نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال ششم، شماره1، بهار و تابستان 1399، صفحه 113-97

# سنتز بهینه ماده ابررسانای YBCO و تولید حسگرهای پیشرفته دما بالای SQUID با هدف تشخیص عیوب زیرسطحی عمیق به کمک روش غیرمخرب جریان گردابی

*مهران رستمی، حمید خرسند* *

1-دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

(دریافت مقاله: 1398/04/19 ؛ پذیرش مقاله: 1398/06/19)

**چکیده**

روش معمولی جریان گردابی برای بررسی غیرمخرب اتصالات جوشکاری دارای محدودیت‌هایی است که می‌تواند عیوب را تا عمق خاصی در زیر سطح نمونه مورد بررسی قرار دهد و برای تعیین عیوب عمیق مناسب نیست. این محدودیت با استفاده از سنسور ابررسانای SQUID می‌تواند رفع شود. ترکیب غیراستوکیومتری YBCO به دلیل دمای ابررسانایی و چگالی جریان بحرانی مطلوب در ساخت سنسورهای بسیار حساس SQUID کاربرد دارد. خواص و دمای ابررسانایی این ترکیب وابسته به تولید ترکیب خالص و همگن و با نسبت دقیق این ترکیب غیراستوکیومتری در فاز Y:123 است. در این تحقیق به تولید این ماده ابررسانای دما بالا به کمک روش سل ژل خود احتراق از نیترات عناصر تشکیل‌دهنده ترکیب پرداخته شد و با بهره‌گیری از تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی، وزن‌سنجی گرمایی، طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس و پراش انرژی اشعه ایکس، شرایط بهینه تکلیس فاز Y:123 تعیین شد. در این شرایط فاز ابررسانای Y:123 تولید و ناخالصی حذف شد و از طرف دیگر نیاز به عملیات حرارتی بعدی و همین‌طور فرایند هزینه‌بر آنیل حذف شد. در نهایت شرایط بهینه رسوب‌دادن این ترکیب با فرایند PLD روی زیرلایه مناسب جهت تولید حسگر اسکوییدی بررسی شد و یک روش بهینه برای این رسوب‌دهی ارائه گردید. یک روش بهینه جهت الگودهی و تولید سنسورهای ابررسانای دما بالا از جنس YBCO برای بررسی غیرمخرب عیوب جوشکاری ارائه شد و همچنین روش بررسی غیرمخرب به کمک این سنسورها بررسی شد.

**کلمات کلیدی**: ابررسانای دما بالا، حسگر اسکوییدی، YBCO، ویفر زیرلایه $SrTiO_3$، سل ژل خود احتراق، بررسی غیرمخرب.

# Optimal SQUID based non-destructive test for detecting sub-surface defects with the help of advanced SQUID superconducting sensors and an experimental approach for optimal production method of these sensors from the YBCO superconductor materials

**M. Rostami, H. Khorsand***

Faculty of Materials Science and Technology, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

(Received 10 July 2019 ; Accepted 9 September 2019)

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: hkhorsand@kntu.ac.ir

[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

**Abstract**

The conventional eddy current method for non-destructive inspection of welding joints has limitations that can examine defects to a certain depth below the surface of the sample and is not suitable for determining deep defects. This limitation can be overcome using the SQUID superconducting sensors. The nonstoichiometric composition of YBCO due to its superconducting temperature and desired critical current density is widely used including the use of highly sensitive SQUID sensors. The properties and temperature of the superconducting compound are related to producing pure and homogeneous with a precise ratio of this non-stoichiometric compound in phase Y:123. In this study, the production of this high-temperature superconductor was carried out using a sol gel self-combustion process with nitrate forming elements and then produced powder analyzed by TGA, XRD, scanning electron microscopy, and EDX method and optimum conditions for production of Y:123 superconducting nanopowder were obtained by sol gel self-combustion method. In these conditions, the superconducting phase Y:123 was produced and the impurities were removed and on the other hand, the need for further thermal treatment and the costly annealing process were removed. Finally, optimal conditions for deposition of this compound on the substrate for producing the SQUID sensor were investigated and an optimal condition was presented to produce thin layer YBCO deposited by pulsed laser deposition method and patterned to produce SQUID High temperature Superconductor SQUID sensor. Finally the SQUID based NDT test for detecting sub-surfaces defects was investigated.

**Keywords:** High temperature superconductor, SQUID, YBCO, $SrTiO_3$ substrate, Sol-gel self-combustion, Non-destructive test.

## 1- مقدمه

آزمون جریان گردابی معمولی یک آزمون غیرمخرب محبوب برای تشخیص عیوب زیرسطحی در موادی چون آلومینیوم، فولاد زنگ‌نزن و موارد مشابه می‌باشد. در این روش شدت جریان گردابی تولیدشده در ماده با زمان به صورت تابعی از عمق عیوب زیرسطحی اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین عمق نقایص قابل تشخیص محدود خواهد بود. در روش معمولی با کاهش فرکانس به منظور دستیابی به عیوب عمیق، شدت سیگنال کاهش می‌یابد. روش دیگر برای افزایش قدرت سیگنال تقویت کویل با تعداد بیشتر سیم‌پیچی است. در این صورت نسبت سیگنال به نویز و وضوح سیستم کاهش خواهد یافت. در سیستم‌های غیرمخرب بر مبنای حسگرهای اسکوییدی ابررسانای دمابالا، حسگر نسبت سیگنال به نویز بسیار بالاتری در فرکانس‌های پایین نشان خواهد داد [1-6].

از آن‌جایی‌که حساسیت حسگرهای اسکوییدی از فرکانس عملکردی مستقل است، می‌توان عیوب عمیق‌تر را نیز شناسایی نمود. کویل پیکاپ نیز در این مورد از سیم‌پیچ ابررسانا ساخته می‌شوند که مستقیماً تغییرات شار را حس خواهند نمود [4].

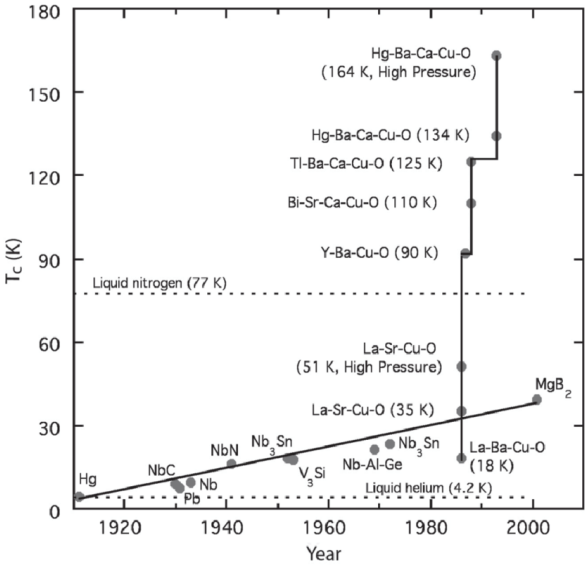
مواد ابررسانا موادی هستند که در دمای بسیار پایین مقاومت الکتریکی و میدان مغناطیسی آنها از بین می‌رود، اما میزان شار جریان عبوری از آن‌ها نیز دارای یک بیشینه مشخص برای هر ماده است. به عبارت دیگر مواد ابررساناها اگر دمایشان از یک دمای بحرانی($T_C$) کمتر شود، مقاومت الکتریکی در آن‌ها به صفر خواهد رسید [1].

در سال 1986، اولین مواد ابررسانای دمابالا کشف شدند که دارای دمای بحرانی بیش از 90 کلوین هستند. مواد ابرسانای دما بالا که عمدتا موادی با ترکیب کاپریت عناصر نادر خاکی هستند به دلیل دمای ابررسانایی بسیار بالاتر، که در حدود دمای نیتروژن مایع است، کاربری‌های بسیار بیشتری دارند، زیرا در دماهایی ابررسانا می‌شوند که راحت‌تر قابل ایجاد هستند. شکل (1) دمای بحرانی ابررسانایی برخی از این ترکیبات را نشان می‌دهد [1-7].

ترکیب $YBa_2Cu_3O_{7-x}$، که به اختصار YBCO یا Y:123 نامیده می‌شود، به دلیل دمای ابررسانایی بالا که در حدود دمای تبخیر نیتروژن مایع است (شکل (1))، یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین مواد ابررسانا به خصوص در مواردی که به تولید فیلم نازک نیاز هست، مانند سنسورهای اسکوییدی است. در ابتدا آماده‌سازی احجام ابررسانا با استفاده از روش تجاری سرامیک به وسیله تعداد زیادی از دانشمندان انجام شد. در این روش‌ها از ترکیب پودر اکسید عناصر سازنده یعنی مس، باریم

[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

و ایتریم با نسبت مناسب و سپس فشردن و تف‌جوشی، پودر ابررسانا تولید می‌شود. تخلخل بالای ذاتی روش متالورژی پودر و همچنین همگنی ضعیف ناشی از عدم اختلاط بهینه پودرها در فاز جامد و وابستگی به اندازه ذرات پودر، علی‌رغم تولید ابررسانا در مدت زمان اندک، سبب شد تا دانشمندان به دنبال روش‌های جایگزین جهت رفع عیوب باشند [8].




شکل 1- دمای بحرانی مواد ابررسانای دما پایین و بالا [7].

روش سل ژل خود احتراق به دلیل توانایی در کنترل مناسب استوکیومتری و تولید ذرات همگن با اندازه زیرمیکرومتر مورد توجه بوده است. یکی از مهم‌ترین گام‌ها در این روش، بهینه‌سازی فرایند تکلیس و تولید ماده ابررسانا با خلوص مناسب است [9].

پس از تولید نمونه به روش سل ژل خود احتراق پودر تولیدشده باید تکلیس شود تا واکنش‌ها کامل و مواد اضافه از ترکیب خارج شوند. در طی گرمادادن تعادلی ترکیب Y:123، در حدود 1020 تا 1040 درجه سانتی‌گراد این ماده به صورت پریتکتیک به ترکیبات $Y_2BaCuO_5$، CuO و $BaCuO_2$ تجزیه خواهد شد. فاز ارتورومبیک $Y_1Ba_2Cu_3O_7$ در دمای بالاتر از 650 درجه سانتی‌گراد ناپایدار خواهد بود. در 900 تا 950 درجه سانتی‌گراد اندیس محتوای اکسیژن ترکیب کمتر از 6/5 بوده و ساختار تتراگونال خواهد شد. اگر ماده از این حالت کوئنچ شود، ابررسانا نخواهد بود. برای دستیابی به محتوای اکسیژن مطلوب (نزدیک به 7) ماده می‌بایست به مدت طولانی در اکسیژن در محدوده دمایی 400 تا 500 درجه سانتیگراد آنیل شود، تا محتوای اکسیژن افزایش یابد. هم‌چنین آنیل در حدود 900 درجه سانتی‌گراد در حضور جریان اکسیژن در مدت زمان کوتاه و سپس سرد کردن آرام در اتمسفر اکسیژن مفید خواهد بود [11]. تف‌جوشی در اتمسفر اکسیژن در دمای حدود 920 تا 950 درجه سانتی‌گراد در محدوده زمانی چند ساعت تا 24 ساعت انجام می‌شود. نرخ خنک‌شدن معمولا 1 تا 2 درجه سانتی‌گراد در دقیقه مخصوصاً در محدوده دمایی 400 تا 600 درجه سانتی‌گراد است. در دمای کمتر از 400 درجه سانتی‌گراد نمونه می‌تواند سریع‌تر خنک شود. بوته پلاتینی در کمتر از 900 درجه سانتیگراد مناسب است، اما در دماهای بالاتر بوته آلومینا به دلیل واکنش پلاتین با مواد در بالاتر از 900 درجه سانتی‌گراد مناسب خواهد بود [10].

پودر ابررسانای YBCO می‌تواند برای تولید فیلم نازک حسگر اسکوییدی به کار رود. اسکوییدها آشکارسازهای بسیار دقیق شار مغناطیسی هستند. این ابزارها کاربردهای فراوانی به عنوان سنسور در گستره عظیمی از آزمایش‌های فیزیک، زمین شناسی، پزشکی، زیست‌شناسی و صنعت را دارا هستند. پیشرفت در صنعت و در فهم منشا نویز در اسکوییدهای با دمای انتقال پایین پیشرفت عظیمی را در تفکیک اندازه‌گیری مغناطیسی و الکتریکی پدید آورد [8-10].

فرض کنید یک ابررسانا بوسیله یک لایه عایق نازک از ابررسانای دیگر منفصل شده باشد؛ بنابراین یک اتصال $S_1$-I-$S_2$، که اتصال ضعیف و یا اتصال جوزفسون نامیده می‌شود، وجود خواهد داشت. جفت‌های الکترونی می‌توانند از درون عایق نازک از یک ابررسانا به ابررسانای دیگر نقب بزنند. یک حلقه ابررسانا که دارای یک و یا دو اتصال جوزفسون است می‌تواند برای اندازه‌گیری شار به کار رود. اسکوییدهای دمای بالا اولین مدارهای الکترونیکی ابررسانا بودند که از اتصال جوزفسون خنک‌شونده با نیتروژن مایع استفاده می‌کردند.

[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

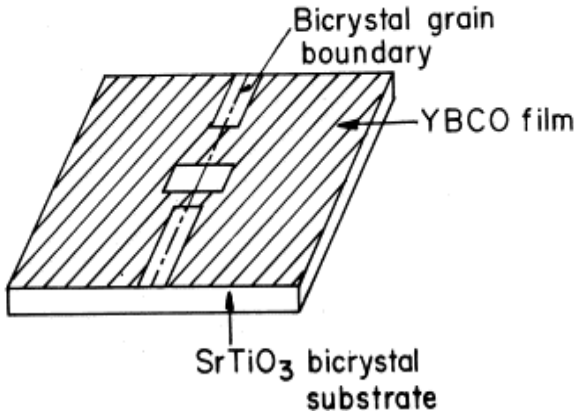
اسکوییدلزوما یک ترانسدوسر شار به جریان است، بنابراین می‌تواند برای اندازه‌گیری شار مغناطیسی، تغییر شار، جریان یا ولتاژ به کار رود.

دو گونه اسکوییدوجود دارد: 1- اسکوییدdc شامل دو اتصال جوزفسون در حلقه ابررسانا، که با جریان مستقیم کار می‌کند و 2- اسکوییدrf شامل یک اتصال جوزفسون در حلقه ابررسانا، که به یک مدار تانک (مدار تشدید یا رزونانس معادل با یک سیم پیچ و خازن در یک مدار سری) متصل است و با جریان rf عمل می‌کند.

اولین اسکوییدdc فیلم نازک از YBCO با اتصال مرز دانه‌ای شکل گرفته بین دانه‌های کاتوره‌ای در فیلم نازک ساخته شد. اکثر اسکوییدهایی که تاکنون ساخته شده‌اند، با کنترل دقیق‌تر اتصالات مرزدانه‌ای با یکی از این دو روش ایجاد شده‌اند. تکنیک اول شامل رسوب‌دادن فیلم YBCO روی زیرلایه چند کریستالی $SrTiO_3$، $LaAlO_3$ یا MgO که در آن یک ناهمسانگردی وجود دارد. فیلم رشد همبافته‌ای روی زیرلایه داشته و یک مرزدانه که متعاقبا به یک یا دو پل الگو داده می‌شود، با عرض چند میکرومتر، خواهد داشت. تکنیک دوم شامل رسوب‌دادن فیلم YBCO روی زیر لایه لبه‌دار است. مرز دانه‌ها در بالا و پایین لبه‌ها شکل می‌گیرند [8].

روش‌های گوناگونی برای ایجاد اتصال جوزفسون وجود دارد اما هر یک از این روش‌ها با نویز و جریان‌های ناخواسته که بر دقت نتایج حسگر تاثیرگذارند همراه است. همچنین تکرار تولید اتصال جوزفسون در هر یک از این روش‌ها با مشکلاتی روبه‌رو است. مرسوم‌ترین روش تولید اتصال جوزفسون مرزدانه‌ای دوکریستاله است.

مطابق شکل (2) اتصال مرزدانه دوکریستالی (GBJ) اساساً یک میکروپل الگو داده‌شده در عرض مرزدانه زیرلایه دوکریستاله است. بر طبق رشد هم‌بافته YBCO روی یک زیرلایه مچ شده STO (1 0 0)، محور a و b فیلم YBCO هم جهت محور a و b زیرلایه است. متعاقباً استفاده از زیرلایه دوکریستاله یک مرز دانه در فیلم YBCO شکل می‌گیرد. در نتیجه سازوکارهای رشد پیچیده، مرزهای دانه YBCO تنها از جهت تعریف شده با مرزدانه زیر لایه تعریف می‌شود. اتصالات دوکریستاله تاکنون به طور گسترده برای تولید اسکوییدهای HTS نویز پایین استفاده شده‌اند. علت، سهولت تولید، و بهره‌وری بالای این اتصال است [11].

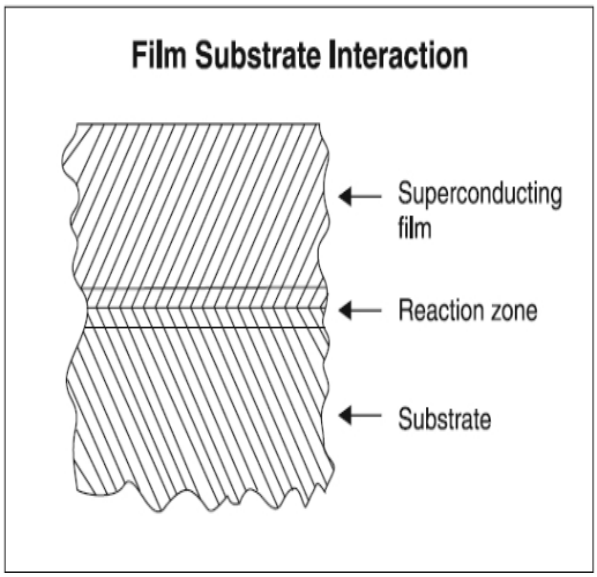



شکل 2- شکل شماتیک اتصال جوزفسون دمای بالای استاندارد مرز دانه‌ای دو کریستاله مورد استفاده در اسکوییدها [11].

از آن‌جایی که فیلم روی زیرلایه رشد می‌کند، انتخاب زیرلایه مناسب مانع از مرزدانه با زاویه بالا خواهد شد. زیرلایه مناسب باید از نظر شیمیایی آلوده‌کننده نباشد، پارامتر شبکه و ضریب انبساط حرارتی متناسب با فیلم داشته باشد، در تک‌کریستال بزرگ ارزان باشد، محتوا و کاهش دی‌الکتریک پایینی داشته باشد و همچنین به راحتی برش و پولیش شود. شکل (3) به صورت شماتیک برهمکنش بین فیلم و زیرلایه را نشان می‌دهد. برهمکنش فیلم و زیرلایه منجر به ایجاد ترکیب جدید با ساختاری متفاوت از زیرلایه و رسوب در منطقه ترکیب گرادیان نفوذ در فیلم و در زیرلایه بدون تشکیل ترکیب جدید می‌شود. مناطق جدید با دما و زمان شروع به گسترش می‌کنند. یکی از بهترین زیرلایه‌ها YSZ و همین‌طور به ترتیب $BaF_2$، $SrTiO_3$، MgO، $Al_2O_3$ می‌باشد. بر اساس مطالعات بسیاری، نفوذ یا واکنش در بین تمام زیرلایه‌ها شامل Si، $Al_2O_3$، $SrTiO_3$، $ZrO_2$ و MgO امکان‌پذیر است. جدول (1) برخی

[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

زیرلایه‌های مناسب برای رشد لایه نازک ابررسانا را معرفی می‌نماید [12 و 13].

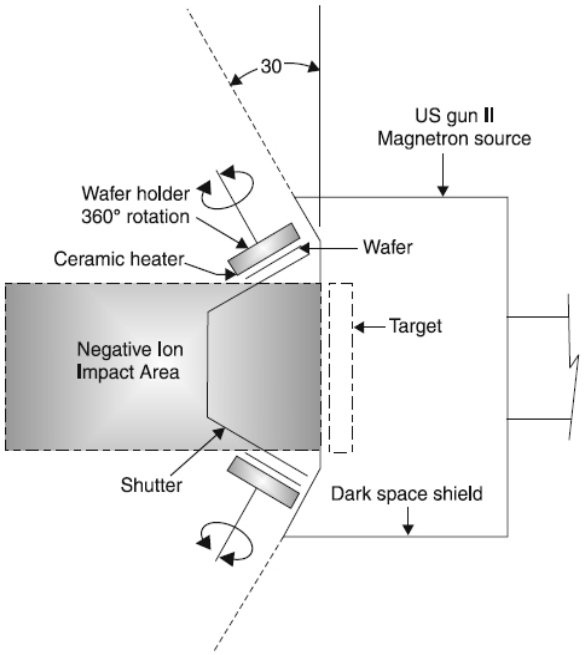



شکل 3- شماتیک برهمکنش بین فیلم YBCO و زیرلایه پس از آنیل در 900 درجه سانتیگراد [14].

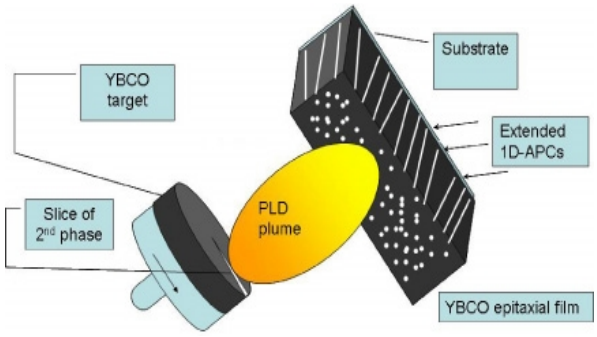
برای رسوب لایه نازک جهت ایجاد زیرلایه از روش‌های گوناگونی چون تبخیر با اشعه الکترونی، رسوب‌دهی پاششی، رسوب‌دهی لیزری پالسی (PLD) و رسوب‌دهی شیمیایی بخار (CVD) استفاده می‌شود [15 و 16].

روش‌های پاششی برای پوشش‌دهی امکان‌پذیر خواهد بود که می‌تواند به پاشش اتمی و پاشش مگنترونی اشاره نمود. پاشش اتمی برای رسوب دادن فیلم نازک قابل استفاده است. پاشش به دلیل انرژی بالای اتم‌ها امکان تولید فیلم با مورفولوژی و ریزساختار مناسب را خواهد داد که امکان تولید فیلم همبافته ابررسانا در دماهای بسیار پایین‌تر زیرلایه نسبت به سایر روش‌ها را خواهد داد. در بین سیستم‌های پاشش متفاوت، پاشش مگنترونی مزایای بیشتری دارد. مانند این که لایه رسوب با فشار پایین پاشش و چگالی انرژی پایین در هدف قابل ایجاد است. در کنار این، گرم‌شدن و پاشش مجدد روی فیلم رسوب‌کرده نیز به وجود نخواهد آمد. شکل (4) پاشش مگنترونی، که عموما استفاده می‌شود، را نشان می‌دهد. این سیستم اولین بار توسط محققین IBM ابداع شد [17].

در حال حاضر یک روش مناسب برای رسوب فیلم نازک ابررسانای YBCO با سرعت بسیار بالاتر از تکنیک پاشش، روش رسوب لیزری پالسی است. اولین کاربرد این روش در مواد ابررسانای دما بالا در سال 1987 ارائه شد [17]. شکل (5) این روش را به طور طرح‌واره ارائه می‌دهد.




شکل 4- شکل شماتیک فرایند پاشش غیر محوری [14].




شکل 5- دیاگرام شماتیک رسوب لیزری پالسی [18].

در مورد دستگاه‌های بررسی غیرمخرب با کمک حسگر اسکوییدی کویل پیکاپ نیز از سیم‌پیچ ابررسانا ساخته

[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

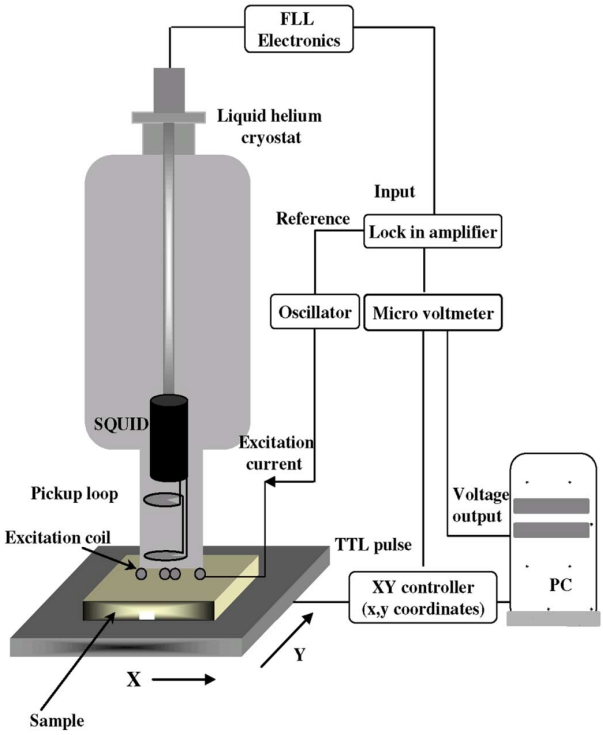
جدول1- برخی زیرلایه‌های مناسب برای رسوب فیلم نازک فیلم ابررسانا [14]

| ماده | ساختار | ثابت لتیس (آنگستروم) | ضریب انبساط حرارتی ($K^{-1}$) | ثابت دی‌الکتریک |
|---|---|---|---|---|
| Y-Ba-Cu-O | ارتورومبیک | 11/67، 3/86، 3/88 | $15x10^{-6}$ | - |
| $SrTiO_3$ | مکعبی | 3/905 | $10x10^{-6}$ | 180 |
| $Y\text{-}ZrO_2$ | مکعبی | 5/16 | $10x10^{-6}$ | 7/8 |
| MgO | مکعبی | 4/21 | $12x10^{-6}$ | 9/7 |
| Si | مکعبی | 5/43 | $3x10^{-6}$ | 12 |
| $SiO_2$ | هگزاگونال | 5/394، 4/91 | $1x10^{-6}$ | 3/8 |
| $Al_2O_3$ | هگزاگونال | 12/9، 4/76 | $6x10^{-6}$ | 10/2 |
| $Gd_3Ga_5O_{12}$ | مکعبی | 12/383 | $8x10^{-6}$ | 15 |
| $MgAl_2O_4$ | مکعبی | 8/085 | $8x10^{-6}$ | - |
| $LaGaO_3$ | ارتورومبیک | 7/77، 5/49، 5/52 | - | 27 |
| $LaAlO_3$ | رمبوهدرال | 6/66، 5/357 | $10x10^{-6}$ | 15 |
| $LiNbO_3$ | هگزاگونال | 13/86، 5/15 | - | - |

می‌شوند، که مستقیماً تغییرات شار را حس خواهند نمود. سیستم‌های بررسی غیرمخرب اسکوییدی به وسیله یک پراب اسکوییدی که به کمک یک سیستم کنترل و جابجایی در محورهای XY کنترل می‌شود و یک آشکارساز سیگنال تولید می‌شوند. وجود عیوب و فازهای مغناطیسی سبب تغییر در شدت میدان خروجی می‌شود که با کمک حسگر بسیار دقیق اسکوییدی دریافت می‌کند و تغییرات آمپراژ در آشکارساز نمایش داده می‌شوند و شدت میدان خروجی عمق و محل حرکت پراب در محور XY محل نقص یا فاز مغناطیسی را نشان خواهد داد. شکل (6) به طور طرح‌واره دستگاه بررسی غیرمخرب جریان گردابی به کمک حسگر اسکوییدی را نشان می‌دهد [4 و 6].

ناجندران و همکارانشان [6] در سال 2007 یک صفحه آلومینیومی با طول 300 میلیمتر، عرض 100 میلیمتر و ضخامت 10 میلیمتر با نقص‌های مصنوعی مهندسی، همانطور که در شکل (7-الف) نشان داده شده است، را مورد بررسی قرار دادند. دو عیب مستطیلی با فاصله 150 میلیمتر در قطعه طراحی شده بود. یک نقص دارای طول 50 میلی‌متر، عرض 1 میلی‌متر و ارتفاع 1 میلی‌متر است و نقص دیگر 50 میلی‌متر، عرض 1 میلی‌متر و ارتفاع 0/5 میلی‌متر برای شبیه‌سازی خصوصیات نقص زیرسطحی است. این صفحه آلومینیومی با ترک در سطح پایین آن تحت پروب SQUID اسکن شده بود و تغییرات میدان مغناطیسی مرتبط با نقص با توجه به مختصات موقعیت ثبت شد. شکل (7-ب) انحنای مغناطیسی مربوط به این نقص‌ها را با استفاده از SQUID نشان می‌دهد. پتانسیل سیستم برای تشخیص نقص‌های زیر سطحی با استفاده از تحریک جریان دایره‌ای پایین با استفاده از این داده‌ها قابل مشاهده است.

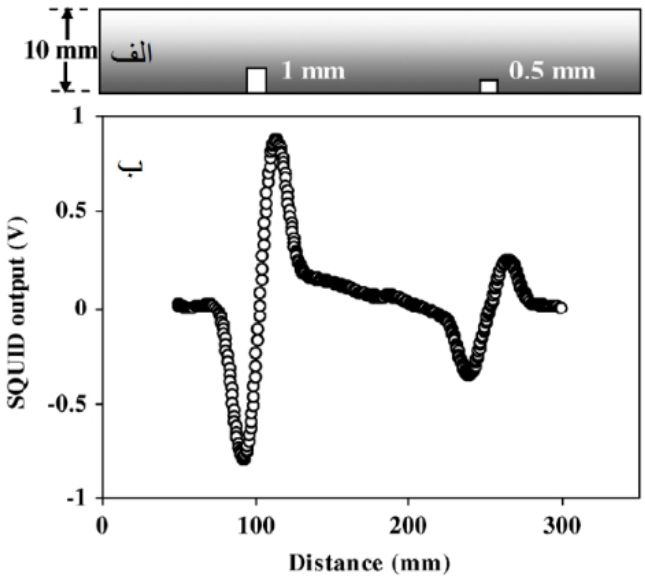
[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]




شکل 6- دستگاه بررسی غیرمخرب به کمک حسگر اسکوییدی[2].

آقای ناجندران و همکارانشان [6] در سال 2007 یک صفحه آلومینیومی با طول 300 میلیمتر، عرض 100 میلیمتر و ضخامت 10 میلیمتر با نقص‌های مصنوعی مهندسی، همان طور که در شکل (7-الف) نشان داده شده است، را مورد بررسی قرار دادند. دو عیب مستطیلی با فاصله 150 میلیمتر در قطعه طراحی شده بود. یک نقص دارای طول 50 میلی‌متر، عرض 1 میلی‌متر و ارتفاع 1 میلی‌متر است و نقص دیگر 50 میلی‌متر، عرض 1 میلی‌متر و ارتفاع 0/5 میلی‌متر برای شبیه‌سازی خصوصیات نقص زیرسطحی است. این صفحه آلومینیومی با ترک در سطح پایین آن تحت پروب SQUID اسکن شده بود و تغییرات میدان مغناطیسی مرتبط با نقص با توجه به مختصات موقعیت ثبت شد. شکل (7-ب) انحنای مغناطیسی مربوط به این نقص‌ها را با استفاده از SQUID نشان می‌دهد. پتانسیل سیستم برای تشخیص نقص‌های زیر سطحی با استفاده از تحریک جریان دایره‌ای پایین با استفاده از این داده‌ها قابل مشاهده است.

در مطالعات اخیر همچنین از روش بررسی غیرمخرب جریان گردابی به کمک حسگر اسکوییدی، به بررسی حضور و میزان فازهای مغناطیسی در قطعات پرداخته شده است. به طور مثال آقای رپلیانتو و همکارانشان [6] در سال 2019 به بررسی غیرمخرب حضور فریت دلتا در درز جوش قطعات 316L در قطعات جوشکاری‌شده نیروگاهی پرداختند. خستگی یکی از مهم‌ترین مشکلات در قطعات دمابالای نیروگاهی خصوصا در محل اتصال جوشکاری می‌باشد. در مورد آلیاژ 316L توجه بسیاری بر پدیده ترک خوردن گرم صورت می‌گیرد. اگرچه ساختار فریتی در دمای بالا به شدت ناپایدار است و به کاربیدها و فازهای بین فلزی ترد تبدیل می‌شود، وجود مقادیر بهینه فریت دلتا در فلز جوش آستنیتی برای پیشگیری از ترک گرم مفید خواهد بود. با توجه به اینکه فریت فازی مغناطیسی است با کمک حسگرهای ابررسانای اسکوییدی می‌توان محتوای فریت فلز جوش را تخمین زد. با بررسی قطعه در حین عملکرد و تحت آسیب خستگی می‌توان به بررسی کاهش میزان فاز فریت دلتا که به فازهای ترد تجزیه خواهد شد پرداخت و بنابراین معیاری از عمر قطعه نیز به دست آورد.




شکل 7 – الف) قطعه آلومینیوم با نقص مصنوعی و ب) خروجی سیستم غیرمخرب با حسگر اسکوییدی [6].

[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

سیم‌پیچ تحریک برای ایجاد جریان‌های گردابی در سیستم‌های بر پایه SQUID از آن‌چه که در روش‌های معمول بررسی مخرب با جریان گردابی استفاده می‌شود، متفاوت است. در روش‌های معمولی، سیم‌پیچ تحریک کویل دایره‌ای شکل است و در برخی موارد از مجموعه کویل‌های دیفرانسیلی نیز استفاده می‌شود. برای افزایش جریان گردابی در نمونه، میدان مغناطیسی متغیر با زمان مورد نیاز است. اگر از کویل تحریک دایره‌ای برای سیستم بررسی غیرمخرب دارای جریان گردابی مبتنی بر SQUID استفاده شود، میدان مغناطیسی اعمالی به SQUID بسیار بزرگ خواهد بود و ولتاژ خروجی جریان الکتریکی خوانده‌شده ممکن است به سطح اشباع برسد. مواد ابررسانا دارای یک حد بحرانی برای شار می‌باشند که به آن $J_C$ می‌گویند. در این شرایط تغییرات میدان مغناطیسی ناشی از حضور عیوب، توسط SQUID قابل تشخیص نیست [2].

تغییرات در جریان القایی مرتبط با حضور یک عیب به عنوان تغییر سیگنال شار توسط دستگاه SQUID آشکار می‌شود. عموماً تحریک و القای مغناطیسی در قطعه در دمای اتاق صورت می‌پذیرد، درحالی که حسگر اسکوییدی برای عملکرد در حالت ابررسانایی در داخل یک پراب در دمای نیتروژن مایع قرار دارد. مجموعه پراب حسگر اسکوییدی برای عدم تداخل سایر میدان‌های مغناطیسی با یک پوشش سربی محافظت می‌شود. تغییرات میدان مغناطیسی باعث ایجاد جریان در کویل حسگر می‌شود و این تغییرات به کمک یک اسیلوسکوپ آشکار می‌شود. یک سیستم دقیق حرکت‌دهنده و اسکنر، حسگر یا نمونه را در جهت صفحه XY جابجا می‌کند. بنابراین با کمک یک سیستم کامپیوتری حضور نقص با مشخصات محل نقص قابل شناسایی خواهد بود [2 و4].

## 2- آزمایش و ساخت

این روش بر مبنای تولید محلول مناسبی از نیترات عناصر سازنده YBCO و ایجاد ژل خود احتراق است. مقادیر مناسبی از ترکیبات $Y(NO_3)_3$، پودر $Ba(NO_3)_2$ و پودر $Cu(NO_3)_2$ و اسید سیتریک انتخاب شد و محلول آبی هر ترکیب با آب مقطر ایجاد شد. در این صورت یون‌های $NO_3^-$ از ترکیب نیترات‌های فلزی خارج می‌شود و در ادامه اسید سیتریک که در محیط‌های اسیدی با ظرفیت یک شرکت می‌کند، جایگزین آن خواهد شد. بالن حاوی محلول در یک حمام آبی با دمای 80 درجه سانتی‌گراد، بر روی یک همزن مغناطیسی قرار داده شد و بدین ترتیب مقدار آب محلول آبی رنگ با تبخیر کاهش یافت. پیوند یون $H_2Cit^-$ با فلز باریم بسیار ضعیف است. بنابراین مقدار قابل توجهی از یون‌های باریم در محلول به صورت آزاد وجود داشته که با ادامه روند تهیه سل ژل و تبخیر آب، این یون‌ها مجددا به نیترات باریم تبدیل شدند و سپس رسوب نمودند. در این حالت رنگ محلول به دلیل تشکیل رسوبات سفید رنگ نیترات باریم به سمت سبز متمایل شد.

برای جلوگیری از رسوب نیترات باریم پس از تبخیر آب و تشکیل ذرات سفید رنگ هیدروکسید آمونیم به میزان کافی افزوده شد تا در نهایت pH محلول به 7 برسد. در این حالت یون‌های $Cit^{3-}$ بسیار بیشتری تشکیل می‌شود که ترکیب قوی‌تری با یون‌های باریم خواهند داشت.

در این حالت رسوب از بین رفت و محلول بنفش رنگ حاصل شد. در ادامه محلول حاصل در یک بشر در دمای 100 درجه سانتیگراد حرارت داده شد تا مقدار آب به کمک تبخیر کاهش یابد. با ادامه روند تبخیر آب ماده ژل مانند ایجاد خواهد شد. روند این تغییرات در شکل (8) نشان داده شده است.

مطابق شکل (8)، پس از تشکیل ژل به دلیل واکنش‌های بین اسید سیتریک و هیدروکسید آمونیوم کم‌کم حباب‌های گازی در ژل پدیدار شد.

در این هنگام ژل در داخل یک بوته چینی ریخته شد و تا اتمام واکنش‌های خود احتراق در داخل کوره با دمای 250 درجه سانتیگراد قرار داده شد. در نتیجه پس از مدت زمان یک ساعت پودر خاکستری رنگی در داخل بوته برجای ماند که بیانگر انجام واکنش‌ها است.

[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

پس از تولید پودر ابررسانا به کمک روش سل ژل خود احتراق ماده حاصل مورد وزن سنجی گرمایی قرار گرفت و با توجه به نتیجه آزمون فرایند تکلیس برای آن طراحی شد.

نمونه 1 با توجه به مطالعات صورت پذیرفته تا دمای 900 درجه سانتی‌گراد و نمونه 2 تا دمای 930 درجه سانتی‌گراد و نمونه سوم تا دمای 970 درجه سانتی‌گراد، هر سه با نرخ گرمادهی 3 ºC/min در کوره گرمادهی شدند و سپس هر نمونه تا دمای 700 درجه سانتی‌گراد با نرخ 1 ºC/min و سپس تا دمای 400 درجه سانتی‌گراد با نرخ 0/5 ºC/min خنک شدند و سپس از کوره خارج و در هوای آزاد قرار گرفتند.

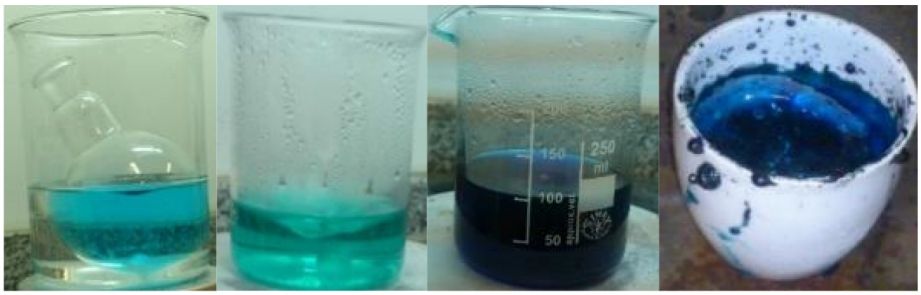
سه نمونه از پودر تولید شده در شرایط متفاوت مورد تکلیس قرار گرفت. مورفولوژی، اندازه دانه و ترکیب شیمیایی هر یک از سه نمونه سپس به وسیله تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی نشرمیدانی، آزمون پراش اشعه ایکس و آزمون طیف‌سنجی انرژی اشعه ایکس مورد بررسی قرار گرفتند. در پایان فرایند بهینه تکلیس جهت تولید تعیین شد و نمونه نهایی مجدداً مورد وزن سنجی حرارتی قرار گرفت.

در ادامه پودر تولیدشده با فرایند پرس و تف‌جوشی به صورت قرص 1 سانتی‌متری فشرده و در دمای 930 درجه سانتی‌گراد تف‌جوشی شد. با استفاده از قرص حاصله به عنوان ماده هدف، توسط فرایند پوشش‌دهی PLD بر روی ویفر زیرلایه STO پوشش به ضخامت 50 نانومتر ایجاد شد و لایه نازک به وسیله آزمون رسانایی چهارنقطه‌ای در دمای پایین مورد بررسی قرار گرفت.

در پایان با کمک فرایند الگودهی با اشعه لیزر متمرکز الگوی نهایی مدار ابررسانای اسکوییدی بر روی ویفر دارای پوشش ایجاد شد.

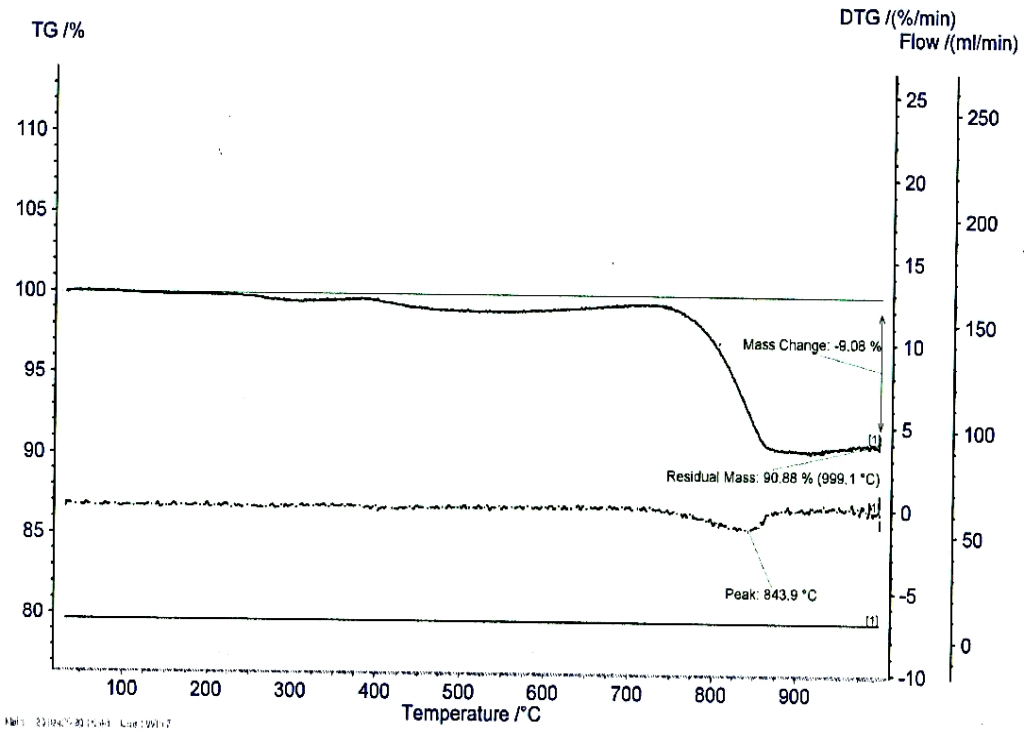
## 3- نتایج و بحث

محدوده تعادلی دمایی پایداری YBCO در محدوده‌ای کمتر از 1000 درجه سانتی‌گراد قرار دارد. در شرایط معمول عملیات تکلیس ممکن است گرم‌شدن به صورت غیرتعادلی سبب تشکیل ترکیباتی چون فاز Y:211 شد. همچنین سایر ترکیبات درصورت عدم رعایت زمان کافی در عملیات تکلیس همچنان پایدار خواهند ماند و از ترکیب خارج نخواهند شد. بنابراین دستیابی به شرایط بهینه تکلیس جهت به دست آوردن بیشترین مقدار Y:123، با کمترین میزان ناخالصی و میزان مناسب‌تر اندیس اکسیژن با توجه به عدم پایداری ترکیب در بالای 900 درجه سانتی‌گراد و کاهش اندیس اکسیژن، ضروری به نظر می‌رسد. از آن‌جاکه افزایش دما سبب تبدیل‌شدن فاز Y:123 به فاز Y:211 می‌شود و همچنین دمای پایین تکلیس سبب کاهش اندیس اکسیژن در ترکیب غیراستوکیومتری YBCO و در نتیجه کاهش خواص و دمای ابررسانایی آن می‌گردد؛ تعیین دمای بهینه تکلیس اهمیت دوچندانی پیدا می‌کند.برای طراحی فرایند تکلیس آزمون وزن سنجی گرمایی (TGA) از نمونه پودر اولیه تهیه شد. شکل (9) نمودار نتیجه آزمون وزن‌سنجی گرمایی نمونه اولیه را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل (9) مشخص است پودر تولید شده تنها در حدود 840 درجه سانتی‌گراد دارای پیک است که مربوط به تکمیل واکنش‌های فازهای اکسیدی و تبدیل آن‌ها به فاز Y:123 هست. این پیک ناشی از تبدیل فازهای $BaCO_3$ و اکسید مس و ایتریم و تبدیل آن به فاز Y:123 می‌باشد. افزایش جرم نمونه پس از 950 درجه سانتی‌گراد به دلیل ورود به محدوده ناپایداری فاز Y:123 است و خبر از تجزیه این فاز و تبدیل‌شدن آن به فازهای با محتوای اکسیژن بالاتر می‌دهد.



شکل 8- روند تغییرات سل ژل خود احتراق تولید ابررسانای دمابالا.

[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]




شکل 9- نمودار وزن سنجی گرمایی پودر تولید شده.

با توجه به نمودار TGA پودر تولیدی 3 فرایند تکلیس در محدوده دمایی بالاتر از پیک 844 درجه سانتی‌گراد طراحی شد. دمای تکلیس برای نمونه‌ها به ترتیب 900، 930 و 970 درجه سانتی‌گراد بود. سه نمونه در دماهای متفاوت تکلیس شد و سپس به کمک الگوی پراش اشعه ایکس به بررسی نمونه‌ها پرداخته شد.

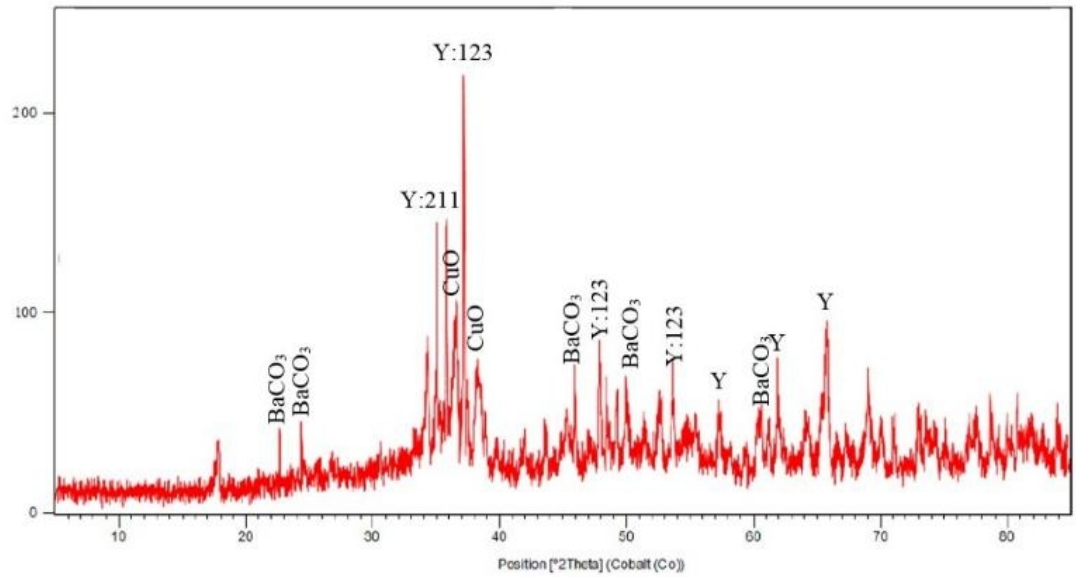
شکل (10) تصویر الگوی پراش اشعه ایکس نمونه 1، که تا دمای 900 درجه سانتی‌گراد تکلیس شده است، را نشان می‌دهد. همانطور که از طیف اشعه ایکس مشخص است، علاوه بر وجود ترکیب Y:123، ترکیباتی چون CuO و $BaCO_3$ نیز در ترکیب موجود است. این امر بیانگر عدم‌انجام فرایند تکلیس به طور کامل هست و نیاز است که برای تکمیل فرایند تکلیس دمای بالاتری برای کوره انتخاب شود.

همچنین طیف‌سنجی انرژی پرتو ایکس و تصویر میکروسکوپی الکترونی نمونه شماره 1 تهیه شد.

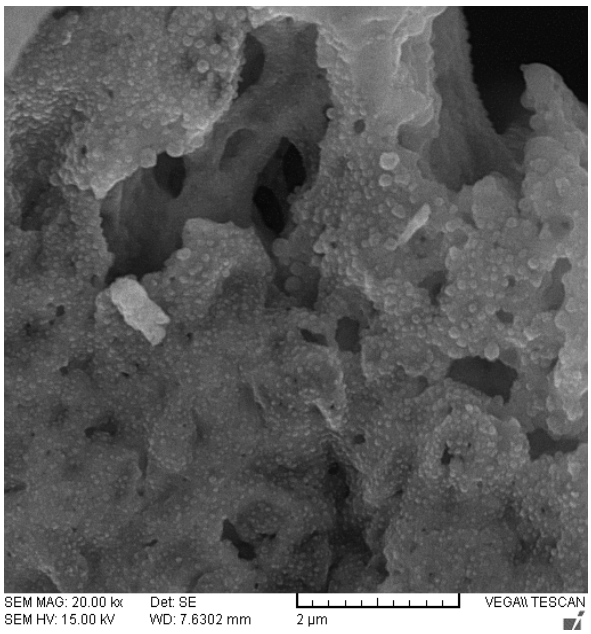
شکل (11) تصویر میکروسکوپی الکترونی نمونه شماره 1 و شکل (12) طیف‌سنجی انرژی پرتو ایکس را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل (12) مشخص است، برخی ذرات غنی از مس که در تصویر میکروسکوپ الکترونی با رنگ روشن‌تر ظاهر می‌شود در میان دانه‌های پودر قابل مشاهده است. همین‌طور با توجه به طیف‌سنجی انرژی اشعه ایکس این نمونه در شکل (11) مناطق با غلظت بالاتر اکسیژن که در نتیجه حضور فازهای با اندیس استوکیومتری اکسیژن بالاتر است و ناشی از عدم تکمیل واکنش تکلیس هست، مشاهده می‌شود.

شکل (13) الگوی اشعه ایکس نمونه 2 را نشان می‌دهد. در این نمونه دمای تکلیس تا 930 درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. مطابق الگو می‌توان مشاهده کرد که ترکیبات اضافی قبلی از ترکیب، در اثر تکلیس خارج شده است و طیف دارای پیک‌های مرتبط با فاز Y:123 است. همچنین به شدت بسیار کمی پیک‌های مرتبط با ترکیب Y:211 شروع به نمایش و ایجاد نموده‌اند.

[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]




شکل 10- طیف‌سنجی اشعه ایکس نمونه تکلیس شده تا 900 درجه سانتی گراد.




شکل 11 – تصویر میکروسکوپی الکترونی نمونه شماره 1.

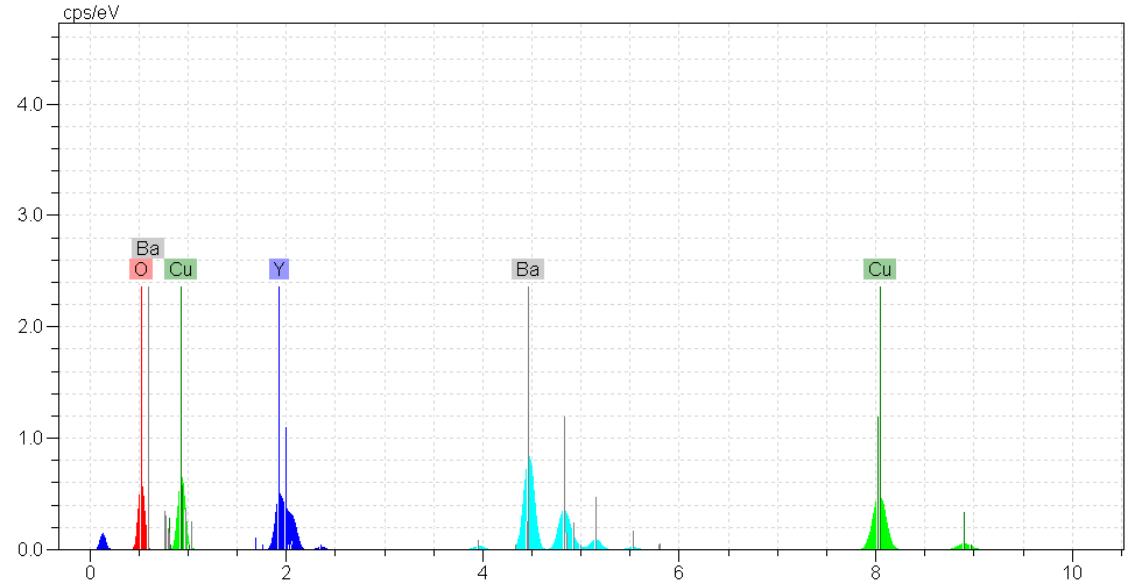
این مسئله بیانگر شروع ناپایداری ترکیب و تبدیل فازی از Y:123 به Y:211 است. مقدار اندک فاز Y:211 در تولید لایه نازک حسگر ابررسانا مناسب خواهد بود. این نقاط محل قفل‌شدن شار الکترومغناطیس عبوری در فیلم نازک خواهند بود. همین‌طور در تولید کپه ابررسانا این نقاط قفل‌شدن شار به افزایش اثر مایسنر و قفل‌شدن شار عبوری در نقاط با عیوب جای خالی اکسیژن در صفحات کاپریت کمک خواهد نمود.

برای بررسی بیشتر نمونه تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی نشر میدانی و طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس نمونه شماره 2 صورت پذیرفت.

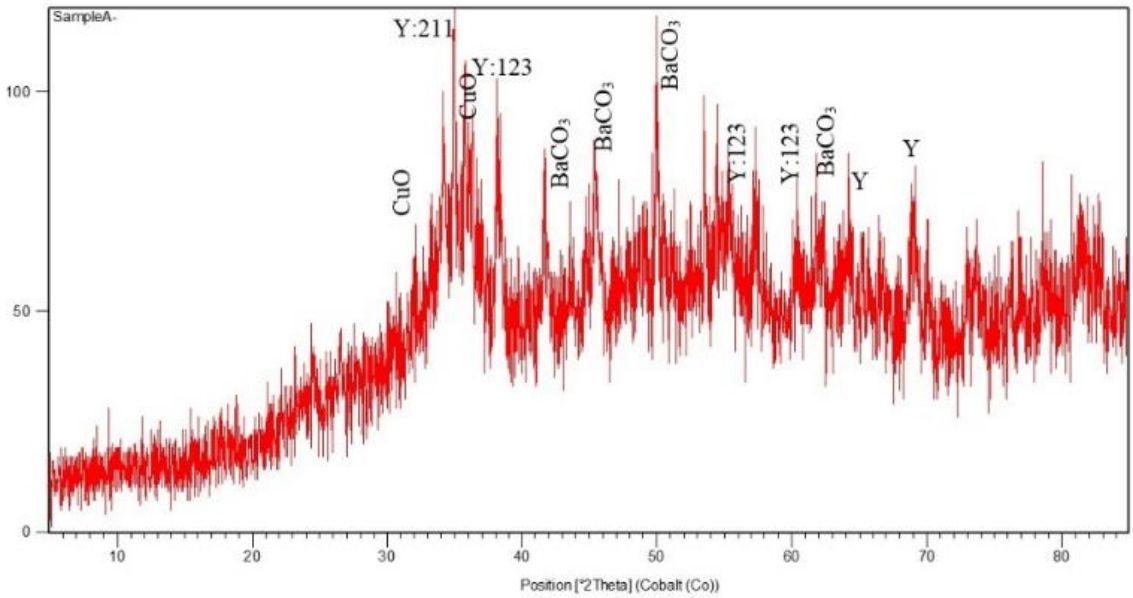
شکل (14) تصویر میکروسکوپی الکترونی نشر میدانی نمونه شماره 2 و شکل (15) طیف‌سنجی انرژی پرتو ایکس این نمونه را نشان می‌دهد. مطابق با شکل (14)، نانوذرات با مورفولوژی و ابعاد مشابه از نانوذرات فاز Y:123 به عنوان محصول ایجاد شده‌اند و هم‌چنین، ساختار طیف‌سنجی انرژی پرتو ایکس نمونه بیانگر نسبت اتمی استوکیومتری فاز Y:123 است. مطابق الگوی طیف‌سنجی انرژی اشعه ایکس نشان‌داده‌شده در شکل (15)، پس از تکلیس پودر اولیه در دمای 930 درجه سانتی‌گراد نسبت اتمی 7/5 درصد برای ایتریم، 14/7 درصد برای باریم، 22 درصد برای مس، و مابقی اکسیژن خواهد بود که بیانگر تولید فاز مطلوب Y:123 است.

در مورد نمونه 3 افزایش دمای تکلیس تا 970 درجه سانتی‌گراد صورت پذیرفت. با توجه به شکل (16)، که طیف‌سنجی اشعه ایکس این نمونه را نمایش می‌دهد، مشاهده می‌شود که پیک‌های مربوط به فاز Y:123 شروع به کاهش می‌نماید و از طرف دیگر پیک‌های مرتبط با فاز Y:211 رشد کرده‌اند. این مسئله بیانگر گذر از دمای بهینه و تبدیل فاز ابررسانای Y:123 به فاز Y:211 در زمینه ماده است.

[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]




شکل 12- الگوی پراش انرژی اشعه ایکس نمونه شماره 1.

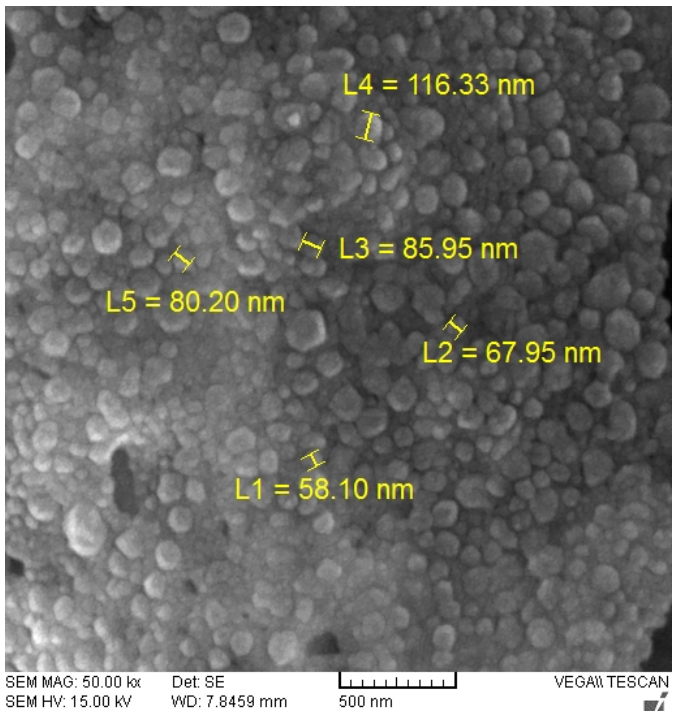



شکل 13- طیف‌سنجی اشعه ایکس نمونه تکلیس شده در دمای 930 درجه سانتی گراد

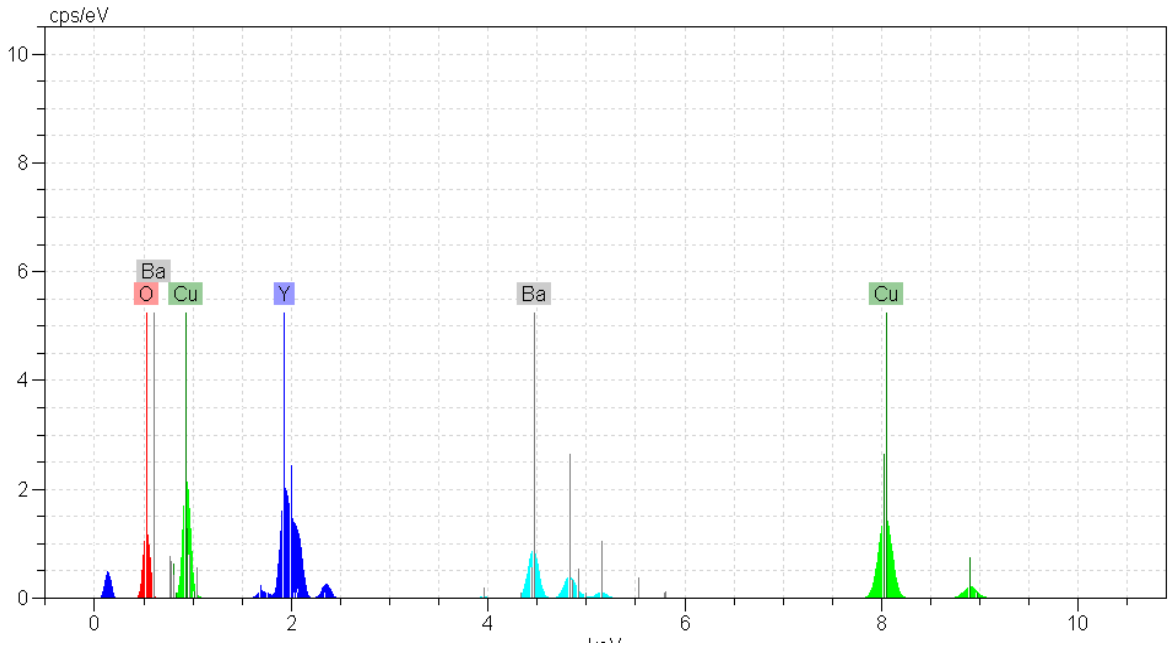
همچنین از نمونه شماره 3 نیز تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی و الگوی پراش انرژی اشعه ایکس تهیه شد. شکل (17) تصویر میکروسکوپی الکترونی پودر تکلیس‌شده تا 970 درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. مطابق این شکل موروفولوژی نانوذرات به سمت دانه‌های کشیده‌تر ناشی از تحول ساختاری Y:123 به Y:211 را نشان می‌دهد.

شکل (18) طیف‌سنجی انرژی اشعه ایکس نمونه شماره 3 را نشان می‌دهد. افزایش میزان اکسیژن ترکیب بیانگر تجزیه فاز ابررسانای Y:123 به فازهای Y:211 و اکسیدمس و باریم خواهد بود. ترکیب Y:123 در این محدوده دمایی وارد منطقه ناپایداری می‌شود و همان‌طور که از نمودار وزن سنجی گرمایی پودر تولیدشده نیز قابل پیش‌بینی بود، در این محدوده دمایی با افزایش میزان اکسیژن ترکیبات حاصله فاز Y:123 تجزیه خواهد شد.

[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]




شکل 14- تصویر میکروسکوپی الکترونی پودر تولید شده در نمونه شماره 2.



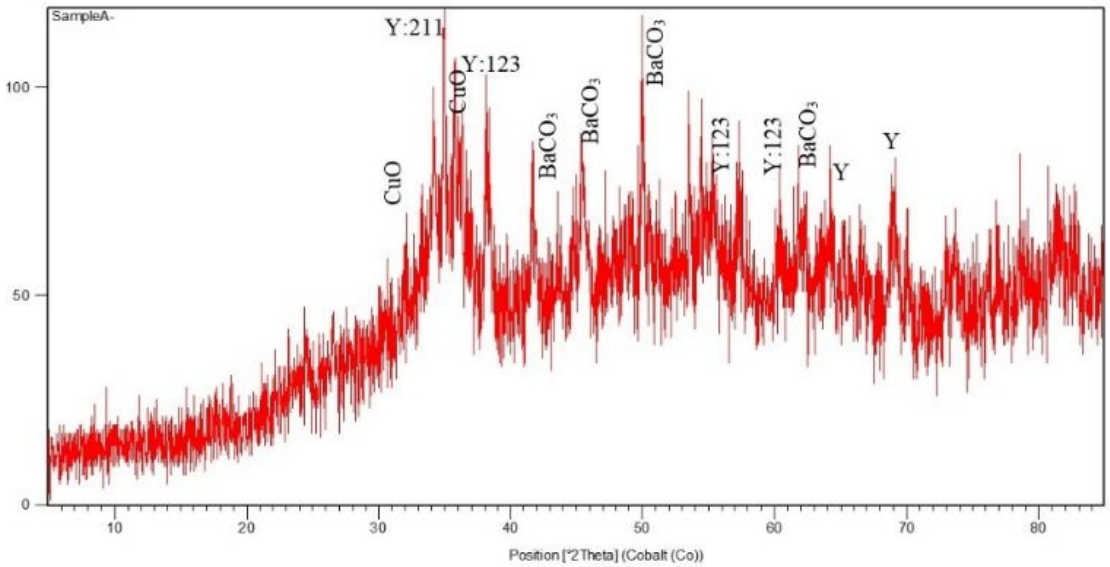

شکل 15- الگوی پراش انرژی پرتو ایکس نمونه شماره 2.

با مقایسه 3 نمونه تکلیس‌شده فوق مشخص می‌شود که فرایند بهینه تکلیس برای نمونه شماره 2 صورت پذیرفته است. برای بررسی مجدد تکمیل فرایند تکلیس نمونه شماره 2، آزمون وزن‌سنجی گرمایی در مورد این ترکیب صورت پذیرفت.

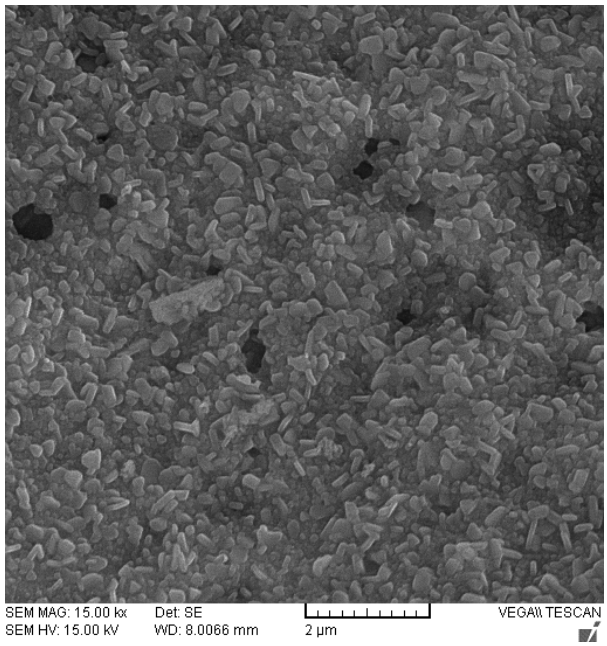
شکل (19) نمودار وزن‌سنجی گرمایی نمونه شماره 2 را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (19) هیچ پیک دیگری در محدوده دمایی تکلیس وجود ندارد و مجددا با افزایش دما تا بالای 930 درجه سانتی‌گراد، تجزیه فاز ابررسانای Y:123 و افزایش جرم در اثر افزایش محتوای اکسیژن صورت گرفته است.

[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]




شکل 16- طیف‌سنجی اشعه ایکس نمونه تکلیس شده در 970 درجه سانتیگراد.



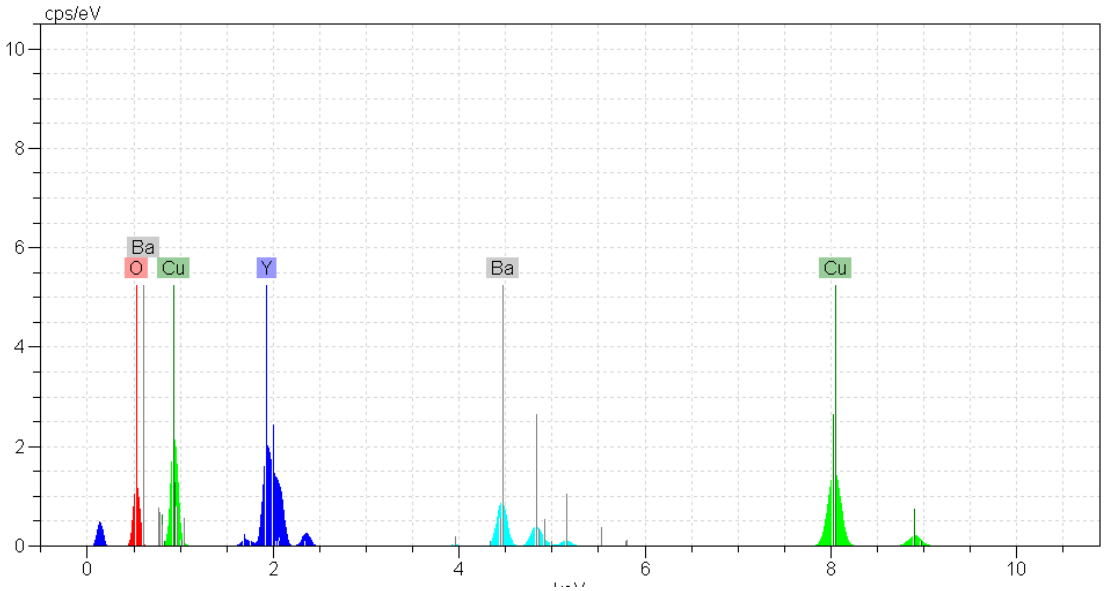

شکل 17- تصویر میکروسکوپی الکترونی نمونه شماره 3.

برای پوشش‌دهی فیلم لایه نازک از روش PLD استفاده شد. هدف YBCO در یک نگه‌دارنده چرخان در یک محفظه خلا در مقابل لیزر $1\ J.Pulse^{-1}$ از نوع KrF قرار داده شد. برای برخورد لیزر به ماده تازه در طی زمان هدف همواره در حال چرخش است. ماده هدف با کمک پرس و تف‌جوشی، مطابق آنچه در بخش قبل توضیح داده شد، به صورت قرص تهیه شد. در روش PLD از لنز کوارتز برای تمرکز لیزر استفاده می‌شود. زیرلایه که یک بایکریستال STO (ویفر زیرلایه دوکریستالی $SrTiO_3$) با ابعاد 1×1 سانتی‌متر مربع بود در یک فاصله 8 cm از هدف روی گرم‌کننده قرار گرفت و یک نرخ رسوب حدود $0/2\ A^o.pulse^{-1}$ با فرکانس لیزر 5 Hz را داشت. به دلیل انتقال اتم به اتم ماده در این روش اتم‌های صفحات مختلف ساختار کریستالی ماده به طور مداوم و یکنواخت از هدف به زیرلایه منتقل می‌شوند و بنابراین استوکیومتری ماده پوشش با ماده هدف یکسان خواهد ماند. پارامترهای رسوب عبارت بود از: طول موج 248 nm (KrF)، انرژی $2-1\ J.cm^{-2}$، نقطه هدف $3\ mm^2$، فاصله هدف 4-3 cm، فشار 1 m.bar، دمای زیرلایه 780 درجه سانتی‌گراد.

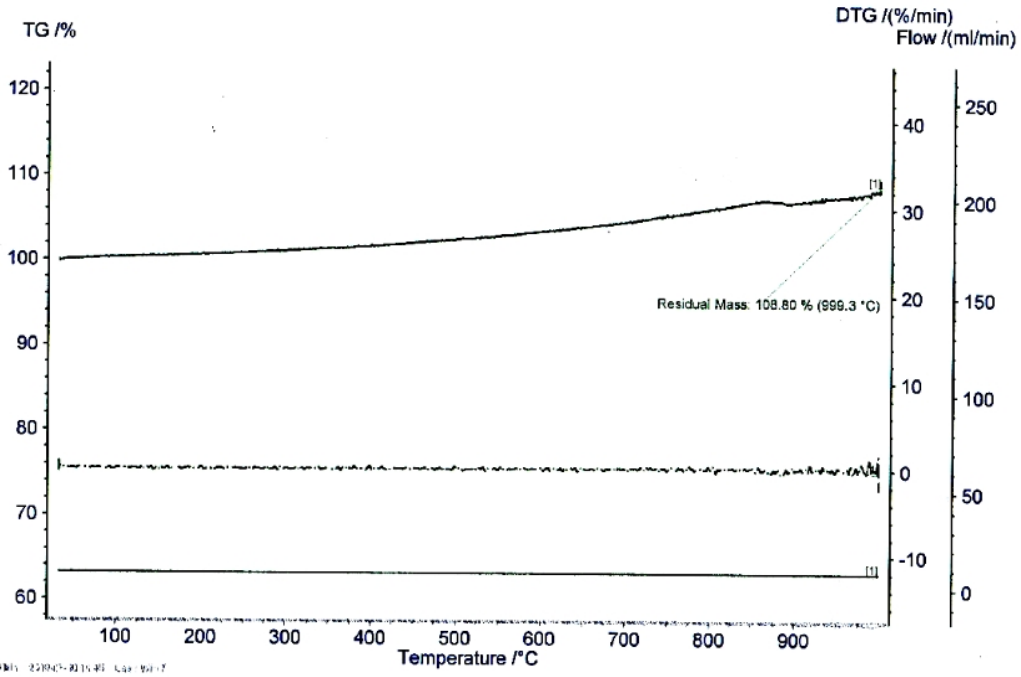
نمونه فیلم نازک تولیدشده سپس از طریق آزمون رسانایی چهار نقطه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. جریان مورد استفاده 140 میلی‌آمپر و از ترموکوپل نوع T برای بررسی تغییرات دما استفاده شد. شکل (20) نمودار رسانایی فیلم نازک تولیدشده را نشان می‌دهد. همان‌طورکه شکل (20) نشان می‌دهد، دمای ابررسانایی این فیلم نازک در حدود 94 کلوین است که دمایی بسیار مناسب برای ابررسانایی این فیلم نازک است و بیانگر حفظ خواص ابررسانا تا مرحله پایانی لایه‌نشانی فیلم نازک هست.

شکل (20-الف) تصویر ویفر حسگر با پوشش YBCO را نشان می‌دهد. فرایند پوشش‌دهی لایه نازک تا ضخامت 50 nm ادامه پیدا کرد.

[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]




شکل 18- الگوی پراش انرژی اشعه ایکس نمونه شماره 3.

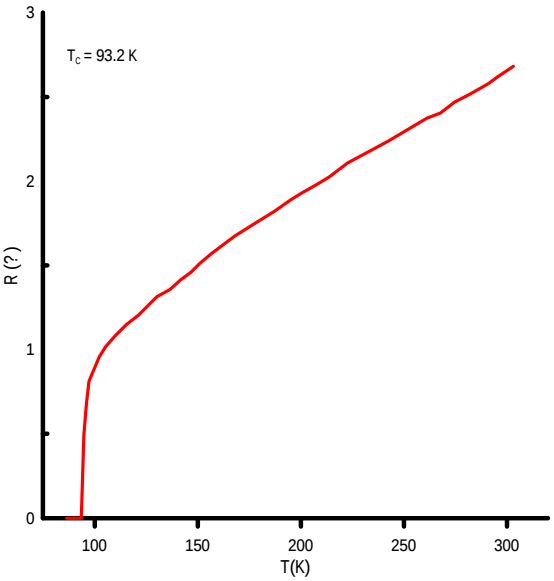



شکل 19 – نمودار وزن سنجی گرمایی نمونه شماره 2 پس از فرایند تکلیس.

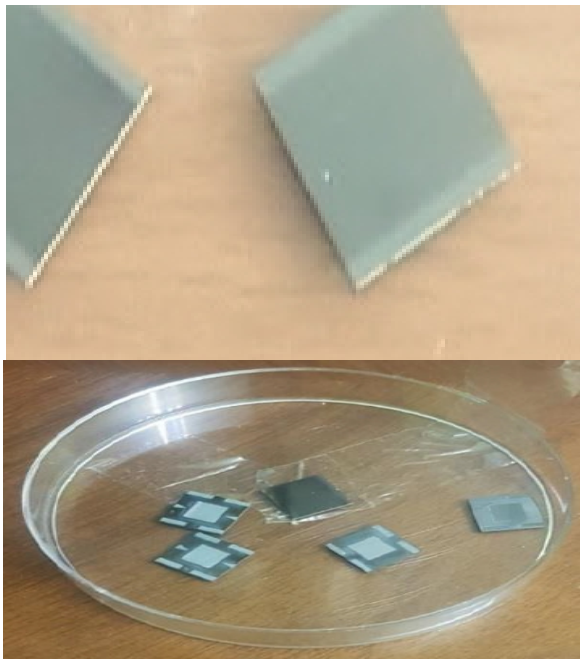
در پایان الگوی مدار حسگر اسکوییدی جریان مستقیم به روش الگودهی با لیزر متمرکز بر روی ویفر ایجاد شد. شکل (20-ب) تصویر حسگر نهایی با مدار الگودهی‌شده را نشان می‌دهد. از این حسگر می‌توان برای تشخیص عیوب عمیق و یا آشکارسازی حضور و میزان فازهای مغناطیسی استفاده نمود. به طور کلی یک سیستم بررسی غیرمخرب جریان گردابی مبتنی بر حسگرهای SQUID از یک XY اسکـنر دقیــق و یک سیستم جمع‌آوری داده کنترل‌شده توسط کامپیوتر تشکیل شده است. خوانش و ثبت تغییرات جریان خروجی حسگر اسکوییدی به کمک اسیلوسکوپ نیز قابل انجام خواهد بود. از آن‌جایی‌که سیستم‌های معمولی بررسی غیرمخرب عیوب جوش با جریان گردابی تنها عیوب تا عمق 2 میلی‌متر را تشخیص می‌دهند، از سیستم‌های مبتنی بر اسکویید برای تشخیص عیوب عمیق‌تر تا عمق بیش از 1/5 سانتی‌متر می‌توان

[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

استفاده نمود.




شکل 20 – نمودار آزمون رسانایی چهارنقطه‌ای فیلم نازک ابررسانا.



شکل 20- الف) تصویر ویفر با پوشش YBCO و ب) حسگر اسکوییدی الگودهی شده نهایی.

همچنین تشخیص فازهای مغناطیسی در ساختار و درعمق قسمت‌های جوشکاری‌شده نیز به کمک این حسگر قابل انجام است. این سیستم برای تشخیص نقص‌های زیرسطحی در صفحات رسانای نسبتا ضخیم استفاده می‌شود، که به واسطه محدودیت‌های عمق پوست به طور معمول با تکنیک‌های معمولی قابل تشخیص نیست [4].

## 4- نتیجه‌گیری

تولید محصولات ابررسانای دمابالا در سال‌های اخیر گسترش چشمگیری یافته است و هر روز کاربردهای گوناگونی به دلیل دمای مناسب عملکرد این مواد افزوده می‌شود. دستگاه‌های تشخیص غیرمخرب عیوب در صفحات رسانا با کمک جریان گردابی از جمله دستگاه‌هایی هستند که با سنسورهای تولیدشده با فیلم نازک مواد ابررسانای دما بالا در این زمینه گسترش می‌یابند. این دستگاه‌ها علاوه بر شناسایی عیوب سطحی قادرند عیوبی که در عمق بیشتری از سطح قرار دارند و به وسیله روش‌های معمول غیرقابل تشخیص هستند، آشکار سازند. در این تحقیق با بررسی فرایند سل ژل خود احتراق به بهینه‌سازی فرایند تولید پودر ابررسانای YBCO پرداخته شد. شرایط بهینه تکلیس ماده ابررسانای Y:123 با خلوص بالا تولیدشده به وسیله فرایند سل ژل خود احتراق عبارت است از گرم‌شدن در کوره تا دمای تکلیس 930 درجه سانتی‌گراد، سپس خنک‌شدن تا دمای 700 درجه سانتی‌گراد با نرخ 1 ºC/min، در ادامه خنک‌شدن تا دمای 400 درجه سانتی‌گراد با نرخ 0/5 ºC/min و در نهایت قرارگرفتن نمونه خارج از کوره در معرض هوای آزاد. این فرایند از آن‌جاکه به تسریع فرایند تولید و کاهش هزینه آنیل بعدی ماده تولیدی کمک می‌کند، اهمیت فراوانی خواهد داشت. در نهایت با کمک زیرلایه STO و استفاده از تکنیک PLD به پوشش‌دهی این پودر بر روی زیرلایه بایکریستال STO پرداخته و یک ویفر حسگر اسکوییدی با ضخامت فیلم نازک 50 نانومتر تهیه شد. شرایط بهینه برای پوشش‌دهی تعیین شد که عبارت است از طول موج 248 nm (KrF)، انرژی $J.cm^{-2}$ 2-1، نقطه هدف $mm^2$ 3، فاصله هدف cm 4-3، فشار m.bar 1، دمای زیرلایه 780 درجه سانتی‌گراد. دمای ابررسانایی زیرلایه در حدود 94 کلوین اندازه‌گیری شد که دمای بهینه برای فیلم نازک از جنس

[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]

YBCO است. روش الگودهی اشعه لیزر متمرکز برای الگودهی حسگر اسکوییدی جریان مستقیم با موفقیت به کار گرفته شد و حسگر اسکوییدی مناسب تولید گردید.

## منابع


[1] Malozemoff, A.P., Fleshler, S.,Rupich, M., Thieme, C., Li, X.,Zhang, W., Otto, A., Maguire, J., Folts, D., Yuan, J., Kraemer, H.P., Schmidt, W., Wohlfart, M., and Neumueller, H.W., "Progress in HTS Coated Conductors and Their Applications", *Superconductor Science and Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 1 – 12, 2008.

[2] Nagendran, R., Janawadkar, M.P., Pattabiraman, M., Baisnab, D.K.,Jayapandian, J., Baskaran, R.,Vaidhyanathan, L.S., Hariharan, Y., Nagesha, A.,Valsan, M., Sankara Rao, K.B., and Raj, B., "Development of SQUID-Based System for Nondestructive Evaluation", *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, VOL. 17, NO. 3, pp. 3824 – 3828, 2007.

[3] Geshkenbein, V. B., Larkin, A. I., and Barone, A., "Vortices with half magnetic flux quanta in heavy-fermion superconductors", *Physical Review B*, Vol. 36, No. 1, pp. 235–238, 1987.

[4] Omar, M., *Nondistructive Testing Methods and New Applications*, In Tech, Croatia, 2012.

[5] Leggett, A., "What DO we know about high Tc", *Nature Physics 2*, Vol. 3, pp. 134 -136, 2006.

[6] Repelianto, A.S., and Kasai, N., "The Improvement of Flaw Detection by the Configuration of Uniform Eddy Current Probes", *Sensors*, Vol. 19, No. 397, pp. 1 -13, 2019.

[7] Tanaka, S., "High temperature superconductivity: History and Outlook". *JSAP International*, No.4, pp. 17 - 22, 2012.

[8] Maeda, H., Tanaka, Y., Fukutumi, M., Asano, T., "A New High-Tc Oxide Superconductor without a Rare Earth Element", *Japanese Journal of Applied Physics*, No. 27, pp. 209–210, 1988.

[9] Schilling, A., "Superconductivity above 130 K in the Hg–Ba–Ca–Cu–O system", *Nature*, Vol. 363, No. 56, 1993.

[10] Bednorz, J.G., and Muller, K.A., "Possible high $T_c$ superconductivity in the Ba-La-Cu-O system", *Zeitschrift für Physik B*, Vol. 64, p. 189-193, 1986.

[11] Liu, R.S., Wang, W.N., Chang, C.T., and Wu, P.T., "Synthesis and Characterization of High-Tc Superconducting Oxides by the Modified Citrate Gel Process", *Journal of Applied Physics*, L2155, 1989.

[12] Roas, B., Schultz, L., and Endres, G., "Epitaxial growth of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ thin films by a laser evaporation process", *Journal of Applied Physics*, L 53, pp. 1557–1559, 1988.

[13] Koren, G., Polturak, E., Fisher, B., Cohen, D., Kimel, G., "Highly oriented as-deposited superconducting laser ablated thin films of $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-d}$ on $SrTiO_3$, zirconia, and Sisubstrates", *Journal of Applied Physics*, Lett. 53, pp. 2330–2332, 1988.

[14] Kumar, A., *High Temperature Superconductors*, Springer, pp. 110 -120, 2012.

[15] Lee, H.K., Kwon, H.C., Kim, I.S., and Park, J.C.," Influence of the calcining temperature on the superconducting transition and critical current of Y-Ba-Cu-oxide compound", *Journal of Applied Physics*, Vol. 63, No. 2, pp. 568 – 570, 1989.

[16] Tinkham, M., *Introduction to Superconductivity*, McGraw Hill, New Jersey, pp. 20-80, 1996.

[17] Saxena, A.K., *Principles of Modern Physics*, Alpha Science International, Oxford, UK, pp. 510-563, 2007.

[18] Mele, P., Matsumoto, K., Horide, T., Ichinose, A., Mukaida, M., Yoshida, Y., and Horii, S., "Enhanced high-field performance in PLD films fabricated by ablation of YSZ-added $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ target", *Superconductor Science and Technology*, Vol. 20, No. 3, 2007.


[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29 ]