

تحلیل اجزای محدود برداشت کننده انرژی پیزوالکتریک توسط سلول آگزتیک با هندسه جدید

سینا دوستعلی لیواری^۱، سید امیرحسین عبادزاده^۲، مرتضی کارآموز مهدی آبادی^{۳*}

^۱ ایران، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک، ۱۴۱۱۵-۱۱۱، دانشجوی کارشناسی ارشد

^۲ ایران، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک، ۱۴۱۱۵-۱۱۱، دانشجوی کارشناسی ارشد

^۳ ایران، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک، ۱۴۱۱۵-۱۱۱، استادیار

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: karamooz@modares.ac.ir

چکیده

در این تحقیق تحلیل عددی به روش المان محدود برای یک هندسه جدید برای برداشت کننده انرژی پیزوالکتریک با نسبت پواسون منفی با الگو برداری از خاصیت ساختار آگزتیک برای افزایش انرژی کرنشی و بطور مشابه برای افزایش کارایی خروجی توان، انجام و توسعه داده شده است. سازه دارای یک تیر از جنس فولاد و یک سلول آگزتیک با جنس مشابه و با هندسه جدید است که در یک انتهای آن قرار داده شده است و یک المان پیزوالکتریک بر روی سلول آگزتیک قرار داده شده است. سیستم برداشت انرژی تحت تحریک پایه با شتاب برابر با شتاب جاذبه زمین نوسان می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که هندسه جدید در عین ثابت نگه داشته شدن ابعاد سلول نسبت به هندسه آگزتیک بازگشتی ۳۹۴ درصد افزایش برداشت ولتاژ داشته است. و توان برداشتی نیز در هندسه آگزتیک جدید ۱۴/۷۷ برابر شده است. مطابق نتایج برای هندسه آگزتیک بازگشتی ولتاژ بیشینه برابر ۰/۲۹۵ ولت است که در فرکانس ۲۶۵ هرتز استخراج می‌شود که برای هندسه جدید آگزتیک این مقدار برابر ۱/۱۳۴ ولت است که در فرکانس ۱۱۹ هرتز برداشت می‌شود.

کلمات کلیدی: ساختار آگزتیک؛ برداشت انرژی؛ پیزوالکتریک؛ تحریک پایه

۱- مقدمه

امروزه در جهان، علاقه‌مندی گسترده‌ای نسبت به استخراج انرژی از منابع تجدیدپذیر به دلیل کاهش آسیب و آلودگی زیستی مشاهده می‌شود. این انرژی از منابعی نظیر گرما، باد، ارتعاشات محیطی و ارتعاشات ناشی از برخورد سیال قابل برداشت است [۱-۳]. این رویکرد می‌تواند در تولید انرژی الکتریکی برای اهدافی مانند تأمین توان حسگرها، منابع تولید انرژی و پایش وضعیت سازه‌ها^۱ مورد استفاده قرار گیرد. تأمین انرژی برای حسگرهایی مانند شتاب‌سنج و سرعت‌سنج اهمیت بالایی دارد، زیرا با بهره‌گیری از سیستم‌های برداشت انرژی، نیاز به سیم‌کشی یا تعویض باتری حذف می‌شود و هزینه‌های نگهداری کاهش می‌یابد [۴]. اغلب برداشت‌کننده‌های

^۱ Structural health monitoring

پیزوالکتریک که با استفاده از جرم کمکی عملکرد بهتری دارند، وابسته به فرکانس تشدید هستند؛ یعنی زمانی که فرکانس طبیعی سیستم به مقدار تشدید برسد، انرژی استحصالی در بیشینه مقدار خود خواهد بود [۵].

در سال‌های اخیر، مواد و ساختارهای آگزتیک^۱ به‌عنوان نسل جدیدی از مواد مهندسی با خواص مکانیکی غیرمتعارف، توجه گسترده‌ای را در حوزه‌های مختلف از جمله جذب ضربه، کنترل ارتعاش و برداشت انرژی به خود جلب کرده‌اند [۶، ۷]. ویژگی منحصربه‌فرد این مواد، ضریب پواسون منفی^۲ است؛ یعنی برخلاف مواد معمولی، هنگام کشش در یک جهت، در جهت‌های عمود بر آن نیز منبسط می‌شوند. این رفتار غیرمعمول باعث تمرکز و تقویت کرنش موضعی در بخش‌های خاص ماده می‌گردد که از دیدگاه برداشت انرژی مزیتی کلیدی محسوب می‌شود [۸، ۹].

در سامانه‌های برداشت انرژی پیزوالکتریک، بازده تبدیل انرژی مستقیماً به میزان کرنش مکانیکی در ماده وابسته است. از این رو، استفاده از زیرلایه‌ها یا تکیه‌گاه‌های آگزتیک می‌تواند دامنه‌ی کرنش مؤثر در لایه‌ی پیزوالکتریک را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد، بدون آن‌که نیاز به افزایش تغییر شکل کلی سازه یا جرم مؤثر سیستم باشد [۱۰، ۱۱]. در واقع، ساختارهای آگزتیک با توانایی تغییر شکل درونی خود، نوعی مکانیزم تقویت کرنش داخلی^۳ فراهم می‌کنند که انرژی ارتعاشی محیط را با کارایی بالاتری به الکتریسیته تبدیل می‌کند [۱۲، ۱۳].

طرح‌های هندسی متنوعی مانند لانه‌زنبوری بازگشتی^۴، شبکه‌ی کایرال^۵ و واحدهای مربعی-مثلثی چرخان^۶ [۱۴]، برای ایجاد رفتار آگزتیک توسعه یافته‌اند. هر یک از این هندسه‌ها بسته به زاویه‌ی سلول و نسبت ابعادی خود، پاسخ کرنشی و سختی مؤثر متفاوتی ارائه می‌دهند. با تنظیم پارامترهای هندسی سلول‌های آگزتیک می‌توان بین انعطاف‌پذیری، تمرکز کرنش و پایداری دینامیکی سیستم تعادل برقرار کرد. این امر طراحی بهینه‌ی برداشت‌کننده‌های انرژی آگزتیک را به حوزه‌ای فعال در تحقیقات نوین تبدیل کرده است [۱۳، ۱۵].

۲- روابط ریاضی

معادلات حاکم بر مواد پیزو الکتریک را میتوان بر اساس تابع آنتالپی الکتریکی (H)، برای حالت استاتیکی خطی در نظر گرفت

که هیچ گونه بار یا نیروی حجمی وجود نداشته باشد. [۲]

$$H(\varepsilon, E) = \iiint_V \left(\frac{1}{2} \varepsilon_{ij} C_{ijmn} \varepsilon_{mn} - \frac{1}{2} E_i k_{in}^\varepsilon E_n + E_n e_{nij} \varepsilon_{ij} \right) dv \quad (1)$$

- در این معادله ε_{mn} کرنش الاستیک و E_n میدان الکتریکی بوده و متغیرهای مستقل‌اند.
- C_{ijmn} ضرایب الاستیسیته هستند که در میدان الکتریکی ثابت اندازه‌گیری شده‌اند.
- e_{nij} ضرایب پیزوالکتریک هستند که در میدان الکتریکی یا کرنش ثابت اندازه‌گیری شده‌اند.
- k_{in}^ε ضرایب دی الکتریک هستند که در کرنش ثابت محاسبه می‌شوند.

معادله حاکم بر پیزوالکتریسته را میتوان با مشتق گیری تابع آنتالپی الکتریکی نسبت به هر یک از ثابت های مستقل به صورت زیر به دست آورد:

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial H(\varepsilon, E)}{\partial \varepsilon_{ij}} = C_{ijmn} \varepsilon_{mn} + e_{nij} E_n \quad (2)$$

^۱ Auxetic

^۲ Negative Poisson's Ratio

^۳ strain amplification mechanism

^۴ Re-entrant honeycomb

^۵ Chiral lattice

^۶ Rotating square/triangle

$$D_i = \frac{\partial H(\varepsilon, E)}{\partial E_i} = e_{imn} \varepsilon_{mn} - k_{in} E_n \quad (3)$$

که در آن تنش مکانیکی و D_i جابجایی الکتریکی هستند.

رابطه بین میدان الکتریکی و جابجایی در مواد دی الکتریک با استفاده از رابطه زیر قابل دستیابی است:

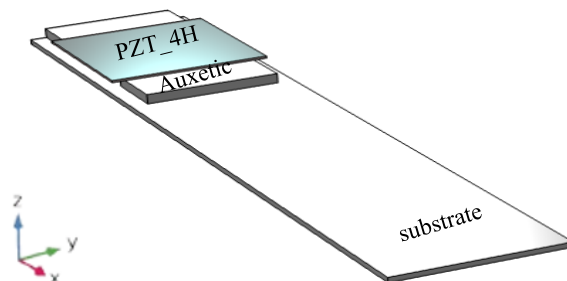
$$D_m = k_{mn} E_n \quad (4)$$

طبق رابطه الکترومغناطیس، میدان الکتریکی برابر است منفی با گرادیان پتانسیل، بنابراین:

$$E_m = -\phi_{,m} \quad (5)$$

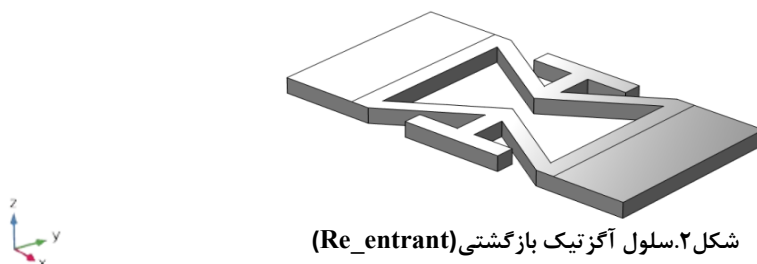
۳- مدل‌سازی اجزای محدود

ساختار مورد بررسی از سه بخش زیرلایه و سلول آگزیتریک از جنس فولاد و لایه پیزوالکتریک از جنس (PZT_4) تشکیل شده است. سلول آگزیتریک به دلیل دارا بودن ضریب پواسون منفی باعث تقویت تنش موضعی بین ماده پیزوالکتریک و سلول شده و میزان حساسیت و ولتاژ برداشت شده توسط ماده پیزوالکتریک را افزایش می‌دهد. ابعاد ورق مستطیلی 120×25 میلی متر و ضخامت ۱ میلی متر بوده، ورق پیزوالکتریک دارای طول و عرض ۲۴ میلی متر و ضخامت ۰/۴۶ میلی متر و ابعاد سلول آگزیتریک مطابق مدل ایکس و همکاران دارای ابعاد ۲۰ در ۴۰ میلی متر است. به منظور بررسی تاثیر مدل پیشنهادی بر میزان تنش و توان برداشت شده از سیستم برداشت انرژی پیزوالکتریک، روش تحلیل اجزای محدود به کار گرفته شده است. ابتدا مدل آگزیتریک پژوهش ملکی و همکاران مورد تحلیل اجزای محدود قرار گرفته و خروجی اعتبارسنجی شده و در ادامه ساختار پیشنهادی نیز بررسی شده و با سلول آگزیتریک بازگشتی مورد مقایسه قرار گرفته است. تحقیق ملکی و همکاران مدل تجربی نیز مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته و همچنین مقدار ضریب میرایی ساختارها نیز از روش تجربی استخراج شده و اندازه آن برابر است با ۰/۱ که در این تحقیق نیز از همین مقدار استفاده شده است، شکل (۱).



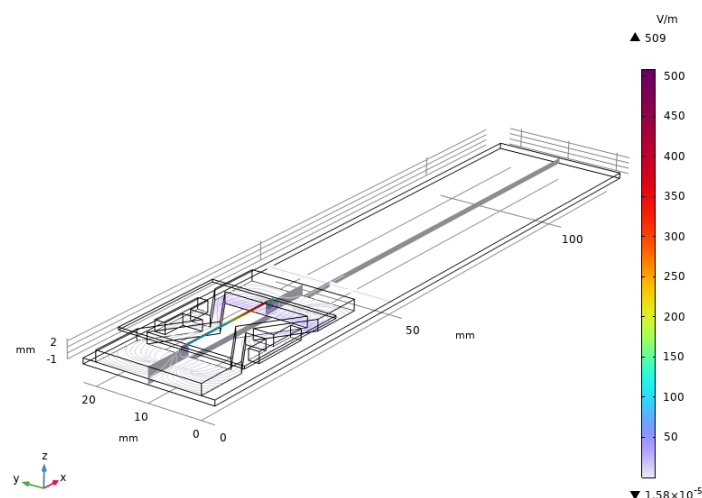
شکل ۱. برداشت کننده انرژی پیزوالکتریک آگزیتریک

اتصال بین این ساختارها توسط چسب اپوکسی صورت می‌گیرد و به دلیل اینکه ضخامت این لایه بسیار کم است در مدل‌سازی از آن صرف‌نظر شده است. در این سیستم لایه ورق فولادی که با سلول آگزیتریک هم تراز شده تحت تحریک با شتابی برابر با شتاب جاذبه زمین قرار گرفته است که تحت این ارتعاش به دلیل تغییر شکل‌های ایجاد شده در سلول آگزیتریک که در شکل (۲) نشان داده شده است، ورق پیزو الکتریک تحت کرنش قرار گرفته و به دلیل کوپل الکترومکانیکی اختلاف پتانسیل در آن ایجاد می‌شود.



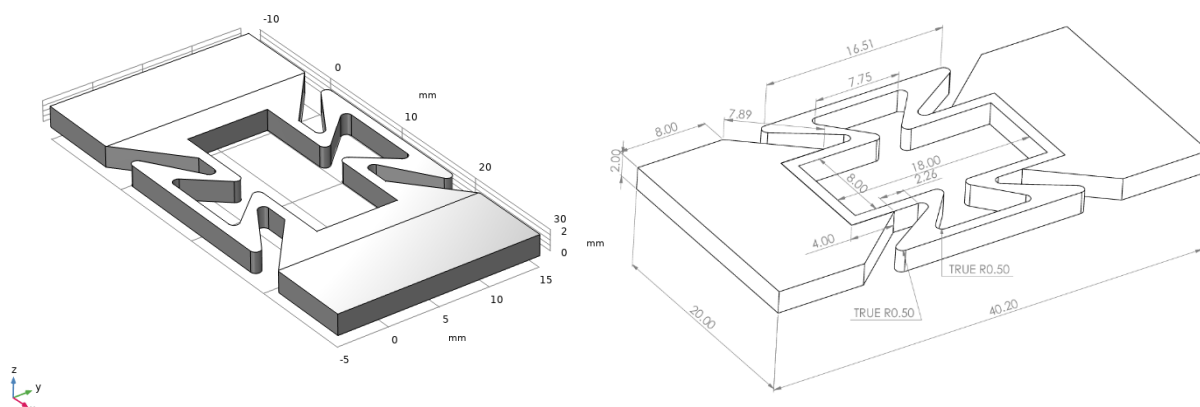
شکل ۲. سلول آگزیتریک بازگشتی (Re_entrant)

صفحه بالای ماده پیزوالکتریک به عنوان زمین^۱ و صفحه زیر آن به عنوان ترمینال^۲ در نظر گرفته شده است تا اختلاف فاز بین این دو صفحه و میدان الکتریکی ناشی از تغییر شکل ماده پیزوالکتریک اعمال شود. مقاومت الکتریکی ماده پیزوالکتریک مشابه تحقیق فرگوسن و همکاران ۱۰۰ کیلو اهم در نظر گرفته شده است. با اعمال پارامترهای ذکر شده میدان الکتریکی ناشی از ارتعاشات که در شکل (۳) نمایش داده شده است، قابل دستیابی است.



شکل ۳. میدان الکتریک در ماده پیزوالکتریک

در سلول آگزتیک بازگشتی به دلیل نوع هندسه وقتی در راستای طولی تحت یک بار نیروی مکانیکی قرار گیرد، دستخوش تغییر در راستای عمود بر جهت اعمال نیرو می‌شود با این تفاوت که برعکس مواد معمولی، دچار انبساط عرضی می‌شود. در طرح پیشنهادی این ویژگی بطوری تقویت شده است که انبساط عرضی بیشتر شود و ابعاد اصلی سلول ثابت بماند. در شکل (۴) سلول آگزتیک پیشنهادی نشان داده شده است.



شکل ۴. سلول آگزتیک پیشنهادی

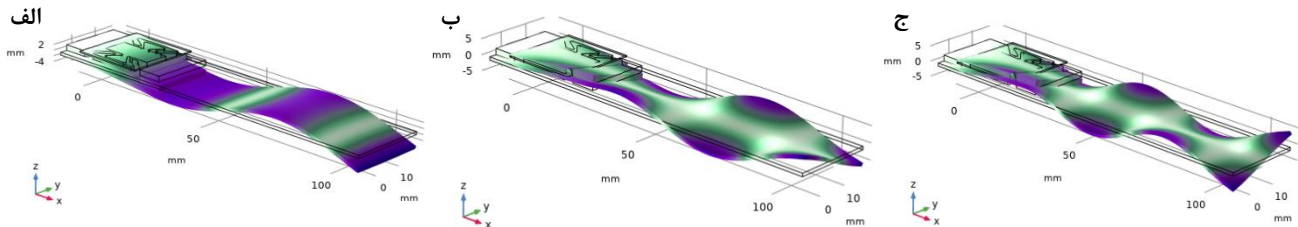
خروجی ولتاژ و توان پیزوالکتریک از سلول آگزتیک به ضرایب کوپلینگ پیزوالکتریک (d_{31} d_{33} d_{15} , ...) بستگی دارد. در هندسه سلول پیشنهادی این ضرایب به واسطه بخش‌های مورب سلول تقویت می‌شوند. افزایش ولتاژ خروجی در سلول جدید ناشی از بهبود مکانیزم تبدیل کرنش است. هندسه اصلاح‌شده با ایجاد مسیرهای مورب و نواحی با سختی موضعی کمتر، کرنش طولی را به مؤلفه‌های عرضی و برشی بزرگ‌تری تبدیل می‌کند و مؤلفه‌های پیزوالکتریک قوی‌تر مانند d_{33} و d_{15} را فعال می‌سازد. این امر موجب افزایش میدان الکتریکی مؤثر و تمرکز تنش در نواحی فعال پیزو شده و بازده تبدیل مکانیکی-الکتریکی سلول را به‌طور چشمگیری بالا می‌برد.

^۱ Ground

^۲ Terminal

۴- نتایج محاسبات مدل‌سازی

شکل مد ۸،۴ و ۱۰ این سیستم در شکل (۵) برای برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک آگزتیک نشان داده شده است که با توجه به شکل مشخص می‌شود که در بین ۱۰ شکل مد اول، شکل مد های شماره ۴ و ۱۰ بیشترین اثر را در تغییر شکل پیزوالکتریک دارند و همین شکل مد ها که بصورت پیچش، خمش و یا برش ظاهر می‌شوند باعث تقویت اثرات مؤلفه های پیزوالکتریک می‌شوند.



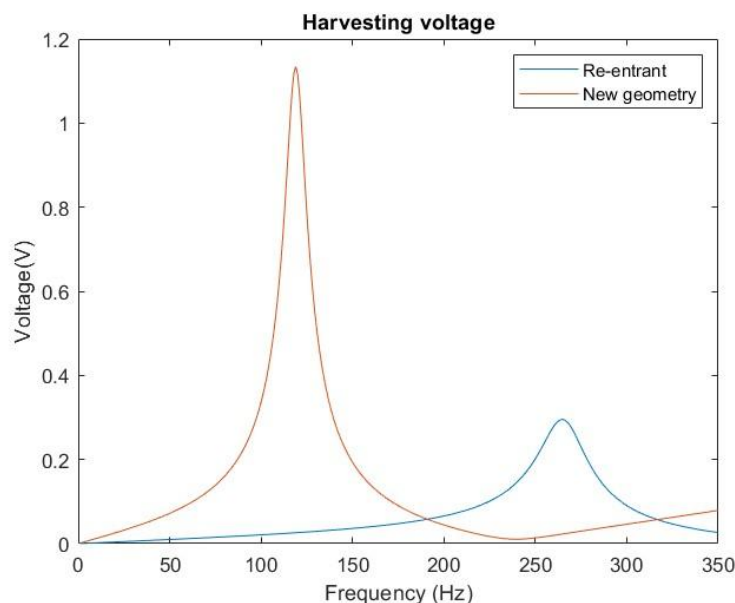
شکل ۵. شکل مد: (الف) شماره ۴ (ب) شماره ۸ (ج) شماره ۱۰

توان برداشت شده در برداشت‌کننده های انرژی، وابسته به توزیع تنش در لایه ی پیزوالکتریک است مطابق رابطه فرگوسن و همکاران [۱۱] توان برداشتی برابر است با:

$$P = Y(\bar{\sigma}_{11} + \bar{\sigma}_{22})^2 \quad (6)$$

که در آن ثابت γ تابعی از پارامترهای هندسی و جنس ماده برای ماده پیزوالکتریک است و معادله نشان می‌دهد که توان تابعی از تنش در جهات های طولی و عرضی است.

در شکل (۶)، نمودار ولتاژ برداشت شده برای سلول آگزتیک بازگشتی و هندسه جدید نشان داده شده است که مطابق نتایج، فرکانسی که بیشترین برداشت انرژی در آن برای سلول بازگشتی اتفاق می‌افتد برابر با ۲۶۵ هرتز و برای سلول آگزتیک جدید برابر ۱۱۹ هرتز است. این نمودار برای سیستم تحت تحریک^۱ پایه با شتاب برابر با شتاب جاذبه زمین استخراج شده است. همچنین برای نمایش نمودار توان از رابطه $P_{harvesting} = \frac{V_{harvesting}^2}{R}$ استفاده شده است که ۱۰۰ کیلو اهم در نظر گرفته شده است.

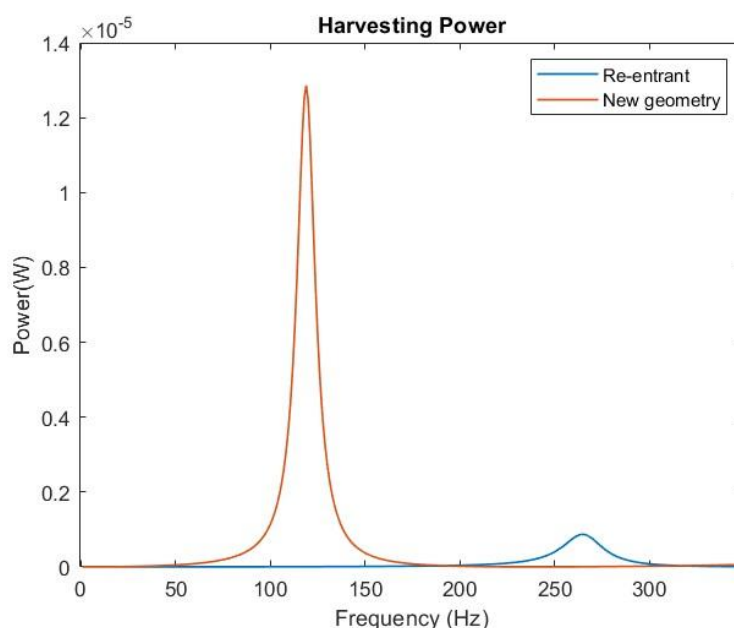


شکل ۶. نمودار ولتاژ برداشت شده

^۱ Base excitation

با توجه به شکل (۶)، مشخص می‌شود که بیشترین ولتاژ استخراج شده از سلول آگزتیک بازگشتی برابر $0/295$ ولت است که فرکانسی که بیشترین استحصال انرژی در آن رخ می‌دهد برابر 265 هرتز بوده و مقدار انرژی بیشینه برای سلول جدید در فرکانس 119 هرتز، $1/134$ ولت برداشت شده که نسبت به سلول آگزتیک بازگشتی، سه برابر بیشتر بوده و در حدود 394 درصد ولتاژ بیشتری برداشت شده است.

در شکل (۷) نمودار توان برای هر دو سلول آگزتیک نشان داده شده است. توان استحصال برای سلول آگزتیک بازگشتی برابر است $0/87$ میکرو وات و برای سلول جدید برابر $12/86$ میکرو وات است که در حدود $14/77$ برابر شده است.



شکل ۷. نمودار توان الکتریکی استحصالی

نتیجه گیری

در این پژوهش، یک هندسه‌ی جدید برای برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک با استفاده از ساختار آگزتیک (دارای ضریب پواسون منفی) ارائه شده است تا کرنش مکانیکی و در نتیجه توان خروجی افزایش یابد. مدل پیشنهادی شامل یک تیر فولادی، یک سلول آگزتیک و یک لایه پیزوالکتریک بوده که تحت تحریک پایه با شتاب برابر با شتاب جاذبه تحلیل شده است. نتایج تحلیل اجزای محدود نشان داده‌اند که ساختار آگزتیک جدید نسبت به مدل آگزتیک بازگشتی متداول، در فرکانس طبیعی پایین‌تری به رزونانس رسیده و ولتاژ خروجی آن تا حدود چهار برابر افزایش یافته است. به‌طور خاص، بیشترین ولتاژ برداشت‌شده برابر با $1/134$ ولت و توان خروجی در حدود $12/86$ میکرو وات بوده که نشان از بهبود قابل توجه عملکرد دارد. این افزایش ناشی از تمرکز تنش و کرنش در نواحی فعال پیزوالکتریک به‌واسطه‌ی مکانیزم در سلول آگزتیک پیشنهادی است. بنابراین، طراحی جدید می‌تواند به‌عنوان روشی مؤثر برای افزایش بازده سامانه‌های برداشت انرژی ارتعاشی مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

- [۱]. Roscow, J., Y. Zhang, J. Taylor, and C. R. Bowen. "Porous ferroelectrics for energy harvesting applications." *The European Physical Journal Special Topics* 224, no. 14 (2015): 2949-2966.
- [۲]. Martínez-Ayuso, Germán, Michael I. Friswell, Sondipon Adhikari, Hamed Haddad Khodaparast, and Harald Berger. "Homogenization of porous piezoelectric materials." *International Journal of Solids and Structures* 113 (2017): 218-229.
- [۳]. Liao, Yabin, and Junrui Liang. "Unified modeling, analysis and comparison of piezoelectric vibration energy harvesters." *Mechanical Systems and Signal Processing* 123 (2019): 403-425.
- [۴]. Martínez-Ayuso, G., Haddad Khodaparast, H., Zhang, Y., Bowen, C.R., Friswell, M.I., Shaw, A.D. and Madinei, H., 2018. Model validation of a porous piezoelectric energy harvester using vibration test data. *Vibration*, 1(1), pp.123-137.
- [۵]. Li, H., C. Tian, and Z. D. Deng. 2014. Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials. *Applied Physics Reviews* 1 (4):041301. doi:10.1063/1.4900845.
- [۶]. Mir, Mariam, Murtaza Najabat Ali, Javaria Sami, and Umar Ansari. "Review of mechanics and applications of auxetic structures." *Advances in Materials Science and Engineering* 2014, no. 1 (2014): 753496.
- [۷]. Taylor, Michael James, Luca Francesconi, Miklós Gerendás, Ali Shanian, Carl Carson, and Katia Bertoldi. "Low porosity metallic periodic structures with negative Poisson's ratio." (2014).
- [۸]. De Bellis, Maria Laura, and Andrea Bacigalupo. "Auxetic behavior and acoustic properties of microstructured piezoelectric strain sensors." *Smart Materials and Structures* 26, no. 8 (2017): 085037.
- [۹]. Li, Qiang, Yang Kuang, and Meiling Zhu. "Auxetic piezoelectric energy harvesters for increased electric power output." *Aip Advances* 7, no. 1 (2017).
- [۱۰]. Umino, Y., T. Tsukamoto, S. Shiomi, K. Yamada, and T. Suzuki. "Development of vibration energy harvester with 2D mechanical metamaterial structure." In *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1052, no. 1, p. 012103. IOP Publishing, 2018.
- [۱۱]. Ferguson, William JG, Yang Kuang, Kenneth E. Evans, Christopher W. Smith, and Meiling Zhu. "Auxetic structure for increased power output of strain vibration energy harvester." *Sensors and Actuators A: Physical* 282 (2018): 90-96.
- [۱۲]. Fey, Tobias, Franziska Eichhorn, Guifang Han, Kathrin Ebert, Moritz Wegener, Andreas Roosen, Ken-ichi Kakimoto, and Peter Greil. "Mechanical and electrical strain response of a piezoelectric auxetic PZT lattice structure." *Smart Materials and Structures* 25, no. 1 (2015): 015017.
- [۱۳]. Eghbali, Pejman, Davood Younesian, and Saman Farhangdoust. "Enhancement of the low-frequency acoustic energy harvesting with auxetic resonators." *Applied Energy* 270 (2020): 115217.

[۱۴]. Chandrasekharan, N., and Lonny L. Thompson. "Increased power to weight ratio of piezoelectric energy harvesters through integration of cellular honeycomb structures." *Smart Materials and Structures* 25, no. 4 (2016): 045019.

[۱۵]. Tornabene, Francesco, Matteo Viscoti, Rossana Dimitri, and Maria Antonietta Aiello. "Higher order formulations for doubly-curved shell structures with a honeycomb core." *Thin-Walled Structures* 164 (2021): 107789.