

طراحی و تحلیل یک میکروژنراتور پیزوالکتریک با قابلیت تنظیم پذیری فرکانس طبیعی برای کاربرد در شبکه سنسورهای بی سیم

امین دمیا^۱، مربی؛ ابراهیم عباسپور ثانی^۲، دانشیار؛ قادر رضازاده^۳، استاد

۱- دپارتمان مهندسی برق - دانشکده قاضی طباطبایی - دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان آذربایجان غربی - ایران

۲- دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه ارومیه - ارومیه - ایران - e.abbaspour@urmia.ac.ir

۳- دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه ارومیه - ارومیه - ایران

چکیده: در این مقاله یک میکروژنراتور با استفاده از تیر دوسرگیردار همراه با بارگذاری در وسط تیر برای تولید انرژی الکتریکی مورد مطالعه قرار گرفته است. تیر از لایه‌های مختلفی از سیلیکون، پیزوالکتریک، عایق‌ها و الکترودها بر اساس تکنولوژی میکروماشین تشکیل شده است که توسط نیروی خارجی اعمال شده به قاب ثابت آن نوسان می‌کند. طراحی ساختار بگونه‌ای بوده که با بیشترین استفاده از فضای موجود، یک تولید کننده انرژی پیزوالکتریک با ابعاد 0.25 cm^2 با قابلیت کنترل فرکانس طبیعی آن حاصل شده است. علاوه بر لایه پیزوالکتریک مولد، یک لایه دیگر پیزوالکتریک جهت تحریک سیستم نیز در دو طرف تیر لایه نشانی شده است که امکان جابجایی فرکانس طبیعی را تا کمتر از 10 Hz برای سیستم فراهم می‌کند. تحلیل تئوری بروش معادلات دیفرانسیل جزئی برای تیر دوسرگیردار چندلایه انجام شده است که شبیه‌سازی انجام شده نیز نتایج تئوری را تایید می‌کند. در میکروژنراتور طراحی شده، فرکانس طبیعی سیستم در حالت بدون تحریک 127 Hz بوده که در شتاب 1 g ، ولتاژ 3.35 V تولید نموده و توان الکتریکی $45 \mu\text{W}$ از آن قابل دریافت می‌باشد که برای کاربردهای شبکه حسگرهای بی‌سیم و زیست حسگرها مناسب می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ذخیره کننده انرژی پیزوالکتریک، تیر دوسرگیردار، شبکه حسگرهای بی‌سیم، زیست حسگرها.

Designing and Analyzing of a Piezoelectric Energy Harvester with Tunable Natural Frequency for WSN Application

Amin Damya, instructor¹; Ebrahim Abbaspour sani, Associate professor²; Ghader Rezazadehe, professor³

1- Department of Electrical Engineering, Faculty of Ghazi tabatabaee, Urmia Branch, Technical and Vocational University (TVU), Urmia, Iran, Email: a.damya@urmia.ac.ir

2- Faculty of Engineering, University of Urmia, Urmia, Iran, Email: e.abbaspour@urmia.ac.ir

3- Faculty of Engineering, University of Urmia, Urmia, Iran, g.rezazadeh@urmia.ac.ir

Abstract: This paper presents a new approach for a Piezoelectric Energy Harvester (PEH) with actuation piezoelectric layer to shift system natural frequency. Beams are consisted of Si and AlN piezoelectric based on MEMS technology and piezoelectric is deposited on Fixed-Fixed beams with mass loading that produces more stress points and generates more power in comparison to other cantilever beam PEHs. This PEH with ability of shifting system natural frequency is designed in the size of 0.25 cm^2 using optimum available space. In addition to piezoelectric generating layers, piezoelectric layers for actuation purpose is added on both sides of the beams for possibility of reducing system natural frequency to less than 10 Hz . Accomplished simulation also confirms theoretical calculation done by Partial Differential Equation (PDE) method for a Fixed-Fixed beam with mass loading in the center to estimate natural frequency of the system and generated voltage from piezoelectric effect. Natural frequency of the system in the designed structure without piezoelectric actuation voltage is about 127 Hz that with 1 g acceleration generated ± 3.35 volts and $45 \mu\text{W}$ electrical powers which can be used in wireless sensor network and biosensing applications.

Keywords: Piezoelectric energy harvester (PEH), Fixed-Fixed beam, Wireless Sensor Network, Biosensing.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۱۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۰۴ و ۱۳۹۷/۱۱/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۰۸

نام نویسنده مسئول: ابراهیم عباسپور ثانی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - ارومیه - بلوار شهید بهشتی - دانشگاه ارومیه - مرکز تحقیقات میکروالکترونیک .

۱- مقدمه

انتهایی استفاده شده است توانسته فرکانس طبیعی سیستم را به ۵۸ Hz کاهش داده و توان $63 \mu W$ را در تحریک $0.7 g$ بدست آورد. استفاده از تیر یک سرگردار بصورت ترکیبی با ممبران توسط جیا و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۱۵] باعث افزایش پهنای باند میکروژنراتور شده است. در ساختار طراحی شده توسط نبوی و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۱۶] نیز از تیر دوسرگردار با سه وزنه استفاده شده است تا فرکانس طبیعی را کاهش و پهنای باند را افزایش دهد. کاتپالیا و همکاران نیز در سال ۲۰۱۷ [۱۷] از تیر دو سرگردار در اندازه 25 cm^2 بصورت کاشی جهت دریافت انرژی از حرکت عابری استفاده نموده و توانسته توانی برابر $80 \mu W$ در فرکانس کمتر از ۱۰ Hz ناشی از حرکت عابری را جذب نماید. در کار ارائه شده توسط دمیا و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۱۸] در ابعاد 1 cm^2 توانسته فرکانس طبیعی سیستم را تا ۴۲ Hz کاهش دهد. لذا با توجه به کاربرد این میکروژنراتورها، کاهش ابعاد با استفاده حداکثری از فضا، پایین بودن فرکانس طبیعی سیستم و سازگار بودن با محیط زیست و بدن انسان یکی از چالش ها در این زمینه می باشد که در طراحی ساختار جدید باید مورد توجه قرار گیرد.

۲- طراحی ساختار جدید و نحوه ساخت

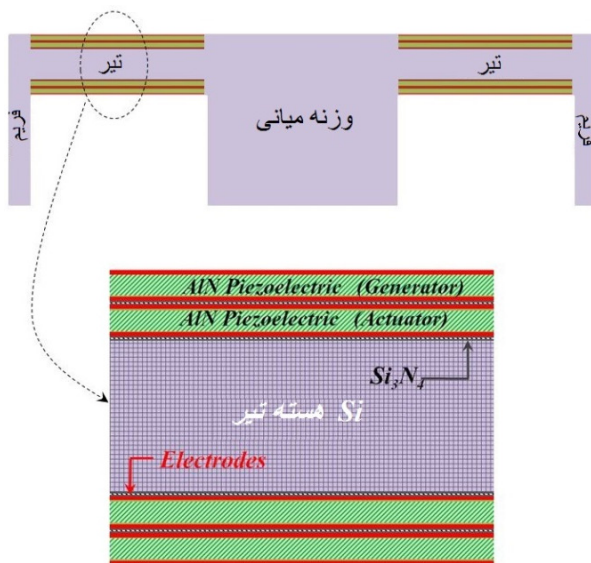
جهت بهبود کارهای انجام شده در گذشته برای میکروژنراتورها، در طراحی پیشنهادی با قرار دادن تیرها در چهار طرف قاب بصورت تیر دو سرگردار همانند شکل ۱، نقاط تنش بالاتری نسبت به تیر یک سرگردار بدلیل نوع خمش ایجاد خواهد شد. زیرا در تیر یک سرگردار تنش فقط در ابتدای تیر وجود داشته درحالیکه در ساختار پیشنهادی تنش در ابتدا و انتهای تیر و نقاط نزدیک وزنه حداکثر می باشد. قرار دادن وزنه میانی و همچنین بلندتر بودن هرچه بیشتر طول تیرها نیز به پایین تر آوردن فرکانس طبیعی سیستم کمک خواهد نمود [۱۸]. در طراحی انجام شده طبق قانون جمع آثار می توان دو تیر دوسر گردار (a) و (b) در شکل ۱ را بعنوان یک تیر دوسر گردار در نظر گرفت که نیروی وزنه میانی بصورت نقطه ای بر مرکز تیر اعمال می شود. باتوجه به اینکه هدف ما ایجاد قابلیت جابجایی و تنظیم پذیری فرکانس طبیعی سیستم می باشد لذا یک لایه پیزوالکتریک تحریک نیز در دو طرف تیرها علاوه بر لایه پیزوالکتریک مولد لایه نشانی می کنیم. قرار دادن تیرها بصورت قطری طول بیشتری را نسبت به تیر در حالت عرضی ایجاد می کند. لذا استفاده حداکثر از فضای مورد نظر جهت هرچه بزرگتر در نظر گرفتن وزنه میانی و طول تیرها ضرورت دارد که در طراحی انجام گرفته مورد توجه قرار گرفته است. ضخامت وزنه میانی جهت به حداکثر رسیدن اثر آن برابر با ضخامت ویفر ۴ اینچی $500 \mu m$ در نظر گرفته شده است. برای برداشتن سیلیکون اطراف وزنه نیز باید از روش برداشت بمباردمان یونی^۲ استفاده شود. لذا قرار دادن حداقل فاصله $200 \mu m$ بین قسمت های مختلف ضرورت دارد. طول هر تیر دوسر گردار قطری $4/23 \text{ mm}$ و عرض آن $456 \mu m$ می باشد که مساحت میکروژنراتور 0.25 cm^2 خواهد بود.

باتوجه به افزایش کاربرد حسگرها در مکان ها و صنایع مختلف، ضرورت تامین منابع انرژی این حسگرها نیز مورد توجه قرار گرفته است که اغلب در مکان هایی که دور از دسترس می باشند از طریق باتری ها تامین می شود [۱]. در مکانهایی مانند جاده ها، خطوط ریلی، پل ها، جنگلها و دریا که از حسگرهای بی سیم بصورت شبکه ای برای کنترل، نگهداری و رصد وضعیت استفاده می شود، تامین انرژی این سنسورها که اغلب توان مصرفی کمتر از $100 \mu W$ دارند از طریق باتری ها و یا انرژی های تجدیدپذیر صورت می گیرد [۴-۲]. در حسگرهای قابل کاشت در داخل بدن نیز اغلب تامین انرژی بعهده باتری ها می باشد. در دستگاه ضربان ساز قلب که برای ایجاد تحریک های پالسی در قلب بکار می رود، باتری های تامین کننده انرژی دارای طول عمر پنج الی ده سال می باشند که می توانند با باتری های قابل شارژ و شارژ از طریق انواع میکروژنراتورها جایگزین شوند تا نیاز به تعویض باتری را در زمان های کوتاه برطرف کند [۵].

روشهای مختلفی برای ذخیره انرژی وجود دارد که از عمده ترین آنها فتولتائیک، الکترومغناطیس، پیزوالکتریک، الکتروگرمایی و الکترواستاتیک می باشد. میکروژنراتورهای الکتروگرمایی و الکترواستاتیکی دارای بازدهی توان بر سطح کمتری نسبت به دیگر میکروژنراتورهای فتولتائیک و پیزوالکتریک می باشند [۶]، لذا استفاده از روش فتولتائیک و پیزوالکتریک بدلیل قابلیت تولید توان بالاتر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۷]. از معایب روش فتولتائیک کاهش شدید بازده آنها در محیط هایی است که نور مستقیم وجود ندارد. در میکروژنراتورهای پیزوالکتریک انرژی ناشی از نوسانات مکانیکی محیطی باعث ایجاد تنش شده و در نتیجه تغییر تجمع بار، ایجاد اختلاف پتانسیل الکتریکی می نماید. باید توجه نمود که فرکانس نوسانات مکانیکی محیطی دارای محدوده وسیعی می باشد ولی اغلب نوسانات مکانیکی محیطی مانند انرژی جنبشی ناشی از امواج دریا، نوسانات ماشین ها و حرکات بدن انسان در محدوده فرکانسی پایین تر از ۱ KHz می باشند [۸]. بنابراین هدف ما طراحی سیستمی با فرکانس طبیعی پایین می باشد که بتواند حداکثر توان را از نوسانات مکانیکی محیط دریافت نماید و برای کاربردهای شبکه حسگرهای بی سیم و زیست حسگرها مناسب باشد.

میکروژنراتورهای بر اساس سیستم های میکروالکترومکانیکی^۱ بدلیل ابعاد کوچک معمولاً دارای فرکانس تشدید طبیعی بالا و توان تبدیلی کوچک می باشند. با مروری بر کارهای گذشته می توان دید که اغلب کارهای انجام شده بعنوان میکروژنراتور پیزوالکتریک، دارای ابعادی بزرگتر از 1 cm^2 بوده و دارای پهنای باند ثابت و محدودی می باشند [۹-۱۳]. یکی از بیشترین ساختارهای بکار رفته، استفاده از تیر یک سرگردار با اتصال وزنه به انتهای تیر می باشد که در این ساختار تنش تنها در نقاط نزدیک به پایه تیر حداکثر است. در کار انجام شده توسط آندوسکا و همکاران در سال ۲۰۱۲ [۱۴] که از تیر یک سرگردار با وزنه

برداشت با یون غیرفعال برداشته تا تیرها و وزنه را آزاد کنیم. شکل ۲، میکروژنراتور بعد از ساخت و ترتیب لایه‌های تیر را نشان می‌دهد.



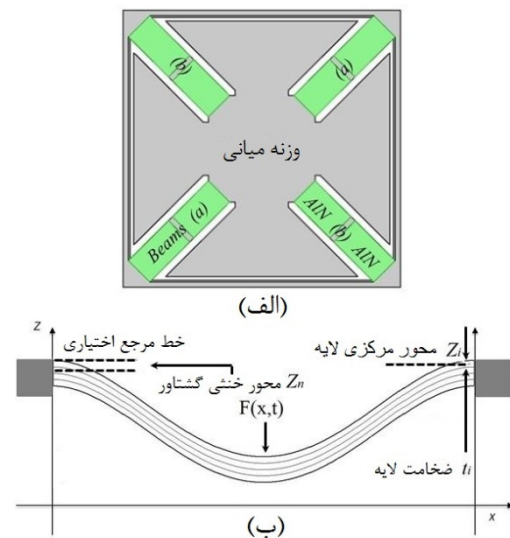
شکل ۲: شکل میکروژنراتور بعد از مراحل ساخت و ترتیب لایه‌های تیر

۳- تحلیل تئوری

هدف از این بخش بدست آوردن فرکانس طبیعی سیستم و محاسبه مقدار جابجایی فرکانس طبیعی سیستم در اثر اعمال ولتاژ و تحریک خارجی می‌باشد تا اثر پیزوالکتریک ایجاد شده و توان قابل دریافت از آن را مورد مطالعه قرار دهیم. تیر از دو طرف به پایه متصل بوده و نیروی حاصل از وزنه میانی نیز در تحلیل بصورت نقطه‌ای بر مرکز تیر در نظر گرفته شده است. براساس تحلیل اویلر برنولی برای نوسان تیر [۲۲] داریم:

$$EI \frac{\partial^4 Z(x,t)}{\partial x^4} + \left(m + m_0 \delta \left(x - \frac{L}{2} \right) \right) \frac{\partial^2 Z(x,t)}{\partial t^2} + C \frac{\partial Z(x,t)}{\partial t} - T_p \frac{\partial^2 Z(x,t)}{\partial x^2} = F(t) \quad (1)$$

در این معادله $Z(x,t)$ جابجایی نقاط مختلف تیر و C ضریب میرایی می‌باشد. برای در نظر گرفتن اثر نیروی وزنه میانی مقدار وزن آن m_0 در تابع ضربه در وسط تیر ضرب شده است. البته باید توجه نمود که رفتار مکانیکی تیرها در اندازه‌های میکرو و نانو وابسته به ابعاد می‌باشد [۲۳]. برای تحلیل رفتار وابسته به ابعاد می‌توان از تئوری‌های غیرکلاسیک مانند تئوری تنش کوپل^۵ و یا الاستیسیته شیب تنش^۶ استفاده نمود. اثر اندازه در تیرهای میکرو و نانو به مقدار نسبت اندازه ابعاد طولی تیر نسبت به ضخامت تیر بستگی دارد [۲۴]. در این تحقیق هسته تیر از جنس پلی سیلیکون بوده که دارای مقدار مقیاس طولی داخلی کوچکی بوده و بنابراین نسبت مقدار مقیاس طولی داخلی تیر به ضخامت تیر باندازه کافی کوچک بوده تا بتوان بروش کلاسیک اویلر برنولی مورد مطالعه قرار داد [۲۵].



شکل ۱: ساختار ارائه شده برای میکروژنراتور (الف) مشخصات تیر چند لایه دو سر گیردار (ب)؟

استفاده از پیزوالکتریک نیترات آلومینیم^۳ بدلیل فرایند لایه نشانی آسان تر، سازگار بودن با محیط زیست و بدن انسان و ضریب ولتاژ و توان مناسب مد نظر بوده است [۱۹]. با توجه به اینکه فلز مولیبدنم^۴ دارای خاصیت دانه‌گیری خوبی برای رشد نیترات آلومینیم می‌باشد لذا از فلز مولیبدنم بجای آلومینیم جهت الکترودها استفاده شده و Si_3N_4 نیز بعنوان عایق در نظر گرفته شده است [۲۰].

در لایه نشانی پیزوالکتریک لایه مولد باید دقت نمود که لایه نشانی پیوسته کل تیر با پیزوالکتریک باعث خواهد شد ولتاژ حاصل از پیزوالکتریک صفر شود چون ولتاژ تولید شده در یک سمت تیر در اثر تنش فشاری مثبت بوده و در سمت دیگر در اثر تنش کششی منفی خواهد بود و در صورت پیوستگی پیزوالکتریک اثر همدیگر را خنثی خواهند نمود. برای حل این مشکل باید در وسط تیرها، پیزوالکتریک دوطرف تیرها را از هم جدا کنیم. با اضافه کردن یک لایه دیگر پیزوالکتریک جهت تحریک در دو طرف تیر و اعمال ولتاژ به آن سختی تیر را نیز می‌توانیم کنترل کنیم [۲۱].

برای ساخت میکروژنراتور پیشنهاد می‌شود ابتدا یک ویفر تک کریستال را انتخاب کرده و پس از لایه نشانی اکسید جهت محافظت، یک لایه Si_3N_4 ۰/۱ μm لایه‌نشانی کرده و با لیتوگرافی بشکل تیرها در می‌آوریم. سپس ۰/۱ μm فلز Mo نیز به همان شکل بعنوان الکترودها بروش پلاسما لایه‌نشانی و لیتوگرافی می‌کنیم تا در مرحله بعد ۰/۵ μm پیزوالکتریک AlN را بر روی Mo هسته‌گیری کنیم. مجدداً یک لایه الکترودها و عایق بر روی پیزوالکتریک لایه‌نشانی و لیتوگرافی می‌کنیم تا لایه اول مولد پایینی شکل گیرد. با تکرار مراحل لایه تحریک پایینی را نیز به همان حالت شکل می‌دهیم. با رشد پلی‌سیلیکون به ضخامت ۲ μm هسته تیرها را شکل داده و لایه‌های تحریک و مولد بالایی را نیز به همان ترتیب لایه نشانی می‌کنیم. با باز کردن روی الکترودها و تبخیر آلومینیم، اتصالات الکتریکی را ایجاد می‌کنیم. بعد از قرار دادن لایه محافظ بر روی ویفر، از سمت پشت ویفر اطراف وزنه و زیر تیرها را بروش

$$EI \sum_{n=1}^N \frac{\partial^4 \varphi_n(x)}{\partial x^4} u_n(t) + \sum_{n=1}^N \left(m + m_0 \delta \left(x - \frac{l}{2} \right) \right) \varphi_n(x) \ddot{u}_n(t) + C \sum_{n=1}^N \varphi_n(x) \dot{u}_n(x) - T_p \sum_{n=1}^N \frac{\partial^2 \varphi_n(x)}{\partial x^2} u_n(t) = \varepsilon \quad (6)$$

با دانستن اینکه $\int \varepsilon \varphi_m(x) dx = 0, m=1, 2, \dots, M$ خواهیم داشت:

$$EI \sum_{n=1}^N \int \varphi_n^{IV} \varphi_m dx u_n(t) + \sum_{n=1}^N \int \left(m + m_0 \delta \left(x - \frac{l}{2} \right) \right) \varphi_n \varphi_m dx \ddot{u}_n(t) + C \sum_{n=1}^N \int \varphi_n^I \varphi_m dx \dot{u}_n(x) - T_p \sum_{n=1}^N \int \varphi_n^{II} \varphi_m dx u_n(t) = \int \varepsilon_0 \varphi_m(x) dx = 0 \quad (7)$$

با نوشتن معادله برحسب متغیر زمانی خواهیم داشت:

$$\sum_{n=1}^N u_n(t) \left[m \int \varphi_n \varphi_m dx + m_0 \varphi_n(l/2) \varphi_m(l/2) \right] + \sum_{n=1}^N \dot{u}_n(x) \left[C \int \varphi_n^I \varphi_m dx \right] + \sum_{n=1}^N u_n(t) \left[EI \int \varphi_n^{IV} \varphi_m dx - T_p \int \varphi_n^{II} \varphi_m dx \right] = 0 \quad (8)$$

ضریب میرایی تأثیری در مقدار فرکانس طبیعی سیستم نداشته و فقط باعث کاهش دامنه نوسان در این فرکانس خواهد شد. لذا در صورتیکه سیستم را بدون میرایی در نظر بگیریم و با در نظر گرفتن معادله حالت، بصورت معادله حالت تیر دو سرگیردار همانند معادله (۹)، فرکانس طبیعی سیستم را می‌توان بصورت زیر بدست آورد.

$$\varphi(x) = (\cosh \beta_1 x - \cos \beta_1 x) - \frac{\cosh \beta_1 l - \cos \beta_1 l}{\sinh \beta_1 l - \sin \beta_1 l} \times (\sinh \beta_1 x - \sin \beta_1 x) \quad (9)$$

با اضافه نمودن یک لایه پیزوالکتریک به دو طرف بالا و پایین تیر، طبق مقاله ارائه شده توسط دکتر رضازاده و همکاران [۲۱]، اثر آن بصورت یک مشتق درجه دو در معادله (۱) ظاهر شده است که باعث تغییر سختی تیر خواهد شد. مقدار ضریب T_p ، بیانگر اثر تحریک پیزوالکتریک می‌باشد و با اعمال ولتاژ خارجی به پیزوالکتریک لایه نشانی شده در دو طرف تیر با تغییر سختی تیر، فرکانس طبیعی سیستم نیز تغییر خواهد نمود. با تغییر ولتاژ تحریک اعمالی به پیزوالکتریک لایه تحریک، امکان جابجایی فرکانس طبیعی سیستم برای ما فراهم می‌شود. ضریب T_p ، به عرض تیر b ، ولتاژ اعمال شده V_p و ضریب موثر ماده پیزوالکتریک e_{31} بستگی دارد. ضریب موثر ماده پیزوالکتریک برای نیترات آلومینیم $e_{31} = -1/0.5$ می‌باشد.

$$T_p = -2bh_1 E_z e_{31} = -2be_{31} V_p \quad (2)$$

در این معادله بدلیل اینکه تیر از لایه‌نشانی چند لایه نازک از مواد عایق، الکتروود و پیزوالکتریک با خاصیت الاستیک ساخته می‌شود لذا باید از تحلیل ساختار چند لایه که برای ساختارهای براساس تکنولوژی میکروماشین بکار می‌رود استفاده شود [۱۴] [۲۶]. لایه‌های ساخته شده بصورت همگن در نظر گرفته شده و از لحاظ جابجایی لایه، هر لایه به لایه بالایی و پایینی خود چسبیده است.

$$Z_n = \sum_{i=1}^N E_i t_i Z_i / \sum_{i=1}^N E_i t_i \quad (3)$$

$$EI = \sum_{i=1}^N \left\{ A_i E_i \left[(Z_i - Z_N)^2 + \frac{t_i^2}{12} \right] \right\} \quad (4)$$

t_i ضخامت هر لایه، E_i مدول الاستیسیته هر لایه، A_i سطح مقطع هر لایه از تیر و Z_n فاصله محور خنثی گشتاور تیر نسبت به مرجع می‌باشد. فاصله محور هر لایه نسبت به مرجع نیز Z_i خواهد بود. برای تیر با دو لایه پیزوالکتریک AIN تحریک و دو لایه دیگر مولد با ضخامت $0.5 \mu\text{m}$ برای هر کدام و ضخامت هسته تیر از جنس پلی سیلیکون $2 \mu\text{m}$ و ضخامت $0.1 \mu\text{m}$ برای هر یک از الکترودهای Mo و عایق‌های Si_3N_4 ، مقدار Z_n و EI را بدست می‌آوریم.

برای حل معادله (۱) از روش گلرکین^۲ استفاده می‌کنیم. به کمک این روش با تقریب یک فضای بینهایت بعدی به یک فضای N بعدی، با مقدار کمی خطا می‌توان به جواب مناسبی دست یافت. مقدار N را تا حدی که به خطای قابل قبولی برسیم می‌توان افزایش داد که در حل این معادله، ۳ در نظر گرفته شده است. از طریق جداسازی متغیرها معادله (۱) را بروش گلرکین حل کنیم.

$$Z_n(x, t) = \sum_{n=1}^N u_n(t) \times \varphi_n(x) \quad (5)$$

$$\mathcal{L}(Z) = 0 \quad \text{and} \quad \mathcal{L}(Z(x, t)) = \varepsilon$$

$$Q = \int_0^l D_3 w dx = \int_0^l d_{31} E_p W \left[\frac{\partial^2 Z(x,t)}{\partial x^2} (z_n - z_p) \right] dx \quad (16)$$

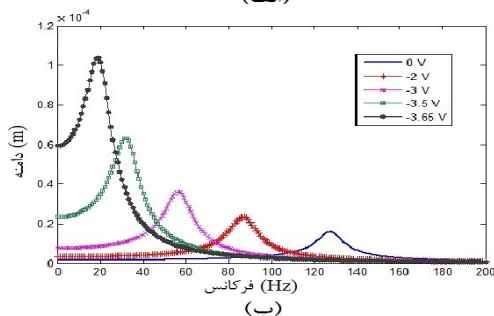
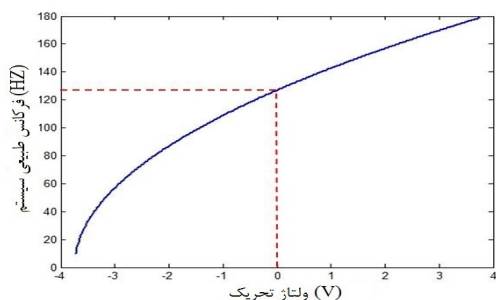
$$C_p = \frac{\varepsilon_0 K_p L W}{t_p} \quad (17)$$

در این معادله C_p مقدار ظرفیت خازنی مابین دو طرف پیزوالکتریک که با الکتروُد پوشانده شده است را نشان می‌دهد، K_p ضریب دی‌الکتریک ماده پیزوالکتریک، t_p ضخامت ماده پیزوالکتریک و W نیز عرض تیر می‌باشد. همچنین E_p مدول الاستیسیته برای ماده پیزوالکتریک بوده و Z_n فاصله محور گشتاور تیر از خط مرجع در جهت Z می‌باشد. فاصله محور گشتاور ماده پیزوالکتریک از خط مرجع اختیاری نیز Z_p است. مدول الاستیسیته نیترات آلومینیم برابر 340 GPa و چگالی حجمی آن 3260 Kg/m^3 می‌باشد. ضریب دی‌الکتریک آن، $K=9$ و ضریب کوپلینگ پیزوالکتریک d_{31} برابر 2 - است.

$$V = \frac{Q}{C_p} = \frac{d_{31} E_p t_p}{\varepsilon_0 K_p L} (z_n - z_p) \frac{AZ_0}{2\beta_1} \cos(\omega_1 t) + \frac{\pi}{2} \int_0^l \frac{\partial^2 Y_1(x)}{\partial x^2} dx \quad (18)$$

Type equation here.

طبق مشخصه‌های AIN و با در نظر گرفتن ضریب میرایی برابر 0.05 ، با جاگذاری مقادیر ضرایب دی‌الکتریک، مدول الاستیسیته، ضریب کوپلاژ الکتريکی و بردار جابجایی میدان الکتريکی در معادله (۱۸)، مقدار ولتاژ حداکثر بدست آمده از طریق محاسبه تئوری در حالت مدار باز $\pm 3.35 \text{ V}$ برای هر ربع بازوی تیر دوسرگیردار می‌باشد. باید توجه نمود که مقدار ضریب میرایی در مقایسه مقدار حداکثر جابجایی تیر در تحلیل تئوری با شبیه سازی با اعمال نیروی یکسان بدست آمده است.



شکل ۳: الف) تغییرات فرکانس طبیعی سیستم بر حسب تغییر ولتاژ تحریک اعمالی (ب) تغییرات دامنه با تغییر فرکانس

$$K_{nm} = EI \int_0^l \phi_n^{IV} \phi_m dx - T_p \int_0^l \phi_n^I \phi_m dx \quad (10)$$

$$M_{nm} = m \int_0^l \phi_n \phi_m dx + m_0 \phi_n(l/2) \phi_m(l/2) \quad (11)$$

$$\sum_{n=1}^N M_{nm} \ddot{u}_n(t) u_n(t) + \sum_{n=1}^N K_{nm} u_n(t) = 0 \quad (12)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_{nm}}{M_{nm}}} \quad (13)$$

فرکانس طبیعی سیستم از طریق معادله (۱۳) در ولتاژ تحریک صفر ولت پیزوالکتریک، مقدار 127 Hz بدست می‌آید. همانطور که از معادله (۱۰) قابل مشاهده است با تغییر ولتاژ تحریک پیزوالکتریک، می‌توان مقدار سختی سیستم را تغییر داد. این معادله نشان می‌دهد که فرکانس طبیعی سیستم قابلیت جابجایی یا شیفت از طریق اعمال ولتاژ به پیزوالکتریک لایه نشانی شده بر روی بازوها را دارد. با اعمال ولتاژ مثبت، مقدار سختی فنر افزایش یافته و در نتیجه فرکانس طبیعی نیز افزایش خواهد یافت. با اعمال ولتاژ منفی، نیز مقدار سختی تیرها کاهش یافته و لذا فرکانس طبیعی سیستم هم کاهش خواهد یافت. در ساختار طراحی شده با اعمال ولتاژ 3.75 V - فرکانس طبیعی سیستم به کمتر از 10 Hz کاهش یافته است. این جابجایی و قابل تغییر بودن فرکانس طبیعی سیستم باعث خواهد شد که سیستم در حالت بدون اعمال ولتاژ تحریک، خاصیت نرم بودن نداشته و تنها در زمان مورد نیاز جهت کاهش فرکانس، سیستم به حالت نرم درآید. شکل ۳ تغییرات فرکانس سیستم بر حسب ولتاژ تحریک به لایه پیزوالکتریک را نشان می‌دهد. دامنه نوسانات تیر بر حسب فرکانس‌های مختلف برای ولتاژهای تحریک متفاوت طبق معادله (۱۴) در شکل ۳ (ب) نشان داده شده است.

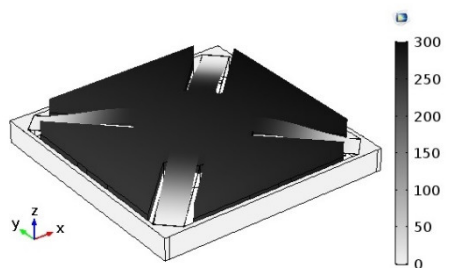
$$a = \frac{F_0 / M_{nm}}{\left(\left(\frac{K_{nm}}{M_{nm}} - \omega^2 \right)^2 + \left(\frac{C}{M_{nm}} \right)^2 \omega^2 \right)^{1/2}} \quad (14)$$

جهت محاسبه ولتاژ ایجاد شده در لایه پیزوالکتریک مولد، نیاز به مقدار بار ایجاد شده Q داریم که با انتگرال‌گیری از جابجایی میدان الکتريکی بدست می‌آید. با در نظر گرفتن اینکه d_{31} ضریب کوپلاژ پلاریزاسیون الکتريکی در جهت Z می‌باشد مقدار جابجایی میدان الکتريکی D_3 در جهت Z طبق معادله (۱۵) بدست می‌آید. جابجایی میدان الکتريکی به فاصله محور پیزوالکتریک از محور کل تیر و گشتاور ایجاد شده در هر نقطه از آن نیز وابسته است [۲۷].

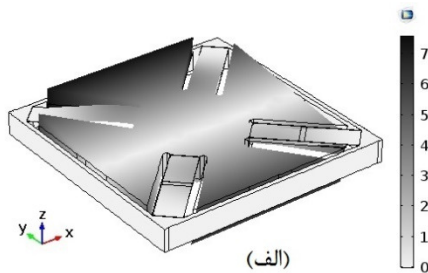
$$D_3 = d_{31} \left[\frac{\partial^2 Z(x,t)}{\partial x^2} (z_n - z_p) \right] \quad (15)$$

جابجایی که ایجاد تنش کند می‌تواند ایجاد ولتاژ نماید. مقدار ضریب میرایی در مشخصات فنر طبق مقدار مشخص شده در قسمت قبل مقدار دهی شده است.

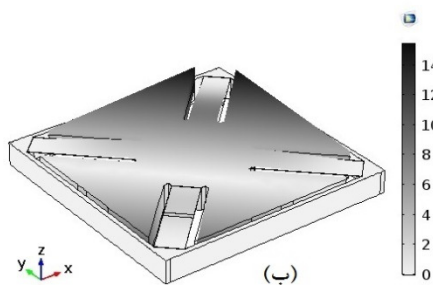
فرکانس طبیعی سیستم بدون تحریک الکتریکی در شبیه‌سازی مقدار ۱۳۱ Hz بوده که این عدد در محاسبات تئوری ۱۲۷ Hz بدست آمده است و صحت تحلیل تئوری بروش گلرکین را نشان می‌دهد. شکل ۴ جابجایی تیرها و وزنه در اثر شتاب وارده در راستای Z را نشان می‌دهد. با اعمال شتاب در راستای Y و XY مقدار جابجایی با توجه به شکل ۵ قابل توجه نبوده و سیستم پایداری مناسبی نسبت به شتاب در غیر جهت‌های مورد نظر دارد.



شکل ۴: جابجایی با اعمال شتاب در راستای Z



(الف)



شکل ۵: جابجایی با اعمال شتاب در راستای Y (الف) و XY (ب)

با اعمال ولتاژ منفی به پیزوالکتریک تحریک تنش فشاری پسماند به تیرها اعمال می‌شود که باعث کاهش فرکانس طبیعی سیستم می‌گردد. تغییرات فرکانس طبیعی با تغییر ولتاژ تحریک از طرق شبیه‌سازی در شکل ۶ نشان داده شده است. حداکثر تنش ایجاد شده در نقاط نزدیک به قاب و وزنه بوده که از ۷ Gpa تنش تسلیم سیلیکون کمتر می‌باشد. البته در بسته‌بندی باید با استفاده از متوقف کننده‌هایی محدوده حرکت وزنه را محدود کرده تا در مقابل شتاب‌های ناگهانی بالا مقاوم باشد.

مقدار حداکثر تنش σ_{max} طبق معادله (۱۹) بستگی به حداکثر ممان ایجاد شده بر روی تیر دارد که در سطح تیر بیشترین مقدار را دارد. حداکثر تنش طبق این معادله ۱۰۵۰ MPa محاسبه شده است.

$$\sigma = \frac{M(x) \times h/2}{I} = \frac{\left(EI \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2}\right) \times h}{2I} \quad (19)$$

با توجه به اینکه پیزوالکتریک AIN دارای مقاومت الکتریکی بالایی می‌باشد با در نظر گرفتن مقاومت داخلی پیزوالکتریک برابر ۱ MΩ حداکثر توان زمانی قابل دستیابی می‌باشد که بار متصل شده R_L برابر با مقاومت داخلی میکروژنراتور باشد [۲۸]. در نتیجه حداکثر توان الکتریکی قابل دریافت از هر پیزوالکتریک با توجه به معادله (۲۱)، ۲/۸ μW خواهد بود و در نظر گرفتن اینکه در هر بازو چهار عدد پیزوالکتریک در دو سمت و بالا و پایین تیر قرار داده شده است مجموع توان الکتریکی حاصل P_t برابر ۱۶×۲/۸ μW برای ۴۴/۸ بدست می‌آید.

$$V_p = \frac{R_L}{R_L + Z} \times V = \frac{V}{2} \quad (20)$$

$$P_p = \frac{V_p^2}{R_L} = \frac{V^2}{4Z} \quad (21)$$

تئوری حداکثر توان مکانیکی برای این ذخیره کننده‌های انرژی نیز توسط راندی بیان شده است [۲۹]:

$$P_{Max} = \frac{k^2 m A^2}{4 \beta^2 \omega^2} \quad (22)$$

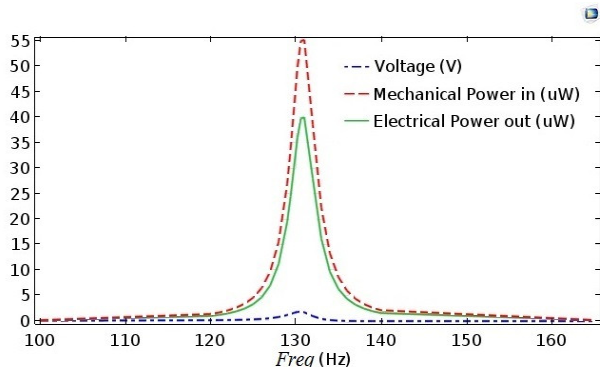
در این معادله k ضریب کوپلینگ، m جرم وزنه، β ضریب میرایی مکانیکی و A دامنه شتاب خارجی می‌باشد. برای این میکروژنراتور حداکثر توان مکانیکی قابل تبدیل طبق معادله (۲۱) با $k=1$ برابر ۵۰ μW خواهد بود.

با توجه به اینکه ابعاد و جنس پیزوالکتریک بکار رفته برای لایه مولد و لایه تحریک یکسان می‌باشد لذا هر دو دارای مقاومت داخلی برابری بوده و اگر ولتاژ لازم برای کل تیر جهت کاهش فرکانس طبیعی سیستم را حداکثر ۳/۷۵ V- در نظر بگیریم، حداکثر توان مصرفی لازم برای این کار برابر ۱۴ μW خواهد شد که می‌تواند از توان ذخیره شده از قسمت مولد سیستم تامین گردد و در مجموع سیستم مولد توان و ذخیره کننده انرژی می‌باشد.

۴- شبیه‌سازی

در شبیه‌سازی انجام شده توسط نرم افزار COMSOL و اعمال ابعاد ذکر شده در قسمت تئوری، مقادیر بدست آمده صحت محاسبات تئوری را نشان می‌دهد. در این تحلیل که در شتاب ۱ g و بدون اعمال ولتاژ تحریک انجام شده است مقدار جابجایی، فرکانس طبیعی سیستم، ولتاژ ایجاد شده و مقدار تنش ایجاد شده بدست آمده است. طبق تحلیل انجام شده مقدار جابجایی در راستای Z حداکثر بوده و با اعمال شتاب در راستای غیر محور Z، مقدار جابجایی قابل ملاحظه نمی‌باشد. اگرچه هر

شکل ۸ ولتاژ، توان مکانیکی و توان الکتریکی بر حسب فرکانس سیستم بدون اعمال ولتاژ تحریک را نشان می‌دهد که در فرکانس تشدید به حداکثر رسیده است.



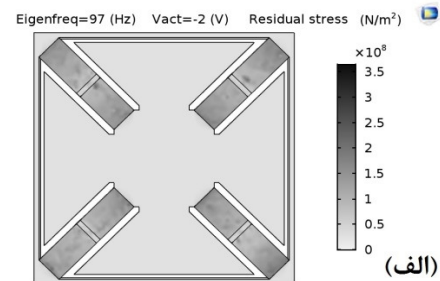
شکل ۸: ولتاژ، توان مکانیکی و توان الکتریکی بر حسب فرکانس سیستم بدون اعمال ولتاژ تحریک

طبق مقایسه انجام شده در جدول ۱ توان مکانیکی اعمال شده به سیستم طبق شبیه‌سازی $55 \mu W$ می‌باشد. توان الکتریکی بدست آمده نیز در شبیه‌سازی $40 \mu W$ را نشان می‌دهد که مجموعاً از بازوها قابل استحصال می‌باشد. در بیشترین حالت توان $14 \mu W$ برای تحریک پیزوالکتریک‌ها جهت کاهش فرکانس طبیعی سیستم تا زیر 10 Hz نیاز بوده که از توان قابل ذخیره توسط سیستم کمتر می‌باشد. در جدول ۲ نیز نتایج این تحقیق با کارهای قبلی مقایسه گردیده است که نشان دهنده کنترل پذیری فرکانس طبیعی سیستم بوده که در کارهای انجام شده قبلی این قابلیت وجود نداشته است اگرچه توان تولید شده قابل رقابت با کارهای قبلی می‌باشد.

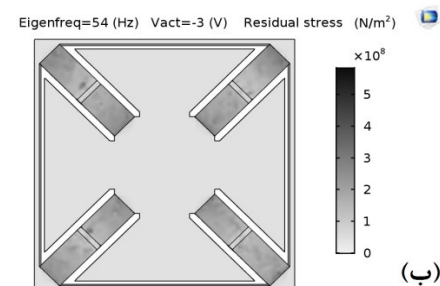
جدول ۱: مقایسه نتایج تئوری و شبیه سازی

نتایج شبیه‌سازی	نتایج تئوری	
۱	۱	شتاب (g)
۱۳۱	۱۲۷	فرکانس طبیعی (Hz)
۷۰۰	۱۰۵۰	حداکثر تنش (MPa)
۳/۶	۳/۳۵	ولتاژ ایجاد شده (V)
۵۵	۵۰	حداکثر توان مکانیکی ورودی (μW)
۴۰	۴۴/۸	حداکثر توان الکتریکی خروجی (μW)

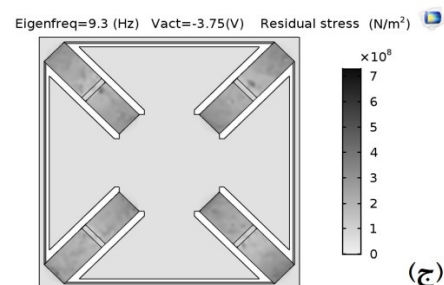
دو الکتروود در اثر نوع تنش فشاری و کششی اعمال شده به پیزوالکتریک، یکی دارای ولتاژ مثبت (رنگ تیره) و دیگری دارای ولتاژ منفی (رنگ روشن) خواهد شد (شکل ۷). ولتاژ بدست آمده در شبیه‌سازی $\pm 1/8 \text{ V}$ در حالت تحت بار $1 \text{ M}\Omega$ بوده که نزدیک نصف ولتاژ بدست آمده در تحلیل تئوری $\pm 3/35 \text{ V}$ در حالت مدار باز می‌باشد.



(الف)



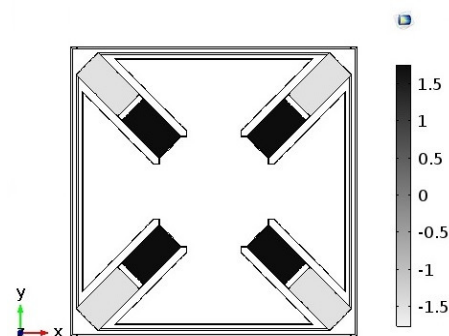
(ب)



(ج)

شکل ۶: تنش اعمال شده به تیرها در اثر اعمال ولتاژهای تحریک

این ولتاژ برای یک چهارم تیر بوده و امکان سری یا موازی کردن آنها نیز وجود دارد. البته باید توجه نمود که مقادیر بدست آمده در تحریک با فرکانس برابر با فرکانس تشدید قابل تنظیم سیستم می‌باشد.



شکل ۷: ولتاژ ایجاد شده در اثر تنش

- Wireless Sensors", *Smart Materials Research*, vol. 2012, pp. 1-13, 2012.
- [8] W. Wang, "Frequency Analysis of Vibration Energy Harvesting Systems", *Elsevier Science & Technology*, Australia, ISBN 012802321X, 9780128023211, 2016.
- [9] H. Yu, J. Zhou, L. Deng and Z. Wen, "A Vibration-Based MEMS Piezoelectric Energy Harvester and Power Conditioning Circuit", *Sensors*, doi:10.3390/s140203323, January 2014.
- [10] A. Hajati, S.G. Kim, "Ultra-wide bandwidth piezoelectric energy harvesting", *Applied Physics. Lett.* 99 (2011) (083105-1-083105-3). *Applied Physics. Lett.* 99 (083105-1-083105-3) (2011).
- [11] R. Elfrink, S. Matova, C. de Nooijer, M. Jambunathan, M. Goedbloed, J. van de Molengraft, V. Pop, R.J.M. Vullers, M. Renaud, R. van Schaijk, "Shock induced energy harvesting with a MEMS harvester for automotive applications", in: *Electron Devices Meeting (IEDM), IEEE International*, 5-7 Dec. 2011, Washington, D.C., 29.5.1-29.5.4, 2011.
- [12] D. Han, K-S Yun, "Piezoelectric energy harvester using mechanical frequency up conversion for operation at low-level accelerations and low-frequency vibration", *Microsystem Technologies*, DOI: 10.1007/s00542-014-2261-1, Aug 2015.
- [13] E.E. Aktakka, R.L. Peterson, K. Najafi, "Thinned PZT on SOI process and design optimization for piezoelectric inertial energy harvesting", in: *16th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators, and Microsystems, Transducers 2011*, Beijing, China, pp. 1649-1652, June 2011.
- [14] R. Andosca, T. Gus McDonald, V. Genova, S. Rosenberg, J. Keating, C. Benedixson, J. Wu, "Experimental and theoretical studies on MEMS piezoelectric vibrational energy harvesters with mass loading", *Sensors and Actuators*. DOI:10.1016/j.sna.2012.02.028, February 2012.
- [15] Y. Jia, S. Du, A.A. Seshia, "Cantilevers-on-membrane design for broadband MEMS piezoelectric vibration energy harvesting", *J. Physics.: Conf. Ser.* 660 012030, doi:10.1088/1742-6596/660/1/012030, 2015.
- [16] S. Nabavi, L. Zhang, "Design and Optimization of Wideband Multimode Piezoelectric MEMS Vibration Energy Harvesters", *EuroSensors 2017 Conference*, doi: 10.3390/proceedings1040586, 2017.
- [17] B. Kathpalia, D. Tan, I. Stern, F. Valdes, S. Kim and A. Erturk, "Modeling and Characterization of Curved Piezoelectric Energy Harvester for Smart Paver Tiles", *Procedia Computer Science* 109C (2017)1060-1066, 2017.
- [18] A. Damya, E. Abbaspour Sani and G. Rezazadeh, "An innovative piezoelectric energy harvester using clamped-clamped beam with proof mass for WSN applications", *Microsystem Technologies*, 2018.
- [19] "Restriction of Hazardous Substances Directive", *En.wikipedia.org*, 2018. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Restriction_of_Hazardous_Substances_Directive. [Accessed: 02-Jun-2018].
- [20] H. Bhugra, G. Piazza, *Microsystems and Nanosystems, Piezoelectric MEMS Resonators* (page 215), ISSN 2198-0063, DOI 10.1007/978-3-319-28688-4, Springer International Publishing Switzerland 2017.
- [21] G. Rezazadeh, A. tahmasebi, M. Zubstov, "Application of piezoelectric layers in electrostatic MEM Actuators: controlling of pull-in voltage", *Microsystem Technology*, 12:1163-1170, DOI 10.1007/s00542-006-0245-5, 2006.
- [22] L. Meirovitch, *Fundamentals of Vibrations*, New York: McGraw-Hill, 2001.
- [23] Z. Rahimi, G. Rezazadeh, H. Sadeghian, "Study on the size dependent effective Young modulus by EPI method based on modified couple stress theory", *Microsystem Technologies*, DOI: 10.1007/s00542-018-3708-6, January 2018.
- [24] Karimipour, A.R. Karimipour, Y. Tadi Beni, "Determination of size-dependent non-linear pull-in instability of clamped nano-Beam based on the modified strain gradient theory using HPM", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No.2, pp.101-112, 2015. (in Persian (فارسی))
- [25] H. Sadeghian, C.K. Yang, J.f.L Goosen, "Effects of size and defects on the elasticity of silicon nanocantilevers", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, June 2010.

جدول ۲: مقایسه نتایج این تحقیق با کارهای انجام شده

تحقیق	ابعاد (cm ²)	ساختار	فرکانس (Hz)	توان (μW)
Y. Jia et al. 2015 [15]	۰/۴	ترکیب تیر یک سرگردار و ممبران	۱۰ تا ۲۰۰۰	۲/۲
Tang et al. 2016 [30]	۱/۱	تیر یک سرگردار	۱۰۰	۳۲۱
A. Batra et al. 2016 [30]	۱۰	تیر دو سرگردار	۳۵	۳۳۰
Kathpalia et al. 2017 [31]	۲۶	تیر دو سرگردار	۱ تا ۱۰	۸۰
Damya et al. 2018 [18]	۱	تیر دو سرگردار	۴۲	۸۰
کار انجام شده	۰/۲۵	تیر دو سرگردار	۱۲۷ با	۴۵
در این تحقیق		قابلیت تنظیم		

۵- نتیجه گیری

با توجه به محاسبات انجام شده و شبیه‌سازی‌ها می‌توان گفت که ساختار ارائه شده قابلیت ایجاد ولتاژ و توان بیشتر با ابعاد کوچکتر نسبت به کارهای قبلی انجام شده را داشته که امکان استفاده از آن جهت تامین توان برای سیستم‌های الکترونیکی با توان پایین مانند شبکه حسگرهای بی‌سیم و زیست حسگرها را فراهم می‌کند. در این طراحی قابلیت تغییر فرکانس طبیعی سیستم با تحریک پیزوالکتریک وجود داشته که می‌تواند از انرژی‌های مکانیکی موجود در محیط اطراف در محدوده فرکانسی قابل تنظیم، توان بیشتری جذب نمود. ابعاد کوچک، استفاده از حداکثر فضای در نظر گرفته شده جهت بازوها و وزنه همراه با تعادل مناسب آن نسبت به تحریک مکانیکی غیر محوری از خصوصیات این طراحی می‌باشد. محاسبات تئوری انجام شده همراه با شبیه‌سازی نیز قابل پیش‌بینی بودن رفتارهای مکانیکی سیستم را تایید می‌کند.

۶- مراجع

- [۱] سید حسین کشمیری‌فر و حمیدرضا بخشی، «بهبود طول عمر و بیشینه سازی پوشش در شبکه حسگر بی‌سیم خوشه بندی شده با استفاده از مسیریابی چند جهشی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۷، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۶.
- [2] R. Andosca, K. Lee, J. Wu, "Efficient vibrational energy harvesting for WSN applications", in: *Invited presentation to the NanoPower Forum Workshop/Darnell Group*, San Jose, CA, pp. 18-20, 2009.
- [3] R. R. Vullers, "Micropower Energy harvesters for autonomous wireless sensor nodes: from lab to reality", in: *Sensors Expo and Conference*, Chicago, 2009.
- [۴] یاسر عظیمی، وحید هاشمی‌فرد و جمشید باقرزاده، «تشخیص توزیع شده و مشارکتی حمله کرم چاله در شبکه‌های حسگر بی‌سیم»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵.
- [5] V. S Mallela, "Trends in Cardiac Pacemaker Batteries", *Indian pacing and Electrophysiology journal*, (ISSN0972-6292), 4(4): 2004.
- [6] J. Lueke, W.A. Moussa, "MEMS-Based Power Generation Techniques for Implantable Biosensing Applications", *Sensors*, DOI: 10.3390/s110201433, ISSN 1424-8220, 2011.
- [7] A. Nechibvute, A. Chawanda and P. Luhanga, "Piezoelectric Energy Harvesting Devices: An Alternative Energy Source for

- [29] S. Roundy, "On the Effectiveness of Vibration-Based Energy Harvesting", *J. Intel. Mat. Syst. Str.*, 16, pp. 809–823, 2005.
- [30] G. Tang, B. Yang, Ch. Hou, G. Li, J. Liu, X. Chen, Ch. Yang "A piezoelectric micro generator worked at low frequency and high acceleration based on PZT and phosphor bronze bonding." , Scientific reports. DOI: 10.1038/srep38798, 2016.
- [31] A. Batra, A. Alomari, M. Aggarwal, and A. Bandyopadhyay, "Energy Harvesting under Excitation of Clamped-Clamped Beam", Alabama A&M University, March 2016, DOI:10.1117/12.2217701.
- [26] A. Erturk, D.J. Inman, "A distributed parameter electromechanical model for cantilevered piezoelectric energy harvesters", *J. Vib. Acoustics* 130 (041002-1041002-15) DOI: 10.1115/1.2890402, 2008.
- [27] B.A. Auld, *Acoustic Fields and Waves in Solids*, vol I, Second ed., Krieger Publishing Co., Malabar, Florida, 1990.
- [28] R. Elfrink, T. M. Kamel, M. Goedbloed, S. Matova, D. Hohlfeld, Y. van Andel, R. van Schaijk, "Vibration Energy Harvesting with Aluminum Nitride-Based Piezoelectric, Journal of Micromechanics and Microengineering", <https://doi.org/10.1088/0960-1317/19/9/094005>.

زیر نویس ها

° Couple Stress

¶ Strain gradient elasticity theories

∇ Galerkin Method

∖ Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)

∗ Reactive Ion Etching (RIE)

∓ Aluminum Nitride (AlN)

‡ Molybdenum (Mo)