

بهینه‌سازی شکل یک تیر تک لایه پیزوالکتریک برداشت کننده انرژی

مجید عاروان^۱، مجتبی فرخ^۲، سعید ایرانی^۳

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، سازه‌های هوایی، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران

۲ استادیار، سازه‌های هوایی، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، farrokh@kntu.ac.ir

۳ دانشیار، سازه‌های هوایی، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۷

چکیده

با رشد روزافزون تکنولوژی و جمعیت، نیاز بشر به منابع انرژی مدام در حال افزایش است. منابع انرژی تجدیدپذیر بهترین گزینه برای تامین این نیازها هستند. استفاده از مواد پیزوالکتریک برای تبدیل ارتعاشات محیط به انرژی الکتریکی یکی از راه کارهای موجود است. در مقاله حاضر، بهینه‌سازی از نوع شکل برای تیر یکسر گیردار بایمورف صورت پذیرفته است. فرض شده است که این تیر تحت تحریک پایه هارمونیک قرار دارد. در این مقاله سیستم برداشت انرژی به همراه مدار الکتریکی در نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی شده است. در این نرم‌افزار شتابی به صورت هارمونیک و با فرکانس‌های مختلف به تکیه‌گاه تیر وارد می‌شود و در هر فرکانس تحریک، ولتاژ و جریان و توان الکتریکی سیستم بدست می‌آید و سپس سعی بر این بوده است که با تغییرات طول، عرض و نسبت ضخامت توان بیشتری حاصل شود. هدف این مقاله، به دست آوردن حالت بهینه‌تر برای ساختمان تیر جهت به دست آوردن بیشتر است. این امر معمولاً از طریق روش‌های بهینه‌سازی صورت می‌گیرد. از بین چهار روش بهینه‌سازی که مورد مطالعه قرار گرفته روش بهینه‌سازی محدود توسط تقریب درجه دوم بهینه‌تر و هزینه محاسباتی کمتری ارائه می‌نماید. در این تحقیق روش‌های مختلف بهینه‌سازی همگی مرتبه صفر می‌باشند که فقط از مقدار تابع هدف استفاده می‌کنند.

واژگان کلیدی

برداشت کننده انرژی؛ پیزوالکتریک؛ توان الکتریکی؛ بهینه‌سازی؛ مقاومت الکتریکی

۱. مقدمه

بین منابع جذب انرژی، برخی دارای سطح انرژی بالا در حد مگاوات هستند نظیر خورشید و باد و برخی دیگر منابع مانند انرژی

بهره‌برداری از منابع انرژی موجود در محیط اطراف، نظیر انرژی خورشید، باد و ارتعاشات همواره مورد توجه محققان بوده است. در

ارتعاشی دارای سطح انرژی در حد میلی‌وات و میکرووات می‌باشند. با پیشرفت تکنولوژی در دهه‌های اخیر، حجم و اندازه و به دنبال آن مصرف انرژی از تجهیزات الکترونیکی نظیر بوردهای الکترونیکی و شبکه‌های سنسوری بی‌سیم به‌طور مرتب رو به کاهش بوده است. در نتیجه تأمین انرژی این‌گونه سیستم‌ها با استفاده از باتری‌های معمولی حجیم که دارای عمر محدودی هستند و نیاز به تعویض یا شارژ مجدد دارند، از چالش‌های اصلی این سیستم‌های کم‌مصرف است؛ بنابراین تلاش‌هایی در جهت برداشت انرژی^۱ از منابع انرژی محیط نظیر خورشید، باد، ارتعاشات مکانیکی و ... به‌عنوان جایگزینی برای باتری‌های معمولی جهت تغذیه سیستم‌های الکترونیکی کوچک صورت گرفته است. در میان منابع انرژی ذکر شده، انرژی ناشی از ارتعاشات مکانیکی به دلیل موجود بودن در اکثر مکان‌های دور از دسترس نظیر هواپیماهای بدون سرنشین^۲ (UAVs)، تجهیزات نظامی، کانال‌های تهویه و ... جهت تأمین انرژی نسبت به سایر منابع انرژی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۱].

ایده‌ی تبدیل ارتعاشات به الکتریسیته اولین بار در مقاله‌ای که توسط ویلیامز و یانز^۳ در سال ۱۹۹۶ نوشته شده مطرح گردید. آن‌ها بیان کردند سه راه برای تبدیل ارتعاشات به الکتریسیته وجود دارد که این سه راه شامل الکترومغناطیس، الکترواستاتیک و پیزوالکتریک است [۲]. پاتل^۴ در مطالعات خود اظهار می‌کند که مبدل‌های پیزوالکتریک بیشترین تولید انرژی را به صورت عملی دارند. مبدل‌های پیزوالکتریک می‌توانند تا چگالی انرژی 35.4 mJ/cm^3 را نسبت به مبدل‌های الکترواستاتیک با چگالی انرژی 4 mJ/cm^3 و مبدل‌های الکترومغناطیس با چگالی انرژی 24.8 mJ/cm^3 تولید کنند [۳]. متداول‌ترین وسیله برداشت کننده انرژی از ارتعاشات، تیر یکسر گیردار با یک یا چند لایه پیزوسرامیک (PZT) است که بر روی یک سازه مرتعش قرار می‌گیرد. 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. به دو دلیل برداشت کننده‌های انرژی پیزوالکتریک را به صورت یکسر گیردار در نظر می‌گیرند، اول به این دلیل که پیکربندی یکسر گیردار بیشترین مقدار کرنش را در اثر اعمال یک نیروی معین ایجاد می‌کند و چون توان برداشت شده رابطه مستقیمی با میزان کرنش ایجاد شده در برداشت کننده دارد،

در نتیجه میزان انرژی برداشت شده افزایش می‌یابد. دومین دلیل این است که پیکربندی مذکور پایین‌ترین فرکانس طبیعی را در یک سازه مشخص نتیجه می‌دهد و از آنجایی که منابع ارتعاشی محیط دارای محدوده فرکانسی پایینی هستند، در نتیجه استفاده از این پیکربندی در اکثر کاربردها مناسب است [۴]. بسیاری از سازه‌ها مانند بدنه‌ی هواپیما و پل‌های معلق، نیاز به پایش دائمی دارند. از سوی دیگر، با توجه به محل قرارگیری حس‌گرهای پایش سلامت سازه، در بسیاری از موارد امکان جایگزینی باتری‌ها وجود ندارد. از این‌رو از یک منبع توان دائمی مانند برداشت کننده‌های پیزوالکتریک استفاده می‌کنند [۵]. روش‌های تحلیلی متفاوتی جهت پیش‌بینی رفتار برداشت کننده‌های انرژی پیزوالکتریک ارائه شده است که در اینجا به اختصار ذکر شده‌اند. اومدا^۵ و همکاران [۶] جزو اولین محققان در زمینه برداشت کننده‌های انرژی بودند. مدل پیشنهادی آن‌ها یک مدل گسسته بود که از یک جرم، فنر و میرا کننده تشکیل شده بود. آجیتساریا^۶ و همکاران [۷] تیر یکسر گیردار با دولایه پیزوالکتریک را با فرض تیر اوایلر - برنولی، و همچنین تیر تیموشنکو بررسی کردند و حل تحلیلی ارائه نمودند. ارتورک^۷ و اینمن برای تیر یکسر گیردار مستطیلی دولایه حل تحلیلی ارائه کردند [۸]. ارتورک و همکاران در مقالات خود به بررسی روش گسسته نیز پرداختند و ثابت کردند که این روش برای ارتعاشات طولی و عرضی تیر نتایج غیر دقیقی ارائه می‌کند، در نتیجه ضرایب تصحیحی برای این مدل ارائه نمودند همچنین آن‌ها روش‌های تحلیلی را با آزمون‌های تجربی مقایسه نمودند و مدل‌های متنوعی پیشنهاد دادند [۹]. نوردین^۸ و همکارانش ادعا کردند که پیکربندی مثلثی شکل می‌تواند عملکرد بهتری در تولید انرژی الکتریکی نسبت به پیکربندی دوزنقه‌ای و مستطیلی داشته باشد [۱۰]. ویلیام^۹ و پوپو این مطلب را افزوده‌اند که برای یک ماده پیزوالکتریک، اثر طول تیر پیزوالکتریک به شدت به ضخامت لایه پیزوالکتریک وابسته است. در حالی که برای جرم ثابت، طول کم و عرض زیاد، کاهش نسبت ضخامت لایه پیزوالکتریک به ضخامت کل، ترجیح دارد [۱۱]. روندی^{۱۰} و همکارانش یک روش تحلیلی جهت طراحی و بهینه‌سازی برداشت انرژی توسط مواد پیزوالکتریک با استفاده از تکنیک جرم و فنر معادل و استفاده از مدار الکتریکی معادل ارائه کردند [۱۲]. شوو^{۱۱} و همکاران نیز یک مدل تحلیلی برای برداشت کننده‌های پیزوالکتریک ارائه کردند. بررسی آن‌ها نشان

مورد استفاده در این مقاله ^{۱۴}COBYLA، ^{۱۳}BOBYQA جستجوی مختصات ^{۱۵} و نلدر _ مید ^{۱۶} است.

۲. تحلیل ارتعاشات آزاد تیر یکسر گیردار

در این مقاله، تیر یکسر گیردار اولر- برنولی با یک لایه پیزوالکتریک، به‌عنوان برداشت کننده انرژی در نظر گرفته شده است (شکل ۱). مدل ذکر شده از طریق الکترودهایی به یک مدار ساده متصل شده که فقط شامل یک مقاومت الکتریکی به‌عنوان مصرف کننده توان است. فرض شده که الکترودها تمام سطح لایه پیزوالکتریک را پوشانده و لایه پیزوالکتریک به‌طور کامل به سطح تیر چسبیده است. در این قسمت، روابطی برای دستیابی به فرکانس‌های طبیعی برای تیر مستطیلی شکل، دوزنقه‌ای و مثلثی آورده شده است. برای یک تیر یکنواخت و تحت ارتعاشات آزاد بدون میرایی، معادله حرکت مطابق رابطه ۱ است [۱۹].

$$EI \frac{\partial^4 z(x, t)}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 z(x, t)}{\partial t^2} = f_0(x, t) \quad (1)$$

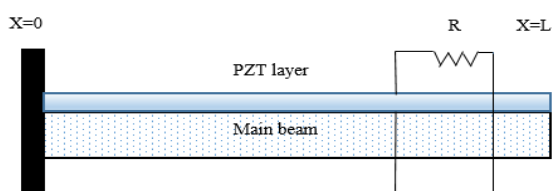
در رابطه ۱ ضریب EI ، بیانگر سختی خمشی تیر و m جرم واحد طول تیر است. z نیز نمایانگر جابجایی عرضی تیر در محل تار خنثی در مقطع دلخواهی از طول تیر است؛ که تابعی از مکان و زمان تیر بوده و ناشی از حرکت خمشی تیر است. مقدار جابجایی عرضی z نیز، مطابق رابطه ۲ بیان می‌شود.

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

در رابطه ۲، $z_b(x, t)$ جابجایی پایه تیر و $z_{rel}(x, t)$ جابجایی تیر نسبت به پایه آن است. $z_b(x, t)$ در حالت ارتعاشات آزاد چون تحریک پایه ندارد برابر صفر می‌باشد.

۲-۱. تخمین فرکانس‌های طبیعی برای تیر مستطیلی

تیر پیزوالکتریک مدنظر مطابق با شکل ۱ است.



شکل ۱. تیر برداشت کننده ارتعاشی با یک لایه پیزوالکتریک

با استفاده از آنالیز مودال، پاسخ ارتعاشات آزاد طبق رابطه ۳ به دست خواهد آمد.

داد که توان برداشت شده به مشخصه‌های ارتعاشی (نظیر فرکانس و دامنه شتاب) جرم برداشت کننده، مقاومت الکتریکی و ثابت الکترومکانیکی سیستم بستگی دارد [۱۳]. جهانی و همکاران به مطالعه برداشت انرژی از ارتعاشات تیر دوزنقه‌ای با یک لایه پیزوالکتریک با استفاده از روش پارامترهای توزیع شده پرداختند. در مطالعه‌ی آن‌ها معادلات حرکت سیستم به صورت تحلیلی به دست آمده و سپس با استفاده از روش مودهای فرضی، فرکانس‌های طبیعی سیستم محاسبه شده و نمودارهای مربوط به ولتاژ، جریان و توان ارائه گردید [۱۴]. کیانپور و همکاران برداشت انرژی الکتریکی از ارتعاشات پایه تیر یکسر گیردار را مورد مطالعه قرار دادند که ساختار سیستم برداشت کننده به صورت یک تیر سه لایه می‌باشد. و تاثیر پارامترهای هندسی را روی رفتار مکانیکی و الکتریکی سیستم مورد بررسی قرار دادند [۱۵]. آذری کام و همکاران یک تیر مستطیلی که از یک لایه پیزوالکتریک تشکیل شده است را ارائه دادند. به‌طوری‌که با تغییرات طول، عرض و نسبت ضخامت سعی در دستیابی به شکل بهینه تیر، جهت حداکثر کردن توان داشتند [۱۶]. پاشنا و همکاران یک تیر بایمورف با دو لایه پیزوالکتریک و یک لایه مرکزی از جنس آلومینیوم تحت فرکانس‌های مختلف توسط نرم‌افزار آباکوس برای دو حالت اتصال سری و موازی صفحات پیزوالکتریک مورد بررسی قرار دارند. نتایج نشان می‌دهند تیر بایمورف مورد نظر در حالت اتصال موازی ولتاژ خروجی بیشتری تولید می‌کند [۱۷]. پیرسون ^{۱۳} و همکاران بر روی سلامت سنجی سازه‌های هوافضایی کار کردند که اجرای سیستم سلامت سنجی سازه (SHM) در مرحله طراحی می‌تواند ساختارهای بهینه‌تری را فراهم کند که باعث کاهش وزن سازه، بهبود عملکرد هواپیما، مصرف سوخت کمتر و برد بیشتر خواهد شد، که مبدل‌های پیزوالکتریک و مبدل‌های حرارتی درون هواپیما به عنوان منابع تغذیه انرژی بکار گرفته شده‌اند [۱۸].

در این مقاله مطالعه‌ای که انجام شده، تأثیر پارامترهای هندسی بر پارامترهای الکتریکی برداشت کننده است. هندسه بهینه شده از یک منبع ارتعاش با فرکانس ۱۲۵ هرتز و شتابی با دامنه 0.2g بهره می‌برد. تابع هدف بهینه‌سازی توان و پارامترهای طرح مشخصات هندسی از جمله طول تیر، عرض تیر و ضخامت هر دولایه است. شبیه‌سازی اجزاء محدود و بهینه‌سازی توسط نرم‌افزار کامسول 5.2a صورت گرفته، الگوریتم‌های بهینه‌سازی

در رابطه ۱۱، n نسبت مدول یانگ تیر به مدول یانگ پیزوالکتریک است. با استفاده از روش آنالیز مودال و شرایط مرزی در رابطه ۷، معادله فرکانس به دست می‌آید [۱۹].

$$1 + \cos \lambda_n \cosh \lambda_n = 0 \quad (12)$$

در رابطه ۱۲، مقادیر λ_n برای یک تیر یکسر گیردار در جدول ۱ ذکر شده است. و همچنین معادله ۷ به صورت رابطه ۱۳ درمی‌آید:

$$w_n(x) = \sin\left(\frac{\lambda_n}{L}x\right) - \sinh\left(\frac{\lambda_n}{L}x\right) + \beta_n \left[\cos\left(\frac{\lambda_n}{L}x\right) - \cosh\left(\frac{\lambda_n}{L}x\right) \right] \quad (13)$$

در رابطه ۱۳، مقدار β_n از رابطه ۱۴ بدست می‌آید

$$\beta_n = \frac{-\cos \lambda_n - \cosh \lambda_n}{-\sin \lambda_n + \sinh \lambda_n} \quad (14)$$

رابطه ۱۳ شکل مود n ام تیر را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مقادیر ویژه تیر یکسر گیردار در مدهای مختلف

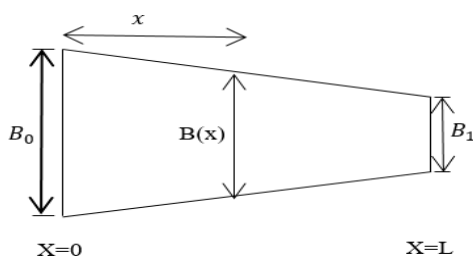
λ_n	شماره مود
۱/۸۷۵۱	۱
۴/۶۹۴۱	۲
۷/۸۵۴۷	۳
۱۰/۹۹۵۶	۴
۱۴/۱۳۷۱	۵

۲-۲. تخمین فرکانس‌های طبیعی برای تیر غیر مستطیلی

با فرض مود شکل‌های ثابت که مطابق رابطه ۱۳ به دست می‌آید و به کمک روش ریلی-ریتز [۱۰] می‌توان معادلات مربوط به فرکانس‌های طبیعی را برای حالتی که شکل تیر غیر مستطیلی است را توسعه داد. در این حالت، پهنای تیر تابعی از طول شده، و مطابق رابطه ۱۵ تعریف می‌شود.

$$B(x) = B_0 + \frac{B_1 - B_0}{L} x \quad (15)$$

در رابطه ۱۵، B_0 پهنای تیر در بخش متصل شده به دیوار بوده و B_1 پهنای تیر در بخش آزاد تیر است (شکل ۲).



شکل ۲. مشخصات هندسی تیر دوزنقه‌ای

$$z_{rel}(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} W_n(x) + q_n(t) \quad (3)$$

در رابطه ۳، $W_n(x)$ و $q_n(t)$ به ترتیب، شکل مودی و مختصات مودال در مود n ام می‌باشند [۱۹]. با جایگذاری رابطه ۳ در رابطه ۱ خواهیم داشت:

$$\frac{EI}{mW_n(x)} \frac{d^4 W_n(x)}{dx^4} = -\frac{1}{q_n(t)} \frac{d^2 q_n(t)}{dt^2} = \omega_n^2 \quad (4)$$

در رابطه ۴، ω_n^2 یک مقدار ثابت مثبت بوده که نشان دهنده پاسخ هارمونیک در تیر است.

جمله سمت چپ معادله ۴، مطابق رابطه ۵ ساده می‌شود.

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

که:

$$\lambda_n^4 = \frac{m}{EI} \omega_n^2 \quad (6)$$

با فرض $W_n(x) = Ce^{sx}$ که s و C ثابت هستند، جواب

معادله ۵ مطابق رابطه ۷ خواهد شد:

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

در رابطه ۷، C_1 تا C_4 ثوابتی هستند که بر اساس شرایط مرزی به دست می‌آیند.

فرکانس‌های طبیعی تیر در مود n ام، از رابطه ۶ و طبق رابطه

۸ به دست می‌آید:

$$\omega_n = \lambda_n^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad (8)$$

از آنجایی که تیر مورد نظر این تحقیق از دو ماده مختلف تشکیل شده است، جملات m و EI مطابق فرمول ۹ و ۱۰ قابل محاسبه خواهند بود [۸]:

$$m = B(\rho_b h_b + \rho_p h_p) \quad (9)$$

در رابطه ۹، B عرض تیر و ρ چگالی است که زیرنویس b به زیر ساختار تیر اشاره می‌کند درحالی‌که p نشان‌دهنده ماده پیزوالکتریک است.

$$EI = \frac{B}{3} [E_b(h^3 + (h_b - h)^3) + E_p((h - h_b)^3 + (h_b + h_p - h)^3)] \quad (10)$$

در رابطه ۱۰، h_b و h_p به ترتیب ضخامت تیر و ضخامت لایه پیزوالکتریک و همچنین E_b و E_p به ترتیب مدول یانگ تیر و مدول یانگ پیزوالکتریک است و پارامتر h نمایانگر تار خنثی است که از رابطه ۱۱ به دست می‌آید.

$$h = \frac{nh_b^2 + 2h_b h_p + h_p^2}{2nh_b + 2h_p} \quad (11)$$

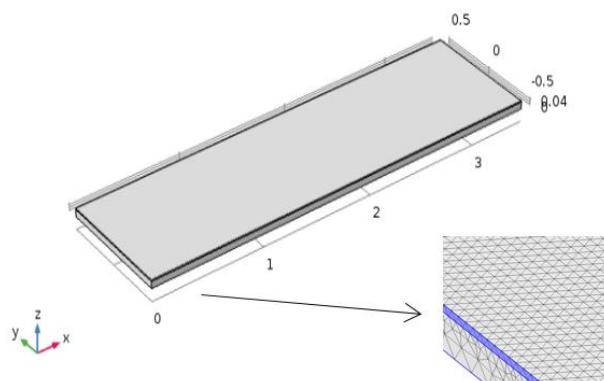
مش بندی دارای ۴ رئوس ۶ لبه با ۴ وجه مثلثی است. برای مطالعه اثر شکل تیر، نسبت پهنای دو انتهای تیر ($\frac{B_1}{B_0}$) در مطالعات لحاظ شده است شکل ۳. نسبت ۱ به معنی تیر مستطیلی، نسبت ۰/۵ به معنی تیر دوزنقه‌ای و نسبت ۰ به معنی تیر مثلثی است.

جدول ۲. خواص مکانیکی تیر مسی و لایه پیزوالکتریک برای مطالعات

شبهه سازی		ماده
چگالی	مدول یانگ	
[kg/m ³]	[N/m ²]	
۸۷۰۰	۱۱×۱۰ ^{۱۰}	تیر مسی
۷۸۰۰	۶۷×۱۰ ^{۱۰}	پیزوالکتریک (PZT-5h)

جدول ۳. پارامترهای هندسی مورد استفاده در سازه تیر

ماده	طول	عرض	ضخامت
	[m]	[m]	[m]
تیر مسی	۰/۰۳۵	۰/۰۱	۰/۰۰۰۵
پیزوالکتریک (PZT-5h)	۰/۰۳۵	۰/۰۱	۰/۰۰۰۱



شکل ۳. شبهه سازی اجزاء محدود تیر مستطیلی یکسر گیردار با یک لایه پیزوالکتریک

جدول ۴. فرکانس‌های طبیعی در سه مود مختلف برای چند شکل تیر

شماره مود	مستطیل			دوزنقه			مثلث		
	کامسول	مقاله حاضر	درصد خطا	کامسول	مقاله حاضر	درصد خطا	کامسول	مقاله حاضر	درصد خطا
۱	۲۶۸/۴۹	۲۶۷/۱۴	۰/۵	۳۲۷/۹۳	۳۲۸/۶۷	۰/۲۲	۵۴۱/۸۷	۵۴۵/۴۵	۰/۶۵
۲	۱۶۷۵/۸۶	۱۶۷۴/۱۵	۰/۱	۱۷۸۲/۶۷	۱۷۸۲/۹۳	۰/۰۱۴	۲۳۴۱/۱۵	۲۰۲۶/۲۵	۱۵/۵
۳	۴۷۰۱/۴۶	۴۶۸۷/۶۷	۰/۲۹	۴۷۹۲/۶۱	۴۷۸۹/۳۷	۰/۰۶۷	۵۶۸۲/۵۲	۴۹۹۹/۸۴	۱۳/۶

تیر یونیمورف با استفاده از اطلاعات جدول ۳ درون نرم‌افزار کامسول تحت تحلیل استاتیکی مدل سازی شده است. در انتهای

به‌طور کلی، انرژی جنبشی تیر مطابق رابطه ۱۶ به دست می‌آید

$$T = \int_0^L \frac{1}{2} (\rho_b h_b + \rho_p h_p) B(x) d(x) \left(\frac{\partial w_n(x, t)}{\partial t} \right)^2 dx \quad (16)$$

از طرفی میزان انرژی پتانسیل نیز، بر اساس رابطه ۱۷ محاسبه می‌شود:

$$U = \int_0^L \frac{1}{2} EI(x) \left(\frac{\partial^2 z(x, t)}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (17)$$

لذا بر اساس قانون بقای انرژی معادله فرکانس طبیعی برابر رابطه ۱۸ خواهد شد:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\left(\frac{\lambda_n}{L} \right)^4 \times EI \times \int_0^L B(x) [W_n(x)]^2 dx}{m \times \int_0^L B(x) [W_n(x)]^2 dx}} \quad (18)$$

در رابطه ۱۷ از مود شکل‌های فرضی برای تیر با عرض ثابت استفاده شده و این رابطه برای تیرهایی با عرض متغیر مانند تیر دوزنقه‌ای شکل و مثلثی شکل تقریبی است.

۳. صحت سنجی و مقایسه نتایج مختلف

برای بررسی صحت سنجی، نتایج تحلیل اجزای محدود با روابط عددی که از مرجع [۱۰] به دست آمده در مورد یک تیر مثلثی، دوزنقه‌ای و مستطیلی مورد مقایسه قرار گرفته است. خواص مکانیکی و پارامترهای هندسی این مطالعه به ترتیب در جدول ۲ و جدول ۳ ذکر شده است. نتایج تحلیل اجزای محدود و نتایج عددی در جدول ۴ ذکر شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود همخوانی خوبی بین نتایج وجود دارد. شکل ۳، شبهه‌سازی اجزاء محدود برای تیر مستطیلی یکسر گیردار را نمایش می‌دهد که در این شبهه‌سازی از مش بندی چهار ضلعی^{۱۷} استفاده شده این نوع

تیر مثلثی شکل از لحاظ تولید توان نسبت به تیر دوزنقه‌ای و مستطیلی شکل بهتر عمل می‌کند. برای نشان دادن این برتری

آزاد تیر یونیمورف یک بار قائم یکسان به مقدار ۵۰ نیوتون برای هر سه مدل به صورت لبه‌ای اعمال شده است. شکل ۴ توزیع کرنش حجمی را برای هر سه حالت تیر نشان می‌دهد و همان‌طور که مشخص است متوسط کرنش در حالت مثلثی از ابتدای تیر تا انتهای تیر تقریباً ثابت است و میانگین کرنش در تیر مثلثی دو برابر تیر مستطیلی است، این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که شکل تیر پیزوالکتریک در استیصال انرژی مؤثر است، اما در واقعیت تحت تحریک پایه ممکن است شکل مثلث بهینه نباشد.

۴. شبیه‌سازی اجزاء محدود

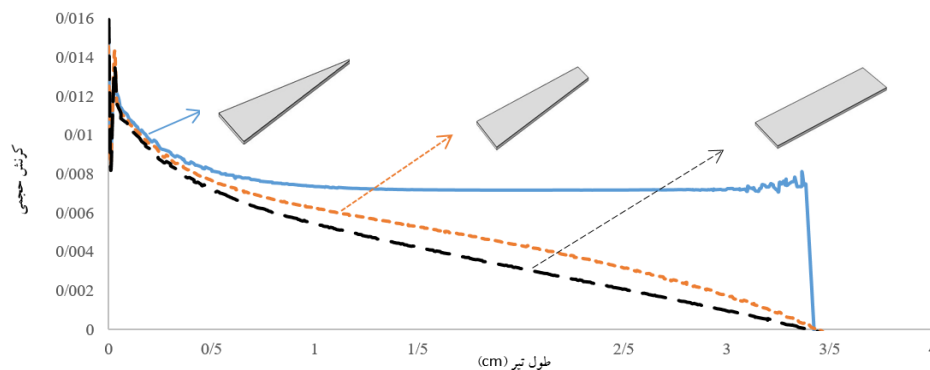
همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است، توزیع کرنش حجمی مثلث از دوزنقه و مستطیل بیشتر است، بنابراین ولتاژ بیشتری

تولید می‌کند چون ماده پیزوالکتریک بیشتر تحت کرنش قرار می‌گیرد. هدف در این مقاله دستیابی به حداکثر توان خروجی در سیستم برداشت انرژی است و هرگاه ولتاژ بیشتر شود طبق رابطه ۱۹ توان نیز افزایش می‌یابد، هندسه مورد نظر ترکیبی از شکل‌های مثلث و دوزنقه است. حال به این سیستم برداشت انرژی، شتابی با دامنه 0.2g و فرکانسی به اندازه ۱۲۵ هرتز به پایه تیر وارد می‌شود. در رابطه ۱۹، P توان الکتریکی، V اختلاف پتانسیل، I جریان الکتریکی و R مقاومت الکتریکی است.

$$P = VI$$

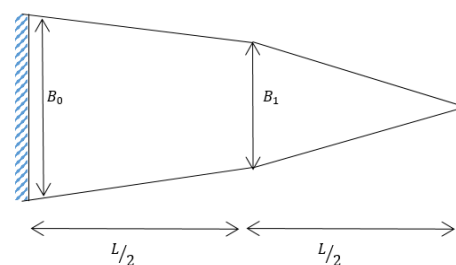
$$I = \frac{V}{R}$$

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (19)$$



شکل ۴. توزیع کرنش حجمی نسبت به طول تیر برای سه شکل مختلف تیر

شکل ۵ پلان سیستم برداشت انرژی را نشان می‌دهد، در شکل ۵ نسبت $(\frac{B_1}{B_0})$ همان مقدار a است، که در این مقاله فرض شده مقدار a از ۰/۰۵ تا ۱ تغییر می‌کند. پارامترهای هندسی این مطالعه در جدول ۵ و خواص مکانیکی در جدول ۲ ذکر شده است.



شکل ۵. سیستم برداشت انرژی در حالت دو بعدی

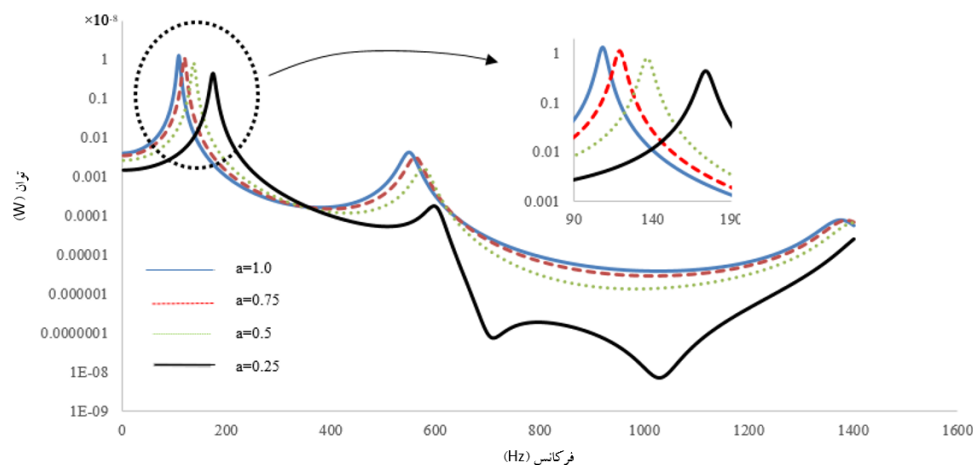
می‌کند اگر میرایی^{۱۸} نداشته باشد جواب به بی‌نهایت میل می‌کند وقتی جواب به بی‌نهایت برسد نرم‌افزار کامسول تا یک عدد بزرگ میل کرده و دیگر نمی‌تواند پاسخ را همگرا کند. که در این صورت تا یکجایی ادامه می‌یابد و بعد خطا می‌گیرد، پس باید حتماً میرایی را در نظر گرفت. برای لایه مسی و لایه پیزوالکتریک گزینه‌ای تحت عنوان میرایی وجود دارد که شامل چندین حالت می‌شود. روش میرایی رایلی^{۱۹}، میرایی ویسکوز^{۲۰}، ضریب اتلاف ایزوتروپیک^{۲۱} و ضریب اتلاف در حالت ناهمسانگرد^{۲۲} است. از این بین میرایی به روش ضریب اتلاف ایزوتروپیک انتخاب شده است. ضریب اتلاف ایزوتروپیک معمولاً به عنوان میرایی مواد، میرایی ساختاری و یا میرایی هیستریک شناخته می‌شود و در حوزه فرکانس اعمال می‌شود. این روش در نرم‌افزار کامسول شامل دو حالت است، حالت اول از خصوصیات ماده^{۲۳} استفاده می‌کند که چون تعامل فیزیک مکانیک و سیالات می‌باشد خیلی زمان‌بر

پس از شبیه‌سازی وقتی که پاسخ فرکانسی گرفته می‌شود زمانی که به فرکانس رزونانس رسیده دامنه به بی‌نهایت میل

با توجه به شکل ۵ وقتی نسبت $(\frac{B_1}{B_0})$ تغییر کند شکل تیر پیزوالکتریک دچار تغییر می‌شود، اگر نسبت $(\frac{B_1}{B_0})$ ۰/۵ شود دقیقاً شکل تیر به صورت مثلث می‌شود، شکل ۶ به خوبی نشان می‌دهد که مقدار $a=1$ توان بیشتری نسبت به حالت کاملاً مثلثی تولید می‌کند، پس می‌توان نتیجه گرفت شکلی که برای سیستم برداشت انرژی در این مقاله ارائه شده است مدل مناسبی برای دستیابی به حداکثر برداشت توان است.

جدول ۵. پارامترهای هندسی مورد استفاده در سازه تیر

ماده	طول [m]	عرض [m]	ضخامت [m]	A (B_1/B_0)
تیر مسی	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۰۰۰۵	{۰/۰۵:۱}
پیزوالکتریک	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۰۰۰۱	{۰/۰۵:۱}



شکل ۶. مقدار توان برای چهار مقدار متفاوت a

است. حالت دوم تعریف توسط کاربر^{۲۴} است. در این تحقیق حالت دوم برای هر دولایه یعنی تعریف توسط کاربر انتخاب شده است. نسبت میرایی به صورت رابطه ۲۰ است و مقدار η که در برنامه کامپول است معادل دو برابر نسبت میرایی است.

$$\zeta = \frac{C}{C_{cr}} \quad (19)$$

$$\eta = 2\zeta$$

$$2\zeta = \frac{c}{\sqrt{K \cdot M}}$$

در رابطه ۲۰، C میرایی و C_{cr} میرایی بحرانی است. K ضریب سختی و M جرم است. در نهایت مقدار η برای هر دولایه ۰/۰۶ در نظر گرفته شده است [۱۰]. مقدار مقاومت الکتریکی برای این شبیه‌سازی ۱ گیگا اهم است.

در نرم‌افزار کامپول بخش بهینه‌سازی چندین الگوریتم بهینه‌سازی وجود دارد، از بین چندین الگوریتم روش‌هایی انتخاب شده که غیر گرایانی است یعنی این روش‌ها بر پایه مقدار تابع هدف استوار هستند. از جمله این روش‌ها، می‌توان روش نلدرد، روش جستجوی مختصات، روش BOBYQA و روش COBYLA را نام برد. توضیحات مختصری از هر روش ارائه شده است.

۵-۱. روش نلدرد - مید

الگوریتم نلدرد - مید یا الگوریتم جستجوی ساده در سال ۱۹۶۵ توسط دو شخص به نام جان نلدرد و راجر مید منتشر شد، که همواره به‌عنوان یکی از بهترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای

۵. بهینه‌سازی سیستم برداشت انرژی

بهینه‌سازی یک فعالیت مهم و تعیین‌کننده در طراحی ساختاری است. طراحان زمانی قادر خواهند بود طرح‌های بهتری تولید کنند که بتوانند با روش‌های بهینه‌سازی در صرف زمان و هزینه طراحی صرفه جویی نمایند. هدف از بهینه‌سازی یافتن بهترین جواب قابل قبول، با توجه به محدودیت‌ها و نیازهای مسئله است. برای یک مسئله، ممکن است جواب‌های مختلفی موجود باشد که برای مقایسه آن‌ها و انتخاب جواب بهینه، تابعی به نام تابع هدف تعریف می‌شود. انتخاب این تابع به طبیعت مسئله وابسته است. به عنوان مثال، زمان سفر یا هزینه از جمله اهداف رایج بهینه‌سازی شبکه‌های حمل و نقل است. هدف از بهینه‌سازی تعیین متغیرهای طراحی است، به‌گونه‌ای که تابع هدف کمینه یا بیشینه شود.

توابع چندبعدي بدون مشتق شناخته می‌شود. این روش قیود خطی و مسائل خطی را حل می‌کند. روش نلدِر-مید یا روش سیمپلکس، یک روش عددی رایج در پیدا کردن کمینه یا بیشینه یک تابع هدف در فضای بهینه‌سازی چندبعدي است. این روش از مرتبه صفر بوده و بنابراین در مسائل بهینه‌سازی غیرخطی که در آن‌ها به دست آوردن مشتق تابع ناممکن یا مشکل باشد، قابل پیاده‌سازی است. با این وجود، روش نلدِر-مید یک روش ابتکاری است که می‌تواند به نقاط غیر ایستا همگرا شود [۲۰].

۲-۵. روش BOBYQA

اصطلاح BOBYQA مخفف بهینه‌سازی محدود توسط تقریب درجه دوم است. روش BOBYQA الگوریتم بهینه‌سازی عددی است که توسط مایکل جی دی پاول ابداع شده است. این الگوریتم روشی غیر گرادیانی است یعنی فقط به مقدار پایه تابع هدف وابسته است. این روش مسائل بهینه‌سازی محدود را بدون استفاده از مشتق تابع هدف حل می‌کند. ایده اصلی این روش بدین صورت است که به‌طور تکراری تابع هدف را با یک مدل درجه دوم که در منطقه پیرامون فعلی معتبر است و به اصطلاح منطقه اعتماد نام دارد تخمین می‌زند. به‌عنوان یک الگوریتم ریاضی عمومی می‌توان از آن برای تقریباً هر نوع مسائل بهینه‌سازی استفاده کرد. الگوریتم BOBYQA فقط به تعداد کمی از نقاط داده برای شروع بهینه‌سازی نیازمند است. این تعداد نقاط به تعداد پارامترهای طرح بستگی دارند [۲۱].

۳-۵. روش COBYLA

اصطلاح COBYLA یک علامت اختصاری برای بهینه‌سازی مقید با استفاده از تقریب خطی است. این روش، یک روش بهینه‌سازی عددی برای مسائل محدود است که در آن مشتق تابع هدف شناخته‌شده نیست و توسط پاول ابداع شده است. این روش تابع هدف و هر قیدی را توسط تقریبات خطی به‌روز می‌کند. تقریب‌ها بر اساس مقادیر عینی و محدود محاسبه شده و از یک‌شکل ساده تشکیل شده‌اند. هر تکرار مسئله برنامه‌ریزی خطی درون یک منطقه اعتماد حل می‌کند که شعاع آن با پیشرفت روش به سمت حالت بهینه کاهش می‌یابد. این روش، مسئله بهینه‌سازی را با مسائل برنامه‌ریزی خطی تقریب می‌زند. در طی یک تکرار، یک مسئله بهینه‌سازی به‌صورت تقریب خطی حل

می‌شود تا یک راه‌حل بهینه به دست آورد. راه‌حل با استفاده از تابع هدف اصلی و پارامترهای طراحی ارزیابی می‌شود و یک نقطه داده جدید در فضای بهینه‌سازی ارائه می‌دهد. این اطلاعات برای بهبود مسئله برنامه‌ریزی خطی که برای تکرار بعدی الگوریتم به کار می‌رود استفاده می‌شود. هنگامی که دیگر راه‌حل نمی‌تواند بهبود یابد، اندازه گام را کاهش می‌دهد، و جستجو را متوقف می‌کند. وقتی اندازه مرحله به‌اندازه کافی کوچک شود، الگوریتم متوقف می‌شود [۲۲].

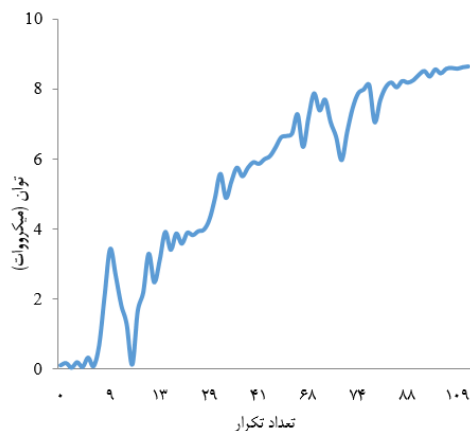
۴-۵. روش جستجوی مختصات

روش جستجوی مختصات، به‌عنوان جستجوگر قطب‌نما نیز شناخته می‌شود، که متعلق به دسته‌ای از الگوریتم‌های مشتق آزاد است که در ادبیات به نام روش‌های جستجوی مجموعه‌ای شناخته می‌شود. این روش تابع هدف در امتداد یک مجموعه مناسب جهات جستجو می‌کند و در یک فاصله معین که به پارامتر xk وابسته به اندازه یک گام Δ^k نمونه‌برداری می‌کند. روش جستجوی مختصات باهدف بهبود عملکرد تابع هدف در امتداد جهات مختصات و کنترل فضای پارامتری است. به‌طوری‌که طول گام‌ها را کاهش می‌دهد و یا مقادیر تابع هدف را افزایش می‌دهد. روش جستجوی مختصات به‌طور مستقیم شیب تابع هدف را ارزیابی نمی‌کند. گرادیان برای هر نوع پارامتر در دسترس نیست و یا ممکن است در شرایط خاص ریاضی دقیق نباشد. با این حال هنگامی که حل‌کننده اطلاعات کافی در اطراف نقطه جستجوی فعلی جمع‌آوری کرده، یک تخمین از شیب ایجاد می‌کند و یک جستجوی خطی در امتداد این جهت قبل از ارزیابی جدید در راستای جهات مختصات انجام می‌دهد [۲۳].

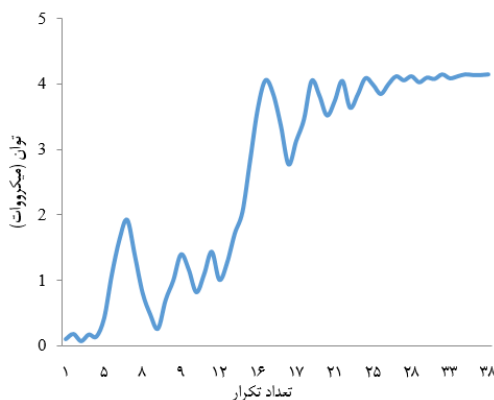
۵-۵. بهینه‌سازی تیر پیزوالکتریک

با استفاده از اطلاعات مندرج در جدول ۵ مدل در نرم‌افزار کامسول مدل‌سازی شده است. به طوری که باید مدول یانگ تیر مسی را ۱۱۰ گیگا پاسکال و مدول یانگ تیر پیزوالکتریک را ۶۷ گیگا پاسکال در نظر گرفت. در این مدل‌سازی ابتدای تیر گیردار و انتهای تیر آزاد است و در فرکانس ۱۲۵ هرتز شتابی با دامنه 0.2g به کل تیر وارد می‌شود. حال باید وارد بخش بهینه‌سازی نرم‌افزار شد در مرحله اول باید روش بهینه‌سازی انتخاب گردد سپس باید تابع هدف مشخص شود که در این مقاله تابع هدف بیشینه کردن

در اشکال زیر مشخص است. شکل ۸ تا ۱۱ به ترتیب نتیجه بهینه‌سازی چندین پارامتر طراحی توسط روش BOBYQA، COBYLA، نلدر-مید و جستجوی مختصات را نشان می‌دهد. تعداد حداکثر تکراری که در بخش بهینه‌سازی نرم‌افزار در نظر گرفته شده ۱۰۰۰ می‌باشد. معیار همگرایی برای تمامی روش‌ها یکی بوده است. با توجه به شکل‌های ۸ تا ۱۱ مقدار تابع هدف (توان) در روش BOBYQA نسبت به دیگر روش‌ها بیشتر است که از مزیت‌های این روش محسوب می‌شود. با توجه به جدول ۷ دو روش BOBYQA و جستجوی مختصات تقریباً به یک عدد همگرا می‌شوند و دو روش دیگر درون یک نقطه حداقل محلی گیر افتاده‌اند و با گذشت بیش از این تعداد تکرار به عدد دیگری همگرا نمی‌شوند. جدول ۷ برای هر روش بهینه‌سازی مقادیر اولیه، متغیرهای طراحی و مقدار پارامترهای طراحی که تابع هدف در آن حداکثر می‌باشد را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۸ می‌توان دریافت که روش بهینه‌سازی BOBYQA نسبت به دیگر روش‌ها جواب بهینه‌تر با هزینه محاسباتی کمتری ارائه می‌نماید.



شکل ۸. بهینه‌سازی برای چندین پارامتر طراحی توسط روش BOBYQA

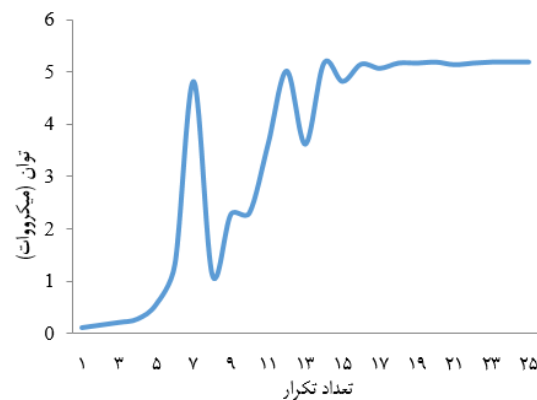


شکل ۹. بهینه‌سازی برای چندین پارامتر طراحی توسط روش COBYLA

مقدار توان در فرکانس مدنظر است. برای حداکثر کردن مقدار توان باید شکل مناسبی را طراحی کرد به طوری که هر یک از پارامترهای طول، عرض، ضخامت لایه مسی و ضخامت لایه پیزوالکتریک روی حداکثر کردن مقدار توان تاثیر دارند و این موارد متغیرهای طراحی می‌باشند که در جدول ۶ نمایش اندیسی و بازه تعریف آن‌ها مشخص شده است. قبل از این که تمام متغیرهای طراحی بررسی شود، تمامی موارد به جز متغیر a ثابت فرض شده است و توسط روش نلدر-مید نرم‌افزار شروع به بهینه‌سازی می‌کند و پس از گذشت مدت زمان اندکی به یک سری داده می‌رسد. برای مقدار $a=0/4$ مقدار توان $7-10 \times 1/15$ و برای $a=0/71219$ مقدار توان یا همان تابع هدف $6-10 \times 1/17$ است.

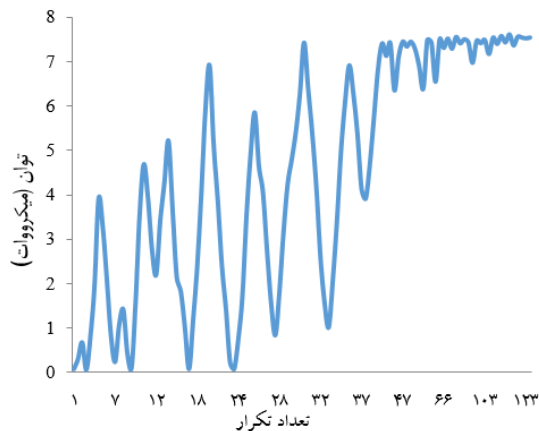
جدول ۶. متغیرهای طراحی و بازه تعریف آن‌ها

مقدار	متغیر طراحی
$0/065 \leq L \leq 0/075$	طول تیر [m]
$0/00025 \leq hb \leq 0/00075$	ضخامت لایه مسی [m]
$0/00005 \leq hp \leq 0/00015$	ضخامت لایه پیزوالکتریک [m]
$0/1 \leq a \leq 1$	(B_1/B_0)



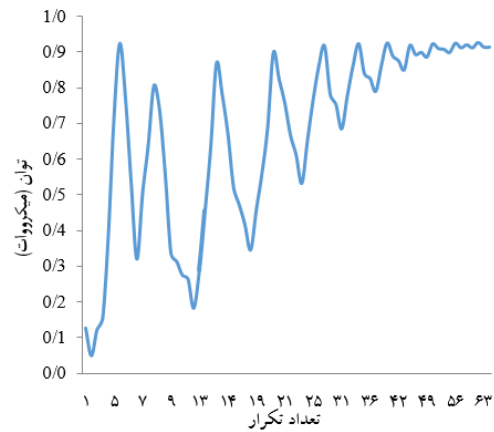
شکل ۷. مقادیر متفاوت توان توسط متغیر طراحی a به ازای چندین تکرار

همان‌طور که از شکل ۷ مشخص است از تکرار، ۱۷ تا ۲۵ جواب به یک مقدار همگرا می‌شود. در حالت $a=0/4$ تابع هدف کمترین مقدار است و منطقی است چراکه فرکانس تحریک پایه ۱۲۵ هرتز است و روش نلدر-مید پارامتر a را به طوری جستجو می‌کند که به فرکانس تحریک پایه نزدیک باشد. در قسمت بعد تمامی پارامترهای طراحی متغیر فرض شده و بهینه‌سازی را توسط چهار روش BOBYQA، COBYLA، جستجوی مختصات و نلدر-مید انجام می‌دهیم. که نتایج این بهینه‌سازی



شکل ۱۱. بهینه‌سازی برای چندین پارامتر طراحی توسط روش

Coordinate Search



شکل ۱۰. بهینه‌سازی برای چندین پارامتر طراحی توسط روش

Nelder_Mead

جدول ۷. مقادیر متفاوت توان به ازای چندین روش بهینه‌سازی

روش Coordinate Search	روش Nelder_Mead	روش COBYLA	روش BOBYQA	مقادیر اولیه	پارامترهای طراحی و تابع هدف
۰/۶۱۲۴۸	۰/۴۱۵	۰/۴۲۹۶۶	۰/۷۵۹۵۹	۰/۴	a
۰/۰۷۴۳۹۹	۰/۰۶۹۲۵	۰/۰۷۱۳۸۲	۰/۰۷۵	۰/۰۷	L [m]
۵/۰×۱۰-۴	۴/۲۵×۱۰-۴	۴/۲۵×۱۰-۴	۵/۶۲×۱۰-۴	۵/۰×۱۰-۴	hb [m]
۱/۵×۱۰-۴	۰/۹۲۵×۱۰-۴	۱/۰۱×۱۰-۴	۱/۵×۱۰-۴	۱/۰×۱۰-۴	hp [m]
۷/۵۷×۱۰-۶	۰/۸۳۶×۱۰-۶	۴/۱۷×۱۰-۶	۸/۶۵×۱۰-۶	۰/۱۱۵×۱۰-۶	Power

جدول ۸. هزینه محاسباتی چندین روش بهینه‌سازی

روش Coordinate Search	روش Nelder_Mead	روش COBYLA	روش BOBYQA	هزینه محاسباتی
۴۵۶ دقیقه	۱۹۲ دقیقه	۱۵۴ دقیقه	۱۶۴ دقیقه	

۶. نتیجه‌گیری

میزان استیصال انرژی خواهد داشت. نتایج حاصل شده از این نوع تحلیل قابل تعمیم به حالت تحریک پایه نمی‌باشد. چرا که در حالت تحریک پایه بار وارد شده به سیستم از نوع متمرکز در انتهای آزاد نمی‌باشد.

هدف اصلی در این تحقیق دستیابی به یک شکل بهینه‌تر نسبت به شکل مثلثی می‌باشد. برای این منظور هندسه جدیدی متشکل از ترکیبی از یک دوزنقه و مثلث ارائه شده است. سپس با استفاده از چندین روش بهینه‌سازی، مطالعه پارامتریک بر روی سیستم برداشت انرژی انجام گرفته است. پارامترهای مورد بررسی شامل طول تیر، ضخامت‌های لایه پیزوالکتریک و لایه مسی، عرض دوزنقه و نسبت عرض مثلث به دوزنقه (پارامتر a) در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی از نرم افزار کامسول استفاده شده است. تابع هدف بهینه‌سازی میزان توان استیصال شده قرار

در این مقاله، محاسبات تحلیلی بر اساس روش پارامترهای توزیع شده برای استخراج مقدار فرکانس تشدید برای تیر یکسر گیردار با یک لایه پیزوالکتریک انجام شد که یکی از بهترین و ساده‌ترین سازه‌های موجود جهت استفاده در سیستم‌های برداشت کننده انرژی است. معادلات بر اساس تیر اویلر - برنولی به دست آمدند و بر این اساس فرکانس‌های طبیعی سیستم محاسبه گردیدند. نتایج حاصل از این معادلات و نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود تا حد زیادی بر هم منطبق بودند و می‌توان از این روابط برای طراحی این‌گونه برداشت کننده‌ها استفاده کرد.

نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود تحت یک بار استاتیکی در انتهای آزاد چند تیر با شکل‌های متعارف مستطیلی، دوزنقه و مثلثی نشان می‌دهد که شکل تیر پیزوالکتریک نقش بسزایی در

فرکانس مد نظر قرار گرفته در این تحقیق (۱۲۵ هرتز) ترکیبی از مثلث با دوزنقه با نسبت پهنای حدود ۰/۷۵ می‌باشد.

داده شده است. چهار روش مختلف بهینه سازی: BOBYQA, COBYLA, نلدر-مید و جستجوی مختصات که همگی مرتبه صفر هستند، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. شکل بهینه برای

۵. مأخذ

- [1] S. Priya & D. J. Inman, Energy Harvesting Technologies, Springer Science, 2009.
- [2] Williams, C.B. and Yates, R.B., Analysis of a Micro-electric Generator for Microsystems, Sensors and Actuators A, 52, pp. 8-11, 1996.
- [3] Rupesh Patel, Modeling, Analysis and optimization of cantilever piezoelectric energy harvesters, The University of Nottingham, 2012.
- [4] IEEE Standard on piezoelectricity, ANSI/IEEE Std 176-1987, pp. 0-1, 1988.
- [5] Ebrahimi F (2013) piezoelectric materials and devices: applications in engineering and medical sciences. CRC Press.
- [6] Umeda, M. Nakamura, K., "Analysis of the Transformation of Mechanical Impact Energy to Electric Energy Using Piezoelectric Vibrator", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 35, No. 5S, pp. 3267, 1996.
- [7] J. Ajitsaria, S. Y. Choe, Modeling and analysis of a bimorph piezoelectric cantilever beam for voltage generation, Smart Materials and Structures, Vol. 16, No. 2, pp. 447, 2007.
- [8] A. Erturk, D. J. Inman, An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations, Smart Materials and Structures, Vol. 18, No. 2, pp. 025009, 2009.
- [9] A. Erturk, D. J. Inman, On Mechanical Modeling of Cantilevered Piezoelectric Vibration Energy Harvesters, Journal of intelligent Material Systems and Structures, Vol. 19, No. 11, pp. 1311-1325, 2008.
- [10] N.H. Diyana Nordin, Asan G.A. Muthalif, Optimal Piezoelectric Beam Shape for single and broadband vibration energy harvesting, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 14, No. 12, pp. 417-426, 2015.
- [11] Patel R, McWilliam S, Popov A (2011) a geometric parameter study of piezoelectric coverage on a rectangular cantilever energy harvester. Smart Material and Structure 20(8): 085004.
- [12] Roundy S., Wright P. K, a piezoelectric vibration based generator for wireless electronics, Smart Material and Structure, Vol. 13, pp. 1131-1142, 2004.
- [13] Shu Y. C., Lien I. C., Analysis of power output for piezoelectric energy harvesting system, Smart Material and Structure, Vol. 15, pp. 1499-1512, 2006.
- [14] K. Jahani, M. Asgharzadeh, Energy Harvesting Investigation From Unimorph Trapezoidal Beam Vibrations Using Distributed Parameters Method, journal mechanic modares, Vol. 14, No. 2, pp. 96-102, 2014.
- [15] A. Kianpoor, K. Jahani, Investigating the Effects of Geometrical Parameters on the Performance of Piezoelectric Energy Harvesters Under Harmonic base Vibration Using Analytical, Magazine Engineering Mechanics, Vol. 75, No. 66, pp. 111-123, 2015.
- [16] F. Azarikam, M. Sadr, Energy Harvesting System from Environmental Vibrations with Piezoelectric Materials, 16th conference International Association of Aerospace Iran.
- [17] M. Pashna, M. Farrokh, S. Irani, A comparison between finite element and separation of variables method in investigating frequency behavior of Bimorph piezoelectric beam, 16th conference International Association of Aerospace Iran.
- [18] M R Pearson, M J Eaton, R Pullin "Energy Harvesting for Aerospace Structural Health Monitoring Systems. Journal of Physics: Conference Series 382 Jul 2012.
- [19] Rao SS (2007) Vibration of continuous systems. John Wiley & Sons.
- [20] Rios LM, Sahinidis NV, "Derivative-free optimization: a review of algorithms and comparison of software implementations. Journal of Global Optimization" Vol. 56, No. 3, pp. 1247-93. Jul 2013.
- [21] Optimization module user's guide, www.comsol.com/patents, 2018.
- [22] Powell, M. J. D. (June 2009). Least Frobenius norm Updating of quadratic models that satisfy interpolation conditions, Mathematical Programming Springer. 183-215.
- [23] WH. Teukolsky, SA. Vetterling, WT. Flannery, (2007). Section 10.5. Downhill Simplex Method in Multi Dimensions, Computing (3rd ed). New York. Cambridge University Press.

پی‌نوشت

¹ . Energy Harvesting
² . Unmanned Aerial Vehicles

-
- 3 . Williams & Yates
 - 4 . Rupesh Patel
 - 5 . Umeda
 - 6 . Ajitsaria
 - 7 . Erturk
 - 8 . Diyana Nordin
 - 9 . Mc William & Popov
 - 10 . Roundy
 - 11 . Shu
 - 12 . Pearson
 - 13 . Bound Optimization By Quadratic Approximation
 - 14 . Constrained Optimization By Linear Approximation
 - 15 . Coordinate Search
 - 16 . Nelder – Mead
 - 17 . Free Tetrahedral
 - 18 . Damping
 - 19 . Rayleigh Damping
 - 20 . Viscous Damping
 - 21 . Isotropic Loss Factor
 - 22 . Anisotropic Loss Factor
 - 23 . From Material
 - 24 . User Defined