



Energy Harvesting from Beam Vibrations with Piezoelectric Patch under Transient Non-Contact Mass, Applicable in Speed Bumps

Ramin Nasiri^a, Reza Tikani^{a*}, Mostafa Ghayour^a

^a Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 8415683111, Iran

Original Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: Nasiri R, Tikani R, Ghayour M. Energy Harvesting from Beam Vibrations with Piezoelectric Patch under Transient Non-Contact Mass, Applicable in Speed Bumps. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2024;4(4):579-596.

 <https://10.61186/masm.4.4.579>

KEYWORDS

Energy harvesting,
Piezoelectric,
Traffic sensors,
Speed bumps.

ABSTRACT

This study proposes an innovative method for harvesting energy from vehicles as they pass over speed bumps by leveraging piezoelectric materials. The core aim is to harness mechanical vibrations produced by vehicle motion and convert them into electrical energy, which can then be used to power low-energy urban infrastructure, such as traffic sensors and street lighting. To simulate this process, a cantilever beam model fitted with a piezoelectric patch was utilized, with excitation through non-contact magnetic force. The equations of motion were formulated based on the Euler-Bernoulli beam theory and subsequently solved numerically using MATLAB. Experimental validation was carried out by testing the system at two distinct velocities of the passing mass and three varying distances between the mass and the beam. The results show a good correlation between the mathematical model and the experimental data, confirming the model's reliability. Analyses indicate that increasing the velocity of the passing mass causes a decrease in the output voltage, and increasing the distance of the object from the magnet also leads to a decrease in the magnetic force and a drop in the generated voltage. Moreover, the findings suggest that, when optimized, the system can deliver a promising level of efficiency in generating power.

Extended Abstract

1. Introduction

The increasing demand for sustainable and low-maintenance energy solutions in intelligent urban infrastructure has stirred up vast interest in energy harvesting technologies. In this context, piezoelectric materials have become promising candidates because of their ability to convert mechanical vibrations into electrical energy. This work proposes a new approach for harvesting energy produced by the vibrations caused by vehicles when they cross speed bumps. The system exploits a cantilever beam provided with a piezoelectric patch, which is actuated by noncontact magnetic forces to generate sustainable energy appropriate for low-power applications, such as traffic sensors and streetlights. Background and Motivation Conventional approaches to piezoelectric energy harvesting usually refer to direct mechanical coupling with dynamic bodies, entailing wear, and reduced reliability in the long run.

* Corresponding author. Tel.: +989132145116

E-mail address: r_tikani@iut.ac.ir

DOI: <https://10.61186/masm.4.4.579>

Received: January 05, 2025; Received in revised form: March 02, 2025; Accepted: March 17, 2025.

© Author



In order to overcome this constraint, the present study proposes an innovative non-contact method by using magnetic forces to generate vibrations in the cantilever beam, which reduces mechanical wear and increases the durability of the system. The main aim is to harvest vibrational energy produced by vehicles and transform it into usable electrical energy, reflecting increasing focus on energy efficiency and development of smart city projects. This would offer a low-cost solution for powering distributed systems in urban environments, such as traffic control and public lighting networks.

2. Methodology

The proposed energy harvesting system is envisaged as a cantilever beam with a piezoelectric patch mounted near its fixed end to maximize strain and increase energy output (Figure 1). The beam is magnetically coupled to a moving mass that simulates the movement of a vehicle passing over a speed bump.

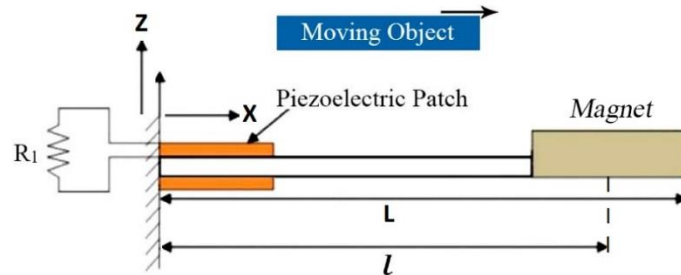


Figure 1. Schematic of a cantilever beam with a piezoelectric patch, and a moving mass passing through

The magnetic forces induce vibrations as the mass moves under the beam, which are then converted to electrical energy by the piezoelectric material. The dynamics are analyzed using Euler-Bernoulli beam theory with the inclusion of electromechanical coupling to account for the coupling between mechanical deformation and electrical charge production.

3. Analytical Modeling

The Lagrangian formulation, through which the kinetic, potential, and electrical energies were expressed in terms of generalized coordinates, was used in deriving the equations of motion for the beam-piezoelectric system. The displacement field was reduced to emphasize transverse motion, thereby reducing the model to a single degree of freedom. Key parameters such as beam stiffness, damping, and piezoelectric coupling coefficients were determined experimentally so as to offer more accuracy for the simulations. The vibrational response of the system was analyzed by obtaining mode shape approximations from finite element modeling. Modal analysis pinpointed the first natural frequency of the beam, which is very important for understanding resonance behavior. The resulting equations were numerically solved using MATLAB, which allowed prediction of the voltage output for different operating conditions.

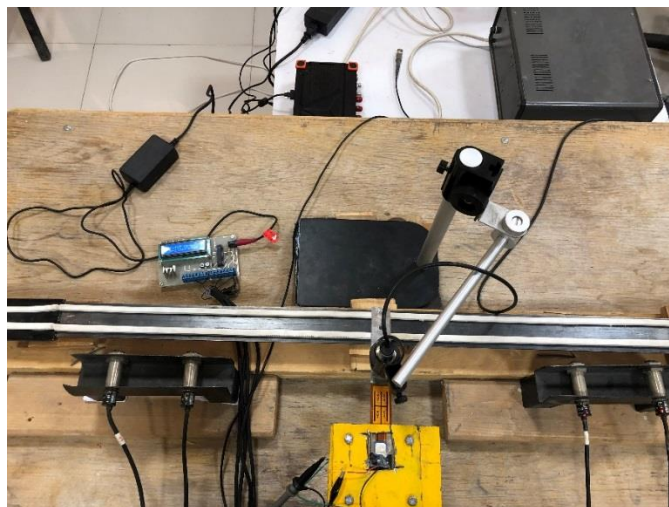


Figure 2. Overview of the energy harvesting system

4. Experimental Setup

Experimental verification was carried out with the help of a specially designed test setup. A cantilever beam, 148 mm long, with a piezoelectric patch bonded near its root, was excited by a magnetically levitated moving mass. The beam was made of stainless steel while the piezoelectric patch used a commercially available material (QP16N). A magnetic ball served as the moving mass and generated variable magnetic forces depending upon its velocity and distance from the beam.

Fundamental experiments involved variation of both the velocity of the mass and its distance from the beam. The generated voltage was measured using a high-impedance data acquisition system under open-circuit conditions. The damping coefficient was determined using logarithmic decrement methods based on measurements of free vibration decay, while the stiffness of the beam was determined via static load testing.

5. Results and Analysis

The system achieved an open-circuit voltage maximum of 3.622 V and delivered a peak power output of 1.40 μW when loaded by a 250 k Ω resistance. A comparison between the numerical simulations and the experimentally measured values revealed a difference of about 16%, due to environmental noise, measurement accuracy, and modeling simplifications.

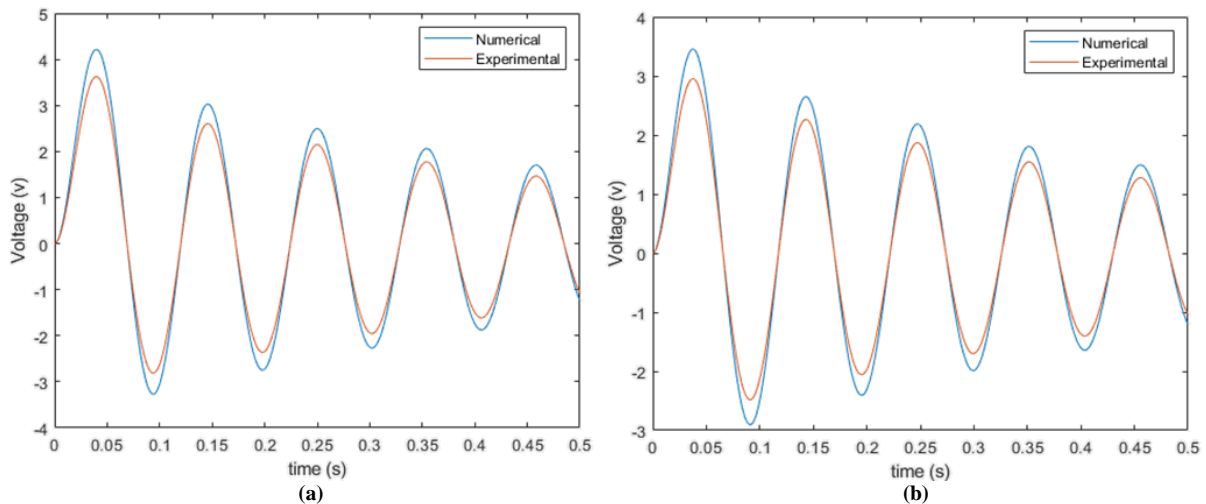


Figure 3. Comparison between measured results and numerical solution for a 25 mm distance of the moving mass at speeds of (a) 0.7 meters per second and (b) 1.4 meters per second

Higher speed in the moving mass decreased the output voltage. Faster motion reduced the residence time to interact with the magnetic field and thus reduced the beam deflection and strain in the piezoelectric patch. Increasing the distance between the magnetic mass and the beam weakened the magnetic force, which reduced vibrations and the voltage output.

Comparison of maximum power in experimental and numerical solutions under the condition of a moving mass speed of 0.7 (m/s) and a distance of 25 mm is shown in Table 1.

Table 1. Comparison of maximum power in experimental and numerical solutions under the condition of a moving mass speed of 0.7 (m/s) and a distance of 25 mm.

Comparison Quantity	Experimental Data	Theoretical Data	Error
Maximum Power at Optimal Resistance (μW)	1.40	7.46	-4.16%

6. Conclusion

This research presents an approach for harvesting energy from vibrations caused by vehicles passing over speed bumps, utilizing piezoelectric patches and non-contact excitation through magnetic force. In this system, a cantilever beam with piezoelectric patches is employed, and as a moving mass passes beneath a magnet attached to the end of the beam, vibrations are generated that convert mechanical energy into electrical energy. The results of the study show that the designed system, under open-circuit conditions, was able to generate a maximum voltage of 3.622 volts. Additionally, an output power of 1.40 microwatts was produced at an optimal resistance of 250 kilo-ohms. The analysis indicates that increasing the speed of the passing mass from 0.7 meters per second to 1.4 meters per second led to a reduction in the output voltage, and increasing the distance of the object from the magnet

also resulted in a decrease in magnetic force and a drop in the generated voltage. Experiments were conducted at three distances: 25 mm, 28.6 mm, and 32.2 mm, with the highest efficiency achieved at a distance of 25 mm. Validation of the numerical model with experimental data showed acceptable agreement, although a discrepancy of approximately 16% was observed due to environmental factors, noise, and simplifications in the simulation model. Considering optimal design and environmental conditions, this system can be employed as a sustainable solution for powering low-consumption urban devices such as traffic sensors and streetlights.



برداشت انرژی از ارتعاشات تیر با وصله پیزوالکتریک تحت جرم غیرتماسی گذرا قابل استفاده در سرعت گیرها

رامین نصیری^{الف}، رضا تیکنی^{ب*}، مصطفی غیور^ج

^{الف} کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، r.nasiri@alumni.iut.ac.ir

^ب دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، r_tikani@iut.ac.ir

^ج استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، ghayour@iut.ac.ir

چکیده	واژگان کلیدی
<p>در این پژوهش، رویکردی نوین برای برداشت انرژی از عبور خودروها از روی سرعت گیر با استفاده از مواد پیزوالکتریک ارائه شده است. هدف اصلی، تبدیل ارتعاشات مکانیکی ناشی از حرکت خودروها به انرژی الکتریکی برای تأمین انرژی دستگاه‌های کم‌مصرف شهری، مانند حسگرهای ترافیکی و چراغ‌های هشدار خیابانی است. به منظور شبیه‌سازی، از یک مدل تیر یک‌سرگردار مجهز به وصله پیزوالکتریک استفاده شده که توسط نیروی مغناطیسی به صورت غیرتماسی تحریک می‌شود. معادلات حرکت این سیستم به روش اویلر-برنولی استخراج و با استفاده از نرم‌افزار متلب حل شده‌اند. اعتبارسنجی مدل با آزمایش‌های تجربی برای دو سرعت جرم عبوری و سه فاصله جرم از تیر انجام گرفته و نتایج نشان‌دهنده دقت مناسب مدل ریاضی در تطابق با داده‌های تجربی هستند. تحلیل‌ها حاکی از آن است که افزایش سرعت جرم عبوری باعث کاهش ولتاژ خروجی شده و افزایش فاصله جسم از آهنربا نیز منجر به کاهش نیروی مغناطیسی و افت ولتاژ تولیدی می‌شود. همچنین، بررسی‌ها نشان می‌دهد که در تنظیمات بهینه، این سیستم می‌تواند راندمان مناسبی در تولید توان ارائه دهد.</p>	<p>برداشت انرژی، پیزوالکتریک، حسگرهای ترافیکی، سرعت گیر.</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۵</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۱۲</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۷</p>

۱- مقدمه

با رشد فناوری و افزایش تقاضا برای سیستم‌های الکترونیکی همراه، بهره‌برداری از انرژی‌های تلف‌شده محیطی به یکی از حوزه‌های پرطرفدار تحقیقاتی تبدیل شده است. در بسیاری از سیستم‌ها، از جمله سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند و دستگاه‌های نظارت بر ترافیک، نیاز به منبع تغذیه پایدار و بدون نیاز به تعویض باتری احساس می‌شود. یکی از رویکردهای نوین در این زمینه، استفاده از انرژی ارتعاشی تولیدشده توسط خودروها در حین عبور از روی سرعت گیرها است که از طریق مواد پیزوالکتریک به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. مواد پیزوالکتریک، به دلیل خاصیت تولید ولتاژ در برابر تنش مکانیکی، گزینه‌ای مناسب برای برداشت انرژی از ارتعاشات محیطی به شمار می‌روند [۱].

تحقیقات متنوعی در زمینه برداشت انرژی از ارتعاشات حاصل از حرکت خودروها در جاده‌ها به کمک مواد پیزوالکتریک ارائه شده است. وانگ و همکاران [۲] یک برداشت کننده انرژی پیزوالکتریک انباشته را معرفی کردند که تولید انرژی الکتریکی از ارتعاشات جاده را با مجموعه پیزوالکتریک به قطر ۱۵ و طول ۳۰ میلی‌متری که حداکثر ولتاژ ۸۶ ولت و بازده انرژی خروجی ۲۱/۴ درصد را در شرایط مختلف ترافیکی به دست می‌آورد. چن و همکاران [۳] به توسعه و آزمایش یک سیستم نوآورانه برداشت

انرژی پیزوالکتریک از ترافیک جاده‌ای پرداختند که با استفاده از مکانیزم تقویت نیروی فشاری، به چگالی انرژی بالایی دست یافتند. ژانگ و همکاران [۴] در مطالعه خود به بررسی یک مدل تحلیلی برای بهبود عملکرد واحدهای برداشت انرژی پیزوالکتریک (PEH) در شرایط ترافیک آزاد پرداخته و نشان دادند عوامل مختلفی از جمله موقعیت جانبی و ویژگی‌های سازه‌ای جاده بر کارایی برداشت انرژی تأثیر می‌گذارند.

چن و همکاران [۵] یک استراتژی جدید برای تأمین برق جاده‌ها از طریق برداشت انرژی مکانیکی ناشی از تغییر شکل‌های متناوب آسفالت ارائه دادند و با انجام تست‌های ردیابی چرخ و توسعه یک مدل الکترومکانیکی، تأثیر شرایط بارگذاری و ویژگی‌های برداشت کننده پیزوالکتریک بر تولید انرژی الکتریکی را بررسی نموده تا بهینه‌سازی مواد و شکل هندسی را برای تولید انرژی بیشینه را پیشنهاد دهند. وانگ و همکاران [۶] یک سیستم برداشت انرژی پیزوالکتریک برای جاده‌ها را بررسی نمودند که با استفاده از مکانیزم تقویت نیروی فشاری، انرژی چگالی بالایی تولید می‌کند. ولتاژ خروجی حداکثر ۲۴ ولت و توان خروجی ۴/۳۸۱ میلی‌وات در این مقاله به ثبت رسیده است. این سیستم به‌طور خاص برای جمع‌آوری انرژی از ترافیک طراحی شده و نتایج آزمایش‌های جاده‌ای نشان می‌دهد که سرعت بالای وسایل نقلیه به بهبود برداشت انرژی کمک می‌کند. دینگ و همکاران [۷] به بررسی برداشت انرژی پیزوالکتریک از فرو رفتگی‌های جاده‌ای ناشی از بارهای ترافیکی پرداخته‌اند. آن‌ها در پژوهش خود از مدل صفحه دو لایه الاستیک برای تحلیل این فرآیند استفاده نمودند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که موقعیت برداشت کننده پیزوالکتریک و ویژگی‌هایی مانند بارگذاری، فرکانس و ضخامت لایه آسفالت تأثیر زیادی بر خروجی ولتاژ و توان تولیدی دارند.

ژانگ و همکاران [۸] روشی برای بسته‌بندی دستگاه‌های برداشت انرژی پیزوالکتریک با استفاده از نایلون MC و رزین اپوکسی پیشنهاد داده و نتایج نشان دادند که کاهش عمق قرارگیری تراشه‌های پیزوالکتریک می‌تواند توان خروجی دستگاه را افزایش دهد. همچنین، یک قانون مقیاس ساده برای حداکثر کردن توان خروجی سیستم بر اساس پارامترهای مرتبط ارائه نمودند. وانگ و همکاران [۹] در پژوهشی به مطالعه یک دستگاه برداشت انرژی از جاده‌ها بر پایه فشردگی با استفاده از مجموعه‌ای از مبدل‌های پیزوالکتریک پرداخته و انتخاب مواد ساختاری آن را بر اساس چهار نیاز فنی برای افزایش خروجی انرژی الکتریکی بررسی نمودند. ابعاد خارجی دستگاه‌ها با توجه به توزیع مسیرهای چرخ خودروها و شرایط فشردگی بهینه‌سازی شده و نتایج نشان داد که این دستگاه می‌تواند با پیکربندی‌های مناسب از جمله تنظیمات خاص ترکیب مواد، حداکثر توان خروجی تا ۵۰/۴۱ میلی‌وات را تحت بارگذاری‌های مختلف تولید کند. وانگ و همکاران [۱۰] یک برداشت کننده انرژی پیزوالکتریک جاده‌ای در مقیاس کامل طراحی نموده و آزمایش‌های میدانی برای ارزیابی عملکرد الکتریکی آن تحت بارهای ترافیکی مختلف را انجام دادند.

سونگ و همکاران [۱۱] یک برداشت کننده انرژی برای جاده‌های پر رفت‌وآمد طراحی و بهینه‌سازی کردند که از تیرهای یک‌سرگردار پیزوالکتریک استفاده می‌کند. با تنظیم فرکانس طبیعی تیرها و اتصال ۴۸ تیر در یک دستگاه با ابعاد $30 \times 30 \times 10$ سانتی‌متر، توان خروجی ۷۳۶ میکرو وات و چگالی توان ۸/۱۹ میلی‌وات بر متر مربع به دست آمد. هوانگ و همکاران [۱۲] یک برداشت کننده انرژی پیزوالکتریک با استفاده از سرامیک‌های پیزوالکتریک و رزین اپوکسی طراحی نمودند که می‌تواند انرژی مکانیکی ناشی از بارهای متحرک وسایل نقلیه را به برق تبدیل کند. آن‌ها با توسعه یک مدل الکترومکانیکی نظری و بررسی اثرات پارامترهای مختلف بر کارایی برداشت انرژی، نشان دادند که انتخاب مناسب پارامترهای سیستم می‌تواند منجر به افزایش کارایی این دستگاه شود.

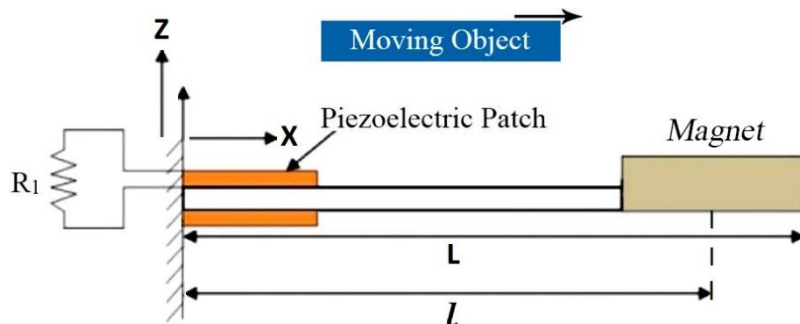
با افزایش تقاضا برای راهکارهای انرژی پایدار، پژوهشگران بر برداشت انرژی از حرکت وسایل نقلیه در جاده‌ها با استفاده از تکنیک‌های نوین متمرکز شده‌اند. یکی از رویکردهای امیدوارکننده، استفاده از اجزای الاستیک در سیستم‌های برداشت انرژی جاده‌ای برای افزایش بازده تبدیل انرژی است که در مطالعات اخیر توسط جانگ و همکاران بررسی شده است [۱۳]. علاوه بر این، فنگ و همکاران نشان دادند برداشت کننده‌های ترکیبی که از مکانیزم‌های پیزوالکتریک و الکترومغناطیسی بهره می‌برند، توان بالقوه بالایی در بهینه‌سازی استخراج انرژی از نیروهای ناشی از ترافیک را دارا هستند [۱۴].

در تحقیقات اشاره شده برداشت انرژی از ارتعاشات و یا تحت فشار ناشی از عبور خودروها از برداشت کننده دارای ماده پیزوالکتریک صورت می‌پذیرد. در این تحقیق، یک سیستم نوین برداشت انرژی مبتنی بر مواد پیزوالکتریک پیشنهاد شده است که هدف آن تبدیل ارتعاشات ناشی از عبور خودروها از روی سرعت‌گیر به انرژی الکتریکی بدون تماس مستقیم و به واسطه نیروی

مغناطیسی بین آهنربای قرار گرفته در انتهای برداشت کننده و جرم عبوری است. این پژوهش به بررسی رفتار مکانیکی و الکتریکی سیستم پیشنهادی پرداخته و پس از استخراج معادلات حاکم بر مسئله، ضمن حل عددی، نتایج را با نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی مقایسه می‌کند.

۲- مدل سازی و استخراج معادلات

در این پژوهش به مدل سازی و استخراج معادلات یک سیستم برداشت انرژی پیزوالکتریک از نوع تیر یک سرگیردار با وصله‌های پیزوالکتریک تحت عبور غیر تماسی جرم متحرک پرداخته شده است (شکل ۱). در این سیستم، انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. عموماً در برداشت انرژی به وسیله مواد پیزوالکتریک، یک تیر یک سرگیردار با لایه‌های پیزوالکتریک بر روی آن استفاده می‌شود که جرم متمرکزی در انتهای آزاد آن مدل سازی شده است. این پژوهش با هدف استخراج و تحلیل معادلات حاکم بر این سیستم و بررسی اثرات عبور جرم متحرک بر کارایی سیستم انجام شده است.



شکل ۱ شماتیک تیر یک سرگیردار با وصله پیزوالکتریک و جرم اضافی و عبور جرم متحرک

۲-۱- معادلات حرکت

برای استخراج معادلات حرکت سیستم، از مدل الکترومکانیکی با فرض تیر اویلر-برنولی استفاده شده است. در این مدل، تمامی انرژی‌های جنبشی و پتانسیل هریک از اجزای سیستم مورد بررسی و محاسبه قرار گرفته‌اند. میدان جابه‌جایی غیر صفر در تیر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$u(x, z, t) = [u^0(x, t) - z \frac{\partial w(x, t)}{\partial x}, 0, w(x, t)] \quad (1)$$

که در آن $w(x, t)$ و $u^0(x, t)$ به ترتیب جابه‌جایی محوری و عرضی محور خنثی می‌باشند. با توجه به اینکه در این تحقیق فقط جابه‌جایی عرضی محور خنثی در نظر گرفته شده است، بردار جابه‌جایی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$u(x, z, t) = -z \frac{\partial w(x, t)}{\partial x} \quad (2)$$

انرژی‌های جنبشی و پتانسیل به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$T_k = \frac{1}{2} \int_{V_S} \rho_S \dot{u}^t \dot{u}^t dV_S + \frac{1}{2} \int_{V_P} 2\rho_P \dot{u}^t \dot{u}^t dV_P \quad (3)$$

$$U = \frac{1}{2} \int_{V_S} S^t T dV_S + \frac{1}{2} \int_{V_P} 2S^t T dV_P \quad (4)$$

همچنین انرژی الکتریکی داخلی پیزوالکتریک به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$W_e = \frac{1}{2} \int E^t D dV_P \quad (5)$$

در معادلات (۳)، (۴) و (۵) V_S و V_P به ترتیب حجم بخش المان پیزوالکتریک و بخش زیر سازه برداشت کننده هستند. به طور مشابه ρ_S و ρ_P چگالی هر کدام از بخش‌های یاد شده را نشان می‌دهند. کمیت‌های E و D, T, S که به ترتیب بردارهای کرنش، تنش، میدان الکتریکی و جابه‌جایی الکتریکی هستند. در اینجا بالا نویس t ترانهادهی بردار است.

معادلات ساختاری پیزوالکتریک به صورت زیر ارائه می‌شوند:

$$\begin{Bmatrix} T \\ D \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^E & -e^t \\ e & \varepsilon^S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S \\ E \end{Bmatrix} \quad (6)$$

با توجه به فرض تیر اویلر-برنولی برای تیر یک‌سرگردار برداشت‌کننده اعوجاج برشی و تأثیرات اینرسی چرخشی قابل چشم‌پوشی است؛ بنابراین فرم تانسوری معادلات ساختاری پیزوالکتریک خطی برای مود خمش در فرم تنش - صفحه‌ای به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{Bmatrix} T_1 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{c}_{11}^E & -\bar{e}_{31} \\ \bar{e}_{31} & \bar{\varepsilon}_{33}^S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_1 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

در اینجا \bar{c}_{11}^E مؤلفه‌ی سختی الاستیک در میدان الکتریکی ثابت، \bar{e}_{31} ثابت مؤثر پیزوالکتریک و $\bar{\varepsilon}_{33}^S$ مؤلفه گذردهی در کرنش ثابت است.

معادلات نهایی انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$T_{tot} = \frac{1}{2} \int \rho_S A_S \dot{u}_1^2 dx + \frac{1}{2} \int 2 \rho_p A_p \dot{u}_1^2 dx \quad (8)$$

$$U_{tot} = \frac{1}{2} \int Y_S I_S S_1^2 dx + \frac{1}{2} \int 2[\bar{c}_{11}^E I_P S_1^2 - \theta v(t) S_1] dx \quad (9)$$

نیروی الکترومغناطیسی بین جرم متمرکز و جرم متحرک به وجود می‌آید که کار مجازی نیروی الکترومغناطیسی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\delta W_{ele} = \int_0^l F_{ele} \delta w dx \quad (10)$$

که در آن δW_{ele} ، F_{ele} و δw به ترتیب کار مجازی نیروی الکترومغناطیسی، نیروی مغناطیسی و جابه‌جایی مجازی جرم متمرکز می‌باشد.

در این پژوهش بر اساس تئوری تیر اویلر - برنولی مؤلفه جابه‌جایی بیان شده است. همچنین جابه‌جایی نسبی سازه، به صورت جمع nr تابع شکل مود مستقل، $\varphi_{ri}(x)$ ، ضرب در مختصات مکانیکی تعمیم یافته، $r_i(t)$ ، نوشته می‌شود؛ با توجه به غالب بودن مود اول تیر، در ادامه صرفاً مود اول در نظر گرفته شده است. بنابراین:

$$w = \psi_{r1}(x)r_1(t) \quad (11)$$

لازم به ذکر است بر اساس روش مودهای فرضی، تابع در نظر گرفته شده در رابطه (۱۱) باید حداقل شرایط مرزی هندسی را ارضا کند. بنابراین کرنش طبق رابطه (۱۲) به دست می‌آید:

$$s_1(x, t) = \frac{\partial u}{\partial x} = -z \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} = \psi''_{r1} r_1(t) \quad (12)$$

که پرایم‌ها نشان‌دهنده مشتقات مکانی هستند. با توجه به توضیحات ارائه شده، معادلات انرژی سیستم موردنظر به صورت یک سیستم یک درجه آزادی با مختصات تعمیم یافته $r(t)$ گسسته سازی شد. با جایگذاری مقادیر جابجایی و کرنش در روابط (۸) و (۹)، با استفاده از رابطه لاگرانژ برای مختصات تعمیم یافته $r(t)$ و $r(t)$ (مربوط به ولتاژ پیزوالکتریک) (رابطه (۱۳) و (۱۴))، می‌توان معادلات حرکت را محاسبه نمود.

$$\frac{d}{dt} \left\{ \frac{\partial T}{\partial \dot{r}} \right\} - \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial U}{\partial r} - \frac{\partial W_e}{\partial r} = Q_{nc} r \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt} \left\{ \frac{\partial T}{\partial \dot{v}} \right\} - \frac{\partial T}{\partial v} + \frac{\partial U}{\partial v} - \frac{\partial W_e}{\partial v} = Q_{nc} v \quad (14)$$

در رابطه (۱۳) و (۱۴)، $Q_{nc} r$ و $Q_{nc} v$ به نیروی‌های تعمیم یافته متناظر با هر کدام از مختصات تعمیم یافته اشاره دارند لازم به ذکر است که تعداد معادلات به تعداد مختصات تعمیم یافته مرتبط می‌باشد. معادلات حرکت به کمک معادلات لاگرانژ

به صورت زیر به دست می آید:

$$M\ddot{r} + Kr - \Theta v = \int_0^l F_{ele} \psi_{r1} \delta r_1(t) dx = F_{ele} \psi_{r1x=l} \quad (15)$$

$$\Theta^t r + C_p v = Q(t) \quad (16)$$

در معادلات فوق M جرم کل معادل سیستم، K سختی معادل سیستم، Θ ثابت توزیع مکانیکی، v ولتاژ الکتریکی تولید شده توسط وصله‌های پیزوالکتریک، F_{ele} نیروی الکترومغناطیسی ایجاد شده بین جرم متمرکز و جرم متحرک، $Q(t)$ بار الکتریکی تولید شده در سیستم (برابر $-v/R$) و C_p ظرفیت خازنی وصله پیزوالکتریک است. این کمیت‌ها برابرند با:

$$M = \int_{V_s} \psi_{r1}^t \rho_s \psi_{r1} dV_s + \int_{V_p} 2\psi_{r1}^t \rho_p \psi_{r1} dV_p + M_0(\psi_{r1}(L))^t \psi_{r1}(L) + I_0(\psi'_{r1}(L))^t \psi'_{r1}(L) \quad (17)$$

که در آن:

$$I_0 = I_{yy} + M_0(L_0^2 + h^2) \quad (18)$$

در اینجا m_0 جرم آهنربای ثابت، I_{yy} ممان اینرسی آهنربای ثابت حول مرکز جرمش و h فاصله بین مرکز جرم آهنربای ثابت و تار خنثی است. همچنین K ، Θ و C_p برابرند با:

$$K = \int_{V_s} (\psi''_{r1})^t (Y_s) (I_s) (\psi''_{r1}) dx + \int_{V_p} 2(\psi''_{r1})^t (c^E) (I_s) (\psi''_{r1}) dx \quad (19)$$

$$\Theta = \frac{\bar{\epsilon}_{31} b_p}{2h_p} [(h_p + \frac{h_s}{2})^2 - (\frac{h_s}{2})^2] \quad (20)$$

$$C_p = \bar{\epsilon}_{33}^s \frac{l_p b_p}{2h_p} \quad (21)$$

۲-۲- مشخصات برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک

برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک استفاده شده در این پژوهش، شامل یک تیر یک سر گیردار از جنس استیل ضدزنگ است که دو وصله پیزوالکتریک ساخت شرکت ماید (QP16N) بر روی آن چسبانده شده‌اند. وصله‌های پیزوالکتریک در نزدیکی نقطه گیردار تیر نصب شده‌اند تا به منظور بهینه‌سازی تولید انرژی، بیشترین میزان کرنش را تجربه کنند. برای ایجاد ارتعاشات در تیر و تحریک پیزوالکتریک‌ها، یک جرم متمرکز (آهنربایی با وزن ۳۹ گرم) به تیر متصل شده است. عبور یک گوی متحرک از زیر آهنربا، نیروی مغناطیسی متغیری را ایجاد می‌کند که منجر به ارتعاشات تیر و در نتیجه تولید ولتاژ در پیزوالکتریک‌ها می‌شود (شکل ۱).

مشخصات هندسی و مواد بکار رفته در برداشت‌کننده، از جمله ابعاد پیزوالکتریک‌ها، خواص ماده پیزوالکتریک و مشخصات هندسی تیر، در جدول ۱ ارائه شده است. شایان ذکر است که به دلیل ضخامت کم و تأثیر ناچیز چسب، اثر آن در محاسبات نادیده گرفته شده است. به دلیل پوشش ناقص تیر توسط وصله‌های پیزوالکتریک، توزیع سختی و چگالی در ساختار برداشت‌کننده ناهمگن است، از این رو برای استخراج تابع آزمایشی برای استفاده در روش مودهای فرضی از یک مدل اجزای محدود استفاده شد. در واقع از آنجاکه لازم بود صرفاً شرایط مرزی هندسی ارضا شود، امکان استفاده از تابع مود اول تیر یک سرگیردار ساده نیز وجود داشت اما برای دقت بیشتر، با توجه به وجود وصله‌های پیزوالکتریک شکل مود اول تیر دارای وصله پیزوالکتریک به عنوان تابع آزمایشی استفاده شد. تحلیل مودال بر روی مدل ایجاد شده انجام شد تا فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی سیستم تعیین شوند. شکل مود پایه سیستم با حل اجزای محدود به دست آمد. مدل اجزای محدود در نرم‌افزار ANSYS ساخته شده است. مدل استفاده شده دارای ۱۴۸۸ گره و ۲۹۷ المان است. نوع المان لایه زیرلایه SOLID186 و نوع المان پیزوالکتریک SOLID226 است که دارای درجه آزادی الکتریکی می‌باشد. تمامی درجات آزادی در لبه گیردار زیرلایه ثابت شده‌اند. وصله پیزوالکتریک دارای درجات آزادی حرکتی مشابه در صفحه اتصال با زیرلایه است. درجات آزادی الکتریکی گره‌ها در صفحه بالایی

وصله به یکدیگر کوپل شده‌اند تا یک درجه آزادی تشکیل دهند؛ در صفحه زیرین، این مقدار به صفر تنظیم شده است.

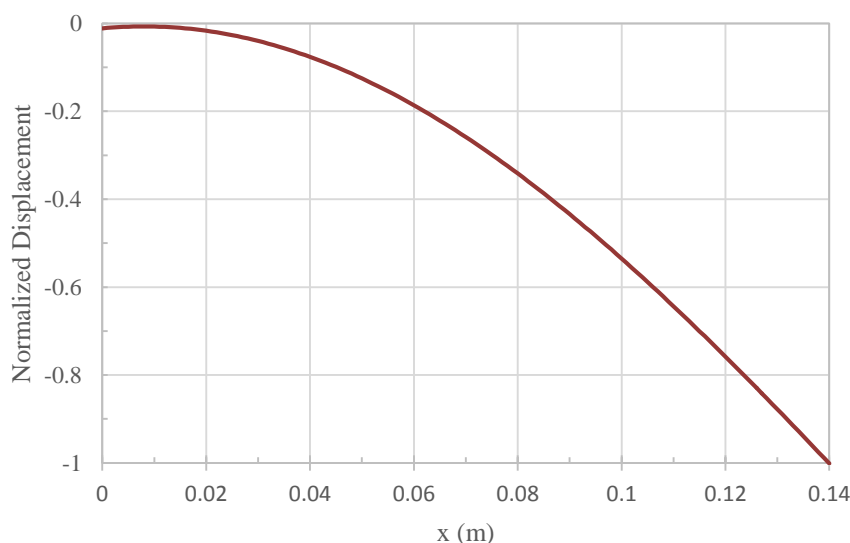
جدول ۱ خواص سیستم برداشت کننده پیزوالکتریک

تعریف کمیت	مقدار
$\rho_P (kg m^{-3})$ چگالی وصله پیزوالکتریک	۷۸۰۰
$\rho_S (kg m^{-3})$ چگالی زیرسازه	۷۵۱۵
$c_{11}^E (GPa)$ مدول یانگ وصله پیزوالکتریک	۶۷
$Y_S (GPa)$ مدول یانگ زیرسازه	۲۱۰
$\varepsilon_{33}^T (F m^{-1})$ ضریب گذردهی مطلق در تنش ثابت	$15/0.82 \times 10^{-9}$
$\varepsilon_{33}^S (F m^{-1})$ ضریب گذردهی مطلق در کرنش ثابت	$12/66 \times 10^{-9}$
$d_{31} (C N^{-1})$ ثابت کرنش	-190×10^{-12}
$e_{31} (C m^{-2})$ ثابت تنش	$-12/75$
$L_S (mm)$ طول تیر	۱۴۸/۴۸۷
$h_S (mm)$ ضخامت تیر	۰/۶
$b_S (mm)$ عرض تیر	۲۵/۴
$L_P (mm)$ طول پیزوالکتریک	۴۵/۷۴
$b_P (mm)$ عرض پیزوالکتریک	۲۰/۵۷۴
$h_P (mm)$ ضخامت پیزوالکتریک	۰/۲۵۴
$M_0 (g)$ جرم متمرکز	۳۹

شکل مود حاصل از حل اجزای محدود با استفاده از ابزار تطبیق منحنی در نرم افزار متلب به یک ترکیب از توابع سینوسی و کسینوسی برازش داده شد تا در حل تحلیلی از آن استفاده شود (شکل ۲). معادله حاصل از برازش به صورت زیر است.

$$\psi_1 = -3.152 * \sinh(0.5197 * x) - 5.931 * \cosh(2.71 * x) + 8.923 * \sinh(-1.934 * x) + 5.875 * \cos(-10.49 * x) - 24.56 * \sinh(-0.8895 * x) + 2.532 * \sin(x); \quad (22)$$

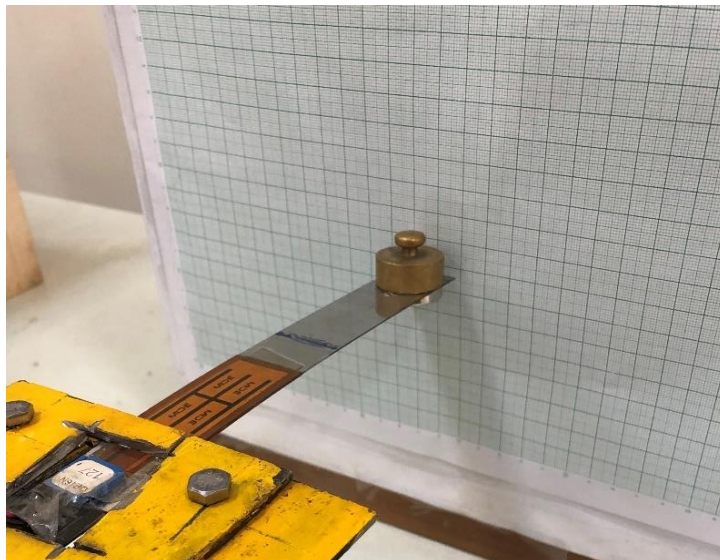
نتایج تحلیل مودال نشان داد که فرکانس طبیعی اول سیستم برابر با ۱۲/۱ هرتز است. شایان ذکر است که این تحلیل تحت فرض‌های اتصال کوتاه الکتریکی وصله‌های پیزوالکتریک و پتانسیل الکتریکی ثابت در کل سطح آن‌ها انجام شده است.



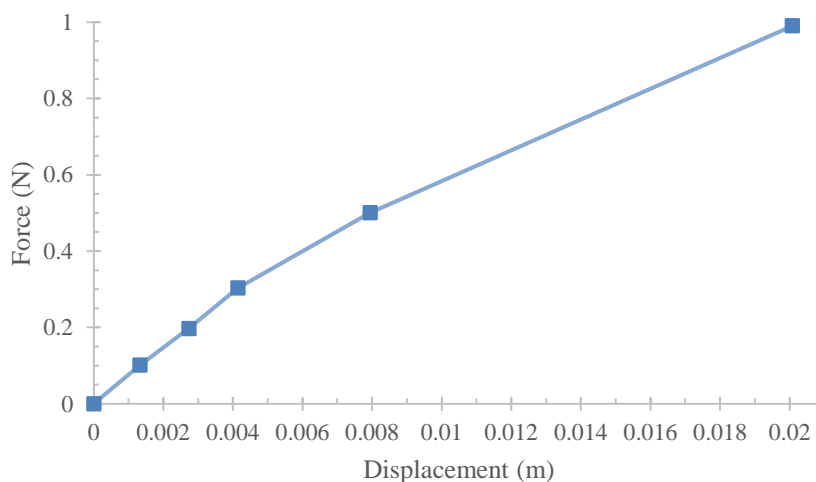
شکل ۲ مود اول نرمال شده برداشت کننده انرژی پیزوالکتریک

۲-۳- استخراج کمیت‌های سختی، میرایی و نیروی الکترومغناطیسی حاصل از عبور جرم

برای تعیین سختی الاستیک برداشت‌کننده، آزمایشی به روش بارگذاری تدریجی انجام شد. در این آزمایش، وزنه‌هایی با جرم‌های مختلف (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ گرم) به تدریج به انتهای برداشت‌کننده اعمال شده و جابه‌جایی ناشی از هر بارگذاری اندازه‌گیری شد (شکل ۳). با رسم نمودار نیرو-جابه‌جایی (شکل ۴)، قسمت خطی اولیه نمودار که نشان‌دهنده رفتار الاستیک ماده است، انتخاب شد. شیب این قسمت خطی، برابر با سختی الاستیک برداشت‌کننده معادل $71/42 \text{ N/M}$ به دست آمده است.



شکل ۳ استخراج سختی برداشت‌کننده انرژی به کمک بارگذاری تدریجی

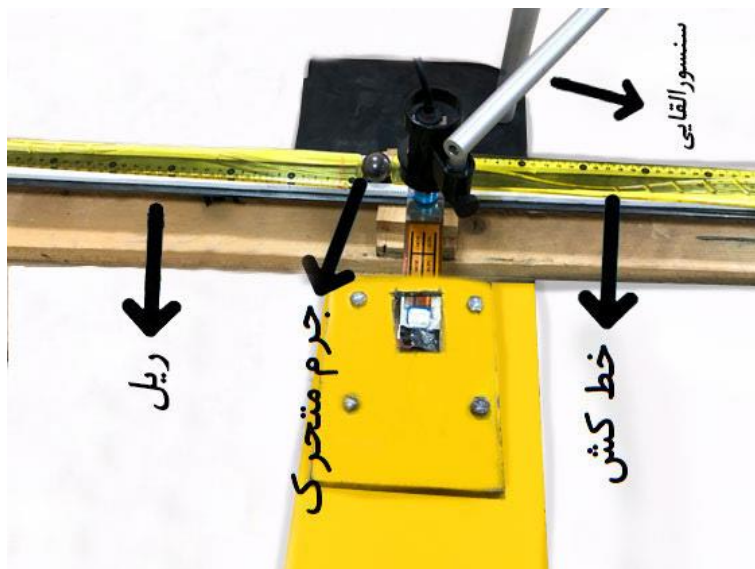


شکل ۴ نمودار سختی الاستیک

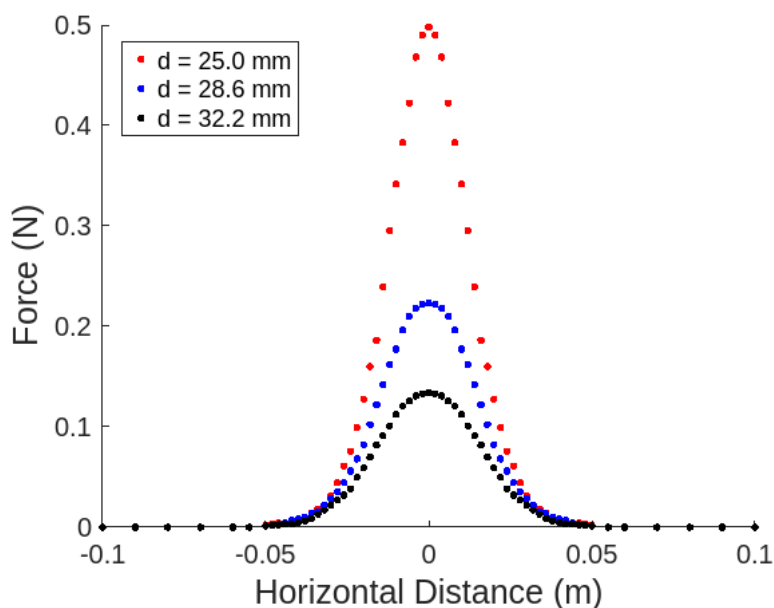
جهت تعیین ضریب استهلاک سیستم، از روش کاهش لگاریتمی بهره گرفته شد. بدین منظور، با اعمال یک ضربه اولیه به انتهای تیر، دامنه‌های متوالی ولتاژ خروجی پیزوالکتریک (ثبت شده توسط آنالیزور دوسافت) اندازه‌گیری گردید. سپس، با استفاده از مقدار کاهش لگاریتمی نمودار حاصل، ضریب میرایی سیستم برابر $\zeta = 0/03$ تعیین گردید.

برای بررسی تأثیر فاصله بر نیروی الکترومغناطیسی بین آهنربا و جسم آهنی متحرک، آزمایشی طراحی شد. در این آزمایش،

فاصله بین آهنربا و جسم (d) به ترتیب ۲۵، ۲۸/۶ و ۳۲/۲ میلی متر تنظیم شد و نیروی وارد بر آهنربای انتهایی تیر با توجه به میزان جابجایی تیر و سختی محاسبه شده از بخش قبل محاسبه شد. شکل ۵ مجموعه آزمایشگاهی مربوطه را نشان می دهد. طبیعی است که نیروی مغناطیسی با افزایش فاصله به طور قابل توجهی کاهش می یابد. شکل ۶ نمودار نیروی مغناطیسی بر حسب فاصله افقی جسم گذرا را برای هر فاصله نشان می دهد.



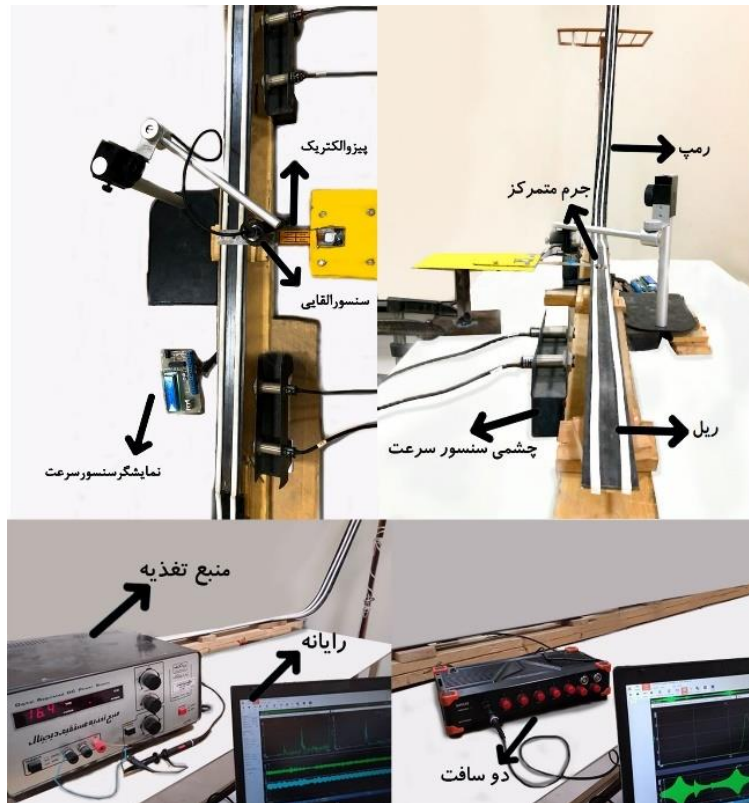
شکل ۵ نمای کلی سیستم تجربی جهت تعیین نیرو بین جسم آهنی و آهنربا



شکل ۶ نمودار حاصل از آزمایش نیروی مغناطیسی بر حسب فاصله افقی جسم گذرا در فواصل ۲۵، ۲۸/۶ و ۳۲/۲ میلی متری

۳- آزمون تجربی برداشت انرژی ناشی از عبور جرم

اندازه گیری ولتاژ تولیدی در وصله های پیزوالکتریک متصل به هم به صورت سری با مقاومت بار R_L ، به کمک یک آنالیزور دوسافت با مقاومت داخلی ۱۰ مگا اهم (حالت مدار باز) انجام شد. برای تحریک برداشت کننده، جرمی از روی یک سطح شیب دار رها شده و با عبور از زیر برداشت کننده، ارتعاشات لازم را ایجاد می نمود (شکل ۷). ولتاژ تولید شده در سه فاصله مختلف و با دو سرعت متفاوت، توسط آنالیزور دوسافت ثبت گردید.



شکل ۷ نمای کلی سیستم برداشت انرژی

۴- مقایسه نتایج تئوری و تجربی

حل عددی معادلات استخراج شده به کمک روش رانگ-کوتا^۱ و به کمک تابع ode45 در نرم افزار متلب انجام شده است. برای اعتبارسنجی مدل عددی، فرکانس طبیعی اول سیستم به صورت تجربی اندازه گیری و با نتایج حاصل از شبیه سازی مقایسه شد. همان طور که در جدول ۲ مشاهده می شود، اختلاف بین فرکانس طبیعی اندازه گیری شده و محاسبه شده حدود ۵/۱۳ درصد است. این اختلاف می تواند ناشی از عوامل مختلفی مانند خطاهای اندازه گیری، ساده سازی های انجام شده در مدل عددی و همچنین خطاهای عددی باشد. با این حال، با توجه به پیچیدگی سیستم و عوامل مؤثر بر آن، می توان نتیجه گرفت که توافق بین نتایج تجربی و عددی در حد قابل قبولی است و اعتبار مدل عددی را تأیید می کند.

جدول ۲ خطای فرکانس اول طبیعی سیستم میان داده های تجربی و حل عددی در حالت مدار باز

فرکانس	داده تجربی	حل عددی	درصد خطا
فرکانس طبیعی اول، $\omega_1 (Hz)$	۱۰/۱۲	۹/۶	۵/۱۳

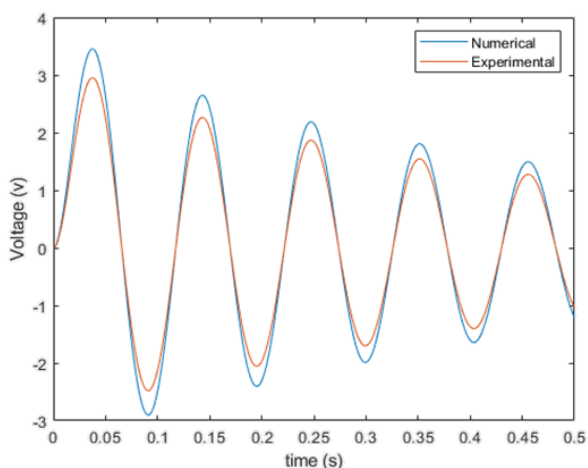
$$\text{درصد خطا} = \frac{\text{داده نظری} - \text{داده تجربی}}{\text{داده تجربی}} \times 100$$

۴-۱- مقایسه ولتاژهای محاسبه شده و اندازه گیری شده

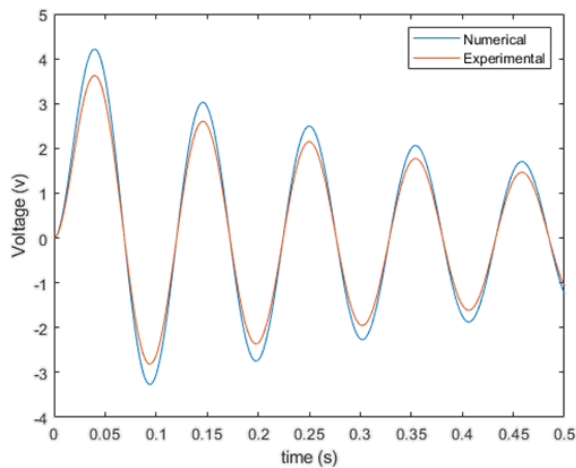
در این بخش، مقایسه ای بین ولتاژهای محاسبه شده از طریق حل های عددی و ولتاژهای اندازه گیری شده از آزمایش های تجربی در فواصل و سرعت های مختلف در شرایط مدار باز ارائه شده است. در شکل ۸ تا ۱۰ نمودارهای مربوط به ولتاژ و خطای اندازه گیری در این مقایسه نمایش داده شده اند. نمودارها برای دو حالت سرعت جسم عبوری برابر ۰/۷ و ۱/۴ متر بر ثانیه در سه

¹ Runge-Kutta method

فاصله عمودی ۲۵، ۲۸/۶ و ۳۲/۲ میلی متری رسم شده است.

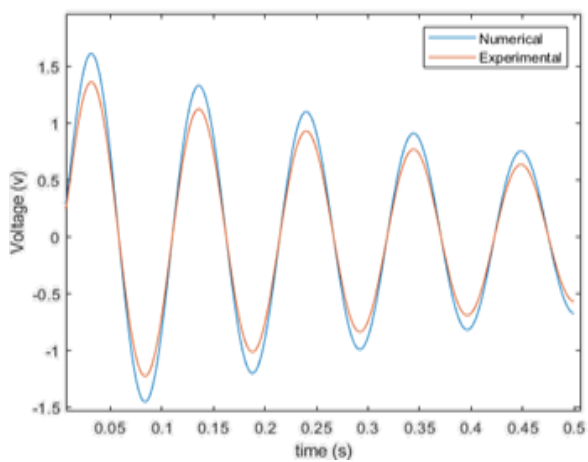


(ب)

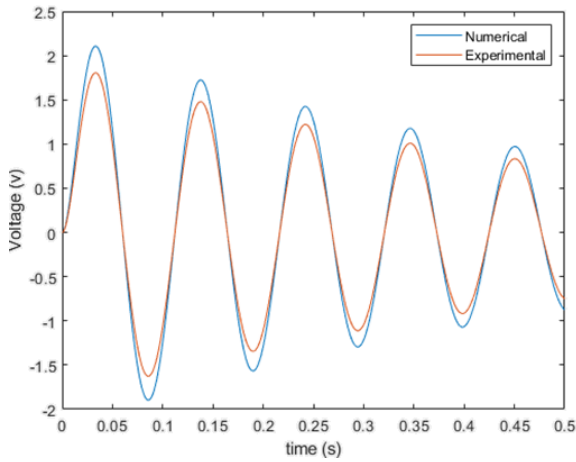


(الف)

شکل ۸ مقایسه بین نتایج اندازه گیری شده و حل عددی برای فاصله ۲۵ میلی متری جرم عبوری در سرعت (الف) ۰/۷ متر بر ثانیه و (ب) ۱/۴ متر بر ثانیه

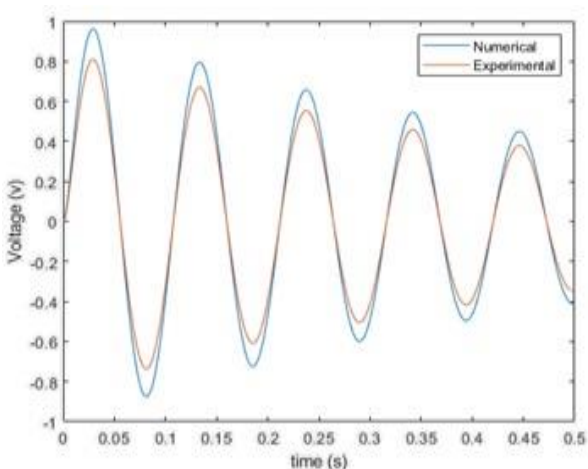


(ب)

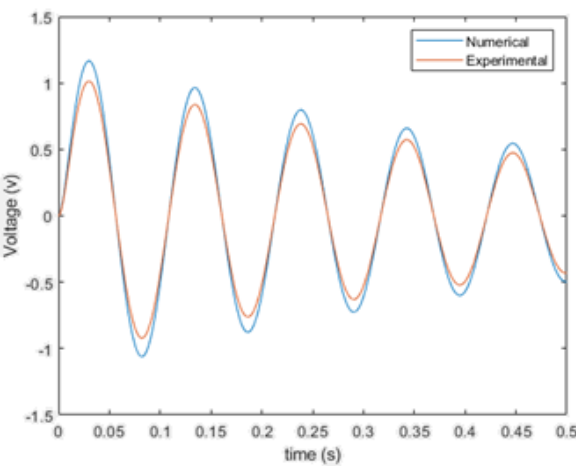


(الف)

شکل ۹ مقایسه بین نتایج اندازه گیری شده و حل عددی برای فاصله ۲۸/۶ میلی متری جرم عبوری در سرعت (الف) ۰/۷ متر بر ثانیه و (ب) ۱/۴ متر بر ثانیه



(ب)



(الف)

شکل ۱۰ مقایسه بین نتایج اندازه گیری شده و حل عددی برای فاصله ۳۲/۲ میلی متری جرم عبوری در سرعت (الف) ۰/۷ متر بر ثانیه و (ب) ۱/۴ متر بر ثانیه

در تحلیل اثر تغییر سرعت و فاصله بر میزان ولتاژ خروجی، از شکل ۸ تا ۱۰ نتیجه می‌شود با افزایش سرعت، میزان ولتاژ برداشت شده کاهش یافته است. به عبارتی حرکت سریع جرم باعث کاهش تأثیرگذاری بر تیر جهت جابجایی و در نتیجه ایجاد ولتاژ می‌شود. همچنین با افزایش فاصله جسم از آهنربا همان‌گونه که در محاسبه نیروی مغناطیسی در حالت استاتیکی بیان شد، در حالت جرم گذرا نیز با افزایش فاصله جسم از آهنربا میزان نیرو کاهش یافته و در نتیجه ولتاژ تولیدی نیز کاهش می‌یابد. در حالت کلی می‌توان سرعت بهینه عبور جرم را برای برداشت توان الکتریکی بیشینه از روش تحلیلی استخراج نمود. این سرعت به فرکانس طبیعی سیستم بستگی دارد. در اینجا سرعت‌های انتخاب شده سرعت‌هایی هستند که در آزمون‌های تجربی امکان ایجاد آن فراهم بود و مقایسه انجام شده بر این اساس صورت پذیرفت. جهت تحلیل جامع‌تر از عملکرد سیستم می‌توان سرعت بهینه را محاسبه و تغییرات توان برداشتی را در اطراف آن سرعت مدنظر قرار داد.

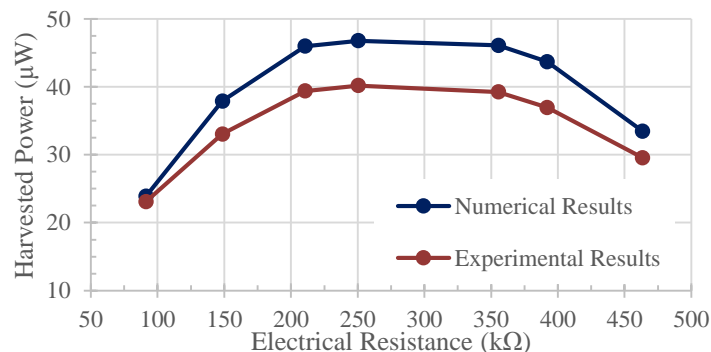
اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و راه‌حل‌های عددی می‌تواند ناشی از شرایط واقعی باشد که به‌طور کامل در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته نشده است. عواملی مانند نویز محیطی، کالیبراسیون تجهیزات و تکنیک‌های اندازه‌گیری می‌توانند بر ولتاژ برداشتی تأثیر بگذارند. جدول ۳ مقایسه نتایج تجربی و عددی را برای حالت‌های مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۳ مقایسه ولتاژ بیشینه داده‌های تجربی و نظری در حالت مدار باز در سرعت‌ها و فواصل مختلف

درصد خطا	داده نظری	داده تجربی	کمیت اندازه‌گیری شده
-۱۶/۲	۴/۲۱۱	۳/۶۲۲	(V) ولتاژ ماکزیمم سرعت (m/s) ۱/۷ در فاصله ۲۵ میلی‌متری
-۱۶/۹	۳/۴۵۲	۲/۹۵۱	(V) ولتاژ ماکزیمم سرعت (m/s) ۱/۴ در فاصله ۲۵ میلی‌متری
-۱۶/۵	۲/۱۰۵	۱/۸۰۵۴	(V) ولتاژ ماکزیمم سرعت (m/s) ۰/۷ در فاصله ۲۸/۶ میلی‌متری
-۱۸/۴	۱/۶۰۷	۱/۳۵۷	(V) ولتاژ ماکزیمم سرعت (m/s) ۱/۴ در فاصله ۲۸/۶ میلی‌متری
-۱۵/۵	۱/۱۶۷	۱/۰۱۳۴	(V) ولتاژ ماکزیمم سرعت (m/s) ۰/۷ در فاصله ۳۲/۲ میلی‌متری
-۱۸/۸	۰/۹۶	۰/۸۰۷۹	(V) ولتاژ ماکزیمم سرعت (m/s) ۱/۴ در فاصله ۳۲/۲ میلی‌متری

۴-۲- مقایسه توان الکتریکی برداشتی

به‌منظور محاسبه توان الکتریکی برداشتی لازم است خروجی ولتاژ تولید شده توسط وصله پیزوالکتریک به بار الکتریکی متصل شود. توان بیشینه به حداکثر توان خروجی که در حضور یک مقاومت خارجی به دست می‌آید و از رابطه $P_{out} = v^2/R$ محاسبه می‌شود، اطلاق می‌شود. نمودار مربوط به توان بیشینه در آزمایش تجربی و حل عددی برای مقادیر مختلف مقاومت الکتریکی در شرایط سرعت (m/s) ۰/۷ جرم عبوری و از فاصله ۲۵ میلی‌متری در شکل ۱۱ ارائه شده است. توان بیشینه در حالت تجربی و حل عددی در مقاومت ۲۵۰ کیلو اهم (مقاومت بهینه) برداشت شده است. جدول ۴ مقایسه بین میزان توان برداشتی در حالت تجربی و حل عددی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ مقایسه توان برداشتی در حالت تجربی و حل عددی برای مقاومت الکتریکی متفاوت در شرایط سرعت (m/s) ۰/۷ جرم عبوری و از فاصله ۲۵ میلی‌متری

جدول ۴ مقایسه توان بیشینه در حل تجربی و عددی در شرایط سرعت $0.7 (m/s)$ جرم عبوری و از فاصله ۲۵ میلی‌متری

کمیت مقایسه	داده تجربی	داده نظری	درصد خطا
(μW) توان بیشینه در مقاومت بهینه	۴۰/۱	۴۶/۷	-۱۶/۴

۵- مقایسه روش حاضر با سایر روش‌ها

روش پیشنهادی این پژوهش (برداشت انرژی از ارتعاشات تیر با استفاده از وصله‌های پیزوالکتریک و تحریک غیر تماسی مغناطیسی) دارای مزایای قابل توجهی از جمله راندمان بالا، قابلیت اطمینان و کاهش سایش و فرسودگی است. با این حال، این روش دارای معایبی مانند وابستگی به سرعت و فاصله عبور جرم، محدودیت در میزان انرژی تولیدی و هزینه‌های اولیه نسبتاً بالا است. در مقایسه با سایر روش‌های برداشت انرژی، روش پیشنهادی به‌ویژه برای کاربردهای کم‌مصرف شهری (مانند حسگرهای ترافیکی و چراغ‌های خیابانی) مناسب است، اما برای کاربردهای پر مصرف یا در مقیاس‌های بزرگ‌تر نیاز به بهبود و بهینه‌سازی دارد. در جدول ۵ روش‌های مختلف برداشت انرژی به‌منظور استفاده در کاربردهای کم‌مصرف شهری مقایسه شده است.

جدول ۵ مقایسه مزایا و معایب روش‌های برداشت انرژی

روش برداشت انرژی	مزایا	معایب
روش پیشنهادی (پیزوالکتریک + تحریک غیر تماسی)	راندمان بالا در تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی، کاهش سایش و فرسودگی، قابلیت اطمینان بالا، هزینه‌های نگهداری پایین	وابستگی به سرعت و فاصله عبور جرم، محدودیت در میزان انرژی تولیدی، هزینه‌های اولیه نسبتاً بالا، محدودیت در مقیاس‌پذیری
پیزوالکتریک مستقیم (تعبیه شده در جاده)	سادگی در طراحی، قابلیت نصب در جاده‌ها	سایش و فرسودگی سریع مواد، نیاز به تعمیر و نگهداری مکرر، حساسیت به بارهای سنگین
سلول‌های خورشیدی	تولید انرژی زیاد در شرایط مناسب، عدم نیاز به اجزای متحرک	وابستگی به نور خورشید، هزینه‌های اولیه بالا، نیاز به فضای بزرگ برای نصب
توربین‌های بادی	تولید انرژی زیاد در مناطق بادخیز، قابلیت استفاده در مقیاس بزرگ	وابستگی به وزش باد، هزینه‌های اولیه و نگهداری بالا، ایجاد آلودگی صوتی
روش‌های القایی (سیم‌پیچ و آهنربا)	قابلیت استفاده در شرایط مختلف، عدم نیاز به تماس مستقیم	راندمان پایین‌تر نسبت به پیزوالکتریک، نیاز به اجزای پیچیده، حساسیت به نویز الکترومغناطیسی

۶- نتیجه‌گیری

این پژوهش، رویکردی برای برداشت انرژی از ارتعاشات ناشی از عبور خودروها از روی سرعت‌گیرها ارائه داده است که در آن از وصله‌های پیزوالکتریک و تحریک غیر تماسی توسط نیروی مغناطیسی استفاده شده است. در این سیستم، تیر یک‌سرگرداری با وصله‌های پیزوالکتریک به کار رفته و با عبور جرم متحرک از زیر آهنربای متصل به انتهای تیر، ارتعاشاتی ایجاد می‌شود که انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که سیستم طراحی شده در شرایط مدار باز توانسته است حداکثر ولتاژ $3/622$ ولت را ایجاد کند. همچنین توان خروجی $40/1$ میکرووات در مقاومت بهینه 250 کیلو اهم تولید شده است. تحلیل‌ها حاکی از آن است که افزایش سرعت جرم عبوری از 0.7 متر بر ثانیه به $1/4$ متر بر ثانیه باعث کاهش ولتاژ خروجی شده و افزایش فاصله جسم از آهنربا نیز منجر به کاهش نیروی مغناطیسی و افت ولتاژ تولیدی می‌شود. آزمایش‌ها در سه فاصله 25 ، $28/6$ و $32/2$ میلی‌متری انجام شده است که بیشترین بازده در فاصله 25 میلی‌متری به دست می‌آید. اعتبارسنجی مدل عددی با داده‌های تجربی حاکی از تطابق قابل قبول نتایج است، اگرچه اختلاف حدود 16 درصدی به دلیل عوامل محیطی، نویز و ساده‌سازی مدل شبیه‌سازی مشاهده شد. این سیستم با در نظر گرفتن طراحی بهینه و شرایط محیطی، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار پایدار برای تأمین انرژی دستگاه‌های کم‌مصرف شهری مانند حسگرهای ترافیکی و چراغ‌های هشدار خیابانی به کار گرفته شود. البته لازم به ذکر است در کاربردهای واقعی بایستی آرایه‌ای از این برداشت‌کننده‌ها درون سرعت‌گیر استفاده شود تا امکان تأمین انرژی مورد نیاز را فراهم آورد.

Authorship Contribution Statement

Ramin Nasiri



Biography: MSc. Student at Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Contribution Statement: Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Software, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing.

Dr. Reza Tikani



Biography: Associate Professor at Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Contribution Statement: Conceptualization, Resources, Supervision, Project administration, Investigation, Writing – review & editing.

Dr. Mostafa Ghayour



Biography: Professor at Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Contribution Statement: Resources, Supervision, Writing – review & editing.

۷- مراجع

- [1] Khorshidi K, Karimi M, and Rezaeisaray M. Piezoelectric Energy Harvesting from Functionally Graded Beams Using Modified Shear Deformation Theories. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2022;2: 136–154.
- [2] Wang S, Wang C, Yuan H, Ji X, Yu G, and Jia X, Size effect of piezoelectric energy harvester for road with high efficiency electrical properties. *Appl Energy*, 2023; 330: 120379.
- [3] Chen C, Xu T.-B, Yazdani A, and Sun J.-Q. A high density piezoelectric energy harvesting device from highway traffic — System design and road test. *Appl Energy*. 2021; 299: 117331.
- [4] Zhang Y, Lai Q, Wang J, and Lü C. Piezoelectric Energy Harvesting from Roadways under Open-Traffic Conditions: Analysis and Optimization with Scaling Law Method. *Energies (Basel)*. 2022; 15: 3395.
- [5] Chen Y, Zhang H, Zhang Y, Li C, Yang Q, Zheng H, Lü C. Mechanical Energy Harvesting From Road Pavements Under Vehicular Load Using Embedded Piezoelectric Elements. *J Appl Mech*. 2016; 83: 4033433.
- [6] Wang C, Zhou R, Wang S, Yuan H, Cao H. Structure optimization and performance of piezoelectric energy harvester for improving road power generation effect. *Energy*. 2023; 270: 126896.
- [7] Ding G, Zhao X, Wang J, Xu C. Vibration energy harvesting from roads under traffic loads. *Road Materials and Pavement Design*. 2020; 21: 780–799.
- [8] Zhang H, Huang K, Zhang Z, Xiang T, and Quan L. Piezoelectric Energy Harvesting From Roadways Based on Pavement Compatible Package. *J Appl Mech*. 2019; 86: 091012.

- [9] Wang C, Zhao J, Li Q, and Li Y. Optimization design and experimental investigation of piezoelectric energy harvesting devices for pavement. *Appl Energy*. 2018; 229: 18–30.
- [10] Wang J, Qin X, Liu Z, Shi K, Ding G, Li X, Cai G. Experimental field study on a full-scale road piezoelectric energy harvester. *Smart Mater Struct*. 2022; 31: 055003.
- [11] Song Y, Yang CH, Hong SK, Hwang SJ, Kim JH, Choi JY, Ryu SK, Sung TH. Road energy harvester designed as a macro-power source using the piezoelectric effect. *Int J Hydrogen Energy*. 2016; 41: 12563–12568.
- [12] Huang K, Zhang H, Jiang J, Zhang Y, Zhou Y, Sun L, Zhang Y. The optimal design of a piezoelectric energy harvester for smart pavements. *Int J Mech Sci*. 2022; 232: 107609.
- [13] Jang SJ, Kim BR, Lee D, Lee SR. Design and analysis of the road energy harvester with an elastic element. *Proc Inst Mech Eng C J Mech Eng Sci*. 2025; 09544062251314310.
- [14] Feng L, Wang C, Yang J, Li Z, Li J, He L. A Piezoelectric Electromagnetic Composite Energy Harvester for Collecting Pedestrian Walking Energy. *physica status solidi (a)*. 2025; 222: 202400311.