



### کواچی ارائه مقاله

ضمن تشکر و قدردانی از ارائه مقاله با عنوان

تاثیر دمای تف‌جوشی بر روی خواص ترمو الکتریک ترکیب

Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> با روش تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای

در هفتمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مواد و متالورژی

و دوازدهمین همایش ملی مهندسی متالورژی و مواد ایران و انجمن علمی ریخته‌گری ایران

این گواهی به نویسندگان مقاله:

نقیسه بلقن آبادی، سید عبدالکریم سجادی، ابوالفضل باباخانی

اعطای گردد. موفقیت روزافزون شما را در پیشرفت علم و فناوری، از خداوند متعال خواستاریم.

محمد علی احمدآبادی  
مدیر اجرایی  
انجمن مهندسی مواد ایران

محمد علی سجادی  
مدیر اجرایی  
انجمن مهندسی مواد ایران

جمال جهانی  
مدیر اجرایی  
انجمن مهندسی مواد ایران



## تأثیر دمای تف‌جوشی بر روی خواص ترموالکتریک ترکیب $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ با روش تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای

نقیسه بلقن آبادی<sup>۱\*</sup>، سید عبدالکریم سجادی<sup>۲</sup>، ابوالفضل باباخانی<sup>۳</sup>

### چکیده

استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله راهکارهای جدید برای صرفه‌جویی انرژی می‌باشد. بدین منظور محققان برای استفاده از گرمای اتلافی به ترکیبات ترموالکتریک علاقه‌مند شدند. در این پژوهش، پودر تلورید بیسموت با روش آلیاژسازی مکانیکی و با استفاده از پودرهای بیسموت و تلوریم ساخته و خواص ساختاری آن بررسی شد. بدین منظور، ابتدا پودرهای بیسموت (۴۷/۸ درصد وزنی) و تلوریم (۵۲/۲ درصد وزنی) به همراه گلوله‌های فولادی با نسبت گلوله به پودر ۱۵:۱ در یک آسیای گلوله‌ای ماهواره‌ای با گاز محافظ آرگون به مدت زمان ۲، ۴ و ۶ ساعت آسیاکاری شدند. سپس نمونه‌هایی با ضخامت‌های متفاوت با روش سنتز احتراقی در فشار ۵۰ MPa و در دماهای ۳۵۰، ۴۰۰ °C در مدت زمان ۵ دقیقه تولید و خواص ساختاری ترموالکتریکی آنها بررسی شدند. به منظور بررسی فازها در نمونه‌های نهایی، بررسی‌های میکروسکوپی با میکروسکوپ نوری و الکترونی SEM و آنالیز EDS و XRD صورت گرفت. نتایج آنالیز XRD نشان داد که در مدت زمان آسیاکاری ۲ ساعت، پودرهای حاصله حاوی فازهای  $\text{BiTe}$  و  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  می‌باشد ولی با افزایش زمان به ۴ ساعت به طور کامل ترکیب  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  تشکیل شده است. پس از تشکیل نمونه کامل با استفاده از فرآیند SPS، نمونه در شرایط دمایی ۴۰۰ °C دارای خواص ساختار  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  بود. با افزایش دما ضریب سیبک افزایش و هدایت الکتریکی کاهش یافت.

کلمات کلیدی: خواص ترموالکتریک، تلورید بیسموت، سنتز احتراقی، ضریب سیبک.

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد. Nbolghanabadi72@gmail.com

۲. استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۳. استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد





## ۱. مقدمه

در جهان مدرن امروزه، مصرف روزافزون انرژی‌های تجدیدناپذیر هزینه‌های اقتصادی و زیست محیطی از جمله آلودگی محیط پیرامون و از بین رفتن منابع طبیعی را به وجود می‌آورد. محققان، به منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی‌های سوختی و توسعه علم و صنعت، منابع انرژی جدیدی را مطرح کردند که شامل انرژی بادی، خورشیدی و ... می‌باشد. بدین سبب استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله راهکارهای جدید برای صرفه‌جویی انرژی می‌باشد. امروزه بحران افزایش دمای محیط و اتلاف حرارتی ناشی از آن و فرآیندهای صنعتی و همچنین آگروز خودروها سبب علاقه‌مندی روزافزون پژوهش‌گران به مواد با خواص ترموالکتریکی شده است. بدین صورت، اثر ترموالکتریک با تعریف تبدیل مستقیم اختلاف دما به ولتاژ الکتریکی طی پدیده‌ای طبیعی در ماده مطرح شد. اما مسئله‌ی مهمی که حائز اهمیت می‌باشد؛ جایگزینی مواد ترموالکتریک در سیستم‌های امروزی به جای سوخت‌های فسیلی و از طرفی مصرف انرژی گرمایی اتلافی است.

بر همین اساس، کارایی مواد ترموالکتریک توسط رابطه‌ی بدون بعد ضریب ارزشی مواد ترموالکتریک،  $ZT = \alpha^2 \sigma T / k$ ، ارزیابی می‌شوند که در آن  $\alpha$  ضریب سیبک،  $\sigma$  رسانندگی الکتریکی و  $k$  رسانندگی گرمایی نمونه است.  $\alpha^2 \sigma$  نیز به عنوان عامل توان معرفی می‌شود. با توجه به رابطه‌ی ضریب ارزشی، برای ساخت ترکیب ترموالکتریک با کیفیت بالا، مواد باید دارای ضریب سیبک و هدایت الکتریکی بالا و همچنین هدایت حرارتی پایین باشند. اما یکی از مهم‌ترین معضلات در بهره‌وری از مواد ترموالکتریک هم‌راستایی رسانش الکتریکی و حرارتی در رابطه‌ی  $ZT$  است که قابلیت‌های مواد ترموالکتریک را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به طور کلی، پراکندگی فونون‌ها در ساختار، کاهش هدایت حرارتی و حضور الکترون‌ها در ماده، افزایش هدایت الکتریکی را به همراه دارد [۱، ۲].

با توجه به تعاریف و بازه‌های حرارتی در سیستم‌های گوناگون، آلیاژ تلورید بیسموت را می‌توان یکی از پرکاربردترین ترکیبات ترموالکتریک در محدوده‌ی دمایی ۳۰۰-۱۵۰ معرفی کرد [۱، ۲].

تلورید بیسموت، نیمه‌رسانایی با گاف نواری نازک و ساختار بلوری لایه‌ای یک‌ریخت و دارای رسانایی الکتریکی خوب و رسانایی گرمایی پایین است، همچنین ضریب سیبک بالاتری نسبت به نیمه‌رساناهای دیگر دارد.

شایان ذکر است که حضور بیسموت در این مواد، به خاطر وجود سه سطح انرژی ناهمسان‌گرد برای الکترون‌ها، تحرک و موبیلیتی بالای حامل‌ها و جرم موثر بالا نیز بر روی خواص ترموالکتریکی ترکیب موثر است.



با توجه به دورنمای کاربردی این ترکیبات، مهم‌ترین موضوع در زمینه‌ی ترموالکتریک این است که چگونه می‌توان بازدهی مواد ترموالکتریک را بالا برد. به منظور سیل به این هدف، یافتن موادی با ضریب شایستگی بالا در اولویت قرار دارند. مواد مطلوب دارای رسانندگی الکتریکی بالا به همراه رسانندگی گرمایی پایین می‌باشند. البته جنبه‌های دیگر نظیر غیر سمی بودن، هزینه ساخت قطعات ترموالکتریکی و ثبات مکانیکی نیز باید مورد توجه باشند [۳].

امروزه ائتلاف حرارتی در محدوده‌ی دمایی محیط که سبب افزایش گرمای زمین و مشکلات زیست محیطی ناشی از آن می‌گردد؛ بدین منظور استفاده از ترکیباتی در این محدوده دمایی حائز اهمیت می‌باشد. بیسموت تلوراید یکی از پرکاربردترین ترکیبات ترموالکتریکی در محدوده دمایی ۱۰۰k-۳۰۰k می‌باشد [۴، ۵].

در این پژوهش، ترکیب بیسموت تلوراید با روش تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای سنتز، سپس خواص ترموالکتریکی آن بررسی شد.

## ۲. مواد و روش تحقیق

برای ساخت ترکیب ترموالکتریک با ترکیب شیمیایی  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ، ابتدا پودرهای بیسموت و تلوریوم با خلوص ۹۹٫۹۵ درصد و ابعاد  $15 \mu\text{m}$  با توجه به ضرایب استوکیومتری و نسبت وزنی با عملیات آسیاکاری گلوله‌ای با نسبت گلوله به پودر ۱۵:۱ و سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه در اتمسفر آرگون آماده‌سازی شد. سپس عملیات SPS در دماهای ۳۵۰، ۴۰۰ و  $450^\circ\text{C}$ ، فشار ۵۰ مگاپاسکال و مدت زمان نگهداری ۵ دقیقه انجام شد.

برای تعیین انرژی باند گپ، ابتدا آنالیز اسپکتروفوتومتر اشعه‌ی ماوراء بنفش از ترکیب پودری  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  اندازه‌گیری شد. نتیجه‌ی حاصل از آنالیز طیفی مرئی-فرابنفش، نمودار جذب ( $\alpha$ ) بر حسب طول موج ( $\lambda$ ) می‌باشد. جهت اندازه‌گیری انرژی باند گپ، ابتدا طول موج با رابطه‌ی (۲-۱) به فرکانس تبدیل شد. سپس مقادیر فرکانس و جذب در رابطه‌ی (۲-۲)، تحت عنوان فرمول تاوک قرار داده شد.

$$v = \frac{c}{\lambda} \quad (2-1)$$

$$\alpha h\nu = b(h\nu - E_g)^n \quad (2-2)$$



در این رابطه،  $v$  فرکانس محاسبه شده از رابطه‌ی (۲-۱)، در رابطه‌ی تاوک،  $\alpha$  میزان جذب اندازه‌گیری شده توسط آنالیز،  $h$  ثابت پلانک که برابر است با  $4.13567 \times 10^{-15}$  eVs و  $E_g$  مقدار انرژی باند گپ می‌باشد. همچنین  $C$  سرعت صوت برابر با  $3 \times 10^8$  m/s می‌باشد. مقدار  $n$  در رابطه می‌تواند اعداد  $1/2, 2/3, 3/2$  باشد. برای ترکیب بیسموت تلورید مقدار  $0.5$  آورده شده است. برای اندازه‌گیری انرژی باند گپ، نمودار  $(\alpha h\nu)^2$  بر حسب  $h\nu$  رسم، سپس معادله‌ی خط مماس محاسبه شد. طول از مبدا خط مماس، میزان انرژی باند گپ می‌باشد [۶، ۷].

برای اندازه‌گیری ضریب سیبک نمونه، از روش استاندارد اندازه‌گیری ضریب سیبک استفاده شد، به طوری که مطابق شکل (۲-۱)، یک طرف نمونه در پیوند سرد و طرف دیگر در پیوند گرم قرار داده و دمای پیوند گرم به طور آهسته بالا برده شد، طبق رابطه‌ی (۲-۱)، شیب نمودار اختلاف پتانسیل بر حسب اختلاف دما ضریب سیبک می‌باشد [۱، ۲، ۸].

$$\Delta V = \alpha \cdot \Delta T \quad (2-3)$$



شکل ۲-۱: شماتیک اتصالات جهت محاسبه ضریب سیبک

به منظور محاسبه رسانندگی الکتریکی، نمونه به شکل قرص با شعاع  $r$  و ضخامت  $d$  در نظر گرفته شد. مقاومت نمونه از روش دو اتصالی توسط دستگاه اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی 4-probe، با دقت اندازه‌گیری  $0.1$  اهم اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از رابطه‌ی (۲-۴) مقاومت سطحی نمونه‌ها محاسبه شدند.

$$R_s = \frac{\pi}{\ln(2)} \cdot R \quad (2-4)$$

پس از آن جهت محاسبه‌ی مقاومت ویژه‌ی الکتریکی از رابطه‌ی (۲-۵) استفاده شد.

$$\rho = R_s t \quad (2-5)$$

در نهایت طبق رابطه‌ی (۲-۶) رسانندگی الکتریکی نمونه‌ها محاسبه گردید [۹].

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2-6)$$

در این پژوهش، برای سهولت در مطالعه‌ی نتایج، نمونه‌های تفجوشی شده در دمای ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ به ترتیب S350، S400 و S450 نام‌گذاری شدند.

به منظور محاسبه‌ی رسانندگی الکتریکی در دماهای مختلف، رسانندگی الکتریکی طبق رابطه‌ی (۲-۷) نوشته می‌شود [۱۰، ۱۱].

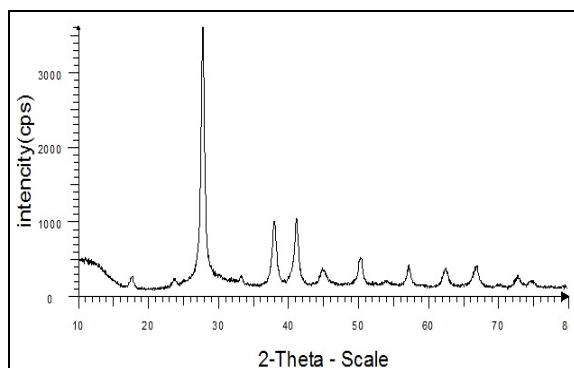
$$\sigma = Ae^{-E_g/2K_B T} \quad (2-7)$$

ثابت بولتزمن ( $K_B$ ) برابر است با [۱۲]:  $8.617 \times 10^{-5} \text{ (ev/k)}$

### ۳. نتایج و بحث

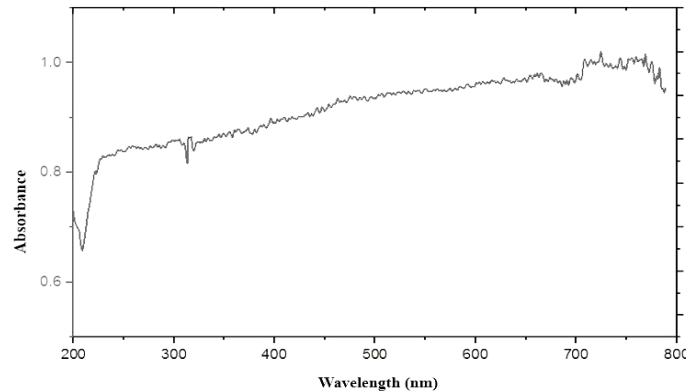
شکل (۳-۱)، الگوی پراش نمونه‌ی پودر حاصل از آماده‌سازی به روش آسیاکاری گلوله‌ای می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که شرایط آسیاکاری گلوله‌ای برای ایجاد پیوند بیسموت تلورید پودری مناسب بوده است.

مطابق شکل (۳-۱)، پیک‌های ارجح (۵۱۰)، (۰۱۰۱) و (۵۰۲) مربوط به فاز  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  می‌باشد و نمونه دارای ساختار هگزاگونال با پارامترهای  $a = b = 4.385 \text{ \AA}$  و  $c = 30.483 \text{ \AA}$  است [۱۳] که نمایانگر ترکیب مورد مطالعه در این پژوهش و همچنین منطبق بر پیک‌های  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  در مقالات می‌باشد [۱۴-۱۶].



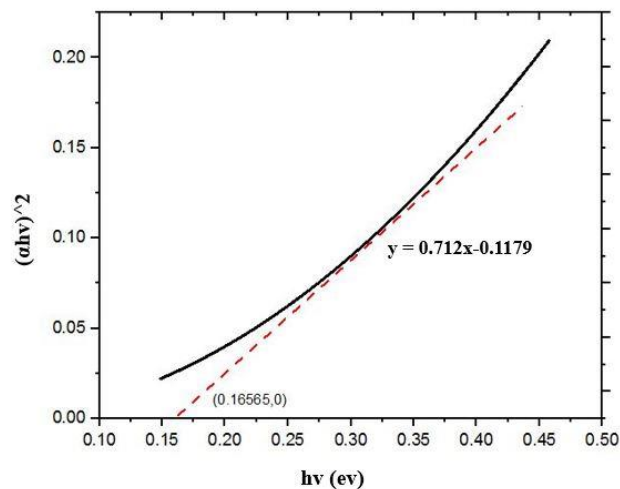
شکل ۳-۱: الگوی پراش پرتو X ذرات پودری  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  پس از آسیاکاری گلوله‌ای.

نتایج حاصل از آنالیز طیف سنجی مرئی-فرابنفش به صورت نمودار جذب بر حسب طول موج به دست آمد که در شکل (۲-۳) آورده شده است. با بررسی و قیاس طیفی ترکیب مورد مطالعه با مقالات، تطابق داده‌ها وجود دارد [۷، ۱۷، ۱۸].



شکل ۲-۳: نمودار نتایج آنالیز طیف سنجی مرئی-فرابنفش ترکیب پودری  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ .

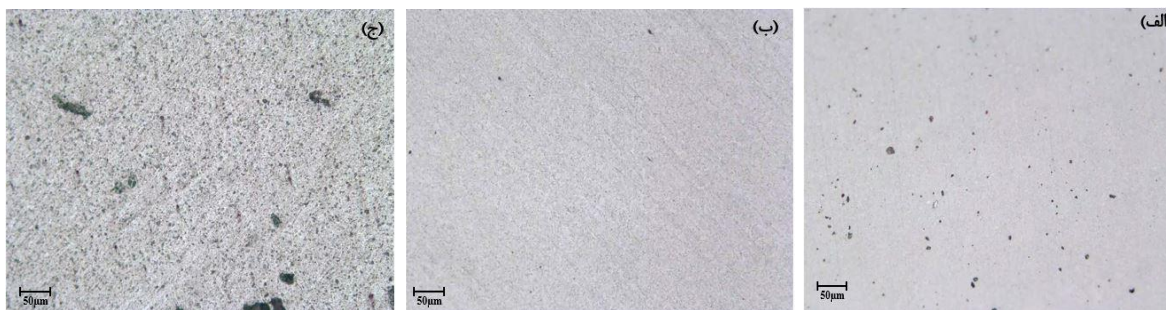
جهت اندازه‌گیری انرژی باند گپ به محاسبات ریاضی توضیح داده شده، پرداخته شد. در نهایت نتایج حاصله به صورت نموداری در شکل (۳-۳) آورده شد.



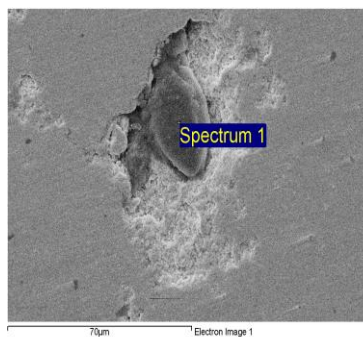
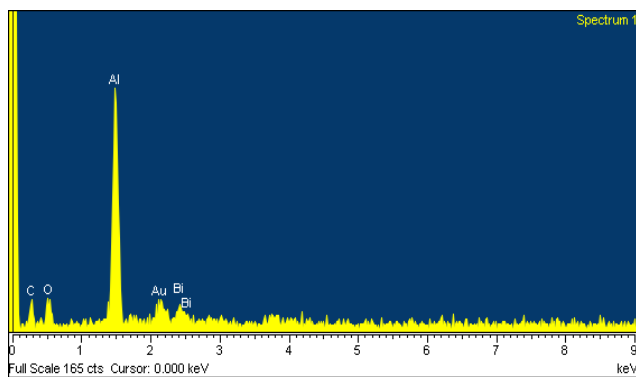
شکل ۳-۳: نمودار تاوک برای اندازه‌گیری باند گپ ترکیب  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ .

با محاسبه‌ی فرکانس،  $h\nu$  و  $\alpha h\nu$  از نتایج نمودار آنالیز طیفی مرئی-فرابنفش، شکل (۳-۳) به دست آمد. به منظور محاسبه‌ی انرژی باند گپ، خط مماس بر منحنی رسم و سپس طول از مبدا آن محاسبه شد. طبق تعاریف مقدار طول از مبدا نمودار انرژی باند گپ را نشان می‌دهد. در محاسبات انجام شده، انرژی باند گپ  $ev$   $0.16565$  برای ترکیب  $Bi_2Te_3$  مورد مطالعه در این پژوهش، حاصل شد که با مقادیر محاسبه شده در مقالات دیگر و همچنین میزان تئوری آن مطابقت دارد [۷, ۱۷, ۱۸].

با اطمینان از تشکیل ترکیب  $Bi_2Te_3$  پس از آلیاژسازی مکانیکی، نمونه‌ها در شرایط تعیین شده سنتز شدند. شکل (۳-۴) تصاویر میکروسکوپ نوری مربوط به نمونه‌های سنتز شده به روش SPS در دماهای  $350$ ،  $400$  و  $450$  درجه‌ی سانتی‌گراد در بزرگنمایی  $50\times$  برابر را نشان می‌دهد. همچنین آنالیز EDS نمونه‌ی S450 در شکل (۳-۵) آورده شده است.



شکل ۳-۴: تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های سنتز شده به روش SPS در دماهای الف)  $350$ ، ب)  $400$  و ج)  $450$  °C

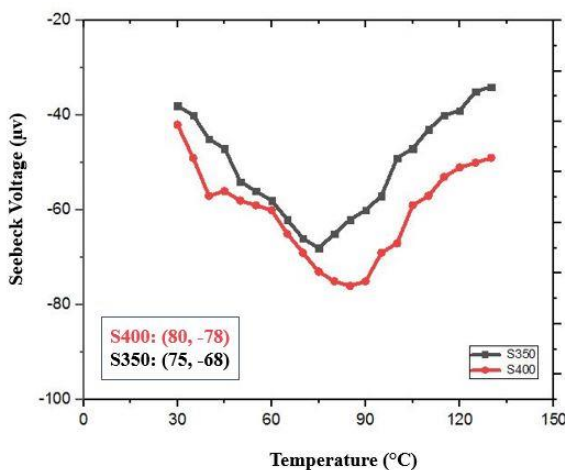


شکل (۳-۵): نتایج به دست آمده از آنالیز EDS از مناطق نفوذ کربن در ترکیب  $Bi_2Te_3$  پس از فرآیند سنتز احتراقی در دمای  $450$  °C

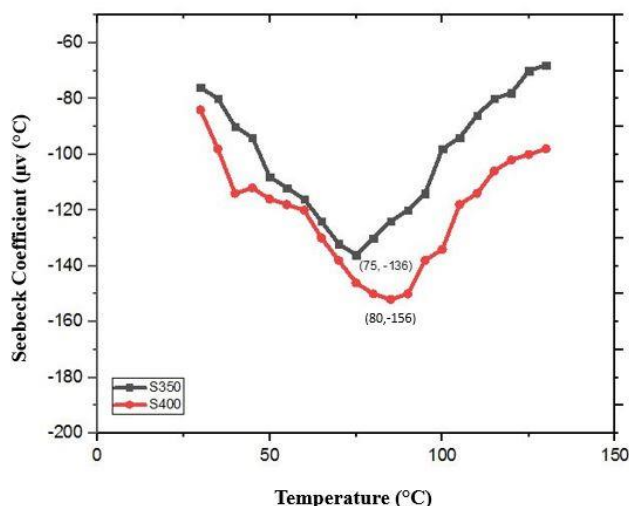


همان‌طور که در تصاویر میکروسکوپی مشهود است، در دمای ۳۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، میزان تخلخل افزایش یافته است که بیانگر عدم تف‌جوشی مناسب در این دما می‌باشد. لازم به ذکر است که حضور تخلخل در ریزساختار سبب کاهش سرعت حرکت حامل‌های بار می‌شود و تاثیر نامطلوبی روی خواص ترموالکتریک خواهد داشت. اما در نمونه‌ی تف‌جوشی شده در دمای ۴۰۰°C، تف‌جوشی و اتصال بین ذرات به خوبی صورت گرفته است. دلیل این امر نزدیک‌تر بودن دمای ۴۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به دمای ذوب موضعی ذرات و در نتیجه توزیع و اتصالات بهتر این ذرات می‌باشد. اما با بررسی تصاویر نمونه‌ی سنتز شده در دمای ۴۵۰°C شاهد تخلخل‌هایی در سطح وسیعی هستیم. پس از افزایش دما به ۴۵۰°C، همان‌طور که در شکل (۳-۵) نشان داده شده است، نفوذ اتم‌های کربن در ورقه‌های گرافیتی استفاده شده در فرآیند تف‌جوشی را شاهدیم که پس از پولیش سطح نمونه به صورت تخلخل‌هایی گسترده بر روی سطح دیده شده است. شایان ذکر است که پیوستگی و یکنواخت بودن ساختار نقش مهمی در کاهش رسانندگی گرمایی شبکه و هم‌چنین مقاومت الکتریکی را بازی می‌کند. بنابراین نمونه‌ی تف‌جوشی شده در دمای ۴۰۰°C دارای شرایط ریزساختاری بهتری می‌باشد.

جهت محاسبات خواص ترموالکتریکی، در ادامه با ایجاد اختلاف دما در دو سر نمونه، ولتاژ تولیدی اندازه‌گیری شد. نمودار اختلاف پتانسیل ایجاد شده بر حسب دمای میانگین دو سر نمونه در شکل (۳-۵) رسم شده و از روی آن نمودار ضریب سیبک بر حسب دمای میانگین در شکل (۳-۶) رسم شد.



شکل ۳-۵: تاثیر دمای تف‌جوشی بر نمودار ولتاژ سیبک بر حسب دمای میانگین سطح گرم و سرد قرص  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ .



شکل ۳-۶: تاثیر دمای تف‌جوشی بر نمودار تغییرات ضریب سیبک بر حسب دمای میانگین سطح گرم و سرد قرص  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ .

طبق نتایج حاصل از نمودار ضریب سیبک بر حسب دما در شکل (۳-۶)، قدر مطلق بیشینه‌ی ضریب سیبک در نمونه‌ی S400 برابر با ۱۵۶ در دمای  $۸۰^{\circ}\text{C}$  و برای نمونه‌ی S350 مقدار ۱۳۶ در دمای  $۷۵^{\circ}\text{C}$  گزارش شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده و ایجاد ولتاژ منفی، می‌توان ادعا کرد که ترکیب ترموالکتریک مورد مطالعه از نوع n می‌باشد و هم‌چنین حامل‌های بار الکترون‌ها می‌باشند. با بررسی نمودار تغییرات ضریب سیبک بر حسب تغییرات دما، با افزایش دما، قدر مطلق ضریب سیبک افزایش می‌یابد [۱۹]. همان‌طور که در مقدمه به مباحث فیزیکی مواد ترموالکتریک اشاره شد، به منظور بهبود خواص ترموالکتریک، عواملی مانند جرم موثر، چگالی حامل‌های بار و تحرک پذیری حامل‌ها نقش اساسی دارند. با افزایش دما، تحرک پذیری حامل‌ها که در این ترکیب الکترون‌ها هستند؛ افزایش می‌یابد. بنابراین سرعت حرکت الکترون‌ها در طول مسیر از طرف سطح با دمای کمتر به سمت سطح با دمای بیشتر، افزایش یافته و ولتاژ بیشتری تولید خواهد شد. اما برای دما نیز مقدار بهینه‌ای وجود دارد. با توجه به نمودار پس از دمای  $۸۰^{\circ}\text{C}$  در نمونه‌ی S400 و دمای  $۷۵^{\circ}\text{C}$  برای نمونه‌ی S350، کاهش ضریب سیبک را شاهدیم. دلیل افت شیب ضریب سیبک را می‌توان این‌گونه تفسیر نمود که پس از دمای بهینه‌ی اندازه‌گیری شده، افزایش نوسانات شبکه‌ای که به عنوان فونون‌ها شناخته می‌شوند و برخورد حامل‌های بار با آن‌ها، باعث این میزان کاهش در نمودار هستند. در بررسی دمای تف‌جوشی می‌توان گزارش نمود که در نمونه‌ی S350، به دلیل میزان تخلخل و عدم تف‌جوشی کامل نمونه، همانند عیوب شبکه عمل کرده و بر روی



سرعت حرکت حامل‌های بار تاثیرگذار است، از طرفی با افزایش دمای تفجوشی میزان عیوب کاهش می‌یابد؛ بنابراین نمونه‌ی S350 دارای ضریب سیبک کمتری نسبت به نمونه‌ی S400 است. از طرفی تاثیر حضور تخلخل‌ها و عیوب شبکه بر روی پیک دمایی نیز مشاهده می‌شود، به‌گونه‌ای که از دمای ۸۰ به ۷۵°C کاهش یافته است.

میزان ضریب سیبک در دمای محیط، برای نمونه‌ی S350 و S400 به ترتیب ۷۶ و ۸۴ گزارش کرد.

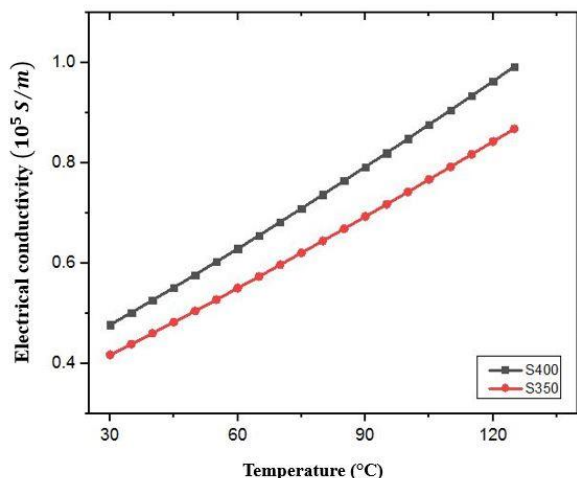
در ادامه مقاومت ویژه‌ی الکتریکی، هدایت الکتریکی و ضریب سیبک نمونه‌ها در دمای محیط در جدول (۱-۳) آورده شده است.

جدول ۱-۳: نتایج اندازه‌گیری مقاومت ویژه‌ی الکتریکی و رسانش الکتریکی در نمونه‌های مورد مطالعه قرص  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ .

نام نمونه	مقاومت ویژه‌ی الکتریکی $(\Omega.m) \times 10^{-5}$	رسانش الکتریکی $(S/m) \times 10^4$	ضریب سیبک $(\mu V/^\circ C)$
S350	۲/۴	۴/۱۷۹	۷۶
S400	۲/۱	۴/۷۷۶	۸۴

در بررسی دمای تفجوشی می‌توان بیان کرد که به دلیل حضور تخلخل در ساختار شبکه‌ای نمونه‌ی S350 و ایجاد اختلال در مسیر حرکت حامل‌های بار، مقاومت الکتریکی به مقداری افزایش می‌یابد و در نتیجه رسانندگی الکتریکی کاهش خواهد یافت.

در ادامه طبق رابطه‌ی تعریف شده در فصل قبل در خصوص وابستگی دمایی رسانندگی الکتریکی به دما، نمودار رسانندگی الکتریکی نسبت به دما در شکل (۷-۳) برای نمونه‌ها در دمای تفجوشی متفاوت رسم شد.



شکل ۲۱-۴: نمودار تغییرات رسانش الکتریکی بر حسب دما برای نمونه‌های با دمای تفجوشی متفاوت.

همان‌طور که در شکل (۲۱-۴) مشاهده می‌شود، با افزایش دما رسانندگی الکتریکی افزایش می‌یابد که با انتظار ما از رفتار یک نیم‌رسانا مطابقت دارد [۱۱].

همان‌طور که پیشتر عامل توان تعریف شد، عامل توان برای دو نمونه‌ی S400 و S350 به ترتیب مقادیر ۰/۲۴ و ۰/۳۴ به دست آمد.

#### ۴. نتیجه‌گیری:

۱- مقدار انرژی باند گپ، با محاسبات فرمول تاوک و هم‌چنین استفاده از نتایج آنالیز طیفی مرئی-فرابنفش ۰,۱۶۵۶۵ الکترون-ولت به دست آمده است. شایان ذکر است که میزان تئوری آن حدود ۰,۱۷ الکترون-ولت گزارش شده است.

۲- طی تحلیل دمای تفجوشی SPS، در دمای تفجوشی ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد، تفجوشی به خوبی صورت نگرفته است و حضور تخلخل بر روی سطح نمونه مشاهده شده است. در دمای ۴۰۰°C تفجوشی به خوبی صورت گرفته بود و در نهایت در دمای ۴۵۰°C به دلیل افزایش دمای تفجوشی و نزدیک بودن به دمای ذوب موضعی، کربن در ورقه‌ی گرافیت استفاده شده درون قالب گرافیتی دستگاه SPS به درون ساختار نفوذ کرده است.





۳- قدر مطلق بیشینه‌ی ضریب سیبک نمونه‌های S350 و S400 به ترتیب ۱۳۶ و ۱۵۶ می‌باشد. حضور تخلخل در نمونه‌ی S350 باعث پراکندگی حامل‌های بار و ایجاد اختلال در سرعت و حرکت آن‌ها و سبب کاهش ضریب سیبک می‌شود.

۴- با افزایش دما چگالی حامل‌های بار و همچنین سرعت حرکت آن‌ها افزایش می‌یابد که باعث افزایش ضریب سیبک می‌شود؛ اما در اثر افزایش دما، میزان ارتعاشات شبکه و تاثیر برخورد فونون و حامل‌های بار، ضریب سیبک کاهش یافته است. بنابراین بیشینه‌ی ضریب سیبک در دمای ۷۵ و ۸۰ °C به ترتیب برای نمونه‌های S350 و S400 به دست آمده است.

۵- رسانش الکتریکی نمونه‌های S350 و S400 به ترتیب  $4/175 \times 10^4$  و  $4.776 \times 10^4$  (S / m) به دست آمد. به دلیل حضور تخلخل در نمونه‌ی S350، مقاومت الکتریکی به میزانی افزایش می‌یابد که منجر به کاهش رسانش الکتریکی می‌شود.

#### مراجع:

- 1- G.S. Nolas, J. Sharp, J. Goldsmid, "Thermoelectrics: basic principles and new materials developments", Springer Science & Business Media, 2013.
- 2- D.M. Rowe, "Thermoelectrics handbook: macro to nano", CRC press, 2005.
- 3- R.M. Ireland, H.E. Katz, "Thermoelectric Polymer-Inorganic Composites", Innovative Thermoelectric Materials: Polymer, Nanostructure and Composite Thermoelectrics, World Scientific, 2016, pp. 147-191.
- 4- P.D. Heinz, (2010).
- 5- G.J. Snyder, E.S. Toberer, "Complex thermoelectric materials, Materials For Sustainable Energy": A Collection of Peer-Reviewed Research and Review Articles from Nature Publishing Group, World Scientific, 2011, pp. 101-110.
- 6- C.Y. Li, A. Ruoff, C. Spencer, Journal of Applied Physics, 32 (1961) 1733-1735.
- 7- K. Sharma, A. Kumar, N. Goyal, M. Lal, AIP Conference Proceedings, AIP, 2013, pp. 603-604.
- 8- H.E. Katz, T.O. Poehler, Innovative thermoelectric materials: polymer, nanostructure and composite thermoelectrics, World Scientific, 2016.
- 9- M.B. Heaney, The measurement, instrumentation and sensors handbook, (2000) 1332-1345.
- 10- C. Kittel, P. McEuen, P. McEuen, Introduction to solid state physics, Wiley New York, 1996.
- 11- H. Meyers, H. Myers, Introductory solid state physics, CRC press, 1997.
- 12- J.K. Shultis, R.E. Faw, Fundamentals of Nuclear Science and Engineering Third Edition, CRC press, 2016.
- 13- D.M. Rowe, Conversion Efficiency and Figure-of-Merit, CRC Handbook of Thermoelectrics, CRC press, 1995, pp. 31-37.
- 14- L. Calvert, Ottawa Canada, ICDD Grant-in-Aid, (1981).
- 15- X. Chen, F. Li, Y. Dong, B. Liang, L. Wang, L. Chen, W. Jiang, Journal of the American Ceramic Society, 95 (2012) 2096-2099.
- 16- M. Zakeri, M. Allahkarami, G. Kavei, A. Khanmohammadian, M. Rahimpour, journal of materials processing technology, 209 (2009) 96-101.
- 17- R. Urkude, P. Patil, S. Kondawar, U. Palikundwar, Procedia Materials Science, 10 (2015) 205-211.

7<sup>Th</sup>  
INTERNATIONAL CONFERENCE  
on MATERIALS ENGINEERING  
and METALLURGY

TEHRAN - IRAN  
OCTOBER 9-10, 2018

iMat 2018



تهران - ایران  
۱۸ و ۱۷ مهرماه ۱۳۹۷

هفتمین کنفرانس بین المللی  
مهندسی مواد و متالورژی

و دوازدهمین کنفرانس مشترک

انجمن مهندسی متالورژی و مواد ایران و انجمن علمی ریخته‌گری ایران

18- K. Yin, Z. Cui, X. Zheng, X. Yang, S. Zhu, Z. Li, Y. Liang, Journal of Materials Chemistry A, 3 (2015) 22770-22780.

19- H.R. Williams, R.M. Ambrosi, K. Chen, U. Friedman, H. Ning, M. Reece, M. Robbins, K. Simpson, K. Stephenson, Journal of Alloys and Compounds, 626 (2015) 368-374.