سنتز پودر مغناطيسي $BaFe_{12}O_{19}$ به روش SHS با نسبت مولي Fe/Ba=۹ و بررسي تاثير مقدار آهن بر تركيب فازي محصول

روزبه نيكخواه مشائي[۱] ، سيد علي سيد ابراهيمي*[۲] و ابوالقاسم عطايي[۲]

[۱]دانش آموخته كارشناسي ارشد متالورژي و مواد - پرديس دانشكده هاي فنی- دانشگاه تهران

[۲]دانشيار دانشكده مهندسي متالورژي و مواد - پرديس دانشكده هاي فنی- دانشگاه تهران

(تاريخ دريافت ۸٤/۳/۷، تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ۸٤/۱۱/۱، تاريخ تصويب ۸۵/۱/۲٦)

چكيده

در تحقيق حاضر، پودر مغناطيسي هگزافريت باريم با روش سنتز دماي بالاي خود پيشرو يا SHS[۱] از پودر آهن، اكسيد آهن و نيترات باريم تهيه شد. نسبت مولي Fe/Ba برابر ۹ انتخاب شد و نسبتهاي مختلف آهن و اكسيد آهن مورد استفاده قرار گرفت. آنيل شدن محصولات SHS در محدوده دمايي ۸۵۰ تا ۱۱۵۰ $^{\circ}$C انجام گرديد. ساختار فازي، نوع واكنش‌هاي صورت گرفته طي SHS و آنيل شدن بر اثر تغييرميزان آهن مورد بررسي قرار گرفت. فرآيند SHS در نمونه با نسبت Fe به Fe_2O_3 برابر ۲ داراي سرعت مناسب بوده و بدون توقف پيش رفت و واكنشها بطور كامل انجام شد. الگوي پراش پرتو ايكس نمونه هاي SHS شده حاكي از حضور فازهاي منوفريت باريم، وستيت، مگنتيت و مقدار كمي آهن، هماتيت و هگزا فريت باريم بود. همچنين نتايج آزمايش DTA/TGA نشان‌دهنده تشكيل فاز هگزا فريت باريم در طي يك واكنش گرمازا مي باشد. نتايج نشان داد كه افزايش دماي آنيل سبب پيشرفت واكنش تشكيل هگزافريت باريم شده و ميدان پسماند زداي مغناطيسي و مغناطش اشباع نمونه آنيل شده در دماي ۱۰۵۰ $^{\circ}$C به ترتيب ۱/۸ kOe و ٥٤/۷ emu/g اندازه گيري گرديد. تصوير SEM نيز بلورهاي شش ضلعي هگزا فريت باريم را با ابعاد كمتر از ۲μm در نمونه آنيل شده در دماي ۱۱۵۰ $^{\circ}$C نشان داد.

واژه‌هاي كليدي : سنتز دماي بالاي خود پيشرو - هگزافريت باريم - تركيب فازي

مقدمه

هگزافريت‌هاي نوع M با فرمول شيميايي $(M = Ba, Sr)MO.6Fe_2O_3$ در زمره مواد مغناطيسي دائمي هستند كه به علت ميدان پسماند زداي مغناطيسي بالا و پايداري شيميايي مناسب كاربردهاي متنوعي در محيطهاي ذخيره اطلاعات، صنايع مخابرات، الكترونيك و هوا فضا دارند. روش مرسوم توليد اين آهنرباها مخلوط كردن كربنات باريم (استرانسيم) با اكسيدآهن سه ظرفيتي با نسبت مولي حدود ۱۱= $\frac{Fe}{Ba}$ و كلسينه‌كردن در دماي حدود ۱۱۰۰ $^{\circ}$C و سپس آسياب كردن به منظور رسيدن به اندازه ذرات مناسب براي پرس كردن است كه نمونه هاي پرس شده در دماهاي بالاتر از ۱۲۰۰ $^{\circ}$C سينتر مي شوند [۱]. علاوه بر روش مرسوم از طريق آليا‌ژسازي مكانيكي [۲]، روش هيدروترمال [۳]، روش هم رسوبي [٤]، روش سل – ژل [۵] و سنتز احتراقي هگزافريت‌ها را مي توان تهيه كرد. استفاده از گاز هيدروژن جهت افزايش نيروي وادارندگي مغناطيسي هگزا فريت‌ها نيز گزارش شده است [٦]. روش مرسوم برغم ارزان بودن مواد اوليه و سادگي فرآيند، به لحاظ استفاده از كوره در دو مرحله كلسيناسيون و سينتر كردن و نياز به آسياب كردن طولاني مواد، زمان و انرژي زيادي را نياز دارد. روش سنتز دماي بالاي خود پيشرو كه از سال ۱۹٦۰ جهت توليد سراميك‌ها ابداع شد، مي‌تواند در تهيه هگزافريت‌ها نيز مورد استفاده قرار گيرد و نتيجه اين عمل، حذف مرحله كلسيناسيون است [۷]. نسبت مولي $\frac{Fe}{Ba(Sr)}$ از پارامترهاي بسيار مهم در تهيه هگزافريتها مي‌باشد كه به روش سنتز، شرايط سنتز و نوع مواد اوليه بستگي دارد. انتخاب نسبت بهينه موجب دستيابي به محصول هگزافريت خالص‌تر و به حداقل رسيدن يا حذف فازهاي مياني مانند هماتيت و منوفريت و در نتيجه افزايش مغناطش اشباع مي‌گردد [۸]. طبق تحقيقات Elwin و همكارانش [۹]، در سنتز هگزافريت استرانسيم با روش SHS و با استفاده از مواد اوليه پودر آهن، اكسيد آهن و

* نويسنده مسئول : تلفن: ۸۸۰۱۲۹۹۹ ، فاكس : ۸۸۰۰۶۰۷۶ , Email:saseyyed@ut.ac.ir

پراكسيد استرانسيم نسبت مولي بهينه ۹= $\frac{Fe}{Sr}$ گزارش شده است و همچنين ذكر شده است كه با انتخاب نسبت استوكيومتري ۱۲= $\frac{Fe}{Sr}$، Fe_2O_3 واكنش نداده در محصول باقي مي‌ماند. طبق آزمايشات Parkin و همكارانش [۱۰] در سنتز هگزا فريت باريم (استرانسيم) با روش SHS و با استفاده از مواد اوليه پودر آهن، اكسيد آهن و پراكسيد باريم (استرانسيم) و با انتخاب دماي آنيل ۱۱۵۰° C به مدت ۲ ساعت نسبت مولي بهينه، ۹= $\frac{Fe}{Ba(Sr)}$ گزارش شده است و نيز ذكر شده است كه با انتخاب ۱۲= $\frac{Fe}{Ba(Sr)}$ محصول حاوي Fe_2O_3 واكنش نداده و با انتخاب ٤= $\frac{Fe}{Ba(Sr)}$ محصول حاوي $BaFe_2O_4$ $(SrFe_2O_4)$ خواهد بود. بر اين اساس در اين تحقيق نيز از يون باريم اضافي استفاده و نسبت مولي ۹= $\frac{Fe}{Ba}$ در نظر گرفته شد اما براي اولين بار علاوه بر پودر آهن و اكسيد آهن سه ظرفيتي از نيترات باريم به عنوان منبع تامين يون باريم و نيز عامل اكسيد كننده داخلي در فرآيند SHS جهت توليد هگزافريت باريم استفاده و تاثير مقدار آهن بر مشخصات محصولات بررسي شد. علت استفاده از نيترات باريم آنست كه دماي تجزيه پراكسيد باريم حدود ۸۳۵° C و دماي تجزيه نيترات باريم حدود ٦۰۰° C است[۱۱]، بنابراين انتظار مي رود كه درجه حرارت شروع SHS در حضور نيترات پائين‌تر باشد و فرآيند SHS زودتر آغاز شود. ضمنا مقدار اكسيژن آزاد شده در اثر تجزيه نيترات باريم بيشتر از اكسيژن آزاد شده در اثر تجزيه پراكسيد باريم است و همين موضوع احتمالا سبب افزايش سرعت فرآيند SHS (سرعت بيشتر اكسيداسيون آهن) در حضور نيترات باريم خواهد شد.

روش آزمايش و تجهيزات استفاده شده

در اين تحقيق از پودرهاي Fe ، Fe_2O_3 و $Ba(NO_3)_2$ به ترتيب با خلوص ۹۹/۵، ۹۹و ۹۹ درصد به عنوان مواد اوليه استفاده شد. ابتدا مواد اوليه با نسبت مولي ۹ =Fe/Ba و نسبتهاي مولي $Fe/\ Fe_2O_3$ ذيل در يك هاون از جنس آلومينا با يكديگر مخلوط شده و سپس با استفاده از يك پرس تك محوري به صورت نمونه هاي استوانه اي شكل با قطر ۱۸ mm و ارتفاع ۱۵ mm فشرده گرديدند. ميزان فشار اعمالي كم و فقط در حدي بود كه نمونه فشرده شده، گسيخته نشود.

(A) $Fe/\ Fe_2O_3 = 40/30 = 1.3$

(B) $Fe/\ Fe_2O_3 = 50/25 = 2$

(C) $Fe/\ Fe_2O_3 = 75/12.5 = 6$

جهت شروع واكنش يك فيلامان داغ به بالاي نمونه فشرده شده نزديك شد. سپس محصولات SHS تحت خردايش قرار گرفته و رفتار حرارتي آنها توسط دستگاه DTA /TGA مدل Linseis/L81 با سرعت گرمايش ۱۰ $\frac{°C}{\min}$ و با نمونه مرجع پودر آلومينياي خالص، بررسي شد. پودرهاي SHS شده در محدوده دمايي۸۵۰ تا ۱۱۵۰° C در يك كوره مقاومتي با سرعت گرمايش ۱۰ $\frac{°C}{\min}$ به مدت ۲ ساعت آنيل شدند. تركيب فازي پودرها توسط دستگاه XRD مدل Philips/3710 با استفاده از تشعشع Cukα تعيين شد. مورفولوژي پودرهاي آنيل شده بعد از پوشش‌دهي با طلا با استفاده از يك دستگاه ميكروسكوپ الكتروني روبشي مدل Philips/XL30 مورد مطالعه قرار گرفت. ارزيابي خواص مغناطيسي توسط دستگاه (VSM) [۲] در دانشكده مواد دانشگاه بيرمنگهام انگلستان و در ميدان مغناطيسي با حداكثر شدت ۱٤ kOe انجام شد.

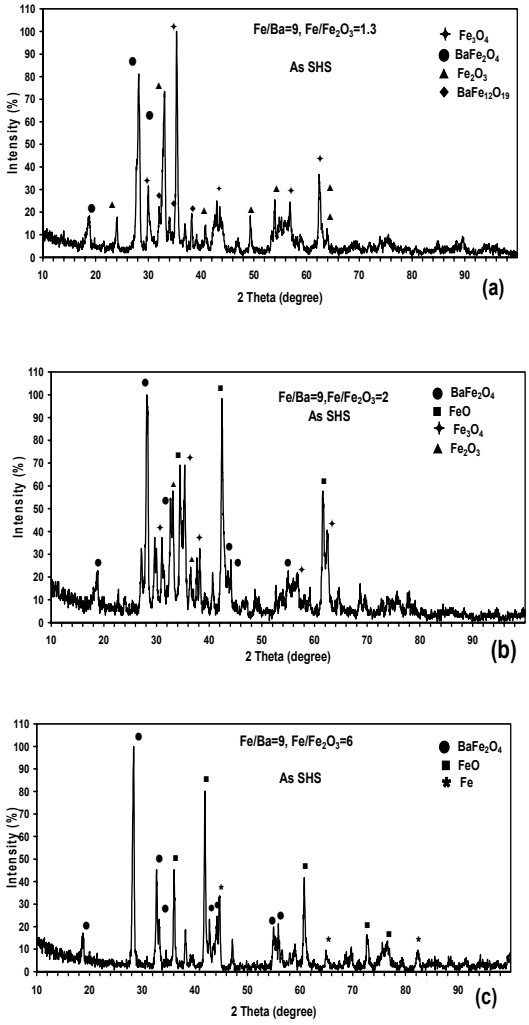
نتايج و بحث

پس از نزديك شدن فيلامان داغ به نمونه فشرده شده واكنش شروع شد و موج سنتز در عرض چند ثانيه از نمونه عبور كرد. ذكر اين نكته لازم است كه فرآيند سنتز با مقادير آهن كمتر از ٤۰ درصد وزني انجام پذير نبود كه به نظر مي رسد علت آن كافي نبودن ميزان سوخت (آهن) جهت شروع واكنش باشد. نتايج حاصل در ذيل مورد بررسي قرار مي گيرد.

بررسي فازي محصول SHS

در شكل (۱) الگوهاي پراش پرتو ايكس نمونه‌هاي(A) ، (B) و (C) بعد از SHS نشان داده شده است. آناليز الگوهاي فوق نشان مي دهد كه نمونه (A) پس از SHS شامل فازهاي مگنتيت، منوفريت، هماتيت و كمي هگزافريت باريم مي‌باشد(شكل(a-۱))، نمونه (B)

شامل فازهاي منوفريت، وستيت، مگنتيت و كمي هماتيت است(شكل(b-۱)) و نمونه (C) شامل فازهاي منوفريت، وستيت و آهن است(شكل(c-۱)).



شكل ۱: الگوهاي پراش پرتو ايكس نمونه هاي SHS شده با نسبتهاي مولي مختلف Fe/Fe_2O_3

a)$Fe/Fe_2O_3 = 1.3$, b)$Fe/Fe_2O_3 = 2$, c)$Fe/Fe_2O_3 = 6$

از نتايج XRD مي‌توان دريافت كه در هر سه نمونه در اثر SHS، نيترات باريم بطور كامل تجزيه شده و اكسيد باريم حاصل از تجزيه نيترات با هماتيت وارد واكنش شده و منوفريت باريم بطور كامل تشكيل گرديده است. همچنين مشاهده مي شود كه بعد از SHS بجز نمونه (C) ، آهن در بقيه نمونه‌ها بطور كامل مصرف شده است، وجود آهن در نمونه (C) بعد از SHS، ناشي از مقدار زياد پودر آهن ($\frac{Fe}{Fe_2O_3} = ٦$) در مخلوط اوليه مي‌باشد كه بطور كامل واكنش نداده و باقي مانده است. حضور وستيت در دماي محيط را مي توان به سرعت بالاي سرمايش نمونه ها از دماهاي بالاتر از $۸۰۰^{\circ}C$ تا دماي محيط مربوط دانست [۱۲].

نكته جالب توجه حضور مقدار كمي فاز هگزافريت باريم در نمونه (A) بعد از SHS است، به نظر مي‌رسد دليل تشكيل هگزافريت در اين نمونه، وجود هماتيت بيشتر در مخلوط اوليه است، بطوريكه بعد از تشكيل منوفريت باريم، با آن وارد واكنش شده و هگزافريت باريم تشكيل داده است. با توجه به اينكه واكنش سنتز خود پيشرو در نمونه (A) به علت وجود آهن كمتر، هم در دماي كمتر و هم با سرعت پايين‌تري صورت مي‌گيرد، زمان كافي براي تشكيل فاز مگنتيت در اين نمونه حاكي از استحاله كامل فاز وستيت به مگنتيت است كه با توجه به طولاني‌تر بودن انجام واكنش سنتز در اين نمونه، توجيه‌پذير به نظر مي‌رسد.

با توجه به نتايجXRD نمونه هاي SHS شده به نظر مي رسد در هر سه نمونه (A)، (B) و(C) در حين SHS دو واكنش ذيل بطور كامل رخ داده است[۱۱و۱]:

در حاليكه:$۰ < x < ۲$:

$$Ba(NO_3)_2 \rightarrow BaO + x\,NO + (2-x)\,NO_2 + \left(\frac{x+1}{2}\right)O_2 \quad (۱)$$

$$BaO + Fe_2O_3 \rightarrow BaFe_2O_4 \quad (۲)$$

اين بدان معني است كه SHS، باعث تجزيه كامل نيترات و تشكيل منوفريت باريم شده است بطوريكه بعد از SHS اثري از نيترات باريم و اكسيد باريم در نمونه‌ها ديده نمي‌شود. براساس نتايج XRD نمونه(B) (شكل(b-۱)) مي‌توان استنباط كرد كه دراين نمونه در حين SHS علاوه بر واكنش‌هاي (۱) و (۲) واكنش‌هاي ذيل نيز انجام شده است [۱۲]:

$$2Fe + O_2 \rightarrow 2FeO \quad (۳)$$

$$6FeO + O_2 \rightarrow 2Fe_3O_4 \quad (۴)$$

$$4Fe_3O_4 + O_2 \rightarrow 6Fe_2O_3 \quad (۵)$$

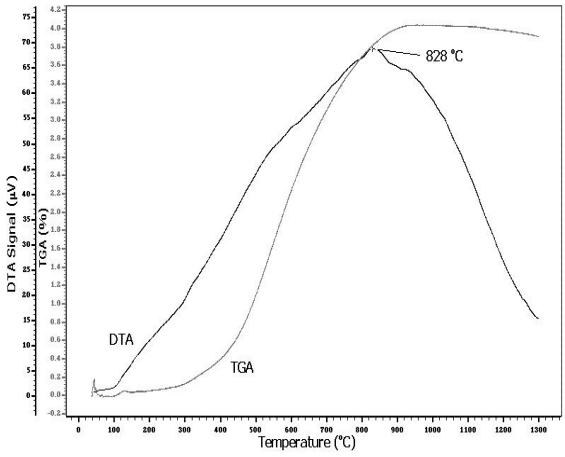
با توجه به مقدار كم فاز هماتيت در نمونه(B) به نظر مي‌رسد در فرآيند SHS فرصت كافي براي انجام واكنش (٥) و تبديل همه فاز مگنتيت به هماتيت مهيا نبوده است.

براساس نتايج XRD در نمونه (C) در حين SHS علاوه بر واكنش‌هاي (١) و (٢) واكنش (٣) نيز رخ داده است. با توجه به سرعت بالاي انجام واكنش سنتز خود پيشرو در نمونه (C) بعلت مقدار زياد پودر آهن به نظر مي‌رسد زمان كافي براي انجام واكنش‌هاي (٤) و (٥) وجود نداشته است (شكل (c-١)) [١٠].

نتايج XRD همچنين نشان مي دهد كه در نمونه (A) (شكل(a-١)) در حين SHS، علاوه بر همه واكنش‌هاي ذكر شده در بالا، واكنش ذيل نيز رخ داده است:

$$BaFe_2O_4 + 5Fe_2O_3 \rightarrow BaFe_{12}O_{19} \quad (۶)$$

با توجه به نتايج مذكور، نمونه (B) به دليل سرعت متوسط واكنش سنتز و عدم توقف فرآيند SHS و نيز مصرف همه آهن موجود در پودر اوليه، جهت آنيل در دماهاي بالاتر انتخاب شد. جهت انتخاب دماهاي آنيل مناسب براي نمونه (B)، آزمايش DTA/TGA انجام شد كه نمودار آن در شكل (٢) نشان داده شده است.



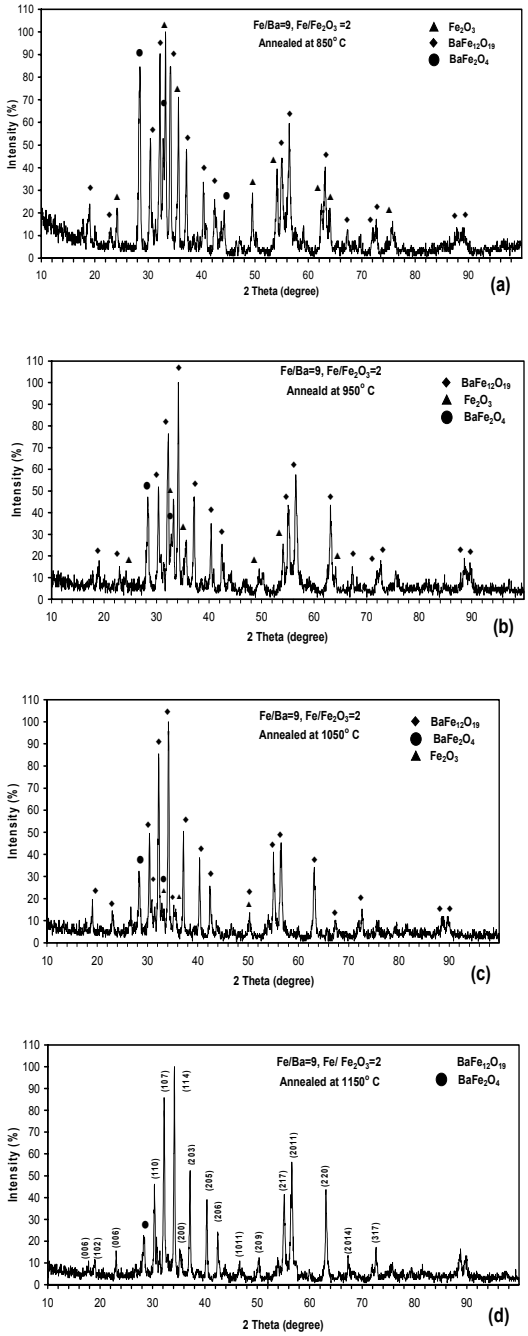
شكل٢: نمودار DTA/TGA نمونه (B) پس از SHS .

همانطور كه در نمودار DTA ملاحظه مي‌شود، يك واكنش گرمازا در دماي ٨٢٨° C رخ داده است. به نظر مي رسد كه در اين دما هماتيت و منوفريت باريم وارد واكنش شده و هگزافريت باريم طي يك واكنش گرمازا تشكيل گرديده است. نمودار TGA نيز در اين دما تغييرات وزني چنداني را نشان نمي دهد كه مطابق با گزارش ديگر محققين مي باشد [١]. به نظر مي رسد كه افزايش وزن حدود چهار درصدي كه در نمودار TGA در محدوده دمايي ٩٠٠° C - ٣٠٠ ملاحظه مي شود به علت دو واكنش اكسيداسيون وستيت به مگنتيت و مگنتيت به هماتيت باشد.

بررسي فازي نمونه ها در طي آنيل شدن

با توجه به نتيجه آناليز حرارتي، تشكيل فاز هگزافريت باريم در دماي بالاتر از ٨٠٠° C اتفاق مي افتد. در شكل(٣) الگوهاي پراش پرتو ايكس نمونه (B) را كه پس از فرآيند SHS در دماهاي ٨٥٠ تا ١١٥٠° C به مدت ٢ ساعت آنيل گرديده، آورده شده است. نتايج نشان مي دهد كه پس از آنيل شدن در دماي ٨٥٠° C فازهاي هماتيت، هگزافريت باريم و منوفريت باريم به عنوان فازهاي اصلي مطرح بوده و اثري از فازهاي وستيت و مگنتيت ديده نمي‌شود (شكل(a-٣)). بنابراين مي‌توان نتيجه گرفت كه در طي آنيل شدن در اين دما علاوه بر انجام واكنش‌هاي تبديل وستيت به مگنتيت و نيز اكسيداسيون مگنتيت به هماتيت، مقدار كمي از هماتيت حاصل نيز با منوفريت باريم وارد واكنش شده و هگزافريت باريم تشكيل شده است. بر اساس شكل(a-٣) فاز غالب در اين نمونه هماتيت مي باشد. نوع فازها با افزايش دماي آنيل شدن از ٨٥٠ تا ٩٥٠° C، تغييري نكرده است ولي درصد وزني فاز هگزافريت باريم افزايش يافته است (شكل(b-٣)). با افزايش دماي آنيل شدن تا ١٠٥٠° C، همانطوري كه در شكل (c-٣) ملاحظه مي‌شود در نوع فازهاي موجود تغييري مشاهده نشد، ليكن شدت پيكهاي مربوط به هماتيت و منوفريت باريم كاهش يافت و به تبع آن مقدار اين دو فاز كاهش پيدا كرد و در نتيجه واكنش تشكيل هگزافريت كامل تر گرديد و هگزافريت بيشتري ايجاد شد. با افزايش دماي آنيل شدن تا ١١٥٠° C، فاز هماتيت حذف و فازهاي نهايي يعني هگزافريت باريم و منوفريت باريم تشكيل گرديدند (شكل (d-٣)).

عدم حذف منوفريت باريم حتي در دماهاي بالاي آنيل شدن مي‌تواند به علت مقدار اضافي باريم در تركيب اوليه باشد كه با توجـــه به فعـــال تر بـودن نيترات باريم نسبت

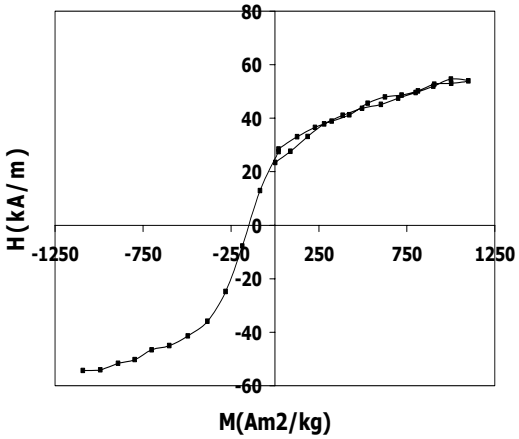


شكل ۳: الگوهاي پراش پرتو ايكس نمونه (B) **پس از** SHS **و آنيل شدن در دماهاي مختلف.**

به كربنات باريم در مقايسه با سنتز به روش مرسوم و نيز نسبت به پراكسيد باريم در سنتز به روش SHS , به نظر مي رسد در اينجا استفاده از يون باريم اضافي ضروري نبوده و احتمالا انتخاب نسبتهاي مولي Fe/Ba بيشتر از ۹ در روش SHS در رسيدن به تك فاز هگزافريت باريم موثر است و تعيين مقدار بهينه آن مي توانـد موضـــوع پژوهش ديگري قرار گيرد.

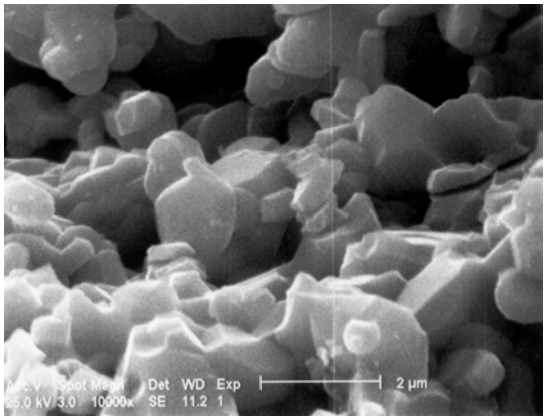
بررسي خواص مغناطيسي و مورفولوژي محصولات

حلقه پسماند مغناطيسي[۳] نمونه (B) پس از آنيل شدن در دماي C ۱۰۵۰° به مدت ۲ ساعت در شكل (٤) آمده است. ميدان پسماند زداي مغناطيسي[٤] و مغناطش اشباع[٥] نمونه فوق به ترتيب kOe ۱/۸ و emu/g ٥٤/۷ است. با توجه به اينكه مغناطش اشباع هگزافريت باريم خالص emu/g ۷۲ است [۱]، بطور تقريبي مي‌توان گفت كه نمونه (B) حاوي ۲٤% فاز ناخالص مي‌باشد و با توجه به نتايج بدست آمده از آناليز فازي، نوع ناخالصي‌ها، هماتيت و منوفريت مي‌باشند.



شكل ٤: حلقه پسماند مغناطيسي نمونه (B) **پس از** SHS **و آنيل شدن در دماي** $^{\circ}C$ **۱۰۵۰ به مدت دو ساعت.**

در شكل (٥) تصويرSEM نمونه (B) پس از آنيل در دماي C ۱۱۵۰° به مدت ۲ ساعت آورده شده است. بلورهاي شش ضلعي هگزافريت باريم با اندازه متوسط كمتر از ۲μm در شكل ملاحظه مي‌شوند.



شكل ٥: تصوير SEM **نمونه** (B) **پس از** SHS **و آنيل در دماي** $^{\circ}C$ **۱۱۵۰ به مدت دو ساعت.**

نتيجه‌گيري

۱- با نزديك كردن يك فيلامان داغ به مخلوط فشرده شده از مواد اوليه پودر آهن، اكسيد آهن و نيترات باريم، واكنش سنتز دماي بالاي خود پيشرو اتفاق مي‌افتد و موج سنتز در عرض چند ثانيه از نمونه عبور مي‌كند. گرماي حاصل از اكسيد شدن آهن به كمك اكسيژن هوا و نيز اكسيژن آزاد شده در اثر تجزيه نيترات باريم كه بعنوان اكسيد كننده داخلي عمل مي‌كند، انرژي لازم جهت ادامه واكنش سنتز را تأمين مي‌كند.

۲- به نظر مي‌رسد انتخاب نسبت ۲= $\frac{Fe}{Fe_2O_3}$ باعث مي‌شود واكنش سنتز دماي بالاي خود پيشرو با يك سرعت مناسب انجام شود، بطوريكه تمام آهن اوليه مصرف مي شود و در عين حال واكنش خود پيشرو نيز بدون توقف ادامه مي يابد.

۳- تركيب فازي محصولات فرآيند SHS براي نمونه حاوی ۲= $\frac{Fe}{Fe_2O_3}$ منوفريت باريم، وستيت، مگنتيت و هماتيت است.

٤- براساس نتايج حاصل، با آنيل كردن محصولات SHS در دماي مناسب مي‌توان به هگزافريت باريم دست يافت، بطوريكه در طي مرحله آنيل شدن وستيت به مگنتيت و مگنتيت به هماتيت تبديل شده و هماتيت پس از انجام واكنش با منو فريت باريم حاصل از SHS به هگزا فريت باريم تبديل مي شود.

۵- مناسب‌ترين دماي آنيل شدن كه فاز هماتيت در آن دما حذف شده است، ۱۱۵۰ $^{\circ}$C است.

٦- با توجه به اينكه در نمونه آنيل شده در دماي ۱۱۵۰ $^{\circ}$C ، حضور مقداري منوفريت باريم مانع از دستيابي به هگزافريت باريم خالص شده است، به نظر مي رسد جهت دستيابي به فاز مغناطيسي خالص از نسبتهاي مولي Fe/Ba بالاتري بايد استفاده كرد.

۷- تصاوير حاصل از ميكروسكوپ الكتروني روبشي، در نمونه(B) پس از آنيل شدن در دماي ۱۱۵۰ $^{\circ}$C به مدت ۲ ساعت در هوا، حاكي از وجود ذرات هگزافريت باريم شش ضلعي با اندازه متوسط كمتر از ۲ ميكرون است.

۸- ميدان پسماند زداي مغناطيسي و مغناطش اشباع نمونه (B) پس از آنيل شدن در دماي ۱۰۵۰ $^{\circ}$C به مدت ۲ ساعت به ترتيب ۱/۸kOe و ٥٤/۷ emu/g است.

تشكر و قدرداني

از معاونت پژوهشي دانشگاه تهران بخاطر پشتيباني مالي از اين تحقيق تشكر و قدرداني مي شود.

مراجع

1 - Stablein, H. (1982). “Hard ferrite and plastoferrite.” *In Ferromagnetic Materilas: A Handbook on Properties of Magnetically Ordered Substances*, edited by Wolfarth (North – Holland, Amsterdam), Vol. 3, Ch. 7, PP.442-602.

2 - Ding, J., Miao, W. F., McCromick, P. G. and Street, R. (1998) “High coercivity ferrite magnets prepared by mechanical alloying.” *J. Alloy and Compounds,* Vol. 281, PP.32-36.

3 - Ataie, A., Harris, I. R and Ponton, C. B. (1995) “Magnetic properties of hydrothermally synthesized strontium hexaferrite as a function of synthesis condition.” *J. Materials science*, Vol. 30, PP.1429 – 1433.

4 - Ataie, A., Heshmati-Manesh, S. and Kazempour, H. (2002) “Synthesis of barium hexaferrite by co – percipitation method using acetate precursor.” *J. Materials Science*, Vol. 37, PP.2125-2128.

5 - Garcia, R. M., Ruiz, E. R. and Rams, E. E. (2001) “Structural characterization of low temperature synthesized $SrFe_{12}O_{19}$.” *Mateials Letters*, Vol. 50, PP.183-187.

6 - Seyyed-Ebrahimi, S. A., Kianvash, A., Ponton, C. B. and Harris, I. R. (2001) “The effect of hydrogen on composition, microstructure and magnetic properties of strontium hexaferrite.” *Ceramics International,* Vol. 26, PP. 379-381.

7 - Yi, H. C. and Moree, J. J. (1990) “Self-propagating high-temperature (combustion) synthesis (SHS) of powder-compacted materials.” *J. Materials Science,* Vol. 25, PP.1159-1168.

8 - Surig, C., Hempel, K. A., and Sauer, Ch. (1996) “Influence of stoichiometry on hexaferrite structure.” *J. Magnetism and Magnetic,* Vol. 157/158, PP.268-269.

9 - Elwin, G., Parkin, I. P., Bui, Q. T., Barquin, L. F., Pankhurst, Q. A., Komarov, A. V. and Morozov, Y. Q. (1997) “Self propagating high hemperature synthesis of $SrFe_{12}O_{19}$ from reaction of strontium superoxide, iron metal and iron oxide powder.” *J. Materials Science Letters*, Vol. 46, PP.1237-1239.

10 - Parkin, I.P., Elwin, G., Komarov, A. V., Bui, Q. T., Pankhurst, Q. A., Barquin, L. F., and Morozov, Y. Q. (1998) “Convenient, low energy routes to hexagonal ferrite $MFe_{12}O_{19}$ (M=Sr, Ba) from SHS reactions of iron, iron oxide and MO_2 in air.” *J. Materials Chemistry,* Vol. 8, No. 3, PP.573-578.

11 - Krick-Othmer, I. (1987). *Encyclopedia of chemical technology*. John Wiley & Sons, Vol. 3, PP.471-472.

12 - Towhidi, N. (2002). *Direct Reduction*, Second Edition, Tehran University Publication.

واژه هاي انگليسي به ترتيب استفاده در متن

1 - Self-propagating High temperature Synthesis
2 - Vibrating Sample Magnetometry
3 - Magnetization Curve
4 - Coercivity
5 - Saturation Magnetization