

# بهینه‌سازی طراحی برداشت‌کننده انرژی ارتعاشات موتور پهپاد بر مبنای قابلیت اطمینان

داودی‌نیک، علیرضا\*<sup>۱</sup>، عفت‌پناه حساری، مجتبی<sup>۲</sup>

۱- استادیار دانشگاه شهید ستاری، دانشکده مهندسی هوافضا

۲- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۳۰)

## چکیده

در این مقاله از یک مدل موجود برای برداشت انرژی از پیزوالکتریک استفاده شده است. توان قابل برداشت به عدم قطعیت‌های زیادی مانند عدم قطعیت‌های ناشی از خواص مواد، شرایط بارگذاری و عدم قطعیت ناشی از تolerانس‌ها حساس است. لذا بمنظور رسیدن به عملکرد صحیح مدار برداشت‌کننده انرژی تحت عدم قطعیت‌ها، از بهینه‌سازی طرح با قابلیت اطمینان با هدف کم کردن حجم برداشت‌کننده استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که چنانچه در طراحی ابعادی سامانه برداشت‌کننده انرژی از روش بهینه‌سازی با قابلیت اطمینان نسبت به عدم قطعیت‌های ناشی از تolerانس استفاده شود، حداقل توان خروجی موردنیاز برای تامین انرژی سنسورها به میزان قابل توجهی در مقایسه با بهینه‌سازی تصادفی افزایش می‌یابد. در این تحقیق طراحی برای تامین حداقل توان جایگزین باتری موردنیاز برای عملگرها و حسگرهای یک پهپاد با استفاده از برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریکی از ارتعاشات موتور هواپیمای بدون سرنشین، به عنوان یک نمونه کاربردی بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: برداشت انرژی، بهینه‌سازی، قابلیت اطمینان، پیزوالکتریک، ارتعاشات موتور هواپیمای بدون سرنشین

## Reliability based design optimization of energy harvester from UAV engine vibration

Alireza Davoudinik, Mojtaba Effatpanah hesari

### Abstract

In this paper, a model is used to harvest energy from the piezoelectric. The harvested energy is in large uncertainties such as uncertainties caused by the material properties, loading conditions and the uncertainty resulting from the tolerances sensitive. Therefore, in order to achieve the proper functioning on the uncertainties, the reliability based design optimization is planned. The results show that if reliability base design optimization method with to the uncertainty caused by tolerances to be done for energy harvesting systems, power output requirement and also ensure the proper functioning significantly increased when compared with the stochastic optimization. In this study, a piezoelectric vibration energy harvester designed to replace the battery supply for actuators and sensors in the unmanned aircraft with respect to predetermined power requirement. In this case, the vibration source is the aircraft engine vibrations.

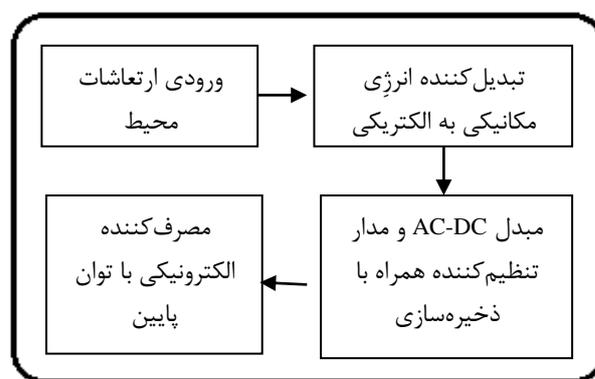
**Keywords:** Energy harvesting, Optimization, Reliability, Piezoelectric, UAV engine vibration.



## مقدمه

اهمیت تکنولوژی تولید ادوات الکترونیکی با توان پایین در تولید سنسورهای بی‌سیم، نمود پیدا کرده است. لزوم تامین انرژی این سنسورها توجه زیادی را به انرژی ارتعاشات بعنوان یک منبع بالقوه برای تامین انرژی معطوف کرده است [۱]. استفاده از ارتعاشات برای تامین انرژی مزیت‌هایی از جمله بازده بالا در مصرف انرژی و سازگاری بیشتر با محیط زیست در مقایسه با باتری‌ها دارد. کاربرد بسیار سنسورها در صنایع مختلف منجر به معطوف شدن توجه به برداشت انرژی از ارتعاشات گردیده و نتیجه آن سبب پیشرفت گسترده‌ای در تحقیقات دانشگاهی و محصولات متعدد صنعتی شده است [۲]. در این زمینه، جنبه‌های متعددی از علوم مهندسی از جمله مکانیک، علم مواد و الکترونیک درگیر می‌شوند. در رویه این تبدیل انرژی از مواد هوشمند که قابلیت وابسته کردن حداقل دو میدان را دارا هستند، از جمله مواد پیزوالکتریک، الکترومگنتیک، الکترواستاتیک، مگنتواسترکتیو، مگنتوالکتریک، پلیمرهای الکترواکتیو از جمله الاستومردیالکتریک و در نهایت آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی استفاده می‌شود [۳].

ارتعاشات مکانیکی به وفور در سازه‌های ساخت بشر نظیر ماشین‌های دوار، کانال‌های هوا، موتورها، بسیاری از لوازم خانگی، سازه‌هایی نظیر پل و ساختمان‌ها وجود دارد. یک سیستم برداشت انرژی از انرژی ارتعاشی از چندین بخش تشکیل شده که به طور شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- اجزای کلی یک سیستم برداشت‌کننده انرژی

در این مقاله در ادامه بیان اهمیت برداشت انرژی از منابع محیطی و لزوم تامین انرژی در عملگرهایی با توان پایین،

مروری بر کارهای انجام شده در زمینه برداشت انرژی از محیط و مفاهیم پایه در برداشت انرژی از پیزوالکتریک‌ها ارائه شده است. سپس تیر یکسر درگیر در حالت کوپل با پیزوالکتریک، بعنوان مدل برداشت‌کننده انرژی ارتعاشی در یک پهپاد ارائه گردیده است. انرژی برداشت شده را می‌توان جایگزین توان مصرفی باتری در عملگرهای پهپاد نمود. این موضوع نیز اخیراً مورد توجه محققین قرار گرفته است [۴-۷]. چرا که پهپادهایی با مداومت پروازی بالا، با محدود بودن میزان انرژی باتری مواجه بوده و نیز استفاده از انرژی خورشیدی مستلزم فراهم شدن شرایط جوی مناسب است. بدین منظور با در نظر گرفتن ارتعاشات ناشی از موتور هواپیمای بدون سرنشین بعنوان منبع ارتعاشی مورد نظر، بهینه‌سازی ابعادی با هدف بیشترین مقدار برداشت انرژی با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای ابعاد برداشت‌کننده و ماده پیزوالکتریک انجام شده است.

نتایج در این مرحله از توجیه لازم برای اطمینان از عملکرد صحیح مدار برداشت‌کننده و نیز میزان کافی برداشت انرژی برخوردار نیست. اما می‌دانیم که در هر سیستم مهندسی واقعی درجه‌ای از عدم قطعیت وجود دارد، که در روش‌های معمول در طراحی بهینه نامعین، در نظر گرفته نمی‌شوند. عدم قطعیت پدیده ناشناخته‌ای در دنیای طبیعی و فن‌آوری است. یک تعریف کلی برای عدم قطعیت عبارتست از: فاصله اطلاعاتی بین آنچه می‌دانیم و آنچه برای تصمیم‌گیری با کم‌ترین ریسک لازم است بدانیم [۸]. لذا می‌حث قابلیت اطمینان برای دستیابی به پاسخ بهینه مطرح می‌شود. قابلیت اطمینان یک مشخصه ذاتی هر محصول یا سامانه است و در جهان امروز به عنوان یکی از کمیت‌های سنجش‌پذیر طراحی، ساخت و بهره‌برداری تعریف می‌شود که در طی فرآیندهای مربوطه همواره باید به عنوان یک معیار مهم مورد توجه و کنترل قرار گیرد. مهندسی قابلیت اطمینان در دو دهه اخیر در کشورهای متری، توسعه قابل توجهی یافته است، به نحوی که صنایع حساس مانند هوافضا، تولید انرژی، نفت و پتروشیمی با استفاده از این معیار است که قادر به طراحی سامانه‌ها و ارزیابی اجراپذیری و موفقیت عملکردهای انتظاری و تحلیل حالت‌های شکست و اثرات آنها می‌باشند [۹]. البته این امر به سرعت در حال گسترش به صنایع خودروسازی و صنایع دیگر نیز می‌باشد. لذا اهمیت بحث از جنبه‌های ایمنی، اقتصادی و کیفیت زندگی جامعه کاملاً روشن بوده و بدیهی است که بکار گرفتن صحیح

از یک جرم، فبر و میراکننده تشکیل شده بود، پیشنهاد دادند [۱۲]. برخی نیز مدل یک درجه آزادی با تحریک پایه و بر اساس مکانیزم الکترومغناطیس ارائه دادند [۱۳]. در سال‌های بعد تلاش شد تا مدل‌های قبلی را بهبود دهند [۱۴]. برای اینکار یک بای‌مورف از جنس PZT-5H را با حجم کل  $1 \text{ cm}^3$  و طراحی کرده و  $375 \mu\text{W}$  توان در فرکانس  $120 \text{ Hz}$  و شتاب  $2/5 \text{ ms}^{-2}$  را جهت تغذیه فرستنده رادیویی برداشت کردند. در تحقیقی دیگر تیر یکسرگیردار با دو لایه پیزوالکتریک با فرض تیر اویلر-برنولی، و همچنین تیر تیموشنکو بررسی شده و حل تحلیلی ارائه شد [۱۵]. در ادامه تحقیقات برای تیر یکسرگیردار مستطیلی دو لایه حل تحلیلی ارائه شده است. بطوریکه به بررسی روش گسسته نیز پرداخته و ثابت کرده‌اند که روش مذکور برای ارتعاشات طولی و عرضی تیر نتایج غیردقیقی ارائه می‌کند، در نتیجه ضرایب تصحیحی برای مدل ارائه شده است [۱۶ و ۱۷]. همچنین روش‌های تحلیلی را با تست‌های تجربی مقایسه نموده و مدل‌های متنوعی پیشنهاد داده‌اند. در این مورد با در نظر گرفتن تیر یکسر درگیر با یک لایه پیزوالکتریک (با وظیفه برداشت‌کننده انرژی ارتعاشی) و تعریف پارامترهای بی‌بعد پاسخ فرکانسی ولتاژ، جریان و توان با روش پارامترهای توزیع شده همراه با تحریک هارمونیک، نمودارهای این پاسخ‌های معرفی شده به‌ازای فرکانس‌های تحریک متفاوت و در مقاومت‌های مختلف بدست آمده است [۱۸].

در تحقیقی دیگر تیری برنجی به طول  $55 \text{ mm}$ ، عرض  $31/8 \text{ mm}$  و ضخامت  $0/14 \text{ mm}$  در میان دو لایه پیزوالکتریک به ضخامت  $0/27 \text{ mm}$  قرار داده و سپس شتاب پایه تیر برابر با  $2/5 \text{ ms}^{-2}$  تنظیم شده و ولتاژ خروجی بر حسب مقاومت مدار و توان برداشتی نسبت به فرکانس ترسیم شده است [۱۹].

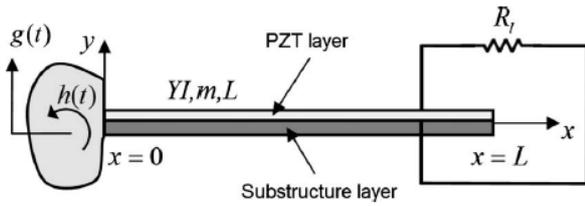
لازم بذکر است که در کارهای معرفی شده بیشترین انرژی برداشتی هنگامی اتفاق می‌افتد که فرکانس تحریک به فرکانس طبیعی سازه نزدیک باشد. در بسیاری از طراحی‌های مکانیکی هدف عدم شکست سازه است اما در مسائل برداشت انرژی و نیز بهینه‌سازی برداشت انرژی، هدف حصول حداقل مقدار انرژی برداشتی خواهد بود. همچنین برداشت این انرژی مورد نیاز با کمترین حجم سازه عامل مهمی است که به آن توجه می‌شود. به عبارت دیگر در این مسئله، هدف بررسی عوامل خرابی تیر با وظیفه برداشت‌کننده انرژی نبوده و تنها

علوم و فنون و تخصص‌های فنی که بتوانند بنحو کامل و شایسته‌ای هر یک از این مجموعه‌ها را تکمیل و به لحاظ بهره‌وری کارا بنماید، حائز اهمیت است [۱۰]. از این‌رو در ادامه تحقیق در این مقاله با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ناشی از تیرانس‌های ابعادی، بهینه‌سازی با قابلیت اطمینان با روش مونت‌کارلو انجام شده و در نهایت نتایج بدست آمده از بهینه‌سازی با و بدون قابلیت اطمینان با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همانگونه که در انتهای این تحقیق در بخش نتایج مشاهده می‌شود، با در نظر گرفتن بهینه‌سازی با قابلیت اطمینان، ضمن افزایش اطمینان از عملکرد صحیح مدار برداشت‌کننده انرژی، قابل توجه میزان انرژی برداشت شده، مقدار مقاومت مدار برداشت‌کننده نیز کاهش می‌یابد. نوع و میزان این تغییرات، جایگزینی باتری با مدار برداشت‌کننده انرژی را قابل ارائه می‌نماید.

### برداشت انرژی از پیزوالکتریک‌ها

مواد پیزوالکتریک به دلایلی از جمله توانایی در تبدیل مستقیم انرژی کرنشی به انرژی الکتریکی قابل مصرف و نیز سادگی کاربرد، مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته‌اند. دلیل این تبدیل انرژی جهت‌گیری ساختار مولکولی مواد پیزوالکتریک است. این جهت‌گیری به گونه‌ای است که منجر به بوجود آمدن دو قطبی‌های الکتریکی می‌گردد. با اعمال انرژی کرنشی، این دو قطبی‌ها دچار تغییر شکل و بروز شارژ الکتریکی در ماده می‌شوند و در نهایت می‌توان این انرژی را در وسایل الکترونیکی مورد استفاده قرار داد. متداولترین وسیله برداشت‌کننده انرژی از ارتعاشات، تیر یکسرگیردار با یک یا چند لایه پیزوسرامیک (PZT) که بر روی یک سازه مرتعش قرار می‌گیرد، می‌باشد. کرنش دینامیکی ایجاد شده در لایه‌های پیزوالکتریک منجر به تولید ولتاژ الکتریکی می‌گردد که به وسیله الکترودهایی که سطح لایه پیزوالکتریک را می‌پوشانند، جمع‌آوری و ذخیره می‌گردد [۱۱].

جهت بیان رفتار ارتعاشی تیر یکسرگیردار PZT سه نوع مدل‌سازی توسط محققین مورد استفاده قرار گرفته است که عبارتند از: مدل گسسته<sup>۱</sup>، مدل پیوسته<sup>۲</sup> و مدل اجزای محدود<sup>۳</sup> که در اکثر این بررسی‌ها، تیر یکسرگیردار مستطیلی با یک یا دو لایه پیزوالکتریک مورد بررسی قرار گرفته است. اولین محققان در زمینه برداشت‌کننده‌های انرژی، مدلی گسسته که



شکل ۲- مدل در نظر گرفته شده برای برداشت انرژی [۱۸]

$$v(t) = \frac{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{-jm\omega^3 \varphi_r \gamma_r^w}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}}{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \chi_r \varphi_r}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega} + \frac{1 + j\omega \tau_c}{\tau_c}} Y_0 e^{j\omega t} \quad (1)$$

$$i(t) = \frac{v(t)}{R} \quad (2)$$

$$P(t) = v(t) \times i(t) \quad (3)$$

که در این معادلات  $\omega$  سرعت زاویه‌ای در فرکانس تحریک،  $Y_0$  دامنه تحریک،  $m$  جرم مدل،  $\tau_c$  معرف ثابت زمانی،  $\omega_r$  سرعت زاویه‌ای در فرکانس‌های طبیعی سیستم،  $\zeta_r$  نسبت دمپینگ و بقیه پارامترها توابعی هستند که در تحقیق ارتورک و اینمن [۱۸] تعریف شده‌اند.

### کدنویسی معادلات و اعتبارسنجی

بعد از ارائه مدل انتخاب شده و کدنویسی محاسباتی در نرم‌افزار متلب، برای صحت‌سنجی کد نوشته شده، مسئله‌ای را که در مرجع [۱۸] ارائه شده است حل نموده و نتایج مقایسه می‌شوند. در نتایج حل، خروجی‌هایی بعنوان پاسخ فرکانسی ولتاژ، جریان و توان تعریف شده است و به‌ازای فرکانس‌های تحریک متفاوت این خروجی‌ها اندازه‌گیری شده و نتایج در نمودارهای مربوط به آن‌ها ارائه می‌شود. در این مسئله ثوابت تیر و پیزوالکتریک مطابق جدول ۱ تعریف شده است.

در اینجا بعنوان نمونه، یکی از نتایج ارائه شده است. شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب بیانگر نتایج مندرج در مرجع [۱۸] و نتایج این تحقیق در بیان تغییرات پاسخ فرکانسی ولتاژ به‌ازای فرکانس‌های تحریک متفاوت می‌باشد. بیشترین برداشت انرژی

حصول اطمینان برای دستیابی به هدف با ابعاد بهینه، مورد نظر است [۲۰].

### معرفی مدل

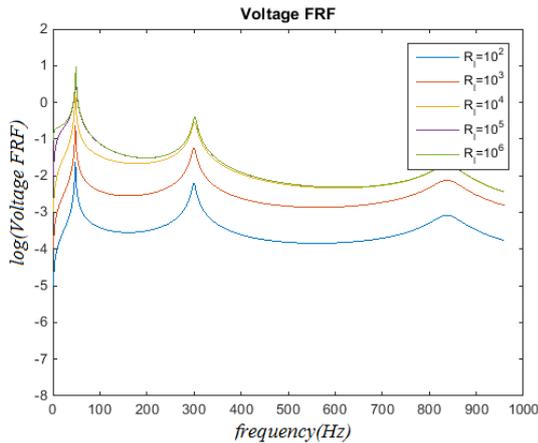
مدلی که در این پژوهش برای برداشت انرژی از ارتعاشات تیر یکسر درگیر در حالت کوپل با پیزوالکتریک (PZT-5A) با وظیفه برداشت‌کننده انرژی در نظر گرفته می‌شود از مرجع [۱۸] انتخاب شده است. این مدل پاسخ الکترومکانیکی دقیق برای برداشت انرژی از تیر یکسر درگیر ارائه می‌دهد.

بدین ترتیب که برداشت انرژی الکتریکی از یک تیر اوپلر-برنولی با پیکربندی مستطیل شکل مستقیم تک‌لایه با استفاده از روش پارامترهای توزیع شده در نظر گرفته شده و نمودارهای مربوط به ولتاژ، جریان و توان خروجی ترسیم خواهند شد. حرکت پایه هارمونیک که منجر به تولید خروجی الکتریکی پیوسته از سیستم می‌گردد، دائمی فرض شده است و الکترودها به صورت سری به لایه پیزوالکتریک متصل شده‌اند. تحت شرایط یکسان، پیکربندی سری الکترودها منجر به تولید ولتاژ خروجی بیشتر و پیکربندی موازی آنها منجر به تولید جریان خروجی بیشتری می‌گردد. همچنین سیستم مدل شده خطی فرض شده است، بدین معنی که آستانه تحریک باید تا جایی باشد که ترم‌های غیرخطی هندسی و پیزوالاستیک در سیستم ظاهر نشود. فرمول‌بندی پارامترهای توزیع شده خطی ارائه شده، نسخه الکترومکانیکی روش رایلی-ریتز است.

منبع برداشت انرژی، ارتعاشات موتور هواپیمای بدون سرنشین است. بدین ترتیب از تیری با یک لایه پیزوالکتریک و بدون جرم محک استفاده می‌کنیم. در شکل ۲ مدل در نظر گرفته شده ارائه شده است. در این مدل فرض شده است که الکترودها تمام سطح لایه پیزوالکتریک را پوشانده و لایه پیزوالکتریک به طور کامل به سطح تیر چسبیده است. در این مدل میرایی سازه‌ای با سختی و میرایی ویسکوز با جرم، متناسب در نظر گرفته شده است. روش بدست آوردن این ضرایب و توصیه‌هایی برای کاهش خطا در مرجع [۱۸] ارائه شده است.

در نهایت ولتاژ، جریان و توان برداشتی از این مدل از معادلات (۱) تا (۳) بدست می‌آیند.

اطمینان از نتایج کدنویسی به ادامه مراحل تحقیق پرداخته می شود.



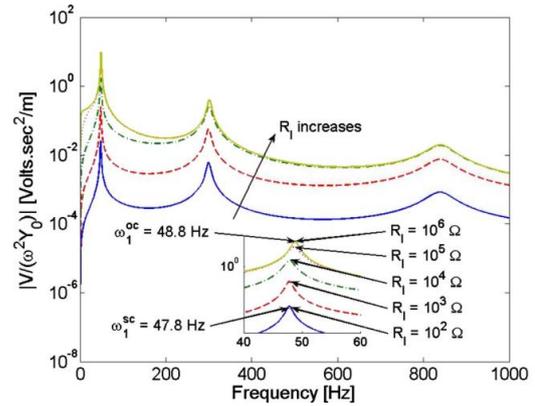
شکل ۴- نمودار پاسخ فرکانسی ولتاژ به ازای فرکانس های تحریک متفاوت بدست آمده از این تحقیق

### معرفی منبع ارتعاشی

منبع ارتعاشی مورد نظر برای تحریک برداشت کننده یک موتور UAV با نام DLE-55 با مشخصات ارائه شده در جدول ۲ در نظر گرفته شده است [۲۱]. حال با داشتن اطلاعات ابعادی اجزای موتور [۲۱]، و نیز میزان توان خروجی در دور معینی از موتور، می توان ابتدا گشتاور وارده به میل لنگ را محاسبه نموده (۵/۲۵ N.m) و با بدست آوردن فشار وارد بر سطح بالایی پیستون (۱۸۸ MPa)، نیرویی که به بدنه UAV وارد می آید (۳۰۰ N) و شتاب حدودی ناشی از آن (۲۰۰ ms<sup>-2</sup>) که به موتور ۱/۵ کیلوگرمی وارد می آورد را بدست آورد. اما به دلیل اینکه موتور از طریق دسته هایش به بدنه هواپیما متصل است، شتاب نهایی وارده به پایه موتور (بدلیل مقید بودن به بدنه) بسیار کمتر خواهد بود. اختلاف شتاب بدنه موتور و دسته متصل به آن، در اثر یک نوع دسته موتور خاص، در کاربرد با موتورهای گوناگون متفاوت است. برای مثال استفاده از دسته موتور نوع Hyde Custom Mount LR85 Universal Mount ارتعاشات را ۸۵ درصد کاهش می دهد [۲۲]. لذا ۱۵ درصد ارتعاشات موتور به بدنه آن وارد آید، بطوریکه داریم:

$$(0/15) \times 200(m.s^{-2}) = 30(m.s^{-2}) \quad (4)$$

بدین ترتیب دامنه شتاب را ۳۰ m.s<sup>-2</sup> در نظر می گیریم.



شکل ۳- نمودار پاسخ فرکانسی ولتاژ به ازای فرکانس های تحریک متفاوت [۱۸]

جدول ۱- پارامترهای هندسی، ذاتی و الکترومکانیکی برداشت کننده نمونه [۱۸]

مقدار	پارامتر
۱۰۰	طول تیر (mm)
۲۰	عرض تیر و لایه ی پیزوالکتریک (mm)
۰/۵	ضخامت تیر (mm)
۰/۴	ضخامت پیزوالکتریک (mm)
۱۰۰	مدول یانگ تیر (GPa)
۶۶	مدول یانگ پیزوالکتریک (GPa)
۷۱۶۵	چگالی تیر (kgm <sup>-3</sup> )
۷۸۰۰	چگالی پیزوالکتریک (kgm <sup>-3</sup> )
-۱۹۰	ثابت پیزوالکتریک (pmV <sup>-1</sup> )
۱۵/۹۳	ظرفیت الکتریکی پیزوالکتریک (nFm <sup>-1</sup> )

جدول ۲- مشخصات موتور UAV [۲۱]

عنوان	کمیت
حجم موتور	۵۵/۶CC
عملکرد	۷۵۰۰ Rpm در ۵/۵ HP
قطر داخلی سیلندر	۴۵ mm
کورس	۳۵mm
جرم	۱/۵Kg

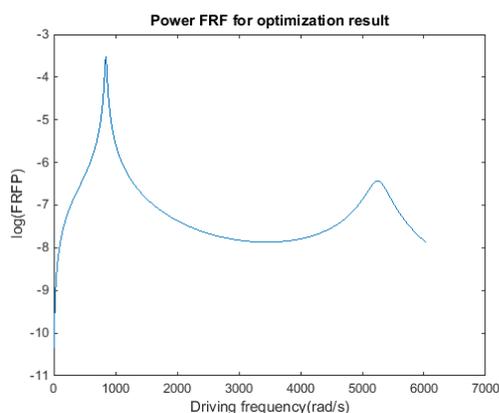
در مقاومت 10<sup>2</sup> اهم در فرکانس ۴۷/۸ هرتز، در مقاومت 10<sup>4</sup> اهم در فرکانس ۴۷/۸۵ هرتز، در مقاومت 10<sup>5</sup> اهم در فرکانس ۴۸/۶۵ هرتز و در مقاومت 10<sup>6</sup> اهم در فرکانس ۴۸/۸ هرتز بدست آمده است. همانگونه که از مقایسه نتایج ارائه شده در شکل ها و فرکانس های بدست آمده مشاهده می شود، صحت نتایج بدست آمده از این تحقیق مورد تأیید است. لذا با

بدین ترتیب بهینه‌سازی تا ۴ رقم بعد از اعشار (با واحد متر) با استفاده از جعبه ابزار نرم‌افزار متلب انجام می‌گردد. برای افزایش مقاومت بازه‌های ۱۰۰ اهمی در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب در جواب‌ها مقاومتی با مقدار ۱۲۳۴۵ وجود نداشته، بلکه بصورت ۱۲۳۰۰ خواهد بود. بعد از انجام بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، نتایج مطابق جدول ۴ بدست می‌آید.

**جدول ۴ - نتایج بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک**

عنوان	کمیت
طول تیر و پیزو (متر)	۰/۰۸۹۳
ضخامت تیر (متر)	۰/۰۰۱۰
ضخامت پیزو (متر)	۰/۰۰۱۰
عرض تیر و پیزو (متر)	۰/۰۲۰۰
مقاومت (اهم)	۴۶۱۰۰
توان خروجی محاسبه شده (میلی وات)	۱۷/۱

در شکل ۵ نمودار پاسخ فرکانسی توان بر حسب فرکانس‌های تحریک متفاوت رسم شده است.



شکل ۵- پاسخ فرکانسی برای توان برداشتی با مشخصات نتایج بهینه‌سازی

همانطور که پیش‌بینی می‌شد سرعت زاویه‌ای در فرکانس طبیعی اول به فرکانس تحریک ( $785/4 \text{ rad.s}^{-1}$ ) بسیار نزدیک است.

اما بهینه‌سازی بدون در نظر گرفتن قابلیت اطمینان، خصوصا در مبحث پهپادها که در حین پرواز هیچگونه دسترسی به سامانه وجود ندارد، با ریسک عدم قطعیت همراه است. لذا ضروری است که در اینگونه موارد بهینه‌سازی با قابلیت اطمینان همراه

حال با استفاده از سرعت زاویه‌ای فرکانس موتور ( $785/4 \text{ rad.s}^{-1}$ ) و با در نظر گرفتن تحریک هارمونیک، می‌توان دامنه تحریک را با تقسیم دامنه شتاب بر توان دوم فرکانس محاسبه کرد.

### بهینه‌سازی مدل برداشت‌کننده انرژی از ارتعاشات موتور هواپیمای بدون سرنشین

بعد از به دست آوردن معادلات حاکم بر پیژوالکتریک کوپل با سازه، نوبت به بهینه‌سازی هندسه سازه و پیژوالکتریک و همچنین پارامتر مقاومت الکتریکی می‌رسد. در این مساله هدف کم کردن حجم تیر با توجه به قید برداشت توان از برداشت‌کننده است، بطوری که توان برداشتی از ۱۷ MW (که فرض می‌شود حداقل توان مورد نیاز برای عملکرد سنسورها است) بیشتر باشد. از آنجاییکه الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی یک روش شناخته شده است، هنگامی که در خود الگوریتم تغییر ایجاد نمی‌شود، فقط به ذکر توابع هدف، قیود و نتایج بسنده می‌شود [۲۳]. بدین ترتیب مساله بهینه‌سازی بصورت معادله (۵) تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Minimize : Volume}(X) \\ = X(1) \times X(4) \times (X(2) + X(3)) \\ = L_{beam} \times W_{beam} \times (h_{beam} + h_{pizo}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{Subject to : } g_1(X) = P_0 - P(X)$$

$$X_k^{\min} < X_k < X_k^{\max} \quad k = 1, 2, 3, 4, 5$$

در این معادلات  $X$  بردار متغیرهای طراحی است و قید پس از محاسبه توان بصورت  $g_1(X) \leq 0$  تعریف می‌شود. در جدول ۳ پارامترهای طراحی و محدوده آنها معرفی شده‌اند. فرض بر این است که مساله با حالت واقعی مقایسه گردد، در عمل دقت ساخت در دسترس تا ۰/۱ میلی‌متر می‌باشد.

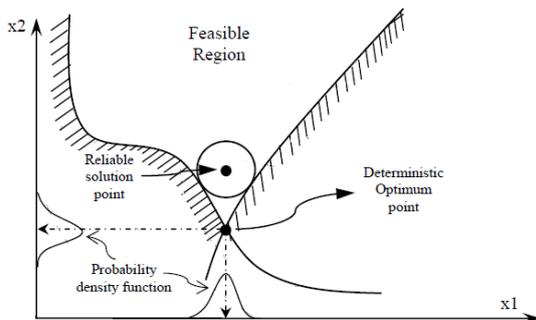
جدول ۳ - معرفی متغیرهای طراحی و محدوده آنها

عنوان	حد بالا	حد پایین
طول تیر و پیزو (متر)	۰/۱۵۰۰	۰/۰۶۰۰
ضخامت تیر (متر)	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۱۰
ضخامت پیزو (متر)	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۱۰
عرض تیر و پیزو (متر)	۰/۰۵۰۰	۰/۰۲۰۰
مقاومت (اهم)	۱۰ <sup>۶</sup>	۱۰ <sup>۲</sup>

طراحی تصادفی<sup>۵</sup> که شامل تمام متغیرهای هندسی (طول، عرض و ارتفاع) تیر و پیزوالکتریک می‌شود.  $d$  عبارتست از بردار متوسط طراحی<sup>۶</sup> که شامل میانگین متغیرهای تصادفی و قطعی می‌باشد.  $\Phi$  تابع تجمعی توزیع احتمال نرمال استاندارد<sup>۷</sup>،  $Pr$  در تابع قید تابع احتمال وقوع،  $R'$  سطح اطمینان مورد نیاز [۲۴] که برابر است با ۰.۹۵ یا بالاتر و این مقدار به شاخص اطمینان  $\beta^t = 1.64$  دلالت می‌کند و  $d_k^{\min}, d_k^{\max}$  مقادیر بیشترین و کمترین در مرزها.

بدین ترتیب ۵ متغیر طراحی داریم که ۴ متغیر را بصورت متغیر تصادفی و یک متغیر باقیمانده و پارامترهای مسئله را بصورت قطعی در نظر می‌گیریم.

در این مقاله از RBDO برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و تیرانس‌ها در هندسه پیزوالکتریک و تیر استفاده شده است. شکل ۶ مقایسه‌ای از دو جواب بدست آمده از بهینه‌سازی با قابلیت اطمینان و بهینه‌سازی تصادفی را ارائه می‌دهد [۲۴].



شکل ۶- مقایسه بهینه‌سازی تصادفی و بهینه‌سازی با قابلیت اطمینان [۲۴]

روش‌های زیادی برای محاسبه قابلیت اطمینان وجود دارد. در این بین روش مونت کارلو<sup>۸</sup> یکی از روش‌های محاسباتی است که برای حل مساله بهینه‌سازی با قابلیت اطمینان بکار می‌رود. الگوریتم مونت کارلو یکی از قویترین ابزار مهندسی است که ما را به تحلیل آماری عدم قطعیت‌های موجود در مسائل مهندسی قادر می‌سازد [۲۶]. این روش در حل مسائل پیچیده‌ای که متغیرهای تصادفی زیادی توسط معادلات غیرخطی به یکدیگر مرتبط شده‌اند، بسیار کاربرد دارد. آنالیز مونت کارلو را می‌توان مانند روش شبیه‌سازی تصور کرد که بجای اجرا در عمل، توسط کامپیوتر انجام می‌پذیرد. اساس

شود. برداشت انرژی با افزایش دامنه تحریک ارتعاشات، افزایش می‌یابد. بیشترین دامنه ارتعاشات زمانی اتفاق می‌افتد که فرکانس تحریک با فرکانس طبیعی آن برابر باشد. اما ذکر این نکته ضروری است که فرکانس طبیعی اول معیاری برای طراحی برداشت‌کننده انرژی است، اما قطعاً بصورت فیزیکی عملکرد در فرکانس طبیعی غیرمحمتمل است زیرا در عمل دیگر پارامترهای فیزیکی تاثیرگذار بر فرکانس تحریک و خواص ماده باعث می‌شوند که برداشت‌کننده شرایط بحرانی را تجربه نکند.

### بهینه‌سازی با قابلیت اطمینان مدل برداشت‌کننده انرژی از ارتعاشات موتور هواپیمای بدون سرنشین

بعد از انجام بهینه‌سازی و یافتن نقطه بهینه بدلیل عدم قطعیت‌های موجود در پارامترها و متغیرهای مسئله، ممکن است جواب بدست آمده در عمل با جواب پیش‌بینی شده در بهینه‌سازی مطابقت نداشته باشد. بدین ترتیب جوابی اهمیت دارد که بتواند با اطمینان مورد نیاز هدف مساله را تامین کند. یعنی ممکن است بعد از ساخت برداشت‌کننده انرژی با استفاده از جواب حالت بهینه‌سازی تصادفی، مقدار توان مورد نیاز حاصل نشود. بدین ترتیب قابلیت اطمینان به معنی حصول هدف با درصد اطمینان است و جوابی مدنظر خواهد بود که بتواند این هدف را با اطمینان مورد نظر تضمین کند.

از جمله روشهای بهینه‌سازی با قابلیت اطمینان معین می‌توان به RBDO<sup>۹</sup> به عنوان یک روش تحلیل احتمالی اشاره کرد. در این روش‌ها با در نظر گرفتن خصوصیت تصادفی بودن ذاتی پارامترها به حل یک مساله مهندسی پرداخته می‌شود [۲۴].

مسئله RBDO را می‌توان بصورت روابط (۶) فرمول‌بندی کرد [۲۳]:

$$\begin{aligned} \text{Minimize: Volume } (d) & \\ &= d(1) \times d(4) \times (d(2) + d(3)) \\ &= L_{beam} \times w_{beam} \times (h_{beam} + h_{pizo}) \end{aligned} \quad (6)$$

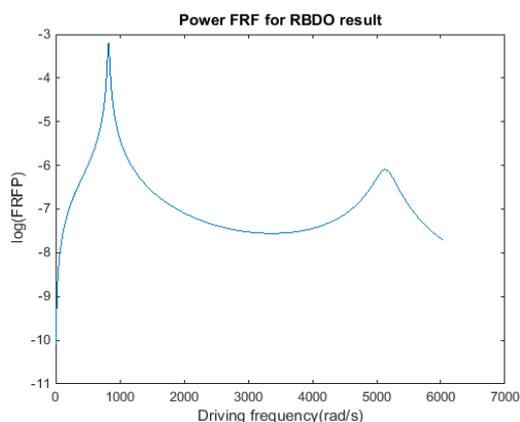
$$\begin{aligned} \text{Subject to:} & \\ \text{Pr } (G(X; d) \leq 0) &\geq \Phi(\beta^t) = R^t \\ d_k^{\min} &< d_k < d_k^{\max} \\ k &= 1, 2, 3, \dots, 5 \end{aligned}$$

که در آن  $G(X; d)$  نشانگر تمامی قیودی است که در بخش بهینه‌سازی معرفی شد.  $X$  عبارتست از متغیرهای

عرض تیر و پیزو (متر) ۰/۰۰۰۱ ۰/۰۰۰۵  
 حال چنانچه مشابه با بخش بهینه‌سازی، با ابعاد بدست آمده نمودار پاسخ فرکانسی توان بر حسب فرکانس‌های تحریک متفاوت رسم شود، مشاهده خواهد شد که در این حالت نیز همانطور که پیش‌بینی می‌شد سرعت زاویه‌ای در فرکانس طبیعی اول به فرکانس تحریک (۷۸۵/۴ rad.s<sup>-1</sup>) بسیار نزدیک است (شکل ۷).

جدول ۶ - نتایج بهینه‌سازی با قابلیت اطمینان با الگوریتم ژنتیک

عنوان	کمیت
طول تیر و پیزو (متر)	۰/۱۰۴۸
ضخامت تیر (متر)	۰/۰۰۱۲
ضخامت پیزو (متر)	۰/۰۰۱۵
عرض تیر و پیزو (متر)	۰/۰۲۵۷
مقاومت (اهم)	۴۳۰۰۰
توان خروجی محاسبه شده (میلی وات)	۶۸/۷۲



شکل ۷- پاسخ فرکانسی برای توان برداشتی با مشخصات نتایج بهینه‌سازی با قابلیت اطمینان

### بحث بر روی نتایج

در شکل ۸ نتایج بدست‌آمده از هر دو روش بهینه‌سازی برای ابعاد تیر و لایه پیژوالکتریک بصورت نمودار میله‌ای با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

همانگونه که مشاهده می‌شود طول تیر و پیزو با وظیفه برداشت‌کننده انرژی ارتعاشی در روش بهینه‌سازی با قابلیت اطمینان نسبت به بهینه‌سازی تصادفی تقریباً ۱۷٪ افزایش دارد. این افزایش در مقادیر ضخامت تیر، ضخامت لایه پیزو و عرض تیر و پیزو به ترتیب برابر با ۲۰٪، ۵۰٪ و ۲۸/۵٪ می‌باشد.

تحلیل مونت کارلو، تولید مجموعه‌ای از اعداد تصادفی است. در این روش نخست  $n$  عدد تصادفی برای هر یک از پارامترهای تصادفی موجود در معادله مورد نظر تولید شده، سپس این معادله به ازاء تک تک اعداد تصادفی تولید شده حل می‌گردد. نهایتاً  $n$  مقدار برای معادله مورد نظر بدست می‌آید که با بکارگیری روابط مربوطه می‌توان اطلاعات آماری نمونه هیستوگرام را برای پاسخ بدست آورد. لازم به ذکر است که هر چه تعداد دفعات تکرار افزایش یابد، همگرایی پاسخ نسبت به مقدار حقیقی بیشتر می‌شود [۲۷].

تمامی متغیرها دارای توزیع استاندارد نرمال فرض شده‌اند و مقدار تیرانس و انحراف از معیار آنها در جدول ۵ آمده است. مقدار تیرانس ارائه شده در جدول ۵، حداکثر تیرانس مجاز می‌باشد. مقادیر انحراف از معیار با توجه به تیرانس ساخت که برابر با ۰/۱ میلی‌متر است از روابط (۷) بدست آمده است [۲۷].

$$T = K \times S$$

$$K = 1, \text{for } \%68$$

$$K = 2, \text{for } \%95$$

$$K = 3.0, \text{for } \%99.7$$

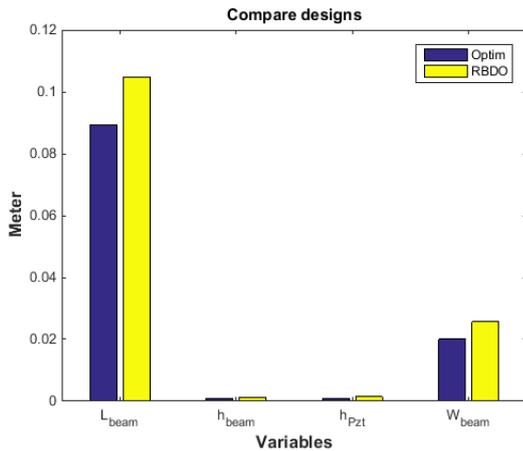
که در روابط (۷)،  $T$  تیرانس و  $S$  انحراف از معیار نمونه‌ها می‌باشد و  $K$  نیز با توجه به بازه اطمینان مشخص می‌شود.

درباره استفاده از روابط (۷) در مسئله باید گفت در روش RBDO نیاز به تولید داده وجود دارد. این داده‌ها با استفاده از انحراف معیار محاسبه شده با روابط (۷) و میانگینی برابر با هر ورودی، ساخته می‌شود [۲۴]. با استفاده از روابط (۷) و در نظر گرفتن بازه اطمینان ۹۵ درصد، ضریب  $K$  برابر با ۲ خواهد بود. لذا برای هر ورودی با استفاده از مقدار تیرانس تعیین شده در جدول ۵، انحراف از معیار مورد نیاز محاسبه می‌شود. حال با این انحراف از معیار و مقدار میانگینی برابر مقدار  $X$  (متغیرهای طراحی) با استفاده از توزیع نرمال می‌توان ورودی‌های تصادفی را تولید کرد. مرزها نیز مانند قسمت بهینه‌سازی تعریف شده است (جدول ۳). که بعد از انجام بهینه‌سازی با قابلیت اطمینان با استفاده از الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار متلب، نتایج مطابق جدول ۶ بدست می‌آید.

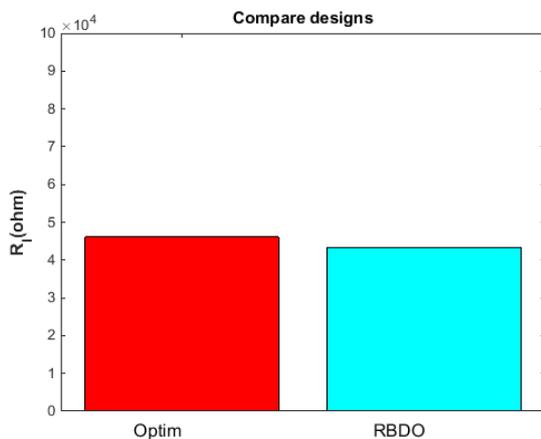
جدول ۵ - معرفی متغیرهای طراحی و انحراف از معیار آنها

عنوان	حداکثر تیرانس مجاز	انحراف از معیار
طول تیر و پیزو (متر)	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۵
ضخامت تیر (متر)	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۵
ضخامت پیزو (متر)	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۵

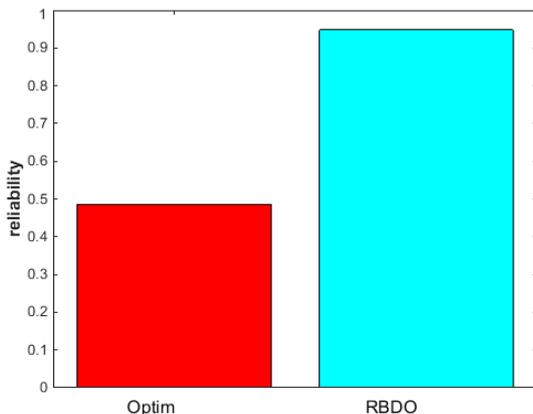
مجاز باشد خیلی بیشتر از حالت ساخت براساس نتیجه بهینه‌سازی با قابلیت اطمینان است (شکل‌های ۱۱ و ۱۲).



شکل ۸- مقایسه متغیرهای تصادفی برای ابعاد بهینه در پاسخ‌های بدست آمده



شکل ۹- مقایسه پارامتر مقاومت الکتریکی در پاسخ‌ها



شکل ۱۰- مقایسه قابلیت اطمینان در پاسخ‌های بدست آمده

اما همانگونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، میزان مقاومت الکتریکی مدار با کاهش ۶/۷٪ مواجه شده و میزان قابلیت اطمینان در مدل بهینه‌سازی تصادفی با قابلیت اطمینان نسبت به پاسخ بهینه‌سازی که با روش مونت کارلو محاسبه شده است با رشد تقریبی ۹۵٪ همراه است (شکل ۱۰).

از طرفی مطابق با نتایج مندرج در جداول ۴ و ۶ که از شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نیز قابل استنتاج است، میزان توان خروجی محاسبه شده در مرز، حداقل با افزایش ۳۰٪ همراه می‌شود. لذا مشاهده می‌شود که طراحی بهینه یک سامانه برداشت‌کننده انرژی بر اساس قابلیت اطمینان در مواجهه با عدم قطعیت‌ها، اگر چه با افزایش نسبی ابعادی همراه است اما علاوه بر به حداقل رساندن ریسک با افزایش قابل توجه بازدهی و کاهش نسبی مقاومت مدار همراه خواهد بود.

برای تحلیل مقادیر بدست‌آمده می‌توان گفت در تعیین قابلیت اطمینان پس از تولید اعداد تصادفی با میانگین متغیرهای طراحی و انحراف از معیار تعیین شده، در هر ورودی تصادفی مقدار قید محاسبه می‌شود و در صورتی که این مقادیر در محدوده مجاز قرار گیرند قابلیت اطمینان محاسبه‌شده بیشتر می‌شود.

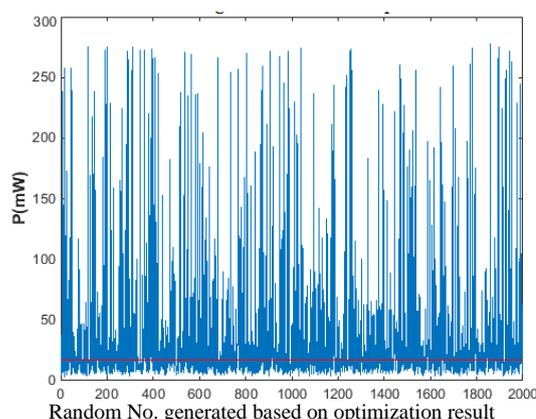
بدین ترتیب برای جواب بدست‌آمده بعد از محاسبه مقادیر قیده‌ها هرچه این مقادیر به مرز نزدیک‌تر باشند قابلیت اطمینان پایین‌تر می‌آید. برای خروجی الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی مقدار توان به مقدار مرز بسیار نزدیک است و در نتیجه قابلیت اطمینان کمتر را دربرخواهد داشت. در نهایت جواب محاسبه شده به روش RBDO به مقدار کافی از مرزها دور بوده و قابلیت اطمینان محاسبه‌شده برای آن ۰/۹۵۱۵ می‌باشد (شکل ۱۰). این نکته در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ کاملاً مشهود است. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ محور افقی نماینده شماره هر عدد تصادفی تولیدشده است.

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ خط افقی قرمز روی نمودار حداقل توان مورد نیاز برای عملکرد سنسورها را نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل ۱۱ مشخص است در حالت تولید اعداد تصادفی براساس نتایج بهینه‌سازی، تعداد زیادی از نتایج زیر خط قرمز (خط افقی در  $P=17 \text{ mW}$ ) قرار دارند. پس چنانچه ساخت برداشت‌کننده انرژی براساس این نتیجه با ترانس‌های معرفی شده انجام شود، احتمال اینکه توان تولید شده زیر حد

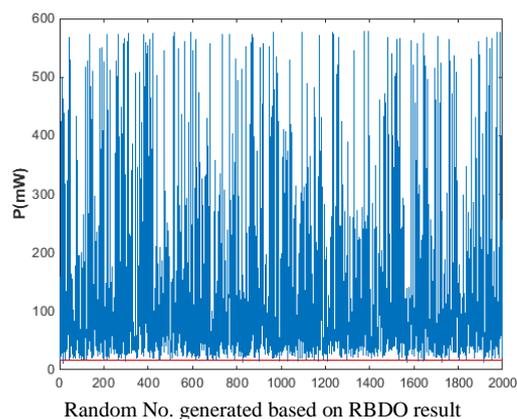
## نتیجه‌گیری

در این مقاله پس معرفی مدل و منبع برداشت انرژی، بهینه‌سازی و بهینه‌سازی با قابلیت اطمینان ۹۵٪ بمنظور رسیدن به هدف (تامین حداقل توان مورد نیاز برای سنسور) انجام گرفت. برای وارد کردن اثرات عدم قطعیت‌های ناشی از تolerانس‌های ابعادی، بازه اطمینان ۹۵٪ در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب از آنچه که در این تحقیق انجام شد نتیجه می‌شود که:



شکل ۱۱ - توان محاسبه‌شده برای اعداد تصادفی تولیدشده در

## بهینه‌سازی



شکل ۱۲ - توان محاسبه‌شده برای اعداد تصادفی تولیدشده در

## بهینه‌سازی بر اساس قابلیت اطمینان

چنانچه ساخت برداشت‌کننده انرژی در مدل تیر یکسرگیردار با وظیفه برداشت‌کننده انرژی به همراه یک لایه پیزوالکتریک چسبیده به آن با تolerانس‌های معرفی شده براساس طراحی بهینه تصادفی انجام شود، احتمال اینکه توان تولید شده کمتر از حد مجاز باشد خیلی بیشتر از حالت ساخت براساس نتایج بهینه‌سازی بر اساس قابلیت اطمینان است. علاوه بر آن در سامانه برداشت‌کننده انرژی از پیزو، طراحی بهینه بر

اساس قابلیت اطمینان مزایای قابل توجهی به همراه دارد. این شیوه از طراحی اگرچه در سامانه مورد نظر با افزایش نسبی ابعادی برای پیزو همراه است، اما علاوه بر دارا بودن ۹۵٪ اطمینان، با افزایش بازدهی قابل توجه و نیز کاهش نسبی مقاومت مدار برداشت‌کننده همراه خواهد بود. لذا در مواقعی که امکان دسترسی به سامانه مورد نظر در حین مأموریت میسر نباشد، الزامی است تا طراحی برداشت‌کننده انرژی برای تأمین توان مورد نیاز مصرف‌کننده‌های سامانه، براساس بهینه‌سازی با قابلیت اطمینان انجام شود. این امر شاید در مرحله طراحی هزینه‌هایی را تحمیل نماید، اما به نظر می‌رسد صرف نظر کردن از آن موجب بروز هزینه‌های جبران‌ناپذیر بعدی ناشی از خسارات و عواقب عملکرد با قابلیت اطمینان کمتر، بازده کمتر و ریسک بیشتر گردد.

افزایش ابعاد در طراحی با قابلیت اطمینان با توجه به ثابت بودن فرکانس تحریک، توان برداشتی را به حدی می‌رساند که رسیدن به هدف با قابلیت اطمینان مورد نظر تضمین شود. همچنین قابلیت اطمینان سبب کاهش مقاومت شده که به افزایش توان منجر می‌شود.

از طرفی نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش قابل توجه اطمینان از انرژی برداشت شده از پیزو در روش طراحی بهینه براساس قابلیت اطمینان، می‌توان آن را جایگزین توان مصرفی باتری در عملگرها و حسگرهای پهناد نمود. چراکه در پهنادهایی با مداومت پروازی بالا، محدود بودن میزان انرژی باتری مطرح بوده و نیز استفاده از انرژی خورشیدی مستلزم فراهم شدن شرایط جوی مناسب است. بدین ترتیب و با حذف باتری از وزن پهناد کاسته شده و با استفاده از بهینه‌سازی با قابلیت اطمینان می‌توان با انتخاب بازه اطمینان مورد نظر و قابلیت اطمینان مورد نیاز نسبت به تامین توان سنسورها آگاهی یافت.

## پی‌نوشت

- ۱ Lumped parameter model
- ۲ Distributed parameter model
- ۳ Finite element model
- ۴ Reliability Based Design Optimization
- ۵ Random design vector
- ۶ Mean design vector
- ۷ Cumulative standard normal distribution
- ۸ Monte Carlo

## منابع و مراجع

- [11] Renato Calìò, Udaya Bhaskar Rongala, Domenico Camboni, Mario Milazzo, Cesare Stefanini, Gianluca de Petris, Calogero Maria Oddo, "Piezoelectric Energy Harvesting Solutions"; Sensors, 14, 4755-4790, 2014.
- [12] Umeda M., Nakamura K., Ueha S., "Analysis of the transformation of mechanical impact energy to electric energy using piezoelectric vibrator"; Japanese Journal of Applied Physics, 35(5S), 3267, 1996.
- [13] Williams C., Yates R.B., "Analysis of a micro-electric generator for microsystems"; sensors and actuators A: Physical, 52(1), 8-11, 1996.
- [14] Roundy S., Wright P.K., Rabaey J., "A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes"; Computer communications, 26 (11), 1131-1144, 2003.
- [15] Ajitsaria J., Choe S. Y., Shen D., Kim D. J., "Modeling and analysis of a bimorph piezoelectric cantilever beam for voltage generation"; Smart Materials and Structures, 16(2), 447, 2007.
- [16] Erturk A., Inman D.J., "An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations"; Smart materials and structures, 18(2), 025009, 2009.
- [17] Erturk A., Inman D.J., "On mechanical modeling of cantilevered piezoelectric vibration energy harvesters"; Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 19, 1311-1325, 2008.
- [18] Erturk A., Inman D.J., "A distributed parameter electromechanical model for cantilevered piezoelectric energy harvesters"; Journal of vibration and acoustics, 130(4), 041002, 2008.
- [19] Du Toit N.E., "Modeling and design of a MEMS piezoelectric vibration energy harvester"; Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [20] Askari Mohammad Amin, Cottone Francesco, Sayyaadi Hassan, Zakerzadeh M.R., Orfei Francesco, Gammaitoni Luca, "Energy harvesting from structural vibrations of magnetic shape memory alloys"; Applied Physics Letters, 110.103905, 10.1063/1.4978258, 2017.
- [21] "DLE-55 Operator's manual"; Hobbico, Inc., 2010.
- [1] Roundy S., Eli S. L., Baker J., Carleton E., Reilly E., Lai E., Otis B., Rabaey J. M., Wright P. K., Sundararajan. V., "Improving power output for vibration-based energy scavengers"; IEEE Pervasive computing, 4(1), 28-36, 2005.
- [2] Erturk, A. and D.J. Inman, "Piezoelectric energy harvesting"; John Wiley & Sons, 2011.
- [3] Bruno, N.M., Ciocanel C., Feigenbaum H. P., Waldauer A., "A theoretical and experimental investigation of power harvesting using the NiMnGa martensite reorientation mechanism"; Smart Materials and Structures, 21(9), 094018, 2012.
- [4] Anton, S. R., Inman, D. J., "Vibration energy harvesting for unmanned aerial vehicles," in SPIE's 15th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring . Bellingham WA, USA, 6928, 692824, 2008.
- [5] Kyle C. Magoteaux; Brian Sanders, Henry A. Sodano; "Investigation of an energy harvesting small unmanned air vehicle", Proc. SPIE 6928, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems, 692823, 2008.
- [6] Erturk A., Anton S. R., Inman D. J., "Piezoelectric energy harvesting from multifunctional wing spars for UAVs – Part I: coupled modeling and preliminary analysis", Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems Proc. of SPIE Vol. 7288 72880C-1, 2009.
- [7] Anton S. R., Inman D. J., "Electromechanical Modeling of a Multifunctional Energy Harvesting Wing Spar", 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Denver, Colorado, 2011.
- [8] Zang A., Hemsch T., Etal J., "Needs and Opportunities for Uncertainty-Based Multidisciplinary Design Methods for Aerospace Vehicles"; NASA/Tm-2002.
- [9] Aleksander Kural, "WIRELESS ENERGY SUPPLY TO AIRCRAFT STRUCTURAL HEALTH MONITORING NODES USING ULTRASONIC LAMB WAVES"; Fatigue of Aircraft Structures, 1, 21-28, 2014.

- [22] "Hyde Custom Mount LR85 Universal Mount"; 2009; available from: [http://www.Probuild-uk.co.uk/index.php?route=product/product&product\\_id=1290](http://www.Probuild-uk.co.uk/index.php?route=product/product&product_id=1290).
- [23] Ashkvari M., Yousefi Koma A., Shariat Panahi M., Keshavarz H., "Design and optimization of an ankle joint actuating mechanism of humanoid robot", Modares Mechanical Engineering Vol. 16, No. 11, pp. 417-428, 2016 (in Persian).
- [24] Dizangian, B., Ghasemi M., "RELIABILITY-BASED DESIGN OPTIMIZATION OF COMPLEX FUNCTIONS USING SELF-ADAPTIVE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION METHOD"; Iran University of Science & Technology, 5(2), 151-165, 2015.
- [25] حسینی، سیدمحمدحسن، "تعیین ظرفیت نصب بهینه نیروگاه‌های آبی متوسط با استفاده از تراز یابی شاخص‌های فنی، مالی و قابلیت اطمینان؟" دوازدهمین کنفرانس مهندسی برق، ۱۳۸۵.
- [26] Buckley J.J., Jowers L.J., "Mont Carlo Methods in fuzzy optimization"; springer, 2008.
- [27] Grafarend E.W., "Linear and Nonlinear Models :Fixed Effects, Random Effects, and Mixed Models" Walter de Gruyter; 2006.