دهی فولاد

سید مجید پیغمبری[۱]*، رومینا عشایر[۲]

[۱]دانشگاه صنعتی ارومیه، دانشکده مهندسی شیمی و مواد پیشرفته، majid.peighambari@uut.ac.ir

چکیده

رادار به عنوان یک سیستم مهم برای تشخیص و ردیابی مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از مواد جاذب امواج، یکی از روش‌های مرسوم در برابر حسگر راداری می‌باشد. این مواد، امواج رادار را جذب میکند، امواج برگشت داده شده را کاهش داده و در نتیجه از شناسایی جلوگیری می‌کنند. امروزه مواد جاذب رادار در صنایع مختلف دارای جایگاه خاصی هستند، این مواد می تواند شامل یک پوشش نازک از مواد مغناطیسی و مواد دی الکتریکی باشند. مگنتیت (Fe_3O_4) یکی از مهمترین مواد مغناطیسی است که به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان یک ماده جاذب امواج مایکروویو بکار رفته است. این نانوذرات در کاربردهای مهمی همچون بیوشیمی، می‌تواندحامل داروهای مغناطیسی باشد. رنگ‌های ضدرادار، که به‌عنوان رنگ‌های استتاری یا رنگ‌های کم دید نیز شناخته می‌شوند، به منظور کاهش قابلیت شناسایی و ردیابی اشیاء توسط رادارها طراحی شده‌اند که معمولا در این رنگ ها از این پودر در کنار مواد دی الکتریک مانند گرافیت استفاده می شود. در این پژوهش پودر Fe_3O_4 که از بازیافت صنایع شکل‌دهی فولاد بدست آمده، با هدف تولید نانوذرات اکسید آهن استفاده شده است. این رنگدانه می‌تواند در داخل رنگ‌ها برای ماده جاذب رادار مورد استفاده قرار گیرد. همچنین خواص فیزیکی و شیمیایی برای تعیین مورفولوژی و آنالیز عناصر، توسط آنالیزهای SEM و EDX مورد بررسی قرار گرفته است. در نتیجه پودر اکسید آهن با اندازه ذرات کمتر از ۲۰ نانومتر به روش شیمیایی و از طریق فرآیند همرسوبی تولید گردید. از جمله ویژگی دیگر پودر حاصل شده، حضور ذرات کربن در کنار این پودر می باشد که می تواند گزینه مناسبی جهت تولید رنگ های ضد رادار باشد.

واژه‌های کلیدی: اکسید آهن، رنگ ضدرادار، گرافیت، مگنتیت، نانوذرات

۱- مقدمه

با ظهور سیستم‌های رادار در جهت تشخیص و ردیابی اهداف راداری که اغلب تجهیزات نظامی می‌باشند، تکنولوژی استتار این تجهیزات از دید رادار اهمیت ویژه‌ای یافته است. با توجه به این که میزان انعکاس موج فرودی از اهداف مورد نظر، نقش تعیین کننده‌ای در ردیابی و تشخیص آنها دارد، جهت استتار اهداف راداری مقدار این انعکاس بایستی کاهش یابد.

رنگ‌های جاذب رادار عمدتا در ارتباطات بی‌سیم، شبکه‌های محلی، تلویزیون های ماهواره‌ای، سیستم‌های گرمایشی برای جلوگیری از تداخل امواج و تجهیزات مشابه دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آنجایی که این پوشش‌ها بصورت رنگ و لایه نازک بر روی سطوح تجهیزات اعمال می‌شوند، بنابراین بالا بودن استحکام چسبندگی، دوام و پایداری این پوشش‌ها در شرایط دینامیکی حاد مانند سرعت‌های بالا و همچنین شرایط آب و هوایی گوناگون از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آماده‌سازی و پیش عملیات سطح زیر لایه قبل از اعمال پوشش، موثرترین شیوه برای افزایش چسبندگی و دوام پوشش به زیر لایه است.

در سال‌های اخیر فناوری مواد جاذب امواج مایکروویو مسئله مهمی در موارد نظامی و غیر نظامی بوده است. این مواد به صورت رنگ‌های جاذب امواج الکترومغناطیس روی سطوح خارجی هواپیماها، شناورها و تجهیزات نظامی، جهت استتار آنها در مقابل رادار به کار می‌روند. قابلیت آشکار شدن هدف توسط رادار با استفاده از توان سیگنال منعکس شده از آن تعیین می‌شود. این امر به شکل و اندازه هدف بستگی دارد و این دو پارامتر تعیین کننده سطح مقطع رادار هستند. بنابراین با کاهش سطح مقطع رادار، قابلیت آشکار شدن هدف نیز کاهش خواهد یافت [۱].

از جمله روش‌های کاهش انعکاس موج رادار از روی سطوح، استفاده از پوشش‌های جاذب امواج رادار بر روی آنها می‌باشد. اولین موادی که به‌عنوان مواد جاذب رادار معرفی شدند، ترکیباتی از قبیل پودر آهن و فیبرهای کربنی بودند که همگی معایبی از جمله بزرگی ضخامت تطبیق داشتند. در سال ۱۹۹۰ میلادی شخصی به نام "ندکف ۳ " از روسیه، ماده مرکب جاذبی با

زمینه پلیمری و پر کننده‌هایی از جنس فریت تهیه کرد. تولید این مواد مرکب جاذب نقطه عطفی در زمینه ساخت جاذب‌های امواج مایکروویو بوده است. این جاذب‌ها علاوه بر دارا بودن پهنای باند جذبی مطلوب، ضخامت تطبیق بسیار کمتری نسبت به جاذب‌های ساخته شده تا آن زمان داشتند [۱].

۱-۱- سطح مقطع راداری

سطح مقطع راداری یک هدف، سطحی فرضی است که سیگنال‌های دریافتی از رادار را با هر توانی بطور مساوی در همه جهت‌ها بازتاب نماید. سطح مقطع راداری اندازهگیری قدرت پراکنده شدن از یک هدف به یک جهت خاص است .در مورد رادارهای مونواستاتیک، که در آن از یک آنتن برای فرستادن و دریافت کردن موج‌های الکترومغناطیسی استفاده می‌شود، سطح مقطع راداری اندازهگیری موج برخوردی برگشتی از هدف است [۱]. حداکثر محدوده تشخیص، در ارتباط با سطح مقطع راداری

معادله (۱) بیان دیگر از معادله اولیه رادار برای بدست آوردن حداکثر محدوده تشخیص می‌باشد که به صورت زیر است:

معادله (۱)

$$R_{max} = [\frac{P_T G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 K T_0 B F L (SNR)_{min}}]^{\frac{1}{4}}$$

که در این معادله:

R_{max} :حداکثر محدوده تشخیص

P_T : اوج قدرت

G: بهره‌ی تقویت آنتن فرستنده و گیرنده

λ: طول موج فرکانس رادار

σ : سطح مقطع رادار تارگت

K: ثابت بولتزمن

T_0 :دمای رادار(بر حسب کلوین)

B: پهنای باند رادار

F: شماتیک نویز گیرندهی رادار

L: تلفات رادار

$(SNR)_{min}$: آستانه رادار برای تشخیص

همانطور که در معادله بالا دیده می‌شود، فاصله تشخیص با ریشه چهارم سطح مقطع راداری متناسب است و از آنجایی که تنها عاملی که می‌تواند توسط یک طراح تجهیزات از قبیل هواپیما تغییر کند، سطح مقطع راداری است، پس از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. طراح باید مراقب باشد چرا که تنها با تغییر بزرگ و چشمگیر در سطح مقطع راداری، به نتایج مطلوب می‌رسد [۲].

۱-۲- تکنیک‌های کاهش سطح مقطع

چهار روش کلی به منظور کاهش سطح مقطع راداری وجود دارد که عبارتند از :شکل‌دهی، مواد جاذب راداری، حذف غیرفعال و حذف فعال.

کاهش سطح مقطع راداری یک روش مطالعه سبک و سنگین کردن است، بطوری که در آن رویکرد سیستم مهندسی باید اعمال شود و مزایای آنها در تعادل با معایب باشد و در حالت بهینه قرار بگیرد. در یک طراحی مهندسی معمولا از چند روش کاهش سطح مقطع راداری برای بدست آوردن نتایج مطلوب، به طور همزمان استفاده می‌شود. در بعضی طراحی‌ها برای مثال

استفاده از تکنیک شکل‌دادن برای کاهش سطح مقطع راداری کافی نبوده و نتیجه مطلوبی به ما نمی‌دهد، برای همین منظور از مواد جاذب رادار در کنار تکنیک شکلدادن استفاده می‌شود. از طرفی هم استفاده از مواد جاذب رادار بدون شکل‌دادن هم موجب مشکلاتی از قبیل: بالارفتن هزینه، افزایش وزن و ...می‌شود، که نامطلوب است [۳].

۱-۲- رنگدانه‌های اکسید آهن

با پیشرفت تکنولوژی و افزایش استفاده از سیستم‌های راداری در نظامی و غیرنظامی، نیاز به توسعه مواد و پوشش‌های ضد رادار به شدت احساس می‌شود. رنگ‌های ضد رادار می‌توانند به کاهش قابلیت شناسایی اشیاء کمک کرده و در نتیجه امنیت و پنهان‌کاری را افزایش دهند. رنگ‌های مایع ترکیبی از اجزاء مختلف هستند که به منظور دستیابی به فام، الگو، مقاومت به خوردگی، رادار گریزی و استتار، زیبایی بخشی و ... بر روی سطوح اعمال می‌گردند. انتخاب اجزاء مناسب برای رنگ از جمله

عوامل تعیین‌کننده خواص آن می‌باشد. به‌طور کلی این اجزا شامل رزین، رنگدانه، حلال و افزودنی‌ها می‌باشد. رزین و رنگدانه اجزای اصلی رنگ را تشکیل می‌دهند. که از عمده‌ترین وظیفه آنها افزایش مقاومت به خوردگی زیر لایه می‌باشد [۵و۴]. رنگدانه ها ذرات ریز و رنگی هستند که به مواد مختلف مانند پلاستیک، پلیمر، کامپوزیت و... اضافه می‌شوند تا به آنها رنگ و زیبایی ببخشند. این ذرات، دنیای وسیعی از تنوع و کاربرد را به روی محصولات پلیمیری گشوده و نقش مهمی در کیفیت، زیبایی و عملکرد آنها ایفا می کنند. رنگدانه‌های اکسید آهن از زرد، قرمز، قهوه‌ای و سبز تا سیاه متغیر است. رنگدانه‌های اکسید آهن غیر سمی هستند و اندازه ذرات نانومتری دارند که آنها را برای استفاده به‌عنوان رنگدانه ایده آل می‌کند [۴]. سنتز رنگدانه‌های اکسید آهن باعث می‌شود آنها برای به‌دست آوردن رنگ‌های تکرار شونده هزینه کمتری داشته باشند. اکسیدهای آهن به‌طور گسترده با عنوان رنگدانه‌های معدنی طبیعی شناخته می‌شوند [۶].

یکی از کاربردهای اصلی پیگمنت های اکسید آهن به‌عنوان پوشش‌های ضد راداری است. فیسلی و همکاران [۷]، خاصیت جذب مغناطیسی کامپوزیت اکسید آهن/ تیتانیا را بررسی کردند. سطح ویژه، حجم منافذ کل و حجم منفذ BJH نمونه با افزایش محتوای اکسید آهن در کامپوزیت افزایش یافت. همچنین خاصیت جذب مغناطیسی با افزایش مقدار اکسید آهن افزایش یافته است. رنگ‌های مقاوم در برابر امواج مغناطیسی از ماده دی‌الکتریک تشکیل شده‌اند که همان ماده گرافیت است.

روزانه مقادیر قابل توجهی از مواد زائد جامد مانند گرد و غبار دودکش کوره بلند (BF) ، سرباره و لجن از کارخانه‌های آهن و فولاد در طول تولید فولاد تولید می‌شود[۹و۸]. میزان و ترکیب گرد و غبار دودکش در آزمایش مطالعات مرتبط به دست آمده است که در جدول ۱نشان داده شده است.[۱۰]

جدول۱: ترکیب شیمیایی گرد و غبار دودکش BF [۱۰]

Component	%
Fe_2O_3	43.38
FeO	20.37
C	16.25
Alkalis	13.38
S	0.37
P	0.02
CaO	2.06
MgO	0.26
Si_2O	2.82
Al_2O_3	0.68
K_2O	0.04
Na_2O	0.14

بازیافت این زباله‌ها نه تنها می‌تواند آلودگی را کاهش دهد و از محیط زیست محافظت کند، بلکه امکان استفاده مجدد از آنها را نیز فراهم می‌کند. امروزه ضایعات صنایع آهن و فولاد عمدتا به‌عنوان خوراک کوره‌های زینتر، کوره بلند و اکسیژن پایه، سرامیک قرمز، شیشه سرامیک، اکسید آهن بازیافت می‌شوند. گرد و غبار دودکش از شرکت تجارت آهن و فولاد تیانجین دارای

محتوای آهن بالایی است که عمدتا به شکل Fe_2O_3 و FeO است. میل اسکیل اغلب در فولاد خام وجود دارد و اغلب با یک پرایمر آبی رنگ اشتباه گرفته می‌شود [۱۰].

اکسید آهن ترکیب شیمیایی از آهن و اکسیژن است که در حدود ۱۶ نوع اکسید آهن و اکسی هیدروکسید می‌توان یافت. مگنتیت یک ماده معدنی است که جزء اصلی آن اکسید آهن بوده و حاوی مقادیر مساوی آهن (II) و آهن (III) است. فرمول تجربی آن Fe_3O_4 است و نام شیمیایی آیوپاک آن به صورت اکسید آهن (II, III) بیان می شود.این محصول کاربردهای زیادی در صنایع مختلف دارد که دو نوع معدنی و سنتزی آن، هرکدام با توجه به ساختار خود در رنگ‌های مختلفی تولید می‌شوند. به‌منظور استفاده کامل از آهن، یک روش ساده برای تهیه رنگدانه اکسید آهن سیاه به اندازه نانومتر Fe_3O_4، مگنتیت ایجاد شده که به‌طور بالقوه می‌تواند برای محیط زیست و جامعه مفید باشد. رنگدانه اکسید آهن سیاه در کاربردهای مختلفی مانند مصالح ساختمانی، رنگ‌ها، پوشش‌ها، مغناطیسی مورد استفاده قرار می‌گیرد که دلیل آن مزایای آن مانند غیر سمی بودن، پایداری شیمیایی، استحکام رنگی بالا، قدرت پنهان کردن، دوام طولانی و هزینه کم است. در این پژوهش از اکسید آهن بازیافتی استفاده شده است و دلیل آن نیز، قیمت ارزان، حلال مشکلات زیستی و مقاوم در برابر خوردگی می‌باشد[۱۲و۱۱].

۱-۳- کاربرد های نانوذرات Fe_3O_4

به دلیل ویژگی‌های ممتاز، نانوذرات مگنتیت در حوزه‌هایی نظیر طراحی کاتالیست برای واکنش‌های آلی، تصفیه‌ی آب و پساب از آلاینده‌هایی همچون فلزات سنگین و رنگ‌ها، تصویربرداری از بافت تومور، دارورسانی هدفمند و... مورد استفاده قرار گرفته اند. امروزه تحقیقات گسترده‌ای برروی کاربرد نانوذرات مگنتیت در زمینه‌ی پزشکی در حال انجام است؛ زیرا نانوذرات مگنتیت سمیت چندانی برای بافت‌های بدن ندارند و هم‌چنین می‌توانند در تشخیص و درمان بیماری سرطان مورد استفاده قرار گیرند. نانوذرات مگنتیت که از یک هسته معدنی اکسید آهن زیست سازگار تشکیل شده‌اند، به‌وسیله‌ی سلول‌ها و با استفاده از مسیرهای بیوشیمی نرمال قابل بازیابی هستند. به دلیل ویژگی‌های منحصر به‌فرد نانوذرات مگنتیت، نظیر توانایی پاسخ گویی به میدان مغناطیسی خارجی و نیز نسبت سطح به حجم بالا توجهات بسیاری را برای امکان سنجی کاربردشان در بسیاری از حوزه‌ها نظیر دارورسانی هدفمند، تصویربرداری سلولی، طراحی کاتالیزور برای واکنش‌های آلی و تصفیه آب و پساب به خود جلب کرده‌اند. سایر کاربردهای تخصصی این نانوذرات عبارتست از: دارو رسانی هدفمند

سمیت پایین و زیست سازگاری بالای نانوذرات مگنتیت منجر به گسترش کاربرد نانوذرات مگنتیت در دارورسانی هدفمند شده است. با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی نانوذرات می‌توانند به بافت مورد نظر هدایت شده و دارو را در محل هدف آزاد کنند. انتقال هدفمند دارو منجر به کاهش اثرات جانبی دارو به بافت‌های سالم اطراف شده همچنین دوز داروی مورد نیاز را کاهش می‌دهد. برای افزایش زیست سازگاری نانوذرات مگنتیت جهت استفاده در حوزه دارورسانی، نانوذرات مگنتیت به‌وسیله‌ی پوشش‌های آلی یا معدنی اصلاح می‌شوند. پوشش نانوذرات مگنتیت با ترکیب مناسب می‌تواند بارگذاری، تحویل دارو و نیز آزادسازی آن را کنترل کند. علاوه‌براین پوشش‌های مناسب می‌توانند از سمیت نانوذره کاسته و منجر به افزایش زیست سازگاری آن شوند. داروهای سرطانی زیادی از طریق برهمکنش‌های مختلف برروی حامل دارویی مغناطیسی بارگزاری

شده‌اند. پوشش نانوذرات مگنتیت با پلیمرها یک روش ایده‌آل در دارورسانی است؛ زیرا علاوه بر کاهش سمیت حامل، از لخته شدن نانوذرات مگنتیت نیز جلوگیری می‌کند.

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- مواد مورد استفاده

مواد مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از: هیدروکلریک اسید، ساخت شرکت شیمی دارویی نوترون و با فرمول شیمیایی HCL ۳۷٪ و جرم مولکولی $36/46\ g/mol$ ، سدیم هیدروکسید، ساخت شرکت نوترون با فرمول شیمیایی NaOH و با جرم مولکولی $40\ g/mol$ به‌عنوان عاملی برای تنظیم pH، آب مقطر فوق خالص از شرکت آذین و کاغذ صافی با گرید ۴۲ از شرکت واتمن.

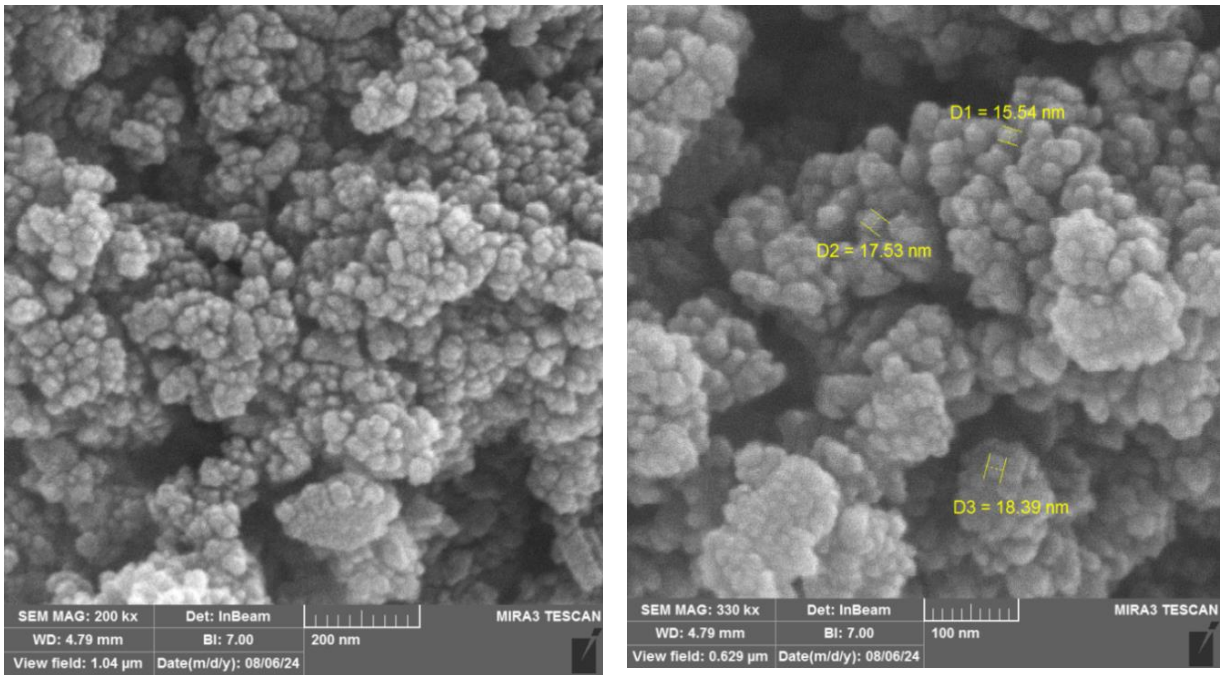
در این پژوهش، از میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM، با نام تجاری TESCAN جهت بررسی اندازه ذرات و مورفولوژی آن استفاده شده است. آنالیز EDX نیز با ابزار مستقر روی همان میکروسکوپ و با نام تجاری MIRA3 جهت انجام انالیز شیمیایی استفاده شده است.

۲-۲- سنتز نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن Fe_3O_4

نانوذرات مغناطیسی توسط روش همرسوبی شیمیایی تهیه شدند. ابتدا در داخل یکی از بشرها به مقدار ۱۵۰ میلی‌لیتر اسید هیدروکلریک ریخته و روی همزن مغناطیسی و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، پودر Fe_3O_4 که از مرحله بازیافت فرآیند شکل دهی فولاد به‌دست آمده را اضافه می شود تا در داخل اسید به آرامی حل شود. سپس در مرحله صاف کردن مواد حل نشده جدا شده و محلول باقی مانده توسط محلول هیدروکسید سدیم ۱ مولار خنثی شده است. در مرحله خنثی سازی، نانوذرات اکسید اهن رسوب می یابد. بعد از این مرحله عملیات صاف کردن و جداسازی پودر از محلول انجام گرفته است. این ماده‌ی جمع شده توسط کوره به مدت ۱ ساعت و در دمای ۱۱۰ سانتی‌گراد خشک می‌شود تا پودر اصلی به دست آید.

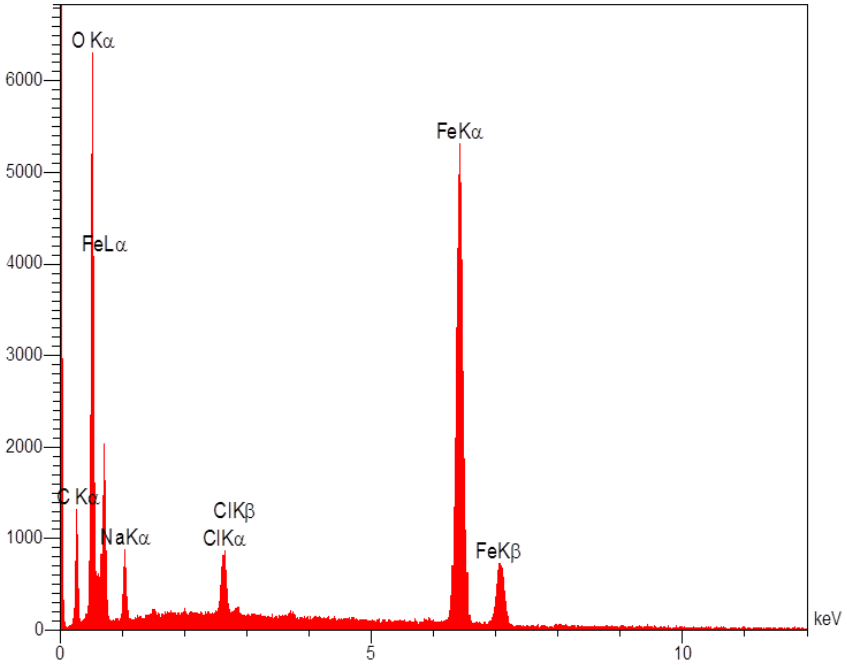
۳- نتایج و بحث

در مرحله‌ی اول نانوذرات مغناطیسی سنتز شده، جهت تعیین مورفولوژی سطح و تخمین اندازه ذرات در ابعاد نانو توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی و تجزیه قرار گرفتند. تصاویر SEM نانوذرات سنتز شده در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به تصاویر، نانوذرات از گستره توزیع مناسبی برخوردارند. اندازه ذرات نانومتری بوده و در محدوده ۲۰ نانومتر است. مورفولوژی سطحی نانوذرات در شکل نشان می‌دهد که نانوذرات تمایل به تجمع و گلوله‌ای شدن را دارند. این ویژگی می‌تواند ناشی از خواص مغناطیسی و ریز بودن این نانو ذرات باشد. شکل نانوذرات تهیه شده کروی است. علاوه بر این، با توجه به نیروی قوی واندر والس و جاذبه‌ی مغناطیسی در بین نانوذرات Fe_3O_4 ، برخی از تجمعات در نمونه تشخیص داده می‌شود.



شکل ۱: تصاویر SEM مربوط به نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4

طیف سنجی اشعه ایکس پراکنده انرژی (EDX) برای نانوذرات Fe_3O_4 در شکل ۲ نشان داده شده است. فقط دو قله در طیف برای اکسیژن و آهن ظاهر شده است که وجود عناصر اکسیژن، آهن، کربن و سدیم را در نانوذره سنتز شده تایید می‌کند. وجود عنصر سدیم نیز به‌دلیل عدم شستشوی مناسب است. وجود عنصر کربن به‌عنوان یک ماده دی‌الکتریک مورد نیاز برای مقاومت در برابر امواج مغناطیسی بسیار مفید است که در ساختار پودر تهیه شده دیده می‌شود. پس با هزینه کم و فرآیند عملیاتی کوتاه می‌توان به این ماده و پوشش ارزشمند دست یافت.



شکل ۲: طیف سنجی اشعه ایکس پراکنده انرژی (EDX) برای نانوذرات Fe_3O_4

۴- نتیجه‌گیری

پودر نانواکسیدآهن از نوع مگنتیت به روش شیمیایی از طریق انحلال در محلول اسید هیدروکلریک اسید، پودر حاصل از بازیافت فرآیند شکل دهی فولاد با موفقعیت سنتز شد. نانوذرات سنتز شده برای بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی توسط آنالیز SEM وEDX مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج آنالیزها حاکی از آن است که، نانوذرات دارای یکنواختی در اندازه ودانه بوده و اندازه ذرات در حدود ۲۰ نانومتر هستند. با توجه به نتایج تصاویر SEM، مورفولوژی سطحی نانوذرات تمایل به تجمع و گلوله‌ای شدن را دارند. این ویژگی می‌تواند ناشی از خواص مغناطیسی و ریز بودن این نانو ذرات باشد. استفاده از نانوذرات سنتز شده برای تهیه‌ی پوشش های ضدراداری می تواند موفقعیت آمیز باشد.

مراجع

[1] Cadirci, S. (2009) "Rf Stealth (or Low Observable) and Counter- Rf Stealth Technologies: Implications of Counter- Rf Stealth Solutions for Turkish Air Force" Information Sciences, pp. 141.

[2] Steven Loke Yew Kok (2012) Naval Survivability and Susceptibility Reduction Study Surface Ship. Naval Postgraduate School, Monterey, California. Retrieved from http://hdl.handle.net/10945/17404

[3] Cihangir Kemal Yuzcelik (2003) Radar absorbing material designs. Naval Postgraduate School, Monterey, California. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.390.450

[4] M. Javidi (2014) Paint, Inspection, Quality Control and Related Standards. shiraz, iran

[5] Knott, E.F., J.F. Schaeffer, and M.T. Tulley, *Radar cross section*. 2004: SciTech Publishing.

[6] Shen, L., et al., Preparation of nanometer-sized black iron oxide pigment by recycling of blast furnace flue dust. Journal of hazardous Materials, 2010. **177**(1-3): p. 495-500.

[7] Bregar, V., Potential application of composite with ferromagnetic nanoparticles in microwave absorber. IEEE Trans. Magn, 2004. **40**(2004): p. 1679-1684.

[8] Ruan, S., et al., *Microwave absorptive behavior of ZnCo-substituted W-type Ba hexaferrite nanocrystalline composite material.* Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2000. **212**(1-2): p. 175-177.

[9] Vinoy, K. and R. Jha, *Trends in radar absorbing materials technology.* Sadhana, 1995. **20**: p. 815-850.
Jenn, D., *Radar and laser cross section engineering*.

[10] Shen, L., et al., *Preparation of nanometer-sized black iron oxide pigment by recycling of blast furnace flue dust.* Journal of hazardous Materials, 2010. 177(1-3): p. 495-500.

[11] Bansal, R.C., M.-J. Wang, and J. Donnet, *Carbon black.* Science and Technology, 1993. **133**

[12] Lemos, Milena Z., et al. "Synthesis and characterization of iron oxides and their application as inorganic pigments in white paint." *Coloration Technology* 140.5 (2024): 769-781.