

برداشت انرژی گرمایی از محیط اطراف

روح‌اله حسینی^۱، سید سجاد حسینی مقدم^۲

۱ دانش‌آموخته دکتری مهندسی مکانیک، باشگاه پژوهشگران جوان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، r.hosseini.mech@gmail.com

۲ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۲۳

چکیده

در بسیاری از وسایل و ابزارها نمی‌توان از باتری استفاده کرد. در این‌گونه از وسایل باید از سیستم‌هایی استفاده نمود که بتوانند توان مورد نیاز خود را تأمین کنند. معمولاً سیستم‌های برداشت‌کننده انرژی بر مبنای ارتعاشات مکانیکی محیط اطراف، انرژی خورشیدی، امواج رادیویی و انرژی گرمایی کار می‌کنند. یکی از روش‌های رایج تأمین انرژی، استحصال انرژی از اختلاف دمای محیط اطراف است که با حذف باتری، دوام و طول عمر بیشتر و هزینه تمام‌شده کمتری برای منبع انرژی ایجاد می‌نماید. مهارکننده‌های انرژی گرمایی، بر مبنای اختلاف دمای دو سطح کار می‌کنند و موجب تولید انرژی الکتریکی می‌گردند. در این مقاله اصول کارکرد، مزایا و معایب این نوع برداشت‌کننده‌ها به اختصار تشریح و از جهت میزان کارایی و نحوه ساخت بررسی می‌شوند. این قطعات هم‌اکنون توجه بسیاری از محققان و پژوهشگران را به خود معطوف کرده‌اند و پیش‌بینی می‌شود در آینده‌ای نزدیک، بتوانند سهم عمده‌ای از بازار را به خود اختصاص دهند.

واژگان کلیدی: مهار انرژی گرمایی، ترموالکتریک، اثر سبیک، اختلاف دما، میکروماشینکاری

۱. مقدمه

است. در بسیاری از سیستم‌ها، با چنین مواردی برخورد می‌شود و باید سیستم بتواند برق مورد نیاز خود را به طریقی تأمین نماید. راه‌های مختلفی برای تأمین این انرژی وجود دارد که از آن دست می‌توان به مهار انرژی گرمایی، مهار انرژی مکانیکی ناشی از ارتعاشات محیط و مهار انرژی نورانی اشاره کرد. به این قبیل سیستم‌ها که می‌توانند انرژی‌های در دسترس را مهار و به انرژی الکتریکی مبدل نمایند، مهارکننده یا برداشت‌کننده انرژی می‌گویند. استفاده از سلول‌های خورشیدی یکی از روش‌های رایج برداشت انرژی تجدیدپذیر از محیط است و کاربرد فراوانی دارد، اما استفاده از آن در همه جا امکان‌پذیر نیست و ممکن

در بسیاری از وسایل و ابزارها نمی‌توان از باتری استفاده کرد؛ زیرا باتری‌ها پس از مدتی باید تعویض یا شارژ شوند و این کار مستلزم هزینه و زمان است. در بسیاری از موارد هم عملاً دسترسی لازم وجود ندارد، نظیر حسگرها و عملگرهای یک فضاپیما که به فضا پرتاب شده است. در برخی موارد همچون باتری قلب یک بیمار قلبی نمی‌توان مدام باتری را شارژ کرد و تعویض آن نیز دردسرساز است. در برخی موارد نظیر حسگرهای مورد استفاده در آگروز [۱] و تایر [۲] یک خودرو به دلیل دمای بالا و وجود اجزای متحرک، امکان سیم‌کشی برای برق‌رسانی به آن منطقه وجود ندارد و از طرفی استفاده از باتری هزینه‌بر

به طوری که در این رابطه α_1 و α_2 مقادیر وابسته به جنس ماده‌اند و به ضرایب سیبک معروفند. معمولاً نیمه‌رساناها به دلیل ضرایب سیبک بزرگ به‌عنوان پایه مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین، علامت ضرایب سیبک برای نیمه‌رساناهای نوع p و n مثبت می‌باشد؛ به طوری که اگر از دو پایه با قطب‌های معکوس در کنار هم استفاده شود، ولتاژ برآیند جمع می‌شود. عنصر اصلی در مهارکننده‌های انرژی گرمایی ترموپیل است. ترموپیل وسیله‌ای مشتمل بر تعداد زیادی ترموکوپل است که بین دو صفحه سرد و گرم قرار گرفته و از نظر حرارتی به صورت موازی و از نظر الکتریکی به صورت سری می‌باشد (شکل ۲). علاوه بر ترموپیل، مهارکننده انرژی ممکن است شامل: رادیاتور جهت کارآمد کردن اتلاف حرارت در محیط و سازه‌های مخصوص جهت هدایت گرمای عبوری بین ورق‌های سرد و گرم به پایه‌های ترموکوپل باشد [۱۰]. پیل ترموالکتریک و المان‌هایی که تشریح شد، در یک مدار گرمایی ساده قرار داده شده‌اند که نمای شماتیک آن در شکل ۳ نمایش داده شده است. فرض می‌شود مولد گرما در بدن انسان باشد. دمای منبع با دمای درونی بدن برابر است (مثلاً ۳۷ درجه سانتی‌گراد) و دمای چاه برابر با دمای محیط است. مقاومت گرمایی منبع همان مقاومت بدن خواهد بود و مقاومت گرمایی چاه بیانگر عوامل محدودکننده تبادل گرما بین ترموپیل و هوا است.

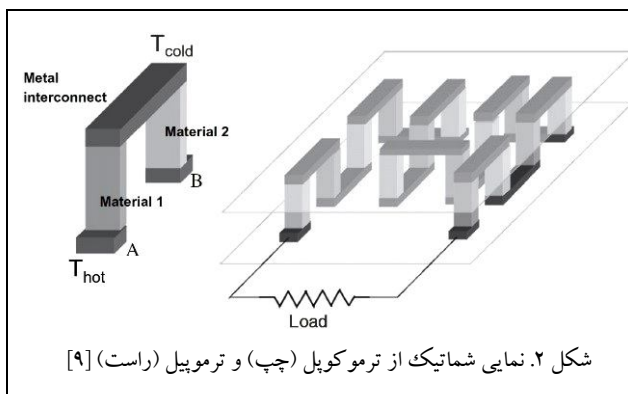
است در جایی مثل آگزوز یک خودرو، به انرژی نورانی دسترسی نباشد (شکل ۱). یکی از روش‌های نو در این زمینه، مهار انرژی گرمایی ناشی از اختلاف دمای وسایل گرم و معمولاً محیط اطراف است که به تازگی توجه محققان را نیز به خود جلب کرده است [۳-۷]. همچنین در بین روش‌های مختلف و رایج مهار انرژی، مهار انرژی حرارتی معمولاً بیشترین مقدار قابلیت مهار انرژی و تبدیل به الکتریسیته بر واحد حجم و سطح را داراست [۸]. در این مقاله روش‌های مهار انرژی حرارتی، به اختصار تشریح و اساس کارکرد و مزایا و معایب هر یک بررسی می‌شود.

۲. مهار انرژی گرمایی

مهارکننده‌های انرژی گرمایی بر مبنای اثر سیبک کار می‌کنند. وقتی دو فلز در یک اتصال از دو رسانای غیرمشابه ساخته شده باشند و آنها را در دو دمای متفاوت نگهداری کنند، اختلاف پتانسیل الکتریکی مدار باز بین آنها ایجاد می‌شود. شکل ۲ نمای شماتیک ترموکوپل در حالت ساده تولید اختلاف پتانسیل الکتریکی تحت تأثیر اثر سیبک را نشان می‌دهد.

وقتی اختلاف دمای ΔT بین بالا و پایین پایه‌ها ایجاد شود، اختلاف پتانسیل الکتریکی بین نقاط A و B به وجود می‌آید. این اختلاف پتانسیل الکتریکی به صورت رابطه ۱ است:

$$V = \alpha_1 \Delta T - \alpha_2 \Delta T \quad (1)$$



شکل ۱. مهار انرژی حرارتی در آگزوز خودروهای نسل جدید

بهینه‌سازی فرض می‌شود جریان گرمایی درون ترموپیل ثابت است. این تقریب، چنانچه مقاومت گرمایی چاه و منبع بسیار بزرگ باشد، تقریباً برای انجام محاسبات ساده قابل قبول می‌باشد و دید خوبی از مسئله می‌دهد. مراجع [۴]، [۱۱] و [۱۲] اطلاعات خوبی در مورد بهینه‌سازی این سیستم‌ها در اختیار قرار

به‌منظور بهینه‌سازی مولد گرمایی باید تمامی اجزا به‌طور صحیح طراحی شوند. مثلاً برای طراحی ترموپیل مناسب باید ابعاد و تعداد پایه‌ها به‌طور صحیح محاسبه شوند. در فرایند بهینه‌سازی، مقاومت ترموپیل‌ها تغییر می‌یابد و با انجام این اقدامات می‌توان چاه و منبع را اصلاح کرد. معمولاً جهت

$$Z = \frac{a^2}{r g_{te}} \quad (6)$$

باید توجه داشت که Z به خواص مواد ترموالکتریک وابسته است و بیشتر اوقات بدون بعد گزارش می‌شود. توان به صورت مستقیم با فاصله بین صفحات متناسب است که در طراحی پیل گرماسنج باید حداکثر در نظر گرفته شود. همچنین ولتاژ خروجی به ضریب h/a^2 بستگی دارد. مطلوب است که درجه ولتاژ خروجی از مرتبه یک باشد تا از بالا رفتن ولتاژ، پیچیده شدن مدار و مصرف توان اضافی جلوگیری شود. بنابراین بلند و باریک شدن پایه‌ها باید در طراحی مدنظر گرفته شود. نسبت h/a توسط فناوری محدود می‌شود. با افزایش h می‌توان توان را بهینه کرد و در نتیجه h/a^2 و ولتاژ کاهش می‌یابند. در نتیجه فضای زیادی جهت بهینه‌کردن توان و ولتاژ وجود ندارد [۹].

بیشترین ماده‌ای که برای ساخت مولدهای ترموالکتریک مورد استفاده در دمای اتاق استفاده می‌شود تلورید بیسموت^۱ است که عموماً برای تولید گرما در میکروماشین‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سراسر جهان تحقیقات روی نانوساختارها و ابرساختارها جهت بهینه‌کردن خواص ترموپیل‌ها در حال انجام است و مواد جدید ممکن است جایگزین تلورید بیسموت شوند [۱۳-۱۴]. علاوه بر پیشرفت در زمینه بهبود خواص مواد، تلاش‌های زیادی در جهت کوچک‌سازی ترموپیل‌ها از طریق میکروماشینکاری صورت گرفته است.

اولین کاربرد تولید برق از طریق مهارکننده‌های انرژی گرمایی در صنعت ساعت می‌باشد. در سال ۱۹۷۸ م، بولووا^۲، یک ساعت مچی که با یک مولد برق ترموالکتریک کوچک کار می‌کند را پیشنهاد داد. حدود ده سال بعد شرکت سیکو از ساعتی مشابه رونمایی کرد. در این ساعت از ده ترموپیل ساخته شده توسط فرایند EDM حاصل از رسوب‌نشینی BiTe استفاده شده بود [۱۳]. ولتاژ خروجی حدود ۳۰۰ میلی‌ولت بود و به‌منظور برآوردن نیاز به ۱/۵ ولت تبدیل شد. ترموپیل‌هایی با اشغال فضای در حدود چند سانتی‌متر مربع در بدن انسان تست شده‌اند. اختلاف پتانسیل الکتریکی خروجی کمتر از ۱ میلی‌ولت و توان خروجی نیم نانووات اندازه‌گیری شده است. استارک^۳ و همکاران (۱۹۹۹) ترموپیل‌ها را روی ورق‌های انعطاف‌پذیر توسعه دادند [۱۵]. در این طراحی یک لایه نازک تلورید بیسموت روی نوعی پلاستیک سبک و محکم با عایق حرارتی لایه‌نشانی شد. این

می‌دهند. اگر مقدار معینی جریان گرمایی W در میان ترموپیل جریان داشته باشد، اختلاف دما به صورت $DT = W/G$ می‌باشد که $G = 1/R$ ضریب رسانایی کل می‌باشد. می‌توان نشان داد برای به حداکثر رساندن توان باید ضریب گرمایی پایه‌ها و هوا برابر در نظر گرفته شوند [۹]. در نتیجه در شرایط حداکثر توان، اختلاف دما را می‌توان به صورت $DT = W/2G_{air}$ بیان کرد که در آن G_{air} ضریب رسانایی هوا بین صفحه‌ها می‌باشد و به صورت $G_{air} = g_{air}A/h$ به دست می‌آید. همچنین g_{air} ضریب رسانایی هوا، A مساحت سطح و h فاصله بین صفحات است. به‌منظور دقت بیشتر در محاسبه ضریب رسانایی هوا باید مساحت پایه‌ها را از صفحه کم کرد. در حقیقت ضریب هدایت گرمایی ماده ترموالکتریک بسیار بزرگتر از هوا و مساحت پایه‌ها بسیار کوچکتر از مساحت صفحه است. باید توجه داشت که از مساحت پایه‌ها صرف‌نظر شده است و DT نه به پارامترهای ضریب هدایت گرمایی بستگی دارد و نه به تعداد ترموکوپل‌ها. برای به بعد جانبی a و ارتفاع h پایه‌ها، تعداد ترموکوپل n (هر کدام متشکل از دو ستون) لازم برای به دست آوردن حداکثر توان لازم برابر است با:

$$G_{air} = 2ng_{te} \frac{a^2}{h} \quad (2)$$

$$n = \frac{G_{air} h}{2a^2 g_{te}}$$

به طوری که g_{te} ضریب هدایت گرمایی مواد ترموالکتریک است که با هدف سادگی برای هر دو نوع از پایه‌ها یکسان فرض شده است. خروجی اختلاف پتانسیل الکتریکی برابر است با:

$$\Delta V = n\alpha\Delta T \quad (3)$$

مقاومت الکتریکی ترموپیل R_{el} با مقاومت ویژه R (که این هم برای سادگی برای دو نوع پایه یکسان در نظر گرفته شده) و تعداد ترموکوپل‌ها متناسب می‌باشد. بنابراین:

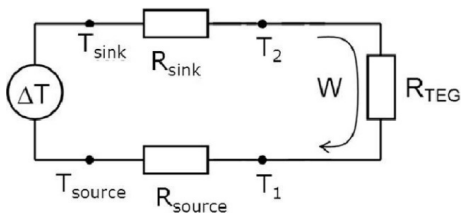
$$R_{el} = n \frac{2rh}{a^2} \quad (4)$$

توان خروجی در یک بار مشابه، به صورت V^2/aR_{el} محاسبه شده، که به صورت رابطه ۵ به دست خواهد آمد:

$$P = \frac{\alpha^2 W_u^2 A h}{64 \rho g_{te} g_{air}} \quad (5)$$

به طوری که در رابطه ۵، W_u جریان گرمایی در واحد سطح می‌باشد. توان با ضریب Z متناسب است که به صورت رابطه ۶ تعریف می‌شود:

پتانسیل الکتریکی و توان یکسانی را تولید می‌کنند، اما در مقاومت حرارتی متفاوت توان متفاوتی را تولید می‌کنند که در شکل ۳ نمایش داده شده است. افت دمای مؤثر برای مهارکننده‌های انرژی گرمایی با مقاومت حرارتی بالاتر بیشتر است و سبب عملکرد بهتر می‌شود. باید دقت کرد که در طراحی مهارکننده انرژی حرارتی، مقاومت حرارتی منبع و مهارکننده یکسان باشد [۱۰-۱۱].



شکل ۳. مدار حرارتی منبع، چاه و مولد انرژی الکتریکی

مطالب و اطلاعات مربوط به طراحی مهارکننده‌های انرژی گرمایی بر مبنای ترموپیل‌های میکروماشینکاری شده بسیار کمیاب است. در سایت شرکت میکروپلت [۱۹] نتایج تست‌های مهارکننده‌های حرارتی گزارش شده است. یک سر مولد روی صفحه داغ با مقاومت حرارتی بسیار کم گذاشته شده و قسمت دیگر با هوا در تماس است. مقاومت حرارتی مؤثر هوا با استفاده از نوعی خاص از پره رادیاتور کاهش می‌یابد. توان تولیدشده با توجه به اینکه جریان حرکت هوا به صورت طبیعی یا اجباری باشد متفاوت است. جریان همرفت اجباری مقاومت حرارتی مؤثر چاه سرد را تغییر می‌دهد و در نتیجه سبب تغییر بازده تولید توان مهارکننده می‌گردد. به منظور مقابله با آثار مقاومت حرارتی بالای منبع گرم، مهارکننده‌های گرمایی میکروماشینکاری شده جدید با هدف افزایش عایق‌بندی حرارتی در حال پیشرفت هستند [۲۰]. همچنین این طرح اجازه می‌دهد تا بهینه‌سازی مستقل توان خروجی و اختلاف پتانسیل الکتریکی صورت گیرد. در شکل ۴ نمونه‌ای شماتیک از این طرح مشاهده می‌شود.

۳. مزایا و محدودیت‌ها

استفاده از برداشت‌کننده‌های انرژی گرمایی مزایای بسیار زیادی ایجاد می‌کند که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. کارکرد مداوم و یکنواخت تا سال‌ها (بیش از ۱۰۰۰۰۰ ساعت کاری)

طراحی مسطح دارای این مزیت است که ارتفاع آن می‌تواند بزرگ باشد (در حدود چند میلی‌متر) و پهنای آن می‌تواند کوچک باشد (در حدود چند ده میکرون). بنابراین دارای نسبت طول به عرض بزرگ می‌باشد. اشکالات این طراحی وجود پارازیت در مقاومت گرمایی به علت استفاده از نوعی پلاستیک خاص به نام کپتون^۴ و سختی برقراری اتصال مکانیکی سرد و گرم در نقاط اتصال آنها به ورقه فلزی می‌باشد. این دستگاه هم‌اکنون توسط شرکت ترمولایف^۵ تجاری شده است. این وسیله یک مولد دکمه‌مانند است که دارای سطح ۳ سانتی‌متر مربع و ارتفاع ۳ میلی‌متر می‌باشد. توان تولیدی در اختلاف پتانسیل ۲/۹ ولت و اختلاف دمای ۵ کلوین حدود ۱۲۰ میکرووات است. مؤسسه فرانهافر^۶ برخی ترموپیل‌ها را براساس لایه‌نشانی توسط کاتدپرانی تلورید بیسموت و سپس حکاکی خشک ساخته است [۱۶]. پایه‌های پیل‌های حرارتی عموماً به صورت افقی و در ابعاد ۳۰ تا ۴۰ میکرومتر و ارتفاع ۱۰ تا ۲۰ میکرومتر ساخته می‌شوند. شرکت میکروپلت^۷ مولدهای ترموالکتریک را با استفاده از این فناوری تجاری کرده است. مولدهای ترموالکتریک این شرکت با ابعاد ۲/۵ در ۳/۵ میلی‌متر مربع، توانی در حدود ۱ میلی‌وات در اختلاف پتانسیل الکتریکی ۰/۵ ولت و اختلاف دمای ۱۰ کلوین تولید می‌کنند [۱۷]. هم‌اکنون مهارکننده‌های انرژی حرارتی با استفاده از مواد پیشرفته و ایجاد ابرشبکه‌ای از *BiTe/SbTe* توسط شرکت نکستر^۸ ساخته و تجاری‌سازی شده‌اند. یکی از این دستگاه‌ها با ابعاد ۱/۶ در ۳/۲ میلی‌متر مربع، ۹۰ میلی‌وات توان در اختلاف دمای ۷۰ کلوین ایجاد می‌کند. همان دستگاه با ایجاد اختلاف دمای ۵ کلوین می‌تواند ۴۵۰ میکرووات توان تولید کند. برخی مهارکننده‌های انرژی براساس رسوب لایه نازکی از Si یا SiGe توسط LPCVD عرضه می‌شوند که در آنها اندازه ترموکوپل‌ها بسیار کم و تعداد آنها زیاد می‌باشد [۱۳، ۱۸]. همه پیل‌های حرارتی ذکرشده، با اعمال اختلاف دمای ثابت تست و بررسی شده‌اند. در واقعیت این روش اجازه نمی‌دهد که مهارکننده‌های انرژی گرمایی مناسب برای استفاده انتخاب شود. دلیل این موضوع با تحلیل شکل ۳ مشخص می‌شود. واضح است که در کاربردهای عملی، افت درجه حرارت این نوع مولدها، تنها به اختلاف دمای موجود بستگی ندارد، بلکه به مقاومت حرارتی منبع و چاه گرمایی نیز بستگی دارد. دو پیل حرارتی برای اختلاف دمای معین اختلاف

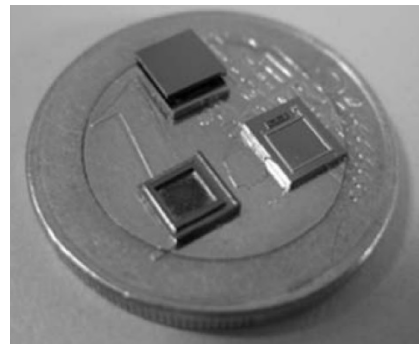
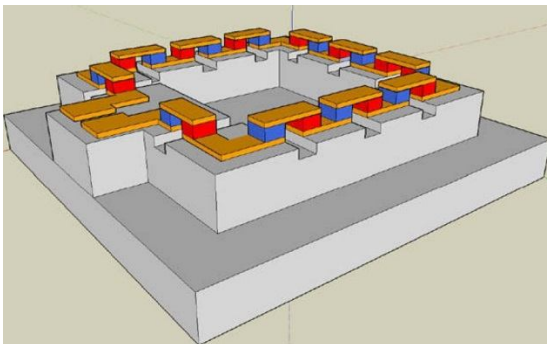
سیم‌کشی برای انتقال برق به سیستم‌های مختلف به‌دلیل گرمای بیش از حد یا متحرک‌بودن و داشتن شرایط خاص، استفاده از مهارکننده‌های انرژی که بتوانند با مهار انرژی‌های محیط و تبدیل آن به الکتریسیته، برق سیستم را تأمین نمایند، توجه پژوهشگران را به‌خود جلب کرده است. از بین مهارکننده‌های انرژی مختلف، سرمایه‌گذاری بسیاری روی مهارکننده‌های انرژی گرمایی، که بتوانند اختلاف دمای موجود در بخش‌های مختلف محیط را به الکتریسیته تبدیل نمایند، انجام شده است. این وسایل می‌توانند برق مورد نیاز حسگرها و میکروعملگرها را تأمین کنند. در این مقاله عملکرد مهارکننده‌های گرمایی بررسی شد و از جنبه‌های میزان کارایی و نحوه ساخت مورد مقایسه قرار گرفتند.

۲. عدم نیازی به جایگزینی مواد موجود در ترموالکترونیک‌ها
 ۳. جای بخش‌های گرم و سرد دستگاه می‌تواند معکوس گردد

اما در کنار این مزایا، متأسفانه بازدهی کارکردی آنها پایین است (معمولاً کمتر از ۱۰ درصد). ساخت موادی که در اختلاف دماهای بالاتر قابل استفاده بوده و رسانای خوب الکتریسیته و نه گرما باشند، منجر به بالا رفتن بازدهی این نوع مهارکننده انرژی می‌گردد.

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به عدم امکان استفاده از باتری‌ها در وسایل مختلف به‌دلیل عدم دسترسی یا هزینه بالا و همچنین عدم امکان



شکل ۴. مثالی از مهارکننده انرژی گرمایی [۲۱]

۵. ماخذ

- [1] X. Liu, C. Li, Y. D. Deng, C. Q. Su, An energy-harvesting system using thermoelectric power generation for automotive application, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 67 pp. 510-516, 2015.
- [2] C. R. Bowen, M. H. Arafa, Energy harvesting technologies for tire pressure monitoring systems, *Advanced Energy Materials*, Vol. 5, No. 7, 2015.
- [3] Xiao Yu, Yanxiang Liu, Hong Zhou, Yi Wang, Tie Li, Xiuli Gao, Fei Feng, Yuelin Wang, Thermal matching designed CMOS mems-based thermoelectric generator for naturally cooling condition, *2013 Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP)*, IEEE, pp. 1-4. 2013.
- [4] S. Lineykin, I. Ruchaevsky, A. Kuperman, Analysis and optimization of TEG-heatsink waste energy harvesting system for low temperature gradients, *16th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'14-ECCE Europe)*, pp. 1-10, 2014.
- [5] L. Tayebi, Z. Zamanipour, D. Vashaei, Design optimization of micro-fabricated thermoelectric devices for solar power generation, *Renewable Energy*, Vol. 69, pp. 166-173, 2014.
- [6] M. S. Romano, J. M. Razal, D. Antiohos, G. Wallace, J. Chen, Nano-Carbon Electrodes for Thermal Energy Harvesting, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 15, pp. 1-14, 2015.

- [7] X. Yu, D. Xu, Y. Liu, H. Zhou, Y. Wang, X. Gao, et al., Significant performance improvement for micro-thermoelectric energy generator based on system analysis, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 67, pp. 417-422, 2015.
- [8] Z. Wan, Y. Tan, C. Yuen, Review on energy harvesting and energy management for sustainable wireless sensor networks, *13th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, IEEE, pp. 362-367, 2011.
- [9] R. J. M. Vullers, Rob van Schaijk, Inge Doms, Chris Van Hoof, R. Mertens, Micropower energy harvesting, *Solid-State Electronics*, Vol. 53, No. 7, pp. 684-693, 2009.
- [10] F. P. Leonov, Thermal matching of a thermoelectric energy harvester with the ambient, in *5th European conf on thermoelectrics*, pp. 129-33, 2007.
- [11] V. Leonov, T. Torfs, P. Fiorini, C. Van Hoof, Thermoelectric converters of human warmth for self-powered wireless sensor nodes, *Sensors Journal*, IEEE, Vol. 7, pp. 650-657, 2007.
- [12] M. Gomez, R. Reid, B. Ohara, H. Lee, Influence of electrical current variance and thermal resistances on optimum working conditions and geometry for thermoelectric energy harvesting, *Journal of Applied Physics*, Vol. 113, No. 17, p. 174908, 2013.
- [13] M. Strasser, R. Aigner, C. Lauterbach, T. F. Sturm, M. Franosch, G. Wachutka, Micromachined CMOS thermoelectric generators as on-chip power supply, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 114, No. 2, pp. 362-370, 2004.
- [14] V. Leonov, P. Fiorini, S. Sedky, T. Torfs, C. Van Hoof, Thermoelectric MEMS generators as a power supply for a body area network, In *The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2005. Digest of Technical Papers. TRANSDUCERS'05.*, Vol. 1, pp. 291-294, 2005.
- [15] I. Stark, M. Stordeur, New micro thermoelectric devices based on bismuth telluride-type thin solid films, *Eighteenth International Conference on Thermoelectrics*, pp. 465-472, 1999.
- [16] H. Bottner, J. Nurnus, A. Gavrikov, G. Kuhner, M. Jagle, C. Kunzel, D. Eberhard, G. Plescher, A. Schubert, K-H. Schlereth, New thermoelectric components using microsystem technologies, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 13, No. 3, pp. 414-420, 2004.
- [17] MPG-D751-Micropelt, Accessed on 8 September 2016, <http://www.micropelt.com>.
- [18] Z. Wang, V. Leonov, P. Fiorini, C. Van Hoof, Realization of a poly-SiGe based micromachined thermopile, *Proceedings of Eurosensors XXII*, pp. 1420-1423, 2008.
- [19] Thermal Energy Harvesting through Waste Heat Recovery, Accessed on 8 September 2016, <http://www.micropelt.com>.
- [20] E. Hourdakis, A. G. Nassiopoulou, A thermoelectric generator using porous Si thermal isolation, *Sensors*, Vol. 13, No. 10, pp. 13596-13608, 2013.
- [21] Z. Wang, V. Leonov, P. Fiorini, C. Van Hoof, Micromachined thermopiles for energy scavenging on human body, In *TRANSDUCERS 2007-2007 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, pp. 911-914, 2007.

پی‌نوشت

-
1. Bismuth telluride (Bi₂Te₃)
 2. Bulova
 3. Stark
 4. Kapton
 5. ThermoLife
 6. Fraunhofer
 7. Micropelt
 8. Nextreme