

مبدل آکوستیک - الکتریک با جمع کننده الگوبرداری شده از گوش

امیر پناهی	علیرضا حسن زاده	علی مولوی*
کارشناسی ارشد، مهندسی برق	استادیار، مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق،	کارشناسی ارشد، مهندسی برق
دانشگاه شهید بهشتی، تهران	دانشگاه شهید بهشتی، تهران	دانشگاه شهید بهشتی، تهران
am.panahi@mail.sbu.ac.ir	a_hassanzadeh@sbu.ac.ir	a.moulavi@mail.sbu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۱۱

چکیده

امروزه به دلیل دسترسی محدود به بعضی نقاط و یا شرایط نامساعد آب و هوایی انتقال توان از نیروگاه و ذخیره سازی در باطری بسیار پرهزینه است. این امر باعث شده تا محققان راهی برای حل این مشکل پیدا کنند، بنابراین استفاده از انرژی محیطی^۱ از جمله نوفه، حرکت (یا جابه جایی)، نور، باد، و غیره توانسته باب جدیدی به روی مهندسان باز کند. در این مقاله یک صفحه پیزوالکتریک با الگوبرداری از پرده گوش انسان طراحی و شبیه سازی شده است. این صفحه یکی از اجزا مبدل آکوستیک-الکتریک است که قادر به جمع آوری نوفه محیط های شلوغ و پر تردد و تبدیل آنها به انرژی الکتریکی است. با ضبط و تحلیل سیگنال های صوتی دو مکان با آلودگی بالا در نرم افزار متلب^۲، دو فرکانس که بیشترین وزن صدا در آنها رخ داده بود، به عنوان فرکانس تشدید در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از نرم افزار کامسول^۳ و داده های به دست آمده، فرکانس طبیعی مد اول هندسه مبدل، برابر با فرکانس تشدید صوت قرار داده شده است. قطر بهینه صفحه پیزوالکتریک ۸ سانتی متر انتخاب شد و انرژی معادل با ۱۰/۵ میکرووات بر ثانیه و تغییرات ولتاژی برابر ۱۲ ولت به دست آمد. جهت ذخیره و استفاده از ولتاژ به دست آمده، مداری به همین منظور ارائه شده است.

واژگان کلیدی: آلودگی صوتی، مبدل آکوستیک-الکتریک، پیزوالکتریک، پرده گوش آکوستیک-الکتریک، انرژی سبز

۱. مقدمه

در جدول ۱ تعدادی از فرکانس های پایین و آستانه شنیداری آنها آورده شده است. بررسی روند آلودگی صوتی به ما نشان می دهد که با تولید روزافزون علم و صنعتی شدن جوامع، این آلودگی نیز افزایش پیدا کرده است.

در روزگاری که در آن به سر می بریم؛ آلودگی، یک عنصر جداناپذیر از آن است که آلودگی صوتی یکی از موارد آن به حساب می آید. در جهت کاهش آلودگی صوتی سازمان های بین المللی، قوانین و مقرراتی را وضع کرده اند.

در پژوهشی که در سال ۲۰۰۴ در شهر هنگ کنگ صورت گرفت؛ از بین ۴۰۶ اندازه‌گیری نوفه در ۶ پارک شهری و فضای باز، ۲۵۹ مورد آن سطح فشار صدایی بیشتر از ۵۵ دسی‌بل داشتند که از این تعداد ۱۰۸ مورد بالاتر از ۶۵ دسی‌بل بوده است [۱]. این معضل باعث شده که توجه محققین به تولید برق از صدا و آلودگی صوتی جلب شود. در چند سال اخیر، مبحث دریافت انرژی^۴ بسیار پر طرفدار

شده و پژوهشگران زیادی از رشته‌های مکانیک، فیزیک، برق، مواد و ... به دنبال روش‌ها و مواد جدید هستند تا روش‌های قدیمی را بهبود بخشند. روش‌های مختلف برای دریافت انرژی الکتریکی از تغییرات مکانیکی وجود دارد. از جمله این روش‌ها می‌توان به القای الکترومغناطیس، الکترواستاتیک، پیزوالکتریک، تریبوالکتریک و ... اشاره کرد [۲].

جدول ۱. آستانه شنیداری انسان در محدوده فرکانس‌های فرصوت و فرکانس‌های پایین [۳]

فرکانس (Hz)	۴	۸	۱۰	۱۶	۲۰	۲۵	۴۰	۵۰	۸۰	۱۰۰	۱۲۵	۱۶۰	۲۰۰
سطح فشار صدا (dB)	۱۰۷	۱۰۰	۹۷	۸۸	۷۹	۶۹	۵۱	۴۴	۳۲	۲۷	۲۲	۱۸	۱۴

۲. معادلات ریاضی

فشار ناشی از حرکت نوسانات مولکول‌ها در هوا که به گوش انسان و حیوان وارد می‌شود را فشار صوت می‌گویند؛ واحد این فشار پاسکال^۶ است. تراز فشار صوت^۷ با استفاده از رابطه ۱ به دست می‌آید.

$$\text{SPL} = 20 \log \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (1)$$

که در اینجا SPL سطح فشار صوت بر حسب dB، P_0 فشار صوت و P فشار صوت (۲۰ میکروپاسکال) است.

$$V = \frac{d_{33} \cdot d}{e_{33} \cdot A} \cdot F \quad (2)$$

در اینجا V ولتاژ، d_{33} و e_{33} ثابت پیزوالکتریک هستند که مقادیر آنها در جدول ۲ بر گرفته از مشخصات ماده PVDF در نرم‌افزار کامسول ورژن ۵/۴ آورده شده است و به ترتیب دارای یکای کولن بر نیوتن و فاراد بر متر [۱۱]، d ضخامت لایه پیزوالکتریک بر حسب متر، A مساحت سطح پیزوالکتریک بر حسب متر مربع و F نیرو وارده به پیزوالکتریک که واحد آن نیوتن است.

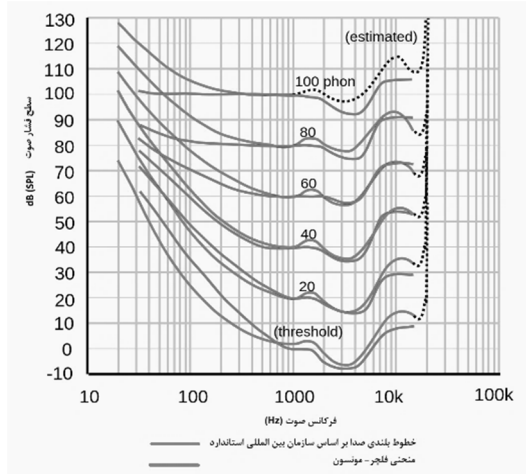
از پیزوالکتریک بیشتر برای کاربردهای مکانیکی استفاده می‌شود اما این ماده قادر است تنش‌های مکانیکی را به الکتریسیته نیز تبدیل کند [۴-۷]. ابتدا از کریستال‌های پیزوالکتریک استفاده می‌شد و سپس موادی با قابلیت‌های پیزوالکتریکی بیشتر [۵، ۷] عرضه شد و در سال‌های اخیر از مولدهای مبتنی بر نانوساختارها برای تبدیل انرژی حاصل از ارتعاشات مکانیکی (مانند جریان خون و باد و آب، پلک زدن، حرکت اندام‌ها و ...) به انرژی الکتریکی استفاده می‌شود [۶].

در کارهای دیگر برای تولید دیوارهای عایق صوت از روش‌های الکترومغناطیس [۸] و تبدیل فشار صوت به الکتریسیته از روشی معروف به تریبوالکتریک^۵ [۹، ۱۰] استفاده می‌کنند. پژوهشگران به تازگی به دنبال بهبود بخشیدن به این روش یا تغییر ساختارهای هندسی آنها هستند و در این کار نیز به نتایج خوب و سودآوری رسیده‌اند [۱۰].

در بخش دوم این مقاله تعاریف و فرمول‌های مرتبط با بحث نوشته شده است، در بخش سوم ساختار مبدل آکوستیک-الکتریک پیشنهادی و مدار رابط پیزوالکتریک و بخش انتهایی بحث و نتیجه‌گیری آورده شده است.

جدول ۲. مقادیر پارامترهای به کار رفته در مقاله

ثابت پیزوالکتریک (PVDF)	e_{33}	$-0.027 \frac{F}{m}$
	d_{33}	$-33.8e^{-12} \frac{C}{N}$
ضخامت (میلی متر)	d	۰/۱
مساحت (متر مربع)	A	۰/۰۴
نیرو (نیوتن)	F	۲



شکل ۱. تغییرات خطوط بلندی صدا [۱۴]

۳. مبدل آکوستیک-الکتریک پیشنهادی

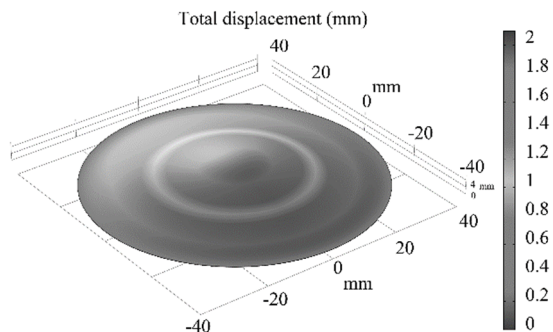
۳-۱. هندسه مبدل

در این پژوهش سعی شده است با الگو گرفتن از نحوه عملکرد گوش انسان یک مبدل آکوستیک-الکتریک طراحی شود. گوش از سه بخش خارجی، میانی و داخلی تشکیل شده است. گوش خارجی وظیفه جمع‌آوری اصوات و متمرکز کردن آنها بر روی پرده گوش را دارد. پرده گوش غشایی است که به وسیله اصوات با فرکانس‌های مختلف مرتعش می‌شود.

ساختار پیشنهادی مبدل آکوستیک-الکتریکی که در این مقاله ارائه شده است؛ از یک لایه پیزوالکتریک PVDF^۹ مانند شکل ظاهری پرده گوش استفاده می‌کند که از شروط مرزی آن ثابت بودن از لبه خارجی و اعمال فشار به سطح رویی آن است. ضخامت صفحه پیزوالکتریک ۰/۱ میلی‌متر و شعاع آن برای محاسبه بهترین فرکانس طبیعی، متغیر انتخاب شده است. فرکانس طبیعی، همان‌طور که از نام آن پیداست، فرکانسی است که در آن سیستم تمایل به بیشترین نوسان را دارد. به دست آوردن این فرکانس در نقطه بهینه منجر به بالاترین ولتاژ و توان در مبدل‌های انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی می‌شود.

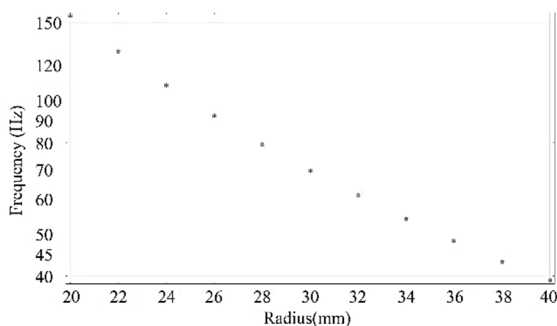
عاملی که در حساسیت شنوایی تأثیر دارد، فرکانس صوت است. همان‌طور که در شکل ۱ نمایش داده شده است قدرت شنوایی انسان با فرکانس تغییر می‌کند و دستگاه‌های اندازه‌گیری به گونه‌ای طراحی شده‌اند که از فیلتر منطبق با شنوایی انسان بهره می‌برند. این فیلتر به نام منحنی توزین "A" برای اندازه‌گیری سطح صدا، ابداع شده است. صدای وزنی توسط منحنی "A" به درک گوش انسان نزدیک می‌شود و مقدار آن با واحد dB(A) بیان می‌شود. طبق این منحنی توزین گوش انسان در بازه فرکانسی ۵۰۰ هرتز تا ۶ کیلوهرتز حساسیت بیشتری دارد. به مقدار سطح فشار صوت در فرکانس ۱ کیلوهرتز فون^۸ گفته می‌شود [۱۲]. به‌طور مثال اگر سطح فشار صوتی در فرکانس ۱ کیلوهرتز برابر ۵۰ dB باشد، فون سیگنال برابر ۵۰ خواهد بود. برخی از مقدارهای سطح صدای معادل (L_{eq}) عمومی [۱۳]:

- $L_{eq} \leq 30\text{dB(A)}$ - اتاق خواب
- $L_{eq} \leq 35\text{dB(A)}$ - کلاس درس، کتابخانه، محل‌های درمانی
- $L_{eq} \approx 65\text{dB(A)}$ - دفتر کار با مکالمات عادی
- $L_{eq} \approx 75\text{dB(A)}$ - خیابان با ترافیک شدید در محدوده اندازه‌گیری
- $L_{eq} \approx 85\text{dB(A)}$ - خیابان با کامیون‌های سنگین که از فاصله ۶ متری عبور می‌کند.



شکل ۴. نمای سه بعدی از هندسه مبدل آکوستیک-الکترونیک

(شکل مد اول)



شکل ۵. نمودار فرکانس طبیعی برحسب شعاع در محدوده

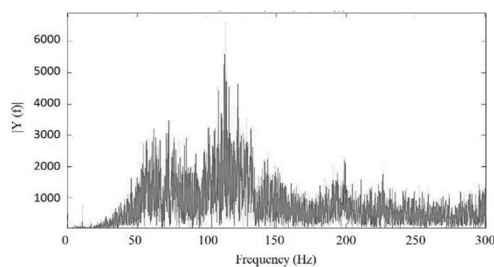
شعاعی ۲۰ تا ۴۰ میلی متر

در شکل ۵ فرکانس طبیعی هندسه مبدل در یازده قطر مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است؛ که فرکانس ۴۰ هرتز در شعاع ۴ سانتی متر و فرکانس ۱۱۵ در شعاع ۲/۴ سانتی متر رخ داده است. در نتیجه بیشترین تولید انرژی الکتریکی برای محیط مجموعه آبی در قطر ۸ سانتی متر و برای محیط خیابان پر تردد (میدان تجریش تهران) در قطر ۴/۸ سانتی متر خواهد بود. با استفاده از رابطه ۲ تغییرات ولتاژ خروجی بر حسب تغییرات شعاع صفحه پیزوالکتریک محاسبه می شود. در شکل ۶ منحنی تغییرات انرژی ذخیره شده بر حسب تغییرات شعاع صفحه پیزوالکتریک توسط نرم افزار کامسول شبیه سازی و آورده شده است.

همان طور که قابل مشاهده است، بیشترین انرژی با شعاع ۴۰ میلی متر (قطر ۸ سانتی متر) برابر ۱۰/۵ میکرووات (معادل توان تولیدی ۱۰/۵ میکرووات در ثانیه) است. توان تولیدی رابطه مستقیم با مقدار ماده پیزوالکتریک و فشار

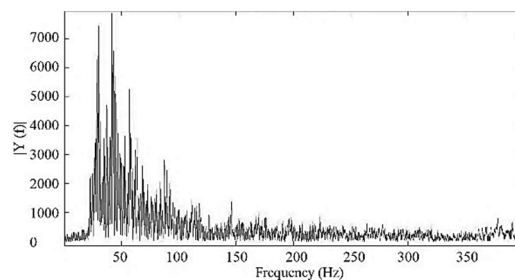
صوت دو مکان پر نوفه به عنوان نمونه با حالت کیفیت بالا و استریو^{۱۰} (بدون فشرده سازی، ۱۶ bit / ۴۴/۱ kHz) در یک روز به صورت اتفاقی و در مدت ۱۲۰ دقیقه ضبط شده است و پس از تحلیل و آنالیز FFT در شکل ۲ و شکل ۳ آورده شده است.

در شکل ۴ هندسه مبدل شبیه سازی شده در نرم افزار کامسول نمایش داده شده است. از تحلیل FFT استفاده شده تا فرکانس بیشترین وزن صدا تعیین شود. حال کافی است فرکانس طبیعی مد^{۱۱} اول را منطبق بر فرکانس تشدید صوت در نظر گرفت. ثابت بودن حاشیه صفحه دایره ای شکل به عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته شده است. در این فرکانس، بیشترین توان تولیدی حاصل می شود. یکی از پارامترهایی که باید نسبت به فرکانس صوت بهینه شود؛ ابعاد پیزوالکتریک است. در شکل ۵ تغییرات فرکانس طبیعی هندسه مبدل در شعاع های مختلف آورده شده است.



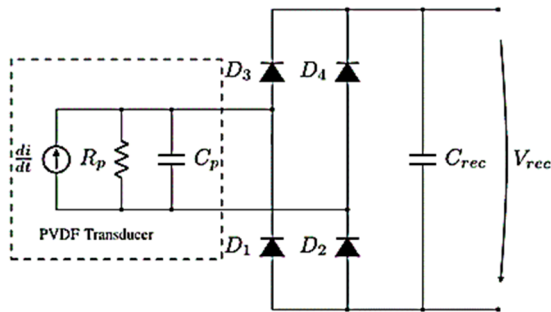
شکل ۲. تبدیل فوریه سریع صوت میدان تجریش تهران.

بیشترین وزن صدا در فرکانس ۱۱۵ هرتز اتفاق افتاده است.



شکل ۳. تبدیل فوریه سریع صوت مجموعه آبی دانشگاه شهید بهشتی. بیشترین وزن صدا در فرکانس ۴۰ هرتز اتفاق افتاده است.

شکل ۸، مدل پایه مدار مبدل پیزوالکتریک با مدار مبدل AC-DC برای کاربردهای گسترده ارائه شده است.



شکل ۸. شماتیک مبدل پیزوالکتریک به همراه مبدل AC-DC

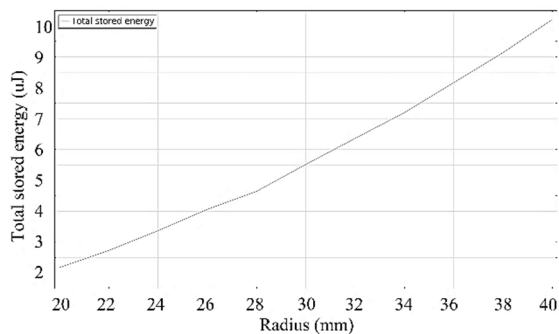
در شکل ۸ شماتیک مبدل آکوستیک-الکتریک با استفاده از یک منبع جریان، مقاومت R_p و خازن C_p نمایش داده شده است. مقاومت و خازن به ترتیب بیانگر مقاومت نشتی و خازن داخلی ماده پیزوالکتریک است. مقاومت نشتی مقدار بزرگی دارد و خازن پیزوالکتریک وابسته به ابعاد هندسه ماده است. از آنجایی که خروجی مواد پیزوالکتریک، سیگنالی شبه ضربه‌ای است، نیاز است از یک مدار یکسوساز که در شکل ۸ با چهار عدد دیود (پل دیودی) نمایش داده شده، استفاده کرد. یکسوساز وظیفه مستقیم کردن جریان تولید شده توسط پیزوالکتریک را دارد. با استفاده از یک خازن موازی در خروجی (C_{rec})، می‌توان ولتاژ خروجی را یکنواخت و صاف کرد. سیگنال خروجی بعد از یکنواخت شدن قابلیت ذخیره در باتری و استفاده مستقیم توسط دستگاه‌های الکتریکی را دارد.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

آلودگی صوتی، دیگر شکل آلودگی‌های محیطی است. صنعتی شدن جوامع و همچنین افزایش جمعیت از عوامل عمده در ایجاد آلودگی در شهرها بوده است.

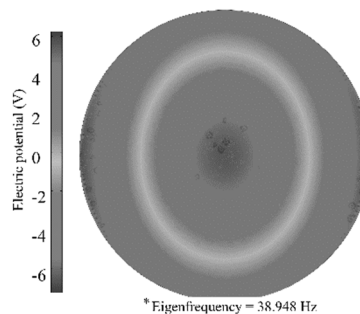
بررسی‌های متعددی نشان می‌دهد که وجود فضاهای باز و پارک‌ها نیز توانسته‌اند از حجم آلودگی صوتی بکاهند از این‌رو تا زمانی که یک راه حل واحد برای کاهش این

وارد به آن دارد، به طوری که هر چه فشار صوت بیشتری به صفحه برخورد کند؛ توان تولیدی افزایش پیدا می‌کند. در شکل ۷ بیشترین تغییرات ولتاژ در حاشیه و مرکز صفحه اتفاق می‌افتد (مناطق تیره رنگ) و بیشترین و کمترین ولتاژ تولیدی به ترتیب برابر ۶ و -۶ ولت خواهد بود (نوار روشن بیانگر نقاط با پتانسیل صفر ولت است).



شکل ۶. منحنی تغییرات انرژی ذخیره شده بر حسب تغییرات

شعاع صفحه پیزوالکتریک.



شکل ۷. تغییرات ولتاژ سطح پیزوالکتریک در فرکانس نزدیک ۴۰

هرتز

۲-۳. مدار رابط برای دریافت انرژی

پیزوالکتریک

استفاده از مواد پیزوالکتریک به دلیل سادگی در مدل‌سازی و نظارت مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. دانشمندان علوم شیمی و مواد در پژوهش‌های جدید خود، به مواد و ساختارهای بهینه‌تر و پربازده‌تری از مواد پیزوالکتریک دست یافته‌اند [۶،۷،۱۰]. با این حال بسیاری از مهندسين الكترونيك به دنبال مدارهایی با بازدهی بهتر هستند. در

آلودگی معرفی و پیاده‌سازی شود؛ می‌توان با تبدیل آلودگی صوتی به انرژی الکتریسیته در جهت تأمین انرژی سنسورها و دستگاه‌های مخابراتی کم‌توان بهره برد. در این مقاله با الهام گرفتن از سازوکار عملکرد گوش انسان و مواد پیزوالکتریک پربازده، سیستمی پیشنهاد شده است که آلودگی صوتی را دریافت و به انرژی الکتریکی تبدیل کند. ابتدا با بررسی و انتخاب محل‌هایی با نوفه صوتی، تحلیل نمونه‌های صوتی در نرم افزار متلب و طراحی هندسه مبدل آکوستیک-الکتریک برای فرکانس خاص در نرم‌افزار کامسول، انجام و شبیه‌سازی شد. قطر بهینه صفحه پیزوالکتریک در محیط‌های آبی نظیر استخرهای سرپوشیده

معادل ۸ سانتی‌متر و در خیابان‌های پر تردد معادل ۴/۸ سانتی‌متر به دست آمد. بیشترین انرژی تولیدی ۱۰/۵ میکروژول (۱۰/۵ میکرووات در ثانیه) و بیشترین ولتاژ برابر ۶ ولت و کمترین ولتاژ برابر ۶- ولت است. در نهایت یک نمونه ساده از مدار رابط پیزوالکتریک آورده شد که سیگنال شبه ضربه‌ای پیزوالکتریک را به سیگنال ثابت DC تبدیل می‌کند تا قابل استفاده برای دستگاه‌های کم‌توان و همچنین ذخیره‌سازی در باطری باشد. می‌توان در آینده با تلفیق چند روش برداشت انرژی با یکدیگر به عملکردی بهتر دست یافت و توان بیشتری از آلودگی صوتی دریافت کرد.

۵. مآخذ

- [1] Lam, Kin-Che, Sai-Leung Ng, Wing-Chi Hui, and Pak-Kin Chan, "Environmental quality of urban parks and open spaces in Hong Kong", *Environmental monitoring and assessment*, 2005, Vol.111, no.1-3, pp.55-73.
- [2] Wang, Zhong Lin, "On Maxwell's displacement current for energy and sensors: the origin of nanogenerators", *Materials Today*, 2017, Vol.20, no.2, pp.74-82.
- [3] Leventhall, Geoff, Peter Pelmar, and Stephen Benton, "A review of published research on low frequency noise and its effects", 2003.
- [4] Cha, Seung Nam, Ju-Seok Seo, Seong Min Kim, Hyun Jin Kim, Young Jun Park, Sang-Woo Kim, and Jong Min Kim, "Sound-driven piezoelectric nanowire-based nanogenerators", *Advanced materials*, 2010, Vol.22, no.42, pp.4726-4730.
- [5] Lee, Ju-Hyuck, Keun Young Lee, Brijesh Kumar, Nguyen Thanh Tien, Nae-Eung Lee, and Sang-Woo Kim, "Highly sensitive stretchable transparent piezoelectric nanogenerators", *Energy & Environmental Science*, 2013, Vol.6, no.1, pp.169-175.
- [6] Manjula, Y., R. Rakesh Kumar, P. Missak Swarup Raju, G. Anil Kumar, T. Venkatappa Rao, A. Akshaykranth, and P. Supraja, "Piezoelectric flexible nanogenerator based on ZnO nanosheet networks for mechanical energy harvesting", *Chemical Physics*, 2020, Vol.533, p.110699.
- [7] Yang, Lu, Qiying Zhao, Kaineng Chen, Yizhou Ma, Yipeng Wu, Hongli Ji, and Jinhao Qiu, "PVDF-Based Composition-Gradient Multilayered Nanocomposites for Flexible High-Performance Piezoelectric Nanogenerators", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, Vol.12, no.9, pp.11045-11054.
- [8] Ma, Guancong, Min Yang, Songwen Xiao, Zhiyu Yang, and Ping Sheng, "Acoustic metasurface with hybrid resonances", *Nature materials*, 2014, Vol.13, no.9, pp.873-878.
- [9] Fan, Feng-Ru, Zhong-Qun Tian, and Zhong Lin Wang, "Flexible triboelectric generator", *Nano energy*, 2012, Vol.1, no.2, pp.328-334.
- [10] Zhao, Luming, Qiang Zheng, Han Ouyang, Hu Li, Ling Yan, Bojing Shi, and Zhou Li, "A size-unlimited surface microstructure modification method for achieving high performance triboelectric nanogenerator", *Nano Energy*, 2016, Vol.28, pp.172-178.

- [۱۱] اصغر زاده، جهانی، کمال، آرمان کیانپور، و همایون صادقی، "بررسی برداشت انرژی از ارتعاشات تیر ذوزنقه‌ای با یک لایه پیزوالکتریک با استفاده از روش پارامترهای توزیع شده"، مهندسی مکانیک مدرس (فنی و مهندسی مدرس)، دوره ۱۴، شماره ۱۵، صص ۹۶-۱۰۲.
- [12] Hartmann, William M., "Signals, sound, and sensation", Springer Science & Business Media, 2004.
- [13] Zannin, Paulo Henrique Trombetta, Andressa Maria Coelho Ferreira, and Bani Szeremetta, "Evaluation of noise pollution in urban parks", *Environmental monitoring and assessment*, 2006, Vol.118, no.1-3, pp.423-433.
- [14] Fletcher, Harvey, and Wilden A. Munson, "Loudness, its definition, measurement and calculation", *Bell System Technical Journal*, 1933, Vol.12, no.4, pp.377-430.

پی‌نوشت:

-
1. Energy Harvesting
 2. MATLAB
 3. COMSOL
 4. Energy Harvesting
 5. Triboelectric
 6. Pascal
 7. Sound Pressure Level
 8. Phon
 9. Polyvinylidene fluoride (PVDF)
 10. LPCM
 11. Mode Shape