پدیدهٔ پیزوالکتریک، برداشت انرژی و معرفی ماژول مربوطه در نرم‌افزار کامسول مالتی‌فیزیکس

نگین مفتونی[1]، شادی کمالی[2]

۱ استادیار دانشگاه الزهرا، تهران، nmaftouni@gmail.com

۲ کارشناس ارشد، دانشگاه الزهرا، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۳۰

چکیده

پدیدهٔ پیزوالکتریک عبارت است از توانایی تبدیل نیروهای مکانیکی به الکتریسیته که در برخی از سرامیک‌ها دیده می‌شود. در این مقاله پس از معرفی پدیدهٔ پیزوالکتریک، کاربردهای متنوعی از آن ارائه می‌شود. چون استفاده از انواع انرژی جهت کاهش فشار موجود بر منابع سنتی انرژی نظیر سوخت‌های فسیلی در اولویت تحقیقاتی و عملیاتی قرار دارد، رویکرد برداشت انرژی از سیستم‌های متنوع توسط پدیدهٔ پیزوالکتریک مورد توجه است. این برداشت انرژی می‌تواند از انواع منابع ارتعاشی با فرکانس‌های مختلف صورت گیرد. شبیه‌سازی‌های کامپیوتری روش مناسبی برای کمک به طراحی‌های مختلف هستند. نرم‌افزار کامسول، که بر اساس حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستم‌ها به روش اجزای محدود عمل می‌کند، دارای ماژولی جهت شبیه‌سازی سیستم‌های پیزوالکتریک است. در این مطالعه این ماژول بعد از معرفی کلی نرم‌افزار کامسول به‌صورت جزئی بررسی می‌شود. تیر یک‌سر گیرداری از جنس مادهٔ پیزوالکتریک شبیه‌سازی و تأثیر تغییرات فرکانس و بار الکتریکی در کارکرد آن بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که میزان ولتاژ و توان الکتریکی قابل حصول از ارتعاشات وارد بر یک مادهٔ پیزوالکتریک به میزان فرکانس ارتعاش بستگی دارد. بیشینه برداشت انرژی الکتریکی نزدیکی فرکانس تشدید رخ می‌دهد. از این پدیده در کاربردهای صنعتی و پزشکی استفاده می‌شود.

واژگان کلیدی

پیزوالکتریک، ماژول برداشت انرژی، شبیه‌سازی، نرم‌افزار کامسول[1]، سیستم‌های انرژی

۱. مقدمه

تأمین انرژی برای فرایندهای گوناگون از جمله کلیدی‌ترین چالش‌های امروز حوزهٔ دانش و فناوری است. تلاش برای استخراج بیشتر منابع انرژی، ارتقای بازدهی فناوری‌ها، مصرف‌کننده‌های انرژی و یافتن منابع نوین انرژی راه‌های

متنوعی هستند که پیش‌روی محققان قرار دارند. استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی و منابعی که به‌صورت آزاد در طبیعت وجود دارند یا از فعالیت‌های فناورانه و زیستی تولید می‌شوند و به‌صورت آزاد تلف می‌شوند، از دیگر مواردی است که توجه پژوهشگران را به‌خود جلب کرده است. زمینهٔ مهم دیگری که در بحث انرژی از اهمیت خاصی برخوردار است عبارت است از تأمین انرژی برای دستگاه‌هایی که به مقادیر بسیار کمی از انرژی به‌صورت پیوسته برای کارکرد خود احتیاج دارند. با پیشرفت‌های اخیر در فناوری بی‌سیم و سیستم‌های میکروالکترومکانیکی[۲] تقریباً امکان جایگذاری حسگرهای بی‌سیم در هر نقطه وجود دارد. معمولاً توان مورد نیاز این حسگرها از طریق باتری‌های معمولی که طول عمر محدود دارند تأمین می‌شود. چون جایگزینی باتری کاری پرهزینه است و همچنین دفع باتری‌های مستعمل همیشه از نظر مباحث زیست محیطی مورد انتقاد قرار دارد، برداشت انرژی از ارتعاشات محیط با استفاده از فناوری سیستم‌های میکروالکترومکانیکی یکی از گزینه‌های مناسب جهت تأمین انرژی مصرفی این وسائل به‌نظر می‌رسد. ارتعاش را می‌توان با استفاده از انواع مختلف مبدل الکترومکانیکی به انرژی الکتریکی تبدیل کرد و سیستم‌های میکروالکترومکانیکی پیزوالکتریک به‌عنوان فناوری جذابی برای برداشت مقادیر کوچکی انرژی از ارتعاشات محیط، کاربردهای زیادی دارند. در این سیستم‌ها ارتعاشات مکانیکی برداشت‌شده به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. این روش برداشت انرژی نسبت به روش‌های دیگر از مزایایی چون تراکم توان بالا، سهولت کاربرد و قابلیت ساخت مواد پیزوالکتریک جهت برداشت انرژی ارتعاشی برای مقیاس‌های مختلف میکرو، ماکرو و نانو برخوردار است. جنس مواد تشکیل‌دهندهٔ حسگر پیزوالکتریک عاملی مهم و تعیین‌کننده در برداشت انرژی است. تیتانات زیرکونات سرب[۳] (PZT) ماده‌ای مطلوب و پرکاربرد در دستگاه‌های برداشت انرژی با استفاده از اثر پیزوالکتریک است. با مطالعهٔ جنبه‌های مختلف این فناوری می‌توان عملکرد آن را بهبود داد و با تغییر جنس فیلم‌های حسگر، یا تغییر فرکانس و شتاب ورودی توان تولیدی را افزایش داد.

از محدودیت‌های این تحقیق می‌توان به متغیربودن فرکانس ارتعاشات در برخی موارد اشاره کرد. به‌عنوان مثال وقتی از ارتعاشات یک موتور احتراق داخلی انرژی برداشت می‌شود با تغییر دور موتور، فرکانس نوسان منبع هم تغییر می‌کند. همچنین از دیگر مواردی که در تحقیقات این زمینه از حساسیت بالایی برخوردار است و موجب محدودیت‌هایی می‌شود، پایین‌بودن فرکانس برخی منابع ارتعاشی است. به‌عنوان مثال در مواردی که از حرکت‌های بدن انسان به‌عنوان منبعی برای تأمین انرژی استفاده می‌شود، فرکانس این حرکات بسیار پایین است.

۲. معرفی پدیدهٔ پیزوالکتریک

یکی از ویژگی‌های غیرمعمولی که برخی از سرامیک‌ها از خود بروز می‌دهند، پدیدهٔ پیزوالکتریک یا اثر فشاربرقی است. با اعمال نیروی خارجی، دوقطبی‌های این سرامیک‌ها تحریک می‌شوند و میدان الکتریکی ایجاد می‌شود. در واقع اثر پیزوالکتریک عبارت است از توانایی برخی مواد برای تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی و برعکس. این اثر را برادران پی‌یر و ژاک کوری، در دههٔ ۱۸۸۰ م کشف کردند. موادی که این پدیده را از خود نشان می‌دهند مواد پیزوالکتریک نامیده می‌شوند. در واقع در پدیدهٔ پیزوالکتریک بار الکتریکی درون یک ماده در اثر اعمال فشار از آن ماده جدا می‌شود. این جدایی بار به‌طور مؤثر یک میدان الکتریکی داخل ماده ایجاد می‌کند [۱].

۲-۱. اثر پیزوالکتریک مستقیم و معکوس

وقتی مادهٔ پیزوالکتریکی تحت تأثیر نیروی مکانیکی به‌صورت فشاری یا کششی قرار گیرد، مقداری بار الکتریکی در سطح آن ظاهر می‌شود. این بار الکتریکی که در اثر نامتقارن بودن سلول یک واحد کریستال وجود دارد، به تولید میدان الکتریکی و پتانسیل الکتریکی منجر می‌شود. به این اثر پیزوالکتریک مستقیم گویند. حال اگر درپی اعمال میدان الکتریکی تغییرات مکانیکی در ساختار سرامیک رخ دهد، این پدیده را اثر پیزوالکتریک معکوس گویند. هر دو اثر فوق کاربردهای متفاوت و فراوان دارند [۱].

۲-۲. مواد پیزوالکتریک

در بیشتر مولدهای پیزوالکتریک که ساخته و تست شده‌اند از برخی انواع تیتانات زیرکونات سرب[۴] استفاده شده است. به‌طور معمول، زیرکونات‌های سرب به‌دلیل دارابودن ضریب پیزوالکتریک و ثابت دی‌الکتریک بزرگ مورد استفاده واقع می‌شود. این خواص برای یک شتاب ورودی مشخص، امکان تولید قدرت بیش‌تری را فراهم می‌کند [۱-۲]. مادهٔ دیگر، که البته کمتر به‌کار می‌رود،

نیترید آلومینیوم[5] است که دارای ضریب پیزوالکتریک و ثابت دی‌الکتریک کوچکتری است. نیترید آلومینیوم با فرایندهای[6] CMOS استاندارد که برای ساخت مدارهای مجتمع به‌کار می‌رود سازگاری دارد [۳].

۲-۳. کاربردهای پیزوالکتریک

با کشف مواد جدید که خاصیت پیزوالکتریک را در شرایط متفاوت تولید می‌کنند، عرصهٔ کاربردهای پیزوالکتریک روبه پیشرفت است. برخی از کاربردهای این پدیده عبارت‌اند از: مبدل انرژی ارتعاشی به انرژی الکتریکی، مبدل انرژی صوتی به انرژی الکتریکی و برعکس در دیسک‌های صوتی، گرامافون‌های قدیمی، میکروفن، بلندگو، زنگ اخبار و جز این‌ها. کنترل امواج الکتراسونیک در دریافت و انتقال امواج الکتراسونیک، تولید ولتاژ و جرقه با ولتاژ بالا، بیوحسگرهای پزشکی، میکروروبات‌های ریز و موتورهای در مقیاس کوچک و استفاده از نانوذرات پیزوالکتریک (نانوذرات سرامیک‌های خاص) در ایجاد خواص الکتریکی یک سطح. در سال‌های اخیر کاربرد مواد پیزوالکتریک بیشتر تحت سه عنوان حسگر، مبدل و محرک شناخته شده است [۴-۵] که در ادامه بررسی می‌شوند.

۲-۳-۱. حسگرهای پیزوالکتریک

یک حسگر پیزوالکتریک می‌تواند با استفاده از اثر پیزوالکتریک مستقیم، اطلاعات را از محدودهٔ مکانیکی به یک سیگنال الکتریکی قابل پردازش تبدیل کند. سیگنال الکتریکی تولیدشده پس از اعمال اولیهٔ نیرو، به سرعت کاهش می‌یابد. بنابراین این حسگرها برای اندازه‌گیری نیروهایی که در مدت زمان کوتاهی اعمال می‌شوند، بسیار مناسب‌اند، اما برای اندازه‌گیری نیروهای استاتیکی مناسب نیستند.

۲-۳-۲. مبدل‌های پیزوالکتریک

مبدل پیزوالکتریک وسیله‌ای است که یک نوع انرژی را به نوع دیگر تبدیل می‌کند. مبدل‌های پیزوالکتریک در تست‌های غیرمخرب[7] و در بسیاری از کاربردها که نیاز به اندازه‌گیری دقیق در حرکت یا نیرو دارند، استفاده می‌شود. در این کاربردها اثر پیزوالکتریک به‌صورت معکوس عمل می‌کند. در این حالت ولتاژی به ماده‌ی پیزوالکتریک اعمال می‌شود که باعث تغییر شکل در مادهٔ پیزوالکتریک می‌شود. این تغییر شکل که می‌تواند به‌صورت کشش یا فشار باشد، با ولتاژ اعمال شده متناسب است.

۲-۳-۳. محرک‌های پیزوالکتریک

اعمال ولتاژ الکتریکی به جسم پیزوالکتریک سبب تغییر شکل در این جسم می‌شود و میزان این تغییر شکل به ولتاژ اعمالی و جهت آن بستگی دارد. هنگامی که از این خاصیت برای ایجاد تغییر شکل در مادهٔ پیزوالکتریک استفاده شود، سیستم به‌عنوان محرک شناخته می‌شود. در واقع محرک‌های پیزوالکتریک شکلی از یک سیستم الکترومکانیک میکروکنترلی هستند که میدان الکتریکی اعمال‌شده به آنها می‌تواند به حرکت‌هایی در ابعاد میکرومتر یا نانومتر تبدیل شود.

۲-۳-٤. برداشت انرژی

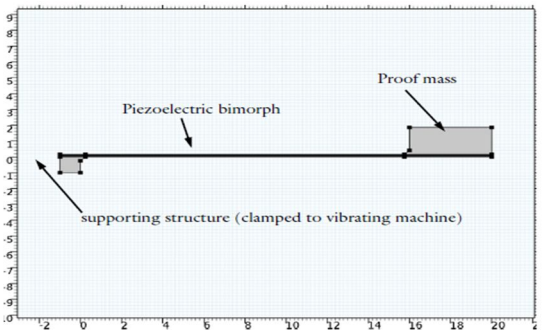
یکی از کاربردهای مواد پیزوالکتریک، که در سال‌های اخیر توجه محققان زیادی را به‌خود جلب کرده است، تبدیل انرژی ناشی از ارتعاشات مکانیکی توسط این مواد، به انرژی الکتریکی است. در واقع با اعمال تنش به این مواد و ایجاد کرنش در آنها، انرژی الکتریکی تولید می‌شود. این سیگنال الکتریکی تولیدشده یا به‌طور مستقیم و یا پس از تقویت مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ویژگی مواد پیزوالکتریک تاکنون در زمینه‌های متفاوتی به‌کار گرفته شده است که از جمله می‌توان به برداشت انرژی مکانیکی تلف شده ناشی از حرکت بدن انسان، برداشت انرژی ناشی از ارتعاشات ماشین‌آلات و یا برداشت انرژی ناشی از ارتعاشات سازه اشاره کرد. از جمله مواردی که از انواع حرکت بدن انسان انرژی قابل برداشت است می‌توان به این موارد اشاره کرد، حرکت عضلات پشت انسان هنگام راه‌رفتن که نمونهٔ برداشت آن توسط قطعهٔ پیزوالکتریک تعبیه‌شده در کوله‌پشتی ساخته شده است [۴]، حرکت عضلات شکم هنگام تنفس که توسط کمربندی از جنس مواد پیزوالکتریک قابل برداشت است [۵]، حرکت پاها حین راه‌رفتن که با قراردادن مادهٔ پیزوالکتریک در کفش انسان قابل استحصال است [۶]، حرکت انگشتان دست [۷] و بسیاری موارد دیگر اشاره کرد [۸].

در مطالعهٔ حاضر برداشت انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. هندسهٔ سازه یک پیزوالکتریک bimorph است که از یک طرف محکم شده و در طرف دیگر یک تودهٔ جرمی روی آن نصب شده است. داخل تیر و روی سطوح خارجی آن الکترودهایی جاسازی شده است. بار خارجی به‌صورت توان مکانیکی ورودی اعمال می‌شود عکس العمل سیستم در قالب ولتاژ تولیدی و توان

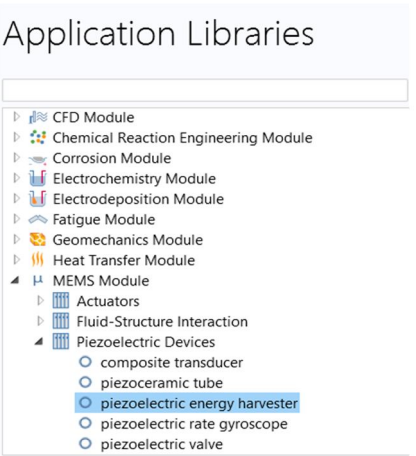
الکتریکی خروجی بررسی می‌شود. شکل ۱ این مدل را نشان می‌دهد.

۳. معرفی نرم‌افزار کامسول و ماژول برداشت انرژی

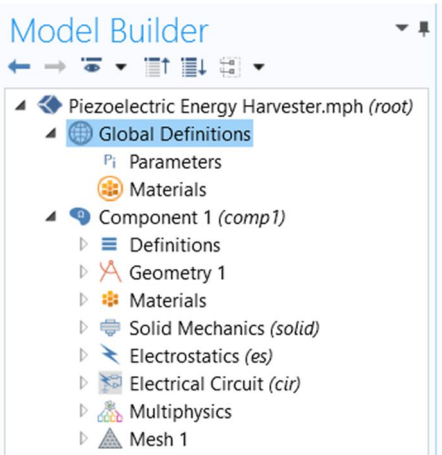
نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیکس[۸] یک مجموعهٔ کامل شبیه‌سازی است که می‌تواند معادلات دیفرانسیل سیستم‌های غیرخطی را توسط مشتق‌های جزئی به روش اجزای محدود در فضاهای یک، دو و سه‌بعدی حل کند. ماژول‌های نرم‌افزار کامسول به شش بخش کلی تقسیم می‌شوند: چندمنظوره، سطوح مشترک، شیمیایی، سیالات، مکانیکی و الکتریکی. شبیه‌سازی پدیدهٔ پیزوالکتریک در مطالعهٔ حاضر با استفاده از ماژول برداشت انرژی پیزوالکتریک طبق مسیر شکل ۲ انجام شده است. پس از انتخاب دیمانسیون صفحهٔ بعدی مربوط به انتخاب فیزیک باز شده که بعد از انتخاب، عبارت Add را فعال کرده، برای انتخاب آنالیز مدل در Model Wizard آنالیز مورد نظر را براساس اینکه تحلیل خروجی در حوزهٔ زمان یا فرکانس، پاسخ حالت دائمی و غیره باشد انتخاب می‌شود. بعد از تعریف مدل نوبت به معرفی Model Builder و ساختن مدل با انتخاب ۴ شاخهٔ اصلی آن می‌رسد. تعریف‌های سراسری از جمله پارامترها، متغیرها، توابع و غیره در شاخه Global Definition، اجزای مدل شامل تعریف، شکل هندسی، مواد، فیزیک و مش در شاخه‌های Component، تمام گام‌های آنالیز و تحلیل‌گر مدل در شاخه Study صورت می‌گیرد و در نهایت خروجی‌ها عبارتند از جداول و تمام مقادیر به‌دست آمده در شاخهٔ Results.



شکل ۱. هندسهٔ مدل [۹]



شکل ۲. دسترسی به فایل آموزشی و ماژول پیزوالکتریک [۹]



شکل ۳. شاخه‌های اصلی و فرعی در Model Builder [۹]

در این مرحله، مطابق شکل ۴، ابعاد مدل و پارامترهای متغیر وارد می‌شود. پارامترهای متغیر شامل شتاب (acc)، بار (Load) و پهنای صفحه تیر (w) هستند که در ادامهٔ تأثیر تغییرات برخی از این پارامترها بر توان خروجی بررسی می‌شود.

در مدل‌های کامسول می‌توان یک یا چند ماده را از شاخه متریال به مدل خود اضافه کرد. شکل ۶ مسیر اضافه‌کردن مواد به مدل را نشان می‌دهد. زمانی که المانی جدید در Model Builder ایجاد می‌شود، زیرشاخه‌ای با عنوان Mesh 1 در این پنجره ظاهر می‌شود. می‌توان توزیع اندازهٔ المان‌های مش را همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده‌است، مشاهده کرد. شبیه‌سازی با استفاده از مش‌بندی‌های مختلف با انواع توزیع‌های موجود در نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیکس نتایج یکسانی برای

همه حالت‌ها به‌دست می‌دهد و تمامی نتایج از مش‌بندی و توزیع آن مستقل هستند. شکل ۶ تنش وارده به سیستم در اثر اعمال بار را نشان می‌دهد. سه نوع تحلیل برای مدلسازی سیستم برداشت انرژی پیزوالکتریک وجود دارد: توان خروجی به‌عنوان تابعی از فرکانس ارتعاش، توان خروجی به‌عنوان تابعی از بار الکتریکی و توان خروجی و ولتاژ برق مستقیم به عنوان تابعی از شتاب. نتایج نشان می‌دهد که میزان ولتاژ الکتریکی و توان الکتریکی برداشتی از ارتعاشات وارد بر یک ماده پیزوالکتریک به میزان فرکانس ارتعاش بستگی دارد. بیشترین برداشت انرژی الکتریکی در نزدیکی فرکانس تشدید رخ می‌دهد. البته در سایر فرکانس‌ها نیز انرژی مناسبی قابل برداشت است که برای کاربردهای مصرف پایین و جایگزینی بعضی باتری‌ها قابل کاربرد است.

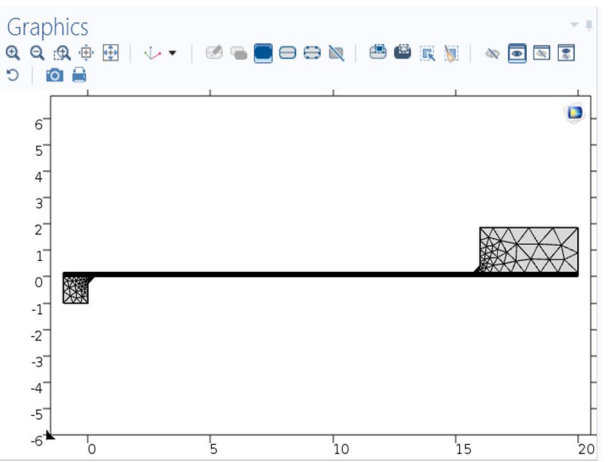
Settings

Parameters

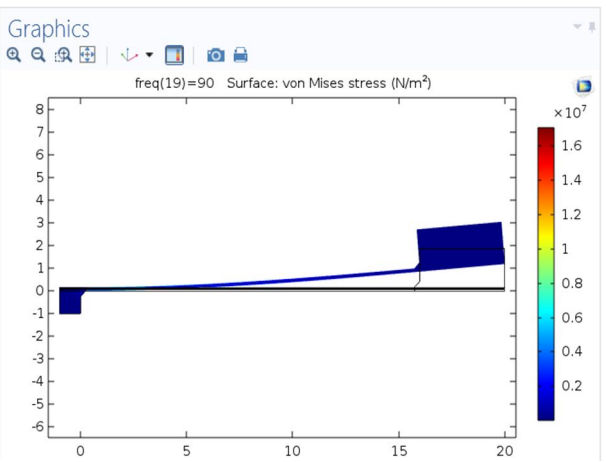
Parameters

Name	Expression	Value	Description
acc	1	1	Acceleration (g)
R_load	12 [kohm]	12000 Ω	Load resistance
w_plate	14 [mm]	0.014 m	Out of plane dimension

شکل ۴. واردکردن پارامترهای متغیر [۹]



شکل ۵. توزیع اندازهٔ المان‌های مش [۹]



شکل۶. نمایش تنش وارده در اثر اعمال بار [۹]

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت استفاده از منابع متنوع انرژی و همچنین برخی کاربردهای خاص، برداشت انرژی از ارتعاشات در فرکانس‌های مختلف با بهره‌گیری از پدیدهٔ پیزوالکتریک مورد توجه قرار دارد. پدیدهٔ پیزوالکتریک و اثر مستقیم و معکوس آن در این مطالعه معرفی شدند و همچنین نرم‌افزار محاسباتی کامسول مولتی فیزیکس، که براساس روش حجم محدود عمل می‌کند، به‌صورت کلی معرفی شده، ماژول برداشت انرژی پیزوالکتریک به‌صورت گام به گام آموزش داده شده است. تیر یک‌سر گیرداری از جنس مادهٔ پیزوالکتریک شبیه‌سازی و بررسی شده است. ولتاژ الکتریکی و توان الکتریکی برداشتی از ارتعاشات وارد بر یک مادهٔ پیزوالکتریک به‌میزان فرکانس ارتعاش وابسته است. برداشت انرژی الکتریکی بیشینه در نزدیکی فرکانس تشدید اتفاق می‌افتد. در فرکانس‌های دیگر نیز مقداری انرژی قابل برداشت است که برای کاربردهایی با مصرف پایین موضوعیت دارد. با توجه به کاربردهای متنوعی که برای این پدیده وجود دارد در تحقیقات آینده می‌توان نمونه‌ای از سیستم برداشت انرژی پیزوالکتریک را به‌صورت آزمایشگاهی تولید کرد تا از انرژی راه رفتن انسان برای تأمین انرژی دستگاه تشخیص سلامت سیستم عصبی پای بیماران دیابتی جهت جلوگیری از ایجاد زخم پای دیابتی استفاده شود. همچنین می‌توان بازهٔ مواد پیزوالکتریک انتخابی را گسترش داد و مواد نوینی را آزمود.

۵. مآخذ

[1] D. Poria, R. Sharma, D. Rohilla, Pandey, Modeling and Simulation of Vibration Energy Harvesting of MEMS Device Based on Epitaxial Piezoelectric Thin Film, *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, Vol. 2, No. 10, pp. 231-238, 2012.

[2] M. Marzencki, S. Basrour, B. Charlot, A. Grasso, M. Colin, L. Valbin, Design and fabrication of piezoelectric micro power generators for autonomous Microsystems, *Proc.Symp. on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS DTIP05,* pp. 299- 302, 2005.

[3] J. W. Sohn, S. B. Choi, and D. Y. Lee, an investigation on piezoelectric energy harvesting for MEMS power sources, *Department of Mechanical Engineering,* Inha University, Incheon, Korea13 January 2005.

[4] J. Feenstra, J. Granstrom, H. Sodano, Energy Harvesting through a Backpack Employing a Mechanically Amplified Piezoelectric Stack, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 22, pp. 721–734, 2016.

[5] P. Glynne-Jones, M. J. Tudor, MEMS Mechanical Sensors, *Sensors and Actuators*, Vol. 110, pp. 344-352, 2014.

[6] D. Han, V. Kaajakari, Microstructured Polymer for Shoe Power Generation, *Institute for Micromanufacturing (IfM), IEEE, Transducers*, Denver, CO, USA, June 21-25, 2009.

[7] R. Yang and Y. Qin, Converting Biomechanical Energy into Electricity by a Muscle-Movement-Driven Nanogenerator, *Nano letters,* Vol. 9, No. 3, pp. 1201-1205, 2015.

[8] H. Abdi, Human Passive Motion and a User-friendly Energy Harvesting System, *Intelligent Material Systems and Structures,* Vol. 23, pp. 209-216, 2009.

[9] COMSOL. Multiphysics 5.1Software,Version number:5.1.0.145.

پی‌نوشت

1. COMSOL MultiPhysics
2. MEMS
3. Lead zirconate titanate
4. Lead zirconate titanate
5. Aluminium nitride
6. Complementary metal oxide semiconductor
7. Non-destructive testing (NDT)
8. COMSOL Multiphysics