مقاله

مهارکننده‌های انرژی مکانیکی

روح‌اله حسینی *
دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک
دانشگاه تهران
r.hosseini.mech@gmail.com

محسن حامدی
دانشیار دانشکدهٔ مهندسی مکانیک
دانشگاه تهران
mhamedi@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۸/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۹/۲۵

چکیده

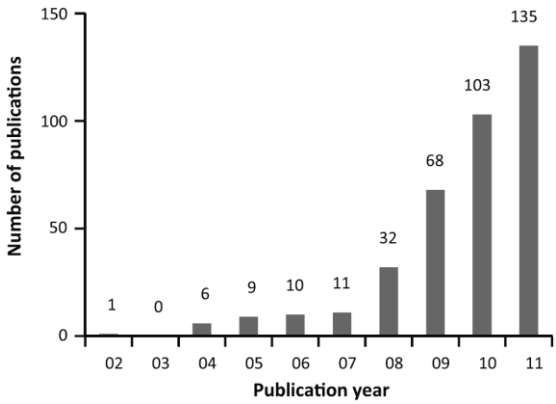
در بسیاری از وسائل و ابزارها نمی‌توان از باتری استفاده کرد و به سیستم‌هایی نیاز است که قادر باشند توان مورد نیاز خود را تأمین کنند. از جمله روش‌های تأمین انرژی، استحصال انرژی از ارتعاشات محیط اطراف است که با حذف باتری، دوام و طول عمر بیشتر و هزینهٔ تمام‌شدهٔ کمتری برای منبع انرژی ایجاد می‌نمایند. مهارکننده‌های انرژی ارتعاشی رایج شامل مهارکننده‌های پیزوالکتریک، الکترواستاتیک و الکترومغناطیس می‌باشند. در این مقاله اصول کارکرد، مزایا و معایب این نوع مهارکننده‌ها به اختصار تشریح و بازار و میزان کاربرد آنها در صنایع گوناگون بررسی می‌شود. هم‌اکنون این قطعات توجه بسیاری از محققان و پژوهشگران را به‌خود جلب کرده‌اند و پیش‌بینی می‌شود در آینده‌ای نزدیک بتوانند سهم عمده‌ای از بازار را به‌خود اختصاص دهند.

واژگان کلیدی: مهار انرژی مکانیکی، ارتعاشات، پیزوالکتریک، الکترواستاتیک، الکترومغناطیس

۱. مقدمه

در بسیاری از وسائل و ابزارها نمی‌توان از باتری استفاده کرد؛ زیرا باتری‌ها پس از مدتی به تعویض یا شارژ نیاز دارند و این کار مستلزم پرداخت هزینه و صرف زمان است. در بسیاری از موارد هم عملاً دسترسی لازم وجود ندارد، نظیر حسگرها و عملگرهای فضاپیمایی که به فضا پرتاب شده است. در پاره‌ای از موارد نظیر باتری قلب یک بیمار قلبی، نمی‌توان مدام باتری را شارژ کرد و تعویض آن نیز دردسرآفرین است. در برخی موارد دیگر نظیر حسگرهای مورد استفاده در اگزوز و تایر یک خودرو، به‌دلیل دمای بالا و وجود اجزای متحرک، امکان سیم‌کشی برای برق‌رسانی به آن منطقه وجود ندارد و از طرفی استفاده از باتری هزینه‌بر است. در بسیاری از سیستم‌ها، به چنین مواردی برخورد می‌کنیم و باید سیستم بتواند برق مورد نیاز خود را به‌طریقی تأمین نماید. روش‌های متنوعی برای تأمین این انرژی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به مهار انرژی‌های مکانیکی ناشی از ارتعاشات محیط، مهار انرژی حرارتی و مهار انرژی نورانی اشاره کرد. استفاده از سلول‌های خورشیدی یکی از روش‌های رایج برداشت

انرژی تجدیدپذیر از محیط است و کاربردهای فراوانی دارد، اما استفاده از آن در همه‌جا امکان‌پذیر نیست؛ مثلاً ممکن است در جایی مثل یک تونل به انرژی نورانی دسترسی نداشته باشیم. یکی از روش‌های نو در این زمینه، مهار انرژی مکانیکی پیرامونی است که به‌تازگی توجه محققان را به‌خود جلب کرده است. اگر به آثار منتشره توسط پایگاه نمایه‌سازی اسکوپوس طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۱ م نگاهی بیاندازیم، ملاحظه خواهیم کرد که تعداد مقالات نمایه‌شده در این زمینه با سرعت زیادی روبه افزایش است. در شکل ۱ نمودار تعداد مقالات نمایه‌شده در این بازهٔ زمانی نمایش داده شده است.

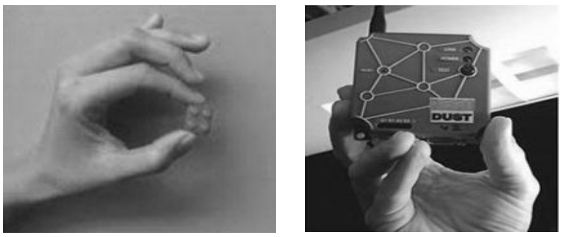


شکل۱. سیر صعودی مقاله‌های نمایه‌شده توسط اسکوپوس طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۱ در زمینهٔ مهارکننده‌های انرژی مکانیکی

در این مقاله روش‌های مهار انرژی مکانیکی محیط، به اختصار توضیح داده می‌شود و اساس کارکرد و مزایا و معایب هر یک مورد بررسی قرار می‌گیرد.

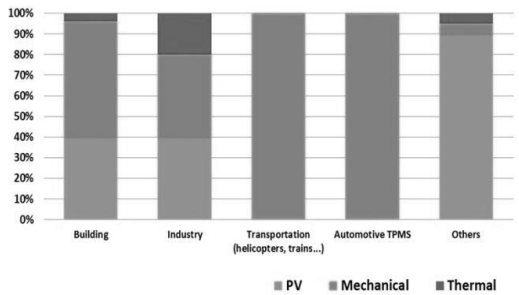
۲. بازار و میزان کاربرد این ادوات

فناوری طراحی و ساخت حسگرها و مهارکننده‌های انرژی روز به‌روز پیشرفت می‌کند. با رشد فناوری و دانش ساخت در ابعاد میکرو، این ادوات علاوه بر کاهش اندازه و قیمت تمام‌شده، سهم بیشتری از بازار را به خود اختصاص خواهند داد. شکل ۲ بیانگر همین مطلب است. میزان استفاده از مهارکننده‌های انرژی در سال ۲۰۱۱ در هر کاربرد طبق گزارش یول مطابق شکل ۳ می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در صنایع حمل‌ونقل، سیستم‌های پایش فشار باد تایر خودروها، ساختمان‌سازی و صنعت، از مهارکننده‌های انرژی مکانیکی استفادهٔ بیشتری شده است.

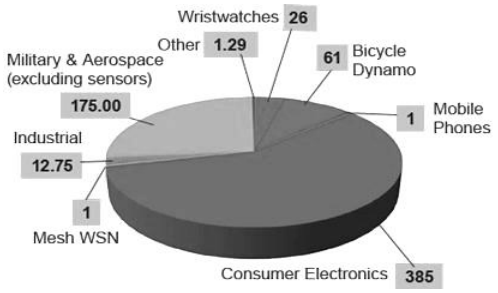


(الف) (ب)

شکل ۲. الف) اندازهٔ حسگرهای کنونی، ب) اندازهٔ حسگرهای مورد استفاده تا سال ۲۰۲۲ [۱]



شکل ۳. نمودار میزان استفاده از انواع مهارکننده‌های انرژی رایج در کاربردهای گوناگون، سال ۲۰۱۱ [۲]



شکل ۴. میزان استفاده از مهارکننده‌های انرژی برحسب میلیون دلار [۲]

شکل ۴ نیز میزان استفاده از مهارکننده‌های انرژی را برحسب میلیون دلار نشان می‌دهد. برآورد می‌گردد سهم این قطعات در بازار تا سال ۲۰۲۱، ۴/۴ میلیارد دلار باشد [۲].

۳. مهار انرژی مکانیکی

معمولاً برای تبدیل حرکت و ارتعاشات به جریان الکتریکی، از سه نوع سازوکار استفاده می‌شود که عبارت‌اند از:

۱. مبدل الکترواستاتیک

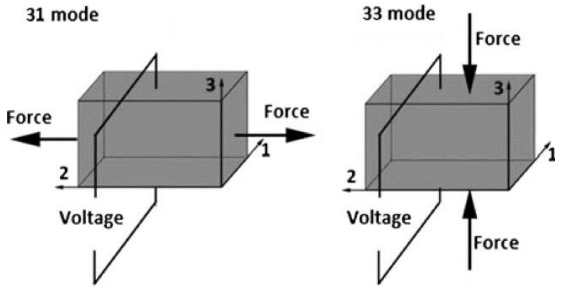
۲. پیزوالکتریک

۳. الکترومغناطیس

گاهی نیز می‌توان این سازوکارها را با هم ترکیب و از یک سازوکار هیبریدی استفاده کرد.

در مبدل‌های الکترواستاتیک، فاصله یا روی‌هم افتادگی دو الکترود از یک خازن در اثر حرکت یا ارتعاش یک الکترود متحرک، تغییر می‌کند. این حرکت سبب تغییر ولتاژ در خازن می‌شود و به ایجاد جریان در مدار خارجی می‌انجامد. فاصلهٔ بین دو الکترود می‌تواند از هوا، خلأ، یک مادهٔ دی‌الکتریک دیگر و یا ترکیبی از اینها پر شود. از جمله مزایای مهم استفاده از این مبدل‌ها، پتانسیل ساخت آن با سیلیکون توسط فرایند میکروماشینکاری می‌باشد که به آن اجازهٔ استفاده در مدارهای الکترونیکی را می‌دهد. اما مهارکننده‌های الکترواستاتیک نیاز به یک ولتاژ و در نتیجه انرژی الکتریکی ورودی دارند که ممکن است همیشه در دسترس نباشد. از طرفی مقاومت و ولتاژ خروجی این نوع مهارکننده‌ها بالاست و در نتیجه جریان نسبتاً کمی تولید می‌کنند که ممکن است برای برخی کاربردهای خاص مناسب نباشد و برای استفاده در آنها باید ابتدا یک تقویت سیگنال انجام گیرد و لذا موجب پیچیده‌تر شدن فرایند ساخت می‌شود.

در مبدل‌های پیزوالکتریک، ارتعاش و حرکت منجر به تغییر شکل یک خازن پیزوالکتریک می‌شود و ایجاد ولتاژ می‌کند. پیزوالکتریک خاصیتی است که در برخی مواد خاص به‌چشم می‌خورد و می‌تواند تنش مکانیکی اعمال‌شده به مادهٔ پیزوالکتریک را به ولتاژ تبدیل کند. برحسب جهت تنش اعمالی و جهت جریان خروجی از ماده، دو مود پیزوالکتریک داریم: اگر جهت جریان خروجی از مادهٔ پیزوالکتریک با جهت تنش اعمالی موازی باشد، مود کاری را d_{33} و اگر این جهات عمود بر هم باشند، مود کاری را d_{31} می‌نامیم. در شکل ۵ این دو مود کاری نمایش داده شده است. استفاده از این مبدل‌ها به‌دلیل سادگی عملکرد (سادگی استخراج و ذخیرهٔ انرژی الکتریکی) و بازدهی بالای آنها متداول‌تر است.



شکل ۵. مودهای کاری یک مادهٔ پیزوالکتریک

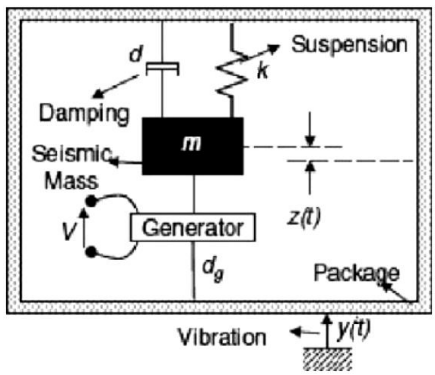
در مبدل‌های الکترومغناطیس، حرکت نسبی یک جرم مغناطیسی نظیر آهنربا نسبت به یک سیم‌پیچ موجب تغییر شار مغناطیسی و ایجاد یک ولتاژ متناوب در طول سیم‌پیچ می‌شود. این حرکت نسبی می‌تواند توسط ثابت نگه‌داشتن سیم‌پیچ و حرکت آهنربا و یا بالعکس ایجاد شود. تغییر میدان مغناطیسی روشی دیگر برای ایجاد جریان در سیم‌پیچ است که تاکنون در مهارکننده‌های انرژی به‌کار گرفته نشده است. چون معمولاً ولتاژ حاصل از مهارکننده‌های الکترومغناطیس کم است، در کنار دستگاه به یک مبدل افزایندهٔ ولتاژ نیز نیاز می‌باشد. در محاسبهٔ توان الکتریکی برداشت‌شده از مهارکننده، باید افت توان ناشی از این مبدل نیز در نظر گرفته شود.

اگر حرکت منبع انرژی آهسته باشد و طول حرکتی زیادی داشته باشد، می‌توان یکی از دو سر مبدل را ثابت نگه داشت و دیگری را به منبع ایجاد حرکت متصل کرد [۳]. اما در بیشتر موارد این امکان وجود ندارد و اصل اینرسی باید استفاده گردد؛ یعنی مبدل در یک قاب جاسازی شود و یک بخش از آن به‌خود قاب متصل گردد و بخش دیگر قابلیت حرکت داشته باشد. قاب به جسم متحرک متصل و حرکت نسبی قطعات مبدل توسط قانون اینرسی کنترل می‌شود.

این روش، روش رایج مهار انرژی ارتعاشی است [۴]. بسیاری از سیستم‌ها با رساندن سیستم به حالت تشدید کار می‌کنند که به آنها مهارکننده‌های رزونانسی می‌گویند. در تخمین اولیه، مهارکننده‌های رزونانسی می‌توانند مانند یک سیستم جرم و فنر و میراکننده کار کنند. رفتار این سیستم‌ها با معادلهٔ دیفرانسیل ۱ توصیف می‌شود:

$$m\ddot{z} + (d + d_g)\dot{z} + kz = m\ddot{y} \qquad (۱)$$

به‌طوری‌که در این رابطه z بیانگر میزان حرکت جرم، d_g میرایی ناشی از تبدیل انرژی مکانیکی به بار الکتریکی، d میرایی ناشی از آثار خارجی مثل وجود هوا، اصطکاک سطوح لغزشی و نظایر آن، k ثابت فنریت، m جرم متحرک و y میزان حرکت قاب در جهت z می‌باشد (شکل ۶).



شکل ۶. نمایی شماتیک از مهارکننده‌های انرژی ارتعاشی [۵]

توان اتلافی در میراکننده تابعی از فرکانس است. اگر ورودی سینوسی باشد، توان خروجی زمانی بیشینه خواهد بود که فرکانس ورودی با فرکانس تشدید سیستم برابر باشد. در این‌صورت داریم:

$$P_{res} = \frac{m\omega_{res}\xi_g |\dot{Y}|^2}{4(\xi + \xi_g)^2} \qquad (۲)$$

به‌طوری‌که در این رابطه $\xi = d/2m\omega$ و $\xi_g = d_g/2m\omega$ ضرایب میرایی بدون بعد و Y مقدار ارتعاش ورودی است. توان خروجی حداکثر زمانی به‌دست می‌آید که میرایی‌های مولد و خروجی با هم برابر باشند. همچنین روشن است که برای رسیدن به حداکثر توان باید میرایی کمترین مقدار ممکن باشد. میزان کاهش میرایی با توجه به ابعاد سیستم محدود می‌شود؛ زیرا با کاهش میرایی، مقدار نوسان افزایش می‌یابد و لذا باید این ابعاد در نظر گرفته شود.

اگر z_{max} حداکثر جابه‌جایی ممکن باشد، توان قابل استحصال برای یک میرایی معلوم برابر است با [۴]:

$$P_{res} = 4\pi^3 m\, f_{res}{}^3 Y\, z_{\max} \qquad (۳)$$

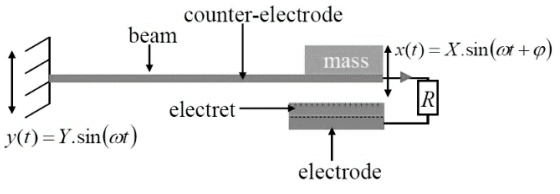
به‌طوری‌که در این رابطه f_{res} فرکانس تشدید است. معمولاً کارایی مهارکننده‌های انرژی برحسب این توان بیان می‌شود [۶]. برای ارتعاشات یکسان، معمولاً میزان ولتاژ خروجی مبدل‌های الکترومغناطیس کم و در مبدل‌های الکترواستاتیک بیشتر است.

اگر از جنبهٔ ساختی به مهارکننده‌های میکروماشینکاری بنگریم، ملاحظه می‌شود که ساخت مهارکننده‌های الکترواستاتیک و پیزوالکتریک نسبتاً ساده است و در متون و مقاله‌های علمی قطعاتی در ابعاد ۱ تا ۱۰ میلی‌متر گزارش شده است. اما در مورد بیشتر مهارکننده‌های الکترومغناطیس می‌توان گفت که نیازمند استفاده از روش‌های پیچیدهٔ میکروماشینکاری و ساخت قیدوبند هستند؛ زیرا ساخت سیم‌پیچ با تعداد دور مناسب توسط میکروماشینکاری صفحه‌ای مقدور نیست. لذا معمولاً ابعاد آنها کمی بزرگتر است و بنابراین توان‌های بیشتری نیز تولید می‌کنند. در شکل‌های ۷ تا ۹، نمایی شماتیک از نحوهٔ عملکرد مهارکننده‌های انرژی نمایش داده شده است.

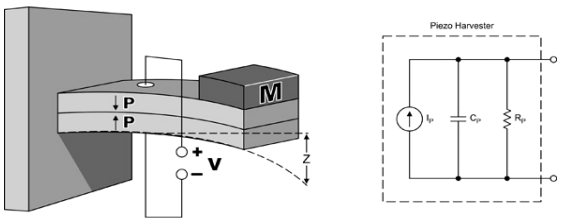
هم‌اکنون مهارکننده‌های ارتعاشی بزرگی در بازار یافت می‌شوند که حجمی در حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متر مکعب دارند و ده‌ها میلی‌وات توان در بازهٔ فرکانسی ۵۰ تا ۱۲۰ هرتز تولید می‌کنند. با این‌حال، به‌دلیل اندازه و روش ساخت آنها، این سیستم‌ها گران هستند و برای کاربردهای خاصی چون کاربردهای نظامی یا تجهیزات صنعتی با کنترل از راه دور استفاده می‌شوند. کاربرد آنها در سیستم‌ها و صنایع متداول و در دسترس زمانی امکان‌پذیر است که

این قطعات به تولید انبوه برسند و هزینهٔ تمام‌شده آنها کاهش یابد.

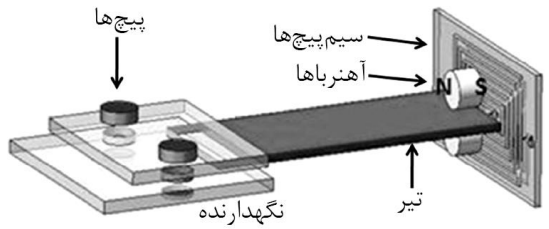
در شکل ۱۰ حداکثر توان مورد نیاز برای مهارکننده‌های ارتعاشی مورد استفاده در برخی وسائل الکترونیکی برحسب اندازه نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود معمولاً با افزایش حجم، توان مورد نیاز نیز کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش فرکانس نوسانات در یک حجم یکسان از وسیله، میزان توان قابل استحصال افزایش می‌یابد. نکتهٔ جالب توجه آنکه تقریباً نسبت فرکانس ارتعاشات و توان خروجی به‌صورت خطی و مضربی از یکدیگر با هم در ارتباطند؛ یعنی با ۱۰ برابر کردن فرکانس، میزان توان نیز ۱۰ برابر افزایش می‌یابد [۶].



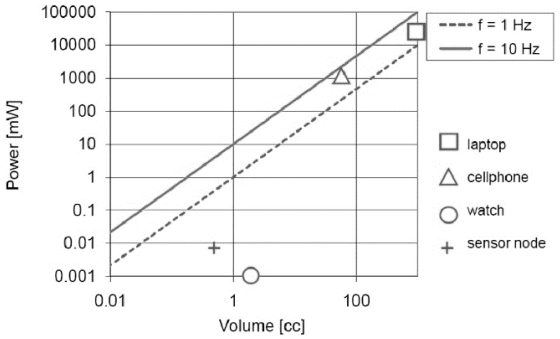
شکل ۷. یک مهارکنندهٔ انرژی ارتعاشی الکترواستاتیک



شکل ۸ یک مهارکنندهٔ انرژی ارتعاشی پیزوالکتریک و مدار الکتریکی معادل آن



شکل ۹. یک مهارکنندهٔ انرژی ارتعاشی الکترومغناطیسی



شکل ۱۰. حداکثر توان برای مهارکننده‌های متحرک برحسب ابعاد در دو فرکانس متفاوت [۶]

۴. محدودیت‌ها و زمینه‌های پژوهشی موجود

مهارکننده‌های انرژی مکانیکی موجود، با اینکه در بیشتر موارد کارایی نسبتاً خوبی از خود نشان می‌دهند، اما اکثراً بازهٔ فرکانسی محدودی دارند که در آن بازه می‌توانند بهترین عملکرد را داشته باشند و خارج از آن بازه عملکرد آنها به‌شدت افت می‌کند. در واقع اکثراً در فرکانس تشدید و حوالی این فرکانس، که در آن سیستم حداکثر ارتعاش را داراست، بهترین کارایی را دارند. بدین منظور سعی شده است تا با غیرخطی کردن سیستم، استفاده از سیستمی با فرکانس‌های تشدید مختلف نزدیک به هم و جز این‌ها، این بازه را تا جای ممکن بزرگتر کنند. همچنین در تحقیقات آتی سعی می‌شود تا چگالی توان تولیدی تا جای ممکن افزایش یابد؛ یعنی از حجمی یکسان از مهارکننده، حداکثر توان ممکن استحصال گردد. معمولاً این مقدار در مهارکننده‌های پیزوالکتریک بیشتر است. گاهی برای

افزایش این توان، می‌توان از روش‌های هیبریدی و ترکیب چندین روش مهار انرژی استفاده کرد. بدین منظور در تحقیقات گوناگون به‌خصوص از ترکیب روش‌های پیزوالکتریک و الکترومغناطیس [۷ و ۸] برای این کار استفاده شده است. گاهی نیز روش‌های متنوع مکانیکی و غیرمکانیکی با هم تلفیق شده‌اند [۹].

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به عدم امکان استفاده از باتری‌ها در وسائل متنوع به‌دلیل عدم دسترسی یا هزینهٔ بالا، همچنین عدم امکان سیم‌کشی برای انتقال برق به سیستم‌های گوناگون، به‌دلیل 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، سرمایه‌گذاری بسیاری روی مهارکننده‌های انرژی مکانیکی که بتوانند ارتعاشات محیط را به الکتریسیته تبدیل کنند، به‌خصوص در وسائل متحرک که ارتعاشات نیز تولید می‌نمایند، انجام شده است. این وسائل می‌توانند برق مورد نیاز حسگرها و میکروعملگرهای متنوع را تأمین نمایند. سه نوع مهارکنندهٔ انرژی مکانیکی رایج عبارت است از مهارکننده‌های پیزوالکتریک، الکترواستاتیک و الکترومغناطیس. در این مقاله عملکرد این مهارکننده‌ها، آیندهٔ پیش‌رو، سهم آنها در بازار و مشکلات پیش‌رو بررسی گردید و از جنبه‌های میزان کارایی و نحوهٔ ساخت مقایسه شدند.

٦. مآخذ

[1] Harrop, P., I. Chairman, "Wireless sensor networks 2012-2022," ed: IDTechEx, 2012.

[2] Harrop, P., R. Das, "Energy harvesting and storage for electronic devices 2011–2021," *IDTechEx Report*, 2011.

[3] Shenck, N.S., J.A. Paradiso, "Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics," *Micro, IEEE,* vol. 21, pp. 30-42, 2001.

[4] Mitcheson, P.D., T.C. Green, E.M. Yeatman, and A.S. Holmes, "Architectures for vibration-driven micropower generators," *Microelectromechanical Systems, Journal of,* vol. 13, pp. 429-440, 2004.

[5] Sterken, T., K. Baert, C. Van Hoof, R. Puers, G. Borghs, and P. Fiorini, "Comparative modelling for vibration scavengers [MEMS energy scavengers]," in *Sensors, 2004. Proceedings of IEEE,* 2004, pp. 1249-1252.

[6] Mitcheson, P.D. ،E.M. Yeatman, G.K. Rao, A.S. Holmes, and T.C. Green, "Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices," *Proceedings of the IEEE,* vol. 96, pp. 1457-1486, 2008.

[7] Wu, X., A. Khaligh, and Y. Xu, "Modeling, Design and Optimization of Hybrid Electromagnetic and Piezoelectric MEMS Energy Scavengers," in *Custom Intergrated Circuits*, 2008, pp. 177-180.

[8] Yang, B., C. Lee, W. L. Kee, and S. P. Lim, "Hybrid energy harvester based on piezoelectric and electromagnetic mechanisms "،*Micro/Nanolith. MEMS MOEMS,* vol. 9, 2010.

[9] Gambier, P., S.R. Anton, N. Kong, A. Erturk, and D.J. Inman, "Piezoelectric, solar and thermal energy harvesting for hybrid low-power generator systems with thin-film batteries," *measurement science and technology*, vol. 23, pp. 1-11, 2011.