نشريه دانشكده فني، جلد ۴۰، شماره ۷، بهمن ماه ۱۳۸۵، از صفحه ۹۹۱ تا ۹۹۷

# 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° C انجام گرديد. ساختار فازي، نوع واكنش‌هاي صورت گرفته طي SHS و آنيل شدن بر اثر تغيير ميزان 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° C به ترتيب ۱/۸ kOe و ۵٤/۷ 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° 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 زداى 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 $\frac{Fe}{Ba}$=۱۱ و كلسينه‌كردن در دماي حدود ۱۱۰۰° 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° 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 : ۸۸۰۰٦۰۷٦ ، Email:saseyyed@ut.ac.ir

پراكسيد استرانسيم نسبت مولي بهينه ٩= $\frac{Fe}{Sr}$ گزارش شده است و همچنين ذكر شده است كه با انتخاب نسبت استوكيومتري ١٢= $\frac{Fe}{Sr}$، $Fe_2O_3$ واكنش نداده در محصول باقي مي‌ماند. طبق آزمايشات Parkin و همكارانش [١٠] 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 ١١٥٠° C به مدت ٢ ساعت نسبت مولي بهينه، ٩= $\frac{Fe}{Ba(Sr)}$ گزارش شده است و نيز ذكر شده است كه با انتخاب ١٢= $\frac{Fe}{Ba(Sr)}$ 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 ٩= $\frac{Fe}{Ba}$ 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 ٨٣٥° C و دماي تجزيه نيترات باريم حدود ٦٠٠° C است[١١]، 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 ٩٩/٥، ٩٩و ٩٩ درصد به عنوان مواد اوليه استفاده شد. ابتدا مواد اوليه با نسبت مولي ٩ =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 ١٨ mm و ارتفاع ١٥ 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 TGA/ DTA مدل Linseis/L81 با سرعت گرمايش ١٠ $\frac{^\circ C}{min}$ و با نمونه مرجع پودر آلومیناي خالص، بررسي شد. پودرهاي SHS شده در محدوده دمايي٨٥٠ تا ١١٥٠° C در يك كوره مقاومتي با سرعت گرمايش ١٠ $\frac{^\circ C}{min}$ به مدت ٢ 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)[٢] در دانشكده مواد دانشگاه بيرمنگهام انگلستان و در ميدان مغناطيسي با حداكثر شدت ١٤ kOe انجام شد.

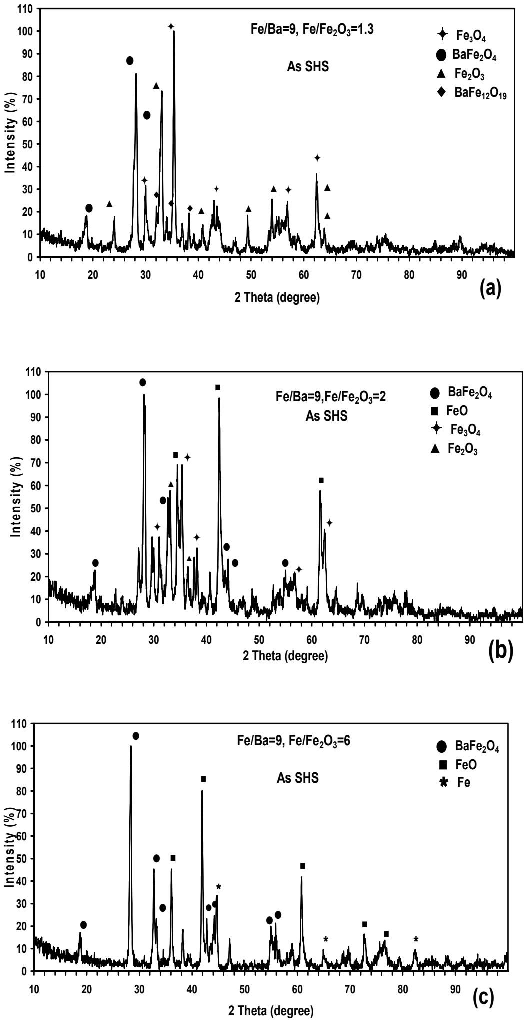
## نتايج و بحث

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 ٤٠ 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 (١) 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-١))، 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 ($\frac{Fe}{Fe_2O_3}=۶$) 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 نتايج XRD 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: $0 < x < 2$:

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

(۱)

$$BaO + Fe_2O_3 \rightarrow BaFe_2O_4$$

(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]:

$$2Fe + O_2 \rightarrow 2FeO$$

(۳)

$$6FeO + O_2 \rightarrow 2Fe_3O_4$$

(۴)

$$4Fe_3O_4 + O_2 \rightarrow 6Fe_2O_3$$

(۵)

با توجه به مقدار کم فاز هماتيت در نمونه(B) به نظر مي‌رسد در فرآيند SHS فرصت کافي براي انجام واکنش (۵) و تبديل همه فاز مگنتيت به هماتيت مهيا نبوده است.

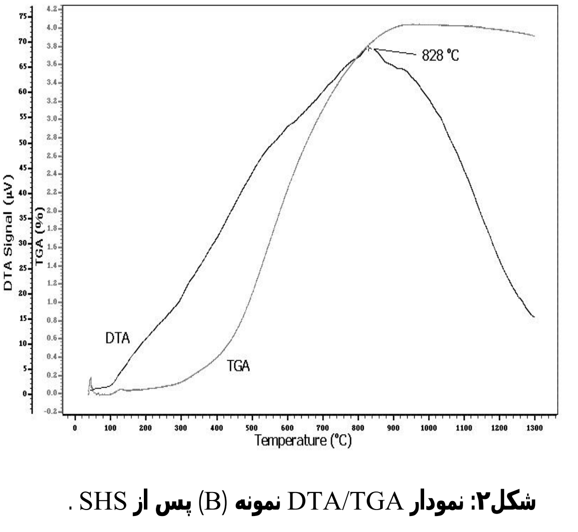
براساس نتايج XRD در نمونه (C) در حين SHS علاوه بر واکنش‌هاي (۱) و (۲) واکنش (۳) نيز رخ داده است. با توجه به سرعت بالاي انجام واکنش سنتز خود پيشرو در نمونه (C) بعلت مقدار زياد پودر آهن به نظر مي‌رسد زمان کافي براي انجام واکنش‌هاي (٤) و (۵) وجود نداشته است (شکل (c-۱)) [۱۰].

نتايج XRD همچنين نشان مي دهد که در نمونه (A) (شکل(a-۱)) در حين SHS، علاوه بر همه واکنش‌هاي ذکر شده در بالا، واکنش ذيل نيز رخ داده است:

$$BaFe_2O_4 + 5Fe_2O_3 \rightarrow BaFe_{12}O_{19}$$

(۶)

با توجه به نتايج مذکور، نمونه (B) به دليل سرعت متوسط واکنش 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 که نمودار آن در شکل (۲) نشان داده شده است.



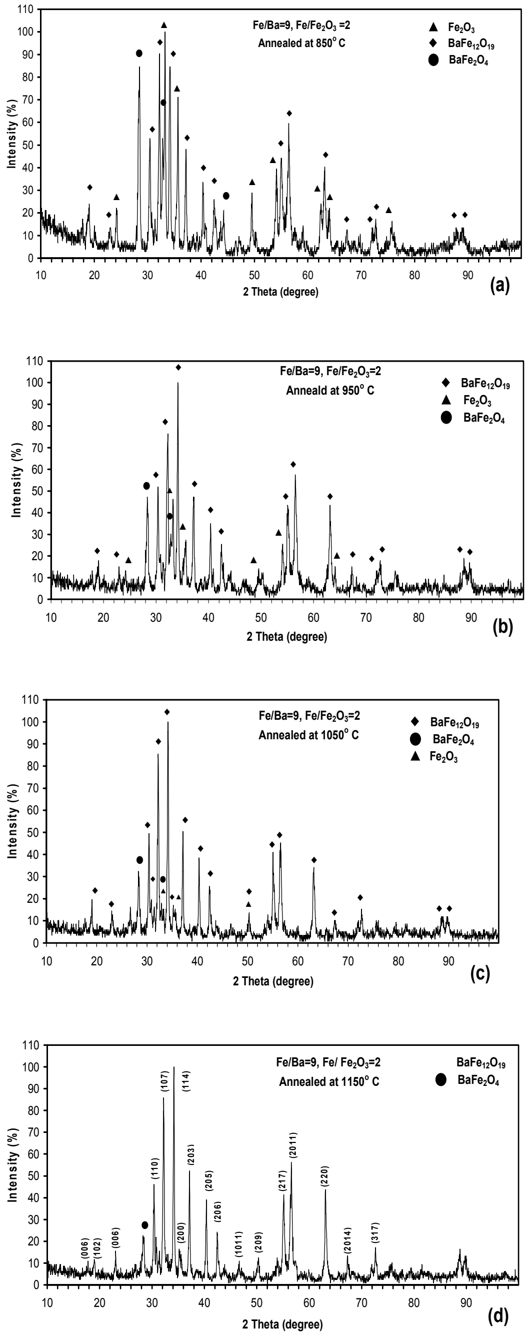
**شکل۲: نمودار** DTA/TGA **نمونه** (B) **پس از** SHS .

همانطور که در نمودار DTA ملاحظه مي‌شود، يك واکنش گرمازا در دماي ۸۲۸° C رخ داده است. به نظر مي رسد که در اين دما هماتيت و منوفريت باريم وارد واکنش شده و هگزافريت باريم طي يك واکنش گرمازا تشکيل گرديده است. نمودار TGA نيز در اين دما تغييرات وزني چنداني را نشان نمي دهد که مطابق با گزارش ديگر محققين مي باشد [۱]. به نظر مي رسد که افزايش وزن حدود چهار درصدي که در نمودار TGA در محدوده دمايي ۹۰۰° C - ۳۰۰ ملاحظه مي شود به علت دو واکنش اکسيداسيون وستيت به مگنتيت و مگنتيت به هماتيت باشد.

## بررسي فازي نمونه ها در طي آنيل شدن

با توجه به نتيجه آناليز حرارتي، تشکيل فاز هگزافريت باريم در دماي بالاتر از ۸۰۰° C اتفاق مي افتد. در شکل(۳) الگوهاي پراش پرتو ايکس نمونه (B) را که پس از فرآيند SHS در دماهاي ۸۵۰ تا ۱۱۵۰° C به مدت ۲ ساعت آنيل گرديده، آورده شده است. نتايج نشان مي دهد که پس از آنيل شدن در دماي ۸۵۰° C فازهاي هماتيت، هگزافريت باريم و منوفريت باريم به عنوان فازهاي اصلي مطرح بوده و اثري از فازهاي وستيت و مگنتيت ديده نمي‌شود (شکل(a-۳)). بنابراين مي‌توان نتيجه گرفت که در طي آنيل شدن در اين دما علاوه بر انجام واکنش‌هاي تبديل وستيت به مگنتيت و نيز اکسيداسيون مگنتيت به هماتيت، مقدار کمي از هماتيت حاصل نيز با منوفريت باريم وارد واکنش شده و هگزافريت باريم تشکيل شده است. بر اساس شکل(a-۳) فاز غالب در اين نمونه هماتيت مي باشد. نوع فازها با افزايش دماي آنيل شدن از ۸۵۰ تا ۹۵۰° C، تغييري نکرده است ولي درصد وزني فاز هگزافريت باريم افزايش يافته است (شکل(b-۳)). با افزايش دماي آنيل شدن تا ۱۰۵۰° C، همانطوري که در شکل (c-۳) ملاحظه مي‌شود در نوع فازهاي موجود تغييري مشاهده نشد، ليکن شدت پيکهاي مربوط به هماتيت و منوفريت باريم کاهش يافت و به تبع آن مقدار اين دو فاز کاهش پيدا کرد و در نتيجه واکنش تشکيل هگزافريت کامل تر گرديد و هگزافريت بيشتري ايجاد شد. با افزايش دماي آنيل شدن تا ۱۱۵۰° C، فاز هماتيت حذف و فازهاي نهايي يعني هگزافريت باريم و منوفريت باريم تشکيل گرديدند (شکل (d-۳)).

عدم حذف منوفريت باريم حتي در دماهاي بالاي آنيل شدن مي‌تواند به علت مقدار اضافي باريم در ترکيب اوليه باشد که با توجه به فعال تر بودن نيترات باريم نسبت

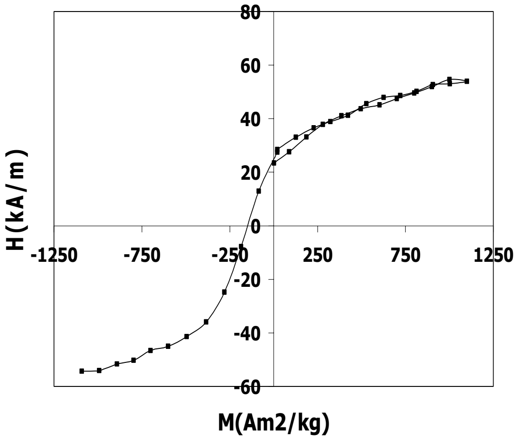


**شکل ۳: الگوهاي پراش پرتو ایکس نمونه (B) پس از SHS و آنیل شدن در دماهاي مختلف.**

به کربنات باریم در مقایسه با سنتز به روش مرسوم و نیز نسبت به پراکسید باریم در سنتز به روش SHS , به نظر مي رسد در اینجا استفاده از یون باریم اضافي ضروري نبوده و احتمالا انتخاب نسبتهاي مولي Fe/Ba بیشتر از ۹ در روش SHS در رسیدن به تك فاز هگزافریت باریم موثر است و تعیین مقدار بهینه آن مي تواند موضوع پژوهش دیگري قرار گیرد.

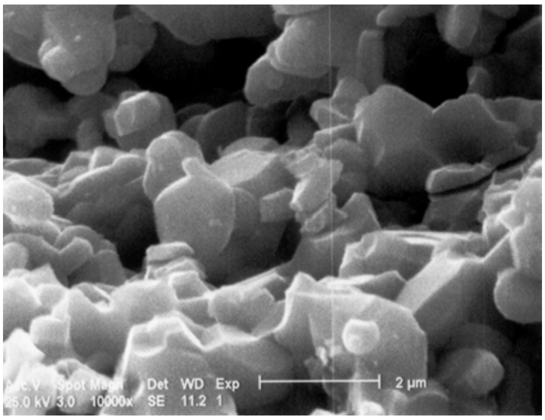
## بررسي خواص مغناطیسي و مورفولوژي محصولات

حلقه پسماند مغناطیسي[3] نمونه (B) پس از آنیل شدن در دماي ۱۰۵۰ °C به مدت ۲ ساعت در شکل (٤) آمده است. میدان پسماند زداي مغناطیسي[4] و مغناطش اشباع[5] نمونه فوق به ترتیب ۱/۸ kOe و ۵٤/۷ emu/g است. با توجه به اینکه مغناطش اشباع هگزافریت باریم خالص ۷۲ emu/g است [۱]، بطور تقریبي مي‌توان گفت که نمونه (B) حاوي ۲٤% فاز ناخالص مي‌باشد و با توجه به نتایج بدست آمده از آنالیز فازي، نوع ناخالصي‌ها، هماتیت و منوفریت مي‌باشند.



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

در شکل (۵) تصویرSEM نمونه (B) پس از آنیل در دماي ۱۱۵۰ °C به مدت ۲ ساعت آورده شده است. بلورهاي شش ضلعي هگزافریت باریم با اندازه متوسط کمتر از ۲μm در شکل ملاحظه مي‌شوند.



**شکل ۵: تصویر SEM نمونه (B) پس از SHS و آنیل 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 $\frac{Fe}{Fe_2O_3}$=۲ 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 $\frac{Fe}{Fe_2O_3}$=۲ 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°C است.

٦- با توجه به اينكه در نمونه آنيل شده در دماي ۱۱۵۰°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°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°C به مدت ۲ ساعت به ترتيب ۱/۸kOe و ۵٤/۷ 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