

Design and Optimization of a Pendulum Driven Piezoelectric Energy Harvester Embedded in Wheel Spokes for Autonomous Tire Sensor Systems

Javad Farjadi Bajestani, Mohammad Hossein Abolbashari* 

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Article History

Received: February 18, 2026

Revised: May 04, 2026

Accepted: June 06, 2026

ePublished: July 26, 2026

ABSTRACT

Energy harvesting technologies aim to recover wasted mechanical energy and are typically categorized into piezoelectric, electromagnetic, and electrostatic mechanisms. Among these, piezoelectric harvesters are particularly appealing due to their structural simplicity, scalability, and high energy density. This study presents a novel vibration-based piezoelectric energy harvesting system integrated within the spokes of a vehicle wheel to continuously supply power for autonomous tire sensor systems. The design employs a pendulum embedded inside each spoke that oscillates during wheel rotation and impacts plates on both sides, thereby exciting the piezoelectric layers mounted on them and converting vibrational energy into electrical output. Eliminating the use of adhesives and the placement of piezoelectric plates significantly improve structural integrity, durability, and operational safety compared to conventional strain-based configurations mounted on the tire's inner liner. The governing equations were solved and the results were validated against finite element analyses performed in COMSOL Multiphysics. The proposed configuration achieves average output power levels exceeding those of previously reported wheel-based designs by factors ranging from 2 to 20,000 while maintaining stable performance within the 20–120 km/h speed range required for Tire Pressure Monitoring System applications. Genetic algorithm-based optimization further enhanced the performance by 82.27%, confirming the system's feasibility for next-generation intelligent tire technologies.

Keywords: Energy harvesting, piezoelectric impact harvester, pendulum-based mechanism, wheel spoke integration, autonomous tire pressure monitoring

How to cite this article

Farjadi Bajestani J, Abolbashari M.H, Design and Optimization of a Pendulum Driven Piezoelectric Energy Harvester Embedded in Wheel Spokes for Autonomous Tire Sensor Systems. Modares Mechanical Engineering; 2026;26(10):769-779.

*Corresponding author's email: abolbash@um.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000-0001-6703-6364



Copyright© 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



طراحی و بهینه‌سازی برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک آونگ‌محور تعبیه‌شده در پره‌های چرخ برای سامانه‌های حسگر خودتأمین تایر

جواد فرجادی بجستانی، محمدحسین ابوالبشری*

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

چکیده

فناوری‌های برداشت انرژی باهدف بازیابی انرژی مکانیکی هدررفته توسعه یافته‌اند و به‌طورکلی به سه دسته پیزوالکتریک، الکترومغناطیسی و الکترواستاتیکی تقسیم می‌شوند. در میان این روش‌ها، برداشت‌کننده‌های پیزوالکتریک به دلیل سادگی ساختاری، مقیاس‌پذیری و چگالی انرژی بالا، از جذابیت ویژه‌ای برخوردارند. در این پژوهش، یک سامانه نوین برداشت انرژی پیزوالکتریک مبتنی بر ارتعاش ارائه می‌شود که درون پره‌های چرخ خودرو یکپارچه شده و به‌منظور تأمین پیوسته انرژی موردنیاز سامانه‌های حسگر تایر خودتأمین طراحی شده است. در این طرح، یک آونگ در داخل هر پره تعبیه شده است که در حین چرخش چرخ نوسان کرده و به صفحات تعبیه‌شده در دو طرف برخورد می‌کند؛ این برخوردها موجب تحریک لایه‌های پیزوالکتریک نصب‌شده بر روی صفحات شده و انرژی ارتعاشی را به توان الکتریکی تبدیل می‌کنند. حذف استفاده از چسب و محل قرارگیری صفحات پیزوالکتریک، در مقایسه با پیکربندی‌های متداول مبتنی بر کرنش که بر روی آستر داخلی تایر نصب می‌شوند، به طور قابل‌توجهی یکپارچگی ساختاری، دوام و ایمنی عملیاتی را بهبود می‌بخشد. معادلات حاکم با استفاده از نرم‌افزار متلب حل شده و نتایج به‌دست‌آمده با تحلیل‌های اجزای محدود انجام‌شده در نرم‌افزار کامسول اعتبارسنجی شده‌اند. پیکربندی پیشنهادی، توان خروجی متوسطی را فراهم می‌کند که نسبت به طرح‌های گزارش‌شده قبلی مبتنی بر چرخ، بین ۲ تا ۲۰،۰۰۰ برابر بیشتر است، درحالی‌که عملکردی پایدار در بازه سرعت ۲۰ تا ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت، موردنیاز برای کاربردهای سامانه پایش فشار تایر، حفظ می‌شود. همچنین، به‌کارگیری بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، عملکرد سامانه را به میزان ۸۲/۲۷٪ بهبود داده و امکان‌پذیری این طرح را برای فناوری‌های نسل آینده تایرهای هوشمند تأیید می‌کند.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۹

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۴

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۵/۰۴

کلیدواژه‌ها: برداشت انرژی؛ برداشت‌کننده پیزوالکتریک مبتنی بر ضربه؛ مکانیزم مبتنی بر آونگ؛ یکپارچه‌سازی با پره‌های چرخ؛ نظارت خودکار بر فشار تایر

نحوه ارجاع به این مقاله

فرجادی بجستانی جواد، ابوالبشری محمدحسین، طراحی و بهینه‌سازی برداشت‌کننده انرژی پیزوالکتریک آونگ‌محور تعبیه‌شده در پره‌های چرخ برای سامانه‌های حسگر خودتأمین تایر، مهندسی مکانیک مدرس. ۷۷۹-۷۷۶ (۱۰): ۲۶(۱۰): ۱۴۰۵

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: abolbash@um.ac.ir

*شناسه اراکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ۰۰۰۰-۰۰۰۱-۶۷۰۳-۶۳۶۴



۱- مقدمه

با پیشرفت سریع فناوری‌های تایر هوشمند، سامانه‌های پایش فشار تایر (Tire Pressure Monitoring Systems – TPMS) به یکی از اجزای ضروری خودروهای مدرن تبدیل شده‌اند [۱]. تایرها به‌عنوان تنها سطح تماس میان خودرو و جاده، نقشی کلیدی در قابلیت هدایت، پایداری، بهره‌وری سوخت و ایمنی سرنشینان ایفا می‌کنند. کم‌باد بودن تایر موجب افزایش مقاومت غلتشی، تولید گرمای بیش از حد و تسریع فرسایش می‌شود و در موارد حاد می‌تواند به ترکیب‌گی تایر منجر گردد [۲ و ۳]. از این‌رو، نصب سامانه پایش فشار از سال ۲۰۰۰ برای خودروهای سواری در ایالات متحده و از سال ۲۰۱۴ در اتحادیه اروپا الزامی شده است [۴ و ۵].

باین‌حال، اغلب سامانه‌های پایش فشار موجود از حسگرهای باتری محور استفاده می‌کنند که این امر هزینه‌های تعویض دوره‌ای، طول عمر عملیاتی محدود و نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از دفع باتری را به همراه دارد [۶].

به‌منظور دستیابی به یک سامانه پایش فشار خودتأمین، برداشت انرژی مکانیکی از حرکت تایر به‌عنوان یک راهکار پایدار پیشنهاد شده است [۷]. این سامانه‌ها معمولاً به سه دسته برداشت‌کننده‌های الکترومغناطیسی، الکترواستاتیکی و پیزوالکتریک تقسیم می‌شوند [۸ و ۹]. در میان آن‌ها، سامانه‌های پیزوالکتریک به دلیل چگالی توان ویژه بالاتر، سادگی ساختاری و سهولت یکپارچه‌سازی در ابعاد کوچک، از مزایای قابل‌توجهی برخوردارند. باین‌وجود، عملکرد آن‌ها به‌شدت به مکانیزم تبدیل انرژی و پیکربندی نصب وابسته است [۹].

برداشت انرژی به فرایند تبدیل انرژی محیطی مکانیکی، حرارتی یا ارتعاشی به توان الکتریکی قابل‌استفاده اطلاق می‌شود، به‌گونه‌ای که بتواند سامانه‌های الکترونیکی کم‌مصرف را به‌صورت خودکار تغذیه نماید. در کاربردهای مرتبط با تایر، برداشت‌کننده‌های انرژی مکانیکی از تغییر شکل‌های ارتعاشی یا ضربه‌ای ناشی از چرخش چرخ استفاده کرده و از طریق تحریک مبدل‌هایی نظیر مواد پیزوالکتریک، انرژی الکتریکی تولید می‌کنند.

این مواد از طریق اثر مستقیم پیزوالکتریک، کرنش القاشده را به بار الکتریکی تبدیل کرده و بدین ترتیب منبع تغذیه‌ای پایدار برای سامانه‌های پایش خودتأمین فراهم می‌کنند. برداشت‌کننده‌های انرژی پیزوالکتریک مورد‌استفاده در تایرها را می‌توان به‌طور کلی به دودسته مبتنی بر کرنش و مبتنی بر ارتعاش تقسیم کرد. در سامانه‌های مبتنی بر کرنش، یک‌لایه پیزوالکتریک به آستر داخلی تایر متصل می‌شود تا از تغییر شکل‌های چرخه‌ای ایجادشده در حین چرخش بهره‌برداری گردد [۱۰ و ۱۱]. اگرچه توان‌هایی در محدوده میلی‌وات برای این ساختارها گزارش شده است [۱۲]، اما مشکلاتی نظیر تخریب لایه‌های چسب، کاهش یکپارچگی سازه‌ای تایر و دمای کاری بالا (حدود ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد در داخل تایر) مانعی جدی برای به‌کارگیری صنعتی آن‌ها به شمار می‌رود [۱۳].

در مقابل، برداشت‌کننده‌های مبتنی بر ارتعاش که عمدتاً به‌صورت تیرهای یک‌سر گیردار طراحی می‌شوند، با بهره‌گیری از تحریک گریزآزمركز و برخورد در حین چرخش چرخ عمل می‌کنند. این سامانه‌ها نیاز به اتصال مستقیم به تایر را حذف کرده و از استحکام مکانیکی بالاتری برخوردارند [۱۴ و ۱۵]. باین‌حال، توان خروجی آن‌ها در سرعت‌های کمتر از ۶۰ کیلومتر بر ساعت اغلب کمتر از ۱۰۰ میکرووات باقی می‌ماند [۱۶ و ۱۷].

برای بهبود عملکرد سامانه‌های برداشت انرژی پیزوالکتریک مورد استفاده در کاربردهای خودتأمین انرژی، راهکارهای متعددی در پژوهش‌های پیشین ارائه شده است؛ از جمله افزودن جرم‌های متمرکز انتهایی و آهنرباها [۱۸]، بهره‌گیری از دافعه مغناطیسی به‌منظور ایجاد تحریک دینامیکی بیشتر [۱۹]، و بهینه‌سازی جنس تیر و هندسه مقطع آن برای تنظیم دقیق فرکانس تشدید [۲۰-۲۲]. کاتانی و همکاران [۲۳] نشان دادند که در مقایسه با مقطع مستطیلی، تیر با مقطع دوزنقه‌ای تنش متوسط بالاتری ایجاد کرده و در نتیجه عملکرد خروجی بهتری ارائه می‌دهد. نتایج بهینه‌سازی آن‌ها حاکی از آن است که توان خروجی متوسط برداشت‌کننده انرژی در بازه ۴۲ تا ۴۳۷ میکرووات و در سرعت‌های ۴۰ تا ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت قرار دارد. هرچند در برخی مطالعات دیگر، توان‌های متوسط ۱ تا ۳ میلی‌وات در سرعت‌های ۸۰ تا ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت گزارش شده است [۲۴ و ۲۵]، اما در شرایط سرعت‌های شهری (۲۰ تا ۵۰ کیلومتر بر ساعت)، توان برداشت‌شده به‌ندرت از ۰/۳ میلی‌وات فراتر می‌رود [۲۶].

از دیگر معایب می‌توان به حساسیت نسبت به تغییرات شعاع مسیر ارتعاش و اثرات نیروهای گریزآزمركز در سرعت‌های چرخشی بالا اشاره کرد. از این‌رو، این محدودیت‌ها ضرورت توسعه یک برداشت‌کننده انرژی با بازه بالا را که قادر به عملکرد پایدار در بازه وسیعی از سرعت‌های خودرو بوده و بدون نیاز به اتصال چسبی به سطح تایر عمل کند، برجسته می‌سازد. بر این اساس، در این پژوهش یک مکانیزم آونگی لولدار نوین پیشنهاد می‌شود که به‌صورت یکپارچه درون پره‌های چرخ ادغام شده است. در حین چرخش چرخ، آونگ نوسان کرده و با صفحات مجاور برخورد می‌کند و بدین‌ترتیب مبدل‌های پیزوالکتریک نصب‌شده بر روی این صفحات را تحریک نموده و انرژی ضربه‌ای را به توان الکتریکی مفید تبدیل می‌کند. رویکرد پیشنهادی مزایای متعددی دارد؛ از جمله مزایای اصلی سامانه پیشنهادی می‌توان به جلوگیری از وارد آمدن آسیب به ساختار تایر، کاهش اثرات شتاب‌های گریز از مرکز در سرعت‌های بالا، و دستیابی به توان خروجی پایدار در بازه وسیعی از سرعت‌های خودرو (۲۰ تا ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت) اشاره کرد.

در این پژوهش ابتدا معادلات حاکم بر سیستم در محیط متلب حل شده و نتایج به‌دست‌آمده از طریق مقایسه با نتایج به دست آمده در نرم‌افزار کامسول اعتبارسنجی گردید. سپس، با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک، فرآیند بهینه‌سازی طراحی با هدف افزایش

در معادلات فوق، x و y به ترتیب بیانگر مختصات مکانی گوی هستند، در حالی که R و L_b به ترتیب شعاع چرخ و طول تیر را نشان می‌دهند. مختصات تعمیم‌یافته θ و ϕ به ترتیب زاویه بین خط واصل مرکز چرخ به نقطه اتصال تیر و محور افقی دستگاه مختصات و زاویه بین محور طولی تیر و محور مرجع متناظر با دستگاه مختصات هستند.

انرژی جنبشی سامانه نشان داده شده در شکل ۲ را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$T = \frac{1}{2} [I_0 \dot{\phi}^2 + m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)] \\ = \frac{1}{2} [I_0 \dot{\phi}^2 + m(R^2 \dot{\phi}^2 + L_b^2 (\dot{\phi} + \dot{\theta})^2 + 2R\dot{\phi}L_b(\dot{\phi} + \dot{\theta}) \cos \theta)] \quad (2)$$

که در آن I ممان اینرسی چرخ را نشان می‌دهد. در صورتی که مسئله به صورت یک بعدی در نظر گرفته شود، خواهیم داشت:

$$\dot{\phi} = \omega \\ T = \frac{1}{2} [I_0 \omega^2 + m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)] \\ = \frac{1}{2} [I_0 \omega^2 + m(R^2 \omega^2 + L_b^2 (\omega + \dot{\theta})^2 + 2R\omega L_b(\omega + \dot{\theta}) \cos \theta)] \quad (3)$$

انرژی پتانسیل گرانشی کل و انرژی کرنشی محور چرخ به صورت زیر فرموله می‌شوند:

$$V = mg[R \sin \phi + L_b \sin(\theta + \omega t)] + \frac{1}{2} k_d (\omega t)^2 \quad (4)$$

که در آن k_d نشان‌دهنده سختی پیچشی رینگ است و لاگرانژ سیستم مطابق با معادله (۵) تعریف می‌شود.

$$L = T - V \quad (5)$$

با جایگذاری روابط انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل، خواهیم داشت:

$$L = \frac{1}{2} [I_0 \omega^2 + m(R^2 \omega^2 + L_b^2 (\omega + \dot{\theta})^2 + 2R\omega L_b(\omega + \dot{\theta}) \cos \theta)] \\ - mg[R \sin \phi + L_b \sin(\theta + \omega t)] - \frac{1}{2} k_d (\omega t)^2 \quad (6)$$

و معادله لاگرانژ به صورت زیر ارائه می‌شود [۲۷]:

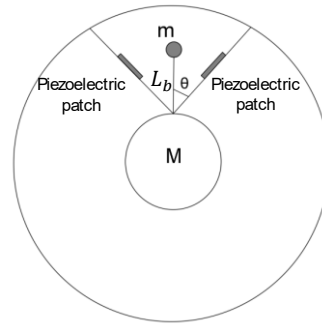
$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 \quad (7)$$

با ساده‌سازی معادله (۷)، خواهیم داشت:

$$L_b \ddot{\theta} + R\omega^2 \sin \theta + g \cos(\theta + \omega t) = 0 \quad (8)$$

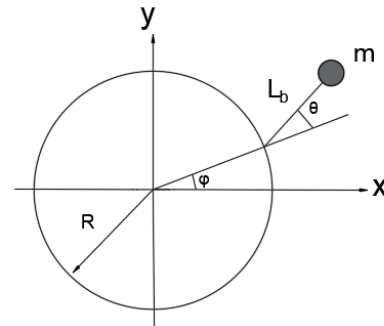
۳-۲- شبیه‌سازی دینامیکی و تحلیل نتایج در نرم‌افزار MATLAB

به منظور تحلیل پاسخ دینامیکی سامانه، شبیه‌سازی‌های عددی در نرم‌افزار متلب انجام شده است. در این بخش، هدف آن است که معادله دینامیکی استخراج شده (معادله ۸) با به کارگیری روش‌های مناسب انتگرال‌گیری عددی حل شده، ویژگی‌های حرکتی آونگ مورد ارزیابی قرار گیرد، انرژی‌های ضربه‌ای متناظر محاسبه شوند و نتایج حاصل به صورت نمودارهای گرافیکی و داده‌های جدول‌بندی شده ارائه گردند.



شکل ۱ آونگ تعبیه شده در داخل پره چرخ

Fig. 1 The pendulum placed inside the wheel spoke



شکل ۲ موقعیت فضایی آونگ

Fig. 2 Spatial position of the pendulum

چگالی توان خروجی در بازه سرعتی ۲۰ تا ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت انجام شد.

۲- روش‌ها

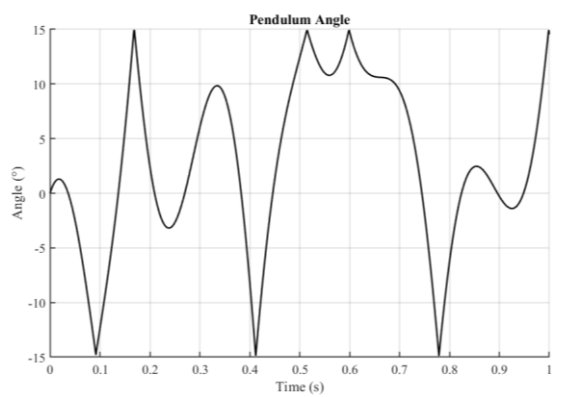
۲-۱- طراحی برداشت‌کننده انرژی تأثیر پیشنهادی

در مدل پیشنهادی، یک آونگ لولا دار درون حفره پره چرخ خودرو نصب شده است، همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است. آونگ تحت تأثیر نیروی گرانش و وزن خود نوسان کرده و به دو سمت پره برخورد می‌کند. انرژی تولید شده ناشی از این برخوردها توسط المان‌های پیزوالکتریک نصب شده بر روی صفحات جانبی برداشت می‌شود و توان الکتریکی مورد نیاز حسگرهای قرار گرفته در داخل چرخ را تأمین می‌نماید.

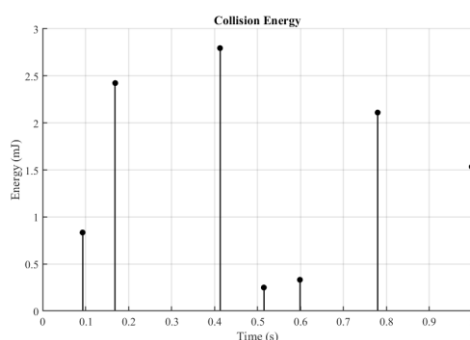
۲-۲- معادلات حاکم بر حرکت آونگ و انرژی تولیدی

موقعیت مکانی آونگ مطابق با شکل ۲ در نظر گرفته شده است. هدف این بخش، استخراج روابط حاکم بر انتقال انرژی مکانیکی ضربه‌ای بین آونگ و سطوح تیر است که در ادامه به عنوان ورودی تحلیل کوپل‌شدگی الکترومکانیکی به کار گرفته می‌شود. مختصات جرم m و مشتقات زمانی آن‌ها به صورت زیر بیان می‌شوند.

$$x = R \cos \phi + L_b \cos(\phi + \theta) \\ y = R \sin \phi + L_b \sin(\phi + \theta) \\ \dot{x} = -R\dot{\phi} \sin \phi - L_b(\dot{\phi} + \dot{\theta}) \sin(\phi + \theta) \\ \dot{y} = R\dot{\phi} \cos \phi + L_b(\dot{\phi} + \dot{\theta}) \cos(\phi + \theta) \quad (1)$$



شکل ۳ تغییرات زاویه آونگ در سرعت ۲۰ کیلومتر بر ساعت خودرو
Fig. 3 Variation of the Pendulum Angle at a Vehicle Speed of 20 Kilometers per Hour



شکل ۴ انرژی برخورد آونگ با پره‌ها

Fig. 4 Impact Energy of the Pendulum with the Blades

جدول ۲ انرژی برخورد در سرعت‌های مختلف خودرو (MATLAB)

Table 2 Impact Energy at Different Vehicle Speeds (MATLAB)

Vehicle Speed (km/h)	Impact Energy (mJ)
20	10.2768
40	10.3566
60	15.1746
80	33.2839
100	54.0183
120	65.6444

الکترومکانیکی، بخشی از آن‌ها به توان الکتریکی تبدیل خواهد شد. مقادیر انرژی برخورد در سرعت‌های مختلف در جدول ۲ فهرست شده‌اند.

تغییرات انرژی برخورد نسبت به سرعت وسیله نقلیه و در نتیجه سرعت زاویه‌ای چرخ با استفاده از نرم‌افزار متلب مورد تحلیل قرار گرفت. همان‌گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، انرژی برخورد به‌صورت غیرخطی با افزایش سرعت زاویه‌ای افزایش می‌یابد که این امر تأیید می‌کند در سرعت‌های چرخش بالاتر، نیروهای ضربه‌ای گذرا بزرگ‌تری ایجاد شده و در نتیجه انتقال انرژی بیشتری به سامانه صورت می‌گیرد.

جدول ۱ پارامترهای سامانه و شرایط اولیه

Table 1 System parameters and initial conditions

Parameter	Value
Wheel radius	$R = 6 \text{ cm}$
Angular velocity of the cylinder	$\omega = 2.53 \text{ rev/s}$
Pendulum length	$L_b = 7 \text{ cm}$
Mass of the ball	$m = 0.011 \text{ kg}$
Acceleration due to gravity	$g = 9.81 \text{ m/s}^2$
Initial angle	$\theta_0 = 0^\circ$
Initial angular velocity	$\dot{\theta}_0 = 2.53 \text{ rad/s}$
Simulation time interval	1 second
Time step	$\Delta t = 0.001$

نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها، مبنایی کمی برای مقایسه با نتایج مبتنی بر نرم‌افزار کامسول در بخش بعدی فراهم می‌کنند و درعین حال به‌عنوان ابزاری برای اعتبارسنجی فرمول‌بندی استخراج‌شده مورد استفاده قرار می‌گیرند. معادله دیفرانسیل حاکم بر حرکت آونگ که در بخش قبل استخراج شده است، به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\ddot{\theta} = -\frac{\sin \theta}{L_b} - \frac{g \cos(\theta + \omega t)}{L_b} \quad (9)$$

در این رابطه، R شعاع چرخ، L طول آونگ، ω سرعت زاویه‌ای چرخ و g شتاب گرانش و θ انحراف زاویه‌ای آونگ نسبت به راستای شعاعی چرخ را نشان می‌دهند. مقادیر این پارامترها در جدول ۱ ارائه شده‌اند. معادله دیفرانسیل حاکم به‌صورت عددی با استفاده از روش رانگ کوتا و از طریق حل‌کننده ode45 در نرم‌افزار متلب انتگرال‌گیری شد. در هر گام زمانی گسسته، موقعیت و سرعت زاویه‌ای آونگ محاسبه شده و امکان وقوع برخورد با پره‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در صورت وقوع برخورد، سرعت زاویه‌ای مطابق با ضریب بازگشت تعیین‌شده به‌روزرسانی شد و سپس نیروی ضربه‌ای و انرژی متناظر برخورد محاسبه گردید.

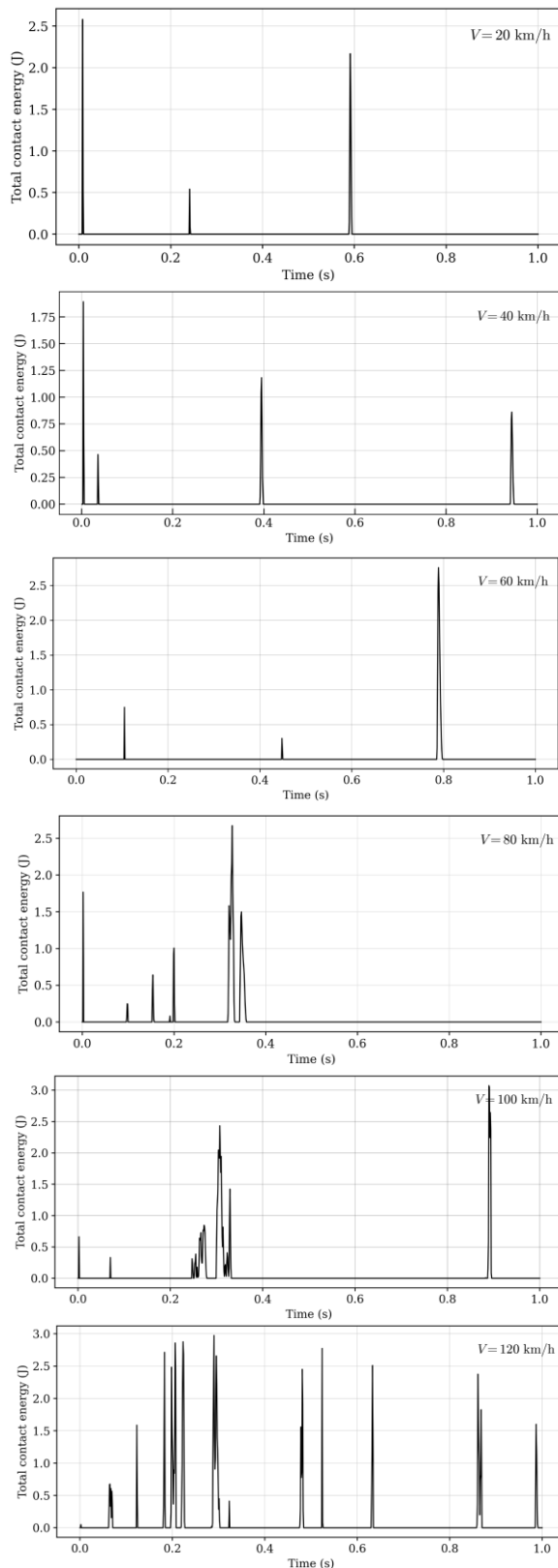
۳-۱-۲ نتایج شبیه‌سازی

شکل ۳ تغییرات زمانی زاویه آونگ θ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، آونگ در بازه زوایای تعیین‌شده برای پره‌ها نوسان کرده و در لحظه برخورد با پره‌ها، تغییرات ناگهانی در مقدار زاویه رخ می‌دهد.

در طول شبیه‌سازی، تعداد کل برخوردها برابر با هفت بوده است. انرژی‌های حاصل از برخوردها در شکل ۴ ارائه شده‌اند.

انرژی‌های نمایش‌داده‌شده متناظر با انرژی مکانیکی برخورد استخراج‌شده از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در نرم‌افزار متلب هستند. انرژی هر برخورد بر اساس اختلاف انرژی جنبشی آونگ قبل و بعد از برخورد محاسبه شده است.

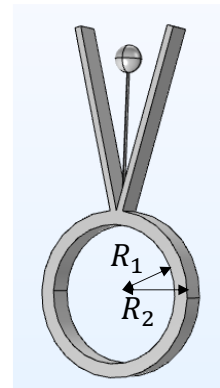
در این محاسبه، اثر برخورد با استفاده از ضریب بازگشت $e = 0.87$ در به‌روزرسانی سرعت آونگ در لحظه تماس در نظر گرفته شده است [۲۸]. این مقادیر بیانگر انرژی خروجی مکانیکی سامانه هستند که در مراحل بعدی و در چارچوب تحلیل کوپل



شکل ۶ انرژی تولید شده ناشی از برخورد آونگ با پره‌های جانبی در سرعت‌های ۲۰ تا ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت

Fig. 6 Energy Generated by Pendulum-Side Blade Impacts at Speeds Ranging from 20 to 120 km/h

برای سرعت‌هایی در بازه ۲۰ تا ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت ارائه شده است. حتی در سرعت ۲۰ کیلومتر بر ساعت، که نرخ برخوردها در



شکل ۵ مدل آونگ طراحی شده در کامسول

Fig. 5 Pendulum Model Designed in COMSOL

جدول ۳ مشخصات هندسی مدل طراحی شده در کامسول

Table 3 Geometric Specifications of the COMSOL-Designed Model

Application Area	Symbol	Value
Inner radius of cylinder	R_1	0.05 m
Outer radius of cylinder	R_2	0.06 m
Length of wheel spokes	L_1	0.14 m
Length of cylinder	L_2	0.02 m
Length of pendulum	L_3	0.07 m
Radius of sphere	r_1	0.01 m

۲-۴- شبیه‌سازی حرکت آونگ در نرم‌افزار کامسول

نرم‌افزار کامسول یک ابزار عددی پرکاربرد برای مدل‌سازی و تحلیل پدیده‌های فیزیکی کوپل شده در علوم و مهندسی است. این نرم‌افزار به دلیل انعطاف‌پذیری بالا و قابلیت یکپارچه‌سازی مسائل چند فیزیکی، به عنوان ابزاری استاندارد در پژوهش‌های علمی و کاربردهای صنعتی مورد استفاده گسترده قرار گرفته است.

در این پژوهش، مدل پیشنهادی برای شبیه‌سازی برخورد آونگ با صفحات جانبی و تولید توان متناظر، مطابق با شکل ۵ و بر اساس ابعاد ارائه شده در جدول ۲، در محیط کامسول توسعه داده شد. شبیه‌سازی‌ها در سرعت‌های مختلف وسیله نقلیه انجام گرفت و انرژی تولید شده در اثر برخوردها محاسبه گردید. سپس، روابط انرژی سرعت متناظر ترسیم شد. در نهایت، انرژی الکتریکی تولید شده کفی‌سازی و با نتایج گزارش شده در مطالعات پیشین مقایسه گردید.

ابعاد و پارامترهای هندسی مدل جدید طراحی شده در کامسول در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

آلومینیوم به عنوان ماده‌ی اصلی انتخاب شد و زیرکونات تیتانات سرب به عنوان ماده‌ی پیزوالکتریک مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه از روش‌های جریمه و جریمه‌ی دینامیکی [۲۹] استفاده شد. با حرکت خودرو و چرخش چرخ، آونگ نوسان کرده و با پره‌های جانبی برخورد می‌کند. انرژی مورد نیاز برای تأمین توان حسگرهای داخل تایر توسط یک پیچ پیزوالکتریک که روی صفحات نصب شده است، تولید می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، تعداد برخوردها و میزان انرژی تولید شده ناشی از برخورد بین آونگ و پره‌های جانبی

برای یک تیر گیردار-گیردار، شکل مود نرمال‌شده‌ی $\phi(x)$ مربوط به مود اول به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\phi(x) = \cosh(Bx) - \cos(Bx) - \alpha[\sinh(Bx) - \sin(Bx)] \quad (12)$$

$$BL_b = 4.73, \quad \alpha = \frac{\cosh(BL_b) - \cos(BL_b)}{\sinh(BL_b) - \sin(BL_b)}$$

در این مطالعه، پیچ پیزوالکتریک در ناحیه‌ی میانی دهانه قرار داده شده است.

$$x_p = 0.45L_b, \quad x_p + L_p = 0.6L_b \quad (13)$$

که در معادله ۱۳، L_p طول پیزوالکتریک، تیر طول L_b و x_p محل نصب پیزوالکتریک بر روی تیر است. جایی که خمیدگی $\phi''(x)$ به بیشینه‌ی محلی خود می‌رسد.

۲-۵-۲- معادلات الکترومکانیکی کوپل‌شده

با استفاده از کاهش مودال و با در نظر گرفتن شکل مود فوق، روابط کوپلینگ معادل به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$F_p = \theta V_p, \quad Q_p = \theta q + C_p V_p \quad (14)$$

که منجر به به دست آمدن معادلات کامل حرکت کوپل‌شده به صورت زیر می‌شود:

$$\ddot{q} + 2\zeta w_1 \dot{q} + w_1^2 q = 1/m_r (F_c - \theta V_p) \quad (15)$$

$$C_p \dot{V}_p + V_p/R_L + q\theta = 0$$

در روابط (۱۴) و (۱۵)، F_c نیروی تحریک وارد بر سازه، q مختصه مودال تعمیم‌یافته متناظر با مود غالب ارتعاش، $\dot{q}$ و $\ddot{q}$ به ترتیب سرعت و شتاب مودال، m_r جرم تعمیم‌یافته سیستم، ζ نسبت میرایی مودال، و w_1 فرکانس طبیعی مود اول سیستم هستند. همچنین V_p ولتاژ تولیدشده در لایه پیزوالکتریک، C_p ظرفیت معادل الکتریکی لایه پیزوالکتریک، R_L مقاومت بار الکتریکی، Q_p بار الکتریکی تولیدشده، و θ ضریب کوپلینگ الکترومکانیکی بین میدان مکانیکی و الکتریکی را نشان می‌دهد.

۲-۵-۳- بازده تبدیل انرژی

انرژی الکتریکی لحظه‌ای برداشت‌شده از لایه‌ی پیزوالکتریک به صورت زیر بیان می‌شود [۳۱]:

$$E_p = 1/2 C_p V_p^2 \quad (16-1)$$

و بازده تبدیل انرژی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta = E_p/E_{\text{impact}} = 0.5 C_p V_{p,\text{max}}^2 / E_{\text{impact}} \quad (16-2)$$

ولتاژ خروجی لحظه‌ای $V_p(t)$ از معادلات الکترومکانیکی کوپل‌شده به دست آمد و انرژی کل برداشت‌شده با استفاده از رابطه‌ی زیر ارزیابی شد:

$$E_{\text{load}} = \int_0^{t_{\text{end}}} V_p^2(t) / R_L dt \quad (17)$$

که در آن R_L مقاومت بار را نشان می‌دهد و t_{end} زمانی است که در آن نوسانات به طور کامل مستهلک می‌شوند.

در نهایت، بازده برداشت انرژی به صورت زیر بیان شد:

$$\eta = E_{\text{load}} / E_{\text{impact}} \times 100\% \quad (18)$$

جدول ۴ انرژی‌های برخورد متناظر با سرعت‌های مختلف خودرو به دست آمده از شبیه‌سازی در نرم افزار COMSOL

Table 4 Impact energies corresponding to various vehicle speeds obtained from COMSOL simulation

Vehicle Speed (km/h)	Impact Energy (mJ)
20	9.9900
40	10.5493
60	15.8460
80	35.9747
100	53.2620
120	65.5206

هر ثانیه حداقل مقدار را دارد، انرژی برداشت‌شده برای تأمین توان حسگر پایش فشار تاپر کافی است؛ حسگری که معمولاً تنها به چند میکروژول انرژی نیاز دارد.

همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، آونگ در تمامی سرعت‌ها با صفحات مجاور برخورد می‌کند. جدول ۴ انرژی ضربه‌ی حاصل از برخورد آونگ با المان پیزوالکتریک نصب‌شده روی صفحات مجاور در کامسول را ارائه می‌دهد.

۲-۵-۵- کوپلینگ الکترومکانیکی و تبدیل انرژی (تیر گیردار-گیردار)

بر اساس فرمول‌بندی دینامیکی تیر دو سر گیردار که در بخش ۲-۳ استخراج شده است، در این بخش سهمی از انرژی ضربه‌ی مکانیکی که از طریق لایه‌های پیزوالکتریک چسبانده شده به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود، به صورت تحلیلی تشریح می‌گردد. برای پیکربندی حاضر، روابط ساختاری خطی لایه‌ی پیزوالکتریک به صورت زیر بیان می‌شوند [۳۰]:

$$S_1 = s_E T_1 + d_{31} E_3, \quad D_3 = d_{31} T_1 + \epsilon_T E_3 \quad (10)$$

که در آن S_1 ، T_1 ، E_3 و D_3 به ترتیب بیانگر کرنش طولی، تنش، میدان الکتریکی و جابجایی الکتریکی هستند؛ s_E تطابق‌پذیری الاستیک در میدان الکتریکی ثابت، d_{31} ضریب پیزوالکتریک، و ϵ_T گذردهی الکتریکی تحت تنش ثابت را نشان می‌دهد.

۲-۵-۱- کوپلینگ الکترومکانیکی مودال برای تیر پایه‌ی گیردار-گیردار

با در نظر گرفتن مدل تیر اویلر-برنولی، کرنش طولی در یک نقطه از تیر متناسب با فاصله آن نقطه از محور خنثی و انحنای تیر است و به صورت $\phi''(x) = -z$ بیان می‌شود. از سوی دیگر، در مواد پیزوالکتریک رابطه کوپلینگ الکترومکانیکی بین جابجایی الکتریکی و کرنش مکانیکی با استفاده از ثابت پیزوالکتریک d_{31} و مدول یانگ ماده Y_p تعریف می‌گردد. با در نظر گرفتن یک لایه پیزوالکتریک متصل به سطح تیر و انتگرال‌گیری از اثر کرنش در طول ناحیه پوشیده شده توسط وصله پیزوالکتریک، ضریب کوپلینگ الکترومکانیکی معادل برای این لایه به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\theta = d_{31} Y_p b_p h_p \int_{x_p}^{x_p+L_p} \phi''(x) dx \quad (11)$$

که در آن Y_p ، b_p ، h_p و L_p به ترتیب مدول یانگ، عرض، ضخامت و طول پیچ پیزوالکتریک هستند.

که در آن

$$E_{\text{impact}} = \frac{1}{2} m_b v_0^2 \quad (19)$$

انرژی اولیه‌ی برخورد گوی را نشان می‌دهد. با استفاده از این رابطه انرژی ضربه به دست می‌آید سپس با استفاده از معادله (۱۱) و با انجام انتگرال‌گیری بر روی طول پیچ پیزوالکتریک، ضریب کوپلینگ الکترومکانیکی (θ) به دست می‌آید.

در ادامه با استفاده از معادله کوپل شده (۱۵)، که به کمک نرم‌افزار MATLAB حل شده است، پاسخ ولتاژ $V_p(t)$ محاسبه می‌شود. از روی این پاسخ، انرژی الکتریکی تولیدی E_{load} تعیین می‌گردد. در نهایت با استفاده از رابطه (۱۸)، مقدار $14/4985\%$ برای بازده تبدیل انرژی به دست می‌آید. که بیانگر بازده بالای تبدیل انرژی است. این بازده بالا ناشی از افزایش خمیدگی و تمرکز کرنش در ناحیه‌ی میانی دهانه‌ی تیر می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اعتبارسنجی معادلات

هدف اصلی این مطالعه، توسعه‌ی یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی انرژی برداشت‌شده از ارتعاشات ناشی از حرکت آونگ و برهم‌کنش آن با المان‌های پیزوالکتریک نصب‌شده روی صفحات مجاور در داخل تایر خودرو بوده است. معادلات حاکم بر دینامیک سیستم استخراج شده و با استفاده از نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی گردیدند. اعتبار این معادلات از طریق مقایسه‌ی نتایج تحلیلی با شبیه‌سازی‌های عددی انجام‌شده در نرم‌افزار کامسول مورد ارزیابی قرار گرفت.

پایداری عددی مدل از طریق آزمون همگرایی گام زمانی بررسی شد. با کاهش گام زمانی انتگرال‌گیری از $\Delta t = 0.001$ s به $\Delta t = 0.0005$ s، انحراف انرژی کل تماس کمتر از 0.005% مشاهده شد. بنابراین، گام زمانی انتخاب‌شده ($\Delta t = 0.001$ s) به‌اندازه‌ی کافی کوچک در نظر گرفته شد تا هم همگرایی عددی و هم استقلال از گام زمانی تضمین گردد.

در این بخش، داده‌های انرژی برخورد در بازه‌ی سرعت خودرو ۲۰ تا ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت که از هر دو رویکرد به‌دست آمده‌اند، ارائه و تحلیل می‌شوند تا دقت معادلات استخراج‌شده و قابلیت اطمینان مدل پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گیرد.

جدول ۵ مقایسه نتایج شبیه‌سازی تحلیلی و عددی

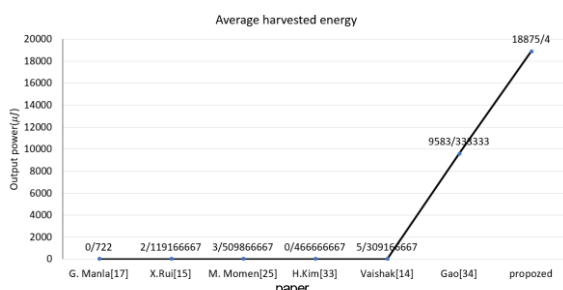
Table 5 Validation and Comparison of Analytical and Numerical Simulation Results

Vehicle Speed (km/h)	Impact Energy (mJ) (MATLAB)	Impact Energy (mJ) (COMSOL)	Percentage Difference
20	10.2768	9.9900	2.79
40	10.3566	10.5493	1.86
60	15.1746	15.8460	4.42
80	33.2839	35.9747	8.08
100	54.0183	53.2620	1.40
120	65.6444	65.5206	0.19

همان‌طور که در جدول ۵ نشان داده‌شده است، نتایج به‌دست‌آمده از متلب و کامسول تطابق بسیار خوبی با یکدیگر دارند؛ به‌طوری‌که اختلاف درصدی در اغلب موارد کمتر از 5% بوده و در شرایط برخورد با سرعت‌های بالا (برای مثال در 80 کیلومتر بر ساعت) به حدود 8% می‌رسد. این اختلاف عمدتاً ناشی از ماهیت غیرخطی و گذرای رفتار تماس در سرعت‌های بالا است که حساسیت نتایج را نسبت به چگالی شبکه و تفکیک‌پذیری گام زمانی در کامسول افزایش می‌دهد. به‌طور کلی، سازگاری نزدیک میان نتایج حاصل از دو نرم‌افزار متلب و کامسول، شواهد محکمی از صحت فرمول‌بندی الکترومکانیکی کوپل‌شده ارائه می‌دهد و نشان می‌دهد که مدل دینامیکی پیشنهادی قادر است پاسخ سیستم را به‌طور قابل اعتماد پیش‌بینی کند.

شکل ۷ مقایسه‌ای میان نتایج شش طرح گزارش‌شده‌ی پیشین در حوزه برداشت انرژی ارتعاشی داخل تایر و نتایج حاصل از طرح پیشنهادی این پژوهش ارائه می‌دهد. بر اساس فرمول‌بندی کوپل‌شدگی معرفی‌شده در بخش ۲-۵ و با استفاده از داده‌های انرژی برخورد مکانیکی ارائه‌شده در جدول ۴، بازده متوسط تبدیل انرژی در سامانه پیشنهادی حدود 15% محاسبه شده است که به‌خوبی در بازه تجربی گزارش‌شده ($10\%-20\%$) در مرجع [۳۲] قرار می‌گیرد. این هم‌خوانی، اعتبار فرمول‌بندی الکترومکانیکی کوپل‌شده و قابلیت پیش‌بینی مدل پیشنهادی را تأیید می‌کند. انرژی الکتریکی برداشت‌شده‌ی متناظر به طور متوسط به $18/88$ میلی‌ژول در بازه‌ی سرعت 20 تا 60 کیلومتر بر ساعت رسید که نشان‌دهنده‌ی بهبود قابل‌توجهی نسبت به میانگین خروجی طرح‌های پیشین بوده و پتانسیل بالای پیکربندی پیشنهادی را برای یکپارچه‌سازی در سامانه‌های پیشرفته‌ی پایش فشار تایر تأیید می‌کند.

این نتایج، برتری عملکرد، پایداری خروجی و قابلیت کاربرد بالای مفهوم پیشنهادی را برای یکپارچه‌سازی عملی در سامانه‌های پیشرفته‌ی حسگر پایش فشار تایر خودتغذیه به‌روشنی تأیید می‌کند.



شکل ۷ مقایسه‌ی توان خروجی به‌دست‌آمده از مدل پیشنهادی با نتایج گزارش‌شده در مطالعات پیشین

Fig. 7 The comparison of the output power obtained from the proposed model with that reported in previous studies

جدول ۶ مقایسه انرژی برداشت‌شده در سرعت‌های مختلف پیش و پس از بهینه‌سازی و درصد بهبود

Table 6 Comparison of Harvested Energy at Different Speeds Before and After Optimization and Percentage Improvement

Vehicle Speed (km/h)	Impact Energy (mJ) (MATLAB)	Impact Energy (mJ) (optimization)	Improved Percentage
20	10.2768	10.9000	6.07
40	10.3566	13.4104	29.46
60	15.1746	27.6126	81.93
80	33.2839	78.5058	135.92
100	54.0183	171.9673	218.39
120	65.6444	79.9685	21.85

مکانیکی و مسائل کپسوله‌سازی همچنان از چالش‌های فنی باقی می‌ماند که در پژوهش‌های آتی از طریق آزمون‌های تجربی بررسی خواهند شد. بنابراین، هرچند طرح حاضر عملکرد شبیه‌سازی‌شده‌ی امیدبخشی را نشان می‌دهد، انتقال آن به یک محصول قابل‌عرضه مستلزم ساخت نمونه‌ی اولیه و انجام آزمون‌های دوام تحت شرایط خستگی دورانی است.

۴- نتیجه‌گیری

باوجود تلاش‌های پژوهشی گسترده در سال‌های اخیر، تاکنون یک برداشت‌کننده‌ی انرژی کاملاً کاربردی و مناسب برای به‌کارگیری صنعتی در داخل تایلر خودرو به طور کامل تحقق‌نیافته است. طرح‌های موجود با چالش‌هایی نظیر ملاحظات ایمنی، پیچیدگی‌های نصب درون حفزه‌ی تایلر و محدودیت عملکرد در بازه‌های مختلف سرعت مواجه هستند. در این پژوهش، یک برداشت‌کننده‌ی انرژی پیزوالکتریک نوین با استفاده از آونگ لولا دار نصب‌شده درون پره‌های چرخ پیشنهاد شد. برخلاف پیکربندی‌های متداول تیر یک‌سر گیردار که در مطالعات پیشین گزارش شده‌اند، این آرایش از افزایش سختی سازه ناشی از نیروی گریزمرکز جلوگیری می‌کند و در نتیجه، بازده برداشت انرژی را به طور محسوسی بهبود می‌بخشد. این ویژگی ساختاری، طرح پیشنهادی را به گزینه‌ای امیدوارکننده برای کاربردهای برداشت انرژی در سامانه‌های خودکار پایش فشار تایلر تبدیل می‌کند.

تعارض منافع: هیچ تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

۳-۲- بهینه‌سازی پارامتری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک

به‌منظور بیشینه‌سازی عملکرد برداشت‌کننده‌ی انرژی، بهینه‌سازی پارامتری با استفاده از الگوریتم ژنتیک که در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شده است، انجام شد. چهار متغیر اصلی طراحی شامل زاویه پره، طول آونگ، شعاع گوی و جرم گوی در محدوده‌ی قیود فیزیکی و عملی ازپیش‌تعیین‌شده بهینه‌سازی شدند: زاویه پره (۱۰ تا ۲۰ درجه)، طول آونگ (۵ تا ۱۲ سانتی‌متر)، شعاع گوی (۰/۲ تا ۱ سانتی‌متر) و جرم گوی (۵ تا ۱۵ گرم). الگوریتم ژنتیک با اندازه جمعیت ۲۰ و در طول ۱۴ نسل اجرا گردید.

تابع هدف به‌گونه‌ای تعریف شد که انرژی کل برخورد را بیشینه کند. در هر تکرار، پاسخ دینامیکی سیستم با استفاده از انتگرال‌گیری عددی شبیه‌سازی شد و دینامیک برخورد به طور کامل در نظر گرفته شد تا نیروهای تماس با دقت مناسبی ارزیابی شوند.

مجموعه پارامترهای بهینه به‌دست‌آمده از الگوریتم ژنتیک به شرح زیر است:

- زاویه صفحه (پره): ۱۱/۶۷ درجه
- طول آونگ: ۹/۹۷ سانتی‌متر
- شعاع گوی: ۰/۸۱۴ سانتی‌متر
- جرم گوی: ۱۴/۶۱ گرم

نتایج بهینه‌سازی نشان داد که انرژی کل برخورد در مقایسه با طرح اولیه (پیش از بهینه‌سازی) به طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. جدول ۶ مقایسه‌ای از نتایج حاصل با استفاده از پارامترهای بهینه‌شده ارائه می‌دهد و درصد بهبود عملکرد را نشان می‌دهد.

مقایسه‌ی این نتایج نشان می‌دهد که بهینه‌سازی پارامترها مبتنی بر الگوریتم ژنتیک رویکردی مؤثر برای افزایش بازده برداشت‌کننده‌ی انرژی پیزوالکتریک پیشنهادی در کاربردهای تایلر خودرو است. طرح بهینه‌شده توانست انرژی برخورد بالاتری تولید کند که این امر، پتانسیل کاربرد عملی آن را در سامانه‌های واقعی پایش فشار تایرتأیید می‌کند. افزایش غیرمعمول ۲۱۸/۳۹٪ در سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت را می‌توان به بروز یک شرط رزونانس موضعی میان تحریک دورانی چرخ و فرکانس طبیعی آونگ نسبت داد که به‌واسطه‌ی تنظیم پارامترهای سیستم نظیر زاویه برخورد و ضریب بازگشت توسط الگوریتم ژنتیک تقویت شده است. اگرچه این حالت یک بهینه‌ی موضعی بوده و نمایانگر یک روند کلی نیست، اما غیرخطی‌بودن شدید وابسته به سرعت در برداشت‌کننده‌ی پیشنهادی را به‌خوبی برجسته می‌سازد.

با وجود آنکه مطالعه‌ی حاضر عمدتاً مبتنی بر شبیه‌سازی است، پارامترهای به‌کاررفته و شرایط مرزی از مواد پیزوالکتریک تجاری (PZT-5H) و هندسه‌های واقعی تایلر انتخاب شده‌اند که قابلیت پیاده‌سازی مهندسی طرح را تضمین می‌کند. این مفهوم می‌تواند به‌صورت عملی با جاسازی آونگ و پیچ پیزوالکتریک درون حفزه‌ی رینگ چرخ پیاده‌سازی شود، به‌گونه‌ای که تحریک مبتنی بر برخورد به طور خودپایدار توسط چرخش چرخ تأمین گردد. بااین‌حال، دوام

[11] I. Al-Najati, K. W. Chan, and A. F. Jasim, "Development and Optimization of a New End-Cap Tire-Strain Piezoelectric Energy Harvester (TSPEH)," *Energy Conversion and Management*, vol. 303, p. 118109, 2024. doi: 10.1016/j.enconman.2024.118109

[12] E. Lefevre, A. Badel, and C. Richard, "Piezoelectric energy harvesting device optimization by synchronous electric charge extraction," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 16, no. 10, pp. 865–876, 2005. doi: 10.1177/1045389X05056859

[13] A. Ebrahimi, F. Jasim, and W. Cheung, "The future of tire energy: a novel one-end cap structure for sustainable energy harvesting," *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, vol. 13, pp. 63–90, 2024. doi: 10.1007/s40243-023-00254-3

[14] S. Vaishak, R. Manjunatha, and G. L. Manjunath, "Piezoelectric energy harvesting from automotive wheels," in *Springer Proceedings in Materials*, vol. 18, 2022, pp. 163–178. doi: 10.1007/978-981-19-5395-8_13

[15] X. Rui, Z. Zeng, and Y. Zhang, "Design and Experimental Investigation of a Self-Tuning Piezoelectric Energy Harvesting System for Intelligent Vehicle Wheels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 2, pp. 1440–1451, 2020. doi: 10.1109/TVT.2019.2959616

[16] A. E. Kubba and K. Jiang, "Efficiency enhancement of a cantilever-based vibration energy harvester," *Sensors*, vol. 14, no. 1, pp. 188–211, 2013. doi: 10.3390/s140100188

[17] G. Manla, N. M. White, and J. Tudor, "Harvesting energy from vehicle wheels," in *TRANSDUCERS 2009*, 2009, pp. 1389–1392.

[18] Y. Zhang, R. Zheng, and K. Shimono, "Effectiveness testing of a piezoelectric energy harvester for an automobile wheel using stochastic resonance," *Sensors*, vol. 16, no. 10, p. 1727, 2016. doi: 10.3390/s16101727

[19] H. A. Sodano, D. J. Inman, and G. Park, "Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for recharging batteries," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 16, no. 10, pp. 799–807, 2005. doi: 10.1177/1045389X05056681

[20] M. Elhadidi, M. Helal, O. Nassar, M. Arafa, and Y. Zeyada, "Tunable bistable devices for harvesting energy from spinning wheels," *Proceedings of SPIE*, vol. 9431, 2015. doi: 10.1117/12.2083669

[21] J. R. Leppe-Nerey, F. Z. Sierra-Espinosa, and M. E. Nicho, "Energy harvesting by car-tire using piezoelectric polymer films blended with carbon-nanotubes," *Next Energy*, vol. 5, p. 100177, 2024. doi: 10.1016/j.nxener.2024.100177

[22] M. Momen, S. Ebrahimejad, and M. Mollajafari, "Multi-objective optimization of exponential-cross-section piezoelectric cantilever under tire rotational excitation for self-powered tire pressure monitoring systems," *Journal of Cleaner Production*, vol. 493, p. 145255, 2025. doi: 10.1016/j.jclepro.2025.145255

[23] K. Nguyen, M. Bryant, and I. Song, "The application of PVDF-based piezoelectric patches in energy harvesting from tire deformation," *Sensors*, vol. 22, no. 24, p. 9995, 2022. doi: 10.3390/s22249995

[24] F. Cottone, H. Vocca, and L. Gammaitoni, "Nonlinear energy harvesting," *Physical Review Letters*, vol. 102, no. 8, p. 080601, 2009. doi: 10.1103/PhysRevLett.102.080601

[25] M. Momen, M. Mollajafari, and S. Ebrahimejad, "Energy harvesting with a single beam with two radial sections under the tire rotation excitation," *Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of the*

بیانیه هوش مصنوعی: در جریان آماده‌سازی این اثر، نویسندگان از ChatGPT به منظور بهبود نگارش گرامری و بازنویسی برخی جملات جهت ارتقای روانی متن استفاده کرده‌اند. پس از استفاده از این ابزار، نویسندگان محتوا را در صورت نیاز بررسی و ویرایش کرده و مسئولیت کامل محتوای مقاله منتشرشده را بر عهده می‌گیرند.

حامی مالی: این پژوهش بدون دریافت حمایت مالی از سازمان یا نهاد خاصی انجام شده است.

نقش نویسندگان:

جواد فرجادی بجستانی: مفهوم‌پردازی؛ روش‌شناسی؛ شبیه‌سازی نرم‌افزاری؛ انجام پژوهش و محاسبات؛ تحلیل محاسباتی و ریاضی. دکتر محمدحسین ابوالبشری: نظارت بر پروژه؛ بازبینی و ویرایش علمی متن؛ مدیریت پروژه

منابع

- [1] Z. Liu, W. Qin, and S.-K. Lyu, "Design and Verification of a Novel Energy Harvester for Tire Pressure Monitoring Systems," *Machines*, vol. 11, no. 5, p. 562, 2023. doi: 10.3390/machines11050562
- [2] F. Li, Y. W. Li, and Q. Zhou, "A watch in developments of intelligent tire inspection and monitoring," in *2005 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, 2005, pp. 333–338. doi: 10.1109/ICVES.2005.1563668
- [3] M. Germer, U. Marschner, and A. Richter, "Summary of energy collection application in vehicle tire pressure monitoring system," in *ACM International Conference Proceeding Series*, 2019, pp. 1–6. doi: 10.1145/3351917.3351918
- [4] C. R. Bowen and M. H. Arafa, "Energy harvesting technologies for tire pressure monitoring systems," *Advanced Energy Materials*, vol. 5, no. 7, p. 1401787, 2015. doi: 10.1002/aenm.201401787
- [5] M. Germer, U. Marschner, and A. Richter, "Energy Harvesting for Tire Pressure Monitoring Systems from a Mechanical Energy Point of View," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 10, pp. 7700–7714, 2022. doi: 10.1109/JIOT.2022.3152547
- [6] N. Persson, S. Ahlqvist, and U. Forssell, "Low tire pressure warning system using sensor fusion," *SAE Technical Paper*, 2001-01-3337, 2001. doi: 10.4271/2001-01-3337
- [7] Y.-J. Wang, C.-D. Chen, and C.-K. Sung, "Design of a frequency-adjusting device for harvesting energy from a rotating wheel," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 159, no. 2, pp. 196–203, 2010. doi: 10.1016/j.sna.2009.12.007
- [8] J. Siang, M. H. Lim, and M. S. Leong, "Review of vibration-based energy harvesting technology: Mechanism and architectural approach," *International Journal of Energy Research*, vol. 42, no. 5, pp. 1870–1893, 2018. doi: 10.1002/er.3986
- [9] Y. Li, C. Xie, S. Quan, C. Zen, and W. Li, "Vibration energy harvesting in vehicles by gear segmentation and a virtual displacement filtering algorithm," *International Journal of Energy Research*, vol. 42, no. 4, pp. 1702–1713, 2018. doi: 10.1002/er.3975
- [10] C. B. Williams and R. B. Yates, "Analysis of a micro-electric generator for microsystems," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 52, no. 1–3, pp. 8–11, 1996. doi: 10.1016/0924-4247(96)80118-X

- wings," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 18, no. 9, pp. 1–7, 2018. doi: [10.22092/amr.2022.358840.1419](https://doi.org/10.22092/amr.2022.358840.1419)
- [31] S. J. Roundy, "Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion," Ph.D. dissertation, University of California, Berkeley, 2003.
- [32] M. Renaud, P. Fiorini, and R. van Schaijk, "Harvesting energy from the motion of human limbs: the design and analysis of an impact-based piezoelectric generator," *Smart Materials and Structures*, vol. 18, no. 3, p. 035001, 2009. doi: [10.1088/0964-1726/18/3/035001](https://doi.org/10.1088/0964-1726/18/3/035001)
- [33] H. Kim, W.-C. Tai, and J. Parker, "Self-tuning stochastic resonance energy harvesting for rotating systems under modulated noise and its application to smart tires," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 122, pp. 769–785, 2019. doi: [10.1016/j.ymssp.2018.12.040](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.12.040)
- [34] Q. Gao, W. Li, and Y. Shi, "A rotating auxetic energy harvester for vehicle wheels," *Engineering Structures*, vol. 288, p. 116190, 2023. doi: [10.1016/j.engstruct.2023.116190](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116190)
- ISME*, vol. 25, no. 4, pp. 81–99, 2024. doi: [10.30506/ijmep.2023.553046.1875](https://doi.org/10.30506/ijmep.2023.553046.1875)
- [26] H. Givois, A. Allein, and F. Le Krom, "Strain Energy Harvesting Performances of Piezoelectric Composite Transducers in Rolling Tires," *Energy Conversion and Management*, 2025 (In Press). doi: [10.2139/ssrn.5229765](https://doi.org/10.2139/ssrn.5229765)
- [27] V. Rastogi, A. Mukherjee, and Dasgupta, "A review on extension of Lagrangian-Hamiltonian mechanics," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 33, no. 1, pp. 22–33, 2011. doi: [10.1590/S1678-58782011000100004](https://doi.org/10.1590/S1678-58782011000100004)
- [28] E. Jacquelin, S. Adhikari, and M. I. Friswell, "A piezoelectric device for impact energy harvesting," *Smart Materials and Structures*, vol. 20, no. 10, p. 105008, 2011. doi: [10.1088/0964-1726/20/10/105008](https://doi.org/10.1088/0964-1726/20/10/105008)
- [29] M. Gen and R. Cheng, "A brief review of penalty methods in genetic algorithms for optimization," in *Proceedings of the Korean Operations and Management Science Society Conference*, 1996.
- [30] R. Yeganeh, S. A. Bagherzadeh, and M. Salehi, "Experimental and numerical study of energy harvesting from harmonic loading on high aspect ratio micro-UAV