

DOR:

## تحلیل حساسیت توان خروجی ژنراتور ارتعاشی پیزوالکتریکی با ولتاژ ثابت به روش VBSA و PAWN

افراسیاب چشم‌آور<sup>۱</sup>، امیر باقری<sup>۲\*</sup> و علی اسماعیلی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دکتری، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

<sup>۲</sup>دانشجوی دکتری هوافضا، هسته آیرودینامیک و انتقال حرارت وسایل پرنده، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

<sup>۳</sup>استادیار، هسته آیرودینامیک و انتقال حرارت وسایل پرنده، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۰۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۸

### چکیده

با توجه به لزوم تأمین توان موردنیاز گره‌های شبکه‌های حسگر بی‌سیم و مشکلات متعددی که برای تعویض منبع انرژی این گره‌ها وجود دارد، نیاز به گره‌هایی است که بتوانند انرژی خود را تأمین کنند. در بالگردها و هواپیماها، حسگرهای زیادی برای ثبت اطلاعات نقاط مختلف سامانه وجود دارد که با توجه به وجود منابع ارتعاشی در این وسایل، تأمین توان گره‌های شبکه حسگر از منابع ارتعاشی روش مناسبی برای جایگزینی باتری است. در این مقاله یک ژنراتور پیزوالکتریکی به گونه‌ای طراحی شد که توانایی توان مصرفی یک گره متشکل از حسگرهای بی‌سیم را داشته باشد؛ همچنین به منظور طراحی بهینه، تحلیل حساسیت توان خروجی آن تیر پیزوالکتریکی در ولتاژ ثابت ارائه شده است. با توجه به لزوم تأمین توان گره مورد نیاز در ولتاژ ثابت و تأثیر عدم قطعیت‌ها بر توان خروجی، با استفاده از دو روش VBSA و PAWN، میزان حساسیت پارامترهای هندسی نظیر طول، عرض و ضخامت لایه‌های مختلف تیر پیزوالکتریک بر توان خروجی به عنوان تابع هدف سنجیده می‌شود و نتایج با یکدیگر مقایسه می‌شوند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد، ژنراتور طراحی شده توانایی تأمین توان موردنیاز گره در ولتاژ ثابت را دارد و طول پیزوالکتریک و تیر بیشترین تأثیر و ضخامت تیر کمترین تأثیر را بر توان خروجی داراست.

**کلمات کلیدی:** ژنراتور پیزوالکتریکی؛ تحلیل حساسیت؛ شاخص حساسیت؛ برداشت انرژی؛ برداشت انرژی ارتعاشی.

## Sensitivity Analysis of Power Output from Piezoelectric Vibration Constant-Voltage Generator using VBSA and PAWN Method

A. Cheshmavar<sup>1</sup>, A. Bagheri<sup>2,\*</sup>, A. Esmacili<sup>3</sup>

<sup>1</sup> PhD, Mech. Eng., Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran.

<sup>2</sup> PhD, Stu. Aerosp. Eng., Aero. Heat. Transf. of Flying Vehicles Res. Cent., Fac. of Eng., Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

<sup>3</sup> Assist. Prof. of Mech. Eng., Aero. Heat. Transf. of Flying Vehicles Res. Cent., Fac. of Eng., Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

### Abstract

Based on the power required for nodes in wireless sensor networks and numerous issues in power resource changing in these nodes, this is essential to have nodes that can harvest their energy themselves. There are many sensors in helicopters and airplanes to record data from different parts of the system so that supply the power required by these sensor network nodes by the available mechanical vibration can be an alternative for batteries. In this paper, a piezoelectric harvester is designed to support the amount of electrical power needed for wireless nodes. In order to optimize the design, sensitivity analysis of the power output from the piezoelectric beam in constant voltage is presented. Due to the necessity of providing the amount of power for wireless nodes in constant voltage and the effects of uncertainties on the power output, two sensitivity analysis methods, the sensitivity factors of geometry parameters such as length, width, thickness of substrate and piezoelectric layers on the power as objective function are assessed by two methods, VBSA and PAWN, and the both results are compared. The comparing results demonstrate that the designed harvester can provide the required power for nodes in constant voltage and the length of substrate and piezoelectric have significant improvement on the output power, while the thickness of the sub layer has a minor effect.

**Keywords:** Piezoelectric Generator; Sensitivity Analysis; Sensitivity Index; Vibration Energy Harvesting.

## ۱- مقدمه

دستیابی به میزان بارهای عملیاتی بر اجزای چرخشی بالگرد برای نگهداری و تعمیرات مبتنی بر پایش وضعیت<sup>۱</sup> (CBM)، سامانه‌های نظارت بر کارکرد و سلامت سامانه<sup>۲</sup> (HUMS) بسیار مهم است. توسعه فناوری و گسترش تکنولوژی‌های بی‌سیم، سبب پیشرفت این سامانه‌ها و کارایی بیشتر آن‌ها شد، اما مشکل تعمیر و نگهداری باتری در این حسگرها<sup>۳</sup> مانع بزرگی در استفاده از این سامانه‌ها محسوب می‌شود [۱]. از طرف دیگر، با توجه به عدم قطعیت‌هایی که با منابع مختلف در خروجی‌ها وجود دارد، نیاز به درک صحیحی از تأثیر هر ورودی در خروجی مدل احساس می‌شود. بدین ترتیب می‌توان دریافت که برای تأمین توان سامانه، کدام یک از ورودی‌ها تأثیر بیشتری دارند و در فرآیند کنترل کیفیت و ساخت باید توجه بیشتری به آن‌ها شود و کدام ورودی‌ها نیاز به بازه تلورانس‌ی بازتر و بالطبع توجه کمتری دارند.

به این منظور، از شبکه حسگر بی‌سیم برای اندازه‌گیری گروهی برخی از کمیت‌های فیزیکی یا شرایط محیطی مانند دما، صدا، لرزش، فشار، حرکت یا آلاینده‌ها در مکان‌های مختلف یک محدوده استفاده می‌شود. در این حالت، علاوه بر یک یا چند حسگر، هر گره از شبکه معمولاً نیازمند به یک فرستنده و گیرنده رادیویی (یا هر وسیله مخابراتی بی‌سیم دیگر)، یک میکروکنترلر کوچک و یک منبع انرژی (معمولاً یک باتری) است. اندازه یک گره حسگر بسته به اندازه بسته‌بندی آن تغییر کرده و تا یک‌دانه شن می‌تواند کوچک باشد و بدین ترتیب قطعات این گره باید در ابعاد میکروسکوپی ساخته شود [۲]. از آنجایی که این حسگرها معمولاً در مناطق خطرناک (ناحیه در تیررس دشمن یا محیط آلوده) یا مناطق دور از دسترس قرار دارند یا به علت تعداد زیاد و گستردگی در محیط، تعویض یا شارژ مجدد منبع تغذیه آن‌ها (نظیر باتری) به‌سختی صورت پذیرد، لذا نیاز است که گره‌ها کارآمد باشند و وظایف خود را برای چندین ماه یا حتی سال‌ها انجام دهند [۳]. این الزامات وابستگی افزایش طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم را به

افزایش طول عمر گره‌های حسگر نشان می‌دهد و این مهم با استفاده از فن‌های مختلف به حداقل رساندن انرژی و یا ارائه مکانیسم‌های برداشت انرژی برای گره‌های حسگر حاصل می‌شود. بدین ترتیب در کنار تکنیک‌های کاهش مصرف گره‌ها، روش‌های برداشت انرژی و تأمین توان مصرفی برای کارکرد گره، از اهمیت زیادی برخوردار است [۳]؛ لذا حسگرهای نسل آینده معرفی شدند که نیازی به باتری نداشته و اغلب با استفاده از پیزوالکتریک انرژی ناشی از تغییرات کرنش‌ها را به انرژی الکتریکی تبدیل و ذخیره کرده و از این انرژی برای اندازه‌گیری، ضبط و انتقال اطلاعات ناشی از کرنش‌ها و بارها استفاده می‌کنند. با از بین بردن موانع نظارت بر اجزای چرخشی بالگرد، این فناوری به‌طور چشمگیری توانایی‌های آینده HUMS را بهبود می‌بخشد.

به منظور تأمین انرژی از طریق پیزوالکتریک‌ها، در ابتدا لازم است که منابع مختلف برداشت انرژی در هواپیماها و بالگردهای مدرن مورد ارزیابی قرار گیرند. این منابع شامل اختلاف‌های دما، تغییرات دما، ارتعاشات، کرنش‌ها، نور محیط اطراف، تغییرات فشار، تغییرات الکترواستاتیک و... است. باین‌حال نمی‌توان از همه این منابع انرژی کافی برای کارکرد حسگرها برداشت کرد. بدین ترتیب سنجش مقدار انرژی برداشت‌شده نسبت به تجهیزات و هزینه‌ی بکار رفته [۴] و قابلیت اطمینان وسایل برداشت‌کننده انرژی [۵] می‌تواند در انتخاب منبع انرژی کمک شایانی بنماید. از بین منابع در دسترس حول هواپیماها و بالگردها، تنها منابع ارتعاشی و دمایی توانایی برآورده کردن محدودیت‌های برداشت انرژی را دارند.

در هواپیماها و بالگردها، منابع ارتعاش درونی و بیرونی زیادی وجود دارند. اگرچه در حال حاضر اکثر هواپیماهای تجاری از موتورهای جت استفاده می‌کنند، اما حتی آخرین و پیشرفته‌ترین فناوری‌های طراحی، قادر به مقابله با چالش قدیمی صدا و لرزش نیستند، به‌طوری‌که در شکل ۱ نشان داده شده شدت و مکان ارتعاشات در هواپیما و بالگرد همچنان

مقادیر بالایی دارند. در بالگردها و هواپیماهای ملخی<sup>۴</sup>، ارتعاشات با فرکانس‌های مختلف وجود دارد که وابسته به سرعت روتور و

<sup>1</sup> Condition Based Maintenance

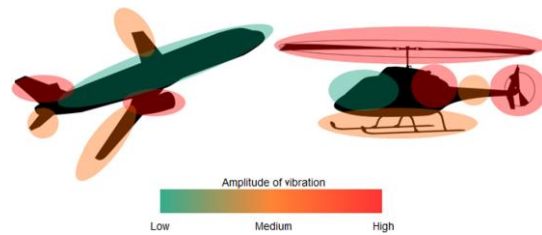
<sup>2</sup> Health Usage Monitoring Systems

<sup>3</sup> Sensors

<sup>4</sup> Propeller-driven aircraft

## ۲- معرفی ژنراتور پیزو الکتریکی

هنگامی که از برداشت کننده‌های پیزوالکتریکی صحبت می‌شود، معمولاً دو نوع پیکربندی مدنظر قرار می‌گیرد. در نوع اول پیزوالکتریک مستقیماً به سازه متصل می‌شود و تنش و کرنش‌های سازه میزبان بر آن اثر می‌گذارد [۹]. نوع دوم از یک سامانه مکانیکی واسطه استفاده می‌شود که امکان عمل ساده‌تر را فراهم می‌کند، اما نیاز به تنظیم دقیق فرکانس رزونانس دارد تا آن را با یکی از مودهای اصلی سازه میزبان سازگار کند. در هر دو پیکربندی، سامانه در حالت مودهای دینامیکی عمل می‌کند تا شرایط را برای برداشت میزان قابل‌توجهی از انرژی مکانیکی مستعد کند [۱۰]. در حالت اتصال یا کوپلینگ مستقیم، انرژی فراهم‌شده توسط نیروی ورودی برای اولین بار به‌وسیله سازه میزبان به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود، سپس توسط پیزوالکتریک این انرژی به انرژی الکترواستاتیک تبدیل می‌شود. مزیت اصلی در این حالت استفاده از گستره وسیع‌تری از باند ارتعاشی برای سامانه‌هایی است که گستره فرکانس ارتعاشی وسیع‌تری دارند. در مدل‌سازی و طراحی برداشت کننده‌های پیزوالکتریکی، پیکربندی متفاوتی در نظر گرفته می‌شود. در بین این مدل‌ها، مدل تیر یکسر درگیر جذابیت بسیاری دارد و بیشتر محققان از این مدل به عنوان برداشت کننده انرژی ارتعاشی استفاده می‌کنند [۱۱، ۱۲]. در بعضی از این پیکربندی‌ها از یک جرم متمرکز در نوک تیر برای افزایش فرکانس‌های اصلی ارتعاشی تیر استفاده می‌شود. در بین مدل‌های ارائه‌شده، کارهای مربوط به ارتورک در منابع [۱۳-۱۵] بسیار معتبر بوده و مورد استفاده بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. در این مراجع از روش پارامترهای توزیع‌شده برای مدل‌سازی برداشت کننده انرژی استفاده می‌شود و معادلات به‌صورت کوپل<sup>۲</sup> و دی کوپل<sup>۳</sup> حل می‌شوند. در قدم بعدی نیاز به یک مدار الکتریکی برای تحویل این توان به مصرف‌کننده می‌باشد. مدارهای زیادی برای تحویل توان برداشتی به مصرف‌کننده معرفی شده‌اند. این مدارها جریان متناوب<sup>۴</sup> (AC) را به جریان مستقیم<sup>۵</sup> تبدیل می‌کنند. در



شکل ۱- شماتیک مکان ارتعاشات مکانیکی در بالگرد و

هواپیما [۸]

میزان فرکانس عبوری جریان از پره‌ها<sup>۱</sup> است. سرعت روتور در بالگردها باعث ارتعاشات نسبتاً کم در حد ۱۰ هرتز می‌شود؛ از طرفی فرکانس ارتعاش ناشی از عبور جریان از پره‌ها مربوط به بالگردها با سه یا چهار پره کمتر از ۴۰ هرتز اتفاق می‌افتد. هواپیماهای ملخی فرکانس روتور بیشتری دارند؛ برای مثال در E-2C Hawkeye دارای سرعت روتور ۱۸/۴ هرتز است. با چهار پره، فرکانس عبور جریان می‌تواند چهار برابر سرعت روتور باشد [۶]؛ به‌طوری‌که اسمیت و همکاران شتاب  $0.8 \text{ m/s}^2$  در فرکانس  $73/6$  هرتز را برای صندلی افسر پرواز در یک هواپیما E-2Hawkeye اندازه‌گیری کردند [۷]؛ همچنین دیکسون [۶] شتاب  $3.5g$  در فرکانس ۸۰ هرتز در جعبه‌دنده بالگرد AH-64 را اندازه‌گیری کرد. این میزان از شتاب را می‌توان به عنوان یک منبع انرژی مناسب دانست که توانایی تأمین انرژی برای گره‌ها و حسگرهای بی‌سیم را دارد. به همین دلیل در تحقیق پیشرو، یک ژنراتور پیزوالکتریکی مورد طراحی قرار می‌گیرد؛ به‌طوری‌که با توجه به ارتعاشات دریافتی، بتواند انرژی مورد نیاز شبکه حسگر را تأمین نماید. از آنجایی که بازده این ژنراتور می‌بایستی حداکثر باشد و بتواند به طور کامل میزان انرژی مورد نیاز برای یک گره نظیر IMote2 تأمین نماید، از آنالیز حساسیت استفاده می‌شود تا میزان اثرگذاری پارامترهای مختلف نظیر طول تیر، ضخامت لایه غیرفعال، ضخامت پیزوالکتریک و عرض تیر بر توان خروجی بررسی شود. بدین منظور، از دو روش تحلیل حساسیت واریانس مبنا یا VBSA و روش PAWN استفاده می‌شود و در نهایت ژنراتور بهینه و حساسیت‌های آن یافت خواهد شد.

<sup>2</sup> Couple

<sup>3</sup> Decouple

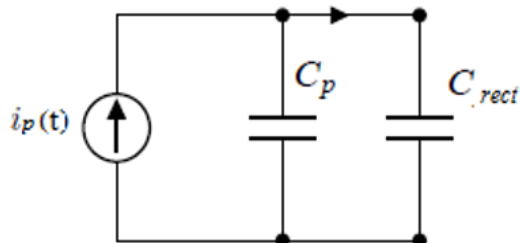
<sup>4</sup> Alternating Current

<sup>5</sup> Direct Current

<sup>1</sup> Blade Passage Frequency

یعنی  $C_p$  را یافت. با توجه به اینکه در خروجی این مدار، نیاز به یک ولتاژ dc ثابت است، با فرض اینکه در قسمت خروجی این ولتاژ ثابت به مقدار  $V_{rect}$  به وسیله باتری تأمین شده است و ظرفیت محل ذخیره یعنی  $C_{rect}$  از  $C_p$  خیلی بیشتر است، معادلات حل می‌شوند. در این مدار از یک پل دیودی استفاده شده است که کارکرد آن یکسو سازی جریان است.

مدلی که در این مقاله برای برداشت انرژی از ارتعاشات تیر یکسر درگیر در حالت کوپل با پیزوالکتریک (PZT-5A) با وظیفه برداشت کننده انرژی در نظر گرفته می‌شود، از مرجع [۱۴] 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 اولپر-برنولی با پیکربندی مستطیل شکل مستقیم تک لایه 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 سامانه می‌شود، دائمی فرض شده 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 می‌شود؛ همچنین سامانه مدل شده، خطی فرض شده، بدین معنی که آستانه تحریک باید تا جایی باشد که ترم‌های غیرخطی هندسی و پیزوالاستیک در سامانه ظاهر نشود. فرمول‌بندی پارامترهای توزیع شده خطی ارائه شده، نسخه الکترومکانیکی روش رایلی-ریتز است. با توجه به مدار DCIM که به عنوان مدار الکتریکی در نظر گرفته شده است، هنگام باز بودن دیودها، مدار به صورت شکل ۵ مدل می‌شود. بدین ترتیب داریم:



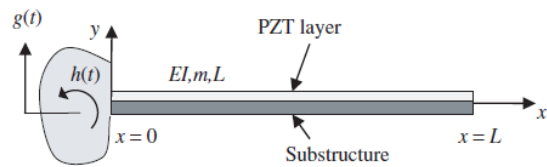
شکل ۵- وضعیت مدار بهنگام باز بودن دیودها

حقیقت این مدارها توان برداشت شده را برای مصرف و ذخیره آماده‌سازی می‌کنند. در این پژوهش از مدل تیر یکسر درگیر با یک‌لایه پیزوالکتریک برای برداشت کننده ارتعاشی [۱۳، ۱۴] و از مدار [۱۶] DCIM<sup>۱</sup> به‌عنوان مدار الکتریکی استفاده شده است. شکل ۲ و شکل ۳ به ترتیب مدل برداشت کننده ارتعاشی و مدار در نظر گرفته شده را نشان می‌دهند.

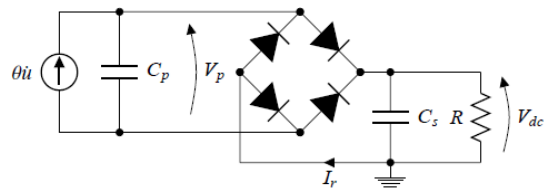
با توجه به شکل ۴ پیزوالکتریک را می‌توان به صورت یک منبع جریان و یک خازن مدل کرد [۱۷]. برای گره موجود در این مدل داریم:

$$\theta \dot{u} = i_0 + C_p \dot{V}_p \quad (1)$$

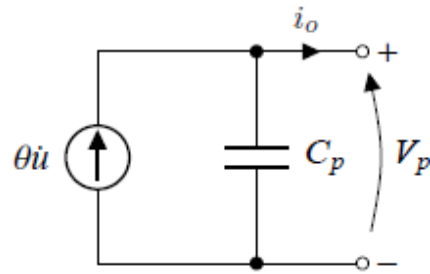
بدین ترتیب با استفاده از معادلات مکانیکی و مدل‌سازی پیزوالکتریک، در نهایت باید مقدار  $\theta \dot{u}$  (می‌توان آن را با  $i_p$  نمایش داد) برحسب زمان و ظرفیت داخلی پیزوالکتریک



شکل ۲- مدل تیر یکسر درگیر به همراه یک لایه پیزوالکتریک [۱۴]



شکل ۳- مدار الکتریکی در نظر گرفته شده برای برداشت کننده انرژی [۱۶]



شکل ۴- مدل الکتریکی پیزوالکتریک

<sup>۱</sup> DC Impedance matching

مورد پدیده‌ها و مدل‌های مختلف وجود دارد. با توجه به اینکه مطالعه این پدیده‌ها و مدل‌ها در شرایط آزمایشگاهی یا محیط طبیعی با مشکلات زیادی نظیر افزایش هزینه، ناتوانی در فراهم آوردن شرایط مناسب و... روبروست، محققان و دانشمندان از مدل‌های ریاضی برای بررسی این پدیده‌ها استفاده می‌کنند. این مدل‌ها شامل معادلات دیفرانسیل معمولی با مشتقات جزئی خطی یا غیرخطی می‌باشند [۱۹].

جدول ۱- مشخصات برداشت کننده انرژی

مقدار	پارامتر
۱۱۴/۴	طول تیر (mm)
۲۰/۳	عرض تیر و لایه پیزوالکتریک (mm)
۱	ضخامت تیر (mm)
۱	ضخامت پیزوالکتریک (mm)
۱۰۰	مدول یانگ تیر (GPa)
۶۶	مدول یانگ پیزوالکتریک (GPa)
۷۱۶۵	چگالی تیر (kg/m <sup>3</sup> )
۷۸۰۰	چگالی پیزوالکتریک (kg/m <sup>3</sup> )
-۱۹۰	ثابت پیزوالکتریک (pm/V)
۱۵/۹۳	ظرفیت الکتریکی پیزوالکتریک (nF/m)

بدین ترتیب پاسخ برای تحریک هارمونیک عبارت است از:

$$V_0 = \frac{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{m\omega^2 K_r (\gamma_r^w Y_0 + \gamma_r^{\theta} \theta_0)}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}}{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{X_r K_r}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}} + (C_p + C_{rect}) \quad (2)$$

در این معادلات  $\omega$  سرعت زاویه‌ای در فرکانس تحریک،  $Y_0$  دامنه تحریک،  $m$  جرم مدل،  $K_r$  مقداری حاصل از ضرب انتگرال مشتق دوم توابع متعامد در پارامترهای هندسی،  $\omega_r$  سرعت زاویه‌ای در فرکانس‌های طبیعی سامانه،  $\zeta_r$  نسبت دمپینگ و بقیه پارامترها توابعی هستند که در تحقیق ارتورک و اینمن [۱۴] تعریف شده‌اند؛ همچنین توان خروجی بر حسب ولتاژ نیز به صورت زیر ارائه شده است:

$$i_p(t) = (C_p + C_{rect}) \dot{V}(t) = (C_p + C_{rect}) j\omega V_0 e^{j\omega t} \quad (3)$$

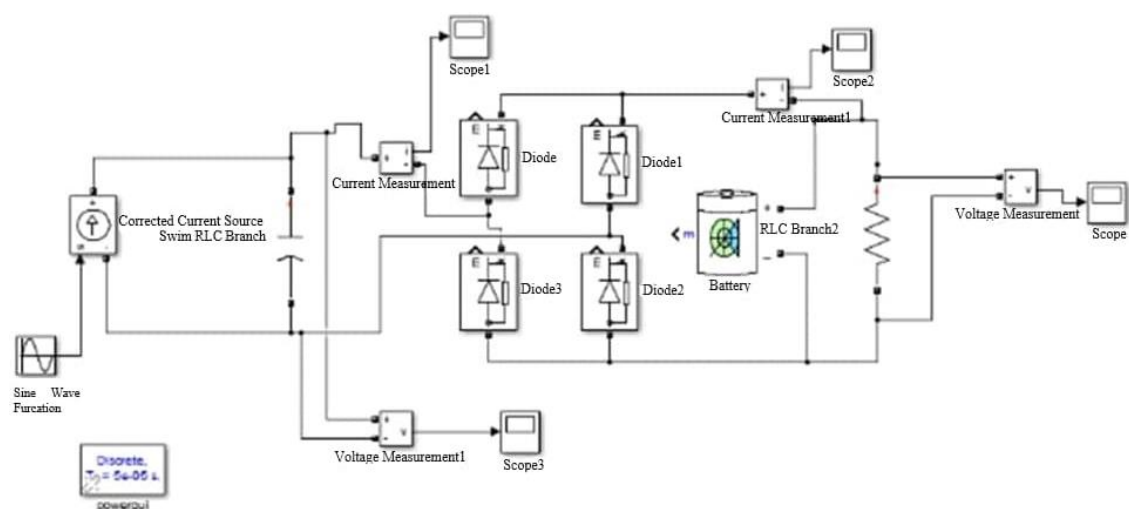
$$C_p = \frac{\epsilon_{33}^S b l}{h_p} \quad (4)$$

بدین ترتیب  $C_p$  و  $i_p(t)$  محاسبه شدند.

پس از معرفی سامانه با استفاده از منبع ارتعاش جریان و مشخصات برداشت کننده مطابق با جدول ۱، خروجی از پیزوالکتریک محاسبه شده و با شبیه‌سازی مدار در محیط سیمولینک از نرم‌افزار متلب (شکل ۶)، نمودارها مطابق مرجع [۱۸] کنترل می‌شوند.

#### ۴- معرفی روش تحلیل حساسیت

با پیشرفت علوم همواره نیاز به بررسی و تصمیم‌گیری در



شکل ۶- ژنراتور پیزوالکتریک در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب

برای سنجش شاخص در حالات مختلف آسان می‌شود. برای محاسبه فاصله بین حالت بدون شرط و مشروط از آمار کولموگروف - اسمیرنوف [۲۴] استفاده می‌شود. با استفاده از این روش، فاصله به‌دست‌آمده بدون توجه به محدوده خروجی  $y$  همواره بین 0 و 1 است؛ همچنین هنگامی که هدف تحلیل حساسیت شناخت ورودی‌های بی‌تأثیر بر خروجی باشد، می‌توان از نتایج آماری آزمون دو-نمونه کولموگروف - اسمیرنوف [۲۵] برای تعیین ورودی‌های غیر مؤثر با سطح اطمینان موردنظر استفاده کرد. به منظور تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف، معادلات آن در نرم‌افزار MATLAB کد نویسی شده و به ازای ورودی‌ها و پارامترهای گوناگون، اثر حساسیت آن‌ها بر خروجی‌ها سنجیده می‌شود.

### ۵- نتایج

در این مطالعه، امکان تأمین توان گرّه IMote2 در ولتاژ ثابت به‌عنوان یکی از گرّه‌های پر کاربرد مورد توجه قرار گرفته که به این منظور، یک مدل ژنراتور برداشت کننده انرژی که مشخصات آن در جدول ۱ بیان شده مد نظر قرار گرفته است. توان مورد نیاز این گرّه حدود ۱۲ mW است که به عنوان هدف دستیابی به آن تعیین شده است.

با انجام شبیه‌سازی، میزان ولتاژ و جریان تولیدی توسط پیزوالکتریک مد نظر در طی زمان در شکل ۷ نشان داده شده است. ذکر این نکته ضروری است که نرم‌افزار متلب اثرات دیگر مانند اتلاف و... را نیز در نظر می‌گیرد و اندکی اختلاف در ظاهر این نمودارها به این علت است. از طرف دیگر، پاسخ حل معادلات در حالت کوپل نیز در جدول ۲ ارائه شده است و

جدول ۲- پاسخ حل معادلات در حالت کوپل

مقدار	پارامتر
۶/۱۴۴	دامنه منبع جریان سینوسی $i_p$ (mW)
۰/۰۳۷۰	ظرفیت خازن معادل $C_p$ ( $\mu F$ )
۱۲/۳۹۶۹	توان خروجی (mW)
۱۲/۰۰۴۷	توان موردنیاز (mW)
۳/۲	ولتاژ dc خروجی موردنیاز (v)

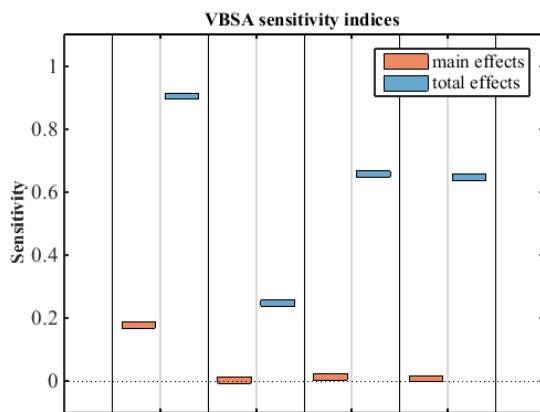
تعداد و تنوع متغیرهای ورودی در این مدل‌های کامپیوتری سبب پیچیدگی آن‌ها می‌شود که به منظور شناسایی متغیرهای با اهمیت و کنار گذاشتن متغیرهای بی‌اهمیت، از تحلیل حساسیت می‌توان بهره گرفت [۲۰].

تحلیل حساسیت از دیدگاه آماری به عنوان مطالعه چگونگی تخصیص عدم قطعیت خروجی یک مدل به منابع عدم قطعیت موجود در ورودی‌های مدل تعریف می‌شود [۲۱]. روش‌های مختلفی برای تحلیل حساسیت وجود دارد که یکی از این روش‌ها، روش تحلیل حساسیت واریانس مبنای یا VBSA است که به عنوان یک روش کارآمد برای تحلیل حساسیت مدل‌های خطی و غیرخطی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش میزان اهمیت هر یک از متغیرهای ورودی بر اساس شاخص‌های حساسیت مبتنی بر مفاهیم واریانس شرطی تعیین می‌شود [۲۲]. در این روش دو نوع شاخص حساسیت به نام شاخص اصلی  $S_i$  و شاخص کل  $S_{Ti}$  تعریف می‌شود. شاخص اصلی نشان‌دهنده اثر مستقیم و خطی ورودی‌ها بر خروجی و شاخص کل، نشان‌دهنده اثر مستقیم و غیرمستقیم ورودی‌ها بر خروجی‌ها است. بدین ترتیب اثر کل همواره حاوی اثر اصلی است؛ بنابراین همواره شاخص کل از شاخص اصلی بزرگ‌تر است یا به عبارتی  $S_i > S_{Ti}$  علاوه بر این، شاخص‌های حساسیت مبتنی بر تراکم، حساسیت را با برآورد تغییراتی که به‌واسطه حذف عدم قطعیت یک ورودی یا بیشتر در خروجی ایجاد می‌شود، اندازه‌گیری می‌کنند؛ بطوریکه حساسیت نسبت به متغیر  $x_i$  را با اندازه‌گیری فاصله منحنی توزیع احتمال خروجی در حالت تغییر تمامی ورودی‌ها و حالت ثابت در نظر گرفتن متغیر  $x_i$  انجام می‌دهند.

در این مقاله از دو روش تحلیل حساسیت استفاده شده است که شامل، روش تحلیل حساسیت واریانس مبنای یا VBSA و روش PAWN است که این نام برگرفته شده از نام ارائه‌دهندگان این روش [۲۳] است. از روش PAWN برای بهبود روش‌های مبتنی بر تراکم استفاده می‌شود. ایده اصلی این روش، استفاده از توزیع‌های تجمعی به دلیل راحت بودن تقریب در محاسبه فاصله بین حالت بدون شرط و مشروط (ثابت بودن متغیر  $x_i$ ) است. بدین ترتیب تکرار محاسبات

<sup>1</sup> Variance Based Sensitivity Analysis

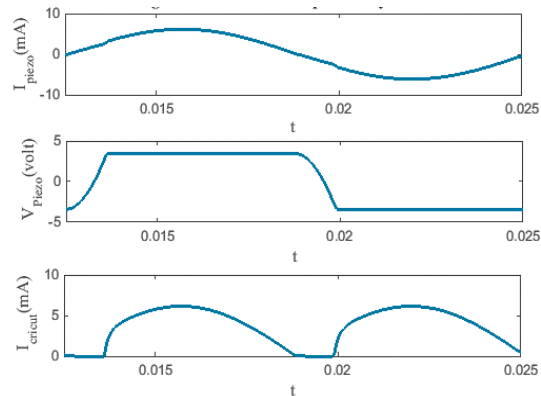
از ورودی‌ها، از روش‌های تحلیل حساسیت استفاده می‌شود. هر دو روش تحلیل حساسیت در نرم افزار متلب کد نویسی شده و داده‌ها را از مدل کامپیوتری ژنراتور ارتعاشی پیزوالکتریکی دریافت می‌کند. پس از اعمال روش‌های تحلیل حساسیت بر مدل کامپیوتری ژنراتور ارتعاشی پیزوالکتریکی، اثر ورودی‌ها بر توان خروجی این سامانه مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۸ و جدول ۳ نتایج تحلیل حساسیت VBSA ارائه شده‌اند. همان‌طور که از این شکل مشخص است، طول تیر بیشترین اثرگذاری را در میزان توان خروجی دارد، در حالی که ضخامت لایه غیرفعال تیر، کم‌ترین اثرگذاری را در میزان انرژی استخراج شده از خود نشان داده است. البته قابل ذکر است که شاخص حساسیت به ضخامت لایه فعال تیر پیزوالکتریک نسبت به لایه غیرفعال واکنش بهتری نشان داده و می‌توان نتیجه گرفت که هر چه ضخامت لایه پیزوالکتریک بیشتر باشد، می‌توان توان خروجی بیشتری استخراج کرد.



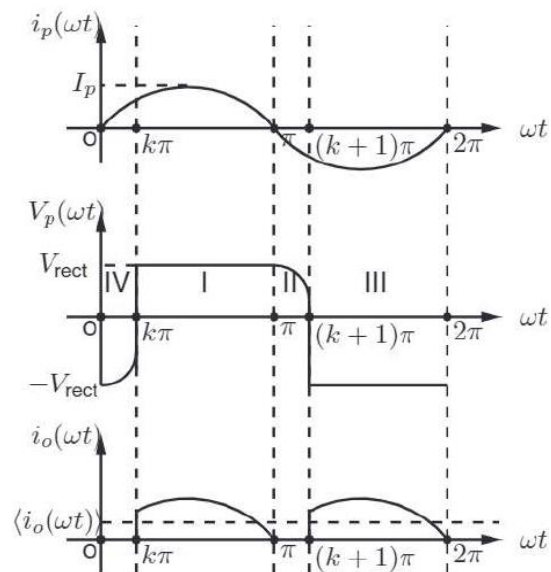
شکل ۸- نتایج تحلیل حساسیت به روش VBSA

جدول ۳- شاخص‌های تحلیل حساسیت به روش VBSA

پارامتر	اصلی	کلی
طول تیر	۰/۱۷۹۳	۰/۹۰۳۹
عرض تیر و لایه‌ی پیزوالکتریک	۰/۰۰۴۳	۰/۲۴۸۰
ضخامت تیر	۰/۰۱۴۱	۰/۶۵۷۵
ضخامت پیزوالکتریک	۰/۰۰۸۹	۰/۶۴۷۳



(الف)



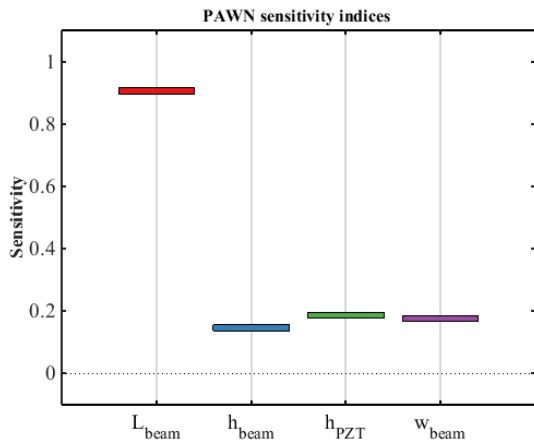
(ب)

شکل ۷- (الف) نتایج حاصل از شبیه‌سازی با سیمولینک در نرم‌افزار متلب و (ب) نتایج تئوری مشابه به دست آمده از مرجع [۱۸]

همان‌طور که در این جدول می‌توان مشاهده کرد، میزان توان تولیدی  $۱۲/۳۹$  mW تخمین زده شده که این مقدار برای تأمین توان گره IMote2 کفایت می‌کند؛ همچنین برای اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از حل معادلات در نرم افزار، با نتایج تئوری بیان شده در مرجع [۱۸] کاملاً مطابقت دارد و از طرفی رفتار مشاهده شده در شکل ۷ نیز کاملاً مشابه رفتار تئوری ذکر شده در [۱۸] می‌باشند.

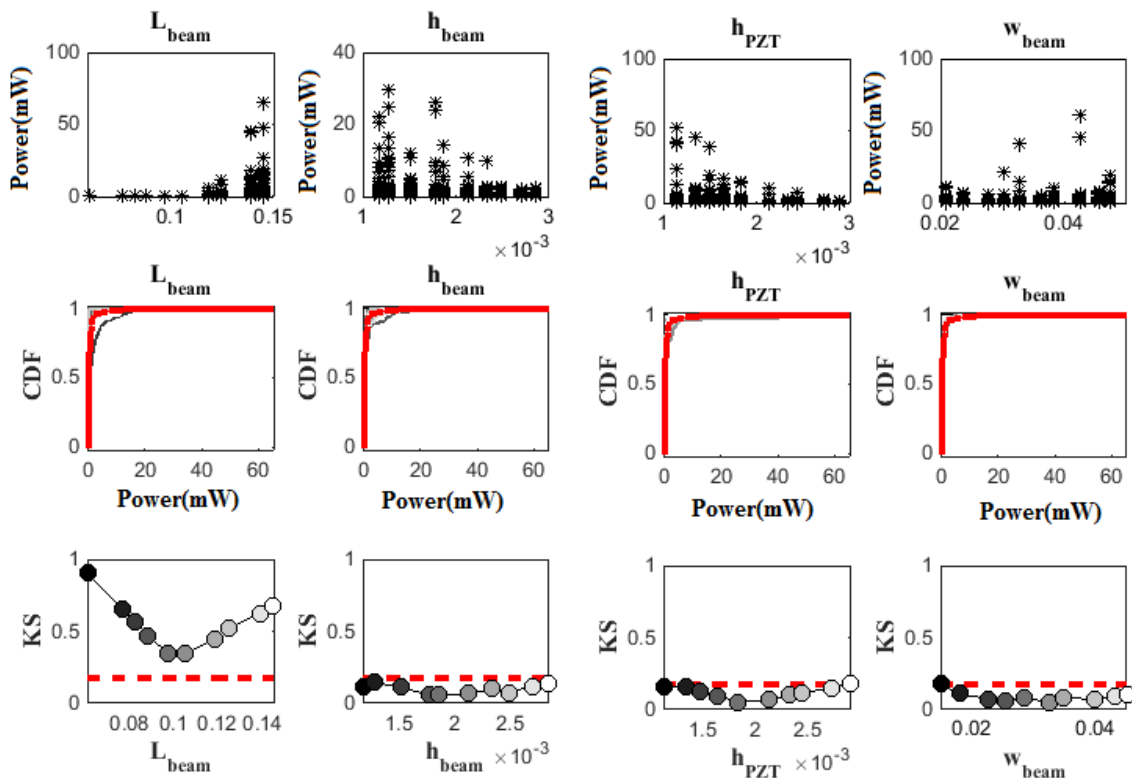
بعد از صحت سنجی مدل و اطمینان از توانایی ژنراتور برای تأمین توان گره‌های حسگر، بمنظور بررسی تأثیر هر یک

به وضوح دیده می‌شود که حساسیت طول تیر تقریباً ۳۰٪ بیشتر از سه پارامتر دیگر است و خروجی نسبت به آن سه پارامتر حساسیت تقریباً یکسانی از خود بروز داده است.



شکل ۹- نتایج تحلیل حساسیت به روش PAWN

علاوه بر این، شاخص‌های حساسیت اصلی و کلی ارائه‌شده در جدول ۳ نیز بیان‌کننده این موضوع است که ورودی اول، بیشترین تأثیر و ورودی‌های سوم، چهارم و دوم به ترتیب رتبه‌های بعدی را در تأثیرگذاری بر خروجی دارند. میزان حساسیت پارامترهای فوق روی خروجی با روش PAWN نیز ارزیابی شد، به طوری که نتایج این آنالیز در شکل ۹ و ۱۰ به تصویر کشیده شده است. در شکل ۹، میزان حساسیت پارامترهای طول تیر، ضخامت لایه غیرفعال، ضخامت پیزوالکتریک و عرض تیر نشان داده شده که میزان اثرگذاری طول تیر نسبت به دیگر پارامترها بسیار زیاد است و ضخامت لایه غیرفعال تیر نیز کمترین حساسیت را نشان می‌دهد. نکته حائز اهمیت این است که حساسیت ضخامت پیزوالکتریک هر چند که نسبت به ضخامت لایه غیرفعال بیشتر است، ولی اختلاف این اثرگذاری زیاد نیست. در جدول ۴، میزان شاخص حساسیت ثبت شده که به مانند شکل ۹، مقادیر حساسیت قابل مشاهده است. در این جدول



شکل ۱۰- نتایج برای تحلیل حساسیت توان به روش PAWN. ردیف اول؛ نمودارهای پراکندگی، ردیف دوم؛ مقایسه توابع توزیع تجربی در حالت مشروط و بدون شرط، ردیف سوم؛ فاصله کولموگروف-اسمیرنوف در مقادیر مختلف ورودی



جدول ۴- شاخص تحلیل حساسیت به روش PAWN

شاخص	پارامتر
۰/۸۹۴۵	طول تیر
۰/۱۷۵۵	عرض تیر و لایه‌ی پیزوالکتریک
۰/۱۹۴۵	ضخامت تیر
۰/۱۸۸۷	ضخامت پیزوالکتریک

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل ژنراتور برداشت کننده انرژی پیزوالکتریکی طراحی شد؛ به طوری که این تیر پیزوالکتریکی توانایی تأمین توان مورد نیاز گره پرکاربرد IMote2 را دارد. نتایج حاصل از حل معادلات مربوطه نشان دادند که میزان توان قابل استخراج توسط این تیر برابر با توان مورد نیاز گره مذکور است. سپس با استفاده از روش‌های VBSA و PAWN به‌عنوان روش‌های کارآمد و آسان برای تحلیل حساسیت، میزان اثرگذاری پارامترهای مختلف نظیر طول تیر، ضخامت لایه غیرفعال، ضخامت پیزوالکتریک و عرض تیر بر توان خروجی بررسی شد. درنهایت با توجه به لزوم تأمین توان در گره‌های شبکه‌های حسگر بی‌سیم، تحلیل حساسیت توان خروجی در ولتاژ ثابت انجام گرفت.

از آنچه که در این تحقیق انجام شد، نتیجه می‌شود که:

- چنانچه ساخت ژنراتور پیزوالکتریکی در مدل تیر یکسر درگیر به همراه یک لایه پیزوالکتریک با مدار معرفی شده انجام شود، مقدار طول تیر بیشترین تأثیر را در توان خروجی دارد و هرگونه اشتباه در این بُعد، تأثیر زیادی بر توان خروجی و نتیجه خواهد گذاشت.
- در طراحی و بهینه‌سازی برداشت کننده با توجه به محدودیت‌های مورد نیاز و در نظر گرفتن توان، می‌توان ضخامت و عرض تیر و ضخامت پیزوالکتریک را در محدوده ماکزیمم و مینیمم بررسی کرد و با معیار مورد نظر، ثابت در نظر گرفت.
- با در نظر گرفتن شاخص‌های حساسیت به دست آمده مطابق روش VBSA و PAWN، رتبه‌بندی تأثیرگذارترین ورودی‌ها بر توان خروجی در ولتاژ ثابت تعیین شده است که به ترتیب عبارت‌اند از: طول تیر، ضخامت پیزوالکتریک، عرض تیر و ضخامت لایه غیرفعال تیر پیزوالکتریک
- با در نظر گرفتن حساسیت‌ها و تأثیرگذاری عدم قطعیت‌ها بر خروجی، قابلیت اطمینان سامانه افزایش می‌یابد و هدف اصلی که مانیتور کردن اجزای بالگرد با گره‌های حسگر است، در سطح اطمینان مورد نظر محقق می‌شود.

علاوه بر مقادیر حساسیت، نمودارهای پراکندگی، اثر توابع توزیع تجمعی و فاصله کولموگروف-اسمیرنوف نیز بررسی شده‌اند که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به نمودار ردیف اول در این شکل، هر چه طول تیر در سطوح مختلف تغییر می‌کند، مقدار خروجی مدل نیز تغییر محسوسی خواهد داشت و با تغییر طول تیر، نقاط در توان‌های خاصی تجمع کرده‌اند. بدین ترتیب تغییر در میزان طول تیر، تأثیر چشم‌گیری در خروجی خواهد داشت. در ردیف دوم از شکل ۱۰ که در آن توابع توزیع تجمعی تجربی در حالت مشروط و بدون شرط رسم شده‌اند، مشاهده می‌شود که با ثابت در نظر گرفتن طول تیر در سطوح مختلف، نمودار توزیع تجمعی تجربی در حالت مشروط فاصله نسبتاً زیادی با همین نمودار در بدون شرط دارد. این نکته نشان‌دهنده تأثیرگذاری زیاد تغییرات ورودی مورد نظر در خروجی است. همچنین با استفاده از آزمون دو-نمونه‌ای کولموگروف-اسمیرنوف در حالت  $\alpha=0.05$  که در ردیف سوم شکل ۱۰ نشان داده شده است، می‌توان میزان تأثیر هر ورودی در هر سطح را بر خروجی مدل مشخص کرد. با توجه به اینکه وقتی طول تیر در سطح‌های میانی قرار دارد، مقدار فاصله کولموگروف-اسمیرنوف بین دو توزیع تجمعی تجربی کمتر از مقدار مورد نظر است، لذا می‌توان نتیجه گرفت که در این حالت می‌توان از تأثیر تغییرات آن بر خروجی صرف‌نظر کرد. مشابه تحلیل انجام شده برای ورودی اول، می‌توان دریافت که تأثیر تغییرات ورودی‌های دوم تا چهارم در خروجی نسبت به ورودی اول بسیار کم است؛ همچنین با توجه به آزمون دو-نمونه‌ای کولموگروف-اسمیرنوف در حالت  $\alpha=0.05$ ، می‌توان از تأثیر تغییرات این ورودی‌ها در خروجی، صرف‌نظر کرد و آن‌ها را ثابت در نظر گرفت.

۷- مراجع

- تحت تحریر اتفافی از پایه. نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۱۰-۱: ۶(۱).
- [13] Erturk D, Inman J (2008) On mechanical modeling of cantilevered piezoelectric vibration energy harvesters. *J Intel Mat Syst Str* 19(1): 1311-1325.
- [14] Erturk D, Inman J (2008) A distributed parameter electromechanical model for cantilevered piezoelectric energy harvesters. *J Vib Acoust* 130(4): 041002
- [15] Erturk, D, Inman J (2009) An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations. *Smart Mater Struct* 18(2): 025009.
- [16] Shu YC, Lien IC (2006) Analysis of power output for piezoelectric energy harvesting systems. *Smart Mater Struct* 15(6): 1499.
- [17] Roundy S, Wright PK (2004) A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics. *Smart Mater Struct* 13(5): 1131.
- [18] Zhao Z, Wang S, You C (2002) Piezoelectric Micro-power Generation to Charge Supercapacitor with Optimized Duty Cycle. *J Intel Mat Syst Str* 21(11): 1131-1140.
- [19] Fang KT, Li R, Sudjianto A (2006) Design and modeling for computer experiments. 1th edn. Chapman & Hall, Boston.
- [20] Janfada M, Shahsavani D (2017) Variance-based sensitivity analysis of deterministic model. *Andishe-Ye-Amari* 21(2): 33-44.
- [21] Saltelli A, Annoni P, Azzini I, Campolongo F, Ratto M, Tarantola S (2010) Variance based sensitivity analysis of model output. *Comput Phys Commun* 181(2): 251-270.
- [22] Archer GEB, Saltelli A, Sobol IM (1997) Sensitivity measures, anova-like Techniques and the use of bootstrap. *J Stat Comput Sim* 58(2): 99-120.
- [23] Pianosi F, Wagener T (2015) A simple and efficient method for global sensitivity analysis based on cumulative distribution functions. *Environ Modell Softw* 67(1): 1-11.
- [24] Stephens MA (1992) Introduction to Kolmogorov (1933) On the empirical determination of a distribution. In: *Breakthroughs in Statistics*, New York 93-105.
- [25] Wall J (1996) Practical statistics for astronomers-ii correlation data-modelling and sample comparison. *Q J Roy Astron Soc* 37(1): 519.
- [1] Christopher DL, Townsend CP (2006) Energy Harvesting Wireless Sensors for Helicopter Damage Tracking. *AHS International Forum* 62.
- [2] Wireless sensor network. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless\\_sensor\\_network](https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_sensor_network).
- [3] Shaikh F K, Zeadally S (2016) Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review. *Renew Sust Energ Rev* 55(1): 1041-1054.
- [4] Arms SW, Galbreath JH, Townsend CP, Churchill DL, Corneau B, Ketcham RP, Phan N (2009) Energy harvesting wireless sensors and networked timing synchronization for aircraft structural health monitoring. 1st International Conference on Wireless Communication, 16-20.
- [5] Chang SC (2010) A 1-mW vibration energy harvesting system for moth flight-control applications. *Electrical Engineering and Computer Science*. Massachusetts Institute of Technology. Massachusetts.
- [6] Dickerson S (2011) CH-47D rotating system fault sensing for condition based maintenance. *Air Force Institute of Technology*.
- [7] Smith SD (2006) Seat vibration in military propeller aircraft: Characterization. *Aviat Space Envir Md* 77(1): 32-40.
- [8] Le MQ, Capsal JF, Lallart M, Hebrard Y, Ham AVD, Reffé N, Geynet L, Cottinet PJ (2015) Review on energy harvesting for structural health monitoring in aeronautical applications. *Prog Aerosp Sci* 79(1): 147-157.
- [9] Esmaeili A, Sousa JMM (2017) Power density ratio optimization of bimorph piezocomposite energy harvesters using a multidisciplinary design feasible method. *Compos Struct* 165(1):171-179.
- [10] Keawboonchuay C, Engel TG (2003) Electrical power generation characteristics of piezoelectric generator under quasi-static and dynamic stress conditions. *IEEE T Ultrason Ferr* 50(10): 1377-1382.
- [۱۱] حسینی ر، لطافتی م، حسینی مقدم س (۱۳۹۶) برداشت انرژی ارتعاشی با استفاده از تیر یک سردرگیر با دولایه پیزوالکتریک. نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۹-۱: ۷(۱).
- [۱۲] خادم باشی س، معین فرد ح (۱۳۹۵) مدلسازی برداشت انرژی الکتریکی با استفاده از مواد پیزوالکتریک