



بررسی خواص ساختاری و مغناطیسی الیاف ابررسانای $YBa_2Cu_3O_{7-8}$ ساخته شده به روش الکتروریسندگی

مرتضی زرگر شوشتری*، عبدالمحمد قلمبر دزفولی، فاطمه هاجم بچاری، یاسمن باقری

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز

(دریافت مقاله: ۹۶/۱۲/۲، نسخه نهایی: ۹۷/۲/۳۱)

چکیده: در این پژوهش، الیاف ابررسانای $YBa_2Cu_3O_{7-8}$ (YBCO) به روش الکتروریسندگی تهیه شدند. نخست ترکیب عنصرسنجی YBCO از استات‌های باریوم، ایتريوم و مس همراه با غلظت‌های مختلف ۵٪، ۶٪، ۷٪، ۷/۲٪، ۷/۵٪، ۱۰٪ پلی وینیل الکل (PVA) تهیه شد. سپس برای تولید الیاف ترکیب پلیمری به دست آمده الکتروریسی شد و در آخر الیاف گرمادهی شدند. برای مشخص کردن گستره‌ی دتکلیس گرما وزن‌سنجی (TGA) انجام شد و همچنین برای مشخصه‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، پراش پرتو X (XRD) و ویژگی‌های ابررسانایی مانند دمای گذار با اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی ac بررسی گردید. نتایج نشان دادند که بهترین الیاف از نظر اندازه قطر و نبود نقص‌های دانه تسبیحی با غلظت پلیمر ۷/۵٪ وزنی نسبت به استات‌ها به دست آمده است. همچنین بهترین دمای گرمادهی برای ساخت الیاف ابررسانای $YBa_2Cu_3O_{7-8}$ ، $930^\circ C$ است. دمای گذار ابررسانایی برای این نمونه $93/2 K$ به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: الیاف ابررسانا؛ $YBa_2Cu_3O_{7-8}$ ؛ الکتروریسندگی.

مقدمه

در سال‌های اخیر، پژوهش پیرامون مواد نانوساختاری به علت کاربردهای فراوانی که دارند، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در این میان نانوساختارهای یک بعدی و سرامیکی مانند نانومیله‌ها، نانوسیم‌ها و نانوالیاف به دلیل استفاده از آنها در نانوایزرها، از اهمیت بیشتری برخوردارند. نانوالیاف را می‌توان با روش‌های متفاوتی مانند خود آرای، جداسازی فازی، قالب گیری، کششی تولید کرد. یکی دیگر از روش‌های بسیار مناسب و کارآمد برای ساخت نانوالیاف سرامیکی، الکتروریسندگی است [۱]. در این روش، با استفاده از شرایط آزمایشگاهی (هندسه‌ی دستگاه، رطوبت هوا و دما)، پارامترهای دستگاهی (پتانسیل اعمالی، غلظت محلول، فاصله‌ی نازل و صفحه‌ی جمع‌کننده و سرعت خروج محلول از سرنگ) و ویژگی‌های پلیمر و حلال

(رسانش، چسبندگی و دمای ذوب) امکان تولید نانوالیاف از اکسیدهای فلزی فراهم می‌گردد [۲]. در این روش، از یک مخلوط پیش ماده سرامیکی با یک پلیمر به عنوان ریسند که معمولاً با فرآیند سل-ژل تولید شده است، استفاده می‌شود. الیاف کامپوزیتی الکتروریسیده شده‌ی به دست آمده، اغلب با گرمادهی در جو هوا، ترکیبات پلیمری خود را از دست می‌دهند و با پخت بیشتر، فرآورده‌ها به صورت الیاف سرامیکی ساخته می‌شوند [۳]. پس از کشف ابررساناهای با دمای گذار (T_c) بالا توسط بدنورز و مولر [۴] و نخستین آنها با T_c بیش از دمای ازت مایع (۷۷ K) یعنی ابررسانای $YBa_2Cu_3O_{7-8}$ (YBCO) [۵]، از جمله مواد سرامیکی که در دهه اخیر با روش الکتروریسندگی بررسی شده‌اند، ابررساناهای سرامیکی دما- بالا (HTSC) هستند [۶-۸]. یکی از موضوعات در

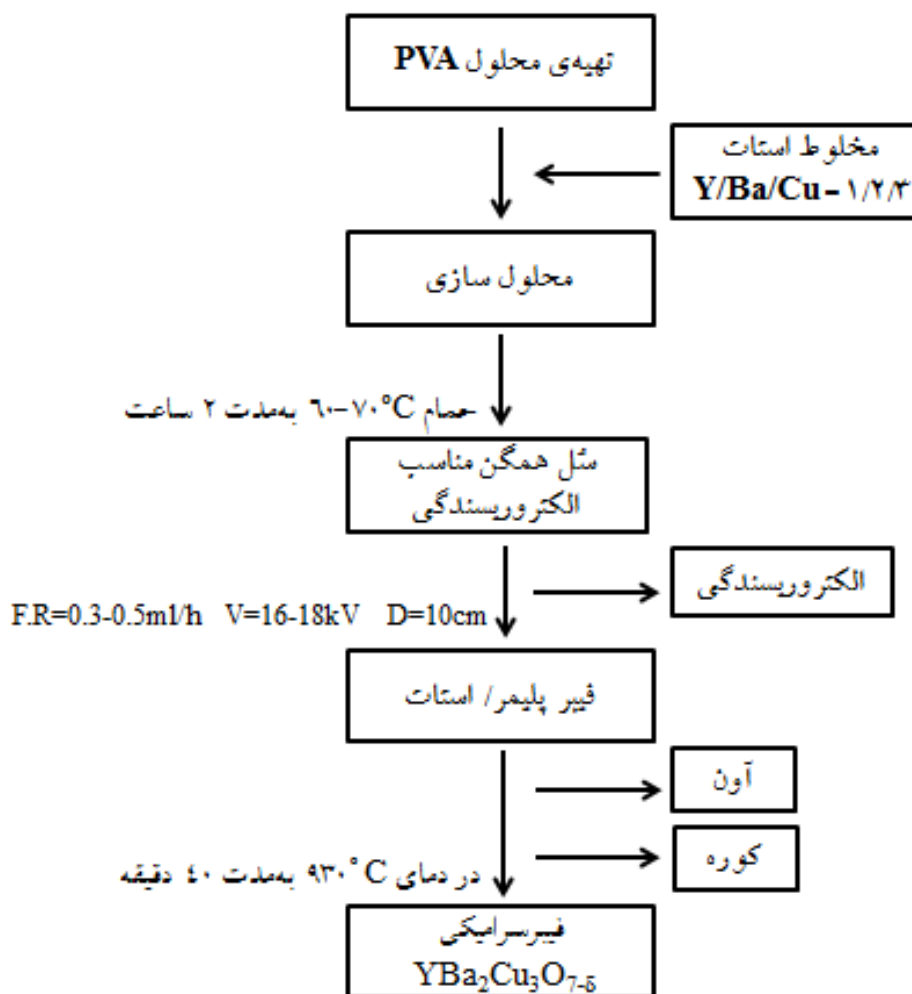
STA 503، پراش سنج پرتو X (XRD) مدل PW 1840 ساخت شرکت فیلیپس و دستگاه پذیرفتاری مغناطیسی ac مشخصه یابی شدند.

روش های تجربی

الیاف $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$

در این روش به طور کلی طی ۳ مرحله ساخته شدند. (۱) تهیه یک سل مناسب از پیش ماده های غیر آلی و پلیمر، برای الکتروریسندگی (۲) الکتروریسندگی محلول توسط برای الکتروریسندگی و به دست آوردن الیاف مرکب از پلیمر و پیش ماده های غیر آلی و (۳) پخت الیاف به دست آمده در دمای مناسب [۳] (شکل ۱).

حوزه ی HTSC که بیشترین پژوهش ها پیرامون آن انجام شده، ابرسانی YBCO است، که به عنوان مثال میزبان آلیش عناصر و افزودن نانوذرات بوده است [۹-۱۱]. ابرسانی $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ برتری های بسیاری در حوزه ی ابرسانی های سرامیکی دارد، از جمله YBCO را می توان به آسانی به صورت تک فاز ساخت و در میدان های مغناطیسی قوی نیز چگالی جریان بالایی دارد [۵]. در این پژوهش، ساخت الیاف $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ به روش الکتروریسندگی با محلول تهیه شده از استات های ایتريم، باریم، مس و پلی وینیل الکل (PVA) پخت شده توسط الگوی گرمادهی مشخص بررسی شده است. در این جا از پلیمر پلی وینیل الکل استفاده شده است که در ساخت الیاف متداول است [۱۲]. (SEM) مدل Leo 1455 VP ساخت کشور آلمان، دستگاه گرمایزن سنجی (TGA) مدل



شکل ۱ طرح وار کلی ساخت الیاف سرامیکی $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ به روش الکتروریسندگی.

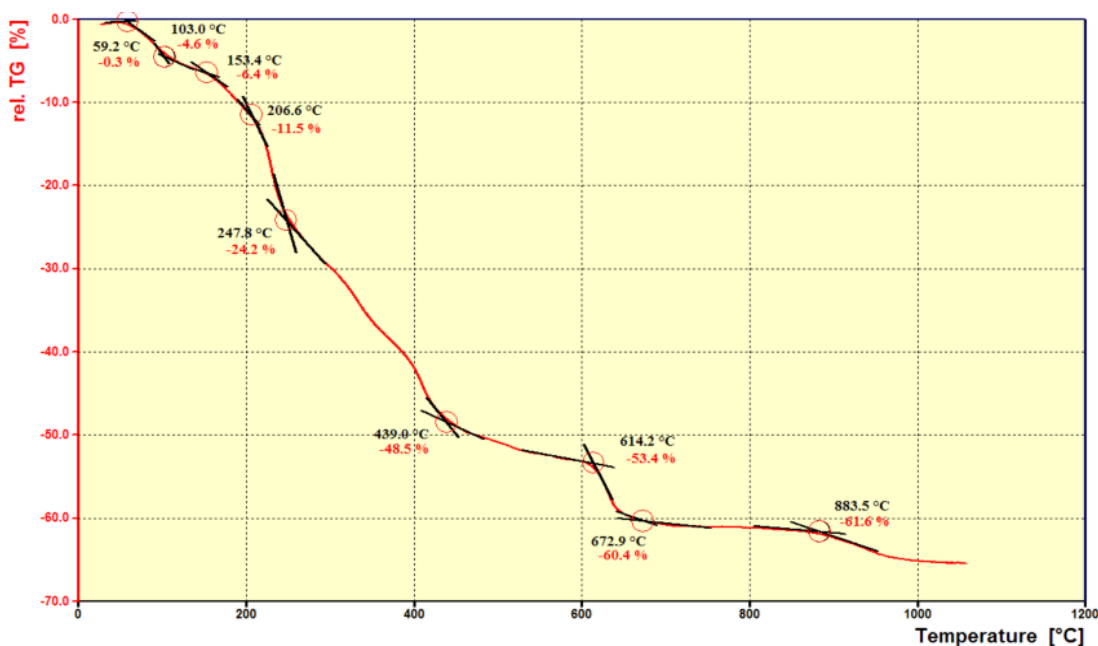
بحث و بررسی

بررسی گرما وزن سنجی

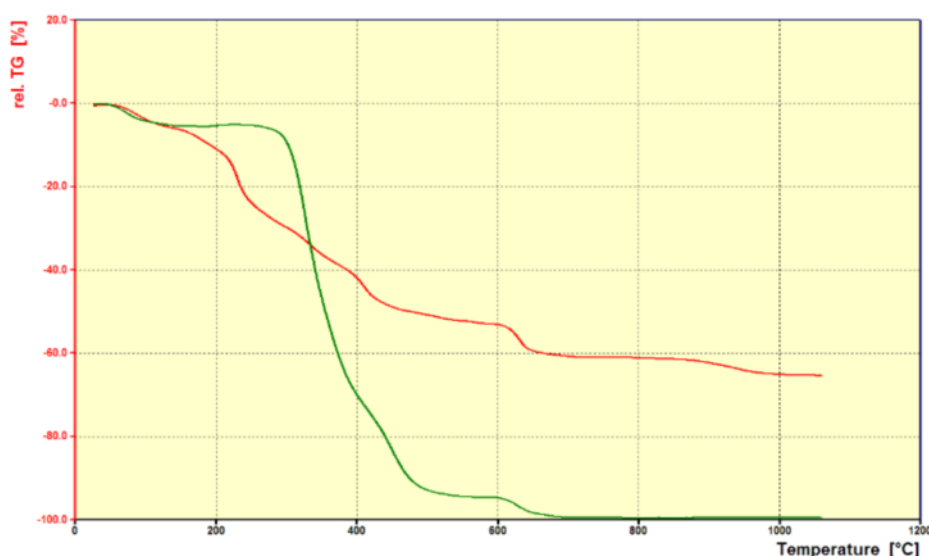
گرما وزن سنجی (TGA)، یک روش تجزیه و تحلیل گرمایی است که در آن رفتار ماده در یک برنامه‌ی دمایی کنترل شده به صورت تابعی از دما، اندازه‌گیری می‌شود. در مرحله‌ی گرما-دهی الیاف پلیمری، قسمت پلیمر PVA و اسیدهای اضافه شده، باید به طور کامل از فرآورده نهایی حذف شوند. بنابراین در این مرحله، دما باید به اندازه‌ی کافی بالا باشد تا این محلول پلیمری بر اثر گرما به طور کامل تبخیر شود. شکل ۲ نتایج TGA مقدار ۵ mg الیاف ترکیبی استات / پلیمر ۷/۵ وزنی را نشان می‌دهد. چنان که مشاهده می‌شود، این منحنی را می‌توان به ۴ بخش تقسیم کرد: نخستین مرحله‌ی کاهش جرم که حدود ۲۴٪ است از دمای حدود ۱۰۰°C آغاز می‌شود و تا دمای ۲۴۷°C ادامه دارد. این مرحله در اصل مربوط به تبخیر سطحی آب موجود در الیاف ترکیبی است. کاهش جرم دوم در گستره دمایی ۲۴۷°C تا ۴۴۰°C رخ می‌دهد. در این مرحله نیز الیاف حدود ۲۴٪ از وزن خود را از دست می‌دهند. این مرحله اغلب ناشی از تجزیه‌ی گروه‌های عاملی استات (CH_3COO) است. در واقع گروه‌های عاملی مربوط به نمک-های فلزی Y، Ba و Cu به صورت ترکیبات فراری مثل بخار آب، گازهای CO_2 و CO از الیاف خارج می‌شوند. Cu_2O از

واکنش Cu و O_2 در این گستره دمایی تشکیل می‌شود. در پایان این مرحله، BaCO_3 از واکنش Ba(OH)_2 و CO_2 که از تجزیه‌ی گرمایی یون‌های استات در دماهای کمتر تولید شده-اند، تشکیل می‌شود [۳، ۸، ۱۳-۱۵]. کاهش جرم سوم که حدود ۱۲٪ است از دمای ۴۴۰°C آغاز می‌شود و تا دمای ۷۲۰°C ادامه دارد. چنان که دیده می‌شود از دمای ۷۲۰°C تا ۸۵۰°C وزن ماده تقریباً ثابت می‌ماند؛ در این گستره، تشکیل فاز $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ آغاز می‌شود. از دمای حدود ۸۵۰°C تا ۹۵۰°C کاهش وزن ناچیزی در حدود ۵٪ مشاهده می‌شود که ناشی از تجزیه‌ی BaCO_3 باقیمانده است. بنابراین پخت الیاف ابررسانا برای تشکیل فاز $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ باید در دمایی صورت گیرد که فاز $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ بالاترین خلوص را داشته باشد. سرانجام با توجه به شکل ۲، کاهش جرم کلی الیاف ترکیبی تا دمای ۹۳۰°C حدود ۶۲٪ است. بنابراین انتظار داریم که وزن فرآورده نهایی الیاف پس از گرمادهی در دمای ۹۳۰°C، حدود ۳۸٪ وزن اولیه باشد.

کاهش جرم در مرحله‌ی دوم در شکل ۳، تقریباً مشابه مرحله‌ی دوم منحنی TGA الیاف PVA خالص است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این کاهش جرم بیشتر ناشی از تجزیه‌ی زنجیره‌های داخلی PVA است.



شکل ۲ نمودار گرما وزن سنجی الیاف ترکیبی پلیمر/استات ۷/۵ وزنی



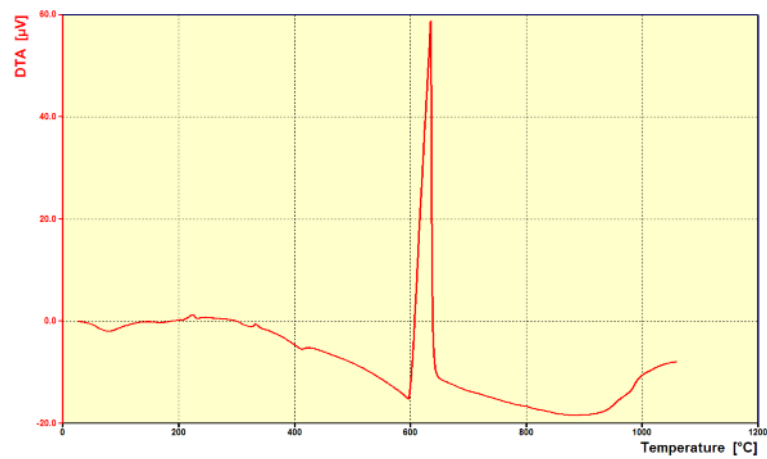
شکل ۳ نمودار گرما وزن سنجی الیاف ترکیبی پلیمر/استات و پلیمر خالص.

غلظت‌های کمتر از ۷/۲٪، الیاف به‌دست آمده دارای نواقص دانه تسبیحی هستند. وجود این نواقص از غلظت کم محلول پلیمر /استات ناشی می‌شود که با افزایش غلظت تا ۷/۲٪، این نواقص تقریباً از بین رفته‌اند. با توجه به تصویرهای SEM دیده می‌شود که با افزایش غلظت، قطر الیاف افزایش می‌یابد و در غلظت‌های بالاتر این روند با سرعت بیشتری ادامه می‌یابد. شکل ۶ نمودار میانگین قطر الیاف نسبت به غلظت محلول پلیمر/ استات را نشان می‌دهد. این افزایش قطر در غلظت‌های بالاتر به دلیل افزایش چسبندگی است. افزایش غلظت محلول پلیمر/ استات باعث افزایش چسبندگی محلول شده که این افزایش، سطح الیاف را نایک‌نواخت کرده و در نتیجه قطر الیاف افزایش یافته است. نایک‌نواختی الیاف از تصویرهای SEM قابل مشاهده است. در این پژوهش، بهترین غلظت برای الیاف تولید شده با ۷/۵٪ وزنی پلیمر PVA، به‌دست آمد. غلظت و نوع پلیمر نقش مهم و کلیدی در یکنواختی و قطر الیاف تولید شده می‌تواند داشته باشد. برای مثال، شکل ۷ تصاویر SEM الیاف تولید شده پلیمر /استات را با پلیمر پلی وینیل پیرولیدون (PVP) برای دو غلظت متفاوت نشان می‌دهد. به دلیل اینکه محلول‌های پلیمری با غلظت حدود ۷٪ در نسبت های بالاتر از استات/پلیمر PVA به حد اشباع می‌رسیدند، یعنی در دمای اتاق به سرعت ته‌نشین می‌شدند، بنابراین در این پژوهش فقط نسبت‌های ۱ و ۲ بررسی شدند. شکل ۸ تصاویرهای SEM نانوالیاف پس از پخت در دمای ۹۳۰°C با نسبت های ۱ و ۲ را نشان می‌دهد.

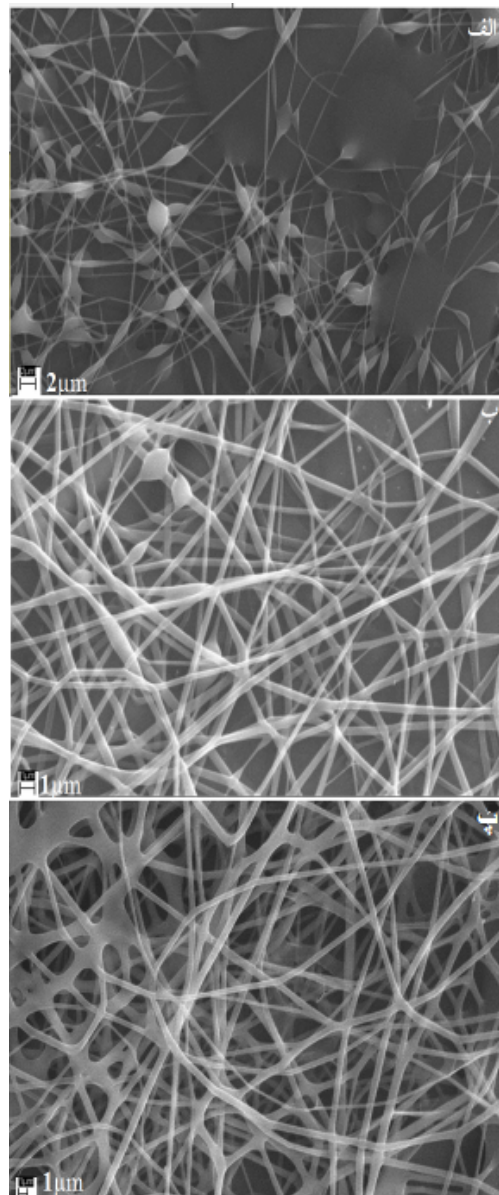
شکل ۴ نتایج گرماسنجی تفاضلی (DTA) الیاف ترکیبی پلیمر/ استات را نشان می‌دهد. این منحنی دارای سه دره‌ی گرماگیر پیرامون ۸۵، ۴۱۵ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و سه قله‌ی گرمازا پیرامون ۲۱۰، ۳۲۰ و ۶۲۰ درجه سانتی‌گراد است. قله‌ی گرماگیر در ۸۵°C ناشی از تبخیر سطحی آب الیاف ترکیبی پلیمر/استات است و قله‌های گرمازای ضعیف پیرامون ۲۱۰°C و ۳۲۰°C را می‌توان به تشکیل ترکیباتی مانند Ba(OH)_2 و Cu_2O از تجزیه‌ی گرمایی یون‌های استات ضمن بالا رفتن دما، نسبت داد. قله‌ی گرماگیر پیرامون ۴۱۵°C مربوط به تجزیه‌ی کامل گروه‌های عاملی استات باقیمانده است. قله‌ی گرماگیر دیگری در ۶۰۰°C دیده می‌شود که ناشی از خشک شدن کامل الیاف و از دست دادن رطوبت کامل درون الیاف است و قله‌ی بزرگ گرمازای موجود در ۶۲۰°C نشان دهنده‌ی اکسایش پلیمر PVA است و بنا بر نتایج برآمده از XRD که در ادامه می‌آید، این قله مربوط به تبلور کامل فازهای Y_2O_3 ، CuO و BaCO_3 در این دماست.

بررسی پارامتر غلظت محلول پلیمر /استات

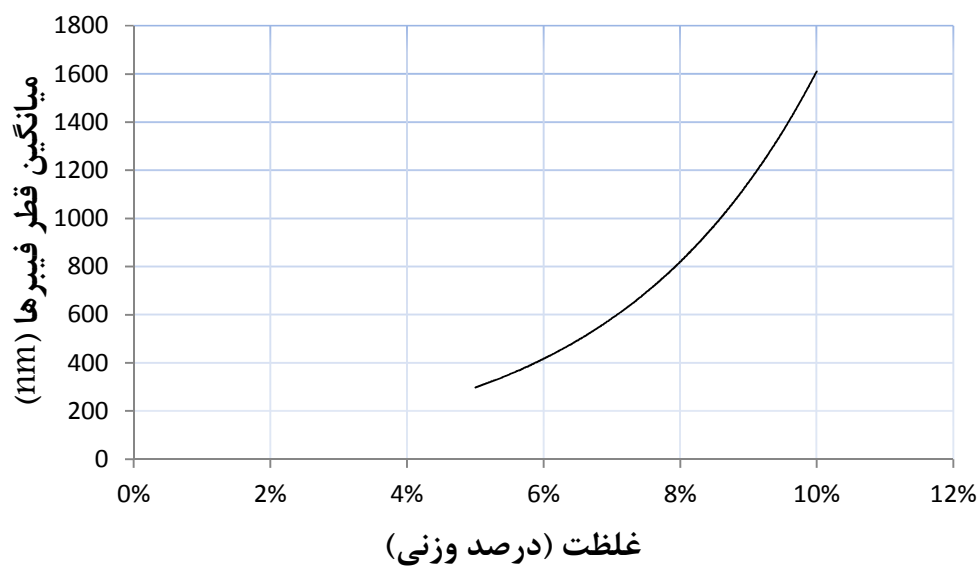
از مهم‌ترین عوامل موثر بر الکتروریسندگی غلظت محلول پلیمر /استات است. این پارامتر یکی از عوامل مهم در کنترل قطر و نواقص دانه تسبیحی در الیاف است. در این پژوهش، الیافی با غلظت ۵٪، ۶٪، ۷٪، ۷/۲٪، ۷/۵٪ و ۱۰٪ وزنی با پلیمر PVA تولید شد. ریختار نمونه‌ها توسط تصویرهای SEM که در شکل ۵ آورده شده‌اند، بررسی شد. تصویرها نشان می‌دهند که در



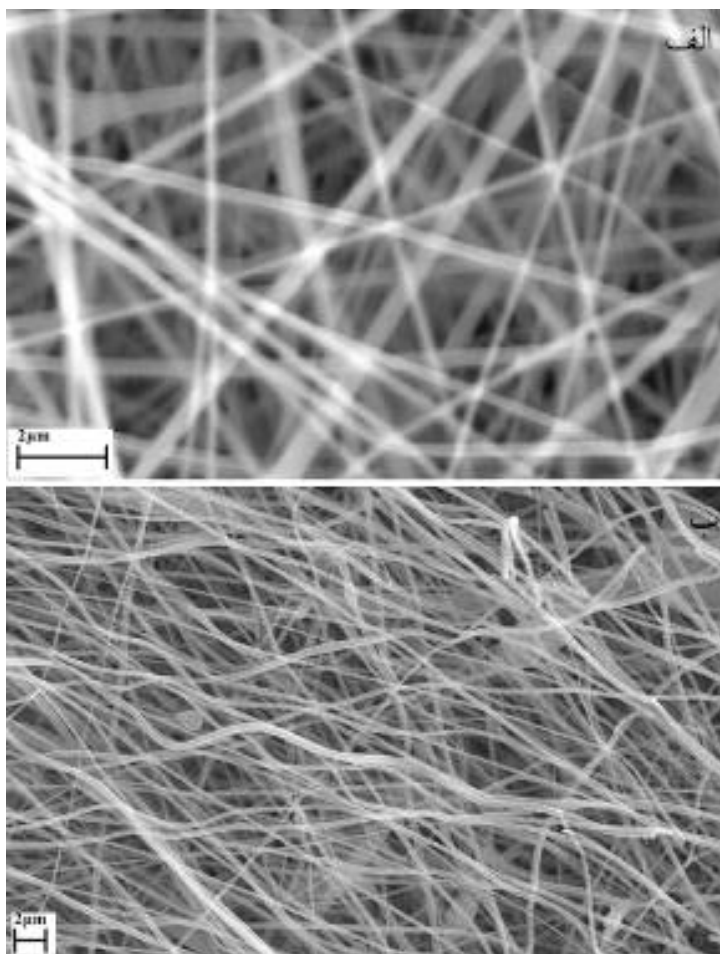
شکل ۴ منحنی DTA الیاف ترکیبی پلیمر/استات ۷/۵ وزنی.



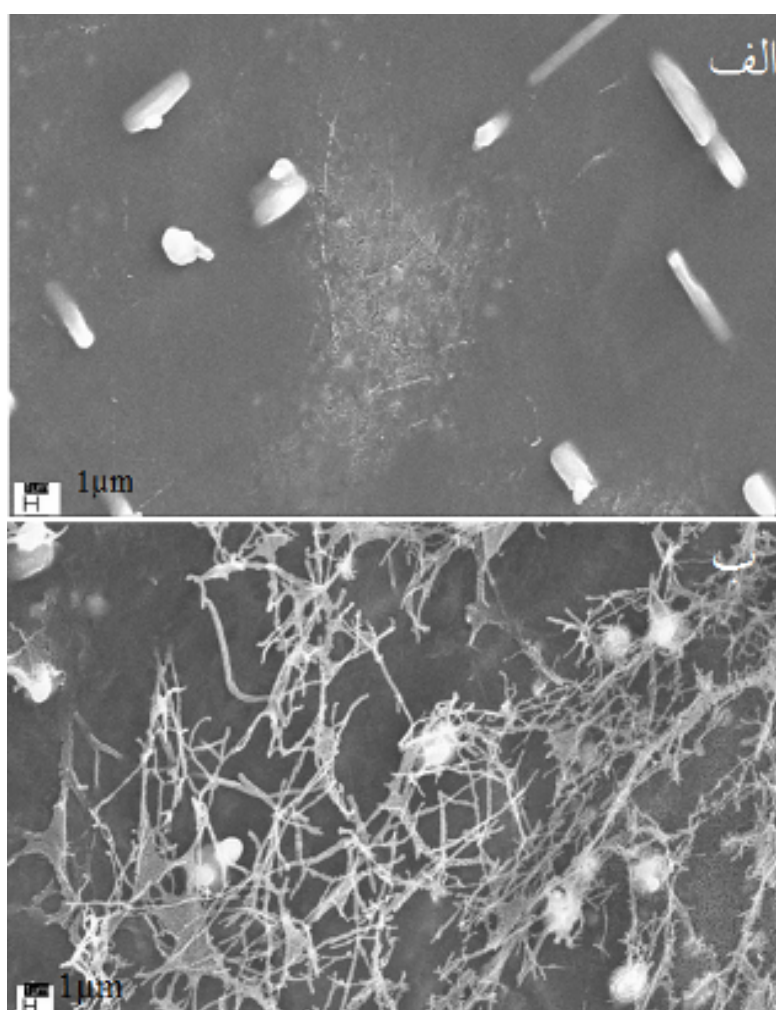
شکل ۵ تصویر SEM الیاف الکتروپسی شده با پلیمر PVA با غلظت الف (۵٪ وزنی ب) ۷٪ وزنی و پ (۵٪ درصد وزنی).



شکل ۶ نمودار میانگین قطر الیاف برحسب غلظت محلول پلیمر/ استات.



شکل ۷ تصویر SEM الیاف الکترورسی شده با پلیمر PVP با غلظت الف) ۸٫۵٪ وزنی و ب) ۱۰٪ وزنی.



شکل ۸. تصویر SEM نانوالیاف پس از پخت در دمای 930°C با نسبت استات به پلیمر (الف) ۱ و (ب) ۲.

گرمادهی الیاف

ابتدا نمونه ابررسانای حجمی از مخلوط پودرهای استات و پلیمر PVA ساخته شد. برای این منظور محلول پلیمر/استات که شامل ۵/۱ گرم مخلوط پلیمر/استات بود در دمای 70°C به مدت ۱۲ ساعت درون کوره الکتریکی قرار داده شد. از فرآورده به دست آمده، قرصی تهیه شد. سپس نمونه در دمای 930°C در کوره مکعبی گرمادهی شد. در شکل ۹ الگوی پراش پرتو ایکس این نمونه دیده می شود که همخوانی خوبی با کارت JCPDS به شمار ۱۸۷۵-۰۸۱-۰۱ مربوط به $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ دارد. برای مشاهده ی خاصیت ابررسانایی، آزمون اثر مایسنر برای نمونه ی حجمی انجام شد که معلق بودن آهنربا بالای نمونه به خوبی نشان داده شد. ساخت نمونه حجمی به دلیل بررسی آزمون ابرسانایی محلول پلیمری پیش از الکتروریسندگی بوده است.

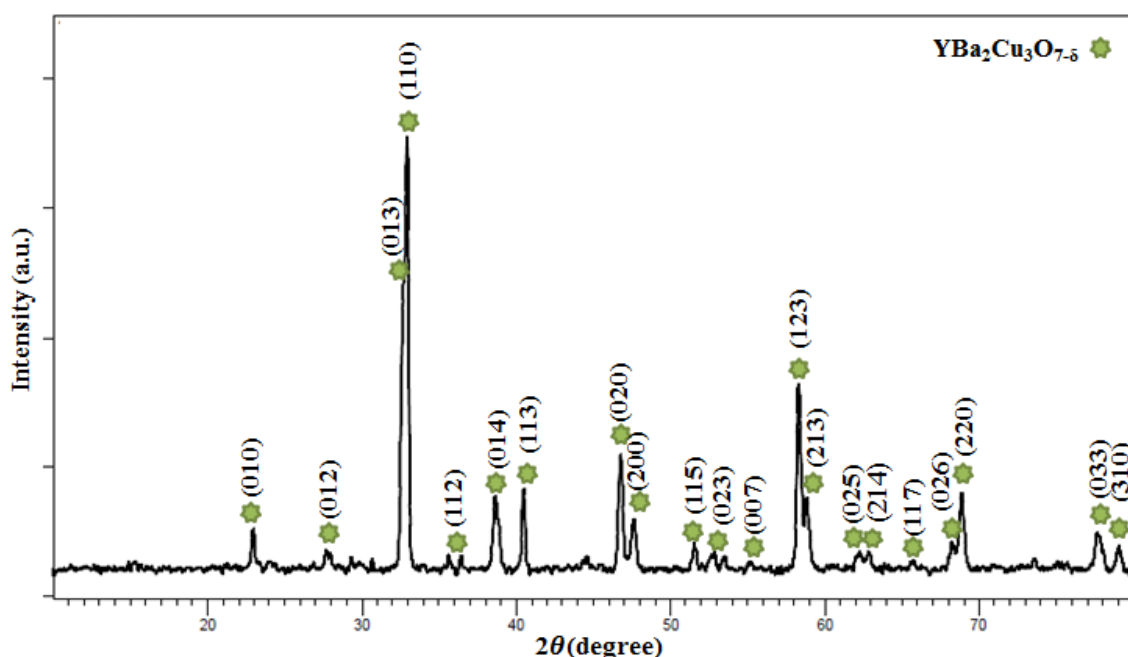
پس از ساخت ابررسانای حجمی، الیاف الکتروریسیده با پلیمر PVA، به مدت ۱۲ ساعت درون کوره الکتریکی 70°C خشک شدند. سپس آن ها از روی ورقه ی آلومینیوم جدا شده و درون بوته ای از جنس کوارتز قرار داده و براساس برنامه ی شکل ۱۰ درون کوره پخت شدند. شکل ۱۱ تصویر نمونه را پیش و پس از پخت نشان می دهد. دیده می شود که حجم نمونه پس از پخت به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است.

با توجه به اهمیت دمای واکنش در تشکیل فاز ابررسانای YBCO، ابتدا اثر پخت نمونه ها در دماهای 70°C ، 300°C ، 400°C ، 500°C ، 700°C و 930°C درجه سانتی گراد با استفاده از الگوی XRD که در شکل ۱۲ نشان داده شده است و تحلیل آنها توسط نرم افزار X'Pert بررسی شد. مشخص شد که بلافاصله پس از پخت تا دمای 300°C قله ی نیم بلورین PVA ناپدید و قله های مربوط به فازهای Cu_2O ، Cu

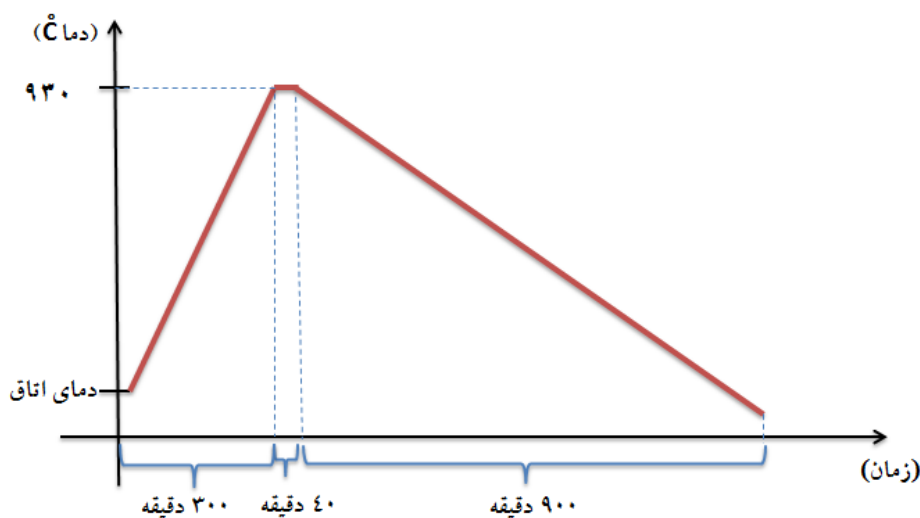
گرمادهی شده تا دمای 930°C با الگوی ثبت شده در کارت استاندارد به شماره ۱۸۷۵-۰۸۱-۰۱، دیده می‌شود که ساختار $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ راستگوشی است. تک فاز بودن نمونه تأیید کننده‌ی مناسب بودن دمای پخت است. شکل ۱۳ الگوی پراش نمونه‌ی گرمادهی شده در دمای 930°C درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. با استفاده از داده‌های الگوهای پراش بدست آمده و به کمک رابطه‌ی شرر [۱۶] (معادله (۱)) می‌توان اندازه‌ی متوسط بلورک‌های YBCO را محاسبه کرد:

$$D = 0.9\lambda / \beta \cos\theta \quad (1)$$

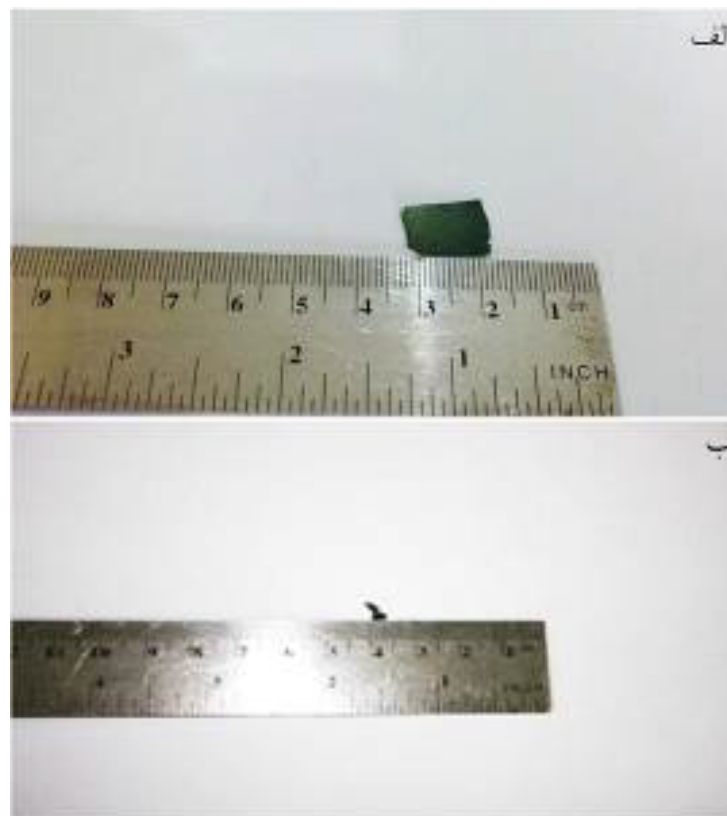
$\text{Ba}(\text{OH})_2$ در این دما مشاهده شد. در گستره دمایی $300-500^{\circ}\text{C}$ فاز $\text{Ba}(\text{OH})_2$ با واکنش با CO_2 ، فاز BaCO_3 را تشکیل می‌دهد. در دمای 500°C همه‌ی فازهای تشکیل شده در دماهای کمتر به فازهای CuO ، Y_2O_3 و BaCO_3 تبدیل می‌شوند و تا دمای 700°C این فازها کاملاً متبلور می‌شوند. از دمای 720°C به بالا، تشکیل فاز YBCO آغاز می‌شود. بنابراین در الگوی پراش پرتوی ایکس در دمای 800°C ، قله‌های مربوط به فازهای CuO ، Y_2O_3 و BaCO_3 حذف می‌شوند. از مقایسه‌ی الگوی به‌دست آمده از الیاف



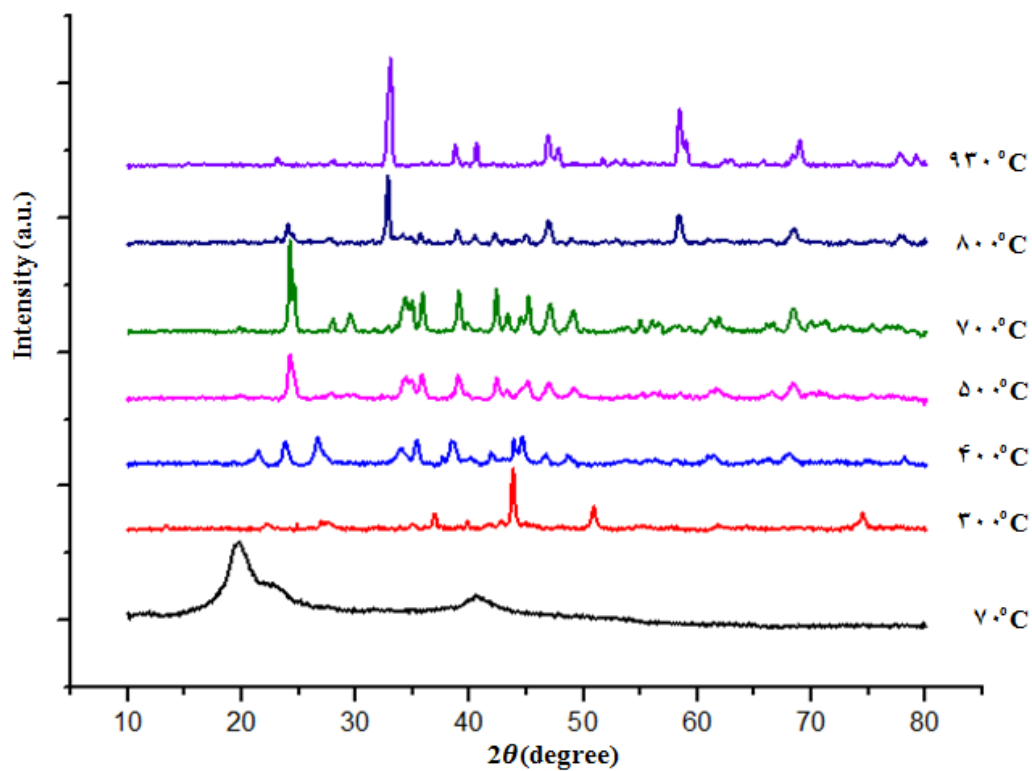
شکل ۹ الگوی پراش پرتوی ایکس مربوط به نمونه‌ی حجمی تولید شده در دمای 930°C .



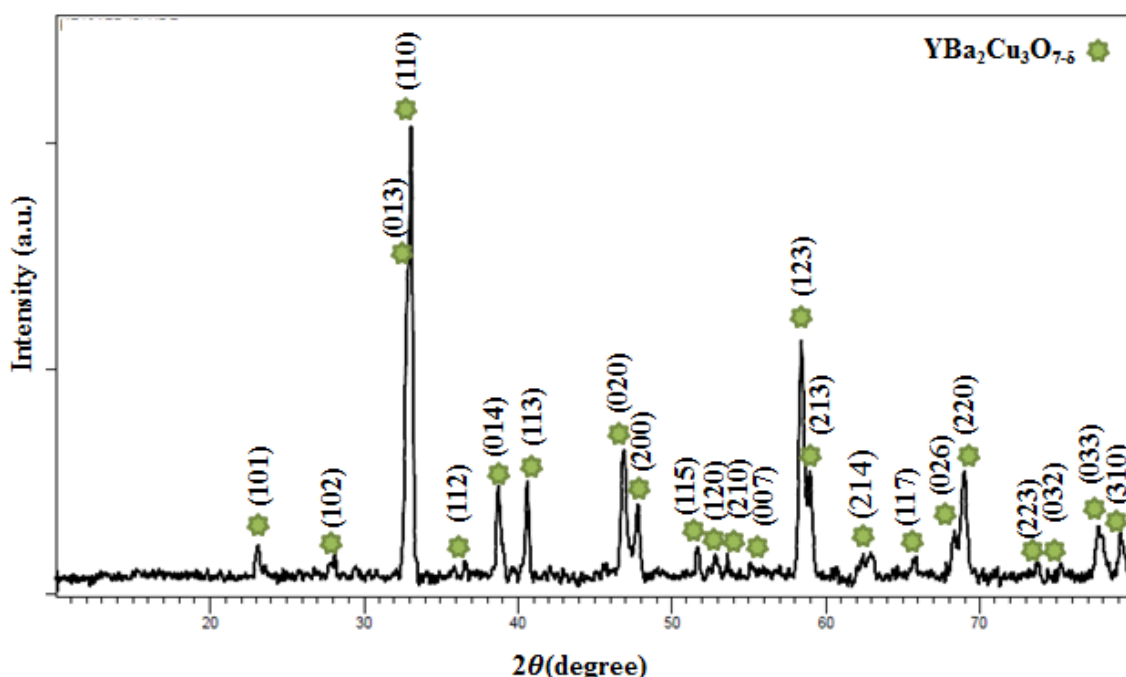
شکل ۱۰ نمودار گرمادهی الیاف YBCO.



شکل ۱۱ تصویر نمونه، الف) پیش و ب) پس از پخت در دمای 930°C .



شکل ۱۲ الگوی پراش پرتوی ایکس مربوط به الیاف تولید شده در دماهای مختلف.



شکل ۱۳ الگوی پراش پرتوی ایکس مربوط به الیاف تولید شده در دمای 930°C .

های شبکه نمونه‌ها با استفاده از داده‌های بدست آمده از الگوی پراش پرتوی ایکس در جدول ۱ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهند که متوسط اندازه‌ی بلورک‌ها در نمونه حجمی بزرگتر از الیاف است.

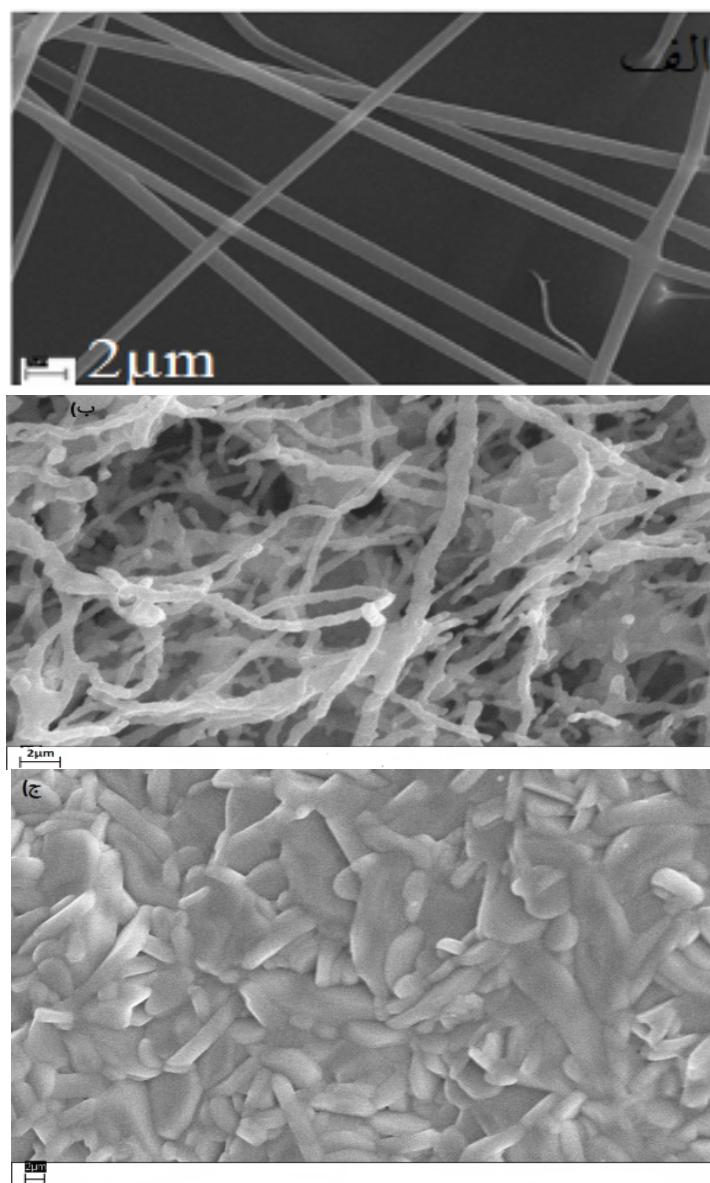
پذیرفتاری مغناطیسی ac الیاف ابررسانا

برای بررسی ویژگی‌های مغناطیسی الیاف ابررسانا، پذیرفتاری مغناطیسی ac آنها اندازه‌گیری شد. در شکل ۱۵ تغییرات مؤلفه‌ی حقیقی χ' و موهومی χ'' پذیرفتاری مغناطیسی ac بر حسب دمای نمونه نشان داده است. قسمت حقیقی منحنی پذیرفتاری اطلاعاتی پیرامون رفتار دیا مغناطیسی نمونه را نشان می‌دهد و قسمت موهومی منحنی نشان دهنده‌ی چگونگی جفت‌شدگی دانه‌های ابررساناست. چنان که دیده می‌شود منحنی χ' بر حسب دما دو مرحله‌ای است که مشخصه ابررسانای سرامیکی با گذار دمای بالا و بازتاب کننده‌ی دماهای گذار درون‌دانه‌ای (T_c) و گذار بین‌دانه‌ای (T_{cj}) است. مرحله‌ی اول گذار درون دانه‌ای که با افت اولیه همراه است و مرحله‌ی دوم گذار بین دانه‌ای است که با کاهش بیشتر دما روی می‌دهد. دلیل این امر وجود اختلاف زیاد در میدان مغناطیسی بحرانی بین دانه‌ها و درون دانه است. میدان بحرانی بین دانه‌ای بسیار کوچکتر از میدان خود دانه‌هاست و بنابراین

در این رابطه $\lambda = 154.06 \text{ \AA}$ طول موج پرتوی ایکس، β پهنای قله در نیم شدت بیشینه بر حسب رادیان و θ زاویه قله پراش است. با استفاده از داده‌های بدست آمده از الگوی پراش پرتوی ایکس نمونه‌ی گرماده‌ی شده در دمای 930°C ، اندازه‌ی متوسط بلورک‌ها 50 nm و ثابت‌های شبکه‌ی راستگوشی نمونه $a = 3.812 \text{ \AA}$ ، $b = 3.880 \text{ \AA}$ و $c = 11.640 \text{ \AA}$ و حجم یاخته یک‌گانه برابر با $172.152 \text{ \AA}^3$ است. برای بررسی ریزساختار و ریخت شناسی الیاف در مرحله‌های مختلف تشکیل ابررسانای YBCO، تصاویر SEM بررسی شدند (شکل ۱۴). شکل الف ۱۴ نشان می‌دهد که الیاف ترکیبی استات/پلیمر پیش از پخت جهت‌گیری خاصی ندارند و دارای سطح صاف و یکنواختی هستند که ناشی از وجود پلیمر در آنها است. میانگین قطر آنها 768 nm است. در شکل ب ۱۴ دیده می‌شود که الیاف در اثر پخت تا دمای 800°C منقبض شده و قطر آنها کاهش یافته است (میانگین 207 nm). این کاهش ناشی از تجزیه گرمایی ترکیبات PVA و استات‌هاست. چنان که دیده می‌شود در شکل ۱۴ پ پس از پخت الیاف تا دمای 930°C ، قطر آنها تا چند میکرون افزایش یافته است. این افزایش می‌تواند ناشی از بزرگ شدن تدریجی بلورهای ابررسانای YBCO از دمای 800°C به 930°C باشد. متوسط اندازه‌ی بلورک‌ها و ثابت-

مرحله‌ای مؤلفه حقیقی χ' در منحنی مشتق آن بر حسب دما (شکل ۱۶) نمایان تر است. چنان که دیده می‌شود، نمودار دارای دو قله در دماهای $T_{cj} = 86.4K$ و $T_c = 93.2K$ است. قله با دمای بالاتر (T_c) نشان دهنده‌ی گذار ابررسانایی درون دانه‌ها است و قله‌ی با دمای پایین‌تر (T_{cj}) مربوط به زوج‌شدگی بین‌دانه‌ای (گذار الیاف $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$) است. دمای T_c به دست آمده هم‌خوانی خوبی با کار دیگران [۱] و همچنین برای مقدار به دست آمده با نمونه‌های حجمی YBCO دارد.

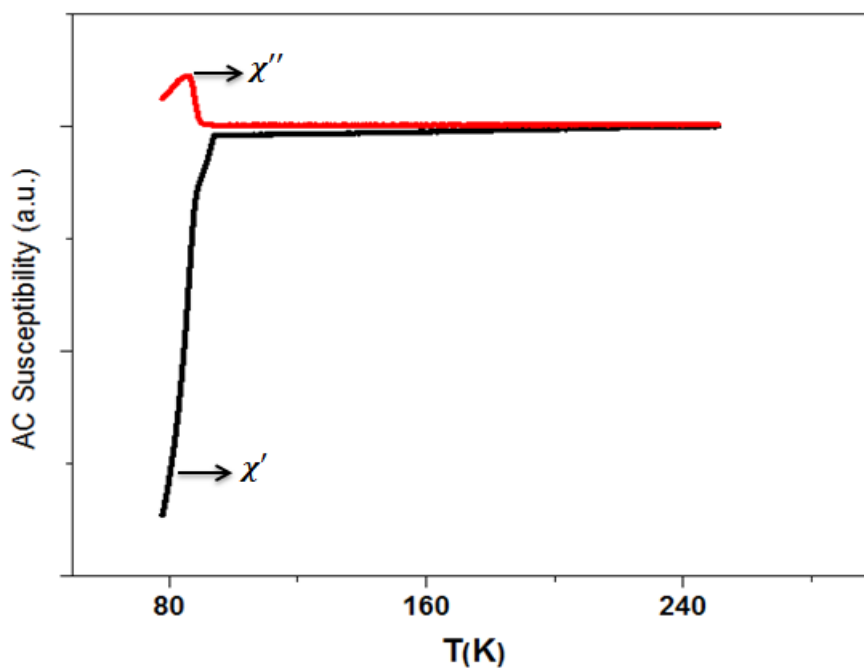
شار مغناطیسی ابتدا به قسمت بین دانه‌ها نفوذ می‌کند، یعنی در دماهای بالا و درست زیر دمای T_c ابتدا دانه‌های درون نمونه ابررسانا می‌شوند و با کاهش بیشتر دما، ارتباط‌های بین‌دانه‌ای برقرار شده و نمونه تقریباً حالت دیامغناطیس کامل پیدا می‌کند. در قسمت موهومی پذیرفتاری نیز قله‌ای در دمای $T_p = 85.6K$ دیده می‌شود که نشان دهنده‌ی اتلاف انرژی در نمونه است. این قله زمانی شکل می‌گیرد که میدان به کل نمونه نفوذ کرده باشد. هر چه این قله باریک‌تر و تیزتر باشد، اتلاف در ابررسانا کمتر و اتصال‌های بین دانه‌ای بهتر است. گذار دو



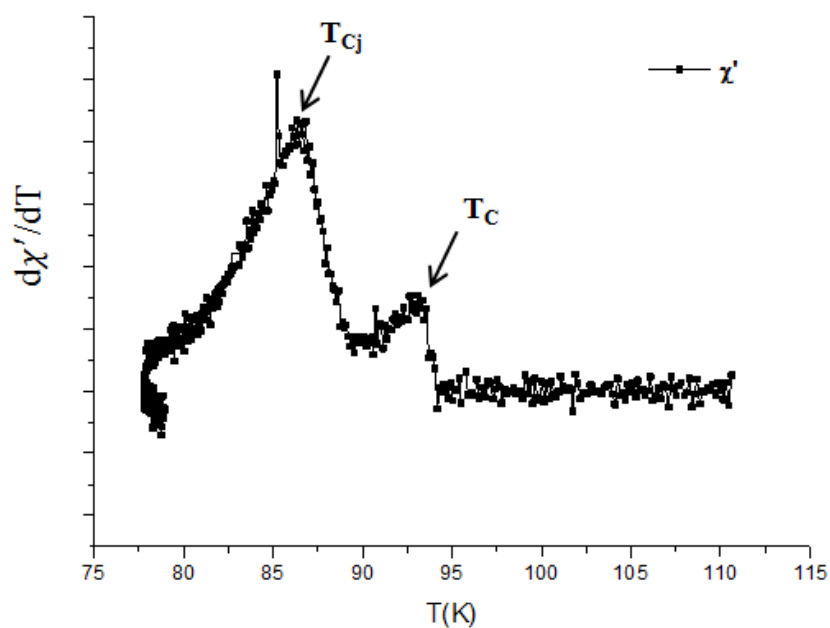
شکل ۱۴ تصویرهای SEM الیاف پس از (الف) الکتروریسندگی، (ب) پخت در دمای $800^\circ C$ و (پ) پخت در دمای $930^\circ C$.

جدول ۱ اندازه متوسط بلورک‌ها و ثابت‌های شبکه نمونه حجمی و الیاف پخت شده در دمای ۹۳۰ °C.

نمونه	a(Å)	b(Å)	c (Å)	حجم یاخته یکه $(\text{\AA})^3$	متوسط اندازه‌ی بلورک‌ها (nm)
فیبر	۳٫۸۱۴	۳٫۸۰	۱۱٫۶۴۰	۱۷۲٫۱۵۲	۵۰
حجمی	۳٫۸۱۴	۳٫۸۴	۱۱٫۶۲۸	۱۷۲٫۲۵۴	۵۶



شکل ۱۵ منحنی پذیرفتاری مغناطیسی ac الیاف ابررسانا.



شکل ۱۶ مشتق قسمت حقیقی پذیرفتاری مغناطیسی نسبت به دما.

برداشت

نتایج بررسی الیاف $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ساخته شده در این پژوهش نشان داد که:

۱- الیاف تولید شده در PVA با غلظت‌های ۰.۵٪، ۰.۶٪ و ۰.۷٪ وزنی دارای نواقص دانه تسبیحی هستند و در غلظت حدود بیش از ۰.۷٪ این نواقص از بین می‌روند. با افزایش غلظت پلیمر PVA، قطر الیاف افزایش می‌یابد و در غلظت‌های بالاتر روند افزایش بیشتر است. بهترین الیاف از نظر اندازه‌ی قطر و نبود نواقص دانه‌تسبیحی با غلظت ۰.۷٪ به دست آمد.

۲- با گرمادهی الیاف در دمای $930^\circ C$ ، نمونه‌ی $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ تک‌فاز با ساختار راستگوشی است. اندازه‌ی بلورک‌های الیاف با افزایش دمای پخت از $800^\circ C$ تا $930^\circ C$ به‌طور قابل توجه‌ای افزایش می‌یابد که این نشان دهنده‌ی بلوری شدن بیشتر نمونه با افزایش دماست. اندازه‌ی بلورک‌ها در نمونه‌ی حجمی $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ بزرگتر از نمونه‌ی الیافی آن است. به‌دلیل تشکیل ساختار بلوری ابررسانا، اندازه‌ی الیاف اولیه، پس از گرمادهی در دمای $930^\circ C$ بزرگتر شده و تبدیل به میکروالیاف ابررسانا شدند؛ یعنی متوسط قطر آنها از حدود 670 nm به $3\text{ }\mu\text{m}$ افزایش پیدا کرد.

۳- نمونه‌های $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ساخته شده هم در حالت حجمی و هم در حالت الیافی به‌هم تنیده، اثر مایسنر را در دمای ازت مایع به‌خوبی نشان دادند.

۴- الیاف ابررسانا دارای گذار درون‌دانه‌ای و بین‌دانه‌ای هستند. گذار درون‌دانه‌ای در دمای $93/2\text{ K}$ و گذار الیاف $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ در دمای $86/4\text{ K}$ صورت گرفته است.

قدردانی

نویسندگان از حمایت مالی دانشگاه شهید چمران اهواز از این کار پژوهشی کمال تشکر را دارند.

مراجع

- [1] Edgar A. D., Nicholas G. R., Pedro A. Q., Meisel M. W., Juan C. N., "Electrospinning of superconducting YBCO nanowires", Supercond. Sci. Technol., 28 (2015) 1-7.
- [2] Wan F. ko, Y., "Introduction to Nanofiber Material", Cambridge University Press, United Kingdom (2014) 45-55.
- [3] Li D., McCann J. T., Xia Y., Marquez M., "Electrospinning: A Simple and Versatile

Technique for Producing Ceramic Nanofibers and Nanotubes", J. Am. Ceram. Soc., 89 (2006) 1861-1869.

[4] Bednorz J. G., Muller K. A., "Possible high T_c Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System", Z. Phys. B 64 (1986) 189-193.

[5] Wu M. K., Ashburn JR., Torng C.J., Hor P.H., Mend R.L., Gao L., Huang Z. J., Wan Y. Q., Chu C. W., "Superconductivity at 93K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure", Phys. Rev. Lett., 58 (1987) 908-910.

[6] Cu X. M. I, Lyoo W. S., Son W. K., Park D. H., Choy J. H., Lee T. S., Park W. H., "Fabrication of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ superconducting nanofibres by electrospinning", Supercond. Sci. and Technol. (2006) 1264-1268.

[7] Greenberg Y., Lumelsky Y., Silverstein M. S., Zussman E., "YBCO nanofibers synthesized by electrospinning a solution of poly (acrylic acid) and metal nitrates", J Mater Sci, (2008) 43:1664-1668

[8] Shen Z. J., Wang Y., Chen W., Fei L., Li K., Chan H. L. W., Bing L., "Electrospinning preparation and high-temperature superconductivity of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ nanotubes", J Mater Sci 48 (2013) 3985-3990.

[9] Yazdaniyan S., Tajabor N., Behdani M., "The synthesis of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ nanocrystalites via mechanochemical alloying & study transition temperature of $xMnO_2 + (1-x) YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ compounds ", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 19 (2011) 219-226.

[10] Khoshnevisan B., Farbod M., "Study of Potassium content and its role in doped superconductor $YBa_{2-x}K_xCu_yO_{6+x}$ with Rietveld analysis of XRD patterns", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 17 (2009) 103-108.

[11] Amirabadizade A., Arabi H., Komeili M., Hoseinzade S., Momeni larimi Z., "Influences of Gd_2O_3 nanoparticle additions on the microstructure and superconductivity of YBCO", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 21 (2014) 757-764.

[12] WU H., PAN W., LIN D., LI H., "Electrospinning of ceramic nanofibers: Fabrication, assembly and applications", Journal of Advanced Ceramics 1 (2012) 2-23.

Superconductive Nanofibers by Electrospinning", Current Nanoscience, (2010) Volume 6, Number 4.

[16] Scherrer P., "Bestimmung der Grösse und der inneren Struktur von Kolloidteilchen mittels Röntgensrahen [Translated English title: Determination of the size and internal structure of colloidal particles using X-rays]. *Nachr Ges Wiss Goettingen*", Math-Phys Kl. 1918 (1918) 98-100.

[13] Alikhanzadeh-Arani S., Salavati-Niasari M., Almasi Kashi M., "Influence of the utilized precursors on the orphology and properties of $Yba_2Cu_3O_{7-y}$ superconducting nanostructures", *Physica C* 388, (2013) 30-34.

[14] Kozuka H., Umeda T., Jin J., Monde T., Sakka S., "Application of Sol-Gel Processing to Preparation of High Temperature Superconducting Materials", *Bulletin of the Institute for Chemical Research, Kyoto University* 66 (2), (1988) 80-92.

[15] Ibrahim U. Ozturk K., Levent Aksu M., Gokmese Faruk M., "Fabrication and Characterization of Boron Supported YBCO