



## مطالعه‌ی پدیده‌ی فرونشانی و مشخصه‌یابی آن بر روی نوار ابررسانای دما بالای Bi-2223/Ag

مهناز عبدالمهدی درگاه\*<sup>۱</sup>، ناصر علی نژاد<sup>۱</sup>، جعفر محمودی<sup>۱</sup>، نیره عبدالمهدی قهی<sup>۱</sup>

۱. پژوهشکده‌ی فیزیک پلاسما و گداحت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۵۱۱۱۳-۱۴۳۹۹، تهران - ایران  
۲. گروه فیزیک، دانشکده‌ی علوم پایه، دانشگاه قم، صندوق پستی: ۳۷۱۶۱۴۶۶۱۱، قم - ایران

**چکیده:** امروزه، کاربرد مگنت‌های ابررسانای دما بالا به دلیل بهبود کیفیت سیم ابررسانا، به واقعیت تبدیل شده است. برای طراحی مگنت ابررسانای ایمن، آگاهی دقیق از فرایند گذار ابررسانایی به مقاومتی (فرونشانی) بسیار مهم است و معمولاً این گذار با قانون توان توصیف می‌شود. در این مقاله، پدیده‌ی فرونشانی و انتشار آن بر روی طول کوتاهی از نوار ابررسانای Bi-2223/Ag با به کارگیری پالس حرارتی موضعی و استفاده از شبیه‌سازی یک‌بعدی با برنامه‌ی Comsol multiphysics 4.4 بررسی شده است. حداقل انرژی لازم برای فرونشانی (MQE) و سرعت انتشار آن ( $v_{MPZ}$ )، دو مشخصه‌ی فرونشانی هستند که در پایداری و حفاظت مگنت ابررسانا مؤثرند. در این جا، با افزایش جریان و دما، نرخ کاهش MQE به عنوان عامل پایداری، و نرخ تغییرات سرعت انتشار ناحیه‌ی نرمال ( $v_{MPZ}$ ) به عنوان پارامتر حفاظت ذاتی در برابر فرونشانی بررسی شده‌اند.

**کلیدواژه‌ها:** نوار ابررسانای Bi-2223/Ag، اختلال حرارتی موضعی، حداقل انرژی فرونشانی، سرعت انتشار ناحیه‌ی نرمال، شبیه‌سازی

## Study of Quench and Its Characterization on High Temperature Superconducting Bi-2223/Ag Tape

M. Abdollahi Dargah\*<sup>1</sup>, N. Alinezhad<sup>1</sup>, J. Mahmoodi<sup>2</sup>, N. Abdollahi Ghahi<sup>1</sup>

1. Plasma Physics and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 14399-51113, Tehran - Iran  
2. Department of Physics, Faculty of Science, Qom University, P.O.Box: 3716146611, Qom - Iran

**Abstract:** Nowadays, high temperature superconductor magnet applications have become a reality due to increases in conductor performance. Detailed knowledge of the superconducting to resistivity transition (quench) process is essential and usually this transition is described by power law. In this paper, the quench and the process of quench propagation are studied in a short sample of Bi-2223/Ag superconducting tape by applying localized heat pulses and using 1D simulation with the Comsol multiphysics 4.4 program. The minimum quench energy (MQE) and quench propagation velocity ( $v_{MPZ}$ ) are two important parameters for the stability and protection of a superconducting magnet. Here, by increasing the current and temperature, the MQE decreasing rate is investigated as a superconducting stability factor. Moreover, the changing rate of the normal zone propagation velocity is studied as a self-protection parameter against the quenching.

**Keywords:** Bi-2223/Ag Superconducting Tape, Local Heat Disturbance, Minimum Quenches Energy, Quench Propagation Velocity, Simulation

## ۱. مقدمه

نشده است و یا هنگام بررسی سرعت انتشار در دماهای مختلف، تغییر جریان بحرانی برحسب دما وارد نشده است [۱۳، ۱۹، ۲۰]. در این مقاله، مشخصه‌یابی فرونشانی بر روی کامپوزیت Bi-2223/Ag انجام می‌شود که در آن از قانون توان برای اندازه‌گیری انرژی فرونشانی استفاده شده است. بنابراین اثر تندی گذار در رفتار فرونشانی در نظر گرفته می‌شود. هم‌چنین وابستگی MQE و  $v_{MPZ}$  به دما و جریان در شرایطی که فقط دو سر نمونه به منبع سرد متصل‌اند، بررسی می‌شود.

## ۲. تئوری و روش محاسباتی

معادله‌ی اساسی یک‌بعدی در بررسی رفتار فرونشانی در سیم حامل جریان عبارت است از [۲۱]:

$$\rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k(T) \frac{\partial T}{\partial x}) + q_1 + q_{ext} + q_c \quad (1)$$

که در آن  $T$  دما،  $t$  زمان،  $\rho$  چگالی جرمی،  $C_p$  گرمای ویژه در فشار ثابت،  $k$  ضریب هدایت حرارتی،  $q_1$  چگالی توان گرمایش ژول، و  $q_c$  چگالی توان سرمایش است.  $q_{ext}$  چگالی توان ناشی از اختلال است که فقط در حجم  $V$  از نمونه‌ی ابررسانا، غیرصفر است. فقط زمانی که انرژی اختلال به اندازه‌ی بزرگ باشد تا حداقل ناحیه‌ی انتشار (MPZ) را فراهم کند، فرونشانی آغاز می‌شود. اگر ناحیه‌ی نرمال تشکیل شده از اختلال، کم‌تر از MPZ باشد، رشد اتفاق نمی‌افتد و به حالت ابررسانا بازمی‌گردد<sup>(۳)</sup> می‌شود. در غیر این صورت، افزایش فراینده‌ی دما و رشد ناحیه‌ی نرمال (فرونشانی) ادامه می‌یابد [۴]. دو کمیت حداقل انرژی لازم برای آغاز فرونشانی (MQE) و حداقل ناحیه انتشار (MPZ) به هم مرتبط هستند؛ به این صورت که MQE انرژی لازم برای تشکیل MPZ است.

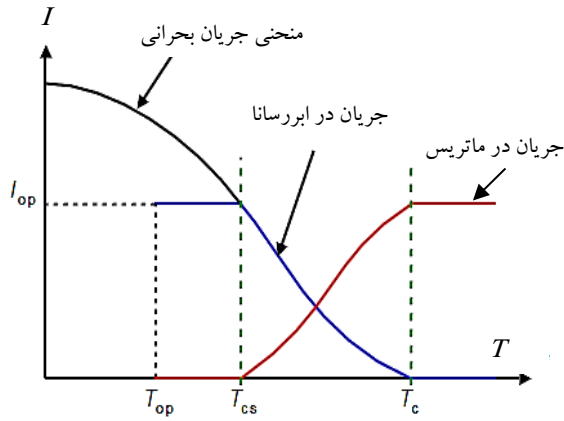
یکی از مشخصه‌های فرونشانی، سرعت انتشار آن است و به لحاظ کمک در آشکارسازی و جلوگیری از انباشت انرژی موضعی اهمیت زیادی دارد. به طور کلی، سرعت بالا منجر به رشد سریع ناحیه‌ی نرمال، آزادسازی انرژی مغناطیسی ذخیره شده‌ی مگنت در حجم بزرگ‌تر، و کاهش خطر فرونشانی مخرب می‌شود. رابطه‌ی کلی سرعت انتشار ناحیه‌ی نرمال،  $v_{MPZ}$ ، به صورت زیر است [۲۲]:

$$v_{MPZ}(T) \propto \frac{1}{C_p(T)} \sqrt{q_1(T)} \quad (2)$$

در سال‌های اخیر سیم‌های ابررسانای دما بالا به ویژه  $YBa_2Cu_3O_x$  (YBCO) و  $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$  (Bi-2223) پیشرفت و توسعه همراه بوده‌اند [۱، ۲]. این پیشرفت شامل بهبود کیفیت سیم در برابر اختلالات غیرقابل اجتناب در حین کار است. هنگامی که عوامل مختلفی مانند پرش شار، حرکت سیم و شکست اپوکسی، دمای ابررسانا را به طور موضعی افزایش می‌دهند، نقطه‌ی داغ<sup>(۱)</sup> تشکیل می‌شود [۳]. با ادامه‌ی افزایش دما تا حد بحرانی ( $T_c$ )، در آن ناحیه از حالت ابررسانایی به حالت نرمال (مقاومتی) گذار رخ می‌دهد و با رشد این ناحیه، پدیده‌ی فرونشانی اتفاق می‌افتد. کم‌ترین انرژی فرونشانی که بتواند تحریک‌کننده‌ی فرونشانی شود، حداقل انرژی فرونشانی نامیده می‌شود [۳، ۴]. با به‌کارگیری ابررسانای دما بالا در صنعت و فناوری، به خصوص ساخت مگنت‌های ابررسانا، مطالعات فرونشانی با توجه به آثار مخرب ناشی از وقوع آن، اهمیت ویژه‌ای می‌یابد [۵]. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های گوناگونی بر روی پدیده‌ی فرونشانی انجام شده است [۶-۱۳]. نتایج نشان می‌دهند که رفتار فرونشانی در ابررسانای دما بالا، متفاوت از ابررسانای دما پایین<sup>(۲)</sup> (LTS) است. در واقع، HTSها در برابر اختلال موضعی، نسبت به LTSها بسیار پایدارترند ولی در مقابل، سرعت انتشار ناحیه‌ی نرمال در آن‌ها یک تا سه مرتبه کوچک‌تر است. از نظر تجربی، اندازه‌گیری این مشخصه‌ها بر روی نمونه‌هایی که در آزمایشگاه با ابعاد کوچک ساخته می‌شوند، مشکل است. از این‌رو، روش عددی و شبیه‌سازی، امکان مشخصه‌یابی فرونشانی را به منظور دستیابی به نمونه‌ی بهتر، به شکل ساده‌تری فراهم می‌کند [۱۴-۱۷].

نوع مواد تشکیل‌دهنده‌ی کامپوزیت ابررسانا، درصد مواد غیرابررسانا و نوع آن‌ها، تندی گذار و شرایط کاری مربوط به کاربرد موردنظر، بر مشخصه‌های فرونشانی مؤثرند و سبب می‌شوند تا مقادیر مشخصه، منحصر به همان ماده و شرایط باشد [۱۷-۱۹].

در سال‌های اخیر، مشخصه‌های حداقل انرژی فرونشانی و سرعت ناحیه‌ی نرمال بر روی نمونه‌هایی از نوع کامپوزیت ابررسانای پایه بیسموت که در ماتریسی از نقره قرار دارد با استفاده از شبیه‌سازی در مدهای سرمایه‌ی متفاوت تخمین زده شده است. در برخی از آن‌ها، تندی گذار ماده در نظر گرفته



شکل ۱. نمودار تغییرات جریان بحرانی بر حسب دما در کامپوزیت ابرسانا.

با توجه به اختلاف دمای بیش‌تر،  $T_c - T_{cs}$ ، به ازای جریان کاری مشخص در HTSها، ناحیه‌ی تقسیم جریان آن در مقایسه با LTSها قابل توجه است به طوری که در LTSها این ناحیه قابل چشم‌پوشی است [۲۲].

هنگام فرایند تقسیم جریان در سیم، گرمایش ژول،  $q_J$ ، از مجموع گرمایش ناحیه‌ی ابرسانا و ناحیه‌ی ماتریس به صورت زیر به دست می‌آید [۱۶]:

$$q_J = \frac{\rho_m(T) I_{op}}{A^*(1-f)} \max\{I_{op} - I_c(T), 0\} \quad (3)$$

با به کارگیری تقریب خطی تغییرات جریان - دما به شکل زیر [۱۶]:

$$I_c(T) = I_{op} \max\left\{\frac{T - T_c}{T_{cs} - T_c}, 0\right\} \quad (4)$$

که در آن  $I_{op}$ ، جریان کاری و  $f$  نسبت سطح مقطع ابرسانا به کل سیم است. گرمایش ژول به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{cases} q_J = 0 & T < T_{cs} \\ q_J = \frac{\rho_m(T) I_{op}}{A^*(1-f)} \left\{ I_{op} - I_{op} \frac{T - T_c}{T_{cs} - T_c} \right\} & T_{cs} < T < T_c \\ q_J = \frac{\rho_m(T) I_{op}}{A^*(1-f)} & T > T_c \end{cases} \quad (5)$$

ظرفیت گرمایی مواد در دمای بین  $4.2$  K و  $77$  K، به طور نوعی، سه برابر می‌شود [۲۳]. بنابراین، برای بالا بردن دمای مقدار مشخصی از ابرسانا در دمای کاری  $77$  K، انرژی بیش‌تری نسبت به دمای کاری  $4.2$  K لازم است. در نتیجه، ابرسانی دما بالا در مقایسه با ابرسانی دما پایین، پایدارتر است ولی در صورت بروز فرونشانی، احتمال مخرب بودن آن بیش‌تر می‌شود. زیرا سرعت انتشار ناحیه‌ی نرمال در HTS کند است و ممکن است دمای حجم کوچکی از سیم قبل از آن که آشکار شود، تا نقطه‌ی ذوب بالا رود.

با توجه به وابستگی دمایی کمیت‌ها، حل معادله‌ی (۱) پیچیده است. به همین دلیل، به استفاده از روش‌های شبیه‌سازی در کنار مطالعات تحلیلی و تجربی توجه شده است. در این مقاله براساس روش عنصر محدود<sup>(۴)</sup> و با استفاده از کد Comsol Multiphysics 4.4، محاسبات و شبیه‌سازی انجام می‌شود.

## ۱.۲ تقسیم جریان

در فرایند فرونشانی، یک پدیده‌ی مهم به دلیل ذات کامپوزیتی سیم ابرسانا رخ می‌دهد که وقوع تقسیم جریان بین حالت‌های ابرسانی و نرمال است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، تا زمانی که دمای سیم، زیر دمای تقسیم جریان ( $T_{cs}$ ) باشد، سیم کاملاً ابرسانا خواهد بود و گرمایشی وجود نخواهد داشت، زیرا هیچ جریانی از ماتریس عبور نمی‌کند. در  $T_{cs}$ ، جریان کاری دقیقاً برابر با جریان بحرانی سیم، وابسته به  $T_{cs}$ ،  $I_{op}(T_{cs})$  می‌شود و در دمای بالاتر از  $T_{cs}$ ، جریان  $I_c(T)$  از ابرسانا می‌گذرد که کم‌تر از  $I_{op}$  است. این جریان با دما کاهش می‌یابد و جریان اضافی از ماتریس می‌گذرد. در دمای بحرانی  $T_c$  و فراتر از آن، در مواردی که  $A_m$  (سطح مقطع ماتریس) در مقایسه با  $A$  (سطح مقطع سیم) صرف‌نظر نشود، واقعاً همه‌ی جریان از ماتریس می‌گذرد، زیرا مقاومت ماتریس ( $\rho_m$ ) بسیار کم‌تر از مقاومت ابرسانا ( $\rho_{sc}$ ) می‌شود:  $\rho_m(T \geq T_c) \ll \rho_{sc}(T \geq T_c)$ . بنابراین، به ازای دماهای بالاتر از  $T_c$ ،  $I_m \approx I_{op}$  و  $I_{sc} \approx 0$  است ( $I_m$  جریان ماتریس است).



می‌دهیم که افزایش دما و یا ولتاژ اندازه‌گیری شده از پروب‌ها، بدون بازیابی ادامه پیدا کند. انرژی اختلال از حاصل ضرب اندازه‌ی توان گرم‌کننده در زمان تپ به دست می‌آید به طوری که این انرژی بین مرز بازیابی و فرونشانی، MQE به ازای شرایط اولیه خواهد بود.

### ۳. مدل‌سازی نمونه‌ی ابررسانا

نمونه‌ی ابررسانای Bi-2223/Ag با سطح مقطع  $3.97 \text{ mm} \times 0.215 \text{ mm}$ ، نسبت  $f=0.3$  و طول  $150 \text{ mm}$  را در نظر می‌گیریم. دمای بحرانی آن  $108 \text{ K}$  و جریان بحرانی در دمای  $77 \text{ K}$ ، و تحت خود میدان حدود  $104 \text{ A}$  است. بنابراین طبق معادله‌ی (۸)، جریان بحرانی در صفر کلون حدود  $I_c(0) = 600 \text{ A}$  به دست می‌آید.

ظرفیت گرمایی و ضریب هدایت حرارتی کامپوزیت ابررسانا از روابط زیر به دست می‌آیند [۲۱]:

$$C_{\text{avg}}(T) = f C_m(T) + (1-f) C_{\text{sc}}(T) \quad (9)$$

$$k_{\text{avg}}(T) = f k_m(T) + (1-f) k_{\text{sc}}(T) \quad (10)$$

منظور از زیرنویس‌های avg میانگین، m ماتریس و sc ابررسانا است. توابع  $C_p(T)$  و  $k(T)$  ماده‌ی Bi-2223 و نقره برگرفته از مرجع [۲۴] هستند.

در شکل ۲، چیدمانی از محل پروب‌ها، حسگرهای دما و گرم‌کننده نشان داده شده است. نمونه درون محفظه‌ی خلأ، و دو انتهای آن ابررسانای ثابت در دمای  $T_{\text{op}}$  فرض می‌شود. بنابراین، سرمایش از طریق هدایت حرارتی به دو سرسیم، صورت می‌گیرد به این ترتیب، شرایط بی‌دررو<sup>(۶)</sup> صدق می‌کند. برای اندازه‌گیری سرعت انتشار فرونشانی، چهار پروب ولتاژ،  $V_1$  تا  $V_4$ ، در فواصل  $1 \text{ cm}$  از یکدیگر، و برای اندازه‌گیری دما، سه حسگر دمای،  $T_1$  تا  $T_3$ ، در وسط پروب‌ها تعبیه شده‌اند. فاصله‌ی پروب اول از انتهای گرم‌کننده نیز  $2 \text{ cm}$  است. برای ایجاد اختلال حرارتی موضعی، گرم‌کننده‌ای به طول  $1 \text{ cm}$  و با مقاومت  $20 \Omega$  و طول پالس  $15 \text{ s}$  در مرکز سیم در نظر گرفته شده است.

تندی گذار از حالت ابررسانایی به مقاومتی را می‌توان از مقدار مشخصه‌ی  $n$  تعیین کرد که از برازش منحنی میدان-جریان به دست می‌آید. بر این اساس، به جای تقریب خطی برای توصیف ابررساناهای کامپوزیتی، از قانون توان<sup>(۵)</sup> با دقت قابل قبولی استفاده می‌شود [۲۱]:

$$E = E_c \left( \frac{I}{I_c(T)} \right)^n \quad (6)$$

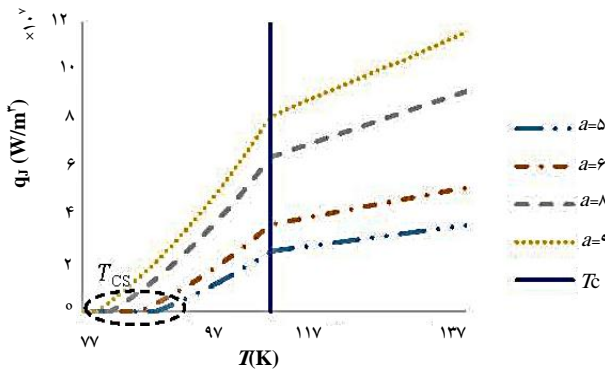
که در آن  $E$  ولتاژ بر واحد طول (میدان الکتریکی) و  $E_c$  میدان الکتریکی معیار است که معمولاً  $10^{-6} \text{ V/cm}$  برای HTS، و یک یا دو مرتبه کوچک‌تر برای LTS در نظر گرفته می‌شود [۲۱]. بنابراین براساس قانون توان، گرمایش ژول به شکل زیر به دست می‌آید:

$$q_J = \min \left\{ \frac{E I_{\text{op}}}{A}, \rho_{\text{norm}}(T) \left( \frac{I_{\text{op}}}{A} \right)^2 \right\} = \min \left\{ \frac{E_c I_{\text{op}}^{n+1}}{A I_c^n}, \rho_{\text{norm}}(T) \left( \frac{I_{\text{op}}}{A} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

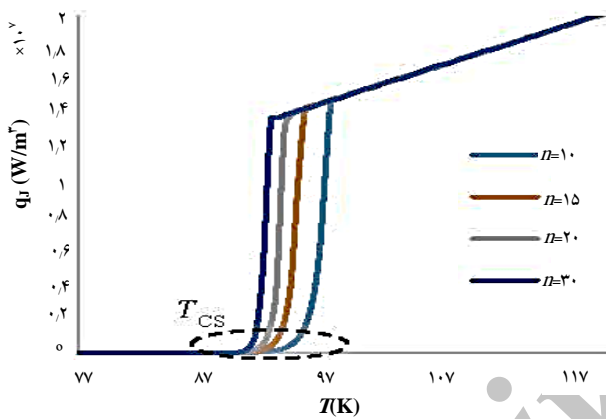
$\rho_{\text{norm}}$  مقاومت سیم در حالت نرمال است. معمولاً در HTS‌ها، رابطه‌ی جریان و دمای بحرانی به صورت زیر است [۱۵]:

$$I_c(T) = I_c(0) \left( 1 - \frac{T}{T_c} \right)^{1/2} \quad (8)$$

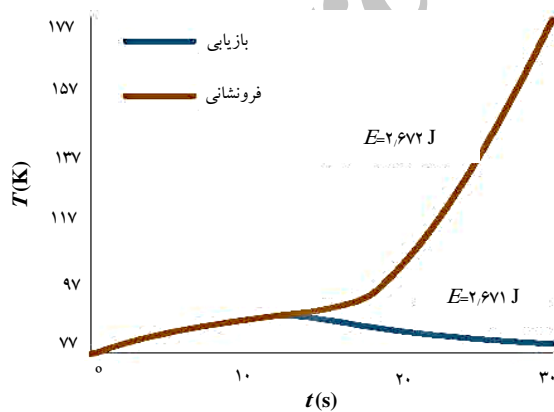
که در آن  $I_c(0)$  جریان بحرانی در صفر کلون است. در این مقاله، دو مشخصه‌ی حداقل انرژی فرونشانی و سرعت انتشار آن براساس قانون توان بررسی می‌شوند. فرایند اندازه‌گیری MQE به این ترتیب است که ابتدا در دمای اولیه‌ی موردنظر، جریان بحرانی محاسبه، و سپس جریانی کم‌تر از آن برای عبور از نمونه‌ی ابررسانای موردنظر تعیین می‌شود. ولتاژ و زمان تپ گرم‌کننده برای ایجاد اختلال حرارتی موضعی تنظیم می‌شوند. ابتدا، دامنه‌ی تپ گرمایی پایین تعیین می‌شود. اگر بعد از قطع تپ ولتاژ، تغییرات زمانی دما نزولی باشد، فرونشانی رخ نمی‌دهد و برای فراهم شدن شرایط فرونشانی، با افزایش ولتاژ گرم‌کننده، روند را تکرار می‌کنیم. این فرایند را تا زمانی ادامه



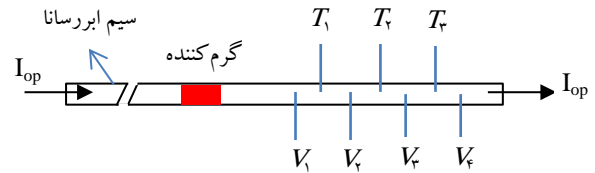
**شکل ۳.** نمودار گرمایش ژول برحسب دما براساس تقریب خطی در فرایند تقسیم جریان به ازای جریان‌های متفاوت.  $a$  نسبت جریان کاری به جریان بحرانی در دمای کاری  $۷۷\text{ K}$  است.  $T_C$  دمای بحرانی در صفر کلوین و  $T_{CS}$  دمای تقسیم جریان است.



**شکل ۴.** نمودار گرمایش ژول برحسب دما براساس قانون توان به ازای مقادیر مختلف  $n$ .



**شکل ۵.** تغییرات زمانی دما به ازای انرژی اختلال  $E=۲,۶۷۱\text{ J}$  که به بازیابی، و  $E=۲,۶۷۲\text{ J}$  به فرونشانی می‌انجامد.



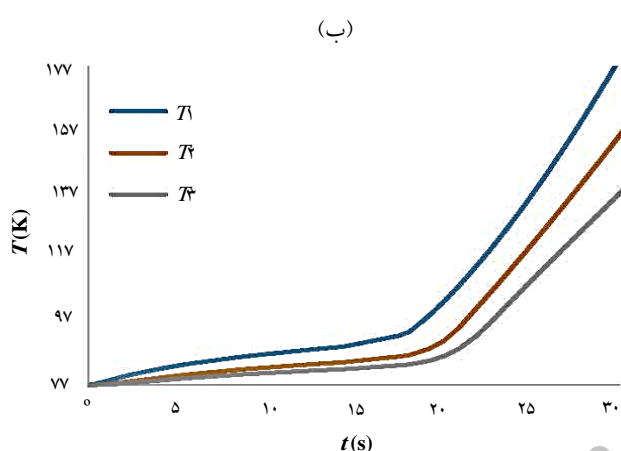
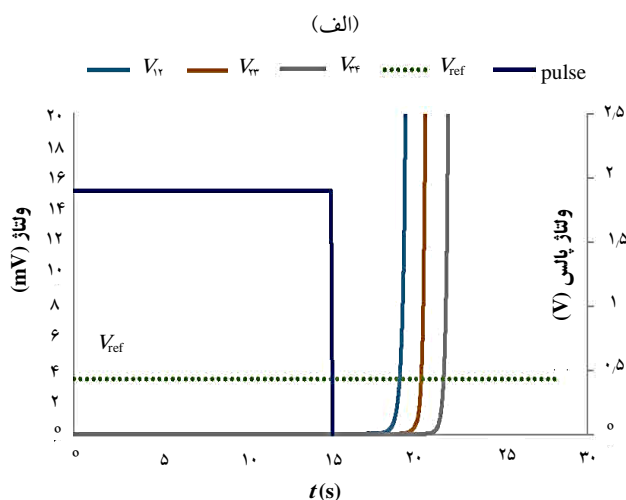
**شکل ۲.** نحوه‌ی قرارگیری گرم کننده، ۴ پروب ولتاژ،  $V_1$  تا  $V_4$  و ۳ حسگر دمای  $T_1$  تا  $T_3$  بر روی نوار ابرسانا.

#### ۴. نتایج و بحث

نمودار گرمایش ژول برحسب دما با در نظر گرفتن تقریب خطی به ازای جریان‌های مختلف در شکل ۳ نمایش داده شده است. دمای کاری  $۷۷\text{ K}$  و طبق شکل ۱ به ازای جریان‌های کاری مختلف دمای تقسیم جریان، متفاوت به دست می‌آید به طوری که با افزایش جریان کاری، دمای تقسیم جریان کاهش می‌یابد. در دمای بالاتر از دمای بحرانی  $T_C=۱۰۸\text{ K}$  که همه‌ی جریان از ماتریس عبور می‌کند، رفتاری کاملاً اهمی مشاهده می‌شود. شکل ۴، رفتار گرمایش ژول برحسب دما را براساس قانون توان، به ازای جریان کاری معادل ۵۰٪ جریان بحرانی در  $۷۷\text{ K}$  و به ازای  $n$ های متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، گذر از دمای تقسیم جریان در این نمودار در مقایسه با تقریب خطی در شکل ۳ سریع‌تر است و با افزایش مقدار  $n$ ، شیب تغییرات تندتر می‌شود و گذار از ابرسانی به حالت نرمال تیزتر خواهد بود. این تغییر فاز ناگهانی نشان‌دهنده‌ی مرغوبیت ابرسانا است.

در شکل ۵، نمودار تغییرات زمانی دما به ازای به کار بستن اختلال حرارتی نشان داده شده است. برای نمونه، ابرسانی با مقدار  $n=۱۰$  در شرایط کاری  $I_{op}=۰,۵ I_C$  و در دمای  $۷۷\text{ K}$  با به کار بستن انرژی اختلالی  $۲,۶۷۱\text{ J}$ ، بعد از قطع پالس ( $t=۱۵\text{ s}$ ) دما کاهش می‌یابد و بازیابی ناحیه‌ی نرمال تشکیل شده به حالت ابرسانی رخ می‌دهد. در همان شرایط کاری، به ازای انرژی اختلال  $۲,۶۷۲\text{ J}$ ، افزایش فزاینده‌ی دما بعد از قطع پالس ادامه می‌یابد و فرونشانی اتفاق می‌افتد. بنابراین حداقل انرژی لازم برای فرونشانی (MQE) در این شرایط کاری برابر می‌شود با:

$$۲,۶۷۱\text{ J} < \text{MQE} < ۲,۶۷۲\text{ J} \quad (۱۱)$$



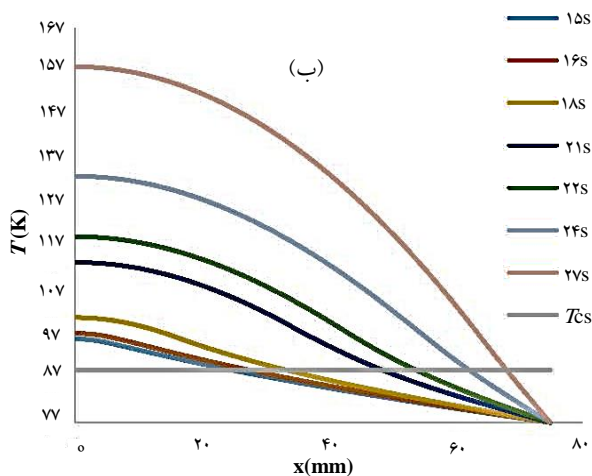
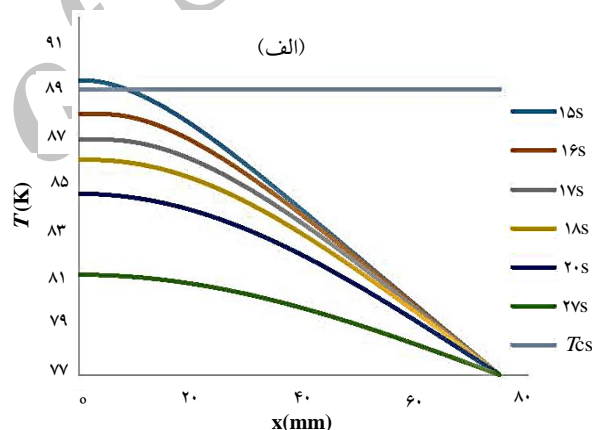
شکل ۷. تحول زمانی الف) ولتاژ در پروب‌های  $V_1$  تا  $V_4$ ، ب) دما در حسگرها  $T_1$  تا  $T_3$  به ازای  $E=2,672 \text{ J}$ ،  $T_{op}=77 \text{ K}$ ،  $I_c=0,5 I_c$ ،  $T_{op}=0,5 I_c$

برای اندازه‌گیری MPZ، روی نمودار ۷. الف، ولتاژ مرجع  $3,45 \text{ mV}$  که از تقسیم توان اختلال بر جریان کاری به دست می‌آید را در نظر بگیرید. از تقسیم فاصله‌ی پروب‌های ولتاژ به بازه‌ی زمانی که طول می‌کشد تا ولتاژ مرجع را نشان دهند، میانگین سرعت انتشار فرونشانی به ازای شرایط کاری مذکور، برابر با  $v_{MPZ} \approx 1,56 \text{ cm/s}$  به دست می‌آید. این سرعت به طور نوعی در LTSها، بیش از  $50 \text{ cm/s}$  است [۲۲]، بنابراین سرعت انتشار فرونشانی در نمونه ابررسانای دمای بالا کندتر است.

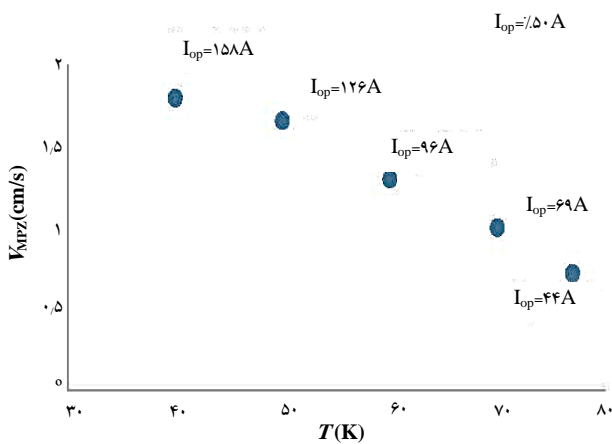
نمودار ۷. ب نشان می‌دهد که اختلال موضعی به فرونشانی می‌انجامد. با گذشت زمان، توان گرمایشی بر توان سرمایشی غلبه می‌کند، و ناحیه‌ی نرمال گسترش می‌یابد که رشد دما در این نمودار مؤید آن است.

به ازای همین شرایط کاری، در شکل ۶. الف و ۶. ب، تحول زمانی در نمودار دما برحسب مکان، بعد از قطع پالس ( $t=15 \text{ s}$ )، نشان داده شده است. نمودار ۶. الف نشان می‌دهد که به ازای انرژی اختلال، دما به بیش از  $T_{cs}$  می‌رسد و ناحیه‌ی نرمال تشکیل می‌شود. ولی این اختلال، انرژی لازم برای ایجاد MPZ را فراهم نمی‌کند و بعد از قطع تپ ولتاژ، به حالت ابررسانا بازمی‌گردد. نمودار ۶. ب نشان می‌دهد چنانچه انرژی اختلال به اندازه‌ی بزرگ باشد که حداقل ناحیه‌ی انتشار (MPZ) را فراهم کند، فرونشانی آغاز می‌شود. در این شرایط افزایش فرایند دما و رشد ناحیه‌ی نرمال مشاهده می‌شود.

در شکل ۷، تحول زمانی ولتاژ و دما به ازای شرایط کاری محاسبه‌ی MQE، سرعت انتشار ناحیه‌ی نرمال که مشخصه دیگر فرونشانی است، محاسبه می‌شود.



شکل ۶. تحول زمانی دما برحسب مکان بعد از قطع پالس. الف) بازمی‌یابی به ازای انرژی اختلال  $E=2,671 \text{ J}$  و ب) فرونشانی به ازای  $E=2,672 \text{ J}$



شکل ۹. سرعت انتشار فرونشانی در بازه‌ی دمایی ۴۰ تا ۷۷K به ازای  $I_{op}=0.5 I_c(T)$

### ۵. نتیجه‌گیری

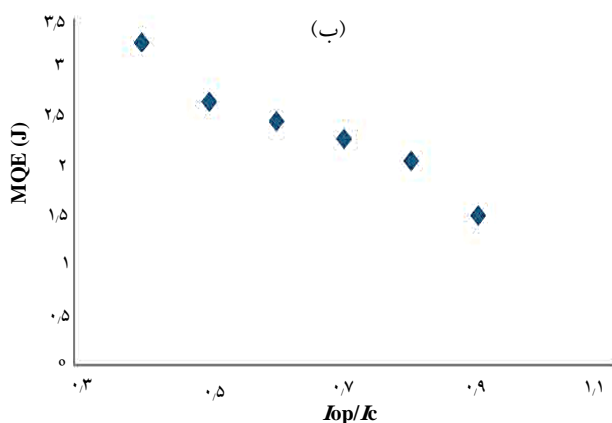
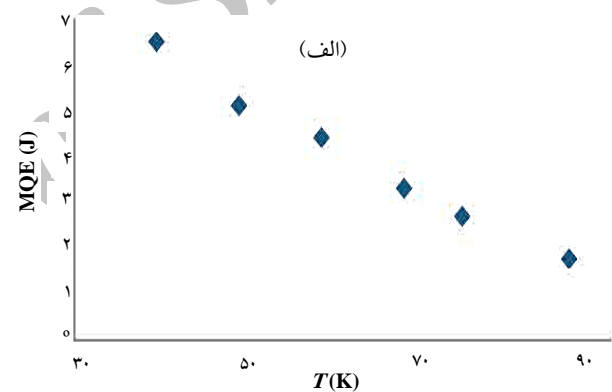
در این مقاله نشان داده شد که با افزایش مقدار  $n$ ، تغییر فاز ابرسانی به مقاوم‌تری سریع‌تر، و تندی گذار بر رفتار فرونشانی مؤثر است. هم‌چنین اثر جریان و دمای کاری بر روی مشخصه‌های فرونشانی نشان داده شد. با افزایش ۱۲۵٪ دما در جریان ثابت، MQE حدود ۷۲٪ کاهش می‌یابد و با افزایش ۱۲۵٪ جریان، حدود ۵۴٪ کاهش در مقدار آن رخ می‌دهد. بنابراین MQE وابستگی بیش‌تری به دما دارد. هم‌چنین با افزایش ۹۰٪ دما که با کاهش ۷۲٪ جریان کاری همراه است، سرعت انتشار فرونشانی ۶۰٪ کاهش می‌یابد.

نتایج نشان می‌دهند با توجه به این نکته که دمای بحرانی در HTSها بالا است، مطلوب آن است که در دماهایی که فاصله‌ی قابل توجه نسبت به مرز بحرانی داشته باشند، شرایط کاری مشخص فراهم شود تا احتمال فرونشانی مخرب کاهش یابد. از سوی دیگر برای استفاده از ظرفیت HTSها در کاهش هزینه (برودتی)، دمای کاری بالاتر مناسب است. MQE و  $V_{MPZ}$  بالاتر برای دست‌یابی به مگنت پایدار و خود محافظ مناسب است. به طور کلی شناخت این تابعیت‌ها و رفتارها در یافتن نقطه‌ی کاری بهینه در طراحی مگنت ابرسانا کمک می‌کند.

### پی‌نوشت‌ها

1. Hot Spot
2. Low Temperature Superconductor
3. Recovery
4. Finite Element Method
5. Power Law
6. Adiabatic

مشخصه‌های فرونشانی به شرایط کاری وابسته است. وابستگی MQE به جریان و دما در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، هر چه جریان و دمای کاری بالاتر باشند، در انرژی پایین‌تری شرایط فرونشانی فراهم می‌شود. در شکل ۹، اثر دما بر سرعت انتشار فرونشانی نشان داده شده است. با توجه به رابطه‌ی (۲)، وابستگی ضمنی سرعت با دما در این نمودار مشاهده می‌شود که در دمای کاری بالاتر، سرعت انتشار کم‌تر است و ناحیه‌ی نرمال کند منتشر می‌شود و می‌تواند به بروز نقطه‌ی داغ در حد دمای ذوب در آن ناحیه منجر شود. در واقع با کاهش دما، جریان بحرانی افزایش می‌یابد و به ازای کسر مشخصی از جریان بحرانی، جریان کاری افزایش می‌یابد که افزایش قابل توجه گرمایش ژول را به همراه دارد و به همین دلیل انتشار ناحیه‌ی نرمال سریع‌تر می‌شود.



شکل ۸. حداقل انرژی لازم برای فرونشانی (الف) به ازای  $I_{op}=0.5 I_c(T)$  (بر حسب دما و ب)  $T_{op}=77K$  بر حسب جریان.



- [1] M. Maeda, R. Yokohama, Y. Yanagisawa, Recent developments in high-temperature superconducting magnet technology (review), *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **24** (2014) 4602412.
- [2] K. Sato, Research, Fabrication and Applications of Bi-2223 HTS Wires, World Scientific (2016).
- [3] A. Devred, Quench origins, *AIP Conference Proceedings* **249** (1992) 1262-1308.
- [4] M. Wilson, Superconducting Magnets, Oxford University Press (1983).
- [5] Y. Iwasa, Stability and protection of superconducting magnets: A discussion, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15(2)** (2005) 1615-1620.
- [6] M. Breschi, L. Trevisani, M. Boselli, L. Bottura, A. Devred, P.L. Ribani, F. Trillaud, Minimum quench energy and early quench development in NbTi superconducting strands, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17(2)** (2007) 2702-2705.
- [7] W. Pi, X. Shi, J. Dong, Y. Wang, Experimental Investigation on Quench Characteristics of NbTi/Bi2223 Hybrid Superconductor, International conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering, (2015).
- [8] H. Bajas, M. Bajko, B. Bordini, L. Bottura, S. Izquierdo Bermudez, J. Feuvrier, A. Chiuchiolo, J. C. Perez, G. Willering, Quench Analysis of High-Current-Density Nb<sub>3</sub>Sn Conductors in Racetrack Coil Configuration, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25(3)** (2015) 1-5.
- [9] C.L. Wu, Z.M. Bai, J.H. Li, J.X. Wang, Normal-zone propagation velocities in Bi-2223/Ag superconducting multifilament tape, *Physica C: Superconductivity* **386** (2003) 166-169.
- [10] E. Martinez, F. Lera, M. Martinez-Lopez, Y. Yang, S.I. Schlachter, P. Lezza, P. Kovac, Quench development and propagation in metal/MgB<sub>2</sub> conductors, *Supercond. Sci. Technol.* **19** (2006) 143.
- [11] T. Huang, E. Martínez, C. Friend, Y. Yang, Quench characteristics of HTS conductors at low temperatures *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **18(2)** (2008) 1317-1320.
- [12] Z. Zhong, H.S. Ruiz, L. Lai, Z. Huang, W. Wang, T. Coombs, Experimental study of the normal zone propagation velocity in double-layer 2G-HTS wires by thermal and electrical methods, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25** (2015) 1-5.
- [13] M. Lebioda, J. Rymaszewski, Analysis of normal zone propagation in superconducting tapes initiated by thermal disturbances, *Journal of Physics: Conference Series.* **709** (2016) 012011.
- [14] T. Huang, A. Johnstone, Y. Yang, C. Beduz, and C. Friend, Finite element modelling of thermal stability and quench propagation in a pancake coil of PbBi2223 tapes, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15(2)** (2005) 1647-1650.
- [15] B. Zhi-ming, X. Wu, C. Wu, J. Wang, Quench Propagation Properties Analysis of High-Temperature Superconductors using Finite Element Method, *Physica C: Superconductivity and its applications* **436(2)** (2006) 99-102.
- [16] A. Stenvall, A. Korpela, J. Lehtonen, R. Mikkonen, Formulation for solving 1D minimum propagation zones in superconductors, *Physica C: Superconductivity and its applications* **468(13)** (2008) 968-973.
- [17] N. Glowa, R. Wesche, P. Bruzzone, P. Bruzzone, Quench Studies of YBCO Insulated and Noninsulated Pancake Coils, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **24(3)** (2014) 1-5.
- [18] S. Sanz, G. Sarmiento, A. Pujana, J.M. Merino, M. Tropeano, D. Nardelli, G. Grasso, J. Sun, F. Tora, I. Marino, Experimental Study and Simulation of Quench in MgB<sub>2</sub> Coils for Wind Generators, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **26(3)** (2016) 1-5.
- [19] M.K. Al-Mosawi, S. Avgeros, C. Beduz, Y. Yang, A. Ballarino, Quench characteristics of Ag/AuBi2223 HTS-stainless steel stack used for the hybrid current leads of the Large Hadron Collider, *J. Phys. Conf. Ser.* **97(1)** (2008) 012304.
- [20] C.L. Wu, H.L. Yang, Finite element analysis of quench propagation velocity in Bi-2223/Ag superconducting multifilamentary tape, *Materials Science Forum* **546** (2007) 1931-1934.
- [21] Y. Iwasa, Case Studies in Superconducting Magnets, 2<sup>th</sup> edition, Springer Science (2009).
- [22] R. Bellis, Y. Iwasa, Quench Propagation in High T<sub>c</sub> Superconductors, *Cryogenics* **34(2)** (1994) 129-144.
- [23] Cryocomp Eckels Engineering 3.06 Cryodata Inc. Florence SC, USA 29501.
- [24] C. Uher, Thermal Conductivity of High-T<sub>c</sub> Superconductors, *J. Supercond.* **3(4)** (1990) 337-389.