

بررسی عددی و تجربی یک ساختار هیبریدی آگزتیک جدید جهت افزایش برداشت انرژی با استفاده از پیزوالکتریک

سید امیرحسین عبادزاده^ا، سینا دوستعلی لیواری^ب، امین فرخ آبادی^{پ*}، مرتضی کارآموز مهدی آبادی^{ت*}

^ا تهران، جلال آل احمد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک، ۱۱۱-۱۴۱۱۵، دانشجوی کارشناسی ارشد

^ب ایران، تهران، جلال آل احمد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک، ۱۱۱-۱۴۱۱۵، دانشیار

^ت ایران، تهران، جلال آل احمد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک، ۱۱۱-۱۴۱۱۵، استادیار

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: amin-farrokhi@modares.ac.ir

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

چکیده

در این پژوهش، دو ساختار آگزتیک نوین برای برداشت انرژی ارتعاشی در بازه‌های فرکانسی پایین معرفی می‌شود. هندسه آگزتیک با نسبت پواسون منفی، تحت بارگذاری مکانیکی کرنش‌های هم‌جهت با تنش ایجاد می‌کنند که این ویژگی برای افزایش بازده برداشت انرژی مؤثر است. در سامانه پیشنهادی، حسگر پیزوالکتریک بر روی تیر آگزتیک چاپ‌شده از پلی لاکتیک اسید نصب گردیده تا پاسخ مکانیکی به سیگنال الکتریکی تبدیل شود. آزمایش‌های تجربی برای تعیین ویژگی‌های ارتعاشی و الکتریکی انجام شد و نتایج با مدل اجزای محدود سه‌بعدی در نرم‌افزار کامسول مقایسه و اعتبارسنجی گردید. عملکرد هندسه‌های پیشنهادی با ساختار ساده (i) ارزیابی شد. نتایج اعتبارسنجی حداکثر خطای $8/57\%$ در فرکانس طبیعی و $2/09\%$ در حساسیت ولتاژ را نشان می‌دهد. بررسی عددی سه سلول در شرایط یکسرگیردار و بازه ۰ الی ۳۰۰ هرتز، برتری سلول آگزتیک (iii) با حداکثر ولتاژ ۴/۶۱ ولت (در ۴۵ هرتز) را تأیید می‌کند که نسبت به سلول (ii) حدود $4/45\%$ و نسبت به سلول (i) بیش از ۹/۷ برابر ولتاژ بیشتری تولید می‌نماید. این یافته‌ها پتانسیل ساختارهای آگزتیک در بهبود کارایی سامانه‌های برداشت انرژی ارتعاشی در فرکانس‌های پایین محیطی را برجسته می‌سازد.

کلمات کلیدی: ساختار آگزتیک؛ برداشت انرژی؛ پیزوالکتریک؛ تست تجربی.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، نیاز فزاینده به حسگرهای کم‌مصرف در حوزه‌هایی همچون میکروالکترونیک، سامانه‌های بی‌سیم، ابزارهای پوشیدنی و پایش سلامت سازه، انگیزه‌ی زیادی برای توسعه‌ی فناوری‌های نوین تأمین انرژی ایجاد کرده است. این حسگرها معمولاً از باتری‌های الکتروشیمیایی تغذیه می‌شوند، اما محدودیت عمر، خطر نشت مواد و دشواری در دفع زیست‌محیطی باتری‌ها، استفاده از آن‌ها را در سامانه‌های بلندمدت و مأموریت‌های بحرانی با چالش مواجه می‌سازد [۱]. از این رو، پژوهش‌ها به سمت طراحی سامانه‌های بی‌سیم خودتأمین انرژی برای انجام وظایف حسگری، عملگری و تبادل داده معطوف شده‌اند. در این میان، برداشت‌کننده‌های انرژی مبتنی بر تبدیل انرژی‌های محیطی مانند ارتعاش، حرکت بدن انسان و گرادیان دما به انرژی الکتریکی، به‌عنوان جایگزینی پایدار و قابل اتکا برای باتری‌ها مطرح شده‌اند [۲].

در بین روش‌های گوناگون برداشت انرژی، سامانه‌های پیزوالکتریک به دلیل سادگی ساختار، هزینه‌ی پایین، نیاز اندک به نگهداری، قابلیت تولید هم‌زمان ولتاژ و توان، و سهولت یکپارچه‌سازی با سامانه‌های بی‌سیم، گزینه‌ای کارآمد برای کاربردهای مهندسی و پزشکی محسوب می‌شوند [۳]–[۶]. در یک سامانه‌ی برداشت انرژی پیزوالکتریک معمولاً یک مبدل بر روی تیر ارتعاش‌پذیر نصب می‌گردد تا انرژی مکانیکی ناشی از تحریک پایه را به ولتاژ الکتریکی تبدیل کند؛ از این رو، انتخاب ماده‌ی پیزوالکتریک و طراحی بهینه‌ی سازه‌ی تیر نقشی تعیین‌کننده در بازده کلی سامانه دارد و تاکنون به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است [۷].

در میان مواد پیزوالکتریک، سرامیک‌ها به دلیل سهولت ساخت، پایداری توان خروجی، سازگاری با فناوری MEMS^۱، بازده بالاتر و تلفات دی‌الکتریک کمتر، بیشترین کاربرد را یافته‌اند [۷]–[۹]. با این حال، بهره‌گیری از سازه‌های نوینی که دارای نسبت پواسون منفی هستند (ساختارهای آگزتیک)، هنوز به‌طور کامل در حوزه‌ی برداشت انرژی ارتعاشی بررسی نشده است. پژوهش حاضر به معرفی یک سازه‌ی سبک‌وزن آگزتیک می‌پردازد که در گستره‌ای وسیع از کرنش‌ها، الگوی تغییرشکل یکنواخت «محوری-چرخشی» ایجاد می‌کند و به همین دلیل برای بهبود کارایی برداشت انرژی در فرکانس‌های پایین مناسب است. در این پیکربندی، مبدل پیزوالکتریک بر ناحیه‌ی آگزتیک قرار گرفته تا از تمرکز کرنش و افزایش کوپل الکترومکانیکی بهره‌برداری شود. افزون بر آن، استفاده از تیر یک‌سرگیردار به دلیل نصب آسان و ایجاد انحراف بزرگ‌تر نسبت به سایر شرایط مرزی، روشی مؤثر برای افزایش توان خروجی به شمار می‌رود. در این مقاله چندین هندسه‌ی آگزتیک جدید معرفی شده و عملکرد آن‌ها با ساختارهای ساده و بازگشتی مقایسه و نتایج حاصل گزارش گردیده است.

۲- ارائه مدل‌های فیزیکی و ریاضی، ارائه مشخصات کلی مسئله

به دلیل ساختار بلوری فاقد تقارن مرکزی، مواد پیزوالکتریک تحت بارگذاری مکانیکی دچار دوقطبی‌شدگی الکتریکی می‌شوند و در نتیجه، اختلاف پتانسیل الکتریکی متناسب با بار مکانیکی اعمال‌شده پدیدار می‌گردد. پاسخ کوپله‌شده الکترومکانیکی این مواد از طریق روابط سازگاری زیر بیان می‌شود [۱۰]:

$$\begin{pmatrix} S \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S^E & d' \\ 0 & \varepsilon^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T \\ E \end{pmatrix} \quad (۱)$$

در این روابط، S کرنش، D چگالی بار الکتریکی، T بردار تنش و E میدان الکتریکی هستند. همچنین؛ S^E ماتریس نرمی الاستیک در میدان الکتریکی ثابت، ε^T ماتریس گذردهی دی‌الکتریک در تنش ثابت، d ماتریس ضرایب پیزوالکتریک (اثر مستقیم) و d' ترانیهاده آن (اثر معکوس) می‌باشند. از آنجا که تنش‌های وارد بر لایه پیزوالکتریک در حوزه خطی و کوچک قرار دارند، چگالی بار الکتریکی در ماده PZT را می‌توان صرفاً برحسب مؤلفه محوری تنش به‌صورت زیر نوشت:

^۱ Micro-Electro Mechanical Systems

$$D_i = d_{ij} \sigma_j; \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

در نظر بگیرید که برداشت‌کننده انرژی حول محور محور ۲ خم می‌شود؛ این خمش موجب کشش طولی در جهت محور ۱ و در نتیجه ایجاد میدان الکتریکی در جهت ضخامت محور ۳ می‌گردد، جایی که قطبش ماده نیز در همین جهت است. بنابراین، چگالی بار سطحی روی الکترودهای بالا و پایین لایه پیزوالکتریک از رابطه (۲) به صورت زیر به دست می‌آید.

$$D_3 = d_{31}\sigma_1 + d_{32}\sigma_2 + d_{33}\sigma_3 \quad (3)$$

برای یک ماده ایزوتروپ در شرایط تنش صفحه‌ای [۱]، داریم:

$$D_3 = d_{31}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (4)$$

توان خروجی یک برداشت‌کننده متناسب با مجذور چگالی بار است و می‌توان آن را از معادله (۴) بدست آورد [۱۱]:

$$P \propto d_{31}^2 (\sigma_1 + \sigma_2)^2 \quad (5)$$

برای شرایط تنش صفحه‌ای، معادلات (۴) و (۵) را می‌توان بر حسب کرنش‌ها به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$D_3 = d_{31} \frac{E}{1-\nu} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (6)$$

$$P \propto (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2 \quad (7)$$

از معادله (۵)، مشخص است که وقتی تنش‌های درون صفحه‌ای از یک نوع باشند، توان خروجی بیشتر است، و برای تغییر شکل‌های کوچک، می‌توان از قانون هوک تعمیم‌یافته برای توصیف رابطه تنش-کرنش ساختار آگزیتریک به صورت زیر استفاده کرد:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (8)$$

در شرایط تنش صفحه‌ای و با توجه به فرض‌های اعمال شده، معادله (۸) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} (\sigma_1 + \sigma_2), \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (9)$$

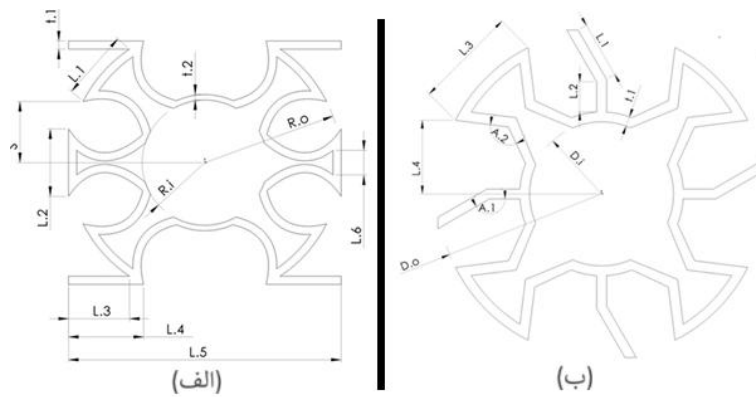
که با جایگذاری عبارات فوق در معادله (۷)، داریم:

$$P \propto \frac{4(\sigma_1 + \sigma_2)^2}{E^2} \quad (10)$$

این نتایج حاکی از آن است که هنگامی که تنش‌های درون صفحه‌ای هم‌علامت باشند، توان خروجی به بیشینه خود می‌رسد. از آنجا که ساختار پیشنهادی نسبت پواسون منفی را در بازه گسترده‌ای از کرنش‌ها حفظ می‌کند، می‌توان از آن در طراحی برداشت‌کننده انرژی بهره گرفت تا توان خروجی آن به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یابد.

۳- ارائه مشخصات کلی مسئله

شکل (۱) هندسه کلی نمونه‌ها و شیوه تعریف پارامترهای هندسی آن‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که پیداست، پارامترهای کلیدی به‌منظور تسهیل کنترل و مقایسه دقیق میان سلول‌های مختلف در مراحل تحلیل عددی و ساخت، تعریف شده‌اند. مقادیر دقیق این پارامترها در جدول (۱) ارائه گردیده است؛ جدولی که مرجع اصلی ابعاد هندسی مدل‌ها به شمار می‌رود و مبنای تمام شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌های بعدی مقاله خواهد بود.

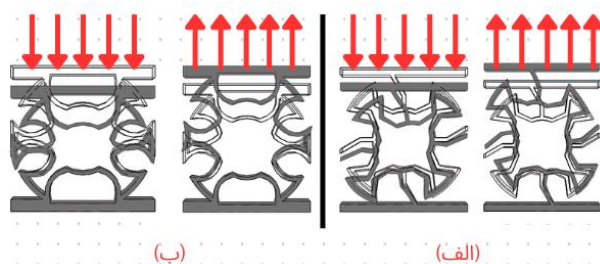


شکل ۱. شماتیک طرح‌های آگزتیک و پارامترهای هندسی آنها: الف) سلول ii، ب) سلول iii.

جدول ۱ مقادیر پارامترهای هندسی مورد استفاده در تحقیق حاضر.

سلول ii		سلول iii	
مقدار (mm)	نماد	مقدار (mm)	نماد
۱۷/۵	D.o	۱۷/۵۰	D.o
۸/۰۵	D.i	۷/۷۰	D.i
۱/۰۵	t.1	۱/۰۵	t.1
۰/۷۰	t.2	۱۵۰	A.1
۸/۹۸	L.1	۱۲۲/۱۱	A.2
۸/۶۵	L.2	۶/۰۶	L.1
۷/۸۲	L.3	۳/۲۳	L.2
۹/۶۳	L.4	۱۰/۹۹	L.3
۳۵	L.5	۷/۸۶	L.4
۳/۱۶	L.6	-	-

به‌منظور بررسی رفتار آگزتیک، هندسه‌های پیشنهادی در محیط آباکوس به‌صورت مدل اجزای محدود^۲ پیاده‌سازی شدند. تحلیل نمونه‌ها در دو نوع بارگذاری کششی و فشاری انجام گرفت و شکل‌های تغییرشکل‌یافته مربوطه در شکل (۲) ارائه شده‌اند. نتایج حاکی از آن است که جابه‌جایی‌های درون‌صفحه‌ای کاملاً با خاصیت آگزتیک هم‌خوانی دارند: تحت کشش، دهانه سلول‌ها گسترش می‌یابد و تحت فشار، سلول‌ها به سمت داخل جمع می‌شوند. این رفتار عمدتاً ناشی از پارامترهای هندسی طراحی شده است و ماهیت آگزتیک ساختار پیشنهادی را به‌طور کامل تأیید می‌نماید.

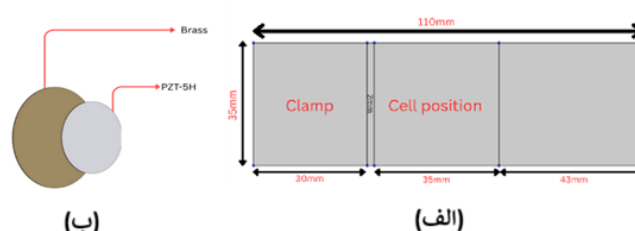


شکل ۲. تغییر شکل و رفتار آگزتیک سلول‌های طراحی شده: الف) سلول ii، ب) سلول iii.

^۲ Finite element method

۴- روش مطالعه:

همان‌گونه که در شکل (۳-الف) مشاهده می‌شود، آرایش تجربی شامل تیری از جنس PLA+ است که به روش چاپ افزایش یافته ساخته شده است. شکل (۳-ب) هندسه سنسور پیزوالکتریک را نشان می‌دهد؛ این سنسور از یک دیسک برنجی و لایه سرامیکی PZT تشکیل شده و دقیقاً بر ناحیه سلول آگزتیک قرار گرفته است. ابعاد دقیق تیر و سنسور در شکل (۳) و جدول (۱) ارائه گردیده‌اند. انتخاب ابعاد تیر بر اساس قطر سنسور تجاری انجام شد؛ به‌طور معمول، تیرهای مورد استفاده در برداشت‌کننده‌های انرژی طولی بین ۱۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر دارند و برای ایجاد خمش مؤثر، طول آن‌ها باید حداقل دو برابر عرض سنسور پیزوالکتریک باشد [۱]. بر همین اساس، با در نظر گرفتن قطر ۳۵ میلی‌متری حسگر، طول انتها تیر ۴۳ میلی‌متر، طول ناحیه مؤثر ۸۰ میلی‌متر، و طول ناحیه آگزتیک ۳۵ میلی‌متر تعیین گردید. ضخامت تیر در راستای Z نیز ۴ میلی‌متر در نظر گرفته شد تا سازگاری هندسی مطلوب با سلول آگزتیک برقرار شود. طرح آزمایش‌های عددی و تجربی بر پایه این ابعاد انجام گرفت و نتایج حاصل در بخش‌های بعدی گزارش می‌گردد.



شکل ۳. الف: شماتیک مدل سازی ب: شماتیک سنسور پیزوالکتریک

۵- تست تجربی:

همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده، برای اعمال تحریک در بازه فرکانسی ۰ تا ۳۰۰ هرتز از یک لرزاننده الکترومغناطیسی، به‌همراه تقویت‌کننده برند Tira استفاده شد. شتاب پایه تیرک به‌وسیله شتاب‌سنج کوچک B&K که با چسب بر روی گیره آلومینیومی نگهدارنده تیرک نصب شده بود اندازه‌گیری گردید. سرعت نوک تیرک در راستای عرضی نیز با ویبرومتر لیزری OMETRON VH۳۰۰ و با نصب نوار بازتابنده کوچک در نوک تیرک ثبت شد. داده‌ها از طریق دیتالاگر B&K PULSE نمونه‌برداری و پردازش شدند و به کامپیوتر فرستاده می‌شود و پاسخ‌های فرکانسی^۳ حاصل برای مقایسه با نتایج مدل‌سازی در کامسول بهره گرفته می‌شود.

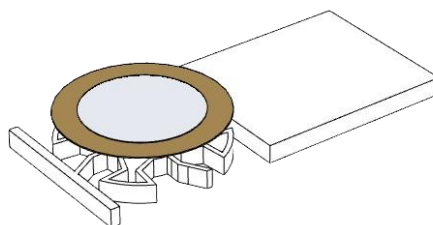


شکل ۴. تجهیزات آزمایش: (الف) دیتالاگر B&K PULSE Type ۳۵۶۰-D؛ (ب) مجموعه تقویت‌کننده Tira BDA ۱۳۰۰-E؛ (پ) ویبرومتر لیزری OMETRON VH۳۰۰؛ (ت) لرزاننده الکترومغناطیسی Tira S ۵۲۲۰-۱۲۰؛ (ث) نمای بزرگ‌نمایی شده از لرزاننده الکترومغناطیسی.

^۳ Frequency Response Functions

۶- مدل سازی عددی:

هندسه تیر در نرم‌افزار کامسول نسخه ۶.۲ مدل سازی و برای حل مسئله کوپله چندفیزیکی پیکربندی شد. نمای انفجاری سامانه (شکل ۵) شامل تیر ساخته شده از PLA+ و سنسور پیزوالکتریک متصل به آن است؛ اتصال میان آن‌ها کاملاً ایده‌آل و بدون نقص فرض گردید. خواص مکانیکی PLA+ (جدول ۲) از آزمون کشش تک‌محوری نمونه‌های چاپ شده به روش چاپ افزایشی^۴ استخراج شد. این آزمون‌ها طبق استاندارد ASTM D638 و با دستگاه کشش جهانی Gotech GT-TCS-2000 انجام گرفتند. مشخصات الکترومکانیکی سنسور پیزوالکتریک، که برای پیش‌بینی دقیق پاسخ الکتریکی ضروری‌اند، مستقیماً از کاتالوگ رسمی سازنده اخذ شدند، که برابر با PZT-5H است. رفتار الکترومکانیکی تیر طبق معادله (۱) توصیف می‌شود؛ از این‌رو، تحلیل چندفیزیکی با کوپلینگ همزمان ماژول‌های «مکانیک جامدات» و «الکترواستاتیک» در کامسول اجرا شد. تکیه‌گاه گیردار در یک انتهای تیر اعمال گردید، الکتروود زیرین به‌عنوان زمین و الکتروود بالایی به‌صورت «ترمینال» تعریف شد. به‌منظور شبیه‌سازی شرایط مدار باز و استخراج حداکثر ولتاژ ممکن، مقاومت بار خارجی برابر یک گیگا اهم در نظر گرفته شد. این مقدار به‌گونه‌ای انتخاب گردید که جریان خروجی به‌حداقل برسد و ولتاژ پیزوالکتریک در حالت نزدیک به مدار باز محاسبه شود. برای در نظر گرفتن اتلاف انرژی، دمپینگ ایزوتروپیک از نوع فاکتور اتلاف ساختاری^۵ برابر $\eta = 0.03$ در ماژول مکانیک جامدات اعمال گردید. تحریک هارمونیک با شتاب پایه 0.07 m/s^2 به‌صورت یکنواخت در جهت Z به مدل وارد شد.



شکل ۵ نمای انفجاری از برداشت کننده ii

جدول ۲ خواص مکانیکی مواد مورد استفاده در تحقیق حاضر.

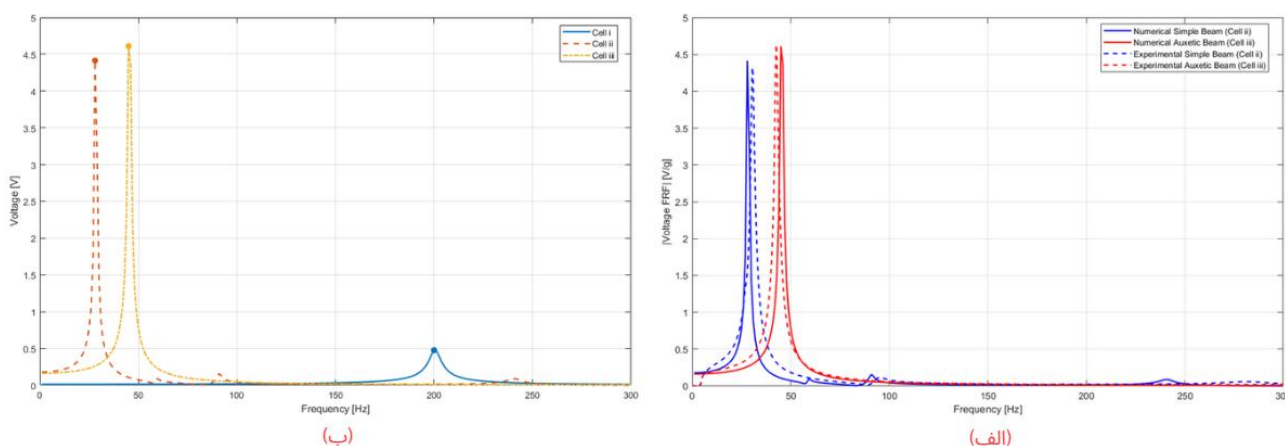
مواد	خواص مواد	نماد	مقدار	واحد
پلی‌لاکتیک‌اسید	چگالی	ρ	۱۲۰۸	kg/m^3
	مدول یانگ	E	2×10^9	Pa
	نسبت پواسون	ν	۰/۳۶	-
برنج	چگالی	ρ	۸۴۹۰	kg/m^3
	مدول یانگ	E	97×10^9	Pa
	نسبت پواسون	ν	۰/۳۱	-

^۴ Fused deposition modeling

^۵ Isotropic Structural Loss Factor

۷- نتایج عددی و تجربی:

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه مدل عددی اجزای محدود و آزمایش تجربی، تطابق بسیار مطلوبی میان پاسخ‌های فرکانسی و ولتاژی مشاهده گردید (شکل ۶-الف). برای سلول آگزتیک (Cell ii)، بیشینه فرکانس طبیعی در آزمون تجربی برابر $30/625$ هرتز و در مدل عددی 28 هرتز به‌دست آمد که بیانگر اختلافی معادل $8/57\%$ است. همچنین ولتاژ بیشینه اندازه‌گیری شده $4/3239$ ولت و مقدار متناظر عددی $4/4143$ ولت بود که اختلافی کمتر از $2/09\%$ را نشان می‌دهد. در مورد سلول آگزتیک (Cell iii)، اختلاف فرکانس پیک بین نتایج تجربی $42/75$ هرتز و عددی 45 هرتز تنها $5/26\%$ و اختلاف ولتاژ خروجی $0/49\%$ گزارش شد. این مقادیر خطا حاکی از آن‌اند که مدل اجزای محدود توسعه‌یافته توانسته است رفتار الکترومکانیکی تیرهای پیزوالکتریک را با دقت بالا بازتولید کند. انطباق نزدیک منحنی‌های پاسخ در شکل (۶-الف) تأیید می‌کند که مدل چندفیزیکی مورد استفاده از اعتبار بالایی برای تحلیل ساختارهای مشابه برخوردار است و می‌تواند مبنای مطمئنی برای بررسی‌های پارامتری و بهینه‌سازی هندسه‌های آتی محسوب شود.



شکل ۶. الف: مقایسه تست عددی و تجربی ب: نمودار مقایسه سلول های معرفی شده با سلول ساده (i)

۸- نتیجه گیری:

در این تحقیق بررسی عملکرد استحصال انرژی سه سلول معرفی‌شده در خود ساختار تیر در بازه فرکانسی ۰ تا 300 هرتز مورد بررسی قرار گرفت، که هندسه آگزتیک (Cell iii) با فرکانس طبیعی 45 هرتز و ولتاژ بیشینه $4/61$ ولت، برترین بازده انرژی را نسبت به دو سلول دیگر ارائه می‌دهد (شکل ۶-ب). این مقدار نسبت به ساختار آگزتیک اولیه (Cell ii) حدود $4/5\%$ و نسبت به تیر ساده (Cell i) بیش از $8/7$ برابر افزایش ولتاژ دارد که بیانگر تأثیر چشمگیر هندسه آگزتیک در تقویت کوپل الکترومکانیکی و افزایش بهره‌وری در فرکانس‌های پایین است. از آنجا که مدل عددی ارائه‌شده با داده‌های تجربی اعتبارسنجی گردید، می‌توان از آن به‌عنوان ابزاری قابل‌اعتماد برای تحلیل و طراحی سایر ساختارهای آگزتیک مشابه در شرایط کاری متفاوت بهره برد. در مجموع، نتایج بخش عددی و تجربی نشان می‌دهند که هندسه آگزتیک پیشنهادی نه‌تنها موجب افزایش ولتاژ خروجی در محدوده فرکانس‌های زیر 50 هرتز می‌شود، بلکه راهکاری کارآمد برای توسعه برداشت‌کننده‌های انرژی ارتعاشی نسل جدید به شمار می‌آید.

مراجع

۱. Z. Yang, S. Zhou, J. Zu, and D. Inman, "High-Performance Piezoelectric Energy Harvesters and Their Applications," *Joule* ۲, ۶۴۲-۶۹۷ (۲۰۱۸).
۲. C. Covaci and A. Gontean, "Piezoelectric energy harvesting solutions: A review," *Sensors (Switzerland)* ۲۰, ۱-۳۷ (۲۰۲۰).
۳. S. Priya, "Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers," *J. Electroceramics* ۱۹, ۱۶۵-۱۸۲ (۲۰۰۷).
۴. H. Salehi, R. Burgueño, S. Chakrabartty, N. Lajnef, and A. H. Alavi, "A comprehensive review of self-powered sensors in civil infrastructure: State-of-the-art and future research trends," *Eng. Struct.* ۲۳۴, ۱۱۱۹۶۳ (۲۰۲۱).
۵. Y. Liu et al., "Piezoelectric energy harvesting for self-powered wearable upper limb applications," *Nano Sel.* ۲, ۱۴۵۹-۱۴۷۹ (۲۰۲۱).
۶. S. Roundy and P. K. Wright, "A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics," *Smart Mater. Struct.* ۱۳, ۱۱۳۱-۱۱۴۲ (۲۰۰۴).
۷. H. Liu, J. Zhong, C. Lee, S. W. Lee, and L. Lin, "A comprehensive review on piezoelectric energy harvesting technology: Materials, mechanisms, and applications," *Appl. Phys. Rev.* ۵, ۰۴۱۳۰۶ (۲۰۱۸).
۸. M. Safaei, H. A. Sodano, and S. R. Anton, "A review of energy harvesting using piezoelectric materials: State-of-the-art a decade later (۲۰۰۸-۲۰۱۸)," *Smart Mater. Struct.* ۲۸, ۱۱۳۰۰۱ (۲۰۱۹).
۹. N. Sezer and M. Koç, "A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting," *Nano Energy* ۸۰, ۱۰۵۵۶۷ (۲۰۲۱).
۱۰. S. Farhangdoust, G. Georgeson, J.-B. Ihn, and F.-K. Chang, "Kirigami auxetic structure for high efficiency power harvesting in self-powered and wireless structural health monitoring systems," *Smart Mater. Struct.* ۳۰, ۰۱۵۰۳۷ (۲۰۲۰).
۱۱. W. J. G. Ferguson, Y. Kuang, K. E. Evans, C. W. Smith, and M. Zhu, "Auxetic structure for increased power output of strain vibration energy harvester," *Sensors Actuators, A Phys.* ۲۸۲, ۹۰-۹۶ (۲۰۱۸).