

## مدل سازی تأثیر نوفه صدا بر روی یک تیرک پیزوالکتریک برای جمع آوری

## انرژی

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

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۱۳

## چکیده

در این مقاله یک تیرک پیزوالکتریک برای دریافت انرژی صوتی در محیط واقعی طراحی شده است. انرژی دریافتی الکتریکی از این تیرک می‌تواند در باتری ذخیره شده یا مستقیماً توسط مدارهای الکتریکی مورد استفاده قرار گیرد. از دو تیرک مسی و پیزوالکتریک شامل پلی وینیلیدن فلوراید که در آن طول لایه پیزوالکتریک کوتاه‌تر است و در نقطه بهینه تیرک مسی قرار دارد، در این شبیه‌سازی استفاده شده است. توان صوت ۱۰۰ دسی‌بل بلندگو در یک اتاق ۱ متر مکعبی با در نظر گرفتن وجود هوا در محیط به تیرک در وسط اتاق اعمال شده است. با ساخت تیرک در طول ۷/۸ سانتی‌متری، فرکانس خمشی اول تیرک به نزدیکی ۱۰۰ هرتز می‌رسد با تحریک تیرک در این فرکانس خمشی اثر نوفه به حداکثر مقدار خود می‌رسد و در نهایت منجر به تولید ولتاژ حدود ۷۰ میلی‌ولتی می‌گردد.

**واژگان کلیدی:** پیزوالکتریک، انرژی صوت، لرزش تیرک، برداشت انرژی، مبدل آکوستیک-الکتریک

## ۱. مقدمه

انرژی، نیاز زیادی به ذخیره و بازیافت این انرژی وجود دارد، چگونگی به دست آوردن این انرژی در ابعاد و شکل‌های مختلف صورت می‌گیرد، در رابطه با این موضوع مقالات متعددی ارائه شده است [۱-۴].

مبحث تولید انرژی و گرفتن ولتاژ از مواد پیزوالکتریک به دلیل کارایی فراوان و خاصیت کشسانی این مواد سال‌ها است که مورد توجه قرار دارند [۵].

مواد پیزوالکتریک با اعمال هرگونه نیروی مکانیکی و یا صوتی می‌توانند تحریک شوند یعنی با قطبش مولکول آنها،

فرایند استخراج انرژی از محیط اطراف برداشت انرژی نامیده می‌شود. انواع برداشت انرژی، که از آسیاب بادی و چرخ آب سرچشمه گرفته است، به‌طور گسترده به عنوان یک راه حل کم هزینه برای طیف عظیمی از راه‌های دریافت انرژی در نظر گرفته می‌شود. اشکال مختلفی از انرژی وجود دارد که می‌توان از آن استفاده کرد، مانند حرارتی، مکانیکی، خورشیدی، آکوستیک و موج که امروزه با توجه به مصرف زیاد انرژی و هدر رفتن بخش اعظم این

یک ولتاژ در سطح آن به وجود بیاید، استفاده از مواد پیزوالکتریک برای جمع‌آوری انرژی امروزه خیلی مورد توجه قرار گرفته و چالش‌های بزرگی را در حوزه علم به وجود آورده است. از این مواد پیزوالکتریک در حوزه جمع‌آوری انرژی در شارژ مجدد باتری‌ها [۶]، منبع برای حسگرهای بی‌سیم [۷]، سنسورهای قابل کاشت در بدن و برای کارهای نظارتی [۸]، و در تولید انرژی با استفاده از لرزش ماشین لباسشویی کاربردهای مختلفی دارند [۹].

نوفه صدا در انواع محیط‌ها وجود دارد، صدا تغییرات موج مانند فشار هوا را توصیف می‌کند که در فرکانس‌های مختلف رخ می‌دهد و می‌تواند گیرنده‌های داخلی گوش را تحریک کند، نوفه دلالت بر وجود صدا دارد. سر و صدا (نوفه) غالباً به عنوان صدای ناخواسته تعریف می‌شود. سطح نوفه محیط در واقع ترکیبی از نوفه همه منابع نزدیک و دور در یک مکان معین است. دسی‌بل (dB) واحدی که دامنه صدا را توصیف می‌کند، برابر با ۲۰ برابر لگاریتم به پایه ۱۰ از نسبت فشار اندازه‌گیری شده به فشار مرجع معادل با ۲۰ میکروپاسکال ( $\mu\text{Pa}$ ) است [۱۰]. فروصوت<sup>۳</sup> مطابق با کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک<sup>۴</sup> (IEC) اینگونه تعریف می‌شود: نوسانات صوتی که فرکانس آنها زیر حد فرکانس پایین شنیداری (حدود ۱۶ هرتز) است. گوش انسان قادر به درک طیف‌های وسیعی از صداها است، به‌طور معمول، گوش غیر پاتولوژیک جوان می‌تواند صداها را از ۲۰ هرتز تا ۲۰،۰۰۰ هرتز را درک کند [۱۰]. یک فرضیه عمومی وجود دارد که نوفه‌های فرکانس‌های پایین‌تر از شنیداری می‌توانند به سلامتی انسان آسیب برسانند. به عنوان مثال، پیشنهاد شده است که صداهایی که دارای نوفه با فرکانس پایین، که مهم‌ترین آنها در سطح فروصوت است، می‌توانند بر سلامتی تأثیر منفی بگذارند، حتی اگر سطح آنها پایین‌تر از حد متوسط فرد در تشخیص یا شنیدن باشد [۱۱].

برداشت انرژی با استفاده از یک غشای پیزوالکتریک انجام شده که از یک لایه پیزوالکتریک یک لایه برنج و یک لایه آلومینیوم برای این کار استفاده شد [۱۲]. استفاده از تیر برای جمع‌آوری انرژی در کارهای گذشته نیز انجام شده است که بر اساس ارتعاش تیر باعث ایجاد ولتاژ در سطح ماده پیزوالکتریک شد و آجیساریا<sup>۵</sup> در کار خود یک تیر پیزوالکتریک را برای تولید ولتاژ طراحی کرد که از لایه پیزوالکتریک و دولایه فلز در آن استفاده شده است [۱۳]، همچنین در مرجع [۱۴] با استفاده از یک تیر پیزوالکتریک و یک شتاب دهنده با قرار دادن یک جرم بر روی نوک تیر باعث کاهش فرکانس رزونانس شدند. در سال ۲۰۲۰ بهینه‌سازی محل قرارگیری جرم روی تیر با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای گرفتن بیشترین ولتاژ انجام شد [۱۵]. آقای اسان در کار خود اثبات کرد که تیر مثلی نسبت به حالت مستطیلی ولتاژ بهتری در مود ارتعاش تولید می‌کند ولی فرکانس رزونانس در مودهای ارتعاشی تیرک در حالت مثلی بالاتر به دست می‌آید [۱۶].

در این مقاله با استفاده از بهینه‌سازی مکان قرارگیری تیرک پیزوالکتریک در نقطه بهینه از استفاده اضافی ماده پیزوالکتریک (پلی وینیلیدن فلوراید) جلوگیری شد تا طول بهینه برای فرکانس بهینه به دست آید. در بخش‌های بعدی به ترتیب روابط ریاضی برای تیر مستطیلی و تخمین فرکانس‌های طبیعی آورده شده و سپس بخش شبیه‌سازی تیر و در نهایت بحث و تحلیل آمده است.

## ۲. تحلیل ارتعاش یک تیرک یک سر ثابت

تجزیه و تحلیل ارتعاشات حوزه‌ای جذاب و چالش‌برانگیز است و در شاخه‌های مختلف مهندسی کاربرد دارد. مطالعه رفتار نوسانی اجسام، اصول ارتعاشات را تشکیل می‌دهد. هر جسمی که دارای جرم و قابلیت الاستیسیته باشد می‌تواند ارتعاش داشته و در برابر نیرو و حرارت تغییر شکل دهد و با کنار رفتن عامل ارتعاش به حالت اولیه باز گردد.

معادله حرکت از نظریه تیر اولر- برنولی آورده شده که در این بخش تخمین فرکانس‌های طبیعی برای انواع تیرها آورده شده است. برای یک تیرک یکنواخت که تحت ارتعاش آزاد قرار می‌گیرد می‌توان معادله حرکت را از فرمول ۱ به دست آورد [۱۷-۱۸].

$$EI \frac{\partial^4 z(x, t)}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 z(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

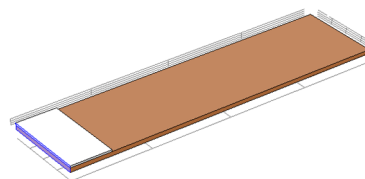
که در اینجا  $EI$  سختی خم شدن،  $m$  جرم در واحد طول تیر همچنین  $z(x, t)$  جابه‌جایی عرضی در محور خنثی (در نقطه  $x$  و در زمان  $t$ ) به دلیل خم‌شدگی است، همچنین  $z(x, t)$  می‌تواند به عبارت پایین که در فرمول ۲ آمده است، نشان داده شود:

$$z(x, t) = z_b(x, t) + z_{rel}(x, t) \quad (2)$$

که در اینجا  $z_b(x, t)$  جابه‌جایی پایه تیر و  $z_{rel}(x, t)$  نشان‌دهنده جابه‌جایی عرضی تیرها نسبت به پایه است.

### ۳. نمای مسئله و تخمین فرکانس‌های طبیعی برای یک تیرک مستطیلی

نمای تیرک مستطیلی در ابعاد مشخص در شکل ۱ نشان داده شده است، که پایه تیر از جنس مس است و لایه پیزوالکتریک روی آن نصب شده است.



شکل ۱. تیر مستطیلی با دولایه مختلف مس (نارنجی) پیزوالکتریک (سفید) که بخش سمت چپ (آبی) آن ثابت شده و در نرم‌افزار کامسول<sup>۶</sup> شبیه‌سازی شده است.

فرکانس طبیعی همان‌طور که از نامش پیداست فرکانسی است که سیستم مورد نظر بر حسب مشخصات خود تمایل به نوسان در آن فرکانس دارد. به دست آوردن این فرکانس در نقطه بهینه باعث رسیدن به بیشترین ولتاژ و رسیدن به کمترین و بهینه‌ترین توان در تیرهای مستطیلی می‌شود. برای ارتعاش آزاد در تیر مستطیلی جابه‌جایی عرضی وجود دارد که طبق رابطه ۳ بیان می‌شود:

$$z_{rel}(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} w_k(x) q_k(t) \quad (3)$$

که در اینجا  $w_k(x)$ ،  $q_k(t)$  به ترتیب مکان جابه‌جایی تیرک و بخش زمانی جابه‌جایی تیرک یک تیر یکسر آزاد و یکسر گیردار در مود  $k$ ام است که در فرمول ۴ آمده است.

$$\frac{EI}{m w_k(x)} \frac{d^4 w_k(x)}{dx^4} = - \frac{1}{q_k(t)} \frac{d^2 q_k(t)}{dt^2} = \omega_k^2 \quad (4)$$

در اینجا  $\omega_k^2$  ثابت مثبتی است. همچنین معادله بالا با معادله ۵ بیان می‌شود.

$$\frac{d^4 w_k(x)}{dx^4} - \gamma_k^4 w_k(x) = 0 \quad (5)$$

که در اینجا  $\gamma_k$  در فرمول ۶ بیان می‌شود:

$$\gamma_k^4 = \frac{m}{EI} \omega_k^2 \quad (6)$$

فرض کنید  $w_k(x) = C e^{sx}$  که در اینجا  $C$  و  $s$  ثابت هستند، حل معادله ۵ به صورت فرمول ۷ بیان می‌شود:

$$w_k(x) = C_1 \sin\left(\frac{\gamma_k}{L} x\right) + C_2 \cos\left(\frac{\gamma_k}{L} x\right) + C_3 \sinh\left(\frac{\gamma_k}{L} x\right) + C_4 \cosh\left(\frac{\gamma_k}{L} x\right) \quad (7)$$

#### ۴. نتایج شبیه سازی

همان‌طور که در شکل ۱ می‌بینیم از دو ماده مختلفی که با رنگ‌های مختلف نشان داده شده، استفاده شده است و بخش سمت چپ برای هر دو ماده ثابت شده است، زیرا در حالتی که سیستم ذکر شده مرتعش می‌شود، بخش ابتدایی آن کشش پیدا می‌کند و باعث تحریک ماده پیزوالکتریک خواهد شد. در شکل ۱ از یک ورق کوچک‌تر پلی وینیلیدن فلوراید (PVDF) نسبت به مس استفاده شده و این لایه پیزوالکتریک فقط در بخشی که باعث ایجاد ولتاژ می‌شود استفاده شده است. از ماده PVDF به دلیل حساسیت بیشتر، نسبت به سایر ماده‌های پیزوالکتریک مانند PZT<sup>۸</sup> استفاده شده است.

با توجه به جدول ۱ از یک تیر با دو لایه مختلف در طول‌های مختلف استفاده شده که طول لایه مسی با لایه پیزوالکتریک (PVDF) اختلاف دارد، این شبیه‌سازی با این ابعاد در نرم‌افزار کامسول انجام شد و سپس در این نرم‌افزار، شکل مود ارتعاش‌های مختلف برای به‌دست آوردن فرکانس‌های طبیعی تیر مورد نظر شبیه‌سازی شده است، در اینجا انواع ارتعاش‌های افقی و عمودی و لبه‌ای بررسی شد. فرکانس ۱۰۰/۷۲ هرتز مربوط به ارتعاش عمودی و کاربردی‌ترین فرکانس طبیعی برای سیستم است، چراکه در این حالت دلیل تولید ولتاژ بیشتری بر سطح تیر پیزوالکتریک مورد نظر خواهد بود.

در اینجا هدف بررسی سیستم بر اساس بیشترین تأثیر صوت روی تیر است و بررسی می‌شود چه میزان فرکانسی برای طراحی این تیر لازم خواهد بود تا بیشترین تحریک همراه با بیشترین جابه‌جایی را باعث شود که بتوان از این تیر انرژی برداشت کرده و از این انرژی استفاده کرد.

ارتعاش عمودی سیستم در شکل ۲ نشان داده شده که در اینجا نوک تیر (قسمت قرمز رنگ) دارای بیشترین جابه‌جایی عمودی است که دلیل ایجاد بیشترین کشش در ناحیه هم‌پوشانی تیر پیزوالکتریک با تیر مسی می‌شود.

که  $C_1, C_2, C_3$  و  $C_4$  ثابت‌های مختلف به‌دست آمده در شرایط مرزی هستند، همچنین  $L$  طول تیر است.  $\omega_k$  فرکانس طبیعی تیر در مود  $k$ ام است که از رابطه ۸ به‌دست می‌آید:

$$\omega_k = \gamma_k^2 \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (۸)$$

به‌علاوه سیستم شامل دو ماده متفاوت است که  $EI, m$  از فرمول ۹ و ۱۰ به‌دست می‌آیند [۵]:

$$m = B(\rho_b h_b + \rho_p h_p) \quad (۹)$$

$$EI = B[E_b \left(\frac{h_b^3}{12}\right) + \frac{E_p}{3} \left(\left(\frac{h_b}{2} + h_p\right)^3 - \frac{h_b^3}{8}\right)] \quad (۱۰)$$

در اینجا  $B$  عرض،  $\rho$  چگالی و  $h$  ضخامت است. همچنین زیرنویس  $b$  مربوط به زیرساختار تیرک (در اینجا مس) است و  $p$  نیز مربوط به لایه پیزوالکتریک است. با اعمال شرایط مرزی در معادله  $W_k(x)$ ، معادله فرکانس از رابطه ۱۱ به‌دست می‌آید:

$$1 + \cos \gamma_k \cosh \gamma_k = 0 \quad (۱۱)$$

علاوه بر آن از معادله ۷، معادله ۱۲ به‌دست می‌آید:

$$w_k(x) = \sin\left(\frac{\gamma_k}{L}x\right) - \sinh\left(\frac{\gamma_k}{L}x\right) + \beta_k \left[\cos\left(\frac{\gamma_k}{L}x\right) - \cosh\left(\frac{\gamma_k}{L}x\right)\right] \quad (۱۲)$$

که با این وجود در معادله ۱۳ داریم:

$$\beta_k = \frac{-\cos \gamma_k - \cosh \gamma_k}{-\sin \gamma_k + \sinh \gamma_k} \quad (۱۳)$$

معادله ۱۲ شکل مودهای تیر در مود ارتعاش  $k$ ام است، و از این معادله برای شبیه‌سازی استفاده شده است.

تیرک مورد نظر را تحریک کرده و اثر آن روی تیرک را مشاهده می‌کنیم. تمام نتایج از روش المان محدود برای این مقاله به‌دست آمده است.

در این مقاله با داشتن ابعاد سیستم پیشنهادی با اعمال یک نوفه بلندگو با توان ۱۰۰ دسی‌بل در فرکانس ۱۰۰ هرتز در یک محیط ۱ متر مکعبی در فاصله مشخص از بلندگو،

جدول ۱. ابعاد لایه‌های استفاده شده و ویژگی مکانیکی لایه‌ها

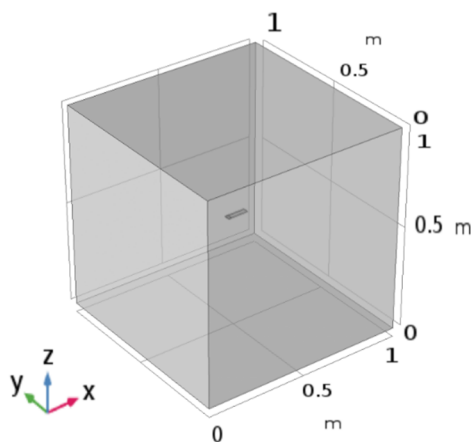
مقادیر	پارامترهای لایه پیژوالکتریک (PVDF Layer)	مقادیر	پارامترهای تیرک مسی (Copper Layer)
۰/۰۱	طول [m]	۰/۰۷۸	طول [m]
۰/۰۲	عرض [m]	۰/۰۲	عرض [m]
۰/۰۰۰۵	ضخامت [m]	۰/۰۰۱	ضخامت [m]
$1/2 \times 10^9$	مدول یانگ [N/m <sup>2</sup> ]	$110 \times 10^9$	مدول یانگ [N/m <sup>2</sup> ]
۱۷۸۰	غلظت جرم [kg·m <sup>3</sup> ]	۸۷۰۰	غلظت جرم <sup>۱۰</sup> [kg·m <sup>3</sup> ]

جدول ۲. فرکانس‌های طبیعی سیستم با مودهای ارتعاشی مختلف

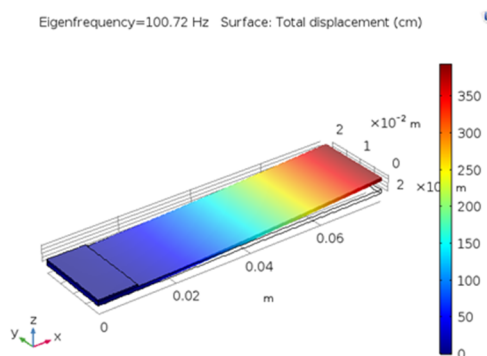
مود ارتعاشی	مود ارتعاش ۱	مود ارتعاش ۲	مود ارتعاش ۳	مود ارتعاش ۴	مود ارتعاش ۵	مود ارتعاش ۶
فرکانس‌های طبیعی (Hz)	۱۰۰/۷۲	۶۲۶/۴۳	۷۶۴/۶۸	۱۷۵۱/۹	۱۸۶۱/۷	۲۳۶۵/۹

قرارگیری تیرک جهت مدل‌سازی در محیط اتاق در شکل ۳ قابل مشاهده هستند.

میزان جابه‌جایی سطحی تیرک با ثابت شدن یک سمت تیرک در فرکانس خمشی اول سیستم در شکل ۲، و شرایط



شکل ۳. محیط مفروض برای قرار دادن تیرک در یک فضای بسته شامل هوا



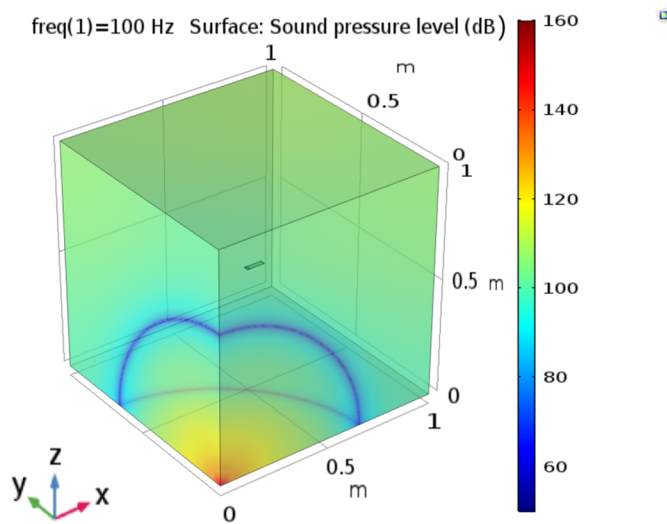
شکل ۲. ارتعاش سیستم پیشنهادی بر اساس میزان جابه‌جایی (بیشترین جابه‌جایی از قرمز به آبی است).

همچنین یک منبع صوتی در یکی از گوشه‌های اتاق با توان ۱۰۰ دسی‌بل درحالی‌که دیوارهای اتاق مرز سخت<sup>۹</sup>

در شکل ۳ فضای اتاق با هوا پر شده است و تیرک مستطیلی طراحی شده در وسط اتاق قرار گرفته است.

شبیه‌سازی شده است. پراکندگی فشار سطح صوت در فضای اتاق و در حول تیرک در شکل ۴ برحسب دسی‌بل نشان داده می‌شود.

در نظر گرفته شد، جنس زیر ساختار تیرک مس و جنس ماده پیزوالکتریک، پلی وینیلیدن فلوراید در نظر گرفته شده است. این تیرک با شرط ثابت شدن یک سمت آن

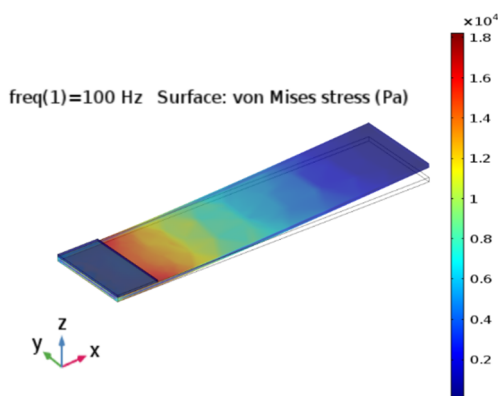


شکل ۴. پراکندگی سطح فشار صوت در فرکانس ۱۰۰ هرتز در فضای اتاق و طول تیرک.

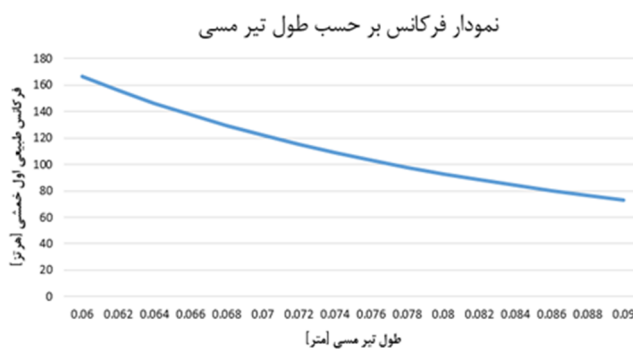
دادن طول زیرساختار در ابعاد جدول ۱ می‌توان میزان تنش ناشی از صدای بلندگو را در شکل ۶ مشاهده کرد. بیشترین میزان تنش در نزدیکی قسمت پیزوالکتریک به علت کشیدگی تیرک حدود ۱۸ کیلوپاسکال در فرکانس خمشی اول یعنی حدود ۱۰۰ هرتز است، تنظیم طول تیرک روی فرکانس مطلوب دلیل افزایش ولتاژ جمع‌آوری شده است [۱۹].

## ۵. بحث و تحلیل

تغییر طول تیرک مسی و یا همان بخش زیر ساختار این تیرک برای تنظیم فرکانس خمشی اول سیستم در نمودار شکل ۵ نشان داده شده است. از روی شکل ۵ دیده می‌شود که برای بیشترین واکنش سیستم به نوبه بلندگو با توان ۱۰۰ دسی‌بل در فرکانس حدود ۱۰۰ هرتز باید طول زیرساختار تیرک  $7/8$  سانتی‌متر در نظر گرفته شود. با قرار



شکل ۶. پراکندگی تنش ناشی از فشار صوت روی تیرک طراحی شده در فرکانس ۱۰۰ هرتز



شکل ۵. نمودار فرکانس بر حسب طول تیر مسی برای رسیدن به فرکانس خمشی نزدیک ۱۰۰ هرتز

## ۶. نتیجه‌گیری

منبع صوت با توان ۱۰۰ دسی‌بل استفاده شد. فرکانس رزونانس خمشی اول تیرک ۱۰۰/۷۲ هرتز به دست آمده است. ولتاژ تولیدی برای فشار صوت شبیه‌سازی شده با ایجاد تنش ۱۸ کیلو پاسکال روی سطح ماده پیزوالکتریک ۷۰ میلی‌ولت گزارش شده است که در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

در این مقاله از یک تیرک با دو لایه مختلف که طول لایه زیرساختار ۷/۸ سانتی‌متری و لایه پیزوالکتریک در نقطه بهینه تیرک مسی با ضخامت نصف لایه مسی است استفاده شده است. این سیستم می‌تواند در محیط‌های شلوغ و پر سروصدا با تنظیم فرکانس رزونانس برای ذخیره انرژی استفاده شود. برای مدل‌سازی محیط پر نوفه از یک

## ۷. مأخذ

- [1] Priya, Shashank, and Daniel J. Inman, eds., "Energy harvesting technologies", Vol.21, New York, Springer, 2009.
- [2] Cottone, Francesco, Helios Vocca, and Luca Gammaitoni, "Nonlinear energy harvesting." *Physical Review Letters* 102.8 (2009): 080601.
- [3] Sudevalayam, Sujesha, and Purushottam Kulkarni, "Energy harvesting sensor nodes: Survey and implications", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2010, Vol.13, no.3, pp.443-461.
- [4] Chalasani, Sravanthi, and James M. Conrad, "A survey of energy harvesting sources for embedded systems", In *IEEE SoutheastCon 2008*, pp.442-447.
- [5] Erturk, Alper, and Daniel J. Inman, "Piezoelectric energy harvesting", John Wiley & Sons, 2011.
- [6] Sodano, Henry A., Daniel J. Inman, and Gyuhae Park, "Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for recharging batteries", *Journal of intelligent material systems and structures*, 2005, Vol.16, no.10, pp.799-807.
- [7] Nechibvute, Action, Albert Chawanda, and Pearson Luhanga, "Piezoelectric energy harvesting devices: an alternative energy source for wireless sensors", *Smart Materials Research*, 2012.
- [8] Chalasani, Sravanthi, and James M. Conrad, "A survey of energy harvesting sources for embedded systems", In *IEEE SoutheastCon*, 2008, pp.442-447.
- [9] Martínez-Cisneros, Eustaquio, Luis A. Velosa-Moncada, Del Angel-Arroyo, A. Jesús, Luz Antonio Aguilera-Cortés, Carlos Arturo Cerón-Álvarez, and Agustín L. Herrera-May, "Electromechanical Modeling of MEMS-Based Piezoelectric Energy Harvesting Devices for Applications in Domestic Washing Machines", *Energies*, 2020, Vol.13, no.3, p.617.
- [10] Colby, D., Robert Dobie, Geoff Leventhall, David M. Lipscomb, Robert J. McCunney, Michael T. Seilo, and Bo Sondergaard, "Wind turbine sound and health effects: An expert panel review", 2009.
- [11] Alves-Pereira, Mariana, and NAA Castelo Branco. "In-home wind turbine noise is conducive to vibroacoustic disease", *Proceedings of the Second International Meeting on Wind Turbine Noise*, 2007.
- [12] Ericka, M., Dejan Vasic, François Costa, Guylaine Poulin, and Sami Tliba, "Energy harvesting from vibration using a piezoelectric membrane", In *Journal de Physique IV (Proceedings)*, EDP sciences, 2005, vol.128, pp.187-193.
- [13] Ajitsaria, Jyoti, Song-Yul Choe, D. Shen, and D. J. Kim, "Modeling and analysis of a bimorph piezoelectric cantilever beam for voltage generation", *Smart Materials and Structures*, 2007, Vol.16, no.2, pp.447.

- [14] Fakhzan, M. N., and Asan GA Muthalif, "Harvesting vibration energy using piezoelectric material: Modeling, simulation and experimental verifications", *Mechatronics*, 2013, Vol.23, no.1, pp.61-66.
- [15] Homayouni-Amlashi, Abbas, Abdenbi Mohand-Ousaid, and Micky Rakotondrabe, "Analytical Modelling and Optimization of a Piezoelectric Cantilever Energy Harvester with In-Span Attachment", *Micromachines*, 2020, Vol.11, no.6, pp.591.
- [16] Muthalif, Asan GA, and NH Diyana Nordin, "Optimal piezoelectric beam shape for single and broadband vibration energy harvesting: Modeling, simulation and experimental results", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, Vol.54, pp.417-426.
- [17] Dimarogonas, Andrew D., "Vibration for engineers", Prentice Hall, 1996.
- [18] Yang, Kai, Zhigang Li, Yupeng Jing, Dapeng Chen, and Tianchun Ye, "Research on the resonant frequency formula of V-shaped cantilevers", In *2009 4th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, IEEE, 2009, pp.59-62.
- [۱۹] پناهی، امیر، علیرضا حسن‌زاده و علی مولوی، "طراحی یک تیر پیزوالکتریک برای جمع‌آوری انرژی ارتعاشی در محیط‌های پر نوفه، نهمین کنفرانس بین‌المللی آکوستیک و ارتعاشات، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، انجمن آکوستیک و ارتعاشات ایران، ۱۳۹۸.

## پی‌نوشت:

1. Noise
2. Speaker
3. Infrasound
4. International Electrotechnical Commission (IEC)
5. Ajitsaria
6. COMSOL Multiphysics Software
7. Polyvinylidene fluoride
8. lead zirconate titanate
9. Hard boundary
10. Mass density