

ISME2015-10118312305

طراحی یک سیستم ترکیبی برداشت انرژی بدن با استفاده از ریز فناوری

سپیده طالب^۱، فرشاد برازنده^۲، فرزانه عبداللهی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق- مکترونیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، s.taleb@aut.ac.ir

^۲ استادیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، fbarazandeh@aut.ac.ir

^۳ استادیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، f_abdollahi@aut.ac.ir

چکیده

هدف از انجام این پروژه طراحی یک مولد انرژی یا برداشت‌کننده^۱ الکتریکی با استفاده از ریز فناوری^۲ می‌باشد که در آن برداشت انرژی از دو طریق اختلاف دمای بدن با محیط و حرکت بدن صورت می‌گیرد. اگرچه تا به امروز کارهای زیادی در هر یک از این زمینه‌ها انجام شده است اما ترکیب این دو ساختار و تولید انرژی از بدن به دو روش ترموالکتریک و مکانیکی- الکترومغناطیسی به صورت همزمان ایده ایست نو که در این مقاله به آن پرداخته می‌شود. باتوجه به پایین بودن فرکانس ارتعاشات بدن از روش افزایش فرکانس^۳ در برداشت‌کننده الکترومغناطیسی استفاده می‌گردد و در نهایت ولتاژ و توان 0.289mv و 35nw از این طریق تولید می‌شود. برداشت‌کننده ترموالکتریک دیگری به منظور کارکرد بهینه به صورت عمودی در دیواره برداشت‌کننده قبلی جای می‌گیرد تا با به‌کارگیری پایه‌های از جنس Bi,Te,Sb ولتاژ و توان $1/59\text{v}$ و 63uw علاوه بر توان برداشت‌کننده اول، تولید نماید. شبیه‌سازی و بهینه‌سازی این دو برداشت‌کننده توسط نرم‌افزار COMSOL و MATLAB صورت گرفته است. ابعاد برداشت‌کننده برابر با $25 \times 25 \times 4/5\text{mm}^3$ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی

برداشت انرژی، ترموالکتریک، الکترومغناطیسی، ریز فناوری

مقدمه

در دهه‌های اخیر برداشت انرژی از تغییرات کوچک محیط اطراف انسان به موضوعی جذاب برای دانشمندان و محققان تبدیل شده است. از جمله انرژی‌های قابل برداشت از بدن انسان می‌توان به لرزش مکانیکی و گرمای آن اشاره کرد. اولین برداشت‌کننده الکترومغناطیسی با سیم‌پیچ‌های ثابت و آهنربای قرارگرفته روی یک صفحه‌ی متحرک توسط Williams et al [۱] طراحی شد که با اعمال فرکانس 70Hz انرژی 1uw را تولید می‌نمود. در مقاله [۲] یک برداشت‌کننده الکترومغناطیسی برای برداشت انرژی از ارتعاشات فرکانس پایین بدن، ساخته شده است که از روش افزایش فرکانس

بهره‌برده است. این برداشت‌کننده از دو ساختار مکانیکی تشکیل شده است: یک دیافراگم با فرکانس طبیعی کم با آهنربای متصل به آن و دیافراگمی با فرکانس طبیعی بالا در زیر دیافراگم اول با سیم‌پیچ‌هایی روی آن. این مجموعه به ازای فرکانس ورودی 10Hz و دامنه $1/5\text{mm}$ ، $1/2\text{nw}$ و $6/94\text{mv}$ انرژی تولید می‌کند.

اولین دستاورد در زمینه ترموالکتریک، ساعت مچی ساخت شرکت سیکو در سال ۱۹۹۸ [۳] می‌باشد که از تکنولوژی ساخت بالایی برخوردار بود و با استفاده از 1040 جفت ترموالکتریک که به‌صورت عمودی با ارتفاع 80um در زیر ساعت جای گرفته‌اند، توان موردنیاز ساعت (24uw) را فراهم نموده است.

همچنین در مقاله [۴] از صد ترموکوپل Sb_2Te_3 و Bi_2Te_3 (با خواص ترموالکتریکی عالی) در دمای محیط و kapton-HN به‌عنوان زیرلایه منعطف با خواص گرمایی مناسب استفاده شده است.

این برداشت‌کننده ولتاژ و توان 430mv - 32nw را در گرادیان دمای 40 درجه تولید می‌نماید. علاوه بر این در مقاله [۵] برداشت‌کننده‌ای از این نوع برای قرارگیری در بافت لباس طراحی شده است که توان تولیدی آن برابر با $10\text{uw}/\text{cm}^2$ می‌باشد.

هدف از ترکیب این دو برداشت‌کننده، تولید توان بیشتر و نیز دائمی می‌باشد. چرا که برداشت‌کننده ترموالکتریک با افزایش دمای هوا از کار می‌افتد. همچنین ارتعاشات بدن انسان در حالت سکون بسیار اندک است. بنابراین در صورت استفاده از دو نوع برداشت‌کننده احتمال تولید توان در هر لحظه بیشتر می‌شود. در تحقیق حاضر با الهام از مدل برداشت‌کننده الکترومغناطیسی مقاله [۲] و برداشت‌کننده ترموالکتریک مقاله [۵] برداشت‌کننده ترکیبی طراحی می‌شود که به‌صورت هم‌زمان از حرکات و گرمای بدن انرژی تولید می‌کند. علت انتخاب این دو برداشت‌کننده، حجم و جرم کمتر نسبت به سایرین و عملکرد مناسب آنها بدون ایجاد مزاحمت در کارهای روزمره فرد می‌باشد. در بخش‌های بعد به ترتیب اصول عملکرد، طرح موردنظر، شبیه‌سازی و مقایسه نتایج حاصل از آن با سایر کارهای انجام شده تاکنون ارائه خواهد شد.

اصول عملکرد و مدل‌سازی ریاضی مجموعه

شمای کلی برداشت‌کننده ترکیبی موردنظر در شکل ۱ مشاهده می‌شود. در این ساختار، یک دیافراگم فرکانس بالا در زیر قرار

^۱ energy harvester

^۲ MEMS

^۳ Frequency up conversion method

بیشینه توان خروجی ترموالکتریک نیز از رابطه (۲) و تحت شرایطی که بار خارجی و مقاومت داخلی باهم برابر باشند، بدست می‌آید [۴].

$$P_0 = VI = \frac{\Delta V^2}{4R_G} = \frac{n^2 \alpha^2}{4R_G} \Delta T_G^2 \quad (2)$$

که در رابطه (۲)، R_G مقاومت الکتریکی پایه‌ها (جفت پایه ترموالکتریک در شکل ۱) می‌باشد.

به منظور مقایسه‌ی عملکرد برداشت‌کننده‌های مختلف، متغیر بازده^۴ تعریف می‌گردد که از رابطه (۳) با یکای $[w/m^2k^2]$ به دست می‌آید [۶].

$$\phi = \frac{P_0}{A_G \Delta T^2} \quad (3)$$

در این رابطه ΔT اختلاف دمای بین منبع سرد و گرم و A_G سطح مقطع برداشت‌کننده ترموالکتریک می‌باشد.

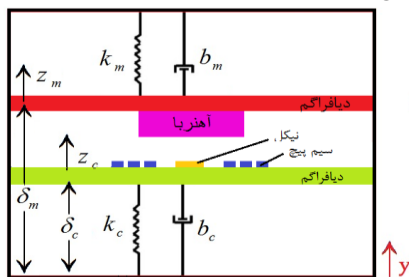
عملکرد برداشت‌کننده مکانیکی-الکترومغناطیسی: یک برداشت‌کننده مکانیکی معمولاً با جرم و فنر مدل می‌شود که درون محفظه‌ای قرار گرفته‌است. ارتعاش خارجی به محفظه اعمال می‌شود و در نتیجه سیستم جرم-فنر-دمپر را به حرکت وامی‌دارد. مبدل‌های الکترومغناطیس از آهنربای دائم و سیم‌پیچ تشکیل شده‌اند و بر مبنای قانون القای الکترومغناطیس فارادی عمل می‌کنند. در این نوع مبدل، در اثر حرکت نسبی آهنربا نسبت به سیم‌پیچ در ساختار شکل ۲، تغییر شار درون سطح دربرگیرنده‌ی سیم‌پیچ ایجاد می‌شود که طبق

رابطه (۴) منجر به تولید ولتاژ متناوب درون سیم‌پیچ می‌گردد [۷].

$$v = -N \frac{d\phi}{dt} = -N \frac{d(A \cdot B)}{dt} \quad (4)$$

در حرکات با فرکانس‌های پایین همچون بدن انسان به منظور جلوگیری از کاهش توان، جابجایی باید افزایش یابد. ولی ابعاد سیستم، جابجایی را محدود می‌کند. که برای حل این مشکل از روش افزایش فرکانس استفاده می‌گردد.

مدل این نوع برداشت‌کننده به صورت شکل ۲ است.



شکل ۲: مدل برداشت‌کننده الکترومغناطیس با افزایش فرکانس

دیفراگم بالایی دارای معادله‌ای به شکل رابطه (۵) است [۷]:

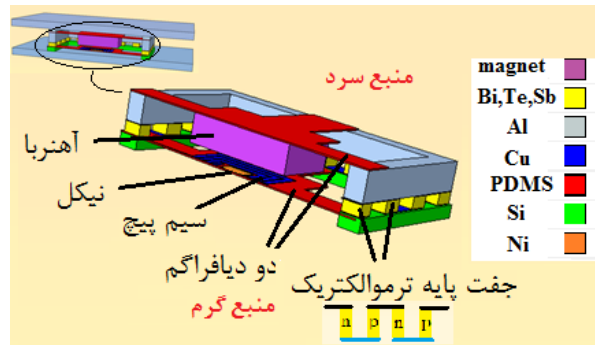
$$m_m \ddot{z}_m + b_m \dot{z}_m + k_m (z_m - \delta_m) = -m_m \ddot{y} - F \quad (5)$$

در این معادله y نشان‌گر میزان جابجایی ناشی از حرکت خارجی و F نیروی آهنربا است.

گرفته‌است و بر روی آن سیم‌پیچ‌ها و یک قطعه نیکل به منظور جذب آهنربا واقع شده‌است. در بالای این دیافراگم فرکانس بالا، دیافراگم دیگری وجود دارد که آهنربا در مرکز آن قرار می‌گیرد و همراه با حرکات بدن، نوسان می‌نماید. این نوسان موجب تغییر فاصله آهنربا تا نیکل گشته و در لحظاتی که فاصله کاهش می‌یابد، آهنربا دیافراگم زیرین را به سمت بالا جذب می‌کند و سپس این دیافراگم در اثر جدا شدن از آهنربا با فرکانس بالایی نوسان می‌کند.

بدین ترتیب حرکت فرکانس پایین دیافراگم بالایی به حرکتی فرکانس بالا تبدیل می‌شود که به آن روش افزایش فرکانس گفته می‌شود.

برداشت‌کننده ترموالکتریک نیز از جفت پایه‌های نیمه‌هادی نوع n و p تشکیل شده‌است، و در دیواره فریم به صورت ثابت جای می‌گیرد.



شکل ۱: برداشت‌کننده ترکیبی (ترموالکتریک-الکترومغناطیس)

عملکرد برداشت‌کننده ترموالکتریک: برداشت‌کننده‌های ترموالکتریک در اثر شار گرمایی ناشی از اختلاف دما بین دو منبع سرد و گرم توان الکتریکی تولید می‌کنند. یک عنصر ترموالکتریک از دو پایه نیمه‌هادی ساخته می‌شود که از یک طرف به منبع گرم و از سوی دیگر به منبع سرد (شکل ۱) اتصال دارد.

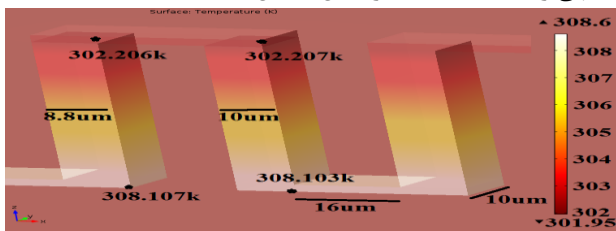
این نوع برداشت‌کننده، ساکن و دارای طول عمر بیشتری نسبت به نوع متحرک می‌باشد. از آنجایی که یک عنصر ترموالکتریک به تنهایی قادر به تولید توان زیادی نیست، صدها عنصر در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند تا ولتاژ بالاتری تولید کنند. این تبدیل انرژی براساس اثر سی‌بک اتفاق می‌افتد.

طبق این اثر، با حرارت دادن محل اتصال دو فلز غیر همنام، می‌توان پتانسیل الکتریکی (dc) تولید کرد. جفت ترموالکتریک‌ها مشابه شکل ۱ از نظر گرمایی موازی و از نظر الکتریکی به صورت سری قرار می‌گیرند. ولتاژ خروجی برای n ترموکوپل سری شده به صورت رابطه (۱) است [۴].

$$v = n \alpha \Delta T_g \quad (1)$$

در این رابطه ΔT_g گرادیان دما در دو سر پایه‌ی ترموالکتریک و α ضریب سی‌بک $[v/k]$ می‌باشد. آشکار است که هرچه ضریب سی‌بک یک ماده بیشتر باشد، انتخاب مناسب‌تری برای ساخت ترموالکتریک خواهد بود.

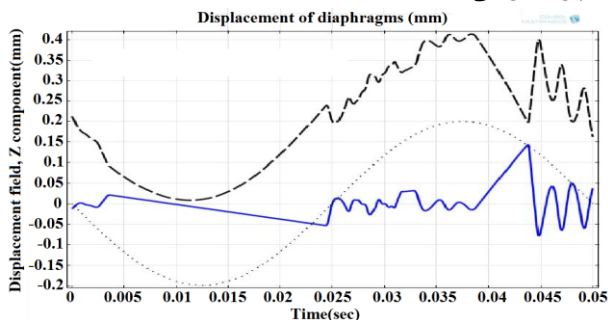
این صورت با قرارگیری ۱۱۰۲ جفت پایه ترموالکتریک، اختلاف دمای مفید ۵/۷۴ درجه در دوسر پایه‌ها ایجاد شده و ولتاژ و توان ۱/۵۹۷ و ۶۳μW حاصل می‌گردد. همچنین فاکتور بازده ۰/۰۴۵W/m²k² می‌باشد. شبیه‌سازی در نرم‌افزار کامسول نیز نتایج مشابهی را به دست داد که در شکل ۳ قابل مشاهده است.



شکل ۳: بررسی برداشت‌کننده ترموالکتریک در COMSOL

طراحی برداشت‌کننده الکترومغناطیس: این برداشت‌کننده از دو دیافراگم به جنس PDMS با ضخامت ۲۲۰μm و ۱۱۰μm تشکیل شده است. آهنربای نئودیمیومی با ابعاد ۵×۵×۱mm³ به دیافراگم ضخیم تر (با فرکانس طبیعی ۳۰Hz) متصل شده است. همچنین سیم‌پیچ‌های مسی بر روی دیافراگم نازک‌تر (با فرکانس طبیعی بالاتر) قرار می‌گیرند، که در فاصله ۱/۴۹mm در زیر دیافراگم اول واقع شده است.

دیافراگم بالایی با دامنه جابجایی نسبتاً زیاد (۰/۲mm) به علت فرکانس طبیعی پایین می‌تواند ارتعاشات فرکانس پایین بدن را جذب کند. با انتقال حرکت دیافراگم بالایی به دیافراگم زیرین توسط جاذبه‌ی بین آهنربا و قطعه نیکل موجود بر روی دیافراگم زیرین، فرکانس حرکات افزایش یافته و جریان و ولتاژ بالاتری تولید می‌شود. حرکت، نحوه عملکرد این برداشت‌کننده و تغییرات شار مغناطیسی در کامسول مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۴ حرکت دو دیافراگم را نشان می‌دهد.



شکل ۴: جابجایی دیافراگم بالایی (. .) و پایینی (-)، برآیند حرکت این دو (- -)

پس از محاسبه‌ی متوسط تغییرات شار نسبت به زمان به ازای سطوح مختلف، ابعاد بهینه‌ی سیم‌پیچ نیز با استفاده از الگوریتم ژنتیک MATLAB به دست آمد. طبق این بهینه‌سازی که با هدف محاسبه‌ی بیشینه توان انجام شد، سیم‌پیچ‌ها دارای عرض ۰/۳۷۹mm و ضخامت ۱۰μm هستند. همچنین ۰/۱۹mm فاصله بین سیم‌پیچ‌ها وجود دارد. در این صورت با وجود ۴ دور سیم‌پیچ ولتاژ ۰/۲۸۹mV و توان ۳۵/۹۵nW حاصل می‌شود.

اگر $m_m \ddot{y} = F_0 \sin(\omega t)$ باشد، این معادله پاسخی به شکل زیر دارد [۷]:

$$z(t) = z_1 \sin(\omega t - \phi) \rightarrow \begin{cases} z_1^2 = \frac{F_0^2}{(k_m - m_m \omega^2)^2 + (b_m \omega)^2} \\ \phi = \tan^{-1} \left(\frac{b_m \omega}{k_m - m_m \omega^2} \right) \end{cases} \quad (6)$$

معادله حرکت دیافراگم زیرین نیز به صورت رابطه (۷) بیان می‌شود [۷]:

$$m_c \ddot{z}_c + b_c \dot{z}_c + k_c (z_c - \delta_c) = -m_c \ddot{y} + F \quad (7)$$

که حل آن عبارت است از [۷]:

$$z_c(t) = z_0 \frac{e^{-\zeta_c \omega_c t}}{\sqrt{1-\zeta_c^2}} (\zeta_c \sin(\omega_{dc} t) + \sqrt{1-\zeta_c^2} \cos(\omega_{dc} t)) \quad (8)$$

که در آن $\omega_{dc} = \omega_{nc} \sqrt{1-\zeta_c^2}$ می‌باشد.

در برخی بازه‌های زمانی از حرکت این دو ساختار ممکن است دو دیافراگم به هم متصل شوند، که در این صورت نیروی جاذبه آهنربا به نیروی طبیعی بین دو جسم متصل به هم تغییر می‌یابد.

طراحی برداشت‌کننده انرژی

طراحی برداشت‌کننده ترموالکتریک: در برداشت انرژی از بدن، اتصال گرم ترموالکتریک‌ها با بدن و اتصال سرد آنها با هوای محیط در ارتباط است. ترموالکتریک‌ها می‌توانند آرایش‌های مختلفی به خود بگیرند [۷] که در این میان آرایش عمودی-عمودی از سایرین عملکرد مناسب‌تری دارد.

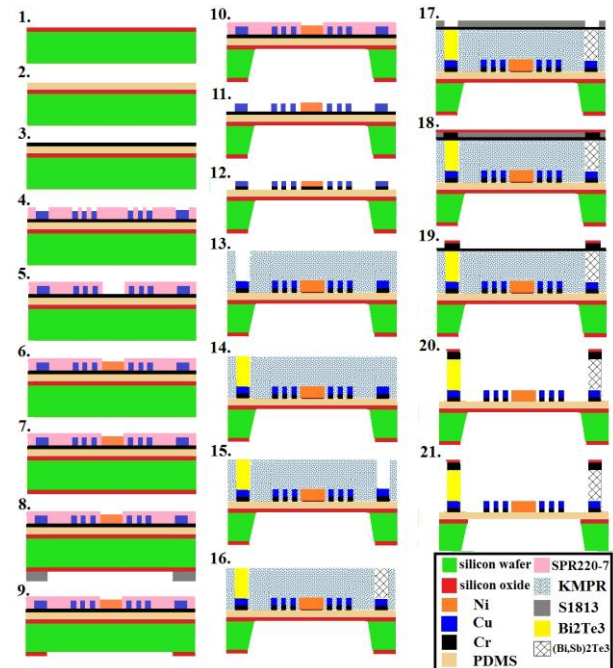
با توجه به ابعاد بسیار کوچک دستگاه، تنها بخشی از اختلاف دمای بین بدن و محیط به دو سر اتصال سرد و گرم منتقل شده (ΔT_g) و سبب تولید انرژی می‌گردد. در این طرح، بخش ترموالکتریک بر روی زیرلایه سیلیکونی با ضخامت ۴۵۰μm ایجاد می‌شود. پایه‌های ترموالکتریک از جنس Bi,Te,Sb بر روی زیرلایه قرار می‌گیرند و اتصال الکتریکی بین آنها از دو جنس کروم و مس (۲μm ضخامت) خواهد بود. در بخش بالایی ترموالکتریک‌ها و به منظور ایجاد فاصله مناسب بین دو دیافراگم، لایه‌ای از جنس آلومینیوم با ضخامت ۱/۴۸mm قرار می‌گیرد. علاوه بر این در محل اتصال کل ساختار با منابع گرم و سرد از یک صفحه آلومینیومی ۲/۵×۲/۵cm² با ضخامت ۱mm استفاده می‌شود که با هدایت گرمایی بالای خود منجر به بهبود عملکرد می‌شود. در طراحی این بخش فرضیاتی در نظر گرفته شد که عبارتند از: (۱) هوا منبع نامتناهی با دمای ۲۰°C است. (۲) پوست بدن منبعی نامتناهی با دمای ۳۵°C است. (۳) جابجایی هوا برابر با ۱۰w/m²k و هدایت گرمایی آن ۰/۰۲۵w/mk می‌باشد. (۴) مقاومت سطح تماس لایه‌های مختلف ناچیز در نظر گرفته می‌شود. (۵) هدایت به صورت یک بعدی (عمود بر سطح بدن) فرض شده است. (۶) خواص مواد و لایه‌ها ثابت است.

بهینه‌سازی ابعاد پایه‌های ترموالکتریک در الگوریتم ژنتیک MATLAB و با هدف یافتن بیشینه توان انجام شد و با در نظرگیری بیشینه طول پایه ۴۰μm، ابعاد موجود در شکل ۳ به دست آمد. در

طراحی فرآیند ساخت

مراحل مختلف ساخت مطابق شکل ۵ در زیر آمده است:

۱. تمیزکاری و لایه نشانی اکسید سیلیکون روی ویفر سیلیکونی ۲. لایه نشانی PDMS با ضخامت $110\ \mu\text{m}$ و طرح دهی آن به شکل دیافراگم ۳. کندوپاش کروم به عنوان لایه میزبان^۶ با ضخامت $200\ \text{nm}$ ۴. ایجاد سیم پیچ ها و اتصال پایینی پایه های ترموالکتریک لایه نشانی الکتروشیمیایی $10\ \mu\text{m}$ مس ۵. پاک نمودن رزیست، و ایجاد فوتورزیست با ضخامت بالاتر و طرح جدید ۶. لایه نشانی الکتروشیمیایی نیکل به ضخامت $10\ \mu\text{m}$ ۷. قراردادی یک لایه SiO_2 (ماسک زدایش سیلیکون) در زیر ویفر ۸. قراردادی فوتورزیست و طرح نگاری نوری آن ۹. زدایش تر سیلیکون اکسید ۱۰. زدایش تر ویفر سیلیکونی از زیر ۱۱. پاک نمودن فوتورزیست باقی مانده ۱۲. زدایش تر کروم ۱۳. طرح نگاری نوری فوتورزیست منفی KMPR (ضخامت $42\ \mu\text{m}$) ۱۴. تولید پایه منفی (n-Bi₂Te₃) از روش تبخیر همزمان^۷ ۱۵. طرح نگاری نوری فوتورزیست منفی KMPR (ضخامت $45\ \mu\text{m}$) ۱۶. تولید پایه مثبت (p-(Bi,Sb)₂Te₃) از روش تبخیر همزمان ۱۷. کندوپاش یک لایه $0.2\ \mu\text{m}$ کروم و طرح دهی به عنوان اتصالات بالا ۱۸. لایه نشانی الکتروشیمیایی کروم با ضخامت $2\ \mu\text{m}$ و ایجاد یک لایه اکسید سیلیکون (عایق) ۱۹. حذف فوتورزیست S1813 ۲۰. حذف فوتورزیست KMPR ۲۱. زدایش تر اکساید سیلیکون.



شکل ۵: فرآیند ساخت

جدول ۱: مقایسه بین برداشت کننده های الکترومغناطیس

توان $[\mu\text{W}]$	ولتاژ $[mV]$	فرکانس $[Hz]$	ابعاد $[cm^3]$	
۱	-	۷۰	۰/۰۲۵	۱۹۹۶ [۱]
۰/۰۰۱۲	۶/۹۴	۱۰	۰/۴۵۷	۲۰۱۳ [۲]
۰/۰۳۵	۰/۲۸۹	۲۰	۰/۴۹۵	این طرح

مقایسه برداشت کننده طراحی شده با سایر نمونه ها

مقایسه ای بین برداشت کننده های مختلف در جداول ۱ و ۲ آمده است.

جدول ۲: مقایسه بین برداشت کننده های ترموالکتریک

متغیر بازده $[\frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2\text{K}^2}]$	توان $[\frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}]$	ΔT	
۲/۴	۶۰	۵	سیکو ۱۹۹۸ [۳]
9×10^{-7}	۰/۰۰۰۱۹	۱۵	بیسموت- تلورئید ۲۰۱۱ [۴]
۰/۰۴	۱۰	۱۵	بیسموت- تلورئید ۲۰۱۱ [۵]
۰/۰۴۴۸	۱۰/۱۱۲	۱۵	این طرح

نتیجه گیری

بدین ترتیب در این مقاله طراحی از یک برداشت کننده ی ترکیبی ارائه شد که در آن برداشت کننده ی ترموالکتریک سهم بیشتری در تولید توان و ولتاژ داشته ($1/59\text{V} - 1/11\ \mu\text{W}/\text{cm}^2 - 15\ \Delta T$) و با توجه به ساختار ثابت آن طول عمر بالایی دارد. حال اگر اختلاف دمای بین بدن و محیط کاهش یابد، برداشت کننده ی الکترومغناطیس با وجود میزان توان اندک آن ($35\text{nw} - 289\text{mv}$) مانع از توقف تولید انرژی می گردد. با به کارگیری این برداشت کننده بر روی بدن انسان، می توان انرژی لازم برای دستگاه هایی با توان مصرفی پایین مثل ساعت مچی و حسگرهای پایش سلامت را تامین نمود.

مراجع

- [1] Williams, C.W., Woods, R.C., and Yates, R.B., 1996. "Feasibility of a vibration powered micro-electric generator". *IEE Coll.On Compact Power Sources* (Digest No. 96/107), IET, pp.7/1-7/3.
- [2] Zorlu, O., Turkyilmaz, S., Muhtaroglu, A., and Kulah, H., 2013. "An electromagnetic energy harvester for low frequency and low-g vibrations with a modified frequency up conversion method". *26th International Conference on MEMS*, IEEE, pp. 805-808.
- [3] Priya, Sh., Inman, D.J. (ed), 2009. *Energy Harvesting Technologies*, Springer.
- [4] Francioso, L., De Pascali, C., Farella, I., Martucci, C., Cretì, P., Siciliano, P., Perrone, A., 2011. "Flexible thermoelectric generator for ambient assisted living wearable biometric sensors". *Journal of Power Sources*, IEEE, Vol. 196, No. 6, pp. 3239-3243.
- [5] Leonov, V., 2011. "Simulation of maximum power in the wearable thermoelectric generator with a small thermopile". *Springer Microsystem Technologies*, Vol. 17, No. 4, pp. 495-504.
- [6] Glatz, W., Schwyter, E., Durrer, L., Hierold, C., 2009. "Bi₂Te₃-based flexible micro thermoelectric generator with optimized design". *Journal of MEMS*, IEEE, Vol. 18, No. 3, pp. 763 - 772.
- [7] Sari, I., Balkan, T., and Kulah, H., 2010. "An electromagnetic micro power generator for low-frequency environmental vibrations based on the frequency up conversion technique". *Journal of MEMS*, IEEE, vol. 19, No. 1, pp. 14-27.