Journal of
مجله تحقیقات مواد نانوکامپوزیتی
Nanocomposite Materials Research

Available online: www.jnmr.ir/papers
مجله تحقیقات مواد نانوکامپوزیتی: ۵:۲ (۱۳۸۹) ۴۹-۴۳

سنتز نانوذرات سوپر پارامغناطیسی اکسید آهن به روش رسوب‌دهی شیمیایی و بررسی پارامترهای موثر بر آن

موسی نظری، علی اصغر روحانی و صاحبعلی منافی*

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شاهرود، گروه مهندسی مواد سرامیک، شاهرود، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۸۹/۰۷/۰۴، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۸۹/۱۰/۰۷، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۸۹/۱۱/۲۳

چکیده

در این پژوهش، نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن (مگ‌همایت) با استفاده از روش تک مرحله‌ای رسوب‌دهی شیمیایی تهیه شد. نانوذرات مگ‌همایت با استفاده از نمک‌های کلرید آهن (II) و کلرید آهن (III) و عامل رسوب دهنده آمونیوم تهیه شدند. ساختار و توزیع اندازه ذرات و مورفولوژی سطح این نانوذرات با استفاده از طیف پراش پرتو ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) و همچنین اثرات خاصیت مغناطیسی (VSM) مورد مطالعه قرار گرفت. طیف XRD به وضوح تشکیل فاز مگ‌همایت و عدم وجود هر گونه فاز دیگری به غیر از اکسید آهن را مورد تایید قرار داد. تصاویر TEM توزیع منظمی از اندازه ذرات تشکیل شده را نمایش داد. میانگین اندازه این ذرات ۸ نانومتر گزارش شد. نتایج VSM نانوذرات مگ‌همایت نشان دهنده خاصیت سوپر پارامغناطیسی ذرات بود.

***واژه‌های کلیدی*: نانوذرات مغناطیسی، رسوب‌دهی شیمیایی، اکسید آهن، مگ‌همایت.**

۱- مقدمه

یکی از مهمترین اهداف متولیان و طرفداران محیط زیست، حذف مواد سمی و خطرناک از چرخه طبیعت است. مواد سمی معمولا از اتم‌هایی تشکیل شده‌اند که خود به خود مضر نیستند، بلکه نحوه‌ی اتصال این اتم‌ها به یکدیگر مواد سمی را به وجود می‌آورد. برخی مواد سمی، حاوی عناصر مضری از قبیل جیوه، سرب، آرسنیک و کادمیوم هستند. این عناصر معمولا حین استخراج مواد معدنی مختلف تولید می‌شوند. با بهره‌گیری از دانش و فناوری نانو در فرآیند استخراج، می‌توان از خروج این عناصر از محیط طبیعی آنها (خاک) جلوگیری کرد. رشد روزافزون جمعیت کشورها و فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی از یک سو و رعایت نکردن الزامات زیست‌محیطی از سوی دیگر، سبب شده است تا در چند دهۀ اخیر، مقادیر زیادی از آلاینده‌ها مانند هیدروکربن‌های

* **عهده‌دار مکاتبات:** صاحبعلی منافی

نشانی: شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، گروه فنی و مهندسی

تلفن: ۰۲۷۳-۳۳۹۴۲۸۳، **دورنگار:** ۰۲۷۳-۳۳۹۴۲۸۳، **پست‌الکترونیکی:** ali_manafi2005@yahoo.com

آلی کلردار به واسطهٔ عواملی نظیر دفع نامناسب پساب‌ها و ضایعات مراکز صنعتی و شهری، استفادهٔ وسیع از آفت‌کش‌ها، علف‌کش‌ها به منابع آب‌های زیرزمینی وارد شده و موجب کاهش کیفیت آب شوند. حلال‌های آلی کلردار مثل تتراکلرواتن، تری‌کلرواتن، دی‌کلرواتن و وینیل‌کلراید از جمله رایج‌ترین آلاینده‌ها هستند. ترکیبات آلی کلردار، که بسیار سمی و غیرقابل تجزیهٔ زیستی هستند، جزء شایع‌ترین و متداول‌ترین آلاینده‌های آب‌های زیرزمینی به شمار می‌روند. ترکیبات آلی کلردار ضمن ایجاد اثرات سمی بر دستگاه اعصاب، خاصیت سرطان‌زایی نیز دارند. استفاده از نانوذرات آهن، یک فناوری نوین در احیای ترکیبات سمی کلردار محسوب می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهند که نانوذرات آهن می‌توانند به عنوان عامل احیاکننده و کاتالیزور در سمیت‌زدایی تعداد زیادی از آلاینده‌های محیط‌زیست، مانند حلال‌ها، آفت‌کش‌های آلی کلردار و بی‌فنیل‌های پلی‌کلرید عمل کنند. با کوچک شدن اندازه ذرات آهن در مقیاس نانو، سطح ویژه و در نتیجه فعالیت سطحی ذرات افزایش می‌یابد. فناوری استفاده از نانوذرات آهن در احیای آلاینده‌های کلردار حرکت جدیدی است که نسبت به روشهای قبلی بسیار اقتصادی‌تر و کارآمدتر است.

نانوذرات مغناطیسی به دلیل پتانسیل کاربردی بالا از قبیل کاتالیست، منبع ذخیره داده‌های مغناطیسی، فروفلویدها و دستگاه‌های اسپین الکترونیکی، سنسورها و دستگاه‌های دیگر توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. از جمله کاربردهای بسیار متنوع این نانوذرات سوپرمغناطیس، می‌توان به استفاده از آنها به عنوان حامل‌های دارو در پزشکی، رنگ‌دانه، انواع کاتالیزورها، تهیه وسایل الکترونیکی، سرامیک‌ها، ضبط کننده‌های مغناطیسی، فرآیند ذخیره‌سازی اطلاعات در حافظه‌های مغناطیسی و جوهرهای چاپ اشاره کرد [۳-۱].

به دلیل جذابیت و اهمیت فوق‌العاده‌ی این نانوذرات و قابلیت کاربرد بسیار بالای آنها در زمینه‌های گوناگون علمی و صنعتی، تاکنون تحقیقات فراوانی در جهت یافتن شیوه‌ای مناسب برای ساخت آنها صورت گرفته است و توسعه روشهای ساخت این نانوذرات برای تولید ذراتی با ترکیب و اندازه‌ی معین و توزیع مناسب از محورهای مورد بحث در پژوهش‌های انجام گرفته در سالیان اخیر محسوب می‌شود [۴،۵]. روشهای مختلفی جهت سنتز نانوذرات وجود دارد که از جمله می‌توان به روشهای رسوب‌گذاری شیمیایی فاز بخار (CVD) [۵،۶]، سل-ژل [۷]، تبخیر لیزرپالسی [۸]، روش هیدروترمال [۹،۱۰]، میکرو امولسیون [۱۱] و رسوب‌دهی شیمیایی [۱۱]، که در میان روشهای فوق، رسوب‌دهی شیمیایی ساده‌تر و کم هزینه‌تر و در نتیجه مطلوب‌تر است. هدف از انجام این پژوهش تولید تک مرحله‌ای نانوذرات مگ‌همایت با روش رسوب‌دهی شیمایی می‌باشد.

۲- فعالیت‌های تجربی

در این تحقیق برای سنتز مگ‌همایت، از روش رسوب‌دهی شیمیایی استفاده شد. مواد استفاده شده برای سنتز عبارتند از: آمونیاک (NH_3) ۲۵٪، آهن (II) چهار آبه ($FeCl_2.4H_2O$)، کلرید آهن (III) ($FeCl_3$)، اسید کلریدریک با خلوص ۲۵٪، اتانول و آب مقطر دی‌یونیزه که همگی از شرکت مرک، با خلوص بالا خریداری شدند.

در این تحقیق، کلرید آهن (II) و کلرید آهن (III) را با غلظت‌های متفاوت ۱ و ۲ مولار بوسیله اسید کلریدریک ۲ مولار به حجم رسانده، محلول تهیه شده را با نسبت‌های حجمی متفاوت (۰/۲، ۰/۵ و ۱) با هم مخلوط کرده، حدودا ۱۵ دقیقه به وسیله همزن مغناطیسی مخلوط کرده و آمونیاک با غلظت‌های متفاوت (۰/۸، ۲ و ۳) به صورت قطره قطره به آن اضافه شده، تا اینکه pH مخلوط از حالت اسیدی به حالت قلیایی برسد و سپس یک آهنربای مغناطیسی در بالای مخلوط قرار داده و با مشاهده حالت موجی که نشان از وجود میدان مغناطیسی است همزدن مخلوط و تیتراسیون آمونیاک را قطع کرده و رسوب قهوه‌ای بوسیله کاغذ صافی (فیلتر باند آبی) جمع‌آوری کرده، در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد خشک شد.

ماده سنتز شده با هاون به حالت پودر تبدیل شد. شکل ۱ ترتیب مراحل تهیه پودر را به صورت فلوچارت نشان می‌دهد.

نمونه‌های سنتز شده توسط آنالیز پراش پرتو ایکس (Philips, X, pert-MPD) با طول موج ۱/۵۴ Å بررسی

شد. تغیرات ساختاری پودر با استفاده از طیف‌سنجی مادون قرمز (FT-IR) و در محدوده $4000-500 cm^{-1}$ و با به کارگیری KBr به عنوان استاندارد مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی ریزساختار پودرها و به منظور تعیین اندازه ذرات پودر آنالیز TEM توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری (CM-120 PW6031/10) و نهایتا به منظور تعیین رفتار مغناطیسی پودر سنتز شده از دستگاه VSM (Vibrating Sampl Magnetometer) استفاده شد. میانگین اندازه دانه پودر، بر اساس الگوی پراش اشعه X بوسیله فرمول شرر طبق معادله (۱) تخمین زده می‌شود [۱۱]:

$$D = \frac{0.89\ \lambda}{\beta\ Cos\ \theta} \qquad (۱)$$

که D اندازه کریستالیت‌ها برحسب nm، λ (۰/۱۵۴ nm) طول موج اشعه ایکس برحسب nm، β پهنای بلندترین پیک در نصف ارتفاع برحسب رادیان و θ زاویه تفرق بلندترین پیک برحسب درجه می‌باشند. سینتیک واکنش به صورت زیر می‌باشد.

$$FeCl_3 + 3NH_3 + 3H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 3NH_4Cl \qquad (۲)$$

$$FeCl_2 + 2NH_3 + 2H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + 2NH_4Cl \qquad (۳)$$

۱- در صورت عدم حضور اکسیژن و حلال آب

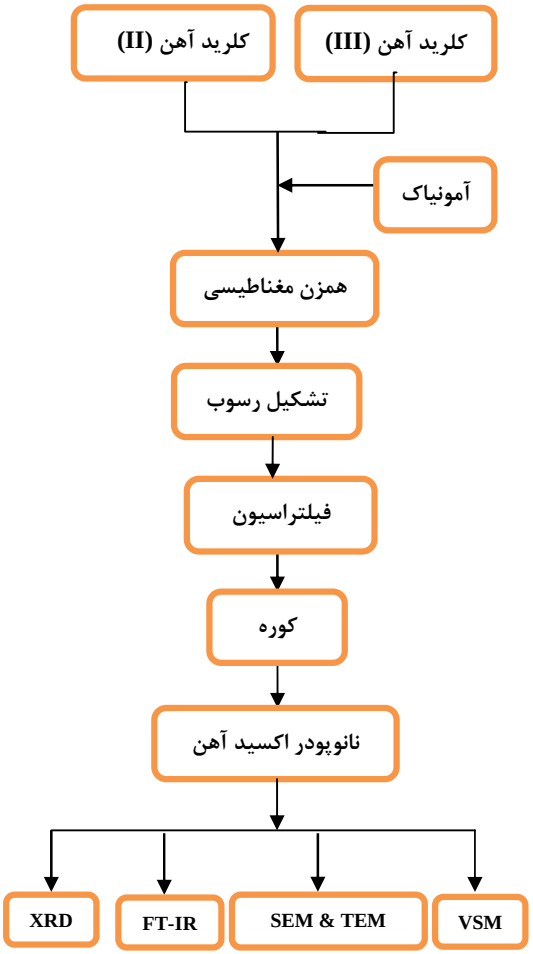
$$2FeOOH + Fe(OH)_2 \rightarrow Fe_3O_4 + 2H_2O \qquad (۴)$$

$$2Fe(OH)_3 + Fe(OH)_2 \rightarrow Fe_3O_4 + 4H_2O \qquad (۵)$$

۲- در صورت حضور اکسیژن و یا حلال آب

$$4Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3 \qquad (۶)$$

$$4Fe(OH)_2 + O_2 \rightarrow 4FeOOH + H_2O \qquad (۷)$$



شکل ۱: دیاگرام تهیه نانوپودرهای اکسید آهن (مگ‌همایت) به روش رسوب‌دهی شیمیایی.

ابتدا کلرید آهن (III) و کلرید آهن (II) با آمونیاک واکنش داده و $Fe(OH)_3$ و $Fe(OH)_2$ تولید شده و سپس محصول تولیدی باهم واکنش داده و مگ‌همایت تولید شده است.

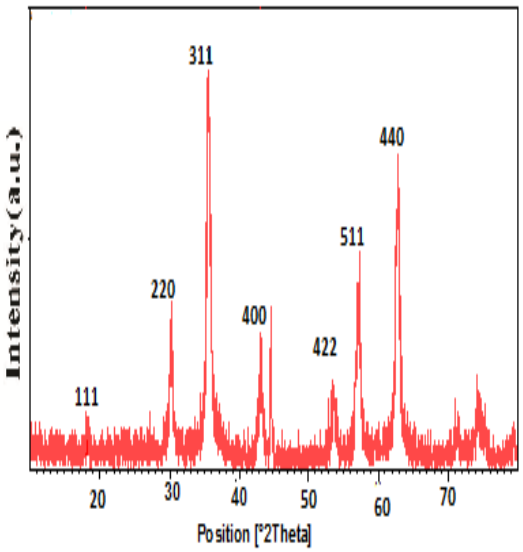
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی تغییرات فازی

جهت آنالیز فازی و تعیین اندازه کریستالیت‌ها از پودر نانو سنتز شده، طیف XRD گرفته شد (شکل ۲). پیک‌های حاصل با پیک‌های استاندارد اکسید آهن نوع مگ‌همایت (JCPDS 39-1346) مطابقت مناسب دارد که نتایج توسط نرم افزار X'Pert HighScore در جدول ۱ ارائه شده است [۱۱].

با بررسی‌های به عمل آمده بـا اسـتفاده از نـرم‌افـزار فـوق مشخص شد تمام پیک‌ها مربوط به فاز مگ‌همایت اکسـید آهن می‌باشد.

بعد از تعیین نوع فاز سنتز شده، با استفاده از رابطـه شـرر میانگین ابعاد کریستال‌های پودر مـگ‌همایـت حـدودا ۱۷ نانومتر بدست آمد. پراش متفاوت پیک‌ها که تطابق سطوح کریستال مربوطه را بیان می‌کند نیز در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: نتایج آنالیز پراش اشعه X (XRD) نانواکسید آهن (مگ‌همایت).

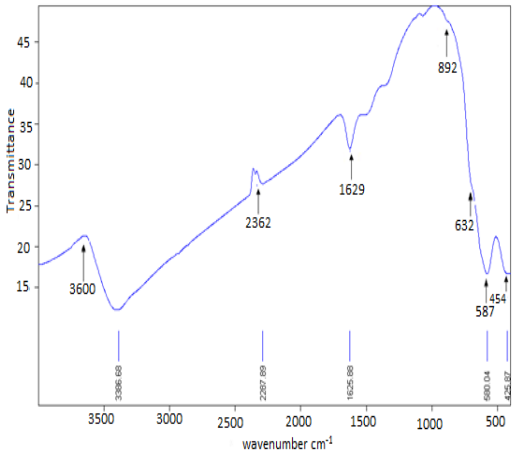
جدول۱: نتایج نرم‌افزار X'Pert HighScore.

Pos. [°2Th]	FWHM [°2Th.]	Tip width [°2Th]	Matched by
۱۸/۱۱	۰/۹۴	۰/۹۶	۰۳۹-۱۳۴۶
۳۰/۲	۰/۴۷	۰/۴۸	۰۳۹-۱۳۴۶
۳۵/۶	۰/۴۷	۰/۴۸	۰۳۹-۱۳۴۶
۴۳/۳	۰/۳۱	۰/۳۲	۰۳۹-۱۳۴۶
۴۴/۷	۰/۱۹۵	۰/۲	۰۳۹-۱۳۴۶
۵۳/۶	۰/۴۷	۰/۴۸	۰۳۹-۱۳۴۶
۵۷/۲	۰/۶۳	۰/۶۴	۰۳۹-۱۳۴۶
۶۲/۸	۰/۵۵	۰/۵۶	۰۳۹-۱۳۴۶
۷۱/۴	۰/۹۴	۰/۹۶	۰۳۹-۱۳۴۶
۷۴/۳	۰/۵۷	۰/۴۸	۰۳۹-۱۳۴۶

۳-۲- بررسی تغییرات ساختاری

شـکل ۳ طیـف FT-IR نـانوذرات مـگ‌همایـت را نشـان می‌دهد. که پیک جذب شده در cm^{-1} ۵۸۷ مربوط به گروه ارتعاشی (γ-FeO) و پیک‌های جذب شـده در cm^{-1} ۴۵۴، ۶۳۲، ۷۹۵ و ۸۹۲ مربوط به مگ‌همایت خالص می‌باشـند. پیک جذب بسیار قوی در cm^{-1} ۳۱۷۰- ۳۶۰۰ ظاهر شـد که مربوط به گروه هیدروکسید (O-H) می‌باشد. همچنـین پیک cm^{-1} ۱۶۲۹ مربـوط بـه گـروه (O-H) آب مـی‌باشـد. وجود یک پیک بسیار ضـعیف در cm^{-1} ۲۳۶۲ مربـوط بـه CO_2 موجود در هوا می‌باشد [۱۵-۱۲].

هیچگونه پیکی که نشان دهنده ناخالصی اعم از گروه‌های کلریدی و آمونیوم در نمونه باشد در طیف FT-IR مشاهده نشد که نشان از سنتز موفق نانوذرات مگ‌همایت است.



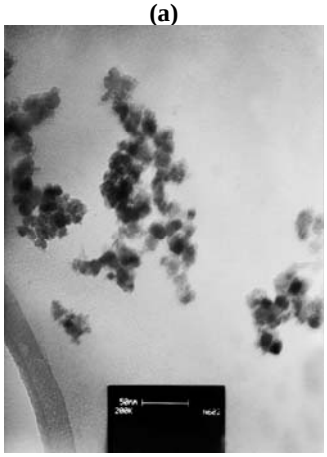
شکل ۳: طیف FT-IR نانوذرات مگ‌همایت آماده‌سازی شده با ۲۰۰ میلی‌گرم پودر KBr.

۳-۳- بررسی ریزساختاری باTEM

شکل ۴a-c تصویر TEM نانوذرات اکسید آهن مگ‌همایـت را نشان می‌دهـد. همـانطور کـه از شـکل مشـخص اسـت نانوذرات مگ‌همایت دارای مورفولوژی کروی است. با توجه به اینکه در روش حاضر قطرات آمونیاک به آهسـتگی وارد محلول کلریدهای آهن می‌شوند و به علت سرعت همـزدن بالا، به سرعت در تمام محلول کلرید آهن پخش می‌شـوند در نتیجه واکنش‌های ترکیب آنها در سطح وسـیعی انجـام شده و علاوه بر این مرکز هسته‌گذاری زیادی تشکیل شده

است، جوانه‌های جامد هیدرواکسید آهن تشکل شده نیز در اثر هم‌زدن شدید با یکدیگر برخورد کرده و شکسته شده‌اند در نتیجه رسوبات به صورت نانومتری تشکیل می‌شود.

(a)

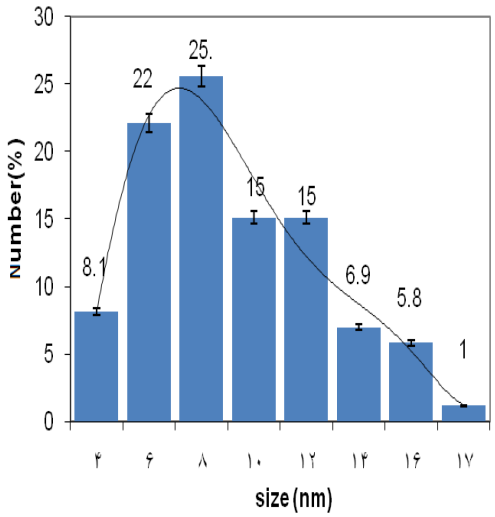


(b)

(c)

شکل ۴: تصاویر TEM از نانوذرات مگ‌همایت a) بزرگنمایی ۱۲۵۰۰۰، b) بزرگنمایی ۱۵۰۰۰۰ و c) بزرگنمایی ۲۶۰۰۰۰.

شکل ۵ نمودار نرمال توزیع دانه‌بندی نانوذرات مگ‌همایت (Image-Pro Express, V4) را نشان می‌دهد. میانگین نانوذرات مگ‌همایت ۸ نانومتر بدست آمد که توافق مناسب با نتایج بدست آمده با آنالیز XRD را دارد. همانطوریکه از نمودار توزیع دانه‌بندی مشاهده می‌شود نمودار توزیع به صورت همگن است که نشان دهنده توزیع خوب و یکنواخت نانوذرات سنتز شده می‌باشد. نتایج حاصل از بررسی میکروسکوپ الکترونی عبوری و همچنین نمودار توزیع دانه‌بندی نانوذرات نشان می‌دهد که میانگین اندازه ذرات ۸ نانومتر بدست آمده و ذرات به شکل کروی می‌باشند. در بررسی میکروسکوپ الکترونی عبوری آماده‌سازی توسط دستگاه التراسونیک انجام شده و ذرات از همدیگر جدا شده در نتیجه شکل نامنظمی که در میکروسکوپ الکترونی روبشی مشاهده شده بر اثر دستگاه التراسونیک از بین رفته و شکل ذرات به شکل واقعی آنها نزدیک‌تر است.



شکل۵: نمودار توزیع دانه‌بندی نانوذرات مگ‌همایت.

با توجه به اینکه ترکیبات آلی کلردار، بسیار سمی و غیرقابل تجزیهٔ زیستی هستند، جزء شایع‌ترین و متداول‌ترین آلاینده‌های آب‌های زیرزمینی به شمار می‌روند. ترکیبات آلی کلردار ضمن ایجاد اثرات سمی بر دستگاه اعصاب، خاصیت سرطان‌زایی نیز دارند. لذا استفاده از نانوذرات اکسید آهن سنتز شده در کار حاضر به عنوان یک کاندیدای مناسب در فناوری نوین در احیای ترکیبات

سمی کلردار می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. تحقیقات نشان می‌دهند، که نانوذرات آهن می‌توانند به عنوان عامل احیاکننده و کاتالیزور در سمیت‌زدایی تعداد زیادی از آلاینده‌های محیط‌زیست، مانند حلال‌ها، آفت‌کش‌های آلی کلردار و بی‌فنیل‌های پلی‌کلرید عمل کنند. با کوچک شدن اندازه ذرات آهن در مقیاس نانو، سطح ویژه و در نتیجه فعالیت سطحی ذرات افزایش می‌یابد. فناوری استفاده از نانوذرات آهن در احیای آلاینده‌های کلردار حرکت جدیدی است که نسبت به روشهای قبلی بسیار اقتصادی‌تر و کارآمدتر است عموما واکنش بین ترکیبات آلی کلردار ($C_xH_yCl_z$) و آهن در محلول آبی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$C_xH_yCl_z + zH^+ + ZFe^0 \leftarrow C_xH_{y+z} + Fe^{2+} + ZCl \qquad (۸)$$

زمانی که اندازهٔ ذرات آهن به مقیاس نانو کاهش می‌یابد تعداد اتم‌هایی که می‌توانند در واکنش درگیر شوند افزایش و در نتیجه سرعت واکنش‌پذیری بیشتر می‌شود. این امر موجب می‌شود که نانوذرات آهن قدرت انتخاب‌پذیری بیشتری نسبت به براده‌های آهن داشته باشند.

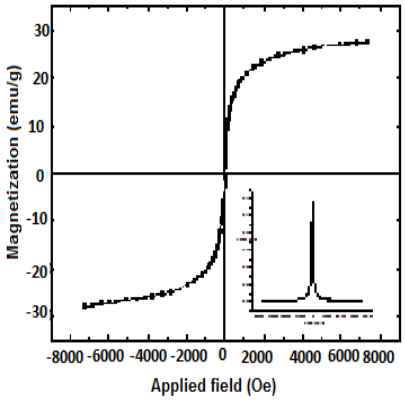
۳-۴- بررسی خاصیت مغناطیسی پودر سنتز شده

شکل ۶ نمودار مغناطیسی نانوذرات مگ‌همایت را که در آن اشباع مغناطیسی در میدان خارجی پایینی برابر ۲۷/۸۵ emu/g اتفاق افتاده است را نشان می‌دهد. تفاوت قابل توجهی با کریستالی‌های توده‌ای مگ‌همایت (۷۳/۵ emu/g) دارد. پسماند مغناطیسی بسیار ناچیزی ۳ Oe که در مقابل میدان ۷۰۰۰ Oe که به آن اعمال شده قابل چشم‌پوشی است.

نتایج نشان داد نانوذرات مگ‌همایت دارای خاصیت سوپر پارامغناطیسی می‌باشند [۱۵،۱۶]. طبق رابطه (۲) می‌توان ماکزیمم اندازه نانوذره را بدست آورد.

$$d_{max} = \left[\frac{18KT\,(dM/dH)_{H=0}}{\pi\rho M_S^{\,2}}\right]^{1/3} \qquad (۲)$$

K: ثابت بولتزمن، (1.38×10^{-16} erg/K)، T: دما (۳۰۰ درجه کلوین)، dM/dH: شیب نزدیک میدان صفر و در شکل (۷) مقدار آن ۰/۰۵ و ρ: دانسیته مگ‌همایت ۴/۸ g/cm^3 و M_S اشباع مغناطیسی، برابر ۲۷/۸۵ emu/g است که براساس این داده‌ها اندازه نانوذره حدود ۱۴ نانومتر است که کمتر از ۲۰ نانومتر و در حوزه مواد سوپر پارامغناطیسی قرار دارد [۱۵،۱۶]. ذرات نانومتری Fe_3O_4 و γ-Fe_2O_3 در دمای اتاق رفتاری سوپر پارامغناطیسی از خود نشان می‌دهند. به عبارت دیگر، آنها تحت یک میدان مغناطیسی تا حد زیادی مغناطیده می‌شوند که این مغناطش دائمی نیست و با حذف میدان از بین می‌رود. به کمک این رفتار مغناطیسی نانوذرات اکسید آهن از طریق حمل عوامل درمانی و تحت اعمال یک میدان مغناطیسی می‌توانند توانایی دارو رسانی را بدون انحراف مسیر در بدن اصلاح کنند. یکی از مهمترین کاربردهای پودر سنتز شده می‌تواند ذخیرهٔ 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 می‌گیرد.



شکل ۶: نمودارمغناطیسی نانوذرات مگ‌همایت.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نانوذرات مگ‌همایت به روش رسوب‌دهی شیمیایی تک مرحله‌ای بدون نیاز به عملیات حرارتی تولید شد. عدم نیاز به حلال آلی، دمای بسیار بالا و یا فرآیند

شیمیایی پیچیده از مزیت‌های این روش بوده که امکان تولید نانوذرات مگ‌همایت را در مقیاس‌های بالا فراهم می‌سازد. خواص نانوذرات با آنالیزهای XRD، FT-IR، TEM و VSM مطالعه شدند. نتایج XRD نشان می‌دهد که در نانوذرات مگ‌همایت سنتز شده همه پیک‌ها را می‌توان با فاز اکسید طبیعی آهن مطابقت داد که دلالت بر خلوص بالای نانوذرات مگ‌همایت بدست آمده دارد. ابعاد ذرات با استفاده از آنالیز XRD حدود ۱۷ نانومتر بدست آمد. ابعاد ذرات بدست آمده با این روش با استفاده از آنالیز TEM، ۸ نانومتر بدست آمد. همچنین نتایج آنالیز FT-IR نشان از خلوص پودر تولیدی داشت. نهایتا نتایج آنالیز VSM نشان داد نانوذرات مگ‌همایت دارای خاصیت سوپر پارامغناطیس مناسب است.

همانطور که در این پژوهش دیده شد روشهای شیمیایی با توجه به در دسترس بودن مواد اولیه و آسانی روش کار یکی از مطلوب‌ترین روشهای سنتز نانوذرات اکسید آهن است. پودر سنتز شده کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف از جمله پزشکی، کاتالیزور، ضبط کننده‌های مغناطیسی، ذخیره‌سازی اطلاعات در حافظه‌های مغناطیس و تصفیه پساب‌های صنعتی را داشته و از نظر اقتصادی بسیار مقرون به صرفه است. روش رسوب‌دهی شیمیایی در عین سادگی روش، بهترین و مطلوب‌ترین نتیجه را می‌دهد.

نتایج مطلوب بدست آمده در این روش مربوط به اندازه، فاز و ساختار مواد سنتز شده می‌باشد که اندازه کریستالیست آن حدود ۸ نانومتر می‌باشد که آنها را در زمره ذرات اکسید آهن سوپر پارامغناطیس فوق‌ریز که قطر ذرات در آنها کمتر از ۵۰ نانومتر است قرار می‌دهد.

مراجع

[1] S.S. Kulkarni, C.D. Lokhande, *Materials Chemistry and Physics*, **82**, 2003, 151.
[2] J.H. Wu, S.P. Liu, H.L. Kim, *Materiales Letters*, **61**, 2007, 3124.
[3] K.H. Choi, S.H. Lee, Y.R. Kim, L. Malkinski, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **310**, 2007, 861.
[4] K. Zhang, M.M.F. Yuen, J.H. Gao, B. Xu, "*Annals of the CIRP*", 2007.
[5] K.R. Reddy, K.P. Lee, A.I. Gopalan, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng*, **320**, 2008, 49.
[6] Y. Zhu, Y. Qian, *Mater. Chem. Phys*., **82**, 2003, 151.
[7] S. Joshi, R. Nawathey, V.N. Koinkar, *J. Appl. Phys*, **64**, 1988, 5647.
[8] Y. Zhao, Y. Wang, *Materials Science Poland*, **25**, 2007, 4.
[9] Q.W. Chen, Y.T. Qian, *Mater. Res. Bull*, **30**, 1995, 443.
[10] A.B. Chin, I.I. Yaacob, *J. Mater. Process. Technol.*, **191**, 2007, 235.
[11] J.H. Wu, S.P. Ko, H.L. Liu, M.H. Jung, J.H. Lee, J.S. Ju, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng*, **313**, 2008, 268.
[12] C.C. Hua, S. Zakaria, R. Farahiyan, L.T. Khong, K.L. Nguyen, M. Abdullah, S. Ahmad, *Sains Malays*, **37**, 2008, 389.
[13] C. He, T. Sasaki, Y. Shimizu, N. Koshizaki, *Appl. Surf. Sci*, **254**, 2008, 2196.
[14] S. Asuha, H.Y. Zhao, Wu, L. Song, O. Tegus, *Journal of Alloys and Compound*, **472**, 2009, 23.
[15] R.M. Cornell, U. Schwertmann, Wiley-VCH, Weinheim, 2003.
[16] U. Meisen, H. Kathrein, *Journal of Imaging Science and Technology*, **44**, 2000 508.