

افزایش برداشت توان الکتریکی از میکروتیر پیزوالکتریک به روش الگوریتم ژنتیک با بهینه کردن شکل هندسی و ماده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۲

مهران اقدامی فاتح آبادی^۱، مجید جباری^۲

۱ کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، اصفهان

۲ استادیار، گروه مکانیک، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، اصفهان. jabbari@iaukhsh.ac.ir

چکیده

با توجه به رابطه مستقیم میان تغییر شکل حاصل از ارتعاش و ولتاژ تولیدشده در سطح میکروتیر پیزوالکتریک، بررسی نقش ابعاد هندسی این قطعات در ولتاژ تولیدشده در اعمال یک نیروی ثابت اهمیت بسزایی دارد. در این تحقیق به منظور بهینه‌سازی ابعاد هندسی میکرو تیر پیزوالکتریک از ابزار الگوریتم ژنتیک نرم‌افزار متلب استفاده می‌شود. به این منظور ابتدا رابطه تحلیلی حاکم بر یک میکروتیر تک لایه پیزوالکتریک در مدل اویلر برنولی استخراج شده، سپس پارامترهای طول تیر، طول لایه پیزوالکتریک، پهنای تیر، ضخامت لایه پیزوالکتریک و ضخامت تیر برای بهینه‌کردن ولتاژ برداشت شده به‌عنوان تابع هدف در بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند. برای اطمینان از دقت رابطه تحلیلی ارائه‌شده در نرم‌افزار آباکوس میکرو تیر تک لایه پیزوالکتریک مذکور مدل شده که مقایسه نتایج از انطباق ۸۸ درصدی رابطه تحلیلی و مدل المان محدود حکایت دارد. همچنین مشاهده می‌شود بهینه‌سازی با استفاده از ابزار الگوریتم ژنتیک نرم‌افزار متلب در صورت انتخاب اندازه جمعیت مناسب می‌تواند تا ۵۹ درصد ولتاژ تولیدشده را افزایش دهد و درعین حال بیش از ۵۰ درصد ابعاد میکرو تیر مذکور را کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک؛ روش عددی؛ پیزوالکتریک؛ بهینه‌سازی؛ ولتاژ

Numerical simulation of radial inflow turbine impeller in aero turbine engine at design and off-design point

Mohammad Mehran Eghdami¹, Majid Jabbari²

1 Master, Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr/Isfahan, Iran

5 Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr/Isfahan, Iran, Jabbari@iaukhsh.ac.ir

Abstract

Considering the direct relationship between the shape change resulting from vibration and the voltage generated on the surface of the piezoelectric micro wire, it is very important to investigate the role of the geometric dimensions of these parts in the voltage generated by applying a constant force. In this research, in order to optimize the geometric dimensions of the piezoelectric micro beam, the genetic algorithm tool of MATLAB software is used. For this purpose, firstly, the analytical relationship governing a single piezoelectric layer micro beam in the Euler-Bernoulli model was extracted, then the parameters of beam length, piezoelectric layer length, beam width, piezoelectric layer thickness and beam thickness were taken to maximize the voltage. They are considered as the objective function in optimization. In order to ensure the accuracy of the analytical relationship presented in Abaqus software, the mentioned piezoelectric single layer micro beam has been modeled, and the comparison of the results indicates that the analytical relationship and the finite element model match 88%. Also, it can be seen that optimization using the genetic algorithm tool of MATLAB software can increase the generated voltage by 59% and at the same time reduce the dimensions of the mentioned micro beam by more than 50%.

Keywords: genetic algorithm, numerical method, piezoelectric, optimization, voltage

۱۶۵

سال ۱۱ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۱

نشریه علمی

دانش و فناوری هوا فضا



دانشگاه صنعتی امیرکبیر

افزایش برداشت توان الکتریکی از میکروتیر پیزوالکتریک به روش الگوریتم ژنتیک با بهینه کردن شکل هندسی و ماده

۱. مقدمه

برداشت انرژی در چند سال اخیر، به یک زمینه تحقیقاتی جدید با هدف پاسخگویی به رفع نیازهای انرژی برای کاربردهای الکترونیکی کم‌مصرف مانند کاشت حسگر زیستی [۱ و ۲]، الکترونیک مصرفی [۳]، تجهیزات نظامی [۴] و شبکه‌های حسگر بی‌سیم [۵ و ۶] تبدیل شده است. به‌طور معمول، فقط از باتری‌ها برای تأمین انرژی دستگاه‌های یادشده که مصرف انرژی کم دارند، استفاده می‌شود. با این حال، محدودیت‌های اندازه و شارژ مجدد باتری از توانایی کارکرد دائمی جلوگیری می‌کند. با توجه به این محدودیت‌ها، تلاش‌های بیشتری برای جایگزینی باتری‌ها با راه‌حل‌های کارآمدتر انرژی که هیچ‌گونه محدودیتی در طول عمر ندارند، انجام شده است. برداشت انرژی از منابع محیطی، کلید اصلی این فناوری است.

قابلیت حمل، به‌عنوان عاملی مهم در بسیاری از کاربردهای عملی، به‌شدت توصیه می‌شود. میزان قابلیت حمل و نقل توسط ابعاد دستگاه و سبکی دستگاه مشخص می‌شود. قابلیت حمل بالا باعث استقرار آسان و کاهش هزینه جانبی می‌شود. فناوری میکروماشینکاری به‌عنوان یکی از روش‌های اصلی تولید دستگاه‌های قابل‌حمل شناخته شده است. این فناوری با استفاده از چاپ سنگی و تکنیک‌های خراش شیمیایی برای چاپ الگوهای طراحی‌شده در سطوح سیلیکونی، می‌تواند قطعات مکانیکی به اندازه میکرومتر یا حتی کوچک‌تر را

تولید کند. چندین روش تولید برای ساخت با فناوری میکروماشینکاری، مانند میکروماشینکاری مواد توپر [۷]، میکروماشینکاری سطوح [۸] و فناوری لیگا (لیتوگرافی، آب‌کاری و قالب‌دهی) [۹]، ارائه شده است. به همین ترتیب، مدارهای یکپارچه را می‌توان با روش‌های مشابه ساخت. روش‌های پیشرفته اتوماسیون طراحی می‌توانند با در نظر گرفتن اثرات مزاحم و پارازیتی دستگاه‌های الکترونیکی [۱۰] تولیدپذیری، کیفیت ساخت و عملکرد مدار را ارتقاء دهند.

با توجه به شباهت‌های موجود در ساخت، میکروماشینکاری و میکروالکترونیک می‌توانند برای ارائه سیستم میکروالکترومکانیکی، یک میکروسیستم عملی با قابلیت حمل و قابلیت اطمینان بالا ادغام شوند [۱۲]. انرژی قابل برداشت طبیعی موجود در محیط بیرون شامل انرژی خورشیدی، حرارتی و لرزشی است. سیستم انرژی خورشیدی، یکی از متداول‌ترین روش‌های برداشت انرژی است [۱۳]. تبدیل انرژی خورشیدی، علاوه بر در دسترس بودن نور خورشید، در سیستم میکروالکترومکانیکی و سایر دستگاه‌های قابل‌حمل وابسته به سطح سلول‌های خورشیدی است، باز هم ممکن است به دلیل اندازه طبیعی و فیزیکی کوچکی که این سیستم‌ها دارند، بهترین سود را از انرژی خورشیدی کسب نکنند. به همین دلیل، به منابع انرژی محیطی دیگری نیاز دارند. تولید برق در ارتباط با گرما یک رویکرد دیگر برای سیستم



میکروالکترومکانیکی یا سایر برداشت‌کنندگان انرژی قابل‌حمل است. اختلاف دما بین دو ماده مختلف می‌تواند باعث تولید انرژی الکتریکی شود [۱۴].

باین‌حال، گرادیان درجه حرارت بزرگ برای سیستم‌های میکروالکترومکانیکی یا سایر دستگاه‌های قابل‌حمل با اندازه‌های مینیاتوری امکان‌پذیر نیست [۱۵].

یکی از روش‌های استفاده از پیزوالکتریک، انتخاب مود کوپلینگ مناسب برای عملکرد بهتر است. دو نوع مود کوپلینگ برای مواد پیزوالکتریک وجود دارد. مود اول، مود ۳-۱ نام دارد که شامل نیروی ارتعاشی عمود بر جهت قطبی‌سازی است. مود دوم نیز ۳-۳ نام دارد که در این مود، نیروی اعمالی در همان جهت قطبی‌سازی است. بین دو مود گفته‌شده در بالا، مود ۳-۱ با وجود اینکه ضریب کوپلینگ «k» کوچک‌تری نسبت به مود ۳-۳ دارد؛ معمول‌تر است [۱۶-۱۷]. باکر و همکارانش [۱۸] دریافته‌اند که برای سه نوع از مواد پیزوالکتریک مود ۳-۱ ضریب کوپلینگ کمتری نسبت به مود ۳-۳ دارد. در مقایسه تیر پیزوالکتریک برای مودهای ۳-۱ و ۳-۳ با حجم برابر مشاهده شد که اگرچه ماده پیزوالکتریک، در مود ۳-۳ ضریب کوپلینگ بالایی دارد؛ اما اعمال نیرو برای قطبی کردن سخت‌تر است این نتیجه در اثر سفتی مکانیکی تیر پیزوالکتریک است که برای مودهای مختلف متفاوت است. همچنین مشخص شد که در یک نیروی کوچک و ارتعاش کم محیطی

مود ۳-۱ حدود دو برابر توان تولیدی بیشتری دارد و کارآمدتر خواهد بود. بعلاوه در یک محیط با نیروی بالا مانند مراکز تولید بزرگ و ماشین‌آلات سنگین با پیکربندی پیزوالکتریک، مود ۳-۳ به دلیل دوام بیشتر، مفیدتر است. این نتایج همچنین توسط راندی [۱۹] به دست آمد که نشان می‌دهد فرکانس تشدید سیستم در مود ۳-۱ پایین‌تر خواهد بود که سیستم می‌تواند به راحتی در ارتعاشات محیطی کار کند و توان بیشتری تولید کند. یانگ و همکارانش [۲۰] دریافته‌اند توان خروجی، متناسب با ضریب کوپلینگ «k» و ثابت الکتریکی «ε» است. این نتیجه تأیید می‌کند که دستگاه‌هایی با ضریب کوپلینگ بالا، در فرکانس تشدید خود قدرت بیشتری تولید می‌کنند و راندمان آن‌ها نیز بالاتر است؛ اما در مود ۳-۱ توان خروجی بالاتر از مود ۳-۳ است و دلیل این امر هم آن است که هنگامی که سیستم در فرکانس تشدید عمل می‌کند، جابه‌جایی و کرنش آن بیشتر است. ریچارد و چوو [۲۱]، به صورت تحلیلی، روشی را برای بهینه‌سازی ضریب کوپلینگ در سیستم برداشت انرژی پیزوالکتریک ارائه دادند. آن‌ها همچنین آزمایش بهینه‌سازی طرح را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. در این مدل تحلیلی، از یک تیر مستطیلی شکل که شامل دولایه پیزوالکتریک و یک زیرلایه است؛ استفاده می‌شود. ضریب کوپلینگ این مدل با افزایش طول الکترودها افزایش می‌یابد. بیشینه توان زمانی رخ می‌دهد که لایه پیزوالکتریک





۴۲٪ زیرلایه را پوشش دهد و ضریب کوپلینگ می‌تواند با افزایش سفتی زیرلایه و بهینه‌کردن ضخامت لایه پیزوالکتریک افزایش یابد. چوو نشان داد که پوشش ۶۰٪ الکترودها روی زیرلایه می‌تواند ضریب کوپلینگ خوبی ایجاد کند. جانسون و همکارانش [۲۲]، دستگاه برداشت انرژی شامل یک تیر دولایه پیزوالکتریک را در مود ۱-۳ را طراحی کردند. همان‌طور که در شکل ۲-۷ مشاهده می‌شود، تیر دولایه، شامل یک لایه پیزوسرامیک و یک لایه غیرپیزوالکتریک است. انواع مختلفی از مواد پیزوالکتریک وجود دارند که مشخصات مخصوص به خود را دارند و می‌توانند برای تیرها استفاده شوند. برای مثال می‌توان به کوارتز اشاره کرد. موادی هم که برای زیرلایه استفاده می‌شوند، می‌توانند روی توان خروجی اثرگذار باشند [۲۳].

جباری [۲۴]، یک روش عددی به همراه آزمایش‌های تجربی برای تعیین و تأیید رفتار دینامیکی تیر پیزوالکتریک غیرخطی با تحریک هارمونیک ارائه داده است. در این مقاله یک برنامه با عنوان NPBDA با نرم‌افزار متلب تهیه شده است. برای تأیید نتایج این برنامه، از نتایج تجربی برای آنالیز ارتعاش یک تیر پیزوالکتریک با تحریک هارمونیک پایه تیر استفاده می‌شود. سپس، اثر پیزوالکتریک بر ولتاژ خروجی، سرعت، مقادیر شتاب و پاسخ زمان به دست می‌آید. پس از آن، تأثیرات سرعت تحریک و موقعیت جرم متمرکز بر ولتاژ خروجی تأیید می‌شود. در همین راستا، از جباری و

همکاران [۲۵] مطالعه‌ای دیگری به منظور بررسی میزان برداشت انرژی از تیر چند لایه پیزوالکتریک غیرخطی مورد تحریک هارمونیک ارائه شده است. تیر پیزوالکتریک چندلایه مورد استفاده شامل دو بی‌مورف به صورت اتصال سری و یک لایه زیرساختی از آلومینیوم است. برای مدار الکتریکی در نظر گرفته شده، مدل برداشت انرژی پیزوالکتریک به بار مقاومتی متصل شده و توان تولیدشده در تیر پیزوالکتریک چندلایه به بار مقاومتی ارسال می‌شود. در ادامه، تأثیر نوع اتصال لایه بر مقدار ولتاژ خروجی بررسی شده است. ولتاژ و نیروی الکتریکی بار مقاومتی تولیدشده با استفاده از تیر چندلایه پیزوالکتریک در هر دو حالت فرکانس تشدید و عدم فرکانس تشدید تأیید می‌شود. با توجه به نتایج، حداکثر مقدار انرژی الکتریکی در بار مقاومتی بهینه برای مقدار فرکانس انتخاب شده اتفاق می‌افتد و رفتار برداشت انرژی به میزان فرکانس تحریک بستگی دارد. همچنین مقدار خازن و بار مقاومتی در ولتاژ و توان تولیدشده تأثیر می‌گذارد و مقاومت بهینه برای تولید حداکثر انرژی بسیار مهم است. از آنجاکه میزان توان تولیدشده به اندازه دستگاه وابسته است، جمع‌آوری انرژی در مقیاس بزرگ به‌طور معمول می‌تواند توان بیشتری نسبت به نمونه‌های کوچک تولید کند. این پژوهش سعی دارد تا با بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک تأثیر پارامترهای هندسی و ماده‌ای در برداشت توان الکتریکی از یک میکروتیر پیزوالکتریک تعیین شود

و مشخص شود در صورت وجود یک فرکانس ثابت اعمال تأثیر میرایی بر بهینه‌سازی ابعاد چه تأثیری خواهد داشت. آنگاه، یک روش طراحی و بهینه‌سازی برای بهبود بهره‌وری از برداشت انرژی پیزوالکتریک یک لایه توصیف می‌شود. سپس سعی بر آن است که دانسته‌های فوق بر دو ماده AIN و PZT تعمیم داده شود تا با استفاده از الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار متلب، بهینه‌ترین میکروتیر پیزوالکتریک به‌منظور اهداف برداشت انرژی معین شود.

۲. مدل ریاضی مسئله

مواد پیزوالکتریک که برای ساخت حس‌گرها و محرک‌ها استفاده می‌شوند ساختاری بلوری دارند [۲۶]. با اعمال نیروی مکانیکی روی سطح، ساختار پیزوالکتریک برای تولید ولتاژ الکتریکی تغییر می‌کند. این خاصیت منحصر به فرد باعث می‌شود پیزوالکتریک برای تبدیل ارتعاشات مکانیکی به توان الکتریکی و برعکس برای تغییر شکل مکانیکی در صورت اعمال توان الکتریکی خارجی مفید باشند. از آنجاکه انرژی جنبشی حاصل از ارتعاش، تغییر شکل متناوب در ساختار پیزوالکتریک ایجاد می‌کند، می‌توان یک ولتاژ الکتریکی AC از سطح آن جمع کرد. به‌منظور جمع‌آوری ولتاژ الکتریکی از سطح پیزوالکتریک، می‌توان از دو تنظیم مختلف برای لایه نشانی الکتروود به‌صورت خازنی و سبک به‌هم‌پیوسته استفاده کرد [۲۷]. در این مطالعه، با توجه به محدودیت تولید، ما فقط می‌توانیم الکتروودهای سبک خازنی را در برداشت توان

الکتریکی پیزوالکتریک یک لایه بررسی کنیم. بنابراین، مطابق استاندارد IEEE در مورد پیزوالکتریک، با توجه ویژه به لایه نشانی الکتروود، ولتاژ تولیدشده به‌وسیله مواد پیزوالکتریک متناسب با تنش مشاهده‌شده بر ساختار آن‌ها با رابطه ۱ محاسبه می‌شود [۲۸].

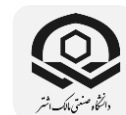
$$V = g_{31} t_p \sigma_p \quad (1)$$

در این رابطه، V ولتاژ تولیدشده است، g_{31} ضریب پیزوالکتریک با فرض تنش غالب در جهت داخل صفحه و تنش صفر در جهت خارج از صفحه، t_p ضخامت فیلم پیزوالکتریک و σ_p تنش اعمال‌شده بر مواد پیزوالکتریک است. چون تنش می‌تواند به کرنش در داخل مواد منجر شود، هنگامی که ماده محدود به حرکت فقط در یک جهت است (جهت داخل صفحه)، در محدوده الاستیک تبدیل کلی آن‌ها می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود:

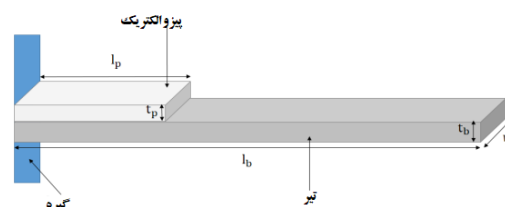
$$\epsilon_p = \frac{\sigma_p}{Y_p} \quad (2)$$

در این رابطه، ϵ_p کرنش مشاهده‌شده در داخل ماده پیزوالکتریک است و Y_p نشان‌دهنده مدول الاستیسیته ماده پیزوالکتریک است. دستگاه‌های برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک به شکل مستطیل شکل با فرایند ساخت منظم سامانه میکروالکترومکانیکی سازگار هستند، این مقاله بر چنین برداشت‌کننده‌هایی متمرکز شده است. به‌طور معمول، دستگاه‌های برداشت‌کننده انرژی ارتعاشی پیزوالکتریک را می‌توان در دو پیکربندی





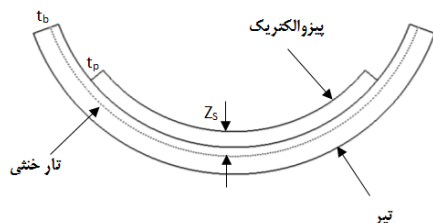
مختلف دو بلوره و یک بلوره ارائه داد. در پیکربندی دو بلوره، مواد پیزوالکتریک با استفاده از رویکردهای اتصال (چسباندن یا فشار هوای گرم) با استفاده از دستگاه‌های برداشت انرژی پیزوالکتریک در مقیاس سانتی‌متر، در دو طرف لایه‌گذاری می‌شود [۲۹]. هدف از این قسمت، توصیف مزایای اتوماسیون طراحی برای برداشت‌کننده‌های انرژی پیزوالکتریک تک‌بلوره است. نمودار ساختاری برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک تک‌بلوره در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. ساختار برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک میکروالکترومکانیکی تک‌بلوره با لایه‌گذاری پیزوالکتریک روی سطح تیر نزدیک به گیره

در مقاله‌های مربوطه، مدل‌های تحلیلی که می‌توانند ولتاژ برداشت شده از دستگاه‌های برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک را تخمین بزنند به سه دسته مدل نیرو-پین، مدل تقویت‌شده پین-نیرو و مدل اویلر-برنولی تقسیم می‌شوند. مدل نیرو-پین فرض می‌کند که فیلم پیزوالکتریک به‌عنوان اتصال به‌صورت پین به تیر متصل شده است. در این حالت، کرنش روی تیر که به‌طور خطی با ضخامت تیر افزایش می‌یابد با تئوری تیر اویلر-برنولی محاسبه می‌شود. درحالی‌که کرنش روی کل فیلم پیزوالکتریک ثابت در نظر گرفته

می‌شود. بدیهی است که این مدل سفتی خمشی مواد پیزوالکتریک را در نظر نمی‌گیرد. مدل تقویت‌شده پین-نیرو با در نظر گرفتن سفتی خمشی پیزوالکتریک، مدل نیرو-پین را بهبود می‌بخشد. در این راستا، کرنش بر ماده پیزوالکتریک که دیگر ثابت نیست و به‌صورت خطی افزایش می‌یابد، با تغییر شکل تیر تعیین می‌شود. در مقایسه با دو مدل بالا، مدل اویلر-برنولی بالاترین دقت مدل‌سازی را دارد. این مدل فرض می‌کند که تیر و فیلم پیزوالکتریک کاملاً به هم پیوند خورده‌اند، تغییر شکل آن‌ها باید با توجه به تار خنثی مشترک جدید نشان داده شود [۳۰]. به دلیل این مزیت، در این تحقیق از مدل اویلر-برنولی برای هدف بهینه‌سازی طراحی استفاده می‌شود.



شکل ۲. شماتیک مدل اویلر-برنولی با فرض پیوند کامل بین تیر و فیلم پیزوالکتریک

شماتیک مدل اویلر-برنولی در شکل ۲ نشان داده شده است. در این مدل، مواد چسبنده پیوندی هیچ تأثیری بر سفتی و جرم تیر نمی‌گذارد. علاوه‌براین، فرض بر این است که فیلم پیزوالکتریک در مقایسه با تیر، همگن، ایزوتروپیک عرضی، الاستیک و نازک است. با استفاده از روش تبدیل

[۳۱]، می‌توان برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک دولایه را به یک ساختار واحد، به‌عنوان مثال، تیر، منتقل کرد. تار خنثی مشترک ساختار تازه شکل گرفته با مرجع سطح پیزوالکتریک در سطح بالا را می‌توان با رابطه ۳ محاسبه کرد:

$$Z_s = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i f_i A_i}{\sum_{i=1}^n f_i A_i} = \frac{\frac{t_p Y_p}{2 Y_b} t_p + \left[t_p + \frac{t_b}{2} \right] t_b}{\frac{Y_p}{Y_b} t_p + t_b} \quad (3)$$

در این رابطه، Z_s تار خنثی جدید مشترک، Z_i تار اصلی خنثی برای ماده i است، f_i فاکتور تبدیل بدون بعد بر اساس نسبت مدول الاستیسیته فیلم پیزوالکتریک به تیر و A_i مساحت سطح مقطع ماده i است. n ثابت تعداد مواد کامپوزیت است که در این کاربرد مدل‌سازی برابر با ۲ است. t_b ضخامت تیر و Y_b مدول الاستیسیته تیر است. در نتیجه، با استفاده از رابطه اساسی تیرها کرنش بر این ساختار تغییر یافته را می‌توان با رابطه ۴ بیان کرد:

$$\varepsilon_p = - \frac{M}{(Y_p I_p + Y_b I_b)} \left(Z_s - \frac{t_p}{2} \right) \quad (4)$$

که در آن، M ممان محرک و ترم $\left(Z_s - \frac{t_p}{2} \right)$ ، فاصله بین تار خنثی و مرکز فیلم پیزوالکتریک را نشان می‌دهد. منشأ این سیستم مختصات در تحلیل ما تار خنثی فرض می‌شود. I_p و I_b ممان اینرسی برای فیلم پیزوالکتریک و تیر درون سیستم

مختصات در شکل ۲ است. آن‌ها را می‌توان با رابطه ۵ محاسبه کرد.

$$I_p = \int_{Z_s - t_p}^{Z_s} w z^2 dz = \frac{1}{3} w \left[Z_s^3 - (Z_s - t_p)^3 \right]$$

$$I_b = \int_{Z_s - t_p - t_b}^{Z_s - t_b} w z^2 dz = \frac{1}{3} w \left[(t_p + t_b - Z_s)^3 - (Z_s - t_p)^3 \right] \quad (5)$$

w عرض تیر یا فیلم پیزوالکتریک را نشان می‌دهد. با جایگزینی رابطه ۵ و ۳ در رابطه ۴، می‌توان کرنش متوسط روی فیلم پیزوالکتریک را در رابطه ۶ به دست آورد:

$$\varepsilon_p = \frac{6 Y_b t_b (t_p + t_b)}{w \left(Y_p^2 t_p^4 + Y_b^2 t_b^4 + 2 Y_p t_p Y_b t_b (2 t_p^2 3 t_p t_b + 2 t_b^2) \right) \times M} \quad (6)$$

در نهایت با استفاده از رابطه ۲ می‌توان میانگین تنش موجود در مواد پیزوالکتریک را نیز محاسبه کرد. سپس با استفاده از آن در رابطه ۱، ولتاژ برداشت‌شده از دستگاه پیزوالکتریک تک‌بلوره برابر است با:



در مدل‌سازی نهایی تحلیلی، پیش‌نیازهای زیر را باید رعایت کرد:

- نسبت طول تیر به ضخامت آن بیشتر از ۱۰ است؛
- نسبت بین طول به عرض آن بیشتر از ۲ است؛
- طول فیلم پیزوالکتریک بسیار بیشتر از ضخامت آن است [۳۲].

الگوریتم ژنتیک، یک روش محاسباتی تکاملی برای جست‌وجو و بهینه‌سازی مسائل پیچیده با تقلید از تکامل بیولوژیکی است [۳۳]. در طول محاسبه در روش الگوریتم ژنتیک، می‌توان به‌طور معمول سه عملگر مختلف را در مجموعه راه‌حل‌ها برای تأمین جمعیت تکاملی جدید به‌کار برد [۳۴].

در این تحقیق، روش بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای شناسایی جنبه‌های فیزیکی مطلوب میکروالکترومکانیکی تیر و فیلم پیزوالکتریک در دستگاه‌های برداشت انرژی برای افزایش کارایی برداشت انرژی بررسی شده است. پوشش الکترودها یکسان با اندازه فیلم پیزوالکتریک تعریف شده است. در ادامه، قابلیت روش بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک در بهبود کارایی و کاربرد آن در فرایندهای ساخت میکرو بحث و نشان داده خواهد شد. از آنجاکه معادلات تحلیلی ارائه‌شده قادر به ارزیابی دقیق ولتاژ برداشت‌شده برای ابعاد برداشت‌کننده هستند، می‌توان از آن‌ها در یک تابع تناسب بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک استفاده کرد که این تابع شامل پنج

$$V = \frac{6g_{31}Y_p t_p Y_b t_b (t_p + t_b)}{w \left(Y_p^2 t_p^4 + Y_b^2 t_b^4 + 2Y_p t_p Y_b t_b \right) 3t} \times M \quad (7)$$

برای استفاده در رابطه ۷ برای تخمین ولتاژ برداشت‌شده، گشتاور محرک با رابطه ۸ ارائه می‌شود:

$$M = (Y_b I_b) \hat{k}; \quad (8)$$

\hat{k} میانگین خمیدگی شعاع است. بر اساس نظریه تیر اویلر-برنولی، معادله حاکم بر تیر را می‌توان با ۹ بیان کرد:

$$Y_b I_b \frac{\partial^4 d(x,t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 d(x,t)}{\partial t^2} = f(t) \quad (9)$$

در این رابطه، ρ چگالی تیر، A ناحیه سطح مقطع تیر، $d(x,t)$ تغییر شکل یا انحراف در امتداد محور Z است که در شکل ۲ نشان داده شده است و $f(t)$ نیروی تحریک خارجی روی تیر است. انحنای تیر با رابطه ۱۰ نشان داده شده است.

$$k(x,t) = \frac{\partial^2 d(x,t)}{\partial x^2} \quad (10)$$

در نهایت، می‌توان میانگین انحنای شعاع موردنیاز برای محاسبه حرکت در رابطه ۸ را محاسبه کرد:

$$\hat{k} = \frac{1}{p} \int_0^{l_p} k(x,t) dx; \quad (11)$$

از آنجاکه از نظریه تیر اویلر-برنولی در استنباط فوق استفاده شده است، برای اطمینان از بالاترین دقت



متغیر فیزیکی ضخامت تیر، طول تیر، طول فیلم پیزوالکتریک، ضخامت فیلم پیزوالکتریک و عرض تیر یا پیزوالکتریک است که به عنوان پارامترهای بهینه‌سازی معرفی می‌شوند. باید توجه داشت که ولتاژ برداشت شده به جای توان برداشت شده به عنوان تابع تناسب الگوریتم ژنتیک تعریف می‌شود. به این ترتیب فقط می‌توان به بهینه‌سازی هندسه فیزیکی برداشت‌کننده‌ها پرداخت و نیازی به معرفی پارامترهای خارجی مانند امپدانس نیرو نیست.

۳. ارزیابی روش الگوریتم ژنتیک و روش عددی

به منظور ارزیابی صحت معادلات تحلیلی ارائه شده در بخش قبلی برای ولتاژ برداشت شده از دستگاه‌های پیزوالکتریک تک‌بلوره، یک برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک با پارامترهای ذکر شده در جدول ۱ در نرم‌افزار متلب برای محاسبات تحلیلی اجرا شد. در ادامه یک مدل عددی با همان خصوصیات با استفاده از نرم‌افزار آباکوس برای روش اجزای محدود شبیه‌سازی شد. مقایسه ولتاژهای برداشت‌شده با استفاده از روش محاسبه تحلیلی و شبیه‌سازی در شکل ۳ نشان داده شده است. بر اساس مقدار گام اولیه در تحلیل دینامیکی اختلاف نتایج تا زمان ۱/۳ میلی‌ثانیه مشاهده می‌شود که بر این اساس محاسبات تحلیلی پیشنهادی پس از رسیدن به حالت ثابت و یکنواخت (حدود ۱/۳ میلی‌ثانیه) دقت و قابلیت اطمینان بالایی دارد. بنابراین می‌توان اطمینان حاصل کرد

که چنین مدل تحلیلی پتانسیل خوبی برای استفاده در برآورد مقدار ولتاژ برداشت‌شده از دستگاه‌های برداشت انرژی از پیزوالکتریک تک‌بلوره دارد. چنین دقت بالایی بین محاسبات تحلیلی و شبیه‌سازی را می‌توان به ساختار نسبتاً ساده برداشت‌کننده‌های انرژی پیزوالکتریک تک‌بلوره و ثوری تیر اوپلر-برنولی نسبت داد.

جدول ۱- پارامترهای استفاده شده در محاسبات تحلیلی و عددی برای برداشت انرژی از پیزوالکتریک تک‌بلوره

پارامتر	توضیحات	مقدار
l_b	طول تیر	mm۷
t_b	ضخامت تیر	$\mu\text{m}400$
Y_b	مدول الاستیسیته	Gpa۷۰
ρ_b	چگالی تیر	kg/m^32700
l_p	طول فیلم پیزوالکتریک	mm۷
t_p	ضخامت فیلم پیزوالکتریک	$\mu\text{m}100$
Y_p	مدول الاستیسیته پیزوالکتریک	Gpa۵۰
ρ_p	چگالی مواد پیزوالکتریک	kg/m^37600
g_{31}	ضریب مواد پیزوالکتریک	e-3Vm/n۹.۵
w	عرض تیر و فیلم پیزوالکتریک	mm۳

۴. روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک میکرو تیرالکترومکانیکی

روش بهینه‌سازی پیشنهادی در جعبه‌ابزار الگوریتم ژنتیک نرم‌افزار متلب برای افزایش میزان ولتاژ برداشت‌شده به همراه کاهش اندازه





برداشت‌کننده استفاده می‌شود. برداشت‌کننده‌های انرژی پیزوالکتریک با یک ارتعاش سینوسی که دامنه شتاب آن $g/5$ است و فرکانس یکسان با مشخصات فرکانس تشدیدکننده برداشت‌کننده انرژی مربوطه تحریک می‌شوند. برای هر پنج پارامتر ضخامت تیر، طول تیر، طول فیلم پیزوالکتریک، ضخامت فیلم پیزوالکتریک و عرض تیر یا پیزوالکتریک، بهینه‌سازی فیزیکی مرزهای بالا و پایین به‌عنوان محدودیت‌های طراحی تعریف می‌شوند.

برای نشان دادن و مقایسه قابلیت الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ۴ بار با اندازه نسل ۲۰، اما با اندازه‌های مختلف جمعیت از ۵ تا ۴۵ اجرا می‌شود و با نام‌های OPT1, OPT2, OPT3, OPT4 نشان داده می‌شوند. برای انجام یک مقایسه جامع، همچنین فرکانس تشدید، پیک ولتاژ تولیدشده در یک فرکانس خاص و زمان اجرا ارائه می‌شوند. قیود مسئله ریاضی به دو نوع خطی و غیرخطی تقسیم‌بندی می‌شوند. قیود خطی نیز به دو نوع قیود خطی مساوی و قیود خطی نامساوی تقسیم‌بندی می‌شوند. رابطه قیود به‌صورت زیر بیان می‌شود.

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_b \\ t_b \\ l_p \\ t_p \\ w \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 7000 \\ 400 \\ 7000 \\ 100 \\ 3000 \end{bmatrix} \quad (12)$$

ماتریس سمت چپ همان ماتریس A_{ineq} است و ماتریس سمت راست رابطه همان ماتریس b_{ineq} است. ماتریس مجهولات نیز ماتریس X است. این رابطه به شکل کلی زیر تعریف می‌شود:

$$A_{ineq} X \leq b_{ineq} \quad (13)$$

درعین‌حال با توجه به اینکه مسئله از نوع بهینه‌سازی است، تابع برازش با تابع هدف مسئله یکسان می‌باشد. در الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی برای به دست آوردن بهبود نتایج و مناسب‌ترین نتیجه از تابع جریمه ضرب استفاده شده است. درواقع تابع هدف اولیه افزایش ولتاژ خروجی و تابع هدف ثانویه حداقل مقدار ابعاد ضخامت تیر، طول تیر، طول فیلم پیزوالکتریک، ضخامت فیلم پیزوالکتریک و عرض تیر است. بر این اساس تابع جریمه از نوع ضرب تعریف می‌شود که مقدار انحراف از مقادیر قیود را به‌عنوان تابعی در مقادیر تابع هدف ثانویه ضرب خواهد کرد.

۵. روش بهینه‌سازی در شبیه‌سازی عددی میکرو تیرالکترومکانیکی

در این قسمت، به شبیه‌سازی سه‌بعدی میکرو تیرالکترومکانیکی مورد مطالعه پرداخته خواهد شد. مشخصات ابعادی مدل برای استفاده در نرم‌افزار آباکوس برای بهینه‌سازی ساختاری میکروالکترومکانیکی در ردیف دوم جدول ۳ بیان شده است (OPT - abaqus نام‌گذاری شده است). روش بهینه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس،

استفاده از روش اجزای محدود در روش بهینه کردن اندازه است. در این روش با تغییر پارامترهای ابعادی مشخص شده با توجه به محدودیت‌های قيود تعریف شده، به یافتن بهترین حالت برای حداقل کردن وزن و بیشترین ولتاژ خروجی منجر خواهد شد.

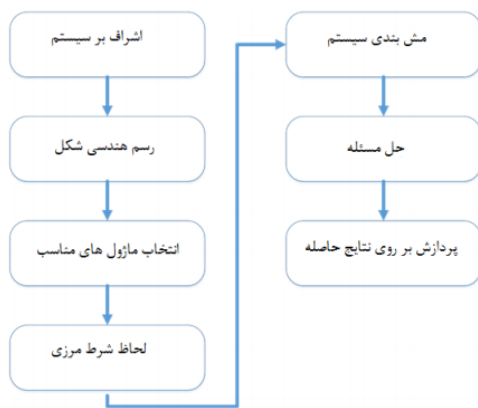
جدول ۲- مشخصات فیزیکی و مکانیکی مواد مورد استفاده

در پیزوالکتریک

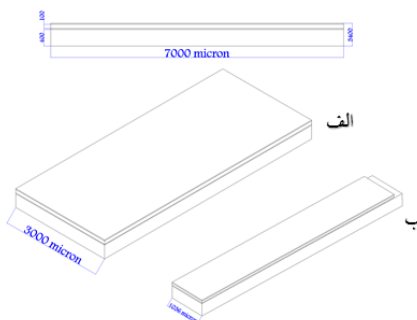
خصوصیات ماده	AlN	PZT	Al	Cu	Si
مدول الاستیسیته (GPa)	۳۰۸	۶۸	۷۰	۱۲۴	۱۵۰
جرم حجمی (kg/m ³)	۳۲۶۰	۷۵۰۰	۲۷۰۰	۸۹۰۰	۲۳۳۰
ضریب پواسون	۰/۲۴	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۴	۰/۱۷
ثابت دی-الکتریک	۱۰/۷۳	۵۱۵/۴۹	۱۲	۱۷/۱	۱۱/۷
ضریب مواد پیزوالکتریک (C/m ³)	-۰/۵۸	-۶/۵	---	---	---

- ۱- انتخاب نوع بهینه‌سازی مورد نظر؛
- ۲- تعریف پاسخ‌های طراحی برای بهینه‌سازی؛
- ۳- تعریف تابع هدف؛
- ۴- تعریف قيود طراحی.

روند شبیه‌سازی در شکل ۴ ارائه شده است. در این شبیه‌سازی از تک‌لایه پیزوالکتریک و زیرلایه آلومینیوم استفاده شده است. خواص ماده پیزوالکتریک به کار برده شده در جدول ۲ ارائه شده است. ابعاد لایه پیزوالکتریک مورد بررسی در شکل ۵ نمایش داده شده است.

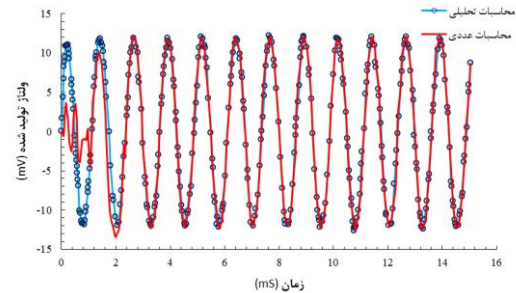


شکل ۴. مراحل شبیه‌سازی در نرم‌افزار



شکل ۵. ابعاد پیزوالکتریک مورد بررسی،

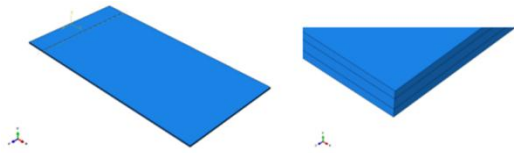
الف) Un_OPTF، ب) Abaqus_OPTF



شکل ۳. برآورد ولتاژهای برداشت شده از دستگاه برداشت انرژی از پیزوالکتریک با استفاده از محاسبات تحلیلی و شبیه‌سازی

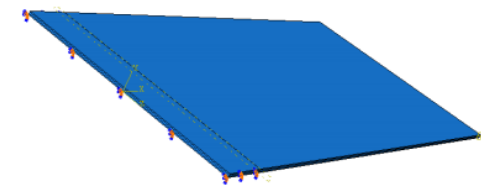
طبق شکل ۴ برای اجرای واحد بهینه‌سازی آباکوس، پس از طی ۶ گام متداول در حل مسئله در نرم‌افزار آباکوس نیاز است در نوار ابزار بهینه‌سازی چهار مرحله نیز به ترتیب زیر اجرا شود:





شکل ۶. ایجاد سه بعدی پیزوالکتریک

در واحد بهینه‌سازی نرم‌افزار، مشخصات مواد سه نوع جنس با نام‌های پیزوالکتریک، آلومینیوم و مس انتخاب می‌شود. نکته قابل توجه در این مرحله، این موضوع است که در لایه پیزوالکتریک با توجه به اورتوتروپیک بودن خواص ماده، باید جهتی را مشخص کرد. در اعمال دمپینگ از ۱۰ فرکانس اول با ضریب دمپینگ ۰/۰۱۵ استفاده می‌شود. در واحد بارگذاری تعیین ورودی سیستم و شرایط مرزی انجام می‌شود. تحریک پایه از نوع ورودی شتاب است. همچنین برای اعمال آن در جهت Y خواهد بود که این ورودی به صورت هارمونیک $A = A_0 \sin(\omega t)$ خواهد بود. چنانکه در شکل ۷ نشان داده می‌شود، انتهای پیزوالکتریک با توجه به نمونه واقعی گیردار شده است. در واحد شبکه‌بندی، با توجه به شکل ۸، بر لایه پیزوالکتریک شبکه ایجاد می‌شود. نوع شبکه‌بندی برای پیزوالکتریک C3D20E است. اتصال هر دو بخش لایه با المان اتصالی contact انجام شده است.



شکل ۷. ایجاد شرایط مرزی در حالت تیر آلومینیومی

نوع پیزوالکتریک از نوع PZT-5A است. قطعه پیزوالکتریک مورد بررسی سه لایه دارد. دو لایه زیر و بالای این قطعه از جنس مس و لایه میانی از جنس پیزوالکتریک است. خواص مکانیکی لایه‌های پیزوالکتریک از نوع اورتوتروپیک است. خواص مکانیکی و الکتریکی لایه پیزوالکتریک به صورت زیر است که در ماتریس الاستیسیته E_{44} و E_{55} و E_{66} مدول برشی پیزوالکتریک می‌باشد [۲۸]. همچنین با توجه به ماتریس کوپلینگ پیزوالکتریک قطبی شدن پیزوالکتریک در جهت محور Y خواهد بود. لازم به بیان است که خواص کوپلینگ پیزوالکتریک با توجه به ثوابت تنش به دست آمده‌اند.

$$[E] = \begin{bmatrix} 132 & 71 & 73 & 0 & 0 & 0 \\ 71 & 132 & 73 & 0 & 0 & 0 \\ 73 & 73 & 115 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 30 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 26 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 26 \end{bmatrix} GPa$$

Piezoelectric Constants =

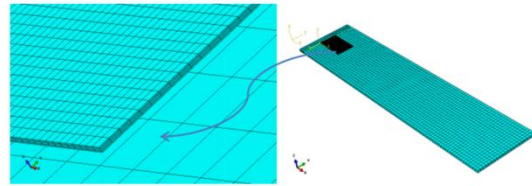
$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & -4.1 \\ 0 & 0 & -4.1 \\ 0 & 0 & 14.1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 10.5 & 0 & 0 \\ 0 & 10.5 & 0 \end{bmatrix} C/m^2$$

Permittivity Constants =

$$\begin{bmatrix} 7.12 & 0 & 0 \\ 0 & 7.12 & 0 \\ 0 & 0 & 5.84 \end{bmatrix} * 10^{-9} f/m$$

به منظور ایجاد مدل قطعه پیزوالکتریک از محیط استاندارد استفاده می‌شود. لایه پیزوالکتریک و لایه مس به صورت سه بعدی ایجاد شده و سپس پیکربندی می‌شود (شکل ۹).

ضخامت تیر و عرض تیر تأثیر گذاشته است. این نکته برای بهینه‌سازی طراحی پیزوالکتریک سیستم‌های میکروالکترومکانیکی بسیار اهمیت دارد.



شکل ۸. نوع شبکه‌بندی تیر آلومینیومی به همراه لایه پیزوالکتریک

جدول ۳- نتایج حاصل از پنج پارامتر فیزیکی برداشت‌کننده انرژی ارتعاشی پیزوالکتریک با واحد بهینه‌سازی آباکوس و الگوریتم ژنتیک با اندازه‌های

مختلف جمعیت

پارامتر	محدوده	Un-OPT	abaqus-OPT	OPT1	OPT2	OPT3	OPT4
طول تیر	[۷۰۰، ۱۰۰۰]	۷۰۰۰	۶۵۸۹	۴۵۶۵	۳۵۹۸	۴۰۵۳	۳۸۹۱
ضخامت تیر	[۴۰، ۲۰۰]	۴۰۰	۳۵۴	۲۵۷	۳۵۶	۳۲۵	۳۱۲
طول پیزوالکتریک	[۷۰۰، ۱۰۰۰]	۷۰۰۰	۶۳۲۵	۴۵۸۲	۱۰۰۰	۱۰۵۸	۱۰۰۰
ضخامت پیزوالکتریک	[۱۰۰، ۲۰۰]	۲۰	۵۸	۲۵	۹۵	۱۰۰	۹۸
عرض تیر	[۴۰، ۱۰۰۰]	۲۸۰۰	۱۰۳۶	۱۸۷۴	۱۲۵۷	۲۵۸۹	۱۵۹۳
پیک ولتاژ VPeak[mV](Analytic)	-	۹/۱۲	۱۱/۸۶	۴/۰۶	۳۷/۹	۴۰/۷۱	۴۱/۳۹
VPeak[mV](FEM)	-	۷/۸۰	۱۱/۲۵	۳/۹۸	۲۶/۹۴	۳۶/۸۷	۳۷/۵۰
فرکانس رزونانس [KHz]	-	۱۰/۵۷	۱۱/۲۸	۳۹/۸۷	۱۵/۳۵	۸/۳۲	۸/۳۶
اندازه جمعیت	-	-	-	۵	۱۵	۳۰	۴۵
زمان اجرا [min]	-	-	۳۵۸	۱۵	۱۲۵	۲۹۶	۷۹۶

۶. نتایج بهینه‌سازی برداشت‌کننده‌های

انرژی

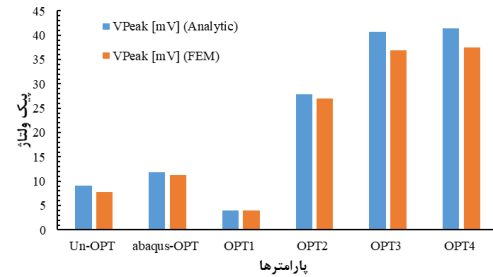
پس از اولین اجرای بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک با عنوان (OPT1) با اندازه جمعیت کوچک، پیک ولتاژ تولیدشده در مقایسه با Un-OPT بسیار کاهش می‌یابد؛ اگرچه روند بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک در این حالت خیلی سریع انجام شده است. با افزایش اندازه جمعیت به ۱۵، زمان موردنیاز همراه با راندمان برداشت انرژی افزایش یافت. OPT3 با اندازه جمعیت کافی ۳۰ نشان می‌دهد که افزایش اندازه جمعیت می‌تواند به بهبود عملکرد برداشت انرژی پیزوالکتریک با ضریب ۴/۴۶ کمک کند؛ هرچند انتظار می‌رود زمان بیشتری برای اجرای بهینه‌سازی باشد. شایان‌ذکر است که انتخاب اندازه مناسب جمعیت برای بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک بسیار حیاتی است. همان‌طور که داده‌های OPT4 نشان می‌دهد، اگرچه از تعداد جمعیت حتی بیشتر نسبت به OPT3 استفاده می‌شود؛ اما زمان اجرا به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد و بهبود عملکرد از نظر پیک ولتاژ برداشت‌شده در مقایسه با OPT3 بسیار کم است.

از سوی دیگر، نتایج به‌دست‌آمده برای OPT3 نشان می‌دهد که بهبود عملکرد در واقع، بر چندین جنبه مانند طول فیلم پیزوالکتریک،

علاوه‌براین، با مقایسه بین داده‌های به‌دست‌آمده با استفاده از بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک و واحد بهینه‌سازی آباکوس به‌وضوح نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک علاوه بر اینکه مدت‌زمان کمتری را کسب کرده است، توانایی بالاتری در بهبود بهره‌وری برداشت انرژی داشته است. علاوه بر محاسبات حاصل از معادله‌های تحلیلی، ستون هشتم در جدول ۳ با استفاده از مطالعه وابسته به زمان در آباکوس نتایج شبیه‌سازی عددی را برای مقدار ولتاژ برداشت‌شده ارائه می‌دهد. در واقع برای هر یک از



حالت‌های OPT تحلیلی نیز با روش شبیه‌سازی در نرم‌افزار انجام شده است. این مقادیر برای هر یک از مراحل بهینه‌سازی در نمودار شکل ۹ ارائه شده است.



شکل ۹. مقایسه پیک ولتاژ در هر مرحله بهینه‌سازی

مشخص است که هر دو نتیجه فوق انطباق مناسبی با یکدیگر دارند. به‌طور کلی، از جدول ۴ می‌توان مشاهده کرد یک تیر باریک (به‌عنوان مثال، طول بزرگ‌تر، عرض کوچک‌تر و ضخامت نازک‌تر) ممکن است به بزرگ‌تر شدن ولتاژ برداشت منجر شود. علاوه بر این، یک فیلم پیزوالکتریک کوتاه و ضخیم‌تر می‌تواند به پیشرفت قابل‌توجهی در تبدیل انرژی برای برداشت‌کننده‌های انرژی پیزوالکتریک یک لایه کمک کند. بر اساس نتایج جدول ۴ هر یک از پارامترهای طول، عرض و ضخامت تیر بر نتیجه ولتاژ حاصله تأثیرگذار است.

همان‌طور که در جدول ۳ مشخص شده روش بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک می‌تواند تعداد زیادی از متغیرهای آزاد (به‌عنوان مثال، پنج پارامتر فیزیکی) را که طراح می‌تواند در طول فرایند طراحی انتخاب کند، با موفقیت بهینه‌سازی کند. با این حال، برای بیشتر فرایندهای ساخت که در دسترس آزمایش‌های تجربی است، ضخامت لایه‌ها به‌طور معمول ثابت نگه داشته می‌شود. به عبارت دیگر، طراحان هیچ کنترلی بر

میزان ضخامت در طی مراحل ساخت ندارند. برای در نظر گرفتن چنین محدودیتی، بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک و مقایسه مرتبط در سه جنبه فیزیکی طول تیر، طول فیلم پیزوالکتریک، تیر و عرض پیزوالکتریک حصول ولتاژ انجام شد که در جدول ۴ گزارش شده است.

جدول ۴- نتایج حاصل از پنج جنبه فیزیکی برداشت‌کننده انرژی ارتعاشی پیزوالکتریک با واحد بهینه‌سازی آباکوس و الگوریتم ژنتیک با اندازه‌های مختلف جمعیت

پارامتر	طول تیر [mm]	طول پیزوالکتریک [mm]	عرض تیر [mm]	پیک ولتاژ (Analytic) VPeak [mV]	پیک ولتاژ (FEM) VPeak [mV]	فرکانس رزونانس [Hz]	اندازه جمعیت	زمان اجرا [min]
محدوده	[۴۵۰۰, ۱۵۰۰]	[۳۵۰۰, ۵۰۰]	[۲۰۰۰, ۵۰۰]	-	-	-	-	-
Un-OPT	۴۵۰۰	۳۵۰۰	۲۰۰۰	۶۱	۵۴	۱۷۸۴	-	-
abaqus-OPT	۳۵۲۴	۲۵۸۴	۷۸۰	۶۸	۶۰	۲۰۱۳	-	۳۱۶
OPT1	۱۷۸۹	۷۵۲	۱۲۵۰	۶۵	۵۶	۲۷۸۷	۱۵	۲۵
OPT2	۴۲۵۷	۷۸۰	۶۲۰	۹۷	۸۵	۲۱۴۵	۳۰	۲۰۱

در جدول ۴، محدوده پوشش سه پارامتر بهینه‌سازی شده بر اساس محدودیت‌های طراحی بیان شده است. اندازه یک برداشت‌کننده انرژی بهینه نشده، با عنوان Un_OPT، با حداکثر اندازه‌های مجاز در تمام ابعاد انتخاب شده است. نتیجه واحد بهینه‌سازی آباکوس، با عنوان Abaqus_OPT، در ردیف چهارم جدول گفته شده است. از مطالعه بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک در جدول ۴ دو اندازه امیدوارکننده جمعیت تکاملی ۱۵ و ۳۰ برای انجام بهینه‌سازی‌های مبتنی بر الگوریتم ژنتیک در سناریوی جدید در



اینجا انتخاب شده‌اند که به ترتیب در OPT1 و OPT2 ذکر شده است. ستون‌های ۵ و ۶ شامل حداکثر مقدار ولتاژ برداشت‌شده از محاسبه تحلیلی که با استفاده از معادله‌های تحلیلی ارائه‌شده در بخش قبل حاصل شد، همچنین شبیه‌سازی عددی با استفاده از معادله‌های وابسته به زمان با فرکانس‌های تشدیدکننده است. از داده‌های خلاصه‌شده در جدول ۴، می‌توان مشاهده کرد که کاهش تعداد پارامترهای بهینه‌سازی از ۵ به ۳ می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی زمان الگوریتم ژنتیک را کاهش دهد. با این حال، بهبود راندمان واحد بهینه‌سازی آباکوس قابل‌توجه نیست. اگرچه Un_OPTF برای استفاده از حداکثر ابعاد فیزیکی موجود انتخاب شده است؛ اما عملکرد آن روی مقدار ولتاژ برداشت‌شده لزوماً بهترین مقدار نیست.

علاوه‌براین، در مقایسه با Abaqus _OPTF، OPTF1 می‌توان به اندازه ولتاژ برداشت‌شده برابر؛ اما با زمان اجرا بسیار کمتر دست یافت. در بین همه گزینه‌ها، OPTF2 می‌تواند با زمان مناسب برای تولید بیشترین مقدار ولتاژ برداشت‌شده انتخاب شود. علاوه‌براین، در مقایسه با ولتاژ خروجی اندازه‌گیری شده، می‌بینیم که مدل تحلیلی ارائه‌شده در بخش قبلی قادر به تخمین اندازه ولتاژ برداشت‌شده با دقت حدود ۸۸٪ است. تجزیه و تحلیل‌ها نشان می‌دهد که چنین تفاوتی بین برآورد تحلیلی و نتایج عددی اغلب به دلیل در نظر گرفتن نسبت میرایی هوا (به‌طور معمول ۰/۰۵-۰/۰۱ [۳۶]) و عدم ضخامت الکتروود در طول محاسبه تحلیلی است. از یک طرف، اگر نسبت میرایی هوا ۰/۰۱۵ در

محاسبات تحلیل در نظر گرفته شود نتایج شبیه‌سازی بسیار نزدیک به نتایج المان محدود خواهد بود. در طرف دیگر، ضخامت الکتروود ممکن است ۱۱٪ ضخامت تیر را در بر بگیرد. علاوه‌براین، می‌توان مشاهده کرد که روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی با اندازه مناسب جمعیت قادر به افزایش ولتاژ برداشت‌شده تا ۵۹٪ است در حالی که اندازه فیزیکی دستگاه برداشت (تیر پیزوالکتریک) را بیش از ۵۰٪ کاهش می‌دهد.

۷. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به مطالعه روش طراحی و بهینه‌سازی برای برداشت‌کننده انرژی ارتعاشی مبتنی بر سیستم میکروالکترومکانیکی پرداخته شد. در این راستا، یک روش طراحی و بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای برداشت‌کننده‌های انرژی میکرو تیر پیزوالکتریک پیشنهاد شد. در این تحقیق برای برآورد ولتاژ تولیدشده توسط دستگاه‌های پیزوالکتریک یک لایه، مدل‌های تحلیلی مبتنی بر نظریه تیر اویلر-برنولی ارائه شد. با نتایج حاصله نشان داده شد که روش بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک قادر به افزایش کارایی برداشت انرژی تا ۵۹٪ در مقایسه با برداشت‌کننده بهینه نشده است.

عملکرد روش بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک مستقل از ویژگی‌های مواد و ورودی‌های تحریک خارجی است. این بهبود با کاهش اندازه کلی برداشت‌کننده در چندین جنبه، مانند عرض تیر و طول فیلم پیزوالکتریک، مشاهده شد که در



- [9] E. Becker, W. Ehrfeld, P. Hagmann, A. Maner, and D. Münchmeyer, Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanofforming, and plastic moulding (LIGA process), *Microelectron. Eng.*, Vol. 4, pp. 35–56, 1986.
- [10] L. Zhang, N. Jangkrajarn, S. Bhattacharya, and C. J. R. Shi, Parasitic-aware optimization and retargeting of analog layouts: A symbolic-template approach, *Comput. Des. Integr. Circuits Syst. IEEE Trans.*, Vol. 27, pp. 791–802, 2018.
- [11] A. A. I. Ahmed and L. Zhang, Fast parasitic-aware synthesis methodology for highperformance analog circuits, in *Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, pp. 2155–2158, 2012.
- [12] C.-M. Ho and Y.-C. Tai, Micro-electro-mechanical-systems (MEMS) and fluid flows, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 30, pp. 579–612, 1998.
- [13] R. W. Miles, K. M. Hynes, and I. Forbes, Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues, *Prog. Cryst. Growth Charact. Mater.*, Vol. 51, pp. 1–42, 2015.
- [14] J. Simon and T. Caroff, Device for generating current and/or voltage based on a thermoelectric module placed in a flowing fluid, *Google Patents*, 2015.
- [15] J. Chen, Z. Yan, and L. Wu, The influence of Thomson effect on the maximum power output and maximum efficiency of a thermoelectric generator, *J. Appl. Phys.*, Vol. 79, pp. 8823–8828, 1996.
- [16] S. R. Anton and H. A. Sodano, A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006), *Smart materials and Structures*, Vol. 16, R1, 2007.
- [17] A. E. Kubba and K. Jiang, A comprehensive study on technologies of tyre monitoring systems and possible energy solutions, *Sensors*, Vol. 14, pp. 10306–10345, 2014.
- [18] J. Baker, S. Roundy, and P. Wright, Alternative geometries for increasing power density in vibration energy scavenging for wireless sensor networks, in *3rd international energy conversion engineering conference*, pp. 5617, 2005.
- [19] S. Roundy, P. K. Wright, and J. Rabaey, A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes, *Computer communications*, Vol. 26, pp. 1131–1144, 2003.
- [20] J. Yang, H. Zhou, Y. Hu, and Q. Jiang, Performance of a piezoelectric harvester in thickness-stretch mode of a plate, *iee*

طی فرایند طراحی سیستم میکروالکترومکانیکی بسیار مطلوب است.

یک مقایسه جامع بین روش بهینه‌سازی پیشنهادی و واحد بهینه‌سازی آباکوس نشان داده شد که روش بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک هم در افزایش مقدار ولتاژ برداشت‌شده و هم در کاهش زمان محاسبه موردنیاز بسیار مؤثرتر است. مشاهده شد، کاهش تعداد متغیرهای بهینه‌سازی از ۵ به ۳ کاهش زمان قابل‌توجه در انجام الگوریتم ژنتیک به همراه خواهد داشت.

۸. مآخذ

- [1] M. Rasouli and L. S. J. Phee, Energy sources and their development for application in medical devices, *Expert Rev. Med. Devices*, Vol. 7, pp. 693–709, 2018.
- [2] S. Nabavi, G. Yaralioglu, High Quality Factor Resonant Mass Sensors Based on CMUT for Immersion in Liquid, in *14th international workshop on Micromachined Ultrasonic Transducers (MUT)*, 2015.
- [3] P. D. Mitcheson, E. M. Yeatman, G. K. Rao, A. S. Holmes, and T. C. Green, Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices, in *Proc. IEEE*, Vol. 96, pp. 1457–1486, 2018.
- [4] S. R. Anton and D. J. Inman, Vibration energy harvesting for unmanned aerial vehicles, in *Proc. The 15th International Symposium on: Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, p.692824, 2019.
- [5] S. P. Beeby, M. J. Tudor, and N. M. White, Energy harvesting vibration sources for microsystems applications, *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 17, pp. 175–181, 2006.
- [6] C. C. Enz, A. El-Hoiydi, J. D. Decotignie, and V. Peiris, WiseNET: an ultralow-power wireless sensor network solution, *Computer (Long Beach, Calif.)*, Vol. 37, pp. 62–70, 2017.
- [7] G. T. A. Kovacs, N. I. Maluf, and K. E. Petersen, Bulk micromachining of silicon, in *Proc. IEEE*, Vol. 86, pp. 1536–1551, 1998.
- [8] J. M. Bustillo, R. T. Howe, and R. S. Muller, Surface micromachining for microelectromechanical systems, in *Proc. IEEE*, Vol. 86, pp. 1552–1574, 1998.



beam for energy harvesting, *Ferroelectrics*, vol. 505, no. 1, pp. 159–183, 2016.

- [33] M. Mitchell, *An introduction to genetic algorithms*, MIT press, 1998.
- [34] A. E. Eiben and J. E. Smith, *Introduction to evolutionary computing*, vol. 53. Springer, 2003
- [35] S. Nabavi and L. Zhang, *Design and Optimization of Wideband Multimode Piezoelectric MEMS Vibration Energy Harvesters*, in *Proc. Eurosesnosors*, Paris, France, vol. 1, no. 4, p. 586, 2017.
- [36] J. I. Daniel, *Engineering vibration*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 2001
- transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, Vol. 52, pp. 1872-1876, 2005.
- [21] J. Cho, M. Anderson, R. Richards, D. Bahr, and C. Richards, *Optimization of electromechanical coupling for a thin-film PZT membrane: I. Modeling*, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 15, pp. 1797, 2005.
- [22] C. D. Richards, M. J. Anderson, D. F. Bahr, and R. F. Richards, *Efficiency of energy conversion for devices containing a piezoelectric component*, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 14, pp. 717, 2004.
- [23] T. J. Johnson, D. Charnegie, W. W. Clark, M. Buric, and G. Kusic, *Energy harvesting from mechanical vibrations using piezoelectric cantilever beams.* in *smart structures and materials*, pp. 61690D-61690D-12, 2006.
- [24] Jabbari, Majid, Mostafa Ghayour, and Hamid Reza Mirdamadi, *Experimental and numerical results of dynamics behavior of a nonlinear piezoelectric beam*, *Mechanics of Advanced Materials and Structures* Vol 23, pp. 853-864, 2016.
- [25] Jabbari, Majid, Mostafa Ghayour, and Hamid Reza Mirdamadi, *Energy harvesting of a multilayer piezoelectric beam in resonance and off-resonance cases*, *Journal of Engineering Materials and Technology* 139.3, 2017.
- [26] A. L. Araújo, V. S. Carvalho, C. M. M. Soares, J. Belinha, and A. J. M. Ferreira, *Vibration analysis of laminated soft core sandwich plates with piezoelectric sensors and actuators*, *Compos. Struct*, 2016.
- [27] N. Chidambaram, A. Mazzalai, and P. Muralt, *Measurement of effective piezoelectric coefficients of PZT thin films for energy harvesting application with interdigitated electrodes*, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 59, no. 8, pp. 1624–1631, 2012.
- [28] A. H. Meitzler, H. F. Tiersten, A. W. Warner, D. Berlincourt, G. A. Couquin, and F. S. Welsh III, *IEEE standard on piezoelectricity*, Society, 1988.
- [29] S. Roundy and P. K. Wright, *A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics*, *Smart Mater. Struct.*, vol. 13, no. 5, pp. 1131, 2004.
- [30] J. I. Daniel, *Engineering vibration*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 2001.
- [31] R. C. Hibbeler, *Mechanics of Materials*, Prentice Hall, 1997.
- [32] S. Kumar, R. Srivastava, and R. K. Srivastava, *Design and analysis of smart piezo cantilever*

