

## بررسی اثر دمای تکلیس در ایجاد خاصیت فرومغناطیسی در ذرات بسیار ریز ابرسانای دمای بالای $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$

هادی عربی<sup>۱\*</sup>، فرزانه رضانی<sup>۱</sup> و محمود رضایی رکن‌آبادی<sup>۲</sup>  
<sup>۱</sup>آزمایشگاه تحقیقاتی مغناطیس و ابرسانایی، گروه فیزیک، دانشگاه بیرجند  
<sup>۲</sup>گروه فیزیک، دانشگاه فردوسی مشهد

### چکیده

در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر دمای تکلیس در ایجاد خاصیت فرومغناطیسی در ذرات بسیار ریز (زیرمیکرومتری) ابرسانای دمای بالا  $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ، نمونه‌هایی با استفاده از روش سیترات ژل در دماهای تکلیس متفاوت تهیه شده است. در این روش از نمک‌های نیترات  $\text{Ho}$ ،  $\text{Ba}$  و  $\text{Cu}$  با خلوص بالا به عنوان مواد اولیه و از اسید سیتریک به عنوان عامل کمپلکس‌ساز استفاده شده است. تعیین فاز و بررسی خواص ساختاری نمونه‌ها توسط الگوی پراش اشعه‌ی X (XRD)، تشکیل ساختار اورتورومبیک پودرهای ریز و نمونه‌ی حجمی را تأیید می‌کند. ریخت نمونه‌ها نیز توسط تصاویر میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفته است. دمای بحرانی گذار به حالت ابرسانایی، که از طریق اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی تعیین شده است، حدود  $93\text{K}$  برای نمونه‌ی حجمی می‌باشد. در ذرات زیرمیکرومتری ابرسانا، به دلیل کاهش مقدار اکسیژن در حین واکنش تجزیه سیترات در طی فرآیند ساخت، دمای گذار کاهش یافته است. خواص مغناطیسی این ذرات نیز در دمای اتاق به وسیله‌ی مغناطیس‌سنج با نمونه‌ی نوسانی (VSM) اندازه‌گیری شده که حضور خاصیت فرومغناطیسی در ذرات زیرمیکرومتری این ماده در دمای اتاق را نشان می‌دهد. در حالی که نمونه‌ی حجمی همین ماده که از حرارت دادن پیش ماده در دماهای بالا به دست می‌آید، منحنی مغناطش خطی را که مشخصه‌ی ابرساناهای (۱۲۳) حجمی است، نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** ذرات زیرمیکرومتری، ابرسانای دمای بالا،  $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ، دمای تکلیس، خاصیت فرومغناطیسی

### مقدمه

فرآیند ساخت به آن‌ها اعمال شده است. در مقالات متعدد [۱-۳] مناسب‌ترین دما برای ساخت ابرساناهای سرامیکی (۱۲۳) حدود  $940^\circ\text{C}$  گزارش شده است. با وجود این که در این دما فاز اورتورومبیک ابرسانای (۱۲۳) به طور کامل تشکیل می‌شود اما نمونه‌ها شامل دانه‌هایی بزرگ با ابعادی در حد میکرون می‌باشند. بنابراین کاهش این دما، که به دمای تکلیس مشهور است، می‌تواند در کاهش اندازه‌ی ذرات و تبدیل آن‌ها به نمونه‌هایی در ابعاد نانو مؤثر باشد. همچنین در روش‌های

ورود به دنیای نانو بر خواص الکتریکی، مغناطیسی، تراپردی و ... بسیاری از مواد تأثیر می‌گذارد. در این میان ساخت نمونه‌های ابرسانا در مقیاس نانو از جمله موضوعاتی است که امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از این رهگذر می‌توان همزیستی خواص ابرسانایی و فرومغناطیسی را مورد بررسی قرار داد. خواص مواد بستگی به بالاترین دمایی دارد که در حین

گرفته شده است به دلیل استفاده از اسید سیتریک به عنوان عامل کمپلکس ساز، به سیترات ژل نیز معروف است. در کار حاضر برای ساخت نانوپودرهای ابررسانای  $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  با روش سیترات ژل از نمک‌های نیترات  $\text{Ho}$ ،  $\text{Ba}$  و  $\text{Cu}$  با خلوص بالا به عنوان مواد اولیه استفاده شده است. مقادیر استوکیومتری نیترات‌های هولمیوم، باریم و مس با نسبت صحیح  $\text{Ho}:\text{Ba}:\text{Cu}=1:2:3$  و مقدار مشخصی اسیدسیتریک (یک اکی‌والان گرم اسیدسیتریک به ازای هر اکی‌والان گرم یون فلزی موجود) جداگانه در مقدار کمی آب دو بار تقطیر حل می‌شوند. سپس محلول‌ها با هم مخلوط شده و مخلوط اسیدی با اضافه کردن اتیلن‌دی‌آمین به صورت قطره‌قطره خنثی می‌شود تا محلولی به رنگ آبی تیره و با pH حدود ۶ به دست آید. محلول حاصل در دمای  $80^\circ\text{C}$  به طور یکنواخت هم زده می‌شود. پس از تبخیر آب، ژل غلیظی به دست می‌آید. به دلیل متصاعد شدن گازهای مضر  $\text{NO}$  و  $\text{NO}_2$  در مرحله‌ی ژل شدن، این مرحله از آزمایش باید در زیر هود با تهویه‌ی مناسب هوا انجام شود.

مرحله‌ی خشک‌شدن و احتراق ژل در آون معمولی در دمای  $250^\circ\text{C}$  به مدت حدود ۲ ساعت صورت گرفته است. لازم است ظرف محتوی ژل بزرگ‌تر از حد معمول باشد زیرا در حین گرمادهی، تجزیه‌ی مؤثر گرمایی و احتراق خود به خودی باعث انبساط شدید ژل و پخش شدن آن می‌شود. پودر نرم و سبک به رنگ قهوه‌ای سوخته به دست آمده از این مرحله پس از ساییدن، به عنوان پیش‌ماده برای عملیات حرارتی بعدی جهت ساخت نانوذرات، در کوره‌ی الکتریکی قابل برنامه‌ریزی و کنترل با لوله استوانه‌ای قرار می‌گیرد.

به منظور بررسی تأثیر دمای تکلیس بر اندازه‌ی ذرات و خواص فیزیکی و مغناطیسی نانوذرات ابررسانا، پودر پیش‌ماده در نمونه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب در دماهای

ساخت ابررساناهای سرامیکی مراحل شامل حرارت‌دهی پیش‌ماده در دماهای بالا در اتمسفر هوا یا اکسیژن وجود دارد [۱-۳]، در این تحقیق به منظور کاهش اندازه‌ی ذرات، مرحله‌ی حرارت‌دهی در جریان هوا حذف و تکلیس نمونه‌ها فقط در اتمسفر اکسیژن انجام شده است.

افزایش نسبت سطح به حجم نانوذرات باعث بروز تغییراتی در خواص فیزیکی مواد می‌شود. در برخی مقالات حضور خاصیت فرومغناطیسی در دمای اتاق در نانوذرات مواد غیرمغناطیسی گزارش شده است [۴]. مشاهده‌ی خاصیت فرومغناطیسی در دمای اتاق در نانوذرات مختلفی از قبیل اکسیدها، نیترات‌ها و... پیشنهاد می‌کند که خاصیت فرومغناطیسی یک ویژگی کلی نانوذرات بسیاری از ترکیب‌هاست [۵]. از آن جایی که تا پیش از کشف همزیستی خاصیت فرومغناطیسی و ابررسانایی در  $\text{UGe}_2$  [۶] و  $\text{ZrZn}_2$  [۷] به نظر می‌رسید که این دو ویژگی ناسازگارند؛ همزیستی این دو پدیده (خاصیت فرومغناطیسی و ابررسانایی) در یک سیستم، بسیار قابل توجه است. کار حاضر تلاش می‌کند تا به بررسی امکان ساخت نانوذرات ابررسانا و مشاهده‌ی دو خاصیت به ظاهر ناسازگار فرومغناطیسی و ابررسانایی در ذرات یکسان بپردازد. از آنجایی که خاصیت فرومغناطیسی در نانوذرات مواد غیرمغناطیسی دیگر ناشی از نقایص سطحی است و هسته‌ی ذرات دیامغناطیس باقی می‌ماند [۵]، به نظر می‌رسد که می‌توان به یک ساختار مشابه هسته‌ی پوسته دست یافت که در آن امکان همزیستی خاصیت فرومغناطیسی سطحی (در پوسته) با خاصیت ابررسانایی در هسته وجود داشته باشد.

## بخش تجربی

در میان انواع روش‌های شناخته شده برای تهیه‌ی مواد در مقیاس نانو [۸]، روش سل ژل یک روش مناسب برای تهیه‌ی اکسیدهای فلزی بسیار ریز است. با توجه به چگونگی انتخاب مواد اولیه، روش سل ژل به فرآیندهای مختلفی اطلاق می‌گردد. روشی که در این تحقیق به کار

اورتورمبیک تشکیل شده است. قله‌های اصلی مربوط به این ساختار به وسیله‌ی اندیس‌های میلر مربوطه در شکل مشخص شده است. تعداد محدودی قله با شدت نسبی نسبتاً ناچیز مربوط به فاز ناخالصی  $BaCuO_2$  نیز در الگوی اشعه‌ی X نمونه‌ها دیده می‌شود که با توجه به پایین بودن دمای ساخت نسبت به دمای لازم برای ساخت نمونه‌های حجمی، قابل انتظار است. اندازه‌ی تقریبی کریستال‌های نمونه یا ریزبلورک‌ها با استفاده از رابطه‌ی شرر و از روی پهنای قله‌ی پراش صفحه‌ی (۰۳۱) به دست آمده است؛ و واضح است که اندازه‌ی ریزبلورک‌ها بعد از بازپخت کمی بزرگ‌تر از اندازه‌ی آن‌ها بعد از مرحله‌ی تکلیس می‌باشد.

در رابطه‌ی شرر  $D = K\lambda / \beta \cos \theta$ ،  $D$  قطر ریزبلورک‌ها،  $\beta$  پهنای قله در نصف ماکزیمم ارتفاع،  $\lambda$  طول موج اشعه‌ی X (برای  $K\alpha$  مس  $1/054 \text{ \AA}$ ) و  $K$  عدد ثابتی برابر  $0/9$  است.

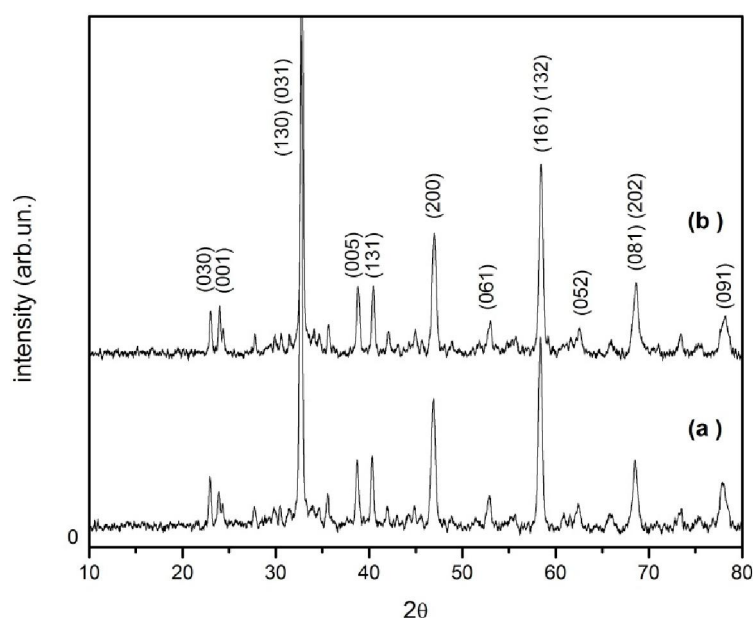
در شکل ۲ طیف اشعه‌ی X نمونه‌های ۱ تا ۵ بعد از بازپخت را به ترتیب افزایش دمای مرحله‌ی تکلیس مقایسه کرده‌ایم. همان‌طور که از این شکل پیداست، در نمونه‌ی ۱ که در دمای  $830^\circ \text{C}$  تکلیس شده، فاز (۱۲۳) به طور ضعیف تشکیل شده است و در واقع شروع تشکیل فاز (۱۲۳) را نشان می‌دهد. با افزایش دمای تکلیس، بر شدت پیک‌ها افزوده شده و قله‌های مربوط به این فاز تیزتر می‌شود و در نتیجه اندازه‌ی ریزبلورک‌ها افزایش می‌یابد. اندازه‌ی ریزبلورک‌ها با استفاده از رابطه‌ی شرر و از روی پهنای قله‌ی پراش صفحه‌ی (۰۳۱)، در محدوده‌ی بین ۳۰ تا ۸۵ نانومتر به دست آمده است. در نمونه‌ی ۵ (نمونه‌ی حجمی) به دلیل بالا بودن دمای تکلیس، قله‌های مشخصه‌ی فاز اورتورمبیک ۱۲۳ بسیار تیز می‌باشند.

$830^\circ \text{C}$ ،  $860^\circ \text{C}$ ،  $880^\circ \text{C}$  و  $900^\circ \text{C}$  به مدت ۸ ساعت در اتمسفر اکسیژن حرارت داده شده تا تکلیس شود و سپس در حضور اکسیژن به آرامی تا دمای اتاق سرد شده است. برای اطمینان از جذب اکسیژن به مقدار کافی، بخشی از این نمونه‌ها مجدداً در دمای  $700^\circ \text{C}$  به مدت ۲ ساعت و با کاهش تدریجی دما تا  $300^\circ \text{C}$  در اتمسفر اکسیژن بازپخت شده است. برای مقایسه، یک نمونه‌ی حجمی (نمونه‌ی ۵) با همان رژیم حرارتی فوق با دمای تکلیس  $940^\circ \text{C}$  نیز تهیه شده است.

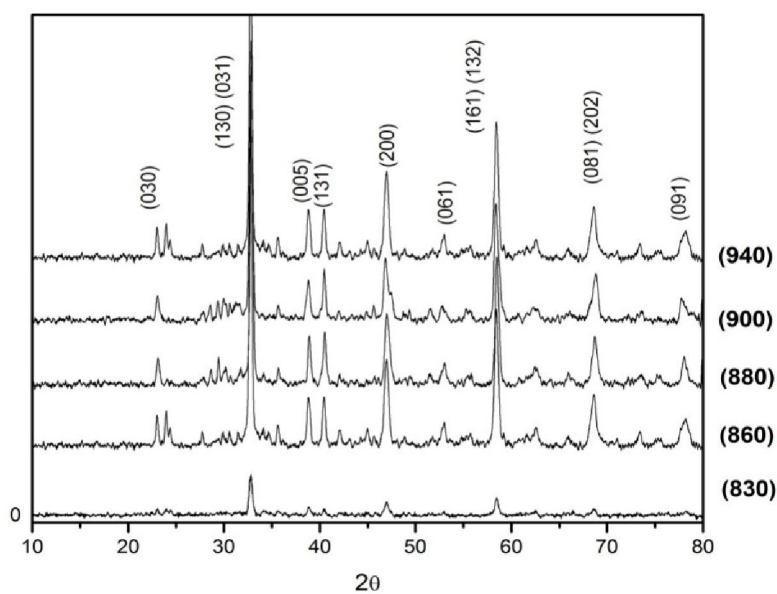
نمونه‌های ساخته شده جهت تعیین فاز و وجود فاز ناخالصی توسط الگوی پراش اشعه‌ی X (دیفرکتومتر با آند مس، Cu، مدل PW180 ساخت شرکت Philips)، بررسی ریزساختار و ریخت توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM، تعیین دمای گذار ابررسانایی توسط سیستم اندازه‌گیری پذیرفتاری AC و اندازه‌گیری خواص مغناطیسی توسط مغناطیس‌سنج با نمونه‌ی نوسانی (VSM, Lake Shore 7400) مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

## نتایج و بحث

برای اطمینان از تشکیل فاز مورد نظر، تعیین ساختار، وجود یا عدم وجود ناخالصی و تعیین اندازه‌ی تقریبی بلورک‌ها، نمونه‌های تهیه شده توسط دستگاه پراش اشعه‌ی X مورد آنالیز قرار گرفت. در شکل ۱ به‌عنوان مثال الگوی پراش اشعه‌ی X نمونه‌ی ۲ بعد از مراحل تکلیس و بازپخت نشان داده شده است. با مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با مقادیر ثبت شده در کارت استاندارد JCPDS 39-1400 مشاهده می‌شود که نمونه‌ها تقریباً خالص هستند و ساختار ابررسانای (۱۲۳) با فاز



شکل ۱- الگوی پراش اشعه‌ی X نمونه‌ی ۲ (a) بعد از تکلیس و (b) بعد از بازپخت.



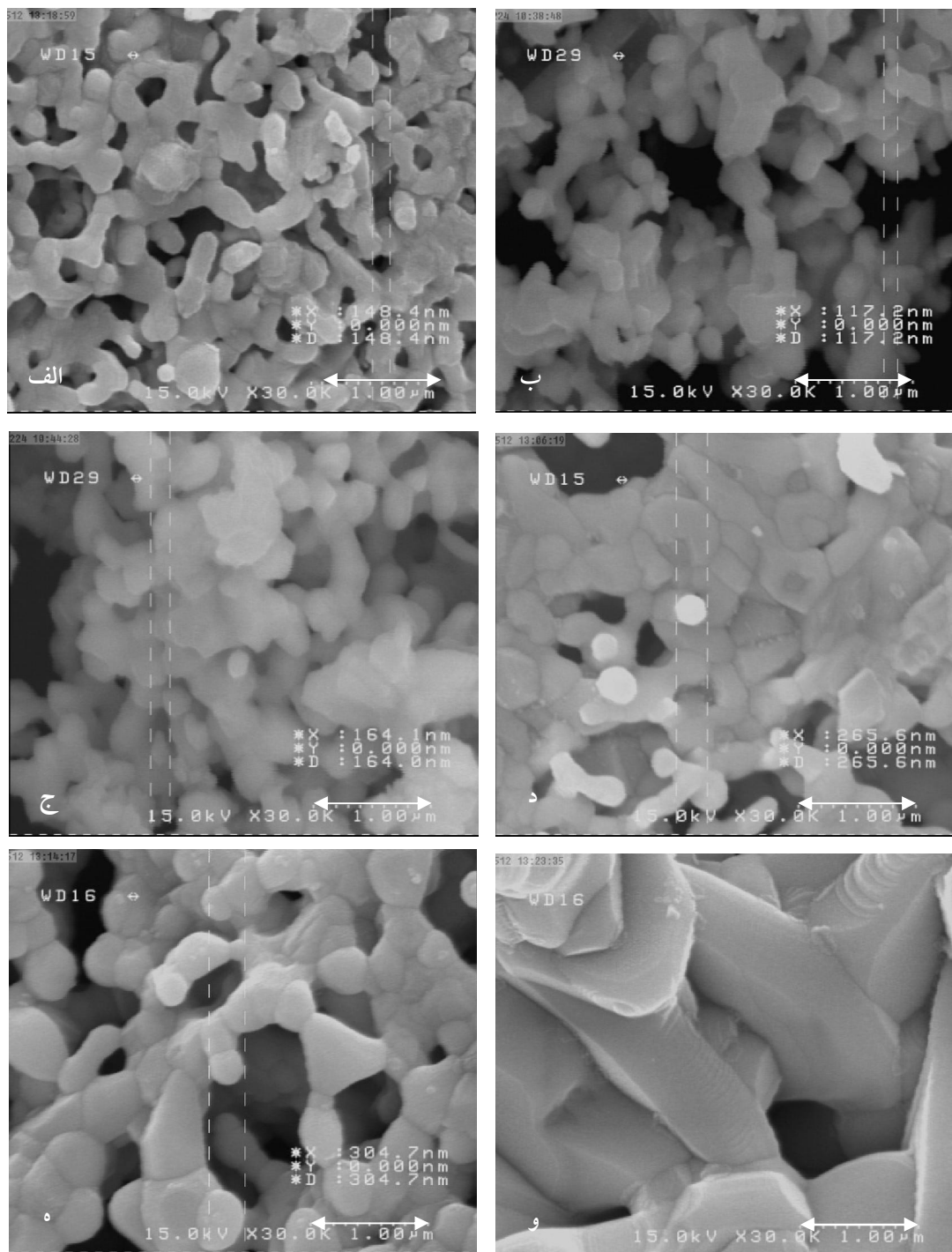
شکل ۲- الگوی پراش اشعه‌ی X نمونه‌های ۱ تا ۵ بعد از بازپخت.

همان‌طور که این تصاویر نشان می‌دهند، توزیع اندازه‌ی دانه‌ها تقریباً یکنواخت است و طبق انتظار با افزایش دمای تکلیس اندازه‌ی دانه‌ها افزایش می‌یابد. توزیع اندازه‌ی ذرات کروی کوچک‌تر و مجزا در نمونه‌ی ۱، شکل ۳- الف، در محدوده‌ی بین ۱۰۰-۱۵۰ nm است. اندازه‌ی دانه‌ها در نمونه‌ی ۲ پس از بازپخت، شکل ۳- ج، به دلیل تشکیل ساختار بلوری کامل‌تر، نسبت به مرحله‌ی قبل، شکل ۳- ب، بزرگ‌تر شده است. در نمونه‌ی ۳، شکل ۳- د،

به منظور بررسی کیفیت نمونه‌ها، تعیین اندازه‌ی دانه‌ها و نحوه‌ی توزیع آن‌ها از تصاویر TEM و SEM استفاده می‌شود. اگر چه قدرت تفکیک، کیفیت و وضوح تصاویر TEM بهتر است اما از آن جایی که روند افزایش اندازه ذرات در تصاویر SEM هم مشاهده می‌شود، برای بررسی ریزساختار و ریخت نمونه‌ها و تغییرات اندازه‌ی دانه‌ها، تصاویر SEM از نمونه‌ها با بزرگ‌نمایی‌های مختلف گرفته شده که در شکل ۳ آورده شده است.

کروی کوچک‌تر در این نمونه حدود  $300\text{nm}$  است و نمونه‌ی حجمی، شکل ۳- و، نیز شامل ذراتی با ابعادی در حد میکرون است.

که در دمای  $880^\circ\text{C}$  تکلیس شده بعد از بازپخت، میانگین اندازه‌ی ذرات کروی در حدود  $250\text{nm}$  می‌باشد. تصاویر مربوط به نمونه‌ی ۴، شکل ۳- ه، نیز آگلومره شدن و بهم چسبیدن ذرات را به وضوح نشان می‌دهد. اندازه‌ی ذرات



شکل ۳- تصاویر SEM الف- نمونه‌ی ۱ بعد از بازپخت، نمونه‌ی ۲ (ب) قبل و (ج) بعد از بازپخت، (د) نمونه‌ی ۳، (ه) نمونه‌ی ۴ و (و) نمونه‌ی حجمی ۵ بعد از بازپخت.

موارد مشابه نیز گزارش شده است [۹ و ۱۰]، اما این موضوع بیانگر این نمی‌باشد که ماده ابررسانا نیست بلکه دمای بحرانی نمونه در دماهای کم‌تر از ۷۷K قرار دارد.

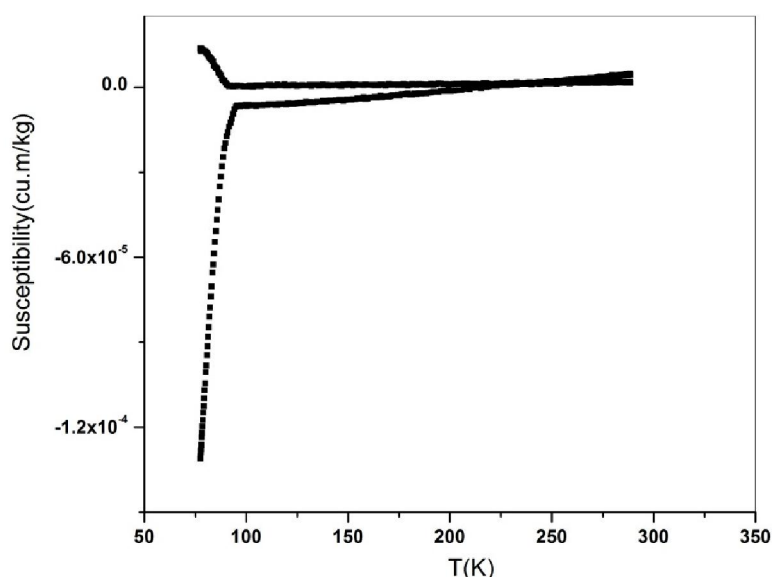
شواهد نشان می‌دهند که سوختن خود به خودی سریع، در طول فرآیند تجزیه‌ی گرمایی، انبساط شدیدی در محصول ایجاد می‌کند که سبب سستی برهم کنش‌های مولکولی و تشکیل ذرات ریز پودری همراه با کاهش مقدار اکسیژن آن‌ها می‌شود. از آن جایی که خاصیت ابررسانایی در مواد ابررسانا به شدت به مقدار اکسیژن در نمونه بستگی دارد، کاهش مقدار اکسیژن و وجود نقایص سطحی در نانوذرات باعث کاهش خاصیت ابررسانایی در این مواد شده است. دمای گذار نانوذرات ابررسانای (۱۲۳) بسته به اندازه‌ی ذرات بین ۸۵K-۶۵ گزارش شده است [۱۱] که قسمتی از این محدوده‌ی دمایی قابل اندازه‌گیری با دستگاه پذیرفتاری سنج AC با کرایستات نیتروژن مایع نمی‌باشد. اما از آن جایی که در الگوی پراش اشعه‌ی X پیک‌های مشخصه‌ی فاز اورتورومبیک ابررسانای ۱۲۳ و فاز تراگونال غیرابررسانای این ماده متفاوتند [۱ و ۱۲] و در همه‌ی نمونه‌های ساخته شده تشکیل فاز اورتورومبیک ابررسانا توسط XRD اثبات شده است، می‌توان از ابررسانا بودن نمونه‌ها با دمای Tc کم‌تر از ۷۷K مطمئن بود.

برای درک بهتر نتایج حاصل از آنالیز XRD و SEM در جدول ۱ فهرست شده است. مقایسه‌ی نتایج XRD و SEM نشان می‌دهد که اندازه‌ی ریزبلورک‌ها که توسط رابطه‌ی شرر و از روی پهنای پیک (۰۳۱) در نصف بیشینه ارتفاع محاسبه شده است از اندازه‌ی ذرات در تصاویر SEM کوچک‌تر می‌باشد و این مبین این موضوع است که هر ذره ممکن است از چند بلورک تشکیل شده باشد. واضح است که تحت شرایط آزمایش ما، بالا بودن دما و زمان حرارت‌دهی ممکن است سبب بهبود دمای گذار Tc شود ولی از طرفی چون ریزبلورک‌های نانومقیاس تمایل زیادی به آگلومره شدن و بهم چسبیدن دارند، با افزایش دما و مدت زمان حرارت‌دهی فرصت لازم برای این کار را خواهند داشت و در نتیجه اندازه‌ی دانه‌ها بزرگ‌تر می‌شود.

نمودار پذیرفتاری مغناطیسی برای نمونه‌ی حجمی برحسب دما، در شکل ۴، افت تیزی را در دمای حدود ۹۳K نشان می‌دهد که مربوط به گذار به حالت ابررسانایی است. برای نمونه‌های با ذرات ریزتر دمای گذار ابررسانایی تعیین شده کم‌تر از نمونه‌ی حجمی است. اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی برای نمونه‌ی ۲ بعد از بازپخت تا دمای ۷۷K (نقطه‌ی جوش نیتروژن مایع) گذار به حالت ابررسانایی را نشان نداده است. البته این مطلب در

جدول ۱- مقایسه‌ی اندازه‌ی ریزبلورک‌ها و ذرات در نمونه‌های مختلف

شماره‌ی نمونه	اندازه‌ی ریزبلورک‌ها (با استفاده از رابطه‌ی شرر)	توزیع اندازه‌ی ذرات کروی کوچک‌تر (با توجه به تصاویر SEM)
۱	۳۲ nm	۱۰۰-۱۵۰ nm
۲ (بعد از تکلیس)	۳۹ nm	۱۰۰ nm
۲ (بعد از بازپخت)	۵۶ nm	۱۵۰ nm
۳	۶۸ nm	۲۵۰ nm
۴	۷۲ nm	۳۰۰ nm
۵ (نمونه‌ی حجمی)	۸۵ nm	در حد میکرون



شکل ۴- نمودار پذیرفتاری مغناطیسی برحسب دما برای نمونه‌ی حجمی ۵ بعد از بازپخت با اعمال میدان‌های مغناطیسی متفاوت.

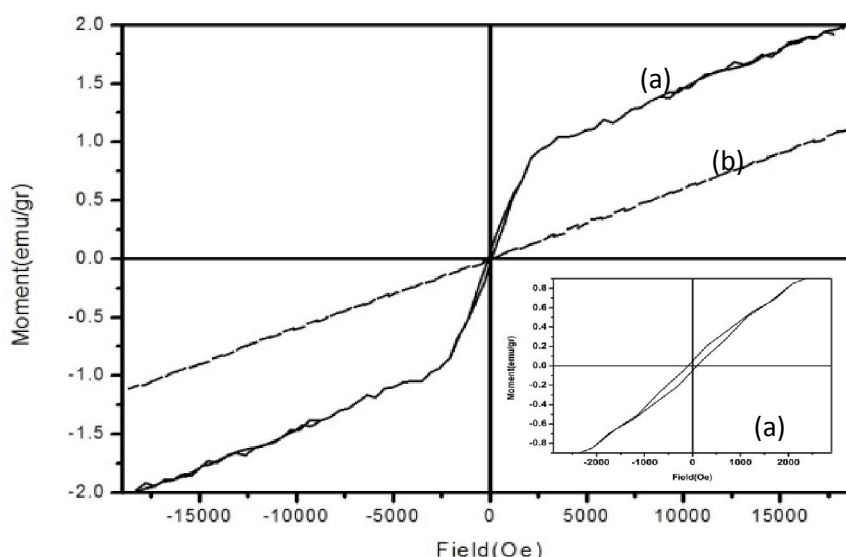
شده است [۱۳]. هرچند واحد اندازه‌گیری در این دو مورد یکسان نیست اما با توجه به یکسان بودن روش‌های ساخت و ساختار بلوری این دو ماده، احتمالاً می‌توان این تفاوت را به اختلاف زیاد مقدار ممان مغناطیسی اتم Ho و Y نسبت داد. البته پارامترهای مهم دیگری از قبیل خواص ناهمسانگردی، مگنتون بوهر اتم Ho و ... نیز بر رفتار مغناطیسی نمونه‌ها و نتایج و منحنی مغناطش اثر دارند که به صورت کمی نمی‌توان به آن‌ها پرداخت.

این مشاهده با نتایج مرجع [۴] مبنی بر این که خاصیت فرومغناطیسی مشخصه‌ی کلی همه‌ی نانوذرات اکسیدی می‌باشد، سازگار است. خاصیت فرومغناطیسی در نانوذرات غیرمغناطیسی به حضور جاهای خالی اکسیژن در سطح نانوذرات نسبت داده می‌شود که منجر به توزیع مجدد الکترون‌ها روی یون‌های متفاوت در سطح می‌شود [۱۳].

اندازه‌گیری‌های مغناطش برای نمونه‌ی حجمی، رفتار پارامغناطیسی آن‌را در دمای اتاق نشان می‌دهد که مشخصه‌ی ابررساناهای (۱۲۳) حجمی می‌باشد.

تراکم نقایص و افزایش جاهای خالی اکسیژن در سطح نانوذرات ابررسانا همان طور که موجب کاهش خاصیت ابررسانایی می‌شود، باعث بروز خاصیت فرومغناطیسی در این مواد نیز می‌شود [۱۱]. لذا به منظور بررسی خواص مغناطیسی نمونه‌ها، منحنی پسماند نانوذرات خالص  $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  در دمای اتاق،  $300\text{K}$  و در بیشینه‌ی میدان اعمالی  $19\text{KOe}$  اندازه‌گیری شده است.

در شکل ۵ منحنی  $M(H)$  مربوط به نمونه‌ی ۲ و نمونه‌ی حجمی مقایسه شده است. برای نمونه‌ی ۲، حلقه- پسماند در محدوده‌ی میدان  $1700\text{Oe}$  به وضوح دیده می‌شود. وادارندگی منحنی پسماند حدود  $100\text{Oe}$  می‌باشد. همچنین در میدان‌های بالا رفتار خطی که مشخصه‌ی خاصیت پارامغناطیسی است، وجود دارد (مشابه رفتار پارامغناطیسی نمونه‌ی حجمی مغناطش به صورت خطی با میدان تغییر می‌کند). مقدار مغناطش در شروع حلقه پسماند برای این نمونه برابر  $0.6\text{emu/gr}$  است، که در میدان  $1700\text{Oe}$  ایجاد شده است. در نانوذرات YBCO، این مقدار  $0.4\text{emu/cm}^3$  گزارش



شکل ۵- مقایسه‌ی منحنی مغناطش (a) نمونه‌ی ۲ و (b) نمونه‌ی حجمی ۵ بعد از بازپخت، در دمای اتاق.

ذرات زیرمیکرومتری این ماده نشان می‌دهد در حالی که نمونه‌ی حجمی همین ماده منحنی مغناطش خطی را، که مشخصه‌ی ابررساناهای (۱۲۳) حجمی است، نشان می‌دهد. با توجه به این که خاصیت فرومغناطیسی به سطح نانوذرات محدود می‌شود؛ حضور این دو خاصیت در کنار هم این ایده را به ذهن می‌رساند که می‌توان به ساختاری مشابه ساختار هسته‌ی پوسته در نمونه‌های ابررسانا دست یافت که در آن ذرات ابررسانا (با خاصیت پارامغناطیس در دمای اتاق) توسط پوسته‌ای با خاصیت فرومغناطیسی پوشانده شده‌اند. خاصیت فرومغناطیسی در نانوذرات غیرمغناطیسی به حضور جاهای خالی اکسیژن در سطح نانوذرات نسبت داده می‌شود که منجر به توزیع مجدد الکترون‌ها روی یون‌های متفاوت در سطح می‌شود.

### منابع

- [1] Blank, D.H.A.; Kruidhof, H.; Flokstrat, J.; "Preparation of  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  by citrate synthesis and pyrolysis", *Journal of Physics D: Applied Physics* 21 (1988) 226-227.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای ساخت نانوذرات و نمونه‌ی حجمی ابررسانای گرم  $HoBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  از پیش‌ماده سیترات تحت رژیم حرارتی مشابه با دماهای تکلیس متفاوت استفاده کرده‌ایم. در این میان، کم‌ترین دمایی که امکان تشکیل کامل فاز اورتورومبیک ابررسانا با کم‌ترین اندازه‌ی ذرات را فراهم می‌کند،  $860^\circ C$  (نمونه‌ی ۲) است و بهترین دما برای ساخت نمونه‌ی حجمی  $940^\circ C$  (نمونه‌ی ۵) می‌باشد. در دماهای کم‌تر از  $860^\circ C$  (نمونه‌ی ۱)، الگوی پراش اشعه‌ی X عدم تشکیل کامل فاز اورتورومبیک ابررسانا را نشان می‌دهد و در دماهای بالاتر (نمونه‌های ۳ و ۴) با توجه به تصاویر SEM و اندازه‌ی ریزبلورک‌های تعیین شده از رابطه‌ی شرر، دانه‌ها بزرگ‌تر و درشت‌تر شده‌اند.

دمای بحرانی گذار به حالت ابررسانایی که از طریق اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی تعیین شده است،  $T_c=93K$  برای نمونه‌ی حجمی می‌باشد. در ذرات زیر میکرومتری ابررسانا به دلیل تراکم نقایص سطحی و کاهش مقدار اکسیژن دمای گذار کاهش یافته است. بررسی خواص مغناطیسی نمونه‌ها در دمای اتاق نیز حضور خاصیت فرومغناطیسی در دمای اتاق را برای



- [8] Hadjipanayis, G.C., Siegel, R.W.; "Nanophase Materials", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, (1994).
- [9] Xu, X.L.; Guo, J.D.; Wang, Y.Z.; Sozzi, A.; "Synthesis of nanoscale superconducting YBCO by a novel technique", *Physica C* 371 (2002) 129-132.
- [۱۰] سعادت‌ی، م؛ هوائی، م؛ دادمهر، و؛ "ساخت نانوکریستال فاز ارتورمبیک ابررسانای دمای بالا YBCO به روش سل-ژل"، *نهمین کنفرانس ماده چگال انجمن فیزیک ایران*، ۱۳۸۷.
- [11] Hasanain, S.K.; Akhtar, N.; Mumtaz, A.; "Particle size dependence of the superconductivity and ferromagnetism in YBCO nanoparticle", *Journal of Nanoparticle Research* 13 (2011) 1953-1960.
- [12] Raittila, J.; Huhtinen, H.; Paturi, P.; Stepanov, Y.P.; "Preparation of superconducting YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-d</sub> nanopowder by deoxydation in Ar before final oxygenation", *Physica C* 371 (2002) 90-96.
- [13] Shipra Gomathi, A.; Sundaresan, A.; Rao, C.N.R.; "Room-temperature ferromagnetism in nanoparticles of Superconducting materials", *Solid State Communications* 142 (2007) 685-688.
- [2] Sanjinels, R., Ravindranathan, K.T.; Kiwi, J.; "Preparation of monodispersed Y-Ba-Cu-O superconductor via sol-gel methods", *Journal of the American Ceramic Society* 71, 12 (1988) C-512-C-514.
- [۳] زرگروشتری، م؛ بروایه، ل؛ فرید، م؛ "بررسی و مقایسه‌ی ساختار ابررسانای سرامیکی HoBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7δ</sub> با دو شیوه‌ی پخت" *مجله‌ی بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران*، ۱۱، ۲، ۱۳۸۲، ۱۸۵-۱۹۴.
- [4] Sundaresan, A.; Rao, C.N.R.; "Implications and consequences of ferromagnetism universally exhibited by inorganic nanoparticles", *Solid State Communications* 149 (2009) 1197-1200.
- [5] Sundaresan, A.; Bhargavi, R.; Rangarajan, N.; Siddesh, U.; Rao, C.N.R.; "Ferromagnetism as a universal feature of nanoparticles of the otherwise nonmagnetic oxides", *Physical Review B* 74 (2006) 161306(R)-161310(R).
- [6] Saxena, S.S.; Agarwal, P.; Ahilan, K.; Grosche, F.M.; Haselwimmer, R.K.W.; Steiner, M.J.; "Superconductivity on the border of itinerant-electron ferromagnetism in UGe<sub>2</sub>", *Nature* 406 (2000) 587-592.
- [7] Pfliderer, C.; Uhlarz, M.; Hayden, S.M.; Vollmer, R.; Lohneysen, H.V.; Bernhoeft, N.R.; "Coexistence of superconductivity and ferromagnetism in the d-band metal ZrZn<sub>2</sub>", *Nature* 412 (2001) 58-61.