

## Research Paper

# AC Magnetic Susceptibility Measurement of High Temperature YBCO Superconductor Doped by Silver Nanoparticles

Mehrdad Ebrahimnezhad<sup>1</sup> and Gholamabbas Shams<sup>2\*</sup>

1. Department of Physics, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran.

2. Department of Physics, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran.

Received: 2021/12/22

Revised: 2022/02/08

Accepted: 2022/02/25

Use your device to scan and read the article online



DOI:

[10.30495/jnm.2022.29619.1949](https://doi.org/10.30495/jnm.2022.29619.1949)

### Keywords:

YBCO, High Temperature Superconductors, Magnetic Susceptibility, Silver Nanoparticles

### Abstract

In this study, the effect of silver nanoparticles (Ag-NPs) inclusion on the AC magnetic susceptibility of high temperature  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (Y123) + x wt% Ag (x=0.00, 0.06, 0.10 and 0.30) polycrystalline superconductors was investigated. The high temperature superconductors (Y123 + x wt% Ag) were fabricated by the solid state reaction method. XRD analysis of the samples showed superconducting orthorhombic phase with symmetry of Pmmm space group. Analysis of scanning electron microscopy (SEM) images related to the surface morphology of the samples showed that increasing silver nanoparticles dopant causes a decrease in granule size of the compounds. Real magnetic susceptibility exhibited intrinsic diamagnetic behavior and grain boundary connections and imaginary components of magnetic susceptibility showed energy loss due to flux penetration and vortex movement at the grain boundary. The critical temperature of 92 K was obtained for pure Y123 by real component of magnetic susceptibility and complete diamagnetism was observed in all samples (x=0.00, 0.06, 0.10 and 0.30). Silver decreased the critical temperature and increased the critical current density. Based on the obtained values of maximum Josephson current and Josephson intergranular energy coupling, it can be concluded that x=0.10 is the best weight percentage for Ag among the Y123 doped samples. Indeed, the greater inter-granular Josephson coupling energy causes, the superior of the trapping force and consequently produces the better critical current density.

**Citation:** Mehrdad Ebrahimnezhad and Gholamabbas Shams, AC Magnetic Susceptibility Measurement of High Temperature YBCO Superconductor Doped by Silver Nanoparticles, Quarterly Journal of New Materials. 2021; 12 (45): 95-110.

**\*Corresponding author:** Gholamabbas Shams

**Address:** Department of Physics, (college of science) Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran.

**Tell:** +98-7136191390

**Fax:** +98-7136410059

**Email:** shams@iaushiraz.ac.ir; shams\_physics@yahoo.com

## Extended Abstract

### Introduction

High temperature  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (Y123) superconductor was discovered in 1986 in Houston and in collaboration with the Wu Group of the University of Alabama. Since then for further study of superconducting properties of these compounds, extensive investigations have been made on them with different doping such as Au, Al, and Ag. Doping superconductors with some nano-size particles is an easily controlled and non-destructive technique which might lead to improve the properties of these compounds. A certain doping such as silver develops the inter-granular couplings of Y123 within grain alignment, grain boundary inclusion, and reduction of grain boundary area. Ag nanoparticle insertion decreases the grain size and upsurges the strength and rigidity of the parent compound. Silver enhances not only the magnetic-flux trapping but also the critical current density.

This investigation denotes to the study of structural analysis of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  samples involving pure and specimens doped with different amounts of Ag nanoparticles ( $x = 0.00$  wt.%,  $0.06$  wt.%,  $0.10$  wt.% and  $0.30$  wt.%) with 50-nm size. The samples are fabricated by conventional solid-state reaction method. Analysing the behaviour of the AC magnetic susceptibility, electrical resistivity and also determination of some variations in pure and added compounds have been obtained.

### Materials and Methods

Samples of pristine and silver nanoparticles (Ag-NPs) added to Y123 were manufactured by solid-state reaction method. High purity powders of  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$  and  $\text{CuO}$  purchased from Merck (Germany) were used to make the nominal composition  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ . The powders

were balanced with respect to the stoichiometric ratios and milled suitably in an agate mortar to obtain equivalently mixed powders. After pressing the blends into pellets, the calcination process performed at  $930^\circ\text{C}$  for 24 hours and re-milled after cooling. Ultimately,  $x = 0.06$ ,  $0.1$ , and  $0.3$  wt% of Ag-NPs (50 nm) were added to the calcined precursor. These mixtures were ground, pressed and sintered at  $930^\circ\text{C}$  for 24 h. The pristine Y123 sample ( $x = 0.0$  wt%) was also made under the same condition as a reference. The X-rays diffraction (XRD) patterns associated with the specimens were obtained to analyse the structure of synthesized samples by a Bruker D8 Advance diffractometer with  $\text{CuK}\alpha$  radiation. The microstructures and morphology of products were characterized by scanning electron microscope (SEM) using KYKY-EM3200 (Tungsten filaments). The electrical resistivity and ac susceptibility were done using the standard four-point probe method and Lock-in amplifier technique respectively.

### Result

According to the X-ray diffraction patterns of samples for Y123 +  $x$  wt% Ag ( $x=0.00-0.30$ ) 19 diffraction peaks are detected at  $2\theta = 22.909^\circ$  to  $87.580^\circ$  due to the planes of orthorhombic  $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ . These results designate that addition a small amount of Ag to the compound has no noticeable effect on the final product in X-ray pattern. Data analysis is shown a single-phase perovskite structure YBCO and small quantities of secondary phases, such as  $\text{BaCuO}_2$ . Obviously, there is no peak related to the Ag-based compounds corresponding to X-ray diffraction displays. Rietveld refinements was used to determin the lattice parameters  $a$ ,  $b$ , and  $c$  for all samples. The data associated with the lattice parameters  $a$ ,  $b$ , and  $c$  for the pristine

sample are 3.8091, 3.8789, and 11.6435 (Å) correspondingly.

The ac-susceptibility  $X$  measurements were examined in order to determine the intergranular coupling characters for all pure and Ag-NPs added to Y123. The real  $X'$  and imaginary  $X''$  parts of  $X = X' + iX''$  have shown a wide step-like transition and a single peak associated with the loss respectively. The variations of single peaks in  $X''$  versus temperature curves are observed from 92.5 K to 82.5 K for 0.0 wt% to 0.3 wt% Ag added sample. The Josephson energy coupling differed from 0.079 eV to 0.067 eV aimed at 0.0 wt% to 0.3 wt% Ag doped sample.

### Discussion

Based on XRD patterns no impurity up to  $x=0.3$  wt% was detected to be attributed to the reflections, except the Y123 phase being considered. The data displays by increasing the Ag nanoparticles, most of the peaks raise and showing the better crystallization of the grains. Rising of nanoparticle silver doping affected reduction of oxygen content. Superconductivity of Y123 is correlated not only to the ordering of the oxygen atoms but also to the oxygen content and oxygen vacancies in the Cu-O basal plane. Lattice constants revealed, although the lattice parameters  $a$  and  $c$  increase the lattice parameter  $b$  remains almost constant with rising of Ag doping up to 0.3%. The tendency of variation in the lattice parameters  $a$  and  $c$  with cumulative of Ag-doping is similar. These variations may be discussed to the substitution of the  $Cu^{2+}$  ions which have a minor ionic radius (0.058nm) by the longer  $Ag^{2+}$  ions (0.087nm). This large ionic radius reasons an increase of the lattice parameter  $c$  and  $a$  whereas the lattice parameters  $b$  remains nearly constant.

The observed shifting of the real part of susceptibility graphs ( $X'$ ) is related to the

intergranular characteristic of the samples and shows the efficient coupling of the superconducting grains. The smaller shifting reveals the better coupling of the superconducting grains. The detected shifting is discovered to be less in 0.1 wt% compared to other samples, which indicates the superior intergranular characters with Ag-NPs addition. For the imaginary part of susceptibility ( $X''$ ) this effect indicates the strengthening of flux pinning that notifies ultimately enhancement on the coupling force of the superconducting grains for 0.1 wt% added sample. This is a clear sign of a better inter-granular links with 0.1 wt% addition. The Josephson energy coupling data related to 0.1 wt% added sample proved that, the greater inter-granular Josephson coupling energy causes the superior of the trapping force and consequently produces the better critical current density.

### Ethical considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the this research was voluntary and accompanied by their consent.

### Funding

The present study was funded by the authors of the article.

### Authors' contributions

Design and conceptualization: Gholamabbas Shams.

Methodology and data analysis: Mehrdad Ebrahimnezhad.

Supervision and final writing: Gholamabbas Shams.

### Conflicts of interest

The authors declared that there is no conflict of interest.

## مقاله پژوهشی

اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی متغیر (AC) در ابررسانای دمای بالای YBCO  
آلاییده با نانوذرات نقرهمهرداد ابراهیم‌نژاد<sup>۱</sup> و غلامعباس شمس<sup>۲\*</sup>

۱. گروه فیزیک، (دانشکده علوم، کشاورزی و فن آوری‌های نوین)، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

۲. گروه فیزیک، (دانشکده علوم، کشاورزی و فن آوری‌های نوین)، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

## چکیده

در این پژوهش پذیرفتاری مغناطیسی AC در ابررسانای دمای بالای YBCO آلاییده شده با نانوذرات نقره مورد بررسی قرار گرفت. ابررسانای دمای بالای YBCO با درصد‌های وزنی آلایش  $x=0/06$ ،  $x=0/10$  و  $x=0/30$  با استفاده از روش واکنش حالت جامد ساخته شد. آنالیز XRD نمونه‌ها فاز ارتورومبیک ابررسانا و تقارن گروه فضایی Pmmm را نشان دادند. تحلیل تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مربوط به مورفولوژی سطحی مواد ابررسانای خالص Y123 و آلایش یافته با نانوذرات نقره ( $Y123+x$  Ag wt%)، کاهش اندازه دانه و ساختارهای متراکم را در اثر افزایش نانوذرات نقره ظاهر نمودند. قسمت‌های حقیقی پذیرفتاری مغناطیسی، رفتار دیامغناطیسی ذاتی و اتصالات مرز دانه‌ای را نمایان ساخته و مولفه‌های موهومی پذیرفتاری مغناطیسی، اتلاف انرژی ناشی از نفوذ شار و حرکت گردش‌ها در مرز دانه‌ها را نشان دادند. از بررسی نمودار حقیقی پذیرفتاری مغناطیسی نمونه خالص Y123 دمای بحرانی ۹۲ کلوین به دست آمد و دیامغناطیس کامل در تمامی نمونه‌ها ( $x=0/06$ ،  $x=0/10$  و  $x=0/30$ ) مشاهده گردید. همچنین همه نمونه‌ها با وجود نانوذرات نقره به طور کامل ابررسانا باقی مانده و افزودن نانوذرات نقره دمای بحرانی را کاهش و چگالی جریان بحرانی را افزایش داد. نتیجه این که بر مبنای مقادیر به دست آمده ماکزیمم جریان ژوزفسون و انرژی جفت شدگی بین دانه‌ای ژوزفسون،  $x=0/10$  بهترین درصد وزنی برای Ag در میان نمونه‌های آلاییده شده Y123 است. در حقیقت انرژی جفت شدگی بین دانه‌ای ژوزفسون باعث افزایش نیروی مهارکننده شده که این خود افزایش چگالی جریان بحرانی را به دنبال خواهد داشت.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۱

تاریخ داوری: ۱۴۰۰/۱۱/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۶

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

[10.30495/jnm.2022.29619.1949](https://doi.org/10.30495/jnm.2022.29619.1949)

## واژه‌های کلیدی:

YBCO، ابررسانای دمای بالا، پذیرفتاری مغناطیسی، نانوذرات نقره

\* نویسنده مسئول: غلامعباس شمس

نشانی: گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز، شیراز، ایران.

تلفن: +۹۸-۷۱۳۶۱۹۱۳۹۰

دورنگار: +۹۸-۷۱۳۶۴۱۰۰۵۹

پست الکترونیکی: shams@iaushiraz.ac.ir, shams\_physics@yahoo.com

## مقدمه

ابررسانای دمای بالای  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (Y123) در سال ۱۹۸۶ میلادی به وسیله گروه چو (Chu) و همکارانش در دانشگاه هیوستون و با همکاری گروه وو (Wu) از دانشگاه آلاباما کشف گردید [1, 2]. از آن به بعد به دست آوردن اطلاعات دقیق از خواص حرارتی و الکتریکی این ماده که به ابررسانای دمای بالای YBCO معروف شد هدف اصلی دانشمندان این رشته بوده تا بتوانند از این ماده در صنعت و تکنولوژی، روز استفاده کنند. بنابراین شناخت پارامترهای ابررسانای خالص YBCO و یا آلیش شده با نانو مواد مختلف یکی از موضوعات جالب توجه در علم و فناوری است. برای بهبود خواص ابررسانایی این کامپوزیت‌ها، محققان به طور گسترده ای این مواد را با ناخالصی‌های مختلف مانند  $SnO_2$ ,  $CeO_2$ ,  $BaZrO_3$ ,  $CoFe_2O_4$ ,  $Al$ ,  $Au$ ,  $Al_2O_3$  و Ag مورد مطالعه قرار داده‌اند [3]. برخی از این ناخالصی‌ها مانند  $Mn_3O_4$ ,  $Co_3O_4$ ,  $Cr_2O_3$  و NiO با ذرات نانومتری باعث افزایش ابررسانایی کامپوزیت‌های کپه‌ای (bulk) خانواده YBCO می‌شوند [4-6].

با این حال، بر مبنای گزارش‌های علمی، آلیش ابررساناها با ذرات نانومتری یک تکنیک و ابزار مهم کنترل شده غیر مخرب و کارآمد است که برای بهبود خواص مکانیکی، ساختاری و ابررسانایی ترکیبات آلاینده شده بکار می‌رود که این خود ممکن است منجر به تغییرات غیرمنتظره در رفتار ابررسانا شود [7, 8]. ناخالصی مشخصی چون Ag با به حداقل رساندن منطقه مرزی دانه باعث افزایش اتصالات بین‌دانه‌ای YBCO از طریق تراز دانه می‌شود. همچنین گنجاندن نانوذرات نقره باعث کاهش اندازه دانه و افزایش استحکام و سختی ترکیب اصلی می‌شود. نقره نه تنها چگالی جریان بحرانی، بلکه جذب فلوی مغناطیسی را نیز بهبود می‌بخشد [9, 10]. افزودن کنترل شده Ag بین دانه‌های YBCO منجر به اتصال بهتر شده و پیوندهای ضعیف را بهبود بخشیده و نهایتاً منجر به افزایش خواص ابررسانایی می‌شود [11]. گزارش شده است که افزودن Ag احتمالاً باعث پر شدن منافذ در مرز دانه‌ها شده که این خود در بهبود خواص مکانیکی موثر است. از نظر کاربرد، مطالعات نشان می‌دهد که افزودن Ag بر روی اکسیدهای ابررسانای کپه‌ای  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (Y123) مقاومت شکنندگی و مقاومت در برابر شوک حرارتی را بهبود می‌بخشد [12]. در سطح مزوسکوپی، نقره پلاستیسیته و مقاومت در برابر ایجاد ترک را افزایش می‌دهد [13].

در این مطالعه به بررسی و تجزیه و تحلیل الکتریکی، حرارتی و ساختاری ابررسانای پلی کریستالی دمای بالای Y123 که با

روش استاندارد واکنش حالت جامد [14] تولید شده‌اند پرداخته و تاثیر آلیش مقادیر مختلف ( $x=0/00 - 0/30$  wt%) نانوذرات نقره (Ag) (۵۰ نانومتر) بر پارامترهای بحرانی این ابررساناها را مورد مطالعه قرار داده ایم. به طور مشخص پارامترپذیرفتاری مغناطیسی متغیر این مواد اندازه‌گیری و تغییرات آن در اثر آلیش با نانوذرات نقره برای اولین بار نشان داد که بر مبنای مقادیر ماکزیمم جریان ژوزفسون و انرژی جفت شدگی بین‌دانه‌ای ژوزفسون،  $x=0/10$  بهترین درصد وزنی برای Ag در Y123 در میان نمونه‌های آلاینده شده است.

## فعالیت‌های تجربی

پودر نانوذرات نقره از شرکت NaBond واقع در هنگ گنگ خریداری گردید. این پودر با روش پروسه بخار لیزر تولید شده است. خلوص نانوذرات خام بیش از ۹۹/۵ درصد با متوسط اندازه ذرات ۵۰ نانومتر و مورفولوژی کروی و رنگ خاکستری است که با میکروسکوپ الکترونی انتقالی (TEM) تعیین شده است. نانوذرات نقره با پودرهای تشکیل‌دهنده YBCO که شامل  $Y_2O_3$ ,  $BaCO_3$  و CuO هستند مخلوط گردیده و در یک هاون مرمر ساییده شده و جهت رعایت یکنواختی مخلوط در یک شیشه تمیز به مدت نیم ساعت غلتش داده شدند. مقدار دوپینگ Ag، در این مورد، از  $x=0/00$  تا  $x=0/30$  درصد وزنی از کل جرم نمونه متغیر است. پودرهای ترکیبی در قالب دیسک‌های مدور و ابعاد ۳۰ میلی‌متر  $\times$  ۴ میلی‌متر با فشار ۲۰۰ بار فشرده شدند. فرآیند کلسیناسیون شامل گرم کردن کوره به دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد با سرعت ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در ساعت و ثابت ماندن در این دما به مدت ۱۲ ساعت و سپس گرم شدن تا دمای ۹۳۰ درجه سانتی‌گراد با سرعت ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در ساعت و سپس کلسینه شدن در دمای ۹۳۰ درجه سانتی‌گراد برای ۲۴ ساعت و نهایتاً سرد شدن و رسیدن به دمای اتاق با سرعت ۶۰ درجه سانتی‌گراد در ساعت می‌باشد. قبل از فرآیند پخت، نمونه‌های کلسینه مرحله قبل به مدت ۲۰ دقیقه آسیاب شدند تا اندازه ذرات آن‌ها تقریباً کمتر از ۱۰ میکرومتر گردد و سپس پودر به دست آمده با استفاده از قالب فولادی به قطر ۳۰ میلی‌متر با فشار ۴۰۰ بار فشرده شده تا نمونه دیسک شکلی به ضخامت تقریباً ۳ میلی‌متر به دست آید. برای فرآیند پخت، نمونه‌ها در کوره قرار داده شدند و دما به میزان ۹۳۰ درجه سانتی‌گراد با نرخ ۹۰ درجه سانتی‌گراد در ساعت افزایش یافت و سپس نمونه‌ها در این دما به مدت ۲۴ ساعت پخته شدند. سپس درجه حرارت به میزان ۲۰ درجه سانتی‌گراد در ساعت به ۷۲۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته و در حضور اکسیژن ۱ اتمسفر و با سرعت ۱۰ درجه سانتی‌گراد در ساعت نمونه‌ها به دمای اتاق

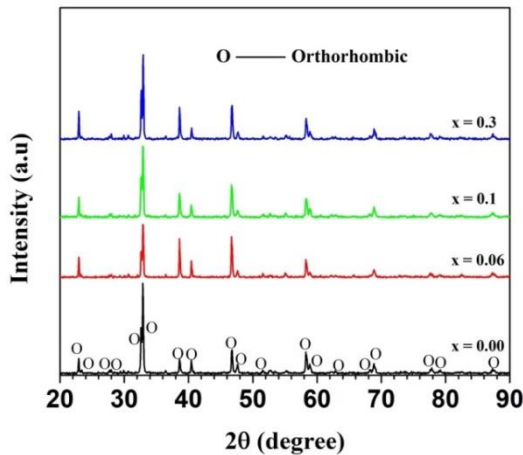
رسیدند. پودر خالص ( $x=0/00$  درصد وزنی) به‌عنوان مرجع در نظر گرفته شده و آن را درست مانند نمونه‌های آلیش یافته آسیاب نموده تا از شرایط یکسان ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌ها اطمینان حاصل شود. پس از آماده‌سازی، ساختار و شناسایی فاز تمامی نمونه‌ها از جمله نمونه خالص YBCO و نمونه‌های آلیش یافته با نانوذرات Ag مورد مطالعه قرار گرفت. این عمل به‌وسیله پراش اشعه ایکس (XRD) روی پودر مواد سنتز شده و با استفاده از پراش سنج بروکر DB Advance با تابش  $CuK\alpha$  (جریان مولد ۴۰ میلی‌آمپر و ولتاژ ژنراتور ۴۰ میلی‌ولت) انجام شد. در حالی که  $K\alpha = 1.540598 \text{ \AA}$  و محدوده ی زاویه‌ی پراش  $2\theta = 20^\circ - 90^\circ$  انتخاب گردید. تجزیه‌وتحلیل پراش اشعه ایکس با روش Rietveld و نرم افزار X'Pert High Score انجام شد. ثابت‌های شبکه  $a$ ،  $b$  و  $c$  و همچنین مقدار اکسیژن مواد تخمین زده شد. متوسط اندازه بلورک نمونه‌های خالص و دوپ شده با مقادیر مختلف نانوذرات نقره بر مبنای معادله شرر (Scherrer) [15]، به‌صورت زیر محاسبه شدند.

شکل ۱ الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به نمونه خالص و نمونه‌های آلیش یافته با مقادیر مختلف نانوذرات نقره از ۰/۰۶ تا ۰/۳۰ درصد وزنی نمایش داده شده است. آنالیز XRD نمونه خالص با شماره مرجع ICSD 98-003-6464 مطابقت داشته و دارای فاز ارتورومبیک ابررسانا و تقارن فضایی Pmmm می‌باشد. بیش‌تر قله‌های به دست آمده با اندیس‌های میلر ( $hkl$ ) در توافق بسیار خوبی با سایر تحقیقات مربوط به Y123 هستند، به‌خصوص بلندترین قله در  $2\theta = 32.8^\circ$  و با ثابت‌های میلر (103) [17، 18]. همچنین قله‌های اضافی دیگری در رابطه با نمونه خالص بین  $27^\circ$  و  $31^\circ$  وجود داشته که بیان‌گر فاز ثانویه  $Y_2BaCuO_5$  (Y211) است. این نتایج به وضوح نشان می‌دهد که افزودن مقدار کمی نقره به نمونه، تأثیر مشخصی بر محصول نهایی و در نتیجه در الگوی اشعه ایکس ندارد. با تجزیه‌وتحلیل داده‌ها یک ساختار پروسکایتی عمدتاً تک‌فاز YBCO و مقادیر کمی از فازهای ثانویه، مانند  $BaCuO_2$  نشان داده می‌شوند. ظاهراً با توجه به الگوهای پراش اشعه ایکس، هیچ پیکی مربوط به ترکیبات مبتنی بر Ag وجود ندارد. هیچ ناخالصی از  $x=0/06$  تا  $x=0/30$  درصد وزنی یافت نگردید که به بازتاب‌های Ag نسبت داده شود، به‌جز فاز Y123 که در الگوهای اشعه ایکس تشخیص داده شدند. شکل ۱ نشان می‌دهد که با افزایش نانوذرات نقره، بیش‌تر پیکی‌ها رشد داشته که نشان‌دهنده تبلور بهتر دانه‌ها است. این اثر در قله  $38/633^\circ$  و همچنین، در  $46/803^\circ$  به‌ویژه با ناخالصی  $x=0/30$  درصد وزنی، مشهود بوده که مشابه مواردی است که توسط فرید و همکاران گزارش شده است [11]. پارامترهای شبکه  $a$ ،  $b$  و  $c$  برای نمونه‌های خالص و آلیش یافته با نانوذرات نقره که در جدول ۱ فهرست گردیده‌اند، توسط اصلاحات Rietveld تعیین شدند. این داده‌ها نشان می‌دهد که مقادیر پارامترهای شبکه  $a$ ،  $b$  و  $c$  برای نمونه

$$P = \frac{C\lambda_{Cu}}{B\cos\theta} \quad (1)$$

که در آن P میانگین اندازه دامنه‌های مرتب شده (بلورک‌ها) است که ممکن است کوچکتر یا برابر با اندازه دانه باشد. C یک ضریب شکل بدون بعد برابر با (0.89) است،  $\lambda_{Cu}$  طول موج اشعه ایکس است ( $\lambda_{Cu} = 1.5418 \text{ \AA}$ )، B پهنای پیک کامل است که برای تصحیح پهنای پیک در نصف ارتفاع بیشینه (FWHM) بر حسب رادیان بکار رفته، و  $\theta$  زاویه براگ پیک‌های پراش است. مورفولوژی و میکرو ساختارهای نمونه‌ها به‌وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل KYKY-EM3200 با ولتاژ شتاب ۲۰ و ۲۶ کیلوولت، رزولوشن ۶ نانومتر (فیلامان تنگستن) و بزرگنمایی  $\times 250000$  تعیین گردید. نمونه‌ها با یک لایه نازک از طلا به‌عنوان پوشش دهنده ماده حاجب با استفاده از پوشش‌دهنده یونی SBC-12 شرکت (KYKY) پوشیده شدند. توضیحات بیش‌تر در مورد چگونگی ساخت مواد را می‌توان در مقالات منتشر شده قبل یافت [7، 8، 16].

اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی برای مطالعه حالت‌های نرمال و ابررسانایی مواد Y123 بدون اعمال میدان مغناطیسی و با استفاده از روش استاندارد کاوشگر چهارنقطه‌ای انجام شد. اندازه‌گیری‌ها از ۱۰ تا ۳۰۰ کلومین با دقت ۰/۱ کلومین، در حالی که دما با سرعت ۱ درجه سانتی‌گراد در دقیقه افزایش می‌یافت صورت پذیرفت. برای اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی AC، نمونه‌ها در میدان مغناطیسی متناوب ایجاد شده توسط دو



شکل ۱- الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) مربوط به نمونه خالص و نمونه‌های آلیش یافته با مقادیر مختلف نانو ذرات نقره با درصد وزنی از ۰/۰۶ تا ۰/۳۰

خالص به ترتیب  $3/8091 \text{ \AA}$ ،  $3/8789 \text{ \AA}$  و  $11/6435 \text{ \AA}$  می‌باشند. حجم سلول که برای همه نمونه‌ها برابر با  $abc$  است در جدول ۱ ثبت شده است. میزان اکسیژن نیز برای نمونه‌های خالص و اضافه شده با نانو ذرات نقره مربوط به  $x=0/00$ ،  $x=0/06$ ،  $x=0/10$ ،  $x=0/30$  و  $x=0/91$  به ترتیب به ترتیب ۶/۷۸، ۶/۷۳ و ۶/۸۶ نشان داده شده اند. با توجه به این جدول، افزایش دوپینگ نانو ذرات نقره باعث کاهش مقدار اکسیژن ماده ابررسانا می‌گردد. ابررسانایی YBCO نه تنها به مقدار اکسیژن (مقدار اکسیژن باید از ۶/۵ بیشتر باشد) بلکه به ترتیب اتم‌های اکسیژن و جای خالی اکسیژن در صفحه پایه Cu-O نیز مرتبط است.

جدول ۱- ثابت‌های شبکه ساختاری، حجم سلول، متوسط اندازه بلورک ها، چگالی حجمی، اورتورومبیسیتی و مقدار اکسیژن ترکیبات Y123 آلیش یافته با مقادیر مختلف نانو ذرات نقره

$x = 0/30$	$x = 0/10$	$x = 0/06$	$x = 0/00$	پارامترها
3/8193	3/8134	3/8103	3/8091	$a$ (Å)
3/8835	3/8784	3/8789	3/8789	$b$ (Å)
11/6832	11/6409	11/6287	11/6435	$c$ (Å)
173/29	172/17	171/87	172/03	حجم سلول (Å) <sup>3</sup>
6/73	6/78	6/86	6/91	مقدار اکسیژن
24/40	25/94	26/32	26/74	اندازه متوسط بلورک‌ها (nm)
4/46	4/40	4/22	4/18	چگالی حجمی (gr/cm <sup>3</sup> )
8/33	8/45	8/92	9/1	$10^{-3} \times$ اورتورومبیسیتی $Y = (a - b)/(a + b)$

می‌رسد که دانه‌ها در یک طرف بیش‌تر کشیده می‌شوند و ساختاری تقریباً مستطیل شکل را تشکیل می‌دهند. اندازه متوسط دانه با استفاده از ۴۰ تا ۵۰ دانه انتخاب شده با در نظر گرفتن هر دو بعد دانه‌ها، اندازه‌گیری شد و مقادیر ۰/۶، ۰/۷ و ۰/۵ میکرومتر، به ترتیب برای نمونه‌های  $x=0/10$ ،  $x=0/06$  و  $x=0/30$  به دست آمد.

به هر حال در نمونه‌های دوپ شده با افزایش نانو ذرات نقره، کاهش اندازه دانه‌ها صورت پذیرفته که ممکن است در اثر تراکم پیوندی باشد و همچنین اتصال بین دانه‌ها بهبود یافته است. با کاهش اندازه دانه‌ها مقدار مرزهای دانه‌ها افزایش می‌یابد که این خود می‌تواند باعث شود که اثرات ابعادی کم‌تر در خواص انتقال رخ دهد. لازم به ذکر است که با کاهش اندازه دانه و زمانی که تعداد مرزهای دانه افزایش می‌یابد در نهایت

### تجزیه و تحلیل تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مربوط به مورفولوژی سطحی مواد ابررسانای فله ای پلی کریستال خالص Y123 و آلیش یافته با نانو ذرات نقره (Y123+x wt%Ag) با مقادیر مختلف  $x=0/00$ ،  $x=0/06$ ،  $x=0/10$  و  $x=0/30$  درصد وزنی را نشان می‌دهد. در شکل ۲-آ اندازه متوسط دانه‌های سرامیک‌های خالص Y123 با توجه به مرجع میله‌ای شکل (1  $\mu\text{m}$ ) به اندازه ۰/۷۵ میکرومتر تخمین زده می‌شود. در شکل‌های ۲-ب، ج، د یعنی در نمونه‌های دوپ شده با نانو ذرات نقره، با افزودن ناخالصی نانو ذرات نقره، اندازه دانه‌ها نسبت به دانه‌های نمونه خالص کاهش می‌یابد. واضح است که هر سه شکل ۲-ب، ج، د کاهش اندازه دانه و ساختارهای فشرده‌تری را با افزایش افزودن نانو ذرات نقره نشان می‌دهند. همچنین به نظر

تعداد بیش‌تری از پیوندهای ضعیف تشکیل می‌شود [10، 19]. پنج قله با بیش‌ترین ارتفاع در مکان‌های  $2\theta$  برابر با مقادیر ۲۳، ۳۲/۸۲، ۳۸/۷۰، ۴۰/۴۴ و ۴۶/۸۵ درجه برای به دست آوردن اندازه بلورک انتخاب شدند. متوسط اندازه بلورک‌ها به ترتیب برابر با ۲۶/۷۴، ۲۶/۳۲، ۲۵/۹۴ و ۲۴/۴۰ نانومتر برای مقادیر مختلف  $x=0/00$ ،  $x=0/06$ ،  $x=0/10$  و  $x=0/30$  درصد وزنی به دست آمدند. واضح است که اندازه بلورک‌های نمونه‌های آلیش‌یافته با افزودن Ag نسبت به نمونه خالص کاهش یافتند.

### مقاومت الکتریکی

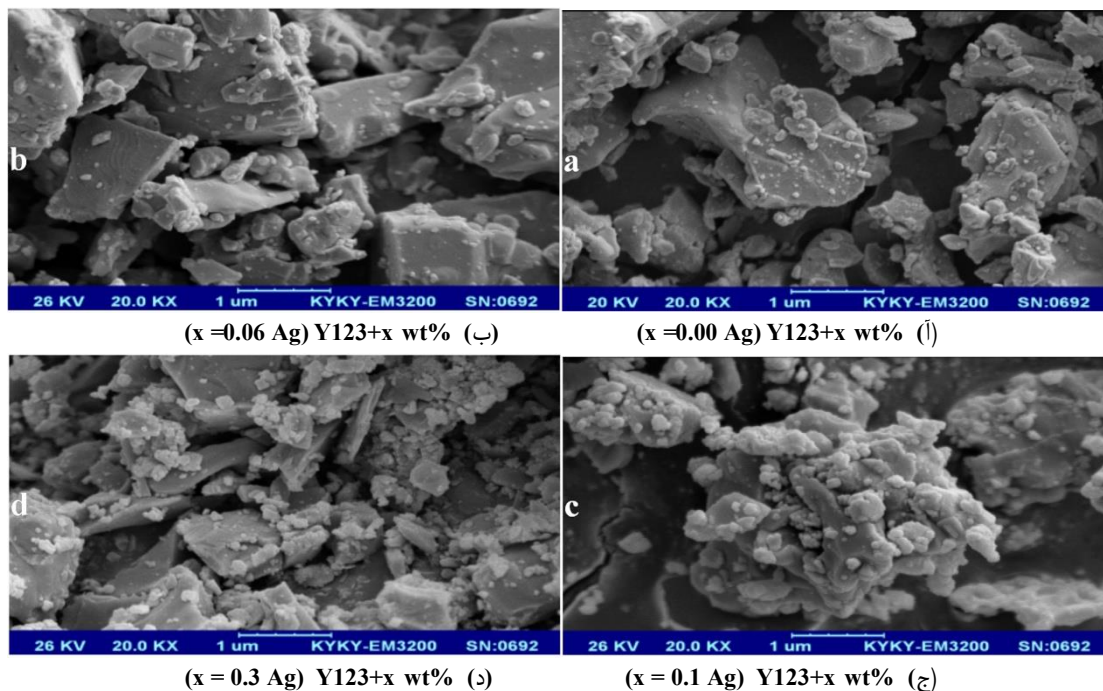
شکل ۳ منحنی ضریب مقاومت مخصوص (Resistivity) بر حسب دما (Temperature) متعلق به ابرسانای خالص Y123 و آلیش یافته با نانوذرات نقره (Ag) با درصدهای وزنی مختلف و آلیش ( $x=0/00$ ،  $0/06$ ،  $0/10$  و  $0/30$ ) را نشان می‌دهد. طبق این نمودار، انواع کلی نمودار مقاومت در برابر دما، رفتار فلزی را در حالت غیر ابرسانا از خود نشان می‌دهند و می‌توان آن‌ها را به صورت زیر فرمول‌بندی کرد.

$$\rho_n = \rho_0 + \beta T \quad (2)$$

در این معادله خطی،  $\rho_0$  و  $\beta$  به ترتیب مقاومت باقی‌مانده و شیب خط در حالت غیر ابرسانا (نرمال) هستند، که عبارت اول یکنواختی نمونه را نشان می‌دهد و جمله دوم نشان‌دهنده رابطه

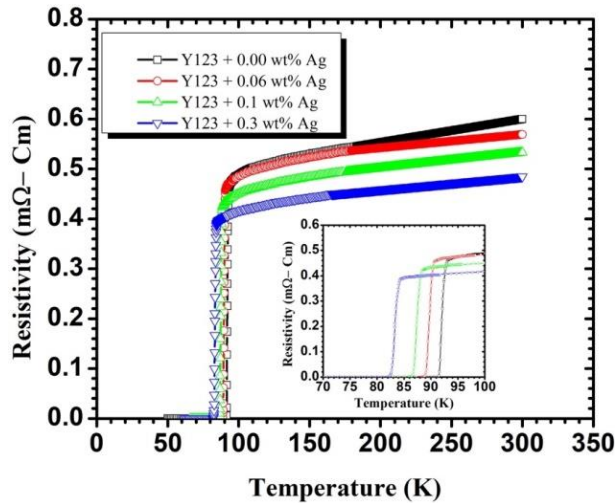
شکل ۴ منحنی مشتق ضریب مقاومت مخصوص بر حسب دما ( $dp/dT$ ) را نمایش می‌دهد. متداول‌ترین تکنیک برای تعیین دمای بحرانی ( $T_C$ ) استفاده از منحنی ( $dp/dT$ ) نسبت به دما است. دمای مرتبط با اوج این انحنا، دمای بحرانی  $T_C^P$  ابرساناهای Y123 را مشخص می‌کند که در شکل ۴ نشان داده شده‌اند.

از قسمت داخلی شکل ۳ به خوبی واضح است که با افزایش دوپینگ نانوذرات نقره  $T_C$  onset کاهش می‌یابد. پارامتر دیگر در رابطه با دمای بحرانی  $T_C$  zero است که برای همه نمونه‌ها در قسمت داخلی شکل ۳ نشان داده شده است. با افزایش مقدار نانوذرات نقره  $T_C$  zero همچنین کاهش می‌یابد. مقادیر این پارامترها در جدول ۲ مستند شده‌اند.



شکل ۲- عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به سطح ابرسانای خالص Y123 و آلیش یافته با نانوذرات نقره (Ag) با درصدهای وزنی مختلف ( $x=0/30$  و  $0/10$ ،  $0/06$ ،  $0/00$ )

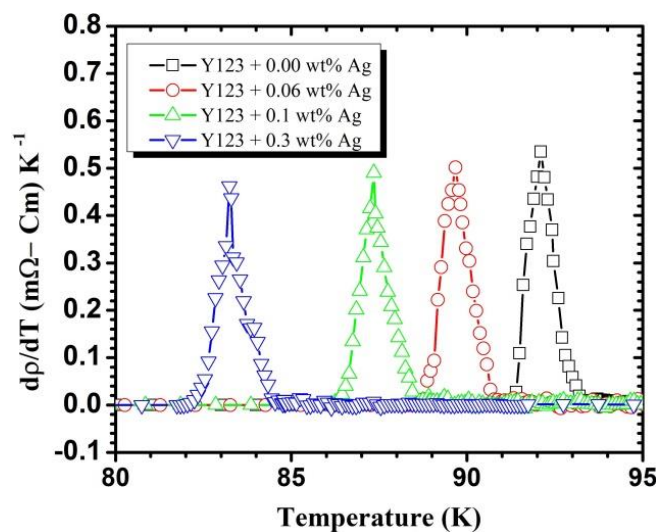




شکل ۳- منحنی ضریب مقاومت مخصوص (Resistivity) بر حسب دما (Temperature) متعلق به ابررسانای خالص Y123 و آلیش یافته با نانو ذرات نقره (Ag) با درصدهای وزنی مختلف (0.00، 0.06، 0.10 و 0.30 wt%)

جدول ۲- پارامترهای دما  $T_{C\ onset}$ ،  $T_{C\ zero}$ ،  $T_C^P$  و  $\Delta T_C$  به همراه فاکتورهای ضریب مقاومت مخصوص  $\rho_n$  (300 K) و  $\rho_0$  (0 K) و  $\beta$  مربوط به اندازه‌گیری ضریب مقاومت مخصوص بر حسب دما به‌ازاء مقادیر مختلف نانو ذرات نقره دوپ شده با ترکیبات Y123

$x = 0.30$	$x = 0.1$	$x = 0.06$	$x = 0.00$	پارامترها
84/52	88/79	90/93	93/54	$T_{C\ onset}$ (K)
82/15	86/06	88/68	91/25	$T_{C\ zero}$ (K)
83/26	87/31	89/68	92/10	$T_C^P$ (K)
2/37	2/73	2/25	2/29	$\Delta T_C$ (K)
0/431	0/484	0/496	0/504	$\rho_0$ (0 K) (mΩcm)
0/489	0/533	0/569	0/6	$\rho_n$ (300 K) (mΩcm)
0/18	0/164	0/245	0/318	$\beta = \frac{d\rho}{dT}$ ( $\mu\Omega\text{cm}$ )/K



شکل ۴- منحنی مشتق ضریب مقاومت مخصوص بر حسب دما ( $d\rho/dT$ ) متعلق به ابررسانای خالص Y123 و آلیش یافته با نانو ذرات نقره (Ag) با درصدهای وزنی مختلف (0.00، 0.06، 0.10 و 0.30 wt%)

افت دوم در دمای پایین‌تر،  $T_{Cj}$ ، مربوط به محافظت بین‌دانه‌ای (Intergranular Shielding) است [25]. در شکل ۵ نمونه  $x=0/00$  رفتار دومرحله‌ای را نشان داد که با افزودن Ag بهبود یافت. در سایر نمونه‌ها به‌خصوص نمونه  $x=0/10$  انتقال تندتر شد، که نشان دهنده کاهش پیوندهای ضعیف و اتصال قوی‌تر بین دانه‌ها بود. با این حال، این انتقال در  $x=0/06$  و  $x=0/30$  شروع به گسترش می‌کند، که نشان می‌دهد  $x=0/10$  درصد وزنی بهینه برای Ag است. این منحنی گسترده شده به دلیل نفوذ شار مغناطیسی به سطح نمونه زمانی ایجاد می‌شود که جریان پوششی مورد نیاز برای حذف شار کاهش یابد [26]. دمای بحرانی نمونه‌ها از دمایی که  $X'$  و  $X''$  برابر صفر می‌شوند تعیین می‌شود. از دمای  $T_{C onset}$  و دمای فاز لاک‌این (Lock-in Phase) دمای  $T_{Cj}$  به دست آمده است. به بیان دیگر دمای گذار دانه‌ای ( $T_{C onset}$ ) و بین‌دانه‌ای ( $T_{Cj}$ ) نمونه‌ها به ترتیب از روی دنباله مولفه حقیقی پذیرفتاری مغناطیسی ( $X'$ ) و قله نمودار مشتق قسمت حقیقی پذیرفتاری بر حسب دما یعنی ( $dX'/dT$ ) تعیین و نتایج در جدول ۳ آورده شد. همچنین ماکزیمم جریان ژوزفسون  $I_0$  که با استفاده از تئوری Ambegaokar-Baratoff به صورت زیر به دست می‌آید [27] محاسبه و در جدول ۳ گزارش شد.

$$I_0 = (1.57 \times 10^{-8} A/K) \times \frac{(T_{C onset})^2}{T_{C onset} - T_{Cj}} \quad (4)$$

بیش‌ترین مقدار  $I_0$  محاسبه شده برابر است با  $52/87 \mu A$  که متعلق به نمونه  $x=0/10$  است. برای نمونه خالص یعنی  $x=0/00$  این مقدار به  $38/7 \mu A$  می‌رسد. در رابطه با قسمت موهومی این مطالب نیز درست است، جایی که اثرات جفت‌شدگی دانه‌ها را می‌توان بر اساس پیک‌های بین‌دانه‌ای مشاهده کرد. تشکیل پیک در منحنی‌های  $X''$  (شکل ۶) بیان‌گر تلفات انرژی است که از نفوذ شار مغناطیسی در شبکه‌های بین‌دانه‌ای پیوندهای ضعیف ناشی می‌شود [28]. مطابق با مدل Bean حداکثر تلفات زمانی رخ می‌دهد که H تا مرکز محصول نفوذ کند و از این رو پیک  $X''$  مشاهده شود [29]. به طور کلی، جداسازی پیک‌های تلفات بین‌دانه‌ای و درون دانه‌ای در مقیاس دما نشان‌دهنده دانه‌های جفت شده ضعیف است. با این وجود، در نمونه‌های آماده شده حاضر پیک‌های مربوط به تلفات انرژی از دست دادن انرژی درون دانه‌ای و بین‌دانه‌ای رانشان دادند که بیان‌گر دانه‌های جفت شده است. واضح است که با افزایش نانوذرات نقره پیک تلفات بین‌دانه‌ای به دماهای پایین‌تر تغییر می‌کند و دامنه پیک تلفات با افزایش نانوذرات نقره در Y123 ثابت می‌ماند. این یافته‌ها شرایط بهتری در به دام انداختن شار و جفت شدن دانه‌ها را نشان می‌دهد [30].

بر مبنای این شکل همانطور که وارد نمودن ناخالصی‌های نانومقیاس نقره افزایش می‌یابد،  $T_C^P$  برای همه نمونه‌های دوپ شده کاهش می‌یابد و به دلیل ادغام نقره، تغییرات درون دانه‌ای رخ می‌دهد. با اضافه شدن نانوذرات نقره در مقایسه با نمونه خالص، تمامی دماهای بحرانی  $T_{C zero}$  کاهش می‌یابند که این خود به دلیل پخش یکسان عناصر نانو متری است که باعث عدم همبستگی دانه‌ای می‌شوند. برای ابررساناهای پلی کریستال، طیف گسترده‌ای از انتقال دمای بحرانی در منحنی  $\rho(T)$  شناسایی شده‌اند که همگی عمیقاً به روش ساخت بستگی دارد. روش‌های مختلف تولید مانند روش بازپخت برای تولید نمونه مهم بوده و افزایش فاصله فرآیند بازپخت ممکن است دمای بحرانی را بهبود بخشد [21]. روش سنتز ابررسانای YBCO توسط فرآیند ذوب ممکن است آرایش کریستالی پایدار کم‌تری نسبت به روش بازخورد حالت جامد [22] ایجاد کند. با این حال، مجموعه‌ای از روش‌های ساخت می‌تواند منجر به پارامترهای بحرانی متفاوتی شود که عیوب متفاوتی از قبیل نوع مرزهای گرانول، غلظت گرانول و همچنین تفاوت در تأثیر جفت‌کننده بین گرانول‌ها باشند. این عیوب نهایتاً منجر به ایجاد منطقه انتقال گسترده‌تر غیرمشابه می‌گردد.

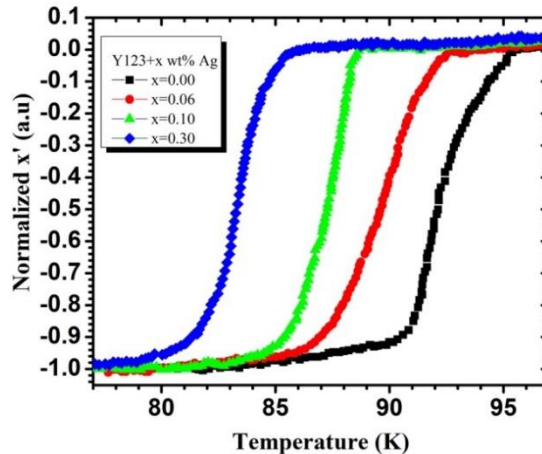
### پذیرفتاری مغناطیسی

به‌طور کلی پذیرفتاری مغناطیسی  $X$  دارای دو قسمت حقیقی  $X'$  و موهومی  $X''$  است که رابطه آن‌ها با معادله زیر بیان می‌شود.

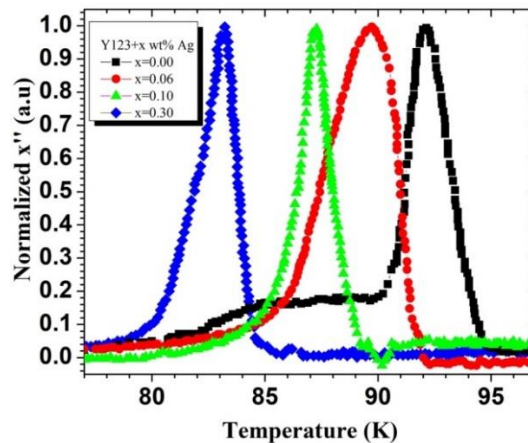
$$X = X' + iX'' \quad (3)$$

همچنین پذیرفتاری مغناطیسی AC هم با نماد  $X$  و قسمت‌های حقیقی  $X'$  و موهومی  $X''$  ( $X = X' + iX''$ )، نشان داده می‌شوند. این کمیت‌ها به منظور تعیین ویژگی‌های جفت بین‌دانه‌ای برای نمونه‌های خالص Y123 و آرایش یافته با نانوذرات نقره مورد بررسی قرار گرفتند. آزمایش‌ها برای اندازه‌گیری  $X'$  و  $X''$  در شرایط میدان مغناطیسی متغیر ۱ اورستد (1 Oe) و فرکانس ۱۰۰۰ هرتز (1000 Hz) انجام شدند. شکل‌های ۵ و ۶ تغییرات قسمت‌های حقیقی  $X'$  و موهومی  $X''$  منحنی نرمالیزه شده پذیرفتاری مغناطیسی AC، نسبت به دما برای ابررسانای Y123 آرایش یافته با مقادیر مختلف ( $x=0/00, 0/06, 0/10, 0/30$ ) را نشان می‌دهد.

اطلاعات مربوط به انتقال دیامغناطیسی ابررسانای حجیم (Bulk) را می‌توان از قسمت حقیقی ( $X'$ ) به دست آورد [23]. انتقال دو مرحله‌ای که می‌تواند به دلیل رفتار پیوندی ضعیف نمونه ابررسانا باشد [24] در نمونه‌ها با کم شدن دما دیده می‌شود. باید توجه داشت که اولین افت در دمای بالاتر،  $T_{C onset}$ ، مربوط به محافظت درون‌دانه‌ای (Intragranular Shielding) است، در حالی که



شکل ۵- قسمت حقیقی منحنی نرمالیزه شده پذیرفتاری مغناطیسی AC برای ابررسانای Y123 آلاینش یافته با مقادیر مختلف مختلف (x= ۰/۳۰ و ۰/۱۰، ۰/۰۶، ۰/۰۰) نانو ذرات نقره



شکل ۶- قسمت موهومی منحنی نرمالیزه شده پذیرفتاری مغناطیسی AC برای ابررسانای Y123 آلاینش یافته با مقادیر مختلف مختلف (x= ۰/۳۰ و ۰/۱۰، ۰/۰۶، ۰/۰۰) نانو ذرات نقره

مواد ابررسانای دمای بالا را می‌توان بصورت یک مدل آرایه جفت شده ضعیف ژوزفسون در نظر گرفت که جفت شدگی دانه‌ای از طریق جریان‌های ژوزفسون جاری در لایه‌ها در بین دانه‌ها صورت می‌پذیرد. انرژی جفت شدگی ژوزفسون را می‌توان به صورت عبارت زیر بیان نمود [33]:

$$E_j = \frac{h}{4\pi e} I_0 \quad (5)$$

در معادله فوق  $e$  بار الکترون،  $h$  ثابت پلانک و  $I_0$  ماکسیمم جریان ژوزفسون است. انرژی جفت شدگی ژوزفسون با استفاده از معادله فوق (معادله ۵) در میدان مغناطیسی ۱ اورستد به دست آمده و در جدول ۳ ثبت گردیده است. این نتایج بهتر شدن جفت‌شدگی بین‌دانه‌ای در میان دانه‌های نمونه  $x=0/10$  افزوده شده با نانو ذرات نقره را نشان می‌دهد. در واقع افزایش انرژی جفت شدگی بین‌دانه‌ای ژوزفسون، افزایش نیروی مهارکننده (Shielding) را موجب شده که این خود افزایش چگالی جریان بحرانی را به دنبال خواهد داشت.

شکل ۶ نشان می‌دهد که پهنای قله نمونه  $x=0/10$  نسبت به سایر نمونه‌ها باریک‌تر است و پهنای قله نمونه  $x=0/06$  نسبت به سایر نمونه‌ها پهن‌تر است. همچنین با افزودن نانو ذرات نقره و افزایش مقدار آن قله‌ها تغییر مکان داشته به سمت دمای پایین‌تر حرکت نمودند. تغییر دمای قله ( $T_p$ ) به سمت دمای پایین‌تر، میخ‌کوبی (Pining) ضعیف‌تر و چگالی جریان بحرانی بین‌دانه‌ای کم‌تری را نشان می‌دهد، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که  $x=0/10$  بهترین درصد وزنی برای Ag در Y123 در میان نمونه‌های آلاینده شده است. مشاهده می‌شود که نمونه خالص دارای پیک وسیع دیگری در دمای  $88 \text{ K}$  است که تصور می‌شود به دلیل فاز ثانویه است که در آن انتقال ابررسانایی دوم رخ می‌دهد [31]. محققان قبلی گزارش کرده‌اند که انتقال ابررسانایی دوم ممکن است از تغییر پارامتر ترتیب حالت ابررسانا ناشی شود که به درجات آزادی داخلی جفت‌های کوپر مربوط می‌شود [32].

جدول ۳- پارامترهای دما  $T_P$ ،  $T_{Cj}$ ،  $T_{C\ onset}$  حداکثر جریان ژوزفسون  $I_0$  و انرژی جفت شدگی ژوزفسون  $E_j$  به همراه میدان مغناطیسی  $H_{ac}$  اعمال شده مربوط به اندازه گیری پذیرفتاری مغناطیسی AC بر حسب دما به ازای مقادیر مختلف نانوذرات نقره دوپ شده با ترکیبات Y123.

پارامترها	$x=0/00$	$x=0/06$	$x=0/1$	$x=0/30$
$H_{ac}$ (Oe)	۱	۱	۱	۱
$T_{C\ onset}$ (K)	۹۵/۵	۹۳/۶	۸۹/۹	۸۶/۸
$T_{Cj}$ (K)	۹۱/۸	۸۹/۸	۸۷/۵	۸۳/۲
$T_p$ (K)	۹۲/۲	۸۹/۸	۸۷/۳	۸۳/۲
$I_0$ ( $\mu A$ )	۳۸/۷	۳۶/۲	۵۲/۸۷	۳۲/۸۶
$E_j$ (eV)	۰/۰۷۹	۰/۰۷۴	۰/۱۰۹	۰/۰۶۷

### نتیجه گیری

ترکیبات خالص و آلیبده با نانوذرات نقره ابرسانی دمای بالای YBCO به روش واکنش حالت جامد ساخته شد. پراش اشعه ایکس و تجزیه و تحلیل ریتولد نشان داد که تمامی نمونه‌ها دارای ساختار کریستالی اورتورومیک هستند. در پارامترهای شبکه با افزودن نانوذرات نقره تغییر مهم و معنا داری ملاحظه نشد. تصاویر SEM نشان دادند که با افزودن ناخالصی نانوذرات نقره اندازه دانه‌ها نسبت به دانه‌های نمونه خالص کاهش می‌یابد. اندازه گیری‌های مقاومت الکتریکی و پذیرفتاری مغناطیسی AC نشان دادند که با افزایش مقدار آلیبش نانوذرات نقره، دمای گذار ابرسانی به تدریج رو به کاهش است. در واقع اندازه گیری پذیرفتاری نمونه‌ها نشان می‌دهد که افزایش ناخالصی دمای گذار ابرسانا را کاهش می‌دهد و با افزایش ناخالصی انرژی کمتری صرف حرکت جریان الکتریکی (شار) در ابرسانا می‌شود و اتلاف انرژی در ابرسانا کمتر خواهد شد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزودن نانوذرات نقره، پهنای گذار نمونه‌های آلیبده نسبت به نمونه خالص YBCO کاهش یافته است (به جز نمونه  $x=0/06$ ) که این امر می‌تواند نشان دهنده ی کیفیت خوب ساخت نمونه‌ها و همچنین تأثیر نانوذرات نقره بر چگالی جریان بحرانی نمونه‌های ابرسانا باشد. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که مبنای مقادیر ماکزیمم جریان ژوزفسون و انرژی جفت شدگی بین دانه‌ای ژوزفسون،  $x=0/10$  بهترین درصد وزنی برای Ag در Y123 در میان نمونه‌های آلیبده شده است.

### سپاسگزاری

از جناب آقای مهندس مرتضی رنجبر که در تهیه نانوذرات نقره و ساخت نمونه‌ها ما را به طور مستمر کمک نمودند متشکریم. همچنین از آقایان مهندس فاطمی، مهندس جمالی و مهندس نوروزی از دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز که در مراحل ساخت مواد و انجام آزمایش‌ها با ما همکاری نمودند سپاسگزاری می‌نماییم.

### ملاحظات اخلاقی

#### پیروی از اصول اخلاق پژوهش

در این تحقیق، کلیه اطلاعات استفاده شده از مراجع دیگر، با اعلام رفرنس انجام شده است.

### حامی مالی

هزینه‌های مطالعه حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شد.

### مشارکت نویسندگان

طراحی و ایده پردازی: غلامعباس شمس  
روش شناسی و تحلیل داده‌ها: مهرداد ابراهیم نژاد  
نظارت و نگارش نهایی: غلامعباس شمس

### تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

## References

1. Wu, M. K., Ashburn, J. R., Torng, C., Hor, P. H., Meng, R. L., Gao, L., ... & Chu, A. (1987). Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure. *Physical review letters*, 58(9), 908. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.908>
2. Hor, P. H., Gao, L., Meng, R. L., Huang, Z. J., Wang, Y. Q., Forster, K., ... & Torng, C. J. (1987). High-pressure study of the new Y-Ba-Cu-O superconducting compound system. *Physical review letters*, 58(9), 911. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.911>
3. Shams, G., & Ranjbar, M. (2019). Conductivity Fluctuation and Some Parameters of High temperature Superconductor Polycrystalline Y 1 Ba 2 Cu 3 O 7-  $\delta$  doped with Silver Nanoparticles. *Brazilian Journal of Physics*, 49(6), 808-819. <https://doi.org/10.1007/s13538-019-00701-5>
4. Cui, X. M., Liu, G. Q., Wang, J., Huang, Z. C., Zhao, Y. T., Tao, B. W., & Li, Y. R. (2007). Enhancement of critical current density of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$</sub>  thin films by nanoscale CeO<sub>2</sub> pretreatment of substrate surfaces. *Physica C: Superconductivity*, 466(1-2), 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2007.04.223>
5. Bartůněk, V. I. L. É. M., & Smrčková, O. L. G. A. (2010). Nanoparticles and superconductors. *Ceramics-Silikáty*, 54(2), 133-138.
6. Abd-Ghani, S. N., Wye, H. K., Kong, I., Abd-Shukor, R., & Kong, W. (2014). Enhanced Transport Critical Current Density of NiO Nano Particles Added YBCO Superconductors. In *Advanced Materials Research* (Vol. 895, pp. 105-108). Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.895.105>
7. Ghaedsharafi, N., Soltani, Z., & Shams, G. (2021). Tin-oxide nanoparticles doping impact in the polycrystalline superconducting Y<sub>3</sub>Ba<sub>5</sub>Cu<sub>8</sub>O<sub>18 $\pm$  $\delta$</sub>  and Y<sub>1</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$</sub>  composites. *Applied Physics A*, 127(2), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s00339-020-04222-w>
8. Ghahramani, S., Shams, G., & Soltani, Z. (2021). Comparative Investigation of the Effect of Titanium Oxide Nanoparticles on Some Superconducting Parameters of Y<sub>3</sub>Ba<sub>5</sub>Cu<sub>8</sub>O<sub>18 $\pm$  $\delta$</sub>  and Y<sub>1</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$</sub>  Composites. *Journal of Electronic Materials*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s11664-021-09012-5>
9. Görür, O., Terzioğlu, C., Varilci, A., & Altunbaş, M. (2005). Investigation of some physical properties of silver diffusion-doped YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> superconductors. *Superconductor Science and Technology*, 18(9), 1233. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/18/9/016>
10. Mendoza, E., Puig, T., Varesi, E., Carrillo, A. E., Plain, J., & Obradors, X. (2000). Critical current enhancement in YBCO-Ag melt-textured composites: influence of microcrack density. *Physica C: Superconductivity*, 334(1-2), 7-14. [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(00\)00098-8](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(00)00098-8)
11. Farbod, M., & Batvandi, M. R. (2011). Doping effect of Ag nanoparticles on critical current of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$</sub>  bulk superconductor. *Physica C: Superconductivity*, 471(3-4), 112-117.

<https://doi.org/10.1016/j.physc.2010.11.005>

12. Diko, P., Fuchs, G., & Krabbes, G. (2001). Influence of silver addition on cracking in melt-grown YBCO. *Physica C: Superconductivity*, 363(1), 60-66. [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(01\)00622-0](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(01)00622-0)

13. Joo, J., Kim, J. G., & Nah, W. (1998). Improvement of mechanical properties of YBCO-Ag composite superconductors made by mixing with metallic Ag powder and solution. *Superconductor Science and Technology*, 11(7), 645. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/11/7/006>

14. Mohammad Ali Omodifard, Babak Hashemi, and Mohsen Babaiee, Effect of Neodymium and Yttrium oxides on the Structural and Electrochemical Properties of LiFePO<sub>4</sub>/C Composite as Cathode of lithium ion Batteries Synthesized by Solid State Method. *Quarterly Journal of New Materials*, 2021; 11 (42): 107-122. [in Persian]

15. Holzwarth, U., & Gibson, N. (2011). The Scherrer equation versus the 'Debye-Scherrer equation'. *Nature nanotechnology*, 6(9), 534-534. <https://doi.org/10.1038/nnano.2011.145>

16. Shams, G., Mahmoodinezhad, A., & Ranjbar, M. (2018). Magnetic Levitation and Some Mechanism of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> Superconductor Doped with Nano-sized Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*, 42(4), 2337-2343. <https://doi.org/10.1007/s40995-017-0451-2>

17. Ramli, A., Shaari, A. H., Baqiah, H., Kean, C. S., Kechik, M. M. A., & Talib, Z. A. (2016). Role of Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles addition on microstructural and

superconducting properties of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> ceramics. *Journal of Rare Earths*, 34(9), 895-900.

[https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(16\)60112-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(16)60112-6)

18. Bhargava, A., Mackinnon, I. D., Yamashita, T., & Page, D. (1995). Bulk manufacture of YBCO powders by coprecipitation. *Physica C: Superconductivity*, 241(1-2), 53-62. [https://doi.org/10.1016/0921-4534\(94\)00638-5](https://doi.org/10.1016/0921-4534(94)00638-5)

19. Falahati, S., Saeb, F., & Daadmehr, V. (2019). Structural and superconducting properties of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3-x</sub>MxO<sub>y</sub> (M= Ag, Al). *Iranian Journal of Physics Research*, 9(1), 43-47.

20. Wang, X. L., Horvat, J., Gu, G. D., Uprety, K. K., Liu, H. K., & Dou, S. X. (2000). Enhanced flux pinning by Fe point defects in Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>1-x</sub>Fex<sub>2</sub>O<sub>8+δ</sub> single crystals. *Physica C: Superconductivity*, 337(1-4), 221-224. [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(00\)00105-2](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(00)00105-2)

21. Chaud, X., Prikhna, T., Savchuk, Y., Joulain, A., Haanappel, E., Diko, P., ... & Soliman, M. (2008). Improved magnetic trapped field in thin-wall YBCO single-domain samples by high-pressure oxygen annealing. *Materials Science and Engineering: B*, 151(1), 53-59. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2008.02.006>

22. Sangchaisri, S., Longhan, N., & Kruaehong, T. (2017). Investigation of Superconductivity and Crystal Structure of Y123, Y358 and Y3-8-11 Prepared by Solid State Reaction and Melt Process. *J. Mater. Sci. Appl. Energy* 6(3), 233. <http://jmsae.snru.ac.th/wp-content/uploads/2017/12/11-V6-N3-9>

23. Hannachi, E., Slimani, Y., Azzouz, F. B., & Ekicibil, A. H. M. E. T. (2018). Higher intra-granular and inter-granular performances of YBCO superconductor with TiO<sub>2</sub> nano-sized particles addition. *Ceramics International*, 44(15), 18836-18843. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.07.118>
24. Dew-Hughes, D. (2001). The critical current of superconductors: an historical review. *Low temperature physics*, 27(9), 713-722. <https://doi.org/10.1063/1.1401180>
25. Salamati, H., & Kameli, P. (2003). Effect of deoxygenation on the weak-link behavior of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> superconductors. *Solid state communications*, 125(7-8), 407-411. [https://doi.org/10.1016/S0038-1098\(02\)00809-8](https://doi.org/10.1016/S0038-1098(02)00809-8)
26. Sarmago, R. V., & Singidas, B. G. (2004). Low field AC susceptibility of YBCO: the frequency and field dependence of intra-and intergrain coupling losses in the absence of vortices. *Superconductor Science and Technology*, 17(9), S578. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/17/9/023>
27. Clem, J. R. (1988). Granular and superconducting-glass properties of the high-temperature superconductors. *Physica C: Superconductivity*, 153, 50-55. [https://doi.org/10.1016/0921-4534\(88\)90491-1](https://doi.org/10.1016/0921-4534(88)90491-1)
28. Slimani, Y., Hannachi, E., Salem, M. B., Azzouz, F. B., & Salem, M. B. (2018). Comparative study of electrical transport and magnetic measurements of Y<sub>3</sub>Ba<sub>5</sub>Cu<sub>8</sub>O<sub>18±δ</sub> and YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> compounds: intragranular and intergranular superconducting properties. *Applied Physics A*, 124(2), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s00339-017-1547-4>
29. Bean, C. P. (1962). Magnetization of hard superconductors. *Physical review letters*, 8(6), 250. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.8.250>
30. Slimani, Y., Hannachi, E., Ekicibil, A. H. M. E. T., Almessiere, M. A., & Azzouz, F. B. (2019). Investigation of the impact of nano-sized wires and particles TiO<sub>2</sub> on Y-123 superconductor performance. *Journal of Alloys and Compounds*, 781, 664-673. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.062>
31. Awang Kechik, M. M. (2011). Improvement of critical current density in YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> films with nano-inclusions (Doctoral dissertation, University of Birmingham). <http://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/2930>
32. Deguchi, K., Tanatar, M. A., Mao, Z., Ishiguro, T., & Maeno, Y. (2002). Superconducting double transition and the upper critical field limit of Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> in parallel magnetic fields. *Journal of the Physical Society of Japan*, 71(12), 2839-2842. <https://doi.org/10.1143/jpsj.71.2839>
33. Halim, S. A., Mohamed, S. B., Azhan, H., & Khawaldeh, S. (1999). Effect of Ba and Zn doping in Bi<sub>2</sub>PbO<sub>6</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>8</sub> superconductors using ac susceptibility measurements. *Journal of materials science*, 34(12), 2813-2819. <https://doi.org/10.1023/A:1004670931858>

