

## مکانیزم تشکیل بلورهای در حد نانومتر هگزاریت باریم در روش سل-ژل احتراقی

امین مالی و ابوالقاسم عطایی

**چکیده:** ذرات بلوری هگزاریت باریم ( $BaFe_{12}O_{19}$ ) در حد نانومتر در دمای نسبتاً پایین  $700^{\circ}C$  بروش سل-ژل احتراقی و با استفاده از ژل اولیه شامل اسیدسیتریک بعنوان احیا کننده (سوخت) و نیتراهای فلزی بعنوان اکسیدکننده، تهیه شدند. نتایج نشان داد که ژلهای نیترا-سیترا پس از احتراق یک رفتار خودپیشرونده دارند. فرآیند تجزیه حرارتی ژلهای نیترا-سیترا و پودر خام حاصل از احتراق بمنظور مطالعه روند تشکیل فازها با استفاده از روشهای XRD و DTA/TG مورد بررسی قرار گرفت. هگزاریت باریم بر خلاف دیگر فریتها در روش سل-ژل احتراقی بطور مستقیم تشکیل نشد، بلکه بدلیل داشتن ساختار پیچیده بلوری بطور تدریجی از برخی فازهای میانی شکل گرفت. بررسیهای SEM نشان داد که متوسط اندازه ذرات با افزایش دمای کلسیناسیون افزایش می یابد. نتایج اندازه گیری خواص مغناطیسی توسط دستگاه VSM نشان داد که پودر کلسینه شده در  $1000^{\circ}C$  دارای مقادیر بالای وادارندگی مغناطیسی ( $5/1 kOe$ ) و مغناطش اشباع ( $61/2 emu/g$ ) تحت میدان  $14 kOe$  می باشد.

**واژه های کلیدی:** هگزاریت باریم، سل-ژل، مغناطش، کلسیناسیون، احتراق

### ۱. مقدمه

هگزاریت باریم با فرمول شیمیایی  $BaFe_{12}O_{19}$  یک ترکیب تک محوره فری مگنتیک<sup>۱</sup> با ساختار هگزاگونال مگنتوپلامبیت<sup>۲</sup> می باشد که نا همسانگردی و وادارندگی مغناطیسی بالا از مشخصات مهم آن است. علاوه بر این از نظر حرارتی، بالای دمای کیوری خود پایدار بوده و از سختی مکانیکی و مقاومت به خوردگی بالایی برخوردار می باشد. این ویژگیها سبب شده است که این فریتها بعنوان ماده ای مناسب در ساخت هسته های مغناطیسی القاگرها و وسایل انتقال استفاده شوند [1-4]، اما مهمترین مورد استفاده آنها

در محیطهای ذخیره اطلاعات با ظرفیت بالا می باشد [5,6]. ویژگی مهم برای ذرات فریت بکار رفته در این محیطها، اندازه ذرات حدود  $0.5 \mu m$ ، خلوص شیمیایی بالا و توزیع یکنواخت اندازه ذرات می باشد [7]. بمنظور رسیدن به هگزاریت باریم همگن با ذرات بسیار ریز و دوری از فرآیند آسیاکردن روشهای مختلفی شامل هم رسوبی شیمیایی [1]، سل-ژل [6]، سنتز احتراقی [8] و هیدروترمال [9] توسعه یافته اند. مهمترین ویژگی این روشها مخلوط کردن مواد اولیه در مقیاس یونی می باشد، بنابراین بلوری شدن بعدی، می تواند در دمای نسبتاً پایینی رخ دهد و در نهایت پودرهای حاصل، بسیار ریز و همگن، با خلوص بالا و توزیع یکنواخت اندازه ذرات می باشند.

در تحقیق حاضر برای تهیه ذرات در حد نانومتر هگزاریت باریم از روش جدید سل-ژل احتراقی استفاده شده است. این روش ترکیبی بی نظیر از روش سل-ژل و فرآیند احتراق می باشد که نسبت به روش سل-ژل ساده تر و

مقاله در تاریخ ۱۳۸۲/۴/۱۵ دریافت شده و در تاریخ ۱۳۸۳/۳/۲۳ به تصویب نهایی رسیده است.

امین مالی کارشناس ارشد مهندسی متالورژی و مواد،  
amin\_mali@alum.sharif.edu

دکتر ابوالقاسم عطایی دانشیار دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه تهران،  
aataie@ut.ac.ir

### ۳. نتایج و بحث

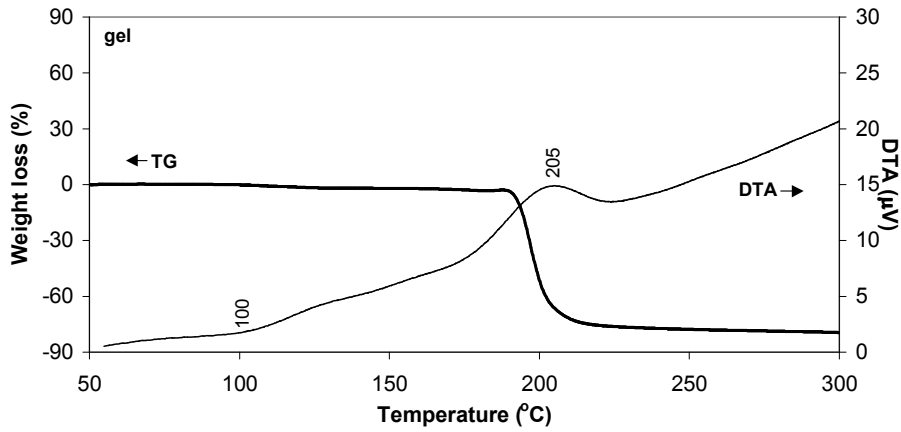
نتایج آزمایشهای انجام شده نشان داد که ژل حاصل از نیترات‌های فلزی و اسیدسیتریک با مشخصات ذکر شده یک رفتار احتراقی خود پیش‌رونده دارد. شکل (۱) نمودارهای DTA/TG مربوط به ژل نیترات-سیترات در محدوده دمایی  $50^{\circ}\text{C}$  تا  $300^{\circ}\text{C}$  را نشان می‌دهد. با افزایش دما بترتیب یک پیک گرماگیر همراه با کاهش وزنی ۴٪ مربوط به خروج گروه‌های نیتروزی نمک‌های فلزی و پروتون خارجی اسیدسیتریک و بخارات آبی در دمای حدود  $100^{\circ}\text{C}$  و یک پیک گرمای شدید با کاهش وزنی حدود ۷۴٪ بدلیل واکنش یونهای نیترات و سیترات در دمای حدود  $205^{\circ}\text{C}$  ظاهر می‌گردد. در واکنش احتراقی، یونهای سیترات بعنوان یک احیاکننده و یونهای نیترات بعنوان یک اکسیدکننده عمل می‌کنند و در نهایت سرعت واکنش اکسید شدن افزایش می‌یابد. دمای پایین به‌همراه سرعت بالای واکنش منجر به یک واکنش احتراقی خودپیش‌رونده با کاهش وزنی زیاد می‌گردد. شکل (۲) نمودارهای DTA/TG مربوط به خاکستر حاصل از احتراق را نشان می‌دهد. در این حالت مجدداً در ابتدا یک پیک گرماگیر با کاهش وزن ناچیز حدود ۰/۲٪ در دمای  $100^{\circ}\text{C}$  بعلت خروج بخارات آبی و بدنبال آن در دمای  $375^{\circ}\text{C}$  یک پیک گرمازا مربوط به تجزیه مواد آلی باقیمانده که در واکنش احتراقی شرکت نکرده‌اند همراه با کاهش وزنی حدود ۴٪ ظاهر می‌گردد. کاهش وزن تا دمای  $760^{\circ}\text{C}$  بدلیل شکستن دیگر باندهای آلی و خروج آنها بصورت دی‌اکسیدکربن ( $\text{CO}_2$ ) یا مونوکسید کربن (CO) ادامه می‌یابد. پس از دمای  $785^{\circ}\text{C}$  کاهش جرم چندانی در منحنی TG دیده نمی‌شود که حاکی از تکمیل واکنشهای تجزیه می‌باشد. پیک گرمازا در دمای  $785^{\circ}\text{C}$  مربوط به تشکیل مونوفریت‌باریم ( $\text{BaFe}_2\text{O}_4$ ) و پیک گرمای بعدی در دمای  $860^{\circ}\text{C}$  مربوط به تشکیل هگزافریت‌باریم ( $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) می‌باشد. به منظور تایید نتایج بدست‌آمده از منحنی‌های DTA/TG از آزمایشات تفرق اشعه ایکس (XRD) برای خاکستر حاصل از احتراق و پودرهای کلسینه شده در دماهای مختلف استفاده شد. همانطور که انتظار می‌رفت الگوی پراش اشعه ایکس ژل، حاکی از حضور ماده آلی آمورف بود.

شکل (۳) الگوهای پراش پرتو ایکس مربوط به خاکستر حاصل از احتراق و پودرهای کلسینه شده در دماهای

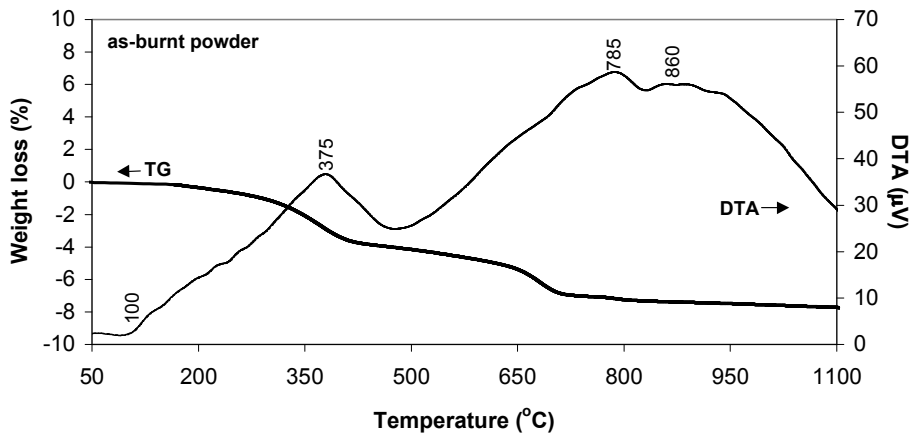
به مواد اولیه ارزانه‌تری نیاز دارد. در این مقاله تهیه پودر هگزافریت‌باریم از این روش، مکانیزم تشکیل آن و در نهایت مشخصات بلوری و خواص مغناطیسی پودرهای تهیه شده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۲. روش تحقیق

نیترات‌باریم، نیترات آهن، اسید سیتریک و آمونیاک با خلوص بسیار بالا (۹۹/۹٪) ساخت کمپانی Merck آلمان بعنوان مواد اولیه برای تهیه هگزافریت‌باریم بکار رفتند. مقادیر مناسب از نیترات آهن، نیترات‌باریم و اسیدسیتریک در آب مقطر حل شدند، بطوریکه نسبت مولی آهن (Fe)، به باریم (Ba)، برابر ۱۱ و نسبت مولی مجموع نیترات‌های فلزی (MN) به اسیدسیتریک (CA) برابر ۱ انتخاب شد. محلول بطور یکنواخت توسط یک همزن مغناطیسی در دمای  $70^{\circ}\text{C}$  بهم زده شد. PH محلول با اضافه کردن تدریجی آمونیاک به ۷ رسانده شد. محلول حاصل (سل)، برای تبدیل شدن به ژل توسط صفحه‌داغ در دمای حدود  $100^{\circ}\text{C}$  حرارت داده شد. پس از تبخیر آب اضافی با بالارفتن دما، انفجار از یک نقطه شروع شد و طی چند ثانیه تمامی ژل را فرا گرفت. خاکستر حاصل از احتراق در دماهای مختلف بمدت یک ساعت در هوا کلسینه شد. آزمایشات آنالیز حرارتی DTA/TG برای ژل خشک شده و خاکستر حاصل از احتراق بترتیب در بازه دمایی  $300-50^{\circ}\text{C}$  و  $1100-50^{\circ}\text{C}$  توسط یک دستگاه آنالیز حرارتی (DTA/TG) نوع LINSEIS مدل L70/2171 با دقت اندازه‌گیری  $0.1 \mu\text{V} \pm$  و  $0.1 \text{mg}$  انجام شد. نرخ گرمایش  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  در هوای ساکن و نمونه استاندارد از پودر آلومینای خالص انتخاب شد. مطالعه و بررسی ریزساختار با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM نوع Cambridge S 360 انجام شد. جهت حصول کیفیت بهتر در تصاویر میکروسکوپی، سطح نمونه‌ها توسط دستگاه پوشش‌دهی از نوع پراکنشی (Sputtering) با لایه‌ای نازک از طلا پوشش داده شد. الگوهای پراش اشعه ایکس پودرهای تهیه شده در بازه  $20-60^{\circ}$   $2\theta$  بوسیله یک دستگاه پراش پرتو ایکس از نوع Philips PW-1730 مجهز به یک تولیدکننده پرتو  $\text{Cu-K}\alpha$  با ولتاژ شتاب‌دهنده  $40 \text{ kV}$ ، بدست آمد. برای محاسبه اندازه متوسط بلوری ذرات از معادله شرر استفاده شد. خواص مغناطیسی پودرهای حاصل با استفاده از دستگاه VSM تحت حداکثر میدان  $14 \text{ kOe}$  اندازه‌گیری شد.

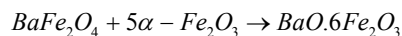
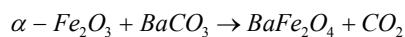
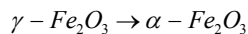
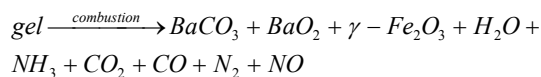


شکل ۱. نمودارهای DTA/TG مربوط به ژل نیترات-سیترات



شکل ۲. نمودارهای DTA/TG مربوط به خاکستر حاصل از احتراق

حاصل مجدداً با  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  وارد واکنش شده و هگزافریت باریم را تشکیل می‌دهد. افزایش دما سبب تکمیل واکنشها می‌شود، همانطور که در نمونه کلسینه شده در دمای  $700^\circ\text{C}$  دیده می‌شود با افزایش دما میزان  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  کاهش در حالیکه  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  و  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  افزایش می‌یابد. در دمای  $800^\circ\text{C}$  هگزافریت باریم بعنوان فاز اصلی ظاهر می‌شود. سرانجام در  $900^\circ\text{C}$  تشکیل فاز مغناطیسی هگزافریت باریم کامل می‌گردد. با توجه به مباحث فوق واکنشهای کلی تشکیل هگزافریت باریم در روش سل-ژل احتراقی را می‌توان بصورت زیر بیان کرد:



$700^\circ\text{C}$ ،  $800^\circ\text{C}$  و  $900^\circ\text{C}$  را نشان می‌دهد. خاکستر حاصل از احتراق شامل اکسید آهن ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) بعنوان فاز اصلی و مقدار جزئی اکسید باریم ( $\text{BaO}_2$ )، کربنات باریم ( $\text{BaCO}_3$ ) و هگزافریت باریم ( $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) می‌باشد. نکته قابل توجه حضور انعکاس (۱۱۴) هرچند جزئی مربوط به هگزافریت باریم در این نمونه است.

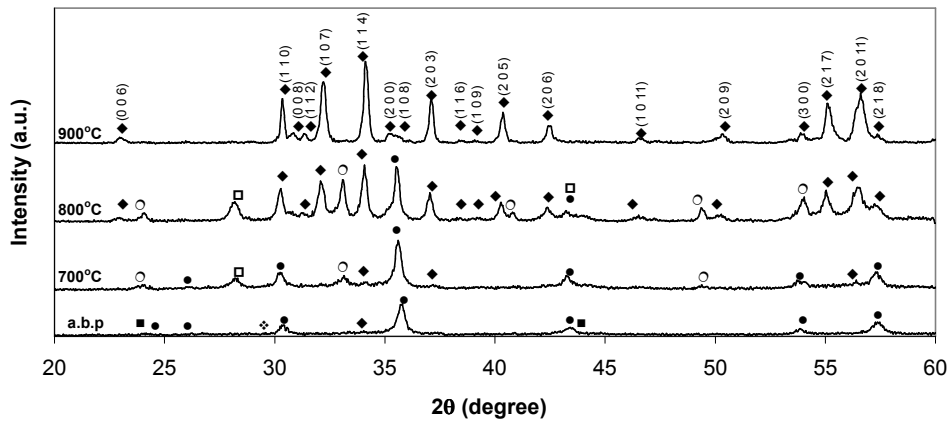
گرمای ناشی از این احتراق نه تنها سبب تبدیل کامل نمکهای فلزی به اکسیدها و کربناتهای فلزی می‌گردد بلکه برای تشکیل مقدار هر چند جزئی هگزافریت باریم کافی می‌باشد، که حاکی از گرمای بالای ناشی از احتراق می‌باشد، چراکه در روشهای مرسوم فاز خالص هگزافریت باریم در دمای بالای  $1100^\circ\text{C}$  تشکیل می‌شود [1]. با بالا رفتن دما باندهای کربنی شکسته و یونهای باریم ( $\text{Ba}^{2+}$ ) آزاد می‌شوند از طرفی مگمهایت ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) به هماتیت ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) تبدیل می‌شود. هماتیت حاصل با  $\text{Ba}^{2+}$  واکنش داده و مونوفریت باریم ( $\text{BaFe}_2\text{O}_4$ ) را تشکیل می‌دهد.

سبب تشکیل هگزافریت در دماهایی به مراتب بالاتر نسبت به فریتهای اسپینل می‌گردد. به هر حال دمای تشکیل هگزافریت باریم تک فاز در این روش بیش از ۲۰۰°C پایین‌تر از روشهای مرسوم می‌باشد.

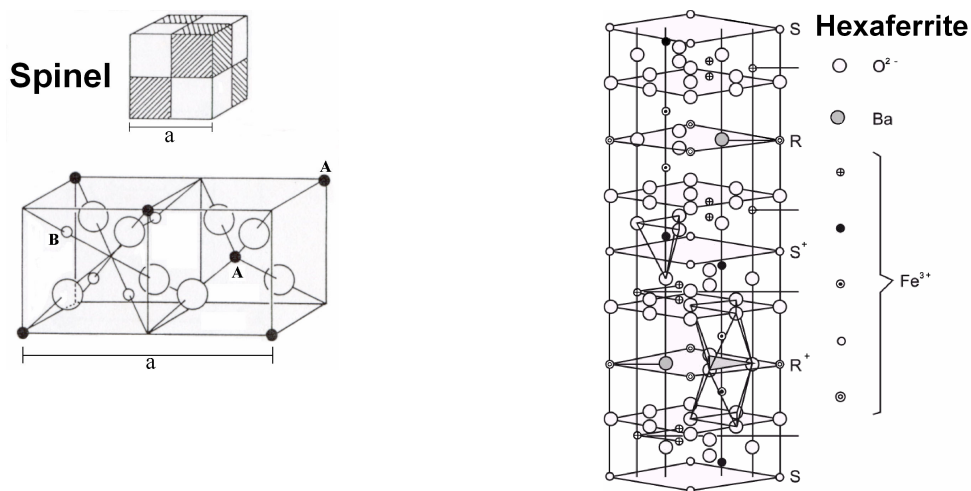
بمنظور تعیین ضخامت (t) و قطر (D) ذرات شش‌وجهی هگزافریت باریم بترتیب از انعکاسهای (۰۰۸) و (۱۱۰) در معادله شرر:  $D = K\lambda / h_{1/2} \cos\theta$  استفاده شد که D اندازه متوسط کریستالی، K ثابت شرر،  $\lambda$  طول موج (۱/۵۴۰.۵Å)،  $h_{1/2}$  عرض پیک در نصف ارتفاع پیک بر حسب رادیان و  $\theta$  محل پیک می‌باشد [10].

جدول (۱) مقادیر محاسبه شده D، t و D/t برای پودرهای کلسینه شده در دماهای مختلف را نشان می‌دهد.

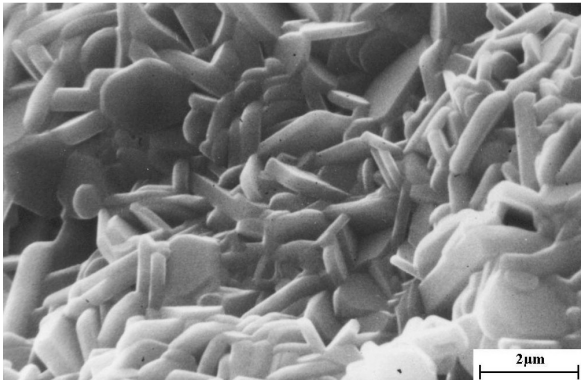
تشکیل فازهای میانی مانند  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  و  $\text{BaFe}_2\text{O}_4$  قبل از تشکیل هگزافریت باریم تک فاز در چندین مورد گزارش شده است [8,1,2,4]. در روش سل-ژل احتراقی نیز هگزافریت تک فاز مستقیماً از احتراق ژل حاصل نمی‌شود بلکه با تشکیل یکسری فازهای میانی همراه است در حالیکه استفاده از این روش برای تهیه فریتهای با ساختار اسپینل مانند فریت NiCuZn به تشکیل مستقیم فریت اسپینل تک فاز می‌انجامد. شکل (۴) ساختار سلول واحد اسپینل و هگزافریت باریم را نشان می‌دهد. هگزافریت باریم دارای ساختار بلوری کانی مگنتوپلامبیت بوده و سلول واحد آن شامل دو مولکول  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  می‌باشد که ساختاری به مراتب پیچیده‌تر از ساختار اسپینل دارد. این ساختار پیچیده



شکل ۳. الگوهای پراش پرتو ایکس مربوط به خاکستر حاصل از احتراق و پودرهای کلسینه شده در دماهای ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰°C به مدت یک ساعت (a.b.p: پودر حاصل از احتراق:  $\blacklozenge$ :  $\text{BaO}_2$ ,  $\bullet$ :  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\circ$ :  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\blacksquare$ :  $\text{BaFe}_2\text{O}_4$ ,  $\blacksquare$ :  $\text{BaCO}_3$ )



شکل ۴. ساختار سلول واحد اسپینل و هگزافریت باریم



شکل ۵. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به پودر هگزافریت باریم کلسینه شده در دمای ۱۱۰۰°C

#### بمدت ۱ ساعت

دما، تشکیل ذرات بلوری هگزافریت باریم کامل شده و فازهای غیر فرومغناطیس یا مغناطیسی نرم حذف می‌شوند و منحنی و امگناطش به حالت عادی خود برمی‌گردد. بطوریکه در ۱۰۰۰°C وادارندگی مغناطیسی ( $H_{ci}$ ) تا ۵/۱ kOe و مغناطش ( $M$ ) تحت میدان اعمالی ۱۴ kOe تا ۶۱/۲ emu/g افزایش می‌یابد. بالا بودن وادارندگی مغناطیسی (۵/۱ kOe) حاکی از حضور ذرات هگزافریت باریم در حد تک حوزه ( $< 0.5 \mu m$ ) در دمای ۱۰۰۰°C می‌باشد که نتایج بدست آمده از XRD را نیز تایید می‌کند. افزایش دما تا ۱۱۰۰°C سبب کاهش وادارندگی مغناطیسی بدلیل رشد اندازه ذرات و خروج از حالت تک حوزه می‌گردد، از طرفی مغناطش اشباع بدلیل افزایش بلورینگی ذرات تا حد ۶۵/۲ emu/g افزایش می‌یابد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

پودرهای بسیار ریز هگزافریت باریم در حد ۵۰ nm بروش سل-ژل احتراقی با استفاده از ژل نیترات-سیترات تهیه شدند. نتایج نشان داد که ژل نیترات-سیترات طی یک فرآیند احتراقی خودپیشرونده به خاکستری نرم شامل کربناتها و اکسیدهای فلزی تجزیه می‌گردد. هرچند استفاده از این روش برای فریتهای اسپینل منجر به تشکیل مستقیم فریت تک‌فاز از فرآیند احتراق می‌گردد اما در مورد هگزافریت باریم بدلیل داشتن شبکه پیچیده بلوری، در ابتدا با افزایش دما یکسری فازهای میانی مانند  $BaFe_2O_4$  و  $\alpha-Fe_2O_3$  تشکیل شده و سپس از واکنش آنها هگزافریت تک‌فاز در دمای ۹۰۰°C شکل می‌گیرد. افزایش دما سبب رشد ذرات بلوری هگزافریت می‌گردد بطوریکه تا ۹۰۰°C رشد ذرات با سرعت کم و در دماهای بالاتر سرعت رشد بطور ناگهانی افزایش می‌یابد. بالا رفتن دما سبب افزایش

#### جدول ۱. مقادیر محاسبه شده برای ضخامت و قطر ذرات

##### کلسینه شده در دماهای مختلف برای یک ساعت

دمای کلسیناسیون (°C)	قطر D(nm)	ضخامت t(nm)	ضخامت/قطر (D/t)
۷۰۰	۲۶	-	-
۸۰۰	۳۴	-	-
۹۰۰	۵۱	۵۱	۱
۱۰۰۰	۱۰۰	۵۳	۲
۱۱۰۰	۸۰۰	۱۳۵	۶

با افزایش دمای کلسیناسیون از ۷۰۰°C تا ۹۰۰°C رشد ذرات هگزافریت بطور یکنواخت و با سرعت کم صورت می‌گیرد. بطوریکه در ۹۰۰°C ذراتی در حد  $0.5 \mu m$  داریم. این ذرات در حد تک حوزه بوده و وادارندگی مغناطیسی بالایی برای آنها پیش‌بینی می‌شود از ۹۰۰°C به بعد با بالا رفتن دما سرعت رشد ذرات بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

سرعت رشد در امتداد محور a بیشتر از c بوده که سبب تغییر شکل ذرات از حالت کروی ( $D/t=1$ ) به حالت بشقابی هگزگونال ( $D/t=6$ ) می‌گردد،

شکل (۵) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به پودر هگزافریت باریم کلسینه شده در دمای ۱۱۰۰°C بمدت ۱ ساعت می‌باشد که وجود بلورهای بشقابی هگزگونال با قطر  $2-0.5 \mu m$  در آن، افزایش اندازه ذرات و پراکندگی اندازه ذرات را با افزایش دما تایید می‌کند. محاسبه ثوابت شبکه a و c برای بلور هگزافریت باریم از معادله  $d_{hkl} = \left( \frac{4}{3} \frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \right)^{-1/2}$  با توجه به مقادیر مختلف مربوط به انعکاسهای (۱۱۰) و (۱۰۷) در دماهای مختلف نشان داد که ثوابت شبکه بر خلاف اندازه متوسط بلوری ذرات که با بالا رفتن دما افزایش می‌یابد مقداری ثابت و برابر با  $a=23/2 \text{ \AA}$  و  $b=5/9 \text{ \AA}$  دارند.

شکل (۶) منحنیهای و امگناطش بدست آمده برای نمونه‌های کلسینه شده در دماهای ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۱۰۰°C به مدت یک ساعت را نشان می‌دهد. خواص مغناطیسی مربوط به هر نمونه در جدول (۲) آورده شده است. شکل خاص منحنی و امگناطش نمونه کلسینه شده در ۸۰۰°C می‌تواند به حضور همزمان فازهای مغناطیسی نرم ( $\gamma-Fe_2O_3$ ) و سخت ( $BaFe_{12}O_{19}$ ) مربوط باشد.

حضور فازهای غیرمغناطیسی  $BaFe_2O_4$  و  $\alpha-Fe_2O_3$  دلیلی بر خواص پایین مغناطیسی در این دما می‌باشد. با بالا رفتن

Hexaferrite Powders”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 20, No. 5, 1984, pp. 1639-1641.

[3] Liu, X., Zhong, W., Yang, S., Yu, Z. and Benxi, G., “Influence of  $La^{3+}$  Substitution on the Structure and Magnetic Properties of M-Type Strontium Ferrite”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 238, 2002, pp. 207-214.

[4] Pankov, V., “Modified Aerosol Synthesis for Nanoscale Hexaferrite Particles Preparation”, Materials Science and Engineering, Vol. 224, 1997, pp. 101-106.

[5] Chin, T.S., Hsu, S.L. and Deng, M.C., “Barium Ferrite Particulates Prepared by a Salt- Melt Method”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 120, 1993, pp. 64-68.

[6] Pullar, R.C., Taylor, M.D. and Bhattacharya, A.K., “Novel Aqueous Sol-Gel Preparation and Characterization of Barium M-ferrite,  $BaFe_{12}O_{19}$  Fibres”, Journal of Materials Science, Vol. 32, 1997, pp. 342-352.

[7] Sakai, H., Hanawa, K. and Aoyagi, K., “Preparation and Magnetic Properties of Barium Ferrite Fine Particles by the Coprecipitation Salt-Catalysis Method”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 28, No. 6, 1992, pp. 3355-3362.

[8] Castro, S.C., Gayoso, M., Rivas, Y. and Mira, Y.J., “Structural and Magnetic Properties of Barium Hexaferrite Nanostructures Particles Prepared by the Combustion Method”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 152, 1996, pp. 61-69.

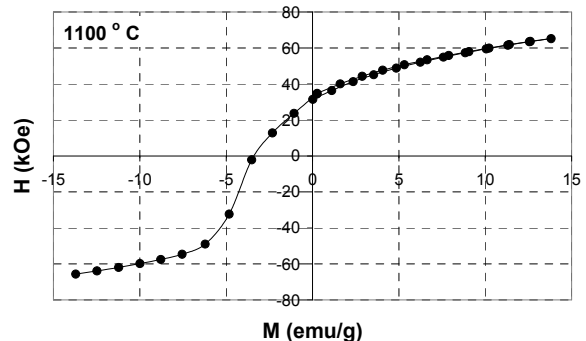
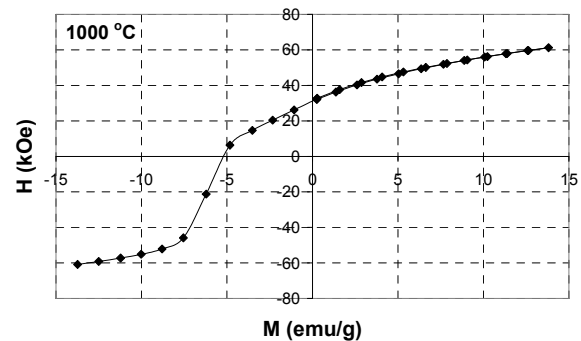
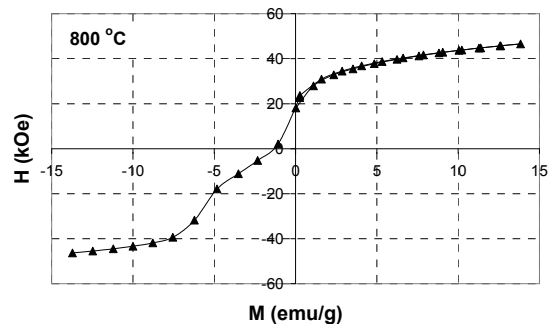
[9] Liu, X., Wang, J., Gan, L.M. and Ng, S.C., “Improving the Magnetic Properties of Hydrothermally Synthesised Barium Ferrite”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 195, 1999, pp. 452-459.

[10] Corral-Huacuz, J.C. and Mendoza-Suarez, G., “Preparation and Magnetic Properties of Ir-Co and La-Zn Substituted Barium Ferrite Powders Obtained by Sol-Gel”, Vol. 242, 2002, pp. 430-433.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تهران بخاطر تامین مالی پروژه طی قرارداد پژوهشی ۱۵/۳/۱۰۱۲، همچنین از دانشکده مهندسی متالورژی و مواد دانشکده فنی بخاطر در اختیار گذاشتن امکانات آزمایشگاهی تشکر و قدردانی می نمایند.

مغناطش اشباع می گردد در حالیکه وادارندگی مغناطیسی تا دمای  $1000^{\circ}C$  افزایش و سپس کاهش می یابد. بهترین خواص مغناطیسی (بالاترین  $(BH)_{max}$ ) مربوط به نمونه کلسینه شده در  $1000^{\circ}C$  با وادارندگی مغناطیسی  $5/1 kOe$  و مغناطش اشباع  $61/2 emu/g$  می باشد.



شکل ۶. منحنی های و امغناطیس بدست آمده برای نمونه های کلسینه شده در دماهای ۸۰۰، ۱۰۰۰ و  $1100^{\circ}C$  برای یک ساعت

### مراجع

- [1] Ataie, A. and Heshmati-manesh, “Synthesis of Ultra-Fine Particles of Strontium Hexaferrite by a Modified Co-Precipitation Method”, Journal of the European Ceramic Society, Vol. 21, 2001, pp. 1951-1955.
- [2] Licci, F. and Besagni, T., “Organic Resin Method for High Reactive and Homogeneous