

تحلیل عددی میکروبازیاب انرژی الکترومغناطیسی تحت تحریک اتفاقی

چکیده: سامانه های میکروبازیاب انرژی، فناوری جدیدی هستند که جایگزین باتری ها و وسایل ذخیره انرژی که دارای محدودیت می باشند، می شوند. عدم نیاز به جایگزینی یا شارژ دوباره آن ها به صورت دوره ای، حجم و وزن خیلی کم و نیز دقت بالا از خصوصیات سامانه های میکروبازیاب انرژی می باشد. در این مقاله، سامانه میکروبازیاب انرژی الکترومغناطیسی تحت تحریک اتفاقی از نوع نویز سفید بررسی می شود. مدل مکانیکی در نظر گرفته شده برای میکروبازیاب انرژی به صورت تیر یک سر گیردار است. در این سامانه، شتاب پایه به عنوان ورودی میکروبازیاب انرژی بوده و ولتاژ القا شده در سیم پیچ به عنوان خروجی سامانه می باشد. تحریک پایه یک فرآیند اتفاقی نویز سفید گوسی و ایستای ضعیف فرض می شود. با توجه به معادله حرکت مکانیکی سیستم می توان تابع پاسخ فرکانسی را بدست آورد. هدف این پژوهش، محاسبه متوسط توان تولید شده در میکروبازیاب انرژی الکترومغناطیسی تحت تحریک اتفاقی می باشد. تحلیل تنش با استفاده از شبیه سازی در نرم افزار المان محدود و حل عددی انجام شده و صحت نتایج تأیید می شود. در نهایت تأثیر پارامترهای میکروبازیاب انرژی الکترومغناطیسی بر روی متوسط توان تولید شده بررسی می شود.

واژه های راهنما: میکروبازیاب انرژی الکترومغناطیسی، ارتعاشات اتفاقی، تابع پاسخ فرکانسی، نویز سفید، سیستم های میکروالکترومکانیکی، تراکم طیفی، متوسط توان

محمد مهدی نظری

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

محسن بهرامی

استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

عباس رهی*

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۱

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۰

Numerical analysis of micro electromagnetic energy harvester under random excitation

Mohammad Mahdi Nazari
Ph.D. Student, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran

Mohsen Bahrami
Professor, Faculty of Mechanical Engineering Amirkabir University of Technology, Tehran

Abbas Rahi*
Assistant Professor, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran

Abstract: Micro energy harvester systems are a new technology that replaces batteries and energy storage devices that have limitations. Not needing to replace or recharge them periodically, very small volume and weight, as well as high accuracy are the characteristics of the micro energy scavenger system. This paper investigates the electromagnetic micro energy harvester system under random white noise excitation. The mechanical model considered for the micro energy harvester is in the form of a beam. In this system, the base acceleration is the input of the micro energy recovery and the induced voltage in the coil is the output of the system. The base excitation is assumed to be a weakly stationary Gaussian white noise random process. According to the mechanical motion equation of the system, the frequency response function can be obtained. The aim of this research is to calculate the mean power produced in the electromagnetic micro energy harvester under random excitation. Stress analysis is done using simulation in finite element software and numerical solution, and the results' correctness is confirmed. Finally, the effect of the electromagnetic micro energy scavenger on the average parameters power produced is investigated.

Keywords: Micro electromagnetic energy harvester, Random vibration, Frequency response function, White noise, Microelectromechanical systems, Spectral density, Mean power

۱- مقدمه

مکعب می‌باشد. این میکروبازیاب انرژی پیشنهادی جایگزین مناسبی برای منابع با طول عمر محدود است.

کائو و همکاران [۵] یک بازیاب انرژی الکترومغناطیسی با غلظت‌های دوتایی برای ذخیره انرژی حاصل از قدم زدن انسان در محیط روسازی راه‌آهن با سرعت بالا را بررسی کردند. نتایج شبیه‌سازی و تجربی آنها نشان داد که می‌توان حداکثر توان خروجی ۴۶۶/۶ میلی وات را تحت فرکانس ارتعاش ۵ هرتز و جابجایی ۱۰ میلی‌متر به دست آورد. همچنین نشان دادند که چرخ فلایویل اینرسی می‌تواند پایداری سیستم را افزایش دهد و در مقایسه با سیستم بدون فلایویل، به بهبود میانگین توان خروجی تا ۴۹/۴۵ درصد دست یابند. بای و همکاران [۶] یک بازیاب انرژی هیبریدی الکترومغناطیس-تریبولکترونیک با راندمان بالا را بر اساس تبدیل ارتعاش به چرخش پیشنهاد کردند. بازیاب انرژی پیشنهادی شامل یک ژنراتور الکترومغناطیسی چرخشی، مکانیزم انتقال حرکت و نانو ژنراتور تریبولکترونیک ارتعاش متقابل است. نتایج تجربی آنها نشان داد که راندمان تبدیل انرژی این بازیاب می‌تواند تحت فرکانس‌های ارتعاشی چندگانه به بیش از ۷۰ درصد برسد. این بازیاب پیشنهادی، توان خروجی بالاتری در مقایسه با بازیاب‌های انرژی ارتعاشی متقابل سنتی دارد. وانگ و همکاران [۷] دینامیک غیرخطی و تحلیل دوشاخگی را برای یک بازیاب انرژی الکترومغناطیس با آهنربای غلظتی مورد مطالعه قرار دادند. بازیاب انرژی القایی الکترومغناطیس مورد بررسی دارای آهنربای غلظتی چند پایه برای جذب انرژی از یک محدوده فرکانس وسیع است. این پژوهش، روش جدیدی از تفکر برای طراحی بازیاب‌های انرژی غیرخطی را ارائه داد.

اردونز و همکاران [۸] یک بازیاب انرژی ارتعاشی الکترومغناطیسی با کارایی بالا بر اساس آهنرباهای حلقه‌ای را پیشنهاد و بررسی کردند. آنها بهینه‌سازی هندسی بازیاب پیشنهادی را به عنوان تابعی از شعاع داخلی، ارتفاع و قطر سیم سیم‌پیچ، برای افزایش توان تولیدی آن دادند. حداکثر توان خروجی شبیه‌سازی شده برای بازیاب انرژی بهینه شده ۳/۶۱ میلی وات در فرکانس ۶۱/۷ هرتز است که به طور قابل توجهی بالاتر از بازیاب‌های انرژی با کاربردهای مشابه است. حسنی و رحقی [۹] بهینه‌سازی یک بازیاب انرژی الکترومغناطیسی برای افزایش عملکرد تولید برق مورد مطالعه قرار دادند. بهینه‌سازی برای پارامترهای کنترلی، از جمله تعداد چرخش سیم‌پیچ‌ها، پیکربندی سیم‌پیچ و ابعاد آهن‌ربا انجام شد. نتایج تجربی نشان داد که بهینه‌سازی انجام شده منجر به بهبود قابل توجهی در توان خروجی بازیاب انرژی بهینه شده نسبت به مطالعات قبلی دارد. وانگ و همکاران [۱۰] یک بازیاب انرژی ارتعاشی

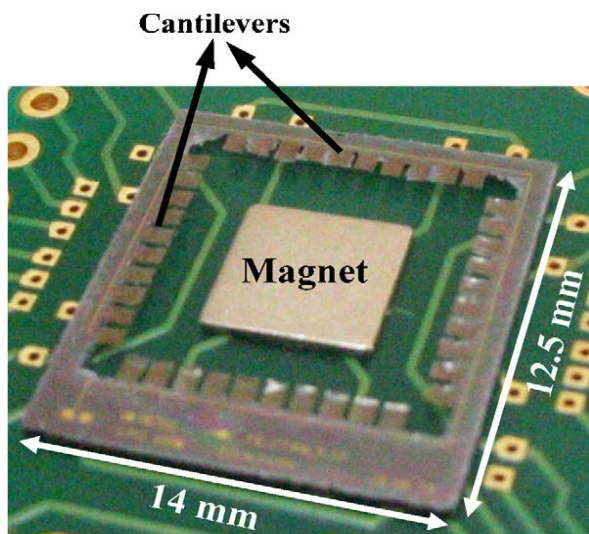
امروزه توجه بسیار بالایی روی فناوری‌های دریافت، جذب و ذخیره انرژی هم از نظر صنعتی و هم از نظر دانشگاهی شده است. به طور کلی بازیاب انرژی وسیله‌ای است که انرژی را که در حالت معمول به هدر می‌رود، جذب و ذخیره نموده و در جای مناسب از آن بهره‌برداری می‌کند. با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی استفاده از میکروبازیاب‌های انرژی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. سامانه میکروبازیاب‌های انرژی قادر به ذخیره انرژی حاصل از حرکات محیطی و ارتعاشات مکانیکی و تبدیل آن به انرژی الکتریکی هستند که این امر از طریق سه مکانیزم اصلی الکترومغناطیس، الکترواستاتیک و پیزو الکترونیک صورت می‌گیرد.

ساری و همکاران [۱] یک میکرو ژنراتور الکترومغناطیس برای تبدیل ارتعاشات محیطی پهن باند را به توان الکتریکی، مورد مطالعه قرار دادند. این میکروبازیاب انرژی قادر به تولید توان ثابت در محدوده فرکانس از پیش تعیین شده است. این میکروبازیاب انرژی، توان ۰/۴ میکرو وات را با ولتاژ ۱۰ میلی ولت در محدوده فرکانس ارتعاش خارجی ۴/۲ تا ۵ کیلوهرتز تولید می‌کند که باند ۸۰۰ هرتز را پوشش می‌دهد. ساری و همکاران [۲] طراحی و بهینه‌سازی یک میکروبازیاب انرژی الکترومغناطیس برای تبدیل ارتعاشات به جریان الکتریکی را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها شامل چیدمانی از تیرهای یک سر گیردار از جنس پارلین است که سیم‌پیچ‌هایی از جنس طلا روی آن پیچیده می‌شود و آهن‌ربای ثابتی هم مقابل تیرهای یک سر گیردار قرار دارد. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش تعداد دور سیم‌پیچ و افزایش فرکانس طبیعی تیر یک سر گیردار می‌توان توان تولیدی را زیاد کرد. هولم و همکاران [۳] یک بازیاب انرژی الکترومغناطیس متشکل از یک لوله با دو آهنربای ثابت و دو سیم پیچ شامل ساختار دمبلی شناور را در نظر گرفتند. حداکثر توان تولید شده توسط این بازیاب ۱/۰۴ میلی وات است که در ۸/۵ هرتز در جاروب فرکانس نزولی که حداکثر شتاب بازیاب ۰/۸۷ شتاب گرانش زمین است، رخ می‌دهد. بهار و همکاران [۴] یک میکرو ژنراتور الکترومغناطیسی متشکل از یک فنر و یک سیم پیچ مسطح و همچنین یک آهنربا و هسته مغناطیسی را مورد بررسی قرار دادند. یک ساختار نوآورانه برای هسته مغناطیسی برای به حداکثر رساندن توان خروجی پیشنهاد دادند. نتایج آنها نشان داد که توان خروجی این میکروبازیاب تا ۱/۰۳۴۴ میکرووات افزایش یافته و چگالی توان آن ۲/۹۴ میکرووات بر سانتی متر

اتفاقی از نوع نويز سفید مورد مطالعه قرار می‌گیرد. تیر یک سر گیردار به عنوان مدل مکانیکی میکروبازویاب انرژی در نظر گرفته می‌شود. در این میکروبازویاب، شتاب پایه به عنوان ورودی و ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ به عنوان خروجی است. با محاسبه تابع پاسخ فرکانسی، متوسط توان تولید شده در میکروبازویاب انرژی الکترومغناطیس تحت تحریک اتفاقی بدست می‌آید. تحلیل تنش میکروبازویاب با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار انسیس انجام شده و با حل عددی صحت‌گذاری نتایج تأیید می‌شود. در انتها تأثیر پارامترهای میکروبازویاب انرژی الکترومغناطیس بر روی متوسط توان تولید شده بررسی می‌شود.

۲- مدل‌سازی میکروبازویاب انرژی الکترومغناطیس

میکروبازویاب‌های انرژی الکترومغناطیس قادر هستند ارتعاشات مکانیکی و حرکات محیطی را به انرژی الکتریکی تبدیل کنند و به صورت توان الکتریکی ذخیره نمایند. در شکل (۱)، یک نمونه واقعی میکروبازویاب انرژی الکترومغناطیس مشاهده می‌شود.



شکل ۱ نمونه واقعی میکروبازویاب انرژی الکترومغناطیس [۱]

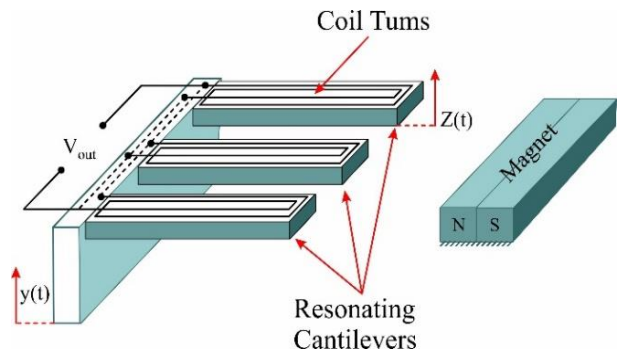
میکروبازویاب انرژی الکترومغناطیس شامل سیم‌پیچ‌هایی است که روی پایه‌ها پیچیده شده و قادر هستند نسبت به آهن‌ربای ثابت حرکت کنند. شکل (۲)، میکروبازویاب انرژی الکترومغناطیس را نشان می‌دهد.

شکل (۳)، مدل الکتریکی یک میکروبازویاب انرژی الکترومغناطیس را نشان می‌دهد که به صورت یک تیر یک سرگیردار می‌باشد که سیم‌پیچ روی آن پیچیده شده است و یک بار الکتریکی را هدایت می‌کند. فرض می‌شود که اندوکتانس سیم‌پیچ در مقایسه با مقاومت داخلی سیم‌پیچ کوچک است.

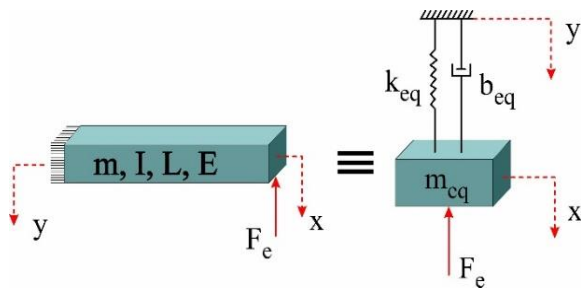
الکترومغناطیسی را با استفاده از یک مکانیزم مبتکرانه برای تبدیل ارتعاش به چرخش بر اساس یک آرایه آهنربا پیشنهاد کردند. یک آهنربا که در امتداد یک مسیر مستقیم ارتعاش می‌کند، گشتاوری را بر روی یک استوانه قابل چرخش که با آرایه‌ای از آهنربا ثابت شده است، القا می‌کند و استوانه را به چرخش سوق می‌دهد و در نتیجه با انتقال الکترومغناطیسی، برق تولید می‌شود. پژوهش آنها نشان داد که بازویاب انرژی ارتعاشی مبتنی بر آرایه مغناطیسی پیشنهادی در تأمین انرژی الکتریکی کم‌توان مؤثر است. آلوئیسوس و همکاران [۱۱] یک بازویاب انرژی جنبشی از فعالیت‌های حرکتی بدن انسان با استفاده از ژنراتور الکترومغناطیسی را بررسی کردند. آنها برای تولید انرژی حاصل از حرکات بدن انسان از ژنراتورهای میکرو الکترومغناطیسی و سروموتورها استفاده کردند. انرژی حاصل از حرکت بدن انسان با استفاده از سنسور میکروالکترومغناطیسی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. محل قرارگیری سنسور برای ذخیره انرژی را قسمت بالایی ساق پا و مچ دست در نظر گرفتند.

فونگ و همکاران [۱۲] یک بازویاب انرژی ارتعاشی الکترومغناطیسی جدید با چگالی توان بالا و فرکانس پایین را مورد مطالعه قرار دادند. آنها با افزایش سرعت نسبی بین سیم پیچ و اجزای آهنربا، به توان خروجی بالاتری رسیدند. ژانگ و همکاران [۱۳] یک بازویاب انرژی الکترومغناطیسی با راندمان بالا بر اساس آهنربای غلتشی را طراحی کردند که از طریق راه رفتن، توان الکتریکی ذخیره می‌کند. نتایج تجربی آنها نشان داد که با سرعت پیاده‌روی ۴ کیلومتر در ساعت، می‌توان توان متوسط ۰/۵ میلی‌وات را تولید کرد. کومار و همکاران [۱۴] طراحی و تحلیل یک بازویاب انرژی الکترومغناطیسی با استفاده از فناوری سیستم‌های میکروالکترومکانیکی را پیشنهاد کردند. این بازویاب انرژی را برای ذخیره انرژی از ارتعاشات محیطی با فرکانس‌های کمتر از ۱۰۰ هرتز در نظر گرفتند. خان و همکاران رفتار غیرخطی یک بازویاب انرژی الکترومغناطیسی از نوع غشایی را تحت ارتعاشات هارمونیک و تصادفی را بررسی کردند. آنها بازویاب انرژی الکترومغناطیسی غشایی از جنس پلی دی متیل سیلوکسان را ساختند و از تحریک سینوسی سطح پایین و باند باریک تصادفی برای تولید انرژی الکتریکی بازویاب استفاده کردند. با بررسی پژوهش‌های انجام گرفته پیشین، مشاهده می‌شود که تاکنون کار خاص و جامعی در خصوص تحلیل میکروبازویاب انرژی الکترومغناطیس تحت تحریک اتفاقی ارائه نشده است. همچنین تأثیر پارامترهای میکروبازویاب انرژی الکترومغناطیس بر روی متوسط توان تولیدی نیز بررسی نشده است. در این مقاله، یک میکروبازویاب انرژی الکترومغناطیس تحت تحریک ارتعاشات

در این رابطه، B_r چگالی شار مغناطیسی باقیمانده است که $1/1$ تا $1/4$ تسلا برای آهن‌رباهای نوع NdFeB می‌باشد. a_p طول آهن‌ربا، a_1 ارتفاع آهن‌ربا، a_2 عرض آهن‌ربا و d فاصله از آهن‌ربا می‌باشد که در شکل (۳) مشاهده می‌شود. به منظور تعیین سرعت نسبی \dot{z} ، باید یک مدل مکانیکی معادل برای بازتاب انرژی الکترومغناطیسی در نظر گرفته شود که در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۲ میکرو بازتاب انرژی الکترومغناطیسی



شکل ۴ مدل مکانیکی معادل بازتاب انرژی الکترومغناطیسی

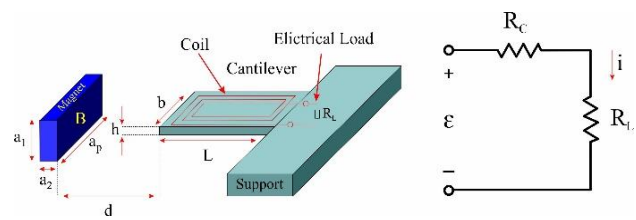
برای این بازتاب انرژی، با استفاده از قانون دوم نیوتن، معادله حرکت به صورت زیر بدست می‌آید:

$$m_{eq}\ddot{z} + b_m\dot{z} + k_{eq}z + F_e = -m_{eq}\ddot{y} \quad (5)$$

که در آن b_m میرایی مکانیکی تولید شده از نیروی جریان هوا، نیروی فشاری هوا، تلفات تکیه‌گاهی و اصطکاک داخلی است که با رابطه زیر بیان می‌شود [۱۶]:

$$b_m = \frac{\left(3\pi\mu b + \left(\frac{3}{4}\right)\pi b^2 \sqrt{2\rho_a\mu\omega}\right)m_{eq}}{\rho_a b^2 h} + \frac{\mu b^2 m_{eq}}{\rho_b g_0^3 h} + \frac{\eta}{\omega} k_{eq} + \frac{(0.23h^3)}{L^3} 2m_{eq}\omega_n \quad (6)$$

در رابطه بالا، μ ویسکوزیته هوا ($1/81 \times 10^{-5}$ pa s)، چگالی ρ_a هوا ($1/3 \frac{kg}{m^3}$)، چگالی تیر، ρ_b ضخامت تیر، h فاصله بین تیر و دیوار صلب نزدیک، η ضریب میرایی سازه‌ای است که به وسیله خواص ماده تعیین می‌شود (5×10^{-6}) [۱۶]، ω فرکانس جابجایی نقطه نوک تیر و ω_n فرکانس طبیعی تیر یک سر گیردار می‌باشد. در رابطه (۶) دو ترم اول مرتبط با میرایی جریان هوا و فشار هوا هستند و از دو ترم دیگر بارزتر و برجسته‌تر هستند. همچنین m_{eq} و k_{eq} به ترتیب جرم معادل و سفتی



شکل ۳ مدل الکتریکی میکرو بازتاب انرژی الکترومغناطیسی

توان ایجاد شده به وسیله مقاومت بار R_L می‌تواند به صورت رابطه زیر بدست آید:

$$P = \frac{1}{2} i^2 R_L \quad (1)$$

در این رابطه، i جریان القا شده از طریق سیم‌پیچ و R_L مقاومت بار می‌باشد. جریان القایی i از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$i = \frac{\epsilon}{R_L + R_C} \quad (2)$$

در رابطه بالا، R_C مقاومت سیم پیچ و ϵ نیروی محرکه القایی روی سیم‌پیچ است که برطبق قانون فارادی، ولتاژ القا شده روی سیم‌پیچ‌ها عبارت است از:

$$\epsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d\left(\int \vec{B} \cdot d\vec{A}\right)}{dt} = -BL_p \dot{z} \quad (3)$$

در این رابطه، ϕ چگالی شار مغناطیسی، B شدت میدان مغناطیسی آهن‌ربا، L_p طول کاربردی سیم‌پیچ و \dot{z} سرعت نسبی نقطه نوک پایه نسبت به آهن‌ربا می‌باشد. شدت میدان مغناطیسی آهن‌ربا عبارت است از [۱۵]:

$$B = \frac{B_r}{\pi} \left(\tan^{-1} \left(\frac{a_1 a_2}{2d\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + 4d^2}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{a_1 a_2}{2(d+a_p)\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + 4(d+a_p)^2}} \right) \right) \quad (4)$$

روی متوسط توان تولید شده بررسی می‌شود. ورودی و خروجی میکروبازیاب انرژی عبارت است از:

$$\begin{aligned} \ddot{y}(t) &= e^{i\omega t} \\ z(t) &= H(\omega)e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (11)$$

با جایگزینی رابطه بالا در معادله حرکت میکروبازیاب انرژی، تابع پاسخ فرکانسی سیستم بدست می‌آید که نسبت ورودی به خروجی سیستم می‌باشد. تابع پاسخ فرکانسی سیستم که نشان‌دهنده رفتار دینامیکی سیستم می‌باشد، عبارت است از:

$$H(\omega) = \frac{-m_{eq}}{-m_{eq}\omega^2 + (b_m + b_e)i\omega + k_{eq}} \quad (12)$$

اگر تراکم طیفی ورودی یک اغتشاش سفید با مقدار ثابت s_0 باشد، در این صورت تراکم طیفی خروجی برابر است با:

$$S_{\ddot{y}}(\omega) = S_0 \quad -\infty < \omega < \infty \quad (13)$$

$$S_z(\omega) = |H(\omega)|^2 S_{\ddot{y}}(\omega)$$

تراکم طیفی سرعت نسبی \dot{z} نوک تیر یک سر گیردار نسبت به آهن‌ریا عبارت است از:

$$S_{\dot{z}}(\omega) = \omega^2 |H(\omega)|^2 S_{\ddot{y}}(\omega) \quad (14)$$

در نتیجه، متوسط مجذور سرعت نسبی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E[\dot{z}^2(t)] = S_0 \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{-m_{eq}i\omega}{-m_{eq}\omega^2 + (b_m + b_e)i\omega + k_{eq}} \right|^2 d\omega \quad (15)$$

با استفاده از مرجع [۱۷] داریم:

$$I_n = \int_{-\infty}^{\infty} |H_n(\omega)|^2 d\omega \quad (16)$$

$$H_n(\omega) = \left\{ \frac{B_0 + (i\omega)B_1 + (i\omega)^2 B_2 + \dots + (i\omega)^{n-1} B_{n-1}}{A_0 + (i\omega)A_1 + (i\omega)^2 A_2 + \dots + (i\omega)^n A_n} \right\}$$

با توجه به رابطه (۱۶) خواهیم داشت:

$$I_2 = \int_{-\infty}^{\infty} |H_2(\omega)|^2 d\omega = \frac{\pi m_{eq}}{b_m + b_e} \quad (17)$$

بنابراین متوسط مجذور سرعت نسبی نوک تیر یک سر گیردار نسبت به آهن‌ریا عبارت است از:

$$E[\dot{z}^2(t)] = S_0 I_2 = \frac{\pi S_0 m_{eq}}{b_m + b_e} \quad (18)$$

معادل مدل مکانیکی در نظر گرفته شده برای بازیاب انرژی می‌باشند. فرکانس طبیعی مود اول خمشی عبارت است از:

$$\begin{aligned} \omega_n &= \sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}} = 3.57 \sqrt{\frac{EI}{mL^3}} \\ m_{eq} &= \frac{33}{140} m, \quad k_{eq} = \frac{3EI}{L^3} \end{aligned} \quad (7)$$

که در آن E, L, m و I به ترتیب جرم، طول، مدول الاستیسیته و ممان اینرسی تیر یک سر گیردار می‌باشند. نیروی الکتریکی F_e در خلاف جهت حرکت تیر یک سر گیردار اثر می‌کند و می‌تواند از رابطه زیر بدست آید:

$$\vec{F}_e = L_p \vec{i} \times \vec{B} = \frac{(BL_p)^2}{R_L + R_c} \dot{z} \quad (8)$$

در رابطه بالا، B میدان مغناطیسی آهن‌ریا، L_p طول سیم‌پیچ کاربردی، R_c مقاومت سیم‌پیچ و R_L مقاومت بار است. با جایگزینی رابطه (۸) در معادله حرکت تیر یک سر گیردار، معادله دیفرانسیل زیر بدست می‌آید:

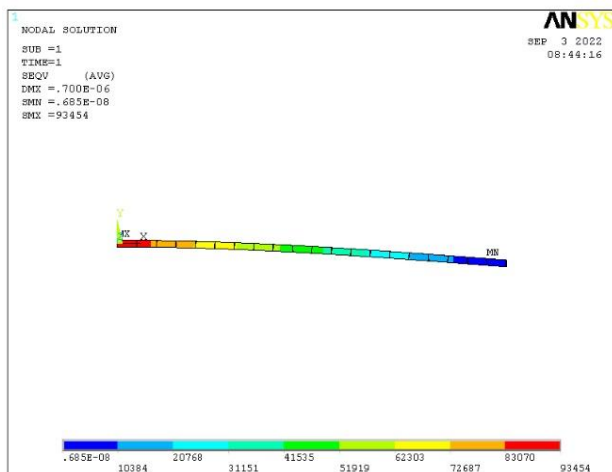
$$m_{eq}\ddot{z}(t) + (b_m + b_e)\dot{z}(t) + k_{eq}z(t) = -m_{eq}\ddot{y} \quad (9)$$

در این رابطه، میرایی الکتریکی b_e عبارت است از:

$$b_e = \frac{(BL_p)^2}{R_L + R_c} \quad (10)$$

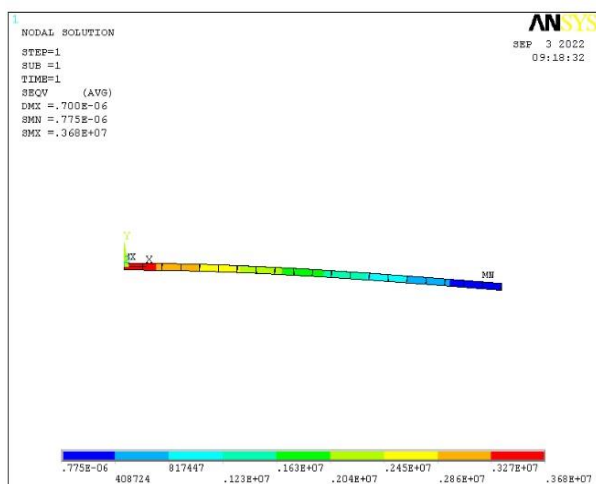
۳- تحلیل ارتعاشات اتفاقی میکروبازیاب انرژی الکترومغناطیس

در این پژوهش، هدف تحلیل ارتعاشات اتفاقی میکروبازیاب انرژی الکترومغناطیس تحت تأثیر تحریک اتفاقی از نوع نویز سفید می‌باشد. تحریک پایه، یک فرآیند اتفاقی نویز سفید گوسی و ایستای ضعیف فرض می‌شود. ورودی میکروبازیاب انرژی، شتاب پایه $\ddot{y}(t)$ و خروجی آن $z(t)$ ، جابجایی نسبی جرم معادل میکروبازیاب انرژی در نظر گرفته می‌شود. جابجایی نسبی جرم معادل باعث ایجاد جریان القایی $i(t)$ روی سیم‌پیچ شده و جریان القایی ایجاد شده، باعث تولید توان میکروبازیاب می‌شود. در نتیجه، متوسط توان تولید شده میکروبازیاب انرژی را محاسبه کرده و تأثیر پارامترهای میکروبازیاب انرژی الکترومغناطیس بر



شکل ۵ تحلیل تنش میکرو بازویاب انرژی الکترومغناطیس از جنس پارلین

از تحلیل تنش شکل (۶) نتیجه می‌شود که بیشترین مقدار تنش برای ماده سیلیکون [۱ ۱ ۱] بیشتر از تنش تسلیم آن است. بنابراین با انجام آزمون مدل مکانیکی میکرو بازویاب انرژی الکترومغناطیس، تیر از جنس سیلیکون [۱ ۱ ۱] دچار شکست می‌شود. با توجه تحلیل تنش مدل مکانیکی میکرو بازویاب انرژی الکترومغناطیس در نرم‌افزار المان محدود، نتیجه می‌شود که ماده مورد استفاده تیر یک سر گیردار باید از جنس پارلین باشد.



شکل ۶ تحلیل تنش میکرو بازویاب انرژی الکترومغناطیس از جنس سیلیکون [۱ ۱ ۱]

۵- ارائه نتایج و صحنه‌گذاری

در جدول (۱)، مقادیر پارامترهای میکرو بازویاب انرژی الکترومغناطیس مطابق با مرجع [۱] آمده است. ماده مورد استفاده در تیر یک سر گیردار از جنس پارلین می‌باشد.

متوسط مجذور نیروی محرکه القایی (ولتاژ القایی) روی سیم‌پیچ برابر است با:

$$E[\varepsilon^2(t)] = B^2 L_P^2 E[\dot{z}^2(t)] = \frac{\pi S_0 m_{eq} B^2 L_P^2}{b_m + b_e} \quad (19)$$

متوسط مجذور جریان القایی ایجاد شده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E[i^2(t)] = \frac{E[\varepsilon^2(t)]}{(R_L + R_c)^2} = \frac{\pi S_0 m_{eq} B^2 L_P^2}{(b_m + b_e)(R_L + R_c)^2} \quad (20)$$

در نتیجه متوسط توان تولید شده میکرو بازویاب انرژی الکترومغناطیس عبارت است از:

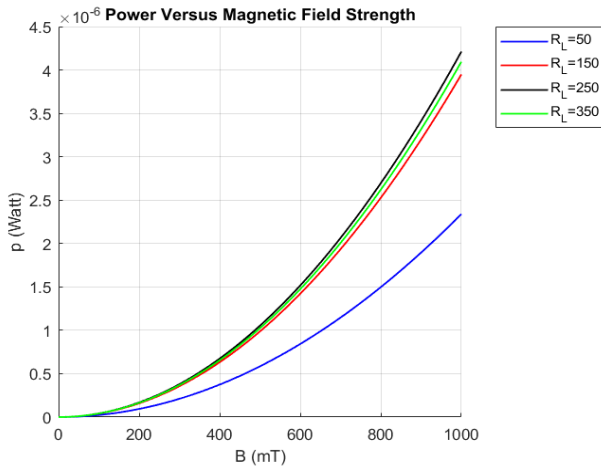
$$E[P] = \frac{1}{2} E[i^2(t)] R_L = \frac{\pi S_0 m_{eq} R_L B^2 L_P^2}{2(b_m + b_e)(R_L + R_c)^2} \quad (21)$$

۴- تحلیل تنش مدل مکانیکی میکرو بازویاب انرژی الکترومغناطیس

تحلیل تنش بر روی مدل مکانیکی میکرو بازویاب انرژی الکترومغناطیس برای حرکت تیر یک سر گیردار انجام می‌شود. مدل مکانیکی میکرو بازویاب انرژی الکترومغناطیس، یک تیر یک سر گیردار با ابعاد $15 \mu m \times 67 \mu m \times 89 \mu m$ است که انتهای آزاد تیر بر اثر میدان مغناطیسی دارای حرکت نسبی $0.17 \mu m$ می‌باشد. با استفاده از نرم افزار انسیس برای دو حالت که جنس تیر یک سر گیردار از پارلین و همچنین سیلیکون [۱ ۱ ۱] است، تحلیل تنش انجام می‌گیرد. شکل (۵) تحلیل تنش مدل مکانیکی میکرو بازویاب انرژی الکترومغناطیس از جنس پارلین را در نرم‌افزار المان محدود نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۵)، بیشترین مقدار تنش برابر $93454 Pa$ است که در سر گیردار تیر اتفاق می‌افتد. تنش تسلیم برای ماده پارلین با مدول الاستیسیته $3/5 \times 10^9 Pa$ و ضریب پواسون 0.4 برابر $55 MPa$ می‌باشد که بیشتر از بیشترین مقدار تنش است و نتیجه گرفته می‌شود که در انجام آزمون مدل مکانیکی میکرو بازویاب انرژی الکترومغناطیس، تیر از جنس پارلین دچار شکست نمی‌شود. در شکل (۶)، تحلیل تنش مدل مکانیکی میکرو بازویاب انرژی الکترومغناطیس از جنس سیلیکون [۱ ۱ ۱] در نرم‌افزار انسیس مشاهده می‌شود.

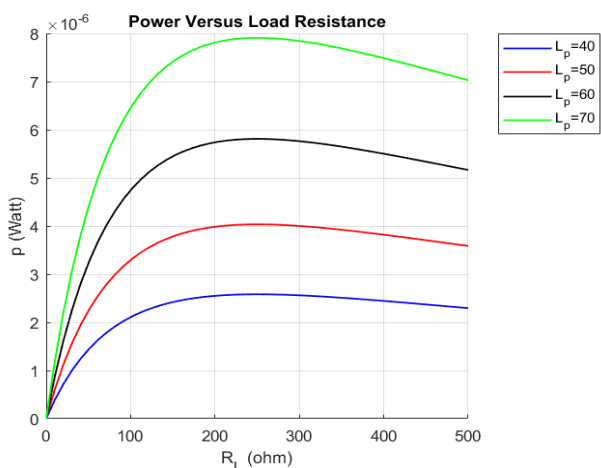
قرار می‌گیرد. شکل (۸)، تغییرات متوسط توان تولید شده میکروبازیاب انرژی الکترومغناطیس بر حسب شدت میدان مغناطیسی آهن‌ریا در مقاومت بارهای مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۸ تغییرات متوسط توان تولید شده بر حسب شدت میدان مغناطیسی آهن‌ریا در مقاومت بارهای مختلف

طبق شکل (۸)، افزایش میدان مغناطیسی آهن‌ریا باعث افزایش متوسط توان تولید شده می‌شود. همچنین در مقاومت بار ۲۵۰ اهم، بیشترین متوسط توان تولید شده را خواهیم داشت و با توجه به مرجع [۱] صحه‌گذاری نتایج انجام می‌شود.

شکل (۹)، تغییرات متوسط توان تولید شده میکروبازیاب انرژی الکترومغناطیس بر حسب مقاومت بار در طول سیم‌پیچ‌های مختلف را نمایش می‌دهد.



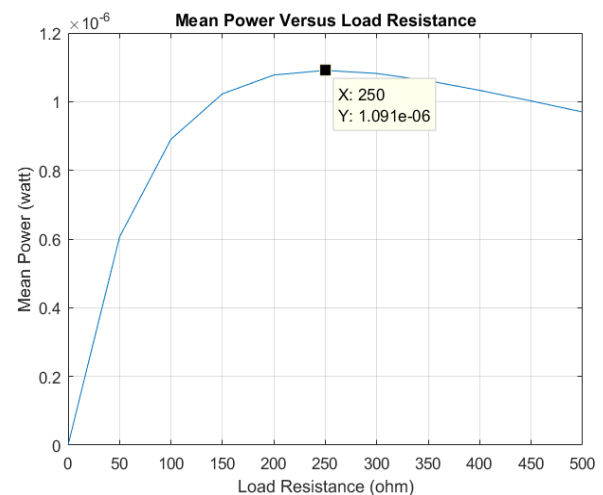
شکل ۹ نمودار تغییرات متوسط توان تولید شده بر حسب مقاومت بار در طول سیم‌پیچ‌های مختلف

طبق شکل (۹)، مشاهده می‌شود که بیشترین متوسط توان تولیدی میکروبازیاب انرژی الکترومغناطیس زمانی است که

جدول ۱ پارامترهای میکروبازیاب انرژی [۱]

مقادیر	پارامترهای میکروبازیاب انرژی
$۸۹۰\mu m \times ۶۷۰\mu m \times ۱۵\mu m$	ابعاد تیر یک سر گیردار
$۰/۰۰۷۵\text{ kg}$	جرم معادل تیر یک سر گیردار
$۳/۵ - ۴/۵\text{ kHz}$	فرکانس طبیعی تیر
$۸\text{ mm} \times ۸\text{ mm} \times ۸\text{ mm}$	ابعاد آهن‌ریا
$۵۰\mu m$	فاصله بین تیر و آهن‌ریا
$۰/۵۰۹\text{ T}$	میدان مغناطیسی آهن‌ریا
$۳۷/۸۲۱ \frac{N.s}{m}$	میرایی مکانیکی
$۲/۱۱ \times ۱۰^۷ \frac{N.s}{m}$	میرایی الکتریکی
$۵۸۰\ \Omega$	مقاومت سیم‌پیچ
۲۶ mm	طول سیم‌پیچ

با توجه به رابطه (۲۱)، با افزایش مقاومت بار، متوسط توان تولید شده میکروبازیاب انرژی الکترومغناطیس ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. شکل (۷)، متوسط توان تولیدی میکروبازیاب انرژی الکترومغناطیس بر حسب مقاومت بار را نشان می‌دهد.



شکل ۷ تغییرات متوسط توان تولید شده بر حسب مقاومت بار میکروبازیاب انرژی الکترومغناطیس

با توجه به شکل (۷) و مقادیر پارامترهای میکروبازیاب جدول (۱)، در مقاومت بار ۲۵۰ اهم، متوسط توان تولید شده بیشترین مقدار را خواهد داشت که با توجه به مرجع [۱]، مقدار بهینه مقاومت بار برای ماکزیمم شدن توان میکروبازیاب انرژی است. در نتیجه درستی نتایج با توجه به مرجع [۱] تأیید می‌شود.

در ادامه، تأثیر پارامترهای میکروبازیاب انرژی الکترومغناطیس بر روی متوسط توان تولید شده مورد مطالعه

- [5] Cao, H., Kong, L., Tang, M., Zhang, Z., Wu, X., Lu, L., and Li, D., An electromagnetic energy harvester for applications in a high-speed rail pavement system, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 243, pp. 108018, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmesci.2022.108018>, (2023).
- [6] Bai, S., Cui, J., Zheng, Y., Li, G., Liu, T., Liu, Y., Hao, C., and Xue, C., Electromagnetic-triboelectric energy harvester based on vibration-to-rotation conversion for human motion energy exploitation, *Applied Energy*, Vol. 329, pp. 120292, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120292>, (2023).
- [7] Wang, W., Li, B., Liu, S., and Wei, Z. H., Bifurcation analysis and nonlinear dynamics of a rolling magnet multistable electromagnetic energy harvester, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 118, pp. 107027, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2022.107027>, (2023).
- [8] Ordonez, V., Arcos, R., and Romeu, J., A high-performance electromagnetic vibration energy harvester based on ring magnets with Halbach configuration, *Energy Conversion, and Management: X*, Vol. 16, pp. 100280, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100280>, (2022).
- [9] Hasani, M., and Rahaghi, M. I., The optimization of an electromagnetic vibration energy harvester based on developed electromagnetic damping models, *Energy Conversion and Management*, Vol. 254, pp. 115271, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115271>, (2022).
- [10] Wang, Y., Wang, P., Li, S., Gao, M., Ouyang, H., He, Q., and Wang, P., An electromagnetic vibration energy harvester using a magnet-array-based vibration-to-rotation conversion mechanism, *Energy Conversion and Management*, Vol. 253, pp. 115146, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115146>, (2022).
- [11] Aloysius, A., Khan, M. A., Lim, W. H., Ramaswamy, M., Qayyum, A., Ang, C. K., and Aramugam, K., Investigation of kinetic energy harvesting from human body motion activities using free-impact electromagnetic generator, *In Sentimental Analysis and Deep Learning: Proceedings of ICSADL 2021*, Springer Singapore, pp. 209-221, DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-5157-1_18, (2022).
- [12] Foong, F. M., Thein, C. K., and Yurchenko, D., A novel high-power density, low-frequency electromagnetic vibration energy harvester based on anti-phase motion, *Energy Conversion and Management*, Vol. 238, pp. 114175, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114175>, (2021).

مقاومت بار ۲۵۰ اهم باشد. همچنین افزایش طول سیم پیچ باعث افزایش متوسط توان تولید شده می شود.

۶- جمع بندی

در مطالعه حاضر، یک میکرو بازویاب انرژی الکترومغناطیس تحت تحریک اتفاقی، جهت بررسی اثر پارامترهای مختلف میکرو بازویاب بر متوسط توان تولید شده مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس پژوهش انجام شده، نتایج به شرح زیر خلاصه می شود:

۱- با در نظر گرفتن تحریک اتفاقی از نوع نویز سفید گوسی، متوسط توان تولید شده میکرو بازویاب انرژی الکترومغناطیس محاسبه می شود.

۲- با تحلیل تنش مدل مکانیکی نتیجه می شود که ماده مورد استفاده در تیر یک سر گیردار میکرو بازویاب انرژی الکترومغناطیس باید از جنس پارلین باشد.

۳- با افزایش مقاومت بار، متوسط توان تولید شده میکرو بازویاب انرژی الکترومغناطیس، ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد.

۴- در مقاومت بار ۲۵۰ اهم، متوسط توان تولیدی میکرو بازویاب انرژی، بیشترین مقدار را خواهد داشت.

۵- افزایش میدان مغناطیسی آهن ربا و طول سیم پیچ باعث افزایش متوسط توان تولید شده میکرو بازویاب انرژی می شود.

۷- مراجع

- [1] Sari, I., Balkan, T., and Kulah, H., An electromagnetic micro power generator for wideband environmental vibrations, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 145, pp. 405-413, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.11.021>, (2008).
- [2] Sari, I., Balkan, T., and Kulah, H., An electromagnetic micro energy harvester based on an array of parylene cantilevers, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 19, No. 10, pp. 105023, DOI: <https://doi.org/10.1088/0960-1317/19/10/105023>, (2009).
- [3] Holm, P., Imbaquingo, C., Mann, B. P., and Bjørk, R., High power electromagnetic vibration harvesting using a magnetic dumbbell structure, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 546, pp. 117446, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117446>, (2023).
- [4] Bahar, M. R. B., Bahrami, M., and Sharifian, M. B. B., Novel structure for electromagnetic micro-power harvester, *Engineering Science & Technology*, pp. 1-13, DOI: <https://doi.org/10.37256/est.4120231636>, (2023).

- Micromechanics and Microengineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 209, DOI: <https://doi.org/10.1088/0960-1317/13/2/307>, (2003).
- [16] Hosaka, H., Itao, K., and Kuroda, S., Evaluation of energy dissipation mechanisms in vibrational microactuators, *In Proceedings IEEE Micro Electro Mechanical Systems an Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robotic Systems, IEEE*, pp. 193-198, DOI: doi.org/10.1109/MEMSYS.1994.555622, (1994).
- [17] Newland, D. E., An introduction to random vibrations and spectral analysis, *Longman Publishing Group*, (1984).
- [13] Zhang, L. B., Dai, H. L., Yang, Y. W., and Wang, L., Design of high-efficiency electromagnetic energy harvester based on a rolling magnet, *Energy conversion and management*, Vol. 185, pp. 202-210, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.089>, (2019).
- [14] Kumar, A., Balpande, S. S., and Anjankar, S. C., Electromagnetic energy harvester for low frequency vibrations using MEMS. *Procedia Computer Science*, Vol. 79, pp. 785-792, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.03.104>, (2016).
- [15] Mizuno, M., and Chetwynd, D. G., Investigation of a resonance microgenerator, *Journal of*