

## افزایش میخکوبی شار با آلایش نیکل در $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$

بهناز هادی سیچانی، حمیده شاکری پور و هادی سلامتی

دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

پست الکترونیکی: hshakeri@cc.iut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۰۴؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۶/۱۱/۰۵)

### چکیده

نمونه‌های ابررسانای دما- بالای  $Y_{1-x}Ni_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  با اضافه کردن ناخالصی Ni در جایگاه Y، با مقادیر ۰، ۰،۰۰۲، ۰،۰۰۴، ۰،۰۰۶، ۰،۰۱ در جایگاه Y، با افزایش اندازه دانه‌ها تک‌فاز بوده و فاز ۱۲۳ تشکیل شده است. پذیرفتاری مغناطیسی AC نمونه‌ها تحت دو میدان مغناطیسی متفاوت ۰،۸ A/m و ۴۰۰ A/m اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش آلایش نیکل تا حد بهینه، اتصال بین دانه‌ها افزایش یافته و میخکوبی شار بهتر می‌شود.

### واژه‌های کلیدی: ابررسانای دما بالا، پذیرفتاری مغناطیسی، میخکوبی شار

#### ۱. مقدمه

عملکرد ابررسانا بازی می‌کنند. یکی از راه‌های مؤثر برای به حداقل رساندن تأثیرات منفی این منطقه و بهبود اتصالات بین دانه‌ای، افزایش اندازه دانه است [۷]. بدین منظور محققین، عناصر، نانوذرات [۸]، نانو اکسید فلزات و ترکیبات اکسید فلزی مختلفی را در ترکیب YBCO به صورت کامپوزیت [۹ و ۱۰] و جای نشانی [۱۱-۲۰] مورد بررسی قرار دادند. در این راستا، جای نشانی عناصر مغناطیسی و غیرمغناطیسی نادر زمین در جایگاه Y توجه زیادی را به خود جلب کرد [۱۲ و ۲۱]. دیده می‌شود با جایگزینی عنصر مغناطیسی نادر زمین  $Gd^{3+}$  و  $Eu^{3+}$  در جایگاه  $Y^{3+}$  اتصال بین دانه‌ای در مقایسه با جایگزینی سایر عناصر نادر زمین، بهبود می‌یابد. این در حالی است، که با جایگزینی  $Ho^{3+}$  و  $Er^{3+}$  (با شعاع یونی کوچک‌تر نسبت به دو

کشف ابررسانایی در ترکیب (YBCO)  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  با دمای گذار حدود ۹۰ کلوین [۱]، یکی از مهم‌ترین کشفیات در حوزه ابررساناهای دما- بالا به شمار می‌آید. اگر چه این مواد از نظر کاربردی بسیار مفید و سودمند هستند [۲ و ۳]، اما محدودیت‌هایی از قبیل دمای گذار بحرانی، چگالی جریان بحرانی و میدان بحرانی دارند [۴]. ابررسانای دما- بالا را می‌توان به صورت دانه‌های منظمی از ابررساناها دانست که از طریق پیوند ضعیف جوزفسون به یکدیگر متصل می‌شوند [۵]، از این روی ابر جریان به راحتی نمی‌تواند از میان مرزدانه عبور کند [۶] و باعث محدود شدن چگالی جریان بحرانی در ابررسانا می‌شود. در ابررساناهای کوپراتی مانند YBCO، مرزدانه‌ها نقش مؤثری در

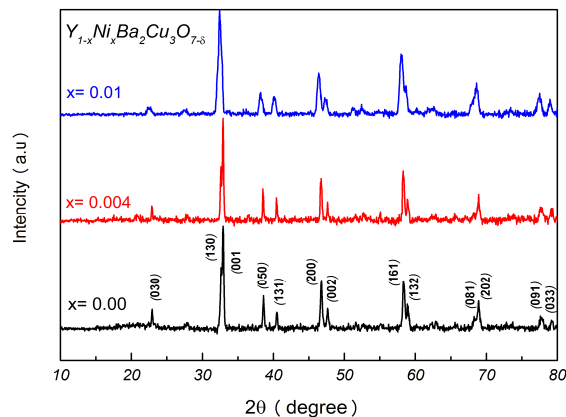
## ۲. ساخت و آزمایشات

نمونه‌های بس بلوری  $Y_{1-x}Ni_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  با  $x=0, 0.02, 0.04, 0.06, 0.1$  با روش استاندارد واکنش حالت جامد ساخته شدند. پودرهای ( $Y_2O_3 (\geq 99\%)$ ), ( $NiO (>99.999\%)$ ), ( $BaCO_3 (99.98\%)$ ) و ( $CuO (>96\%)$ ) طبق مقادیر استوکیومتری مناسب و با دقت  $0.1 \text{ mg}$ ، توزین شدند. عمل تکلیس دو بار و بین هر بار، سایش پودرها به میزان یک ساعت انجام شد. عملیات حرارتی تکلیس در دمای  $850^\circ\text{C}$  در هوای آزاد به مدت ۲۴ ساعت انجام شد. بعد از مراحل تکلیس و سایش نهایی پودر به دست آمده، پودر تحت فشار  $40 \text{ bar}$  به تیغه‌های مکعب مستطیلی در ابعاد  $10 \times 3 \times 1 \text{ mm}^3$  درآمد. نمونه‌ها تحت اتمسفر اکسیژن تا دمای  $950^\circ\text{C}$  حرارت دیده و به مدت ۲۴ ساعت در این دما باقی ماندند. سپس نمونه‌ها به مدت ۸ ساعت در دمای  $550^\circ\text{C}$  پخته و اکسیژن دهی شده و در نهایت نمونه‌ها به آرامی با نرخ دمایی حدود  $1^\circ\text{C}/\text{min}$  تا دمای اتاق سرد شدند. در پایان مرحله ساخت، قرص‌هایی سیاه رنگ با سختی بالا به دست آمد [۲۷]. برای مقایسه سیستماتیک و درست نتایج نمونه‌ها، کلیه نمونه‌ها تحت شرایط یکسان و همزمان با هم ساخته شدند.

برای مطالعه خواص نمونه‌ها، آنالیز پراش پرتوی ایکس نمونه‌ها به منظور بررسی تشکیل فاز اصلی و تک‌فازه بودن نمونه‌ها، و آزمون پذیرفتاری مغناطیسی AC برای بررسی خواص ابررسانایی و مغناطیسی نمونه‌ها در میدان‌های مغناطیسی اعمالی مختلف استفاده شد. اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی AC شرکت Lakeshore مدل ۷۰۰۰ از دمای اتاق تا دمای  $77 \text{ K}$  و در میدان مغناطیسی متناوب به بزرگی  $0.8 \text{ A/m}$  و  $400 \text{ A/m}$  با بسامد  $333 \text{ Hz}$  انجام گرفت. اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی به واسطه تغییر شار ناشی از حضور نمونه در یک میدان مغناطیسی متغیر انجام می‌گیرد. اصول کار دستگاه بدین صورت است که گشتاور مغناطیسی در نمونه در یک میدان مغناطیسی متناوب توسط یک سیم‌پیچ، تغییر می‌کند. تغییرات گشتاور مغناطیسی ایجاد شده در نمونه براساس تغییرات ولتاژ

عنصر جای نشانی شده قبلی) اتصال بین دانه‌ای تضعیف می‌شود [۱۲]. با این مشاهده، پیشنهاد شد که بهبود یا تضعیف اتصالات بین دانه‌ای در نمونه‌های حجمی بس بلوری، ظاهراً به اندازه عنصر نادر زمین وابسته است [۱۲]. همچنین، Y در ساختار، با هشت یون O احاطه شده است [۲۲]، از این روی می‌تواند ظرفیت‌های مختلفی از یون‌های جای‌نشانی شده را بپذیرد. با جای‌نشانی  $Ca^{2+}$  در جایگاه  $Y^{3+}$  دیده شده است با افزایش آلیش تا حد بهینه‌ای، اتصالات بین دانه‌ای افزایش یافته که می‌تواند افزایش جریان بحرانی را نیز به همراه داشته باشد [۱۳]. همچنین با جای‌نشانی عنصر دو ظرفیتی Sr در جایگاه Ba افزایش می‌خکوبی شار با افزایش آلیش تا حد بهینه‌ای، گزارش شده است [۱۴]. جای‌نشانی عنصر غیرمغناطیسی Zn در جایگاه مس در ترکیب YBCO، کاهش اتصالات بین دانه‌ای و در نتیجه کاهش جریان بحرانی را نیز به همراه داشته است [۱۵].

در این تحقیق به طور خاص تأثیر جای نشانی عنصر مغناطیسی نیکل بر میخکوبی شار در ابررسانای کوپراتی  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  بررسی می‌شود. در بررسی‌هایمان دیده می‌شود که تأثیر آلیش یون نیکل در جایگاه مس، در ترکیب مذکور، مورد بررسی و تحقیق فراوانی قرار گرفته است. دیده می‌شود که با آلیش یون نیکل، میخکوبی شار مغناطیسی در نمونه آلییده شده نسبت به نمونه بدون آلیش، افزایش می‌یابد [۱۶-۱۹]. اما اطلاعاتی در مورد جای‌نشانی عنصر نیکل در جایگاه ایتريم موجود نبوده و تأثیرات حضور آن بر میخکوبی شار مورد بررسی قرار نگرفته است. بررسی پذیرفتاری مغناطیسی ابررساناهای دما- بالا اطلاعات مفیدی برای توصیف دینامیک شار، اتلاف انرژی و میخکوبی شارها فراهم می‌کند [۲۳ و ۲۴] و همچنین ابزار مناسبی برای بررسی اتصالات بین دانه‌ای است. از این روی، پذیرفتاری مغناطیسی AC نمونه‌ها تحت میدان‌های مغناطیسی  $0.8 \text{ A/m}$  و  $400 \text{ A/m}$  اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان می‌دهد که جای‌نشانی عنصر مغناطیسی نیکل، بر خلاف دیدگاه‌های موجود [۲۵]، نه تنها باعث تخریب ابررسانایی نشده [۲۶] بلکه آلیش آن تا حد بهینه‌ای، باعث بهبود اتصالات بین دانه‌ای و افزایش میخکوبی شار می‌شود.



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) الگوی پراش پرتوی پرتو ایکس نمونه‌های بس بلوری  $Y_{1-x}Ni_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  به ازای  $x = 0$ ،  $x = 0.004$  و  $x = 0.01$  در کلیه نمونه‌ها ایجاد شده و در حد دقت دستگاه اندازه‌گیری، فاز ناخالصی قابل مشاهده‌ای دیده نمی‌شود.

میدان مغناطیسی خارجی، خطوط شار درون ماده شروع به حرکت کرده و موجب اتلاف انرژی در نمونه می‌شود.

با نگاه به قسمت حقیقی نمودار پذیرفتاری مغناطیسی متوجه می‌شویم،  $T_c^{onset}$  دمایی که پذیرفتاری نمونه‌ها از حالت بهنجار وارد فاز ابررسانایی - دیامغناطیسی می‌شود، به میدان مغناطیسی خارجی حساسیت بسیار کمی دارد (شکل ۲). در حالی که در دماهای پایین‌تر، به دلیل وجود اتصالات ضعیف بین دانه‌ای در نمونه‌های بس بلوری و حرکت گردابه‌های مغناطیسی، پذیرفتاری حساسیت زیادی به میدان خارجی نشان می‌دهد و هنگام کاهش دما، با اعمال میدان مغناطیسی، یک پهن‌شدگی در نمودار دیده می‌شود (شکل ۱ الف، ج)). در میدان‌های ضعیف  $0.8 A/m$ ، پدیده دیامغناطیسی کامل در دماهای پایین رخ می‌دهد  $-1 = \chi$ ، که معرف دیامغناطیس بودن کامل نمونه است. در هنگام اعمال میدان‌های مغناطیسی بزرگ، این امکان وجود دارد که میدان مغناطیسی در بین دانه‌ها نفوذ کند و دیامغناطیس کامل اتفاق نیافتد. با افزایش میدان اعمالی، توانایی در حفظ نمونه از نفوذ شار کاهش می‌یابد و میدان به صورت گردشاره‌هایی در نمونه نفوذ می‌کند. نفوذ میدان در نمونه، و تحریک گردابه‌ها برای به حرکت در آمدن، باعث اتلاف انرژی در ترکیب می‌شود [۲۴].

مشابه این روند در قسمت موهومی پذیرفتاری مغناطیسی دیده می‌شود. معمولاً قسمت موهومی پذیرفتاری شامل دو قله

در یک سیم پیچ ثانویه آشکار می‌شود. این ولتاژ به پذیرفتاری مغناطیسی وابسته است [۲۸].

### ۳. نتایج و بحث

بررسی الگوی پراش پرتوی اشعه ایکس نمونه‌ها شکل ۱ در دمای اتاق نشان می‌دهد که فاز  $123$  در کلیه نمونه‌ها ایجاد شده و فاز ناخالصی قابل مشاهده‌ای دیده نمی‌شود [۲۹].

شکل ۲، پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های  $Y_{1-x}Ni_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  با آلیش  $x = 0$ ،  $0.004$  و  $0.01$  تحت میدان  $0.8 A/m$  و  $400 A/m$  را نشان می‌دهد. گذار ابررساناهای دما - بالای کوپراتی در دو مرحله انجام می‌شود. با کاهش دما در ابتدا، گذار درون دانه‌ای اتفاق می‌افتد که معادل با حذف شار از درون دانه‌ها است. با کاهش بیشتر دما، گذار بین دانه‌ای که معادل با حذف شار از بین دانه‌ها است، نیز اتفاق می‌افتد [۳۰]. این رفتار با توجه به طبیعت دانه‌ای ابررساناهای کوپراتی قابل توجیح است.

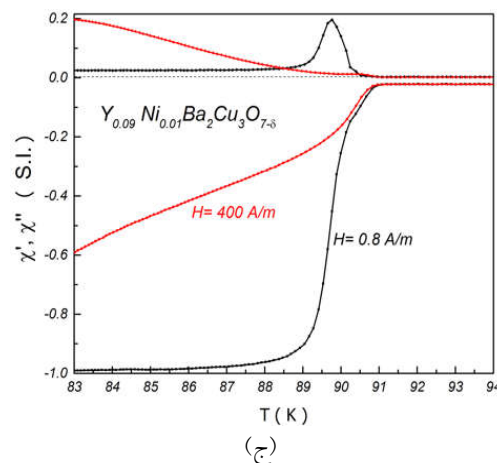
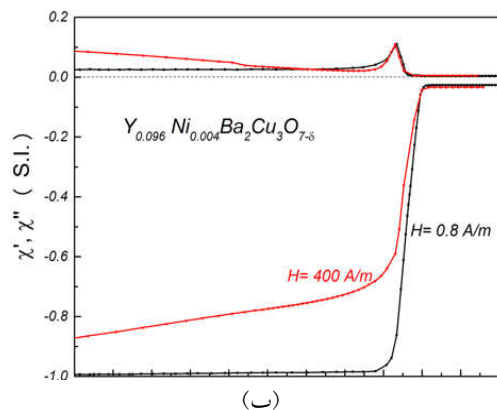
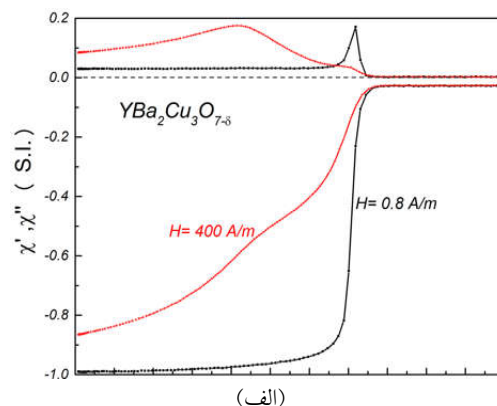
پذیرفتاری مغناطیسی شامل یک جمله هم‌فاز و یک جمله غیرهم‌فاز با میدان مغناطیسی اعمالی است. این دو جمله به ترتیب، جملات حقیقی ( $\chi'$ ) و موهومی ( $\chi''$ ) می‌باشند. قسمت حقیقی پذیرفتاری، رفتار دیامغناطیس ذاتی و مؤلفه موهومی میزان اتلاف انرژی در نمونه را نشان می‌دهد [۳۱]، که این اتلاف ناشی از حرکت خطوط شار مغناطیسی در ماده است. به عبارت دیگر، با افزایش دما به سمت دمای گذار  $T_c$ ، در حضور

است. در یک دستگاه تک‌فاز، قله در دماهای بالاتر، نشان دهنده خصوصیات ذاتی دانه‌ها و در دماهای پایین‌تر به دلیل اتصالات بین‌دانه‌ای است. این رفتار، ناشی از ساختار بس بلوری این ترکیبات است. این در حالی است که با اعمال میدان کوچک،  $0.8 \text{ A/m}$ ، این انتقال دو مرحله‌ای به خوبی دیده نمی‌شود. به این معنا که اتصالات بین دانه‌ای در این میدان، به اندازه‌ای قوی است که تمایز بین ناحیه درون دانه‌ای و بین دانه‌ای قابل آشکارسازی نیست. این رفتار در نمونه  $x=0.004$  حتی در میدان اعمالی  $400 \text{ A/m}$  دیده نمی‌شود (شکل ۲ (ب)) که نشان دهنده اتصالات قوی بین دانه‌ای در این نمونه است.

اگر دمای قله موهومی مشاهده شده در شکل ۲ را  $T_p$  بنامیم و تأثیر میدان خارجی بر جابه‌جایی این دما را بررسی کنیم، دیده می‌شود این جابه‌جایی با افزایش آلایش نیکل تا حد بهینه‌ای، کاهش می‌یابد (شکل ۲ (ب)). این جابه‌جایی، متناسب با قدرت نیروی میخکوبی شار است و با افزایش میدان به دلیل اتلاف ناشی از حرکت گردش‌ها در بین دانه‌ها، به دماهای پایین‌تر جابه‌جا می‌شود. هر چه قدرت میخکوبی در نمونه بیشتر باشد این جابه‌جایی کاهش می‌یابد [۳۲ و ۳۳]. به نظر می‌رسد اتصالات بین دانه‌ای و در نتیجه میخکوبی شار در نمونه با آلایش نیکل  $0.004$ ، در مقایسه با نمونه بدون آلایش، بهبود قابل توجهی یافته است. اندازه‌گیری‌های چگالی جریان بحرانی نمونه‌ها در دمای  $77$  کلوین، این افزایش میخکوبی را حدود  $3.5$  برابر نمونه ی بدون آلایش نشان می‌دهد که در تطابق با گزارشات جای‌نشینی نیکل در جایگاه مس در مقالات موجود است [۱۶]. هم‌چنین، این افزایش، مطابق با نتایج به دست آمده از طریق اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی تحت میدان مغناطیسی است [۳۴].

#### ۴. نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری‌های پراش پرتوی ایکس نمونه‌های بس بلوری  $Y_{1-x}Ni_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  نشان می‌دهد که این نمونه‌ها تک‌فاز بوده و فاز  $123$  تشکیل شده است. پذیرفتاری مغناطیسی تحت میدان‌های مغناطیسی مختلف نمونه‌ها نشان می‌دهند که



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمودار پذیرفتاری مغناطیسی بر حسب دما در دو میدان مغناطیسی متفاوت  $0.8 \text{ A/m}$  و  $400 \text{ A/m}$  با بسامد  $333 \text{ Hz}$  در نمونه‌های  $Y_{1-x}Ni_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  با میزان آلایش‌های  $x=0$  (الف)،  $x=0.004$  (ب) و  $x=0.01$  (ج). به وضوح دیده می‌شود که با اعمال میدان مغناطیسی بزرگ  $400 \text{ A/m}$  بر نمونه‌ای که با مقداری نیکل در حد بهینه‌ای آلاییده شده است (ب)، قله موهومی جابه‌جا نشده که به معنای قدرت میخکوبی بالای شار مغناطیسی در این نمونه است.

### سپاسگزاری

بدین وسیله از همکاری بی دریغ آقایان سید سجاد حسینی و خالد رحمانی سپاسگزاریم. از آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی اصفهان برای همکاری در استفاده از دستگاه توزین، تشکر می‌شود.

اتصالات بین دانه‌ای تا میزان آلایش بهینه‌ای از نیکل، افزایش قابل توجهی داشته است. این مشاهده، در توافق با افزایش دمای گذار دیده شده با افزایش نیکل در ترکیب مورد نظر است [۲۵].

### مراجع

1. C Chu, L Deng, and B Lv, *Physica C: Superconductivity and its Applications* **514** (2015) 290.
2. G Blatter and M V Feigel'man *et al.*, *Reviews of Modern Physics* **66**, 4 (1994) 125.
3. I Obaidat and H Goeckner *et al.*, *Physica C Superconductivity* **291**, 1 (1997) 8.
4. S Ravi and V S Bai, *Physical Review B* **49**, 18 (1994) 13082.
5. D X Chen and R B Goldfarb *et al.*, *Journal of Applied Physics* **63**, 3 (1988) 980.
6. D Dimos and P Chaudhari *et al.*, *Physical Review B* **41**, 7 (1990) 4038.
7. P Rani and R Jha *et al.*, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* **26**, 7 (2013) 2347.
8. S Dadras and Y Liu *et al.*, *Physica C Superconductivity* **469**, 1 (2009) 55.
9. P Rani and A Pal *et al.*, *Physica C Superconductivity and its Applications* **497** (2014) 19.
10. C N Van Huong and M Nicolas *et al.*, *Journal of Materials Science* **28**, 23 (1993) 6418.
11. H Shakeripour and M Akhavan, *Superconductor Science and Technology* **14** (2001) 234.
12. N Liyanawaduge and A Kumar *et al.*, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* **24**, 6 (2011) 1893.
13. N Liyanawaduge and A Kumar *et al.*, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* **25**, 1 (2012) 31.
14. N Liyanawaduge and S K Singh *et al.*, *Superconductor Science and Technology* **25**, 3 (2012) 035017.
15. N Liyanawaduge and S Kumar Singh *et al.*, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* **24**, 5 (2011) 1599.
16. L Shlyk and G Krabbes *et al.*, *Physica C Superconductivity* **377**, 4 (2002) 437.
17. F Saeb and S Falahati *et al.*, *Iranian Journal of Physics Research* **9**, 1 (2009) 29.
18. R Wordenweber and K Heinemann *et al.*, *Superconductor Science and Technology* **2**, 4 (1989) 207.
19. E I Samuel and V S Bai *et al.*, *Superconductor Science and Technology* **14**, 7 (2001) 429.
20. N A Khan and A S Khan *et al.*, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* **27**, 11 (2016) 12178.
21. Z Chen and J Zhang *et al.*, *Physica C Superconductivity* **434**, 2 (2006) 161.
22. M El-Hofy and M El-Shahawy *et al.*, *Defect and Diffusion Forum* **226** (2004) 197.
23. P Kameli and H Salamati *et al.*, *Solid State Communications* **137** (2006) 30.
24. R V Sarmago and B G Singidas, *Superconductor Science and Technology* **17**, 9 (2004) S578.
25. C T Wolowiec and B D White *et al.*, *Physica C Superconductivity and its Applications* **514** (2015) 113.
۲۶. ب هادی سیجانی و ح شاکری‌پور، «بررسی تأثیر آلایش عنصر مغناطیسی Ni بر خواص مغناطیسی ابررسانایی  $Y_{1-x}Ni_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ؛ سیزدهمین کنفرانس ماده چگال انجمن فیزیک ایران، تهران (۱۳۹۵) ۱۳۷.
27. H Shakeripour and M Akhavan *Superconductor Science and Technology* **14**, 4 (2001) 213.
28. H Salamati and P Kameli, *Solid State Communications* **125**, 7 (2003) 407.
29. B Hadi-Sichani and H Shakeripour *et al.*, *Physica C* **550** (2018) 92.
30. A Bahgat and E Shaisha *et al.*, *Physica B Condensed Matter* **399** (2007) 70.
31. T Ishida and H Mazaki, *Physical Review B* **20**, 1 (1979) 131.
32. H Salamati and P Kameli, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **278**, 1 (2004) 237.
33. S Celebi and U Kölemen *et al.*, *Physica Status Solidi (a)* **194**, 1 (2002) 260.
34. B Hadi-Sichani and H Shakeripour *et al.*, *Physica C* **549** (2018) 81.