

Experimental Investigation of Wind Energy Harvesting Based on the Galloping Phenomenon

Ehsan Bakhshi,¹ Amin Taraghi Osguei,*² Alireza Alizadeh Milani³

¹ Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran, bakhshie26@gmail.com

² Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran, taraghi@sut.ac.ir

³ Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran, a_alizadeh403@sut.ac.ir

Keywords:

galloping phenomenon,
piezoelectric,
wind energy harvesting,
electromagnetic induction,
renewable energy.

Original Research Article

Paper History:

Received: 26/08/2025

Revise: 24/09/2025

Accepted: 20/10/2025

Abstract: In recent years, due to the growing global demand for sustainable and environmentally compatible energy solutions, the focus on the development and utilization of renewable energy sources has increased. Among these, wind energy has attracted special attention due to its wide availability and considerable potential for generating electrical power. In this study, inspired by energy harvesting systems (based on structural vibrations caused by the galloping phenomenon), a laboratory-scale setup was designed and constructed. This system consisted of a cantilevered flexible beam on which two types of mechanical-to-electrical energy converters were mounted in combination: a piezoelectric transducer and a coil-and-magnet assembly for electromagnetic induction. The main objective of this research was to achieve maximum electrical power output from galloping-induced vibrations and to compare the performance of two energy conversion methods. Experimental results showed that the maximum power output of the designed setup, using the electromagnetic induction method in AC mode with a load resistance of 100 ohms, was 8100 microwatts. The results showed that the proposed structure could be very useful as a power generation unit with the aim of producing maximum power for simultaneous consumption and storage. Providing the possibility of adjusting the external load of the consumer unit and the storage unit independently for maximum energy harvesting was the main advantage of the proposed structure.

How to cite this article: Bakhshi, E., Taraghi Osguei, A., Alizadeh Milani, A., "Experimental Investigation of Wind Energy Harvesting Based on the Galloping Phenomenon", Energy Engineering and Management, Vol. 15, No. 1, PP. 70-85, 2025. <https://doi.org/10.22052/EEM.2025.257042.1140>

© 2023 University of Kashan Press.

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Extended Abstract

Introduction

In recent decades, the rapid growth of the global population and the increasing energy demand, along with the environmental concerns arising from the excessive use of fossil fuels, have drawn the attention of researchers toward renewable and clean energy

sources. Among these resources, wind energy has gained particular importance due to its abundance, accessibility, and high potential for electricity generation. However, conventional wind energy harvesting technologies such as large-scale wind turbines face several challenges, including high

installation and maintenance costs, the need for extensive land areas, and the generation of noise pollution. Therefore, the development of small-scale wind energy harvesting systems capable of utilizing structural vibrations induced by wind flow has become an important area of research.

One of the well-known phenomena in this context is the galloping phenomenon, a type of self-excited oscillation that occurs in bluff bodies subjected to crosswind flows. When properly controlled, this phenomenon can serve as a significant source for converting mechanical vibration energy into electrical energy. In the present study, inspired by the galloping phenomenon, a hybrid energy harvesting system based on piezoelectric and electromagnetic induction mechanisms was designed, fabricated, and experimentally evaluated. The main objective of this research is to examine the performance of these two energy conversion methods under urban wind conditions in order to achieve the maximum electrical power output from galloping-induced vibrations.

The distinguishing feature of this study lies in the simultaneous use of both energy harvesting mechanisms and the experimental comparison of their performances within a common laboratory setup, as well as the measurement of the power output in the hybrid operating mode. This approach provides a more comprehensive understanding of the system's behavior under realistic urban wind conditions. The findings of this research indicate that the hybrid approach can significantly contribute to the simultaneous development of energy harvesting and storage systems, particularly for off-grid applications and low-power electronic devices.

Materials and Methods

In this paper, to investigate the performance of the system, a small-scale laboratory prototype was designed and fabricated. The system consists of a cantilevered aluminum beam, at the free end of which a rectangular bluff body, made of lightweight foam, was attached to induce galloping oscillations. Two energy transducers were mounted on the beam in a hybrid configuration:

1. A piezoelectric transducer for converting mechanical deformations into electric charge through the direct piezoelectric effect.
2. An electromagnetic induction transducer, consisting of a copper coil and a neodymium permanent magnet, which generated an induced voltage according to Faraday's law of electromagnetic induction as a result of the relative motion between the magnet and the coil.

To generate airflow, a laboratory jet fan with a uniform and controlled velocity was used at different distances (ranging from 0 to 20 cm) from the bluff body to simulate galloping conditions. The system was equipped with electronic circuits for AC-to-DC conversion and an energy storage unit using a lithium battery.

The output voltage and current were measured using a digital multimeter under various external load resistances. The range of resistance values was set between 47 and 2000 Ω for the electromagnetic converter and between 780 and 100,000 Ω for the piezoelectric converter. The electrical output power was calculated using the relation (1):

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (1)$$

where P is the power (in watts), V the output voltage (in volts), and R the load resistance (in ohms).

Experiments were conducted under constant airflow conditions and at different fan-to-bluff-body distances to determine the relationship between wind velocity, vibration amplitude, and output power.

Results

The experimental results demonstrate that the proposed hybrid system is capable of effectively harvesting energy from vibrations induced by the galloping phenomenon with considerable efficiency. Among the two employed conversion mechanisms, the electromagnetic induction method exhibited a significantly superior performance compared to the piezoelectric method.

The maximum voltage output obtained from the electromagnetic induction mechanism was ± 1.38 V in DC mode and approximately 1.8 V in AC mode. The maximum power output in AC mode was measured to be 8100 μ W, while in DC mode it reached about 382.5 μ W. For the piezoelectric converter, the maximum generated power was only 1.25 μ W at a resistance of 50 k Ω .

An increase in the distance between the fan and the bluff body resulted in a noticeable reduction in the amplitude of oscillations and consequently in the output voltage. On average, at a distance of 20 cm, the voltage drops approximately 22% compared with the case of near-zero spacing. The power-current plots for all three configurations showed a concave downward trend, indicating that as the current increased, the power initially rose to a peak value and then decreased due to internal damping and resistive losses.

Experimental observations also revealed that the hybrid system is capable of simultaneous energy harvesting in both AC and DC modes, allowing for direct consumption of the generated energy while simultaneously storing it. Furthermore, the electromagnetic induction method demonstrated greater stability against sudden changes in wind velocity, whereas the piezoelectric method produced a continuous but lower-amplitude voltage under low wind speed conditions.

Discussion and Conclusion

The results of the present study indicated that utilizing the galloping phenomenon as a source of vibration can serve as an effective foundation for small-scale

wind energy harvesting. A comparison between the two energy conversion methods revealed that the electromagnetic induction approach, due to its higher efficiency and greater power output, was more suitable for applications requiring relatively higher energy levels. In contrast, the piezoelectric method, owing to its simplicity, miniaturization capability, and rapid response to low wind speeds, can be effectively employed in low-power applications such as wireless sensors.

The proposed hybrid piezoelectric–electromagnetic structure combines the advantages of both mechanisms. The piezoelectric transducer provides the initial voltage at low wind velocities, while the electromagnetic transducer generates higher power at moderate to strong wind speeds. This synergistic interaction enhances the total harvested energy and improves the adaptability of the system to various electrical load conditions.

Moreover, the findings showed that optimizing the system's geometric parameters such as the shape of the bluff body, the stiffness of the beam, and the

spacing between the magnet and the coil, has a significant influence on the onset of galloping and the overall energy conversion efficiency. The designed prototype achieved a maximum electrical power output of 8100 μW , which is sufficient to power low-consumption electronic devices, wireless sensors, and small energy storage units in urban or off-grid environments.

However, the present research demonstrates that the galloping phenomenon, typically regarded as a structural instability, can be effectively harnessed as an innovative renewable energy source on a microscale. The proposed hybrid configuration enabled simultaneous energy harvesting, storage, and utilization, providing a promising foundation for the development of self-powered systems and autonomous sensors independent of external power supplies. It is recommended that future studies focus on optimizing materials and electronic circuitry and evaluating the system's performance under real wind flow conditions to pave the way for the commercialization of this technology.

بررسی تجربی میزان برداشت انرژی باد بر مبنای پدیده گالوپینگ

احسان بخشی^۱، امین ترقی اسکویی^۲، علیرضا علیزاده میلانی^۳

^۱ کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران، bakhshie26@gmail.com

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران، taraghi@sut.ac.ir

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران، a_alizadeh403@sut.ac.ir

واژه‌های کلیدی:

پدیده گالوپینگ،

پیزوالکتریک،

تولید انرژی از باد،

القای الکترومغناطیسی،

انرژی تجدیدپذیر.

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸

چکیده: در سال‌های اخیر و به دنبال افزایش نیاز جهانی به راه‌حل‌های پایدار و سازگار با محیط‌زیست در حوزه انرژی، تمرکز بر توسعه و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر افزایش یافته است. در این میان، انرژی باد به دلیل دسترسی مناسب و پتانسیل قابل توجه آن برای تولید انرژی الکتریکی، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است. در این پژوهش، با الهام از سامانه‌های برداشت انرژی مبتنی بر ارتعاشات سازه‌ای ناشی از پدیده گالوپینگ، یک سامانه آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. این سامانه متشکل از یک تیر انعطاف‌پذیر یک‌سرگردار است که دو مبدل انرژی مکانیکی به الکتریکی شامل پیزوالکتریک و مجموعه کوئل و آهنربا برای القای الکترومغناطیسی به صورت ترکیبی بر روی آن نصب شده‌اند. هدف اصلی تحقیق، دستیابی به بیشینه توان الکتریکی حاصل از ارتعاشات گالوپینگ و مقایسه عملکرد دو روش تبدیل انرژی است. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که بیشینه توان تولیدشده توسط دستگاه آزمایش طراحی شده، در خروجی AC روش القای الکترومغناطیسی و در مقاومت بار ۱۰۰ اهم، برابر با ۸۱۰۰ میکرووات بوده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد ساختار ارائه شده می‌تواند به عنوان یک واحد تولید توان با هدف تولید حداکثر توان به منظور مصرف و ذخیره‌سازی همزمان بسیار مفید باشد. فراهم شدن امکان تنظیم بار خارجی واحد مصرف‌کننده و واحد ذخیره‌سازی به صورت مستقل برای برداشت حداکثر انرژی اصلی‌ترین مزیت ساختار پیشنهادی است.

۱. مقدمه

امروزه بخش عمده‌ای از نیاز مصرفی انرژی در جهان از سوزاندن سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود. وابستگی به منابع انرژی تجدیدناپذیر، سبب تشدید خطرات زیست‌محیطی، گرمایش جهانی و آلودگی هوا خواهد شد [۱]. استفاده بی‌رویه از منابع انرژی تجدیدناپذیر، نوعی تهدید برای زندگی در جوامع مختلف به شمار می‌آید. در این راستا، به دنبال افزایش نیاز جهانی به راه‌حل‌های پایدار و سازگار با محیط‌زیست در حوزه انرژی، تمرکز بر توسعه و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر افزایش یافته است [۲].

یکی از بهترین گزینه‌ها که بسیار مورد توجه قرار گرفته، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر انرژی خورشیدی، بادی، آبی و زمین‌گرمایی است [۳]. از این میان، انرژی باد به‌عنوان یکی از غنی‌ترین و در دسترس‌ترین منبع انرژی در سراسر جهان شناخته می‌شود. با توجه به پتانسیل بالای تولید توان از انرژی باد، فناوری به‌کاررفته برای تبدیل انرژی این منبع به توان الکتریکی، عمدتاً بر مبنای توربین بادی استوار است [۴].

با وجود پیشرفت‌های صورت‌گرفته در توربین‌های بادی با مقیاس بزرگ، محدودیت‌هایی نظیر نیاز به فضاهای بزرگ برای نصب توربین، هزینه‌های بالای نصب و نگهداری، تأثیرات منفی بر اکوسیستم و همچنین امکان ایجاد آلودگی صوتی به دلیل سرعت بالای نوک پره‌های توربین‌های بادی محور افقی موجب شده، تا پژوهشگران به دنبال فناوری‌های نوین در مقیاس کوچک برای برداشت انرژی از باد باشند [۵].

یکی از فناوری‌های نوین در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر که در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده، بهره‌گیری از ارتعاشات نوسانی سازه‌ها در اثر جریان باد و تبدیل آن به انرژی الکتریکی است. از جمله پدیده‌های ارتعاشی مهم می‌توان به پدیده ارتعاش ناشی از گردابه، بافتینگ، فلاتر و از همه مهم‌تر پدیده گالوپینگ اشاره کرد [۶]. پدیده ارتعاش ناشی از گردابه همانند سایر پدیده‌های ارتعاشی نقش مهمی در رفتار سازه‌ها تحت اثر جریان باد ایفا می‌کند. هنگامی که سیالی از کنار یک مانع عبور می‌کند، در پشت مانع گردابه‌هایی تشکیل می‌شوند که در محدوده مشخصی از عدد رینولدز به صورت متناوب و منظم ظاهر می‌شود [۷].

پدیده بافتینگ یکی دیگر از پدیده‌های ارتعاشی به ارتعاشات گذرا و اغتشاشی سازه‌ها گفته می‌شود که ناشی از نیروهای آیرودینامیکی غیریکنواخت است؛ به‌ویژه هنگامی که جریان هوا دچار

جدایش، آشفتگی یا گردابه‌زنی می‌شود و بخش‌هایی از آن بر سازه تأثیر می‌گذارد [۸].

در کنار سایر پدیده‌های موجود، گالوپینگ به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پدیده‌های ارتعاشی خود تحریک، ناشی از اندرکنش سازه‌های انعطاف‌پذیر بر اثر برخورد جریان باد است که می‌تواند منجر به ارتعاشات شود [۹]. پدیده‌های گالوپینگ اغلب در فرکانس‌های پایین‌تر و دامنه‌های نوسانی بالاتر رخ می‌دهند؛ به همین دلیل ارتعاشات ناشی از این پدیده، پتانسیل بالایی برای تولید انرژی دارند [۱۰]. در حالت کلی، فناوری‌های مورد استفاده برای برداشت انرژی در مقیاس‌های ماکرو، میکرو و نانو، ناشی از ارتعاشات بر پایه گالوپینگ، به صورت الکترومغناطیس، الکترواستاتیک، تریبوالکتریک و پیزوالکتریک است [۱۱]. به‌طور خلاصه، در روش برداشت انرژی مکانیکی ایجادشده توسط باد به طریق القای الکترومغناطیس، تولید جریان الکتریکی با حرکت نسبی آهنربا و سیم‌پیچ بر اثر ارتعاش حاصل می‌شود [۱۲]. این مدل از تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی، برای سامانه‌هایی که دامنه ارتعاشی بالایی دارند کاربردی‌تر است [۱۳].

برداشت‌کننده‌های الکترواستاتیک، سیستم‌هایی با خازن‌های متغیرند که از یک حرکت نسبی بین دو صفحه، بارهای سطحی تولید می‌کنند و باعث تغییر ظرفیت خازن بین حداقل تا حداکثر مقدار می‌شود. این تغییر ظرفیت در حضور بار اولیه باعث جابه‌جایی بارهای الکتریکی و در نتیجه تولید انرژی الکتریکی از ارتعاشات مکانیکی می‌گردد [۱۴]. از آنجاکه این سامانه‌ها برای آغاز فرایند برداشت انرژی به یک ولتاژ اولیه نیاز دارند، تأمین این ولتاژ در همه شرایط ممکن است عملی نباشد. علاوه بر این، خروجی این برداشت‌کننده‌ها معمولاً دارای ولتاژ بالا و جریان الکتریکی پایین است که استفاده از آن‌ها را برای برخی کاربردها محدود می‌سازد. بهره‌برداری مؤثر از توان تولیدشده در این سامانه‌ها مستلزم به‌کارگیری مدارهای جابجایی تقویت‌کننده‌ها و مبدل‌های تطبیق امپدانس است که خود موجب افزایش پیچیدگی و هزینه ساخت سیستم می‌شود و ممکن است از منظر اقتصادی، استفاده از این نوع برداشت‌کننده‌ها را در برخی کاربردها توجیه‌ناپذیر نماید [۱۵].

در مولدهای تریبوالکتریک، بر اثر اصطکاک یا تماس فیزیکی دو ماده ناهمجنس، بار الکتریکی تولید می‌شود. این ویژگی در مواد مختلفی نظیر پلیمرها، سرامیک‌ها، فلزات و کامپوزیت‌ها وجود دارد. نانو ژنراتورهای تریبوالکتریک، برای مهار انرژی حرکتی انسان و

همچنین ارتعاشات ناشی از انرژی باد برای تولید جریان الکریسته مورد استفاده قرار می گیرند [۱۶].

فناوری پیزوالکتریک، می تواند یک روش ساده برای تبدیل مستقیم انرژی ارتعاشات مکانیکی ناشی از پدیده گالوپینگ به جریان الکتریسته باشد که به اثر مستقیم پیزوالکتریک معروف است [۱۷] و [۱۸]. پیزوالکتریک ها موادی از جنس سرامیک ها و پلیمرها هستند که بر اثر اعمال فشار یا تحت تأثیر تنش های مکانیکی دوقطبی می شوند. این دوقطبی ها در سرامیک ها به صورت کریستال و در پلیمرها به صورت درشت مولکولی ایجاد می گردند و همین عامل باعث ایجاد اختلاف پتانسیل و تولید جریان الکتریکی می گردد [۱۹]. پژوهشگران مطالعات زیادی در مورد روش های برداشت انرژی از طریق ارتعاشات بر پایه پدیده گالوپینگ و عوامل مؤثر در افزایش بازده سیستم انجام داده اند، به طوری که دای و همکاران [۲۰] یک سامانه برداشت انرژی براساس القای الکترومغناطیسی مبتنی بر نوسانات گالوپینگ مدل سازی کردند که نتایج آن نشان داد مقاومت بار در حالت بهینه، می تواند توان خروجی را در سرعت های مختلف باد بیشینه کند. عبدالموللا و عبدالکفی [۲۱] در پژوهش خود نشان دادند که امپدانس الکتریکی بار می تواند به طور چشمگیری بر شروع گالوپینگ، دامنه نوسانات و توان برداشت شده در سامانه های انرژی بر تأثیر بگذارد. هو و همکاران [۲۲] رفتار دینامیکی و محدودیت توان یک برداشت کننده انرژی پیزوالکتریک مبتنی بر ارتعاشات گالوپینگ تحت تحریک اجباری را مدل سازی و تحلیل کردند و نشان دادند که مقاومت بار نقش مهمی در توان خروجی سیستم دارد. لی و همکاران [۲۳] یک مدل بهره برداری از انرژی ارتعاشی پیشنهاد کردند که در آن یک بلاف، بین دو کنسول پیزوالکتریک گیره دار قرار داده شد، از دو میله با سختی بالا برای اتصال مورد استفاده قرار گرفت، زمانی که بلوک جرمی دچار نوسان می شود، پیزوالکتریک های متصل شده تغییر شکل داده و انرژی الکتریکی تولید می کنند. ژانگ و همکاران [۲۴] یک مدل غیرخطی با پارامترهای گسترده برای برداشت انرژی از نوسانات براساس پدیده گالوپینگ، با طراحی ساختار تیر به صورت پله ای ارائه کردند؛ این مطالعه نشان می دهد که استفاده از تیر پله ای می تواند به طور مؤثری موجب افزایش تنش و کرنش در المان های پیزوالکتریک شده و در نتیجه، بهره وری تولید توان را افزایش دهد. جیانگ و همکاران [۲۵] یک برداشت کننده هیبریدی پیزوالکتریک و الکترومغناطیسی با دو تیر لبه گیر طراحی کردند که توانست بازده و پهنای باند کاری را در فرکانس های پایین بهبود بخشد. ژانگ و همکاران [۲۶] در پژوهش خود یک برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی مبتنی بر گالوپینگ را

طراحی و بررسی کردند. آن ها ابتدا مدل های نظری برای پیش بینی عملکرد سیستم ارائه دادند و سپس با آزمایش های تونل باد و شرایط واقعی محیط نشان دادند که این سیستم می تواند انرژی کافی برای تغذیه حسگرها در سرعت های باد کم تولید کند. شانگ و همکاران [۲۷] یک ساختار نوین برداشت انرژی پیزوالکتریک با بازوهای قوسی شکل معرفی کرده اند. در این پژوهش طراحی، مدل سازی و آزمایش نمونه پیشنهادی انجام شد و نشان داده شد که این ساختار می تواند بازده تبدیل انرژی و پهنای باند فرکانسی را نسبت به نمونه های متداول افزایش دهد. شی و همکاران [۲۸] یک برداشت کننده انرژی پیزوالکتریک T شکل طراحی و آزمایش کردند که با بهره گیری از تشدید داخلی و ویژگی های مودهای ارتعاشی، بازده تبدیل انرژی را بهبود داده و پهنای باند کاری را گسترش داده است. چن و همکاران [۲۹] یک برداشت کننده دومنبعی طراحی کردند که با ترکیب ارتعاشات گالوپینگ و ارتعاشات چندجهتی، توانست توان و ولتاژ خروجی را در شرایط مختلف ارتعاشی و بادی بهبود دهند.

با مطالعات صورت گرفته، تیرهای یک سر درگیر، در مقایسه با انواع دیگر تیرها، به ازای مقدار ثابت نیرو، فرکانس طبیعی کمتری داشته، در نهایت کرنش های بیشتری تولید می کنند [۳۰]. اشکال مختلفی از تیرهای یک سر درگیر به صورت مستطیلی، مثلثی، V شکل و دوزنقه ای برحسب نیاز و کاربرد طراحی می شود [۳۱].

برای افزایش توان تولیدی و همچنین افزایش بازده سیستم، امکان ترکیب دو روش پیزوالکتریک و الکترومغناطیس وجود دارد. علاوه بر این، تحقیقات نشان داده اند که طراحی هندسی مناسب و انتخاب دقیق پارامترهای مکانیکی، نظیر سفتی سازه و جرم معادل، نقشی تعیین کننده در ارتعاش بهینه گالوپینگ ایفا می کنند. پیزوالکتریک ها به دلیل چگالی توان بالا نسبت به سایر روش های مهار انرژی ارتعاشی، کاربرد بیشتری داشته و به صورت گسترده مورد استفاده قرار می گیرد [۳۲].

در این پژوهش، با الهام از مطالعات پیشین و با تمرکز بر پیاده سازی آزمایشگاهی، یک نمونه از مدل تیر یک سر درگیر، طراحی و ساخته شده است که با بهره گیری از ارتعاشات بر مبنای پدیده گالوپینگ ناشی از برخورد جریان باد در یک سازه انعطاف پذیر و استفاده از مبدل های پیزوالکتریک و سیستم های الکترومغناطیسی شامل سیم پیچ و آهنربا، توانایی تولید انرژی الکتریکی را دارد. هدف اصلی این پژوهش بررسی تجربی عملکرد سیستم در جریان های باد شهری و ارزیابی پارامترهای الکتریکی خروجی همچون ولتاژ، جریان

که بر اثر میدان جریان اعمال می‌شود. نیروی آیرودینامیک را می‌توان به صورت رابطه (۲) نوشت [۳۴]:

$$F_z(t) = \frac{1}{2} \rho_0 S U^2 A_1 \alpha + \frac{1}{2} \rho_0 S U^2 A_3 \alpha^3 \quad (2)$$

که ρ_0 نشان دهنده چگالی جریان ورودی، U پارامتر سرعت جریان ورودی، S بیانگر سطح مقطع ستون مربع در جهت جریان عمودی، A_1 و A_3 ضرایب تجربی مربوط به شکل نوسان ساز و α نشان دهنده زاویه حمله جریان است.

در سیستم‌های برداشت انرژی، به منظور تبدیل انرژی مکانیکی حاصل از ارتعاش به انرژی الکتریکی، معمولاً از یکی از دو روش پیزوالکتریک یا القای الکترومغناطیسی استفاده می‌شود. در این صورت، اثر پارامترهای الکتریکی به پارامترهای مکانیکی نیز لحاظ می‌گردد. برای توصیف رفتار دینامیکی سازه، معادله کلی به صورت رابطه (۳) نوشته می‌شود [۳۵-۳۸]:

$$M\ddot{w}(t) + (C + C_e)\dot{w}(t) + (K + K_e)w(t) = F_z(t) \quad (3)$$

که K_e بیانگر سفتی الکتریکی و C_e میرایی الکتریکی القا شده است. به طور کلی، این معادله بیانگر یک سیستم ارتعاشی است که تحت تأثیر یک نیروی خارجی قرار دارد و همزمان، بخشی از انرژی نوسانی توسط یک سامانه برداشت انرژی مثلاً پیزوالکتریک یا القای الکترومغناطیسی استخراج می‌شود. افزایش مؤلفه‌های K_e و C_e ناشی از حضور سامانه برداشت انرژی است و تأثیر مستقیمی بر پاسخ دینامیکی و بازده تبدیل انرژی سیستم دارد.

در ادامه، نحوه عملکرد، کاربردها و مزایای دو روش برداشت انرژی از ارتعاشات گالوپینگ، یعنی روش‌های پیزوالکتریک و القای الکترومغناطیسی به صورت جداگانه بررسی شده‌اند.

۱.۲. روش پیزوالکتریک

پیزوالکتریک‌ها موادی هستند که به هنگام فشرده سازی، پیچ خوردن یا تغییر شکل، قابلیت تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی، بدون نیاز به انرژی اضافی را دارند [۳۹]. به فرایند تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی اثر مستقیم پیزوالکتریک گفته می‌شود؛ در مقابل، پروسه تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی اثر معکوس پیزوالکتریک نام دارد که اغلب در سنسورها، عملگرها، دستگاه‌های تولید بخار سرد و محرک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴۰]. تیتانات زیرکونات سرب به عنوان یک سرامیک پلی کریستالی و پلی وینیلیدن فلوراید به عنوان یک ماده پلیمری به عنوان مواد اولیه پیزوالکتریک بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴۱].

ژنراتورهای مینیاتوری پیزوالکتریک دارای ویژگی‌های متعددی از جمله بازده تبدیل انرژی زیاد، قابلیت اطمینان بالا، انعطاف پذیری،

و توان تولیدی است. وجه تمایز این پژوهش، استفاده همزمان از دو روش برداشت انرژی و مقایسه تجربی عملکرد آن‌ها در یک بستر آزمایشی مشترک و همچنین اندازه گیری توان تولیدی در حالت ترکیبی است. این رویکرد امکان دستیابی به درک جامع تر از رفتار سامانه در شرایط واقعی جریان باد شهری را فراهم می‌سازد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد استفاده از روش ترکیبی می‌تواند به توسعه سامانه‌های برداشت و ذخیره سازی همزمان انرژی برای کاربردهای خارج از شبکه و مصارف کم مصرف کمک شایانی نماید.

با توجه به اینکه مکانیزم نمونه ساخته شده طوری است که دو روش برداشت انرژی به صورت همزمان قابلیت تولید توان دارند، از این ویژگی می‌توان برای مصارفی که به صورت دائمی کار می‌کنند مناسب باشد، زیرا ممکن است شدت جریان باد در طول روز متفاوت باشد، در این حالت در مواقع جریان باد پرسرعت، تولید توان بیشتر خواهد بود و ممکن است حتی بیشتر از نیاز مصرف کننده توان تولید شود. در مقابل، برای سرعت‌های باد کم، توان تولیدی کمتر خواهد بود و امکان اختلال در عملکرد مصرف کننده وجود دارد. برای این منظور می‌توان بخشی از انرژی را به کمک ولتاژ DC که دستگاه آزمایشگاهی تولید می‌کند، ذخیره کرد. این کار سبب بهبود عملکرد مصرف کننده نیز می‌شود. همچنین این مطالعه، میزان تلفات ناشی از تبدیل ولتاژ تولیدی AC به DC و بیشترین توان‌های به دست آمده برای هریک از حالت‌های خروجی AC و DC را نیز به خوبی بیان می‌کند.

۲. اصول روش‌های برداشت انرژی براساس پدیده

گالوپینگ

در این بخش، با توجه به تجربی بودن مطالعه، مبانی نظری و معادلات حاکم بر سیستم برای هریک از روش‌ها به صورت کلی بیان می‌شود تا زمینه‌ای برای تحلیل تجربی فراهم گردد.

برای تحلیل ریاضی رفتار سیستم‌های برداشت انرژی مبتنی بر گالوپینگ، ابتدا معادله حاکم بر سازه تحت ارتعاشات گالوپینگ بررسی می‌شود. معادله مدل معمول برداشت انرژی گالوپینگ با جسم بلافاصله به صورت رابطه (۱) است [۳۳]:

$$M\ddot{w}(t) + C\dot{w}(t) + Kw(t) = F_z(t) \quad (1)$$

که M ، C ، K در این رابطه پارامترهای ساختاری مربوط به سیستم هستند؛ M جرم استوانه، C ضریب میرایی سیستم، K سفتی فنر، w جابه جایی بلافاصله و F_z نیروی آیرودینامیکی وارد بر بدنه بلافاصله است

برداشت انرژی در کنار مواد پیزوالکتریک است. عملکرد این مکانیزم طوری است که یکی از عملگرها به سازه متصل شده و عملگر دیگر ثابت می ماند، با حرکت پی در پی و نسبی آهنربا، ناشی از ارتعاش سازه، در داخل سیم پیچ، عمل القای الکترومغناطیس صورت گرفته در نهایت اختلاف پتانسیل در دو سر سیم پیچ ایجاد می شود [۴۸].

به منظور برداشت انرژی موجود در ارتعاشات یک سازه انعطاف پذیر، با استفاده از روش القای الکترومغناطیس، نیازمند به سازه ای با ابعاد بزرگتر نسبت به روش پیزوالکتریک است؛ در مقابل، این روش توان تولیدی بیشتری داشته و در شرایط محیطی خشن، مقاوم تر از سامانه های پیزوالکتریک است [۱۵].

در روش القای الکترومغناطیسی، ولتاژ الکتریکی بر اثر تغییرات جریان یا میدان مغناطیسی در سیم پیچ القا می شود. این پدیده بر پایه قانون فاراده و قانون لنز شکل می گیرد. به صورت کلی، ولتاژ القاشده در سیم پیچ با نرخ تغییر جریان عبوری برابر است. فرم ریاضی برای بیان تغییر جریان سیم پیچ بر حسب زمان به صورت رابطه (۷) است [۴۹]:

$$\frac{di}{dt} = (A/s) \quad (7)$$

که di تغییرات جریان بر حسب آمپر و dt مدت زمان تغییرات بر حسب ثانیه است. بنابراین، ولتاژ القاشده در یک سیم پیچ با اندوکتانس L مطابق رابطه (۸) است:

$$V_L = -L \frac{di}{dt} \quad (8)$$

که V ولتاژ القاشده بر حسب ولت، L اندوکتانس سیم پیچ بر حسب هانری است. علامت منفی در رابطه، جهت مخالف ولتاژ القاشده را در برابر تغییرات جریان نشان می دهد.

اندوکتانس سیم پیچ، به ویژگی های فیزیکی آن از جمله تعداد دورها، سطح مقطع و طول هسته بستگی دارد و به صورت تقریبی از رابطه (۹) به دست می آید:

$$L = \mu_0 \frac{N^2 \cdot A}{l} \quad (9)$$

که در آن، μ_0 ضریب نفوذپذیری فضای آزاد، N تعداد دور سیم، A مساحت سطح مقطع هسته πr^2 بر حسب متر مربع و l طول هسته به ازای متر است. بنابراین، با افزایش تعداد دور سیم پیچ یا سطح مقطع، اندوکتانس افزایش یافته و ولتاژ القاشده بیشتر خواهد شد. در نهایت ولتاژ خروجی سیم پیچ را می توان به صورت رابطه (۱۰) محاسبه کرد:

$$V_L = \mu_0 \frac{N^2 \cdot A}{l} \frac{di}{dt} \quad (10)$$

سبک وزن، ولتاژ خروجی بالا با سطح جریان پایین و امپدانس خروجی بالا هستند [۴۲]. وجود چنین مزایایی در این نوع مواد، برداشت انرژی ارتعاشی در مقیاس کوچک یا بزرگ، از منابع مختلف به خصوص انرژی باد را امکان پذیر می کند [۴۳]. در مقایسه با روش سنتی در بهره برداری از انرژی باد، فناوری پیزوالکتریک امکان استفاده در مقیاس کوچک را فراهم می کند [۴۴]. به علاوه، فناوری پیزوالکتریک می تواند در مکان هایی که به طور دائمی در معرض حرکت باد یا ارتعاشات قرار دارند، مانند پل ها، ساختمان ها، و دیگر سازه های مهندسی، انرژی تولید کند [۴۵]. با وجود پتانسیل های بالا، فناوری پیزوالکتریک در زمینه برداشت انرژی از باد با چالش هایی نیز مواجه است. از مهم ترین این چالش ها می توان به توان تولیدی کم در مقایسه با توربین های بادی، مشکلات مربوط به ذخیره سازی انرژی تولید شده، هزینه های بالا برای تولید مواد پیزوالکتریک با کارایی بالا و مشکل خستگی در صفحه های پیزوالکتریک که به مرور زمان ایجاد می شود، اشاره کرد [۴۶]. وجود چنین عواملی باعث شده تا اکثر پژوهش ها در این حوزه به دنبال افزایش کارایی این مواد، کاهش هزینه ها و بهبود فرایندهای ذخیره سازی انرژی باشند تا این فناوری بتواند در آینده به عنوان یک گزینه اصلی در سیستم های انرژی تجدیدپذیر مورد استفاده قرار گیرد [۴۷].

برای بیان معادلات حاکم بر پیزوالکتریک مواد مختلف، از روابط (۴) و (۵) استفاده می شود:

$$\varepsilon_{ij} = s_{ijkl}^E \sigma + d_{nij} E_n \quad (4)$$

$$D_n = d_{nij} \sigma_{ij} + \xi_{nm}^{\sigma} E_m \quad (5)$$

که در آن، ε نشان دهنده کرنش، σ بیانگر تنش، S^E تسلیم برای میدان الکتریکی، E میدان الکتریکی، D جابه جایی الکتریکی، ξ^{σ} ثابت دی الکتریک تحت تنش ثابت و d ثابت پیزوالکتریک (m/v) است. مقدار ولتاژ خروجی از پیزوالکتریک به صورت رابطه (۶) قابل محاسبه است:

$$V = \frac{dFt}{\varepsilon_r \varepsilon_0 A} \quad (6)$$

در این رابطه، F نشان دهنده نیرو، t ضخامت و A مساحت است.

۲.۲. روش القای الکترومغناطیس

الکترومغناطیس یا همان الکترودینامیک، روشی از تولید توان الکتریکی براساس قانون القای الکترومغناطیس فارادی است. این سازوکار ترکیبی از یک سیم پیچ و آهنرباست. به کارگیری این مکانیزم در تیرهای یکسر گیردار، جهت بهره گیری از انرژی ارتعاشی ایجادشده توسط جریان باد بر پایه پدیده گالوپینگ، یکی دیگر از روش های

۳. ساخت سیستم برداشت کننده انرژی

با پژوهش های متعدد انجام شده، برای شبیه سازی و پیاده سازی برداشت انرژی از ارتعاشات ناشی از پدیده گالوپینگ در مقیاس آزمایشگاهی، معمولاً از ساختارهایی ساده اما مؤثر مانند تیر یک سر گیردار استفاده می شود. از عمده دلایل استفاده از این مدل در مطالعات تجربی، می توان به سادگی، پایداری و امکان پیاده سازی آسان اشاره نمود.

در این پژوهش، به منظور بررسی عملکرد پدیده گالوپینگ در برداشت انرژی از باد، یک دستگاه آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده است. این سامانه متشکل از اجزای اصلی نظیر تیر آلومینیومی انعطاف پذیر، تکیه گاه گیردار، پایه نگهدارنده، جسم بلاف، المان پیزوالکتریک و مجموعه سیم پیچ و آهنرباست. در ادامه، ساختار کلی دستگاه آزمایشگاهی به تفکیک قسمت بدنه، برداشت انرژی، تولید جریان باد، تبدیل توان و ذخیره سازی در جدول (۱) بیان شده است. سپس اجزای هر بخش به طور کامل از لحاظ ساختاری و کاربرد تشریح شده است.

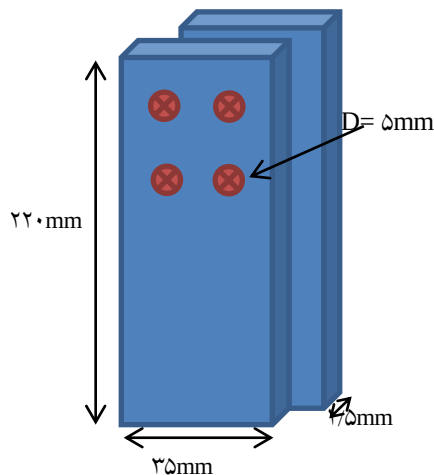
جدول (۱): مشخصات تجهیزات سیستم برداشت انرژی

ردیف	بخش	مشخصات
۱	سازه نوسانی	الف) پایه آهنی: برای نگه داشتن سازه ب) تکیه گاه گیردار ج) تیر مرتعش آلومینیومی: برای نصب مبدل پیزوالکتریک و جسم بلاف روی آن د) جسم بلاف: جهت ایجاد مانع در مسیر جریان و تولید ارتعاش
۲	برداشت انرژی	الف) صفحه پیزوالکتریک ب) سیم پیچ ج) آهنربای دائمی
۳	تولید جریان باد	الف) جت فن: برای ایجاد جریان باد ب) پایه ریلی: برای ایجاد فاصله بین جت فن و جسم بلاف و تغییر در سرعت جریان باد
۴	تبدیل توان و ذخیره سازی	الف) مدار تبدیل جریان AC به DC: شامل پل دیودی، خازن و دیود یک سوکنده ب) باتری لیتیومی برای ذخیره سازی ج) ال ای دی در خروجی پیزوالکتریک به عنوان مصرف کننده توان الکتریکی

مجموعه در معرض جریان باد، منجر به ایجاد نوسانات عرضی در تیر می شود.

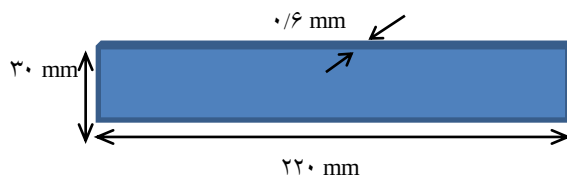
در این پژوهش به منظور تبدیل ارتعاشات مکانیکی به انرژی الکتریکی، در ساختار سیستم از دو مبدل برداشت کننده انرژی استفاده شده است. مبدل انرژی پیزوالکتریک که بر پایه تغییر شکل مکانیکی عمل می کند و مجموعه سیم پیچ و آهنربا برای القای الکترومغناطیسی بر روی تیر آلومینیومی نصب شده اند تا بیشینه توان برداشت شده از نوسانات فراهم شود. همچنین برای حفظ تعادل سازه و جلوگیری از ارتعاشات ناخواسته، از پایه نگهدارنده آهنی استفاده شده است. این دستگاه آزمایش، امکان تحلیل تجربی پدیده گالوپینگ، بررسی تأثیر شکل بلاف و سرعت جریان باد به توان های تولیدی مبدل ها را فراهم می کند.

نمایش طرحواره ورقه های آهنی استفاده شده به عنوان تکیه گاه تیر مرتعش آلومینیومی در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): ورقه های به کاررفته به عنوان تکیه گاه

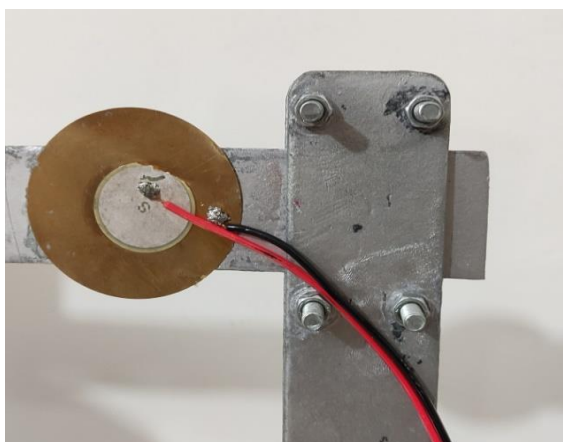
شکل (۲) طرحواره تیر انعطاف پذیر از جنس آلومینیوم را که مبدل های الکتریکی روی آن نصب می شوند، نشان می دهد. این تیر مرتعش دارای ضخامت ۰/۶ mm، عرض ۳۰ mm و طول ۱۹۰ mm از تکیه گاه تا جسم بلاف را دارد. تیر آلومینیومی توسط پیچ و مهره با پایه های تکیه گاه متصل شده، سمت دیگر آن به طور کامل آزاد است.



شکل (۲): طرحواره تیر آلومینیومی

ساختار دستگاه آزمایشگاهی بدین صورت است که تیر آلومینیومی از یک طرف به پایه هایی از جنس آهن به عنوان تکیه گاه متصل شده و از طرف دیگر، جسم بلاف با هندسه ای مناسب جهت تحریک نوسانات گالوپینگ به آن الصاق شده است. با قرار گرفتن این

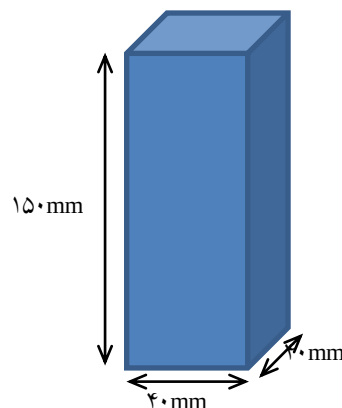
پیزوالکتریک‌ها انواع و شکل‌های مختلفی دارند. با توجه به هندسه ورقه آلومینیومی تیر مرتعش، پیزوالکتریک مستطیلی مناسب سازه برداشت‌کننده انرژی خواهد بود. زمانی که تیر آلومینیومی تحت خمش قرار می‌گیرد، صفحه پیزوالکتریک مستطیل می‌تواند سطح تماس بیشتری را پوشش داده و تحت تأثیر ارتعاش و خمش بیشتری قرار گیرد. ولی بنا بر کمیاب بودن این نوع پیزوالکتریک‌ها در بازار ایران، در این پژوهش از پیزوالکتریک‌های گرد استفاده شد. مطابق شکل (۶)، ۲ نوع پیزوالکتریک با سطح مقطع گرد با قطرهای ۳۵mm و $D_1 = 50\text{mm}$ با مقداری فاصله از تکیه‌گاه به تیر آلومینیومی متصل شد.



شکل (۶): تصویر پیزوالکتریک متصل شده به سازه

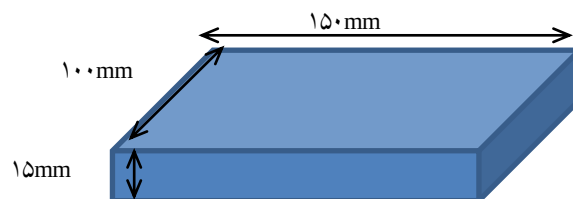
ولتاژ تولیدشده در پیزوالکتریک‌ها به صورت AC است. پیزوالکتریک‌های با قطر $D_1 = 35\text{mm}$ دارای خروجی $1/5 -$ تا $1/5 +$ ولت و $D_2 = 50\text{mm}$ از $3 -$ تا $3 +$ ولت متغیر است. ساختار روش برداشت انرژی به طریق القای الکترومغناطیس، به گونه‌ای است که یک طرف آهنربا به تیر مرتعش متصل شده و طرف دیگر بر اثر ارتعاش تیر حرکت رفت و برگشتی نسبت به سیم پیچ داشته و باعث ایجاد پدیده القای الکترومغناطیسی می‌شود. در این پژوهش برای پیاده‌سازی روش اشاره شده، از یک آهنربای قوی نئودیموم گرید N۴۲ استوانه‌ای به طول ۳cm و قطر ۱/۵cm به جای آهنربای فریت، برای بهبود ولتاژ خروجی استفاده شد. برای ساخت سیم پیچ، ابتدا سیم لاکه مسی به قطر ۰/۸mm به تعداد ۶۰ دور حول لوله‌ای با قطر ۳cm پیچانده شد. به دلیل ولتاژ و جریان دریافتی کم، تعداد دور سیم و ضخامت سیم چندین مرحله تغییر یافت؛ در نهایت ایدئال‌ترین حالت با بیشترین توان تولیدی تهیه شد. مشخصات ساختاری سیم پیچ در جدول (۲) نشان داده شده است.

مطابق شکل (۳)، یک جسم بلاف به صورت مکعب مستطیل از جنس فوم با وزن تقریبی ۲۸ گرم برای ایجاد مانع در مسیر جریان باد و تولید ارتعاش گالوپینگ در تیر ساخته شد. این جسم به انتهای آزاد تیر آلومینیومی با حفظ تقارن چسبیده شده است.



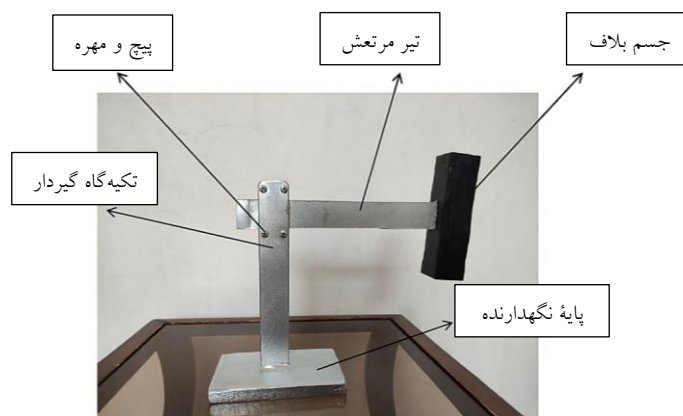
شکل (۳): جسم بلاف

برای حفظ تعادل و تثبیت سازه، از یک پایه آهنی ضخیم، مطابق شکل (۴) استفاده شد. اتصال تکیه‌گاه به پایه آهنی به طریق جوشکاری به هم متصل شده است.



شکل (۴): پایه نگهدارنده آهنی

با مونتاژ کردن اجزا، مکانیزم نهایی برداشت انرژی مطابق تصویر شکل (۵) به دست آمد.



شکل (۵): نمونه کامل شده تیر برداشت‌کننده انرژی از پدیده گالوپینگ

اختلاف پتانسیل تولیدشده از دستگاه آزمایش به وسیله مولتی متر دیجیتال اندازه گیری شد. برای محاسبه توان های تولیدشده در حالت های مختلف، از روابط (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) می توان استفاده کرد.

$$P = VI \quad (11)$$

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (12)$$

$$I = \frac{V}{R} \quad (13)$$

که P توان برحسب وات، V ولتاژ تولیدشده و I شدت جریان خروجی برحسب آمپر است.

مجموعه کامل شده و نهایی دستگاه آزمایشگاهی تهیه شده برای برداشت انرژی باد براساس پدیده گالوپینگ در شکل (۹) نمایان شده است.



شکل (۹): سیستم برداشت انرژی از جریان باد بر مبنای پدیده گالوپینگ

۴. داده ها و نتایج

در این بخش، نتایج حاصل از آزمایش های تجربی صورت گرفته بر روی نمونه آزمایشگاهی طراحی شده، برای برداشت انرژی براساس پدیده گالوپینگ ارائه شده است. در این پژوهش سرعت باد به عنوان یک ورودی مستقل است که نیروی لازم برای ایجاد ارتعاش را تولید می کند. همچنین نوع مبدل انرژی برای تولید انرژی الکتریکی که در این پژوهش از پیزوالکتریک و القای الکترومغناطیس استفاده شده نیز جزو متغیرهای مستقل محسوب می شود. در مقابل ولتاژ، جریان و توان خروجی متغیرهای وابسته به مقدار بار اعمال شده هستند.

همان طور که پیش تر اشاره شد، دستگاه آزمایشگاهی در محیط آزمایشگاه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. در این شرایط جریان باد صرفاً فقط توسط جت فن ایجاد شده و جریان باد مضاعفی به هنگام ارزیابی وجود نداشت. با توجه به اینکه جت فن سرعت چرخشی ثابتی دارد، برای شبیه سازی سرعت های مختلف باد، برای آگاهی از مقدار ولتاژهای تولیدی هر دو برداشت کننده انرژی، در فواصل نزدیک به صفر، ۱۰ و ۲۰ سانتی متری از جسم بلاف سازه

جدول (۲): مشخصات سیم پیچ

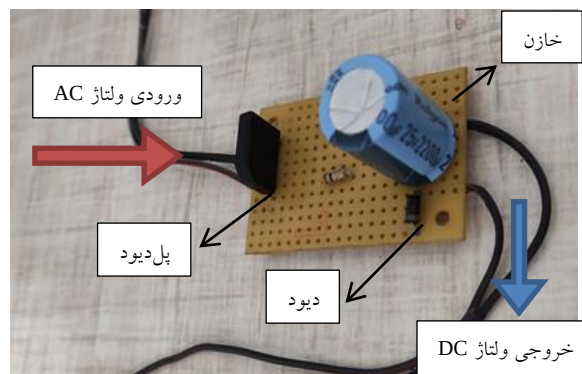
قطر سیم لاکه	۰/۳۵ mm
قطر سیم پیچ	۳ cm
طول سیم پیچ	۳ cm
تعداد دور	۱۱۰۰

برای ایجاد پدیده گالوپینگ در دستگاه آزمایشگاهی، از یک جت فن با سرعت چرخشی ثابت استفاده شد. براساس اطلاعات موجود در برگه مشخصات، فن مورد استفاده با ابعاد $25 \times 60 \times 60$ mm و ولتاژ کاری ۱۲ ولت، دارای دبی هوای CFM $29/4$ معادل $0/83$ متر مکعب بر دقیقه بوده و سرعت متوسط جریان هوای خروجی آن در راستای مرکز فن حدود $1/3$ تا $1/5$ متر بر ثانیه برآورد می شود. در شکل (۷) نمونه فن به کاررفته به عنوان منبع باد نشان داده شده است.



شکل (۷): تصویر فن استفاده شده

با توجه به اینکه ولتاژ خروجی دوسر سیم پیچ در روش القای الکترومغناطیس از نوع AC یا متناوب است، برای تبدیل به ولتاژ DC یا همان مستقیم، نیازمند به دیود یکسوساز است تا بتوان از توان تولیدی برای ذخیره سازی در شارژ باتری های با قابلیت شارژ مجدد استفاده کرد. بدین منظور مدار الکترونیکی متشکل از پل دیود، خازن و دیود ساخته شد. شکل (۸) نمونه نهایی مدار مبدل AC به DC را نشان می دهد.



شکل (۸): مدار تبدیل ولتاژ AC به DC

به صورت میانگین حدود ۲۲ درصد افت پیدا می کند. همان طور که در جدول (۳) آمده است، ماکزیمم ولتاژ حاصل شده برای روش الکترومغناطیس در حالت DC برابر ۱/۳۸+ بود. این مقدار ولتاژ تولید شده می تواند یک باتری قابل شارژ ۱/۲۷ را شارژ کند. با مقایسه ولتاژهای خروجی در سه حالت، AC سیم پیچ، DC سیم پیچ و AC پیزوالکتریک می توان دریافت که تحت شرایط ارتعاشی یکسان، پیک خروجی ولتاژ پیزوالکتریک بیشتر از روش القای الکترومغناطیس است. همچنین بیشینه ولتاژ خروجی AC سیم پیچ از خروجی DC آن بیشتر است. علت این موضوع اتلاف مقدار کمی از ولتاژ در قطعات الکترونیکی مانند پل دیود و خازن، برای تبدیل اختلاف پتانسیل متناوب به مستقیم است. شایان ذکر است پیک ولتاژ AC سیم پیچ به صورت لحظه ای بوده، در حالی که خروجی حالت DC به صورت ثابت است. با توجه به کاربرد و مصارف مورد نیاز، می توان از حالت یا نوع ولتاژ مناسب استفاده کرد.

حال برای به دست آوردن بیشینه توان تولید شده از اتصال سیم های خروجی هر کدام از برداشت کننده ها به مقاومت های الکتریکی مختلف و تشکیل مدار بسته استفاده شد. با داشتن مقادیر ولتاژ و مقاومت استفاده شده و جای گذاری در رابطه (۱۳)، می توان شدت جریان عبوری در حالت های مختلف را حساب کرد و توسط رابطه (۱۱) توان خروجی را محاسبه نمود. شایان ذکر است مقادیر مقاومت های الکتریکی نوشته شده در جداول و نمودارها برای هر سه حالت به گونه ای انتخاب شده تا تفاوت توان های تولیدی برای مقاومت های الکتریکی متفاوت آشکار شود. در ادامه، نمودار و جداول ماکزیمم توان های به دست آمده برای سه حالت به صورت جداگانه تشریح شده است: ۱. توان خروجی DC سیم پیچ؛ ۲. توان تولیدی AC سیم پیچ؛ ۳. توان خروجی AC پیزوالکتریک.

۱.۴. محاسبه توان خروجی ولتاژ DC سیم پیچ

برای محاسبه ماکزیمم توان تولید شده همان طور که اشاره شد، مقاومت های الکتریکی یک اهم تا ۲۰۰۰ اهم مورد استفاده قرار گرفت. جدول (۴) مقادیر ولتاژ، جریان و توان برای مقاومت های مختلف را نشان می دهد.

جدول (۴): ولتاژ، جریان و توان خروجی DC سیم پیچ			
توان $P (\mu W)$	جریان $I (mA)$	ولتاژ (V)	مقاومت $R (\Omega)$
۲۵۵	۱/۵	۰/۱۵	۱۰۰
۳۸۰	۰/۹۷	۰/۳۹	۴۰۰
۳۸۳	۰/۷۵	۰/۵۱	۶۸۰
۳۶۰	۰/۶۸	۰/۵۳	۷۸۰
۲۸۱	۰/۳۷۵	۰/۷۵	۲۰۰۰

قرار گرفت. برای هر کدام از فاصله ها، خروجی ها از نظر توان تولیدی، جریان و ولتاژهای AC و DC برای سیم پیچ و ولتاژ AC برای پیزوالکتریک اندازه گیری شده اند. شایان ذکر است زمانی که فاصله منبع باد از سازه بیشتر از ۲۰ سانتی متر انتخاب شود، در این حالت میزان باد برخوردی به جسم بلاف خیلی کم بود، در نتیجه پدیده قابل توجهی رخ نمی دهد. پس فاصله های انتخابی برای حالتی انتخاب شده که ارتعاشات ناشی از گالوپینگ رخ داده است. زمانی که جریان باد از مقداری معین کمتر باشد، در این حالت به جای تولید پدیده گالوپینگ در مکانیزمی شبیه دستگاه آزمایشگاهی، پدیده جریان گردابی رخ می دهد. این پدیده به هنگام برخورد جریان باد با سرعت پایین رخ می دهد؛ ابتدا در کناره های جسم بلاف گردابه هایی تشکیل شده، این امر موجب به وجود آمدن مناطق پرفشار و کم فشار شده، در نتیجه وجود اختلاف فشار سبب نوسان و ارتعاش جسم خواهد شد.

شایان ذکر است که همانند تمامی پژوهش های تجربی، نتایج به دست آمده می توانند تحت تأثیر برخی عوامل قرار گیرند. از جمله این عوامل می توان به دقت محدود تجهیزات اندازه گیری ولتاژ و جریان، اختلاف اندک مقادیر واقعی مقاومت ها با مقادیر نامی و تغییرات لحظه ای در شدت جریان هوا در خروجی جت فن اشاره کرد. این موارد می توانند باعث نوسانات جزئی در داده های ثبت شده شوند. به دلیل متناوب بودن ولتاژهای تولید شده از روش پیزوالکتریک و القای الکترومغناطیس، مقادیر نشان داده شده توسط ولت متر دارای نوسان بودند. به عبارت دیگر، ولتاژ از مقادیر مثبت تا منفی تغییرات داشت؛ در نتیجه به هنگام جمع آوری داده های مربوط به ولتاژ، بیشینه مقادیر انتخاب شده است و امکان بروز خطای انسانی در قرائت یا ثبت داده ها نیز وجود دارد. ماکزیمم ولتاژهای خروجی برای هر دو روش پیزوالکتریک و القای الکترومغناطیس، با حالت های مختلف جریان باد ذکر شده، مطابق جدول (۳) به دست آمده است.

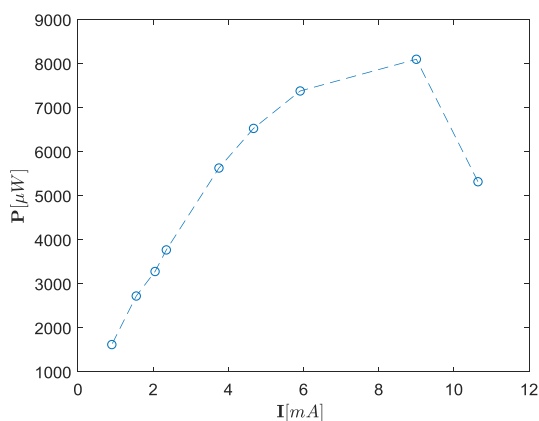
جدول (۳): اختلاف پتانسیل خروجی از سیستم های برداشت			
فاصله جت فن از جسم بلاف (cm)	ماکزیمم ولتاژ AC سیم پیچ (V)	خروجی ولتاژ DC سیم پیچ (V)	ماکزیمم ولتاژ AC پیزوالکتریک (V)
نزدیک به صفر	۱/۸	۱/۳۸+	۳
۱۰	۱/۵	۰/۹۵+	۲/۵
۲۰	۱/۳	۰/۷+	۲

طبق داده های جدول (۳) مشاهده می شود به ازای هر ۱۰ cm افزایش، فاصله منبع باد از سازه نوسان کمتر شده و پیزوالکتریک متصل شده تحت خمش کمتری قرار می گیرد. در کنار آن با کمتر شدن ارتعاش تیر انعطاف پذیر، سرعت و دامنه حرکت آهنربای متصل به ورقه به داخل سیم پیچ کمتر شده در نهایت، اختلاف پتانسیل تولیدی،

جدول (۵): ولتاژ، جریان و توان خروجی AC سیم پیچ

توان $P (\mu W)$	جریان $I (mA)$	ولتاژ (V)	مقاومت $R (\Omega)$
۵۳۱۹	۱۰/۶۴	۰/۵	۴۷
۸۱۰۰	۹	۰/۹	۱۰۰
۷۳۸۰	۵/۹۱	۱/۳	۲۲۰
۵۶۳۰	۳/۷۵	۱/۵	۴۰۰
۱۶۲۰	۰/۹	۱/۸	۲۰۰۰

با استفاده از داده‌های توان و جریان به‌دست‌آمده، نمودار شکل (۱۱) رسم شد. این نمودار همانند قسمت قبل یک منحنی با تقعر رو به پایین است که با افزایش مقدار جریان، توان ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند. قله این نمودار مقدار توان ماکزیمم سیستم برداشت انرژی به روش سیم‌پیچ و آهنربا در خروجی AC خواهد بود.

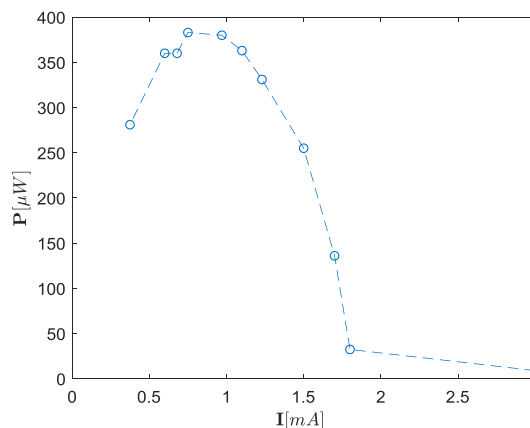


شکل (۱۱): نمودار توان بر حسب جریان AC سیم پیچ

مطابق نمودار شکل (۱۱)، بیشترین توان حالت خروجی AC سیم‌پیچ در مقاومت الکتریکی ۱۰۰ اهمی اتفاق افتاده است و برابر خواهد بود با: $P_{max} = 8100 \times 10^{-6} W$

با تحلیل مقادیر به‌دست‌آمده توان از جداول (۴) و (۵) برای حالت AC و DC روش القای الکترومغناطیس می‌توان مشاهده کرد به‌ازای مقادیر یکسان از مقاومت که به‌عنوان مصرف‌کننده عمل می‌کند، توان‌های به‌دست‌آمده اختلاف قابل ملاحظه‌ای دارد. علت این موضوع استفاده از مدار یک‌سوساز برای تبدیل ولتاژ AC به ولتاژ DC است. دیودهای یک‌سوساز که در مدارهای یک‌سوکننده به کار می‌روند، در مواقعی برای راه‌اندازی به ولتاژ حداقل ۰/۷ ولت برای دیودهای معمولی نیاز دارند. در یک مدار یک‌سوکننده با پل دیودی، جریان در هر نیم سیکل باید از دو دیود عبور کند. بنابراین، در هر لحظه ولتاژ خروجی دو برابر افت پیدا می‌کند؛ در نتیجه با کاهش ولتاژ در حالت DC، بیشینه مقادیر توان به‌ازای مقاومت‌های الکتریکی مشابه برای ولتاژ AC تفاوت چشمگیر خواهد داشت.

در نهایت با استفاده از مقادیر توان و جریان، نمودار توان بر حسب شدت جریان در شکل (۱۰) رسم شده است. این نمودار بیانگر منحنی با تقعر رو به پایین است؛ یعنی با افزایش مقدار جریان، ابتدا توان افزایش می‌یابد و به قله نمودار می‌رسد و سپس شروع به کاهش می‌کند. قله نمودار مقدار ماکزیمم توان برداشت‌شده از سیستم در حالت خروجی ولتاژ DC سیم‌پیچ خواهد بود.



شکل (۱۰): نمودار توان بر حسب جریان برای خروجی DC سیم پیچ

با توجه به نمودار بالا میزان ماکزیمم توان سیستم برداشت انرژی خروجی DC سیم‌پیچ برای مقاومت ۶۸۰ اهمی اتفاق افتاده و برابر است با: $P_{max} = 382.5 \times 10^{-6} W$

۲.۴. محاسبه توان خروجی ولتاژ AC سیم پیچ

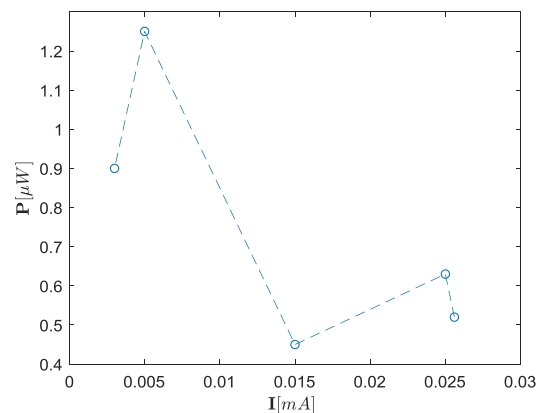
در این حالت، مقاومت‌های الکتریکی مختلف این بار در دو سر خروجی AC سیم‌پیچ قرار گرفته شده است. هنگامی که مقاومت‌های کوچکی در مدار سیم‌پیچ قرار داده می‌شود، بنابر رابطه (۱۳)، مقدار ولتاژ کم و مقدار جریان بیشتر خواهد بود. این جریان مطابق قانون لنز سبب ایجاد میدان مغناطیسی خلاف جهت میدان القاگر (آهنربا) می‌شود. هنگامی که این نیرو برابر یا بزرگ‌تر از نیروی القاگر باشد، برآیند نیروها خنثی شده و مانع حرکت رفت‌وبرگشتی آهنربا به داخل سیم‌پیچ می‌شود؛ در نهایت نمی‌توان مقدار توان مورد نظر را محاسبه کرد. پس می‌بایست مقاومت‌هایی با مقدار اهم بیشتر انتخاب شود تا مقدار جریان کاهش پیدا کرده و میدان مغناطیسی ضعیف‌تری نسبت به میدان مغناطیسی القاگر تولید شود. بنابراین برای محاسبه بیشینه توان تولیدشده در این حالت، از مقاومت‌های الکتریکی ۴۷ تا ۲۰۰۰ اهمی استفاده شده است. جدول (۵) مقادیر توان، ولتاژ و جریان برای مقاومت‌های مختلف را بیان می‌کند.

۳.۴. محاسبه توان خروجی ولتاژ AC پیزوالکتریک

برای محاسبه ماکزیمم توان سیستم برداشت‌کننده انرژی از خروجی پیزوالکتریک، همانند دو مرحله قبل عمل شد. مقدار ولتاژ در مقاومت‌های کوچک‌تر بسیار کم است؛ بنابراین از مقاومت ۷۸۰ اهمی شروع کرده تا مقدار ولتاژ قابل قبولی در دستگاه ولت‌متر نشان داده شود، سپس مقاومت‌های الکتریکی ۱ هزار، ۲ هزار، ۵۰ هزار و ۱۰۰ هزار اهمی به دو سر خروجی پیزوالکتریک متصل شد. در نهایت مقادیر جریان با داشتن ولتاژ و میزان مقاومت از رابطه (۱۳) محاسبه و توان‌های تولیدی با مقدار اهم‌های مختلف مقاومت‌ها طبق رابطه (۱۱) برای جدول (۶) به دست آمد. در انتها با داده‌های جریان و توان، نمودار توان برحسب جریان در نمودار شکل (۱۲) رسم شد.

جدول (۶): ولتاژ، جریان و توان خروجی AC پیزوالکتریک

توان (μW)	P	جریان (mA)	I	ولتاژ (V)	R (Ω) مقاومت
۰/۵۲	۰/۲۵۶	۰/۰۲	۷۸۰		
۰/۶۳	۰/۲۵۰	۰/۰۲۵	۱۰۰۰		
۰/۴۵	۰/۱۵۰	۰/۰۳	۲۰۰۰		
۱/۲۵	۰/۰۵۰	۰/۲۵	۵۰۰۰		
۰/۹	۰/۰۳۰	۰/۳	۱۰۰۰۰		



شکل (۱۲): نمودار توان برحسب جریان AC پیزوالکتریک

همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، بیشترین توان سیستم برداشت انرژی خروجی AC پیزوالکتریک در مقاومت ۵۰ هزار اهمی اتفاق افتاده است.

در تحلیل توان‌های سیستم برداشت‌کننده انرژی، با توجه به جداول (۴)، (۵) و (۶) مشاهده می‌شود که ماکزیمم توان‌های سیستم برداشت انرژی در حالت خروجی AC سیم‌پیچ، خروجی DC سیم‌پیچ و ماکزیمم توان برداشت انرژی برای خروجی AC پیزوالکتریک، به ترتیب برابر با ۸۱۰۰ میکرووات، ۳۸۳ میکرووات و ۱/۲۵ میکرووات است. در محاسبه توان مشاهده شد توان خروجی از

پیزوالکتریک در مقایسه با توان تولیدی روش الکترومغناطیس بسیار کم می‌باشد و توان خروجی هر دو روش به شدت متأثر از مقاومت خارجی است و برای رسیدن به توان خروجی بهینه، مقدار مقاومت متناسب با نوع لایه پیزوالکتریک یا سیم‌پیچ به کاررفته، تعیین‌کننده است. نتایج نشان می‌دهد با مقاومت‌های ۱۰۰، ۶۸۰ و ۵۰ هزار اهمی به ترتیب برای حالت‌های AC و DC سیم‌پیچ و خروجی AC پیزوالکتریک به مقدار بهینه توان می‌رسند. همچنین جریان خروجی از لایه پیزوالکتریک یا سیم‌پیچ با مقاومت به کار گرفته شده رابطه عکس دارد و هرچه قدر مقاومت افزایش یابد، جریان خروجی کاهش می‌یابد.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، امکان برداشت انرژی با استفاده از انرژی باد بر مبنای پدیده گالوپینگ بررسی گردید. دستگاه آزمایشگاهی مرکب از عناصر پیزوالکتریک و مبدل القای الکترومغناطیسی متشکل از سیم‌پیچ و مگنت طراحی و ساخته شد. آزمایش‌ها در سه حالت خروجی AC و DC سیم‌پیچ و ولتاژ AC پیزوالکتریک بررسی شد. نتایج تجربی نشان دادند که توان خروجی سامانه به‌طور قابل توجهی به نوع جریان، مقدار مقاومت و دامنه ارتعاشات وابسته است. برای خروجی روش القای الکترومغناطیسی، در حالت DC توان خروجی از پایداری بیشتری برخوردار بود، ولی مقدار آن محدود باقی می‌ماند. در مقابل برای حالت AC با وجود نوسانات بیشتر، توان لحظه‌ای بیشتری تولید شد. بیشینه توان در این حالت چندین برابر مقدار مشابه در حالت DC به دست آمد، که نشان‌دهنده پتانسیل بالای این روش برای کاربردهای با توان کوتاه مدت بالاست. همچنین مشاهده شد توان تولیدی در یک مقدار بهینه از مقاومت الکتریکی به حداکثر می‌رسد. این یافته به اهمیت تطابق امپدانس میان سامانه برداشت انرژی و مصرف‌کننده تأکید دارد؛ با توجه به اینکه وجه تمایز اصلی این تحقیق، استفاده همزمان از دو مکانیزم تولید انرژی در یک ساختار ساده است. به‌طور کلی، نتایج به دست آمده نشان می‌دهد به کارگیری همزمان دو روش پیزوالکتریک و القای الکترومغناطیس می‌تواند انرژی بیشتری تولید کرده و راهکاری مناسب و کارآمد برای تأمین انرژی در مقیاس کوچک باشد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد ساختار ارائه شده می‌تواند به عنوان یک واحد تولید توان با هدف تولید حداکثر توان به منظور مصرف و ذخیره‌سازی همزمان بسیار مفید باشد. فراهم شدن امکان تنظیم بار خارجی واحد مصرف‌کننده و واحد ذخیره‌سازی به صورت مستقل برای برداشت حداکثر انرژی اصلی‌ترین مزیت ساختار پیشنهادی است. همچنین برای برداشت بیشتر انرژی از چنین سازه‌هایی، امکان به کارگیری پیزوالکتریک در دو طرف تیر

گالوپینگ وجود دارد. امید است نتایج این پژوهش بتواند در طراحی نسل‌های جدید مبدل‌های برداشت انرژی باد مفید باشد.

به‌منظور جذب بیشتر کرنش تیر و استفاده از جسم بلافاصله با جنس بهتر، برای تولید ارتعاش و حرکت عرضی بیشتر در مقابل پدیده

مراجع

- [1] Wang, J., Sun, S. Hu, G. Yang, Y. Tang, L. Li., P. Zhang, G., "Exploring the potential benefits of using metasurface for galloping energy harvesting", *Energy Conversion and Management*, Vol. 243, No. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114414>.
- [2] Zuo, H., Tan, J., Wei, K., Huang, Z., Zhong, D., F., "Effects of different poses and wind speeds on wind-induced vibration characteristics of a dish solar concentrator system", *Renewable Energy*, Vol. 168, No. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.127>.
- [3] Hu, W., Jiaqiang, E., Tan, Y., Zhang, F., Liao, G., "Modified wind energy collection devices for harvesting convective wind energy from cars and trucks moving in the highway", *Energy*, Vol. 247, No. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123454>.
- [4] Liu, Q., Qin, W., Zhou, Z., Shang, M., H., "Harvesting low-speed wind energy by bistable snap-through and amplified inertial force", *Energy*, Vol. 284, No. 2023, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129330>.
- [5] Moazen, M., Saghafi, M., "Investigating the environmental impacts of developing application of wind turbines and the need for the related policies", *epprjournal*, Vol. 9, No. 2, pp. 194-216, 2023, (in Persian) <http://epprjournal.ir/article-1-1128-fa.html>.
- [6] Tang, L., Zhao, L., Yang, Y., Lefevre, E., "Equivalent circuit representation and analysis of galloping-based wind energy harvesting", *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, Vol. 20, No. 2, 2014, <https://doi.org/10.1109/TMECH.2014.2308182>.
- [7] Perelli, A., Zunino, R. Rossi, F., Agata, V., "A piezoelectric power supplier for autonomous underwater sensors", 2016.
- [8] Armandei, M., Fernandes, A.C., A.B., "Hydroelastic buffeting assessment over a vertically hinged flat plate", *Experimental Techniques*, Vol. 40, No. 2, 2016, <https://doi.org/10.1007/s40799-016-0084-y>.
- [9] Dai, H., Abdelmoula, H., Abdelkefi, A., Wang, L., "Towards control of cross-flow-induced vibrations based on energy harvesting", *Nonlinear Dynamics*, Vol. 88, No. 2017, <https://doi.org/10.1007/s11071-017-3380-x>.
- [10] Xue, X., Xiang, H., Ci, Y., J., "A sustainable galloping piezoelectric energy harvesting wind barrier for power generation on railway bridges", *Energy*, Vol. 320, No. 2025, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135135>.
- [11] Zhang, Z., Xiang, H., Tang, L., "Modeling, analysis and comparison of four charging interface circuits for piezoelectric energy harvesting", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 152, No. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107476>.
- [12] Thein, C.K., Foong, F.M., Shu, Y.-C., "Spring amplification and dynamic friction modelling of a 2DOF/2SDOF system in an electromagnetic vibration energy harvester-Experiment, simulation, and analytical analysis", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 132, No. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.06.028>.
- [13] Cai, Q.-l., Zhu, S., "Enhancing the performance of electromagnetic damper cum energy harvester using microcontroller: Concept and experiment validation", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 134, No. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106339>.
- [14] Khan, F. U., Qadir, M.U., "State-of-the-art in vibration-based electrostatic energy harvesting", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 26, No. 10, 2016, <https://doi.org/10.1088/0960-1317/26/10/103001>.
- [15] Liu, Q., Qin, W., Yang, Y., Zhou, Z., "Promote performance of vibration energy harvesting by amplified inertial force and clamped piezoelectric beams", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 178, No. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109291>.
- [16] Ren, Z., L. Wu, Y. Pang, W. Zhang, R. Yang, "Strategies for effectively harvesting wind energy based on triboelectric nanogenerators", *Nano Energy*, Vol. 100, No. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107522>.
- [17] Safaei, M., SodaNo., H. A., Anton, S.R., "A review of energy harvesting using piezoelectric materials: state-of-the-art a decade later (2008–2018)", *Smart materials and structures*, Vol. 28, No. 11, 2019, <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab36e4>.
- [18] Zarei, M.Sh., "Energy harvesting from smart nanocomposite microbeams using piezoelectric materials", *Energy Engineering and Management*, Vol. 13, No. 2, pp. 128–139, 2023, (in Persian) <https://doi.org/10.22052/jeem.2023.252477.0>.
- [19] Abolhasani, M.M., Soleimani, H., "Preparation and evaluation of a piezoelectric transducer based on PVDF nanowires", *Energy Engineering and Management*, Vol. 12, No. 3, 2023, (in Persian) <https://doi.org/10.22052/12.3.106>.
- [20] Dai, H., Abdelkefi, A., Javed, U., Wang, L., "Modeling and performance of electromagnetic energy harvesting from galloping oscillations", *Smart Materials and Structures*, Vol. 24, No. 4, 2015, <https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/4/045012>.
- [21] Abdelmoula, H., Abdelkefi, A., "The potential of electrical impedance on the performance of galloping systems for energy harvesting and control applications", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 370, No. 2016, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.01.037>.
- [22] Hu, G., Lan, C., Tang, L., Zhou, B., Yang, Y., "Dynamics and power limit analysis of a galloping piezoelectric energy harvester under forced excitation", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 168, No. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108724>.
- [23] Li, Z., Peng, X., Gong, Y., Zhu, C., Zhang, L., Peng, Y., "Experimental research of a dual-beam compressive-mode piezoelectric energy harvester," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, Vol. 2418, No. 1: IOP Publishing, p. 012076, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2418/1/012076>.
- [24] Zhang, L., Xu, X., Han, Q., Qin, Z. Chu, F., "Energy harvesting of beam vibration based on piezoelectric stacks", *Smart Materials and Structures*, Vol. 28, No. 12, 2019, <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab4e09>.
- [25] Jiang, B., Zhu, F., Yang, Y., Zhu, J., Yang, Y., M., "A hybrid piezoelectric and electromagnetic broadband harvester with double cantilever beams", *Micromachines*, Vol. 14, No. 2, 2023, <https://doi.org/10.3390/mi14020240>.

- [26] Zhang, L., Dai, H., Abdelkefi, A., Lin, S., Wang, L., "Theoretical modeling, wind tunnel measurements, and realistic environment testing of galloping-based electromagnetic energy harvesters", *Applied Energy*, Vol. 254, No. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113737>.
- [27] Shang, M., Qin, W., Li, H., Liu, Q., Wang, H., "Harvesting vibration energy by novel piezoelectric structure with arc-shaped branches", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 200, No. 2023, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110577>.
- [28] Xie, Z., Wang, T., Kwiimy, C.K., Shao, Y., Huang, W., "Design, analysis and experimental study of a T-shaped piezoelectric energy harvester with internal resonance", *Smart Materials and Structures*, Vol. 28, No. 8, 2019, <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab2e15>.
- [29] Chen, J., Liu, J., Bao, B., "Dual-source energy harvester for collecting both flow-induced and multi-directional vibratory energies", *Nonlinear Dynamics*, Vol. 113, No. 4, 2025, <https://doi.org/10.1007/s11071-024-10392-6>.
- [30] e Silva, A.G.P., Sobrinho, J.M.B., da Rocha Souto, C., Ries, A. de Castro, A.C. "Design, modelling and experimental analysis of a piezoelectric wind energy generator for low-power applications", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 317, No. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112462>.
- [31] Hosseini, R., Hamed, M. "An investigation into resonant frequency of trapezoidal V-shaped cantilever piezoelectric energy harvester", *Microsystem Technologies*, Vol. 22, No. 2016, <https://doi.org/10.1007/s00542-015-2583-7>.
- [32] Hosseini Latafati, H.S., Moghadam, S.S. "Vibration energy harvesting using a cantilever beam with double piezoelectric layers", *Mechanics of Structures and Fluids*, Vol. 7, No. 1, 2017, (in Persian) <https://doi.org/10.22044/jsfm.2017.945>.
- [33] Zhao, L., Yang, Y., "Toward Small-Scale Wind Energy Harvesting: Design, Enhancement, Performance Comparison, and Applicability", *Shock and Vibration*, Vol. 2017, No. 1, 2017, <https://doi.org/10.1155/2017/3585972>.
- [34] Abdelkefi, A., Hajj, M.R. A., Nayfeh, H., "Power harvesting from transverse galloping of square cylinder", *Nonlinear dynamics*, Vol. 70, No. 2012, <https://doi.org/10.1007/s11071-012-0538-4>.
- [35] Tabesh, A., Fréchette, L.G., "On the concepts of electrical damping and stiffness in design of a piezoelectric bending beam energy harvester", *Proc. Power MEMS 2009*, Vol. No. 2009.
- [36] Tabesh, A., Frechette, L.G., "An improved small-deflection electromechanical model for piezoelectric bending beam actuators and energy harvesters", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 18, No. 10, 2008, <https://doi.org/10.1088/0960-317/18/10/104009>.
- [37] Barrero-Gil, A., Alonso, G., Sanz-Andres, A., "Energy harvesting from transverse galloping", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, No. 14, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2010.01.028>.
- [38] Paidoussis, M.P., Price, S.J. De Langre, E., *Fluid-structure interactions: cross-flow-induced instabilities*, Cambridge. 2011.
- [39] Shaukat, H., Ali, A., Bibi, S., Altabay, W.A., Noori, M., Kouritem, S.A., "A Review of the recent advances in piezoelectric materials, energy harvester structures, and their applications in analytical chemistry", *Applied Sciences*, Vol. 13, No. 3, 2023, <https://doi.org/10.3390/app13031300>.
- [40] Zhou, J., He, L., Liu, L., Yu, G., Gu, X., Cheng, G., "Design and research of hybrid piezoelectric-electromagnetic energy harvester based on magnetic couple suction-repulsion motion and centrifugal action", *Energy Conversion and Management*, Vol. 258, No. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115504>.
- [41] Ali, A., Ali, S., Shaukat, H., Khalid, E., Behram, L., Rani, H., Altabay, W.A., Kouritem, S.A., Noori, M., "Advancements in piezoelectric wind energy harvesting: A review", *Results in Engineering*, Vol. 21, No. 2024, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101777>.
- [42] Zhang, S.L., Xu, M., Zhang, C., Wang, Y.-C., Zou, H., He, X., Wang, Z., Wang, Z.L., "Rationally designed sea snake structure based triboelectric nanogenerators for effectively and efficiently harvesting ocean wave energy with minimized water screening effect", *Nano Energy*, Vol. 48, No. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.03.062>.
- [43] Zhao, D., Hu, X., Tan, T., Yan, Z., Zhang, W., "Piezoelectric galloping energy harvesting enhanced by topological equivalent aerodynamic design", *Energy Conversion and Management*, Vol. 222, No. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113260>.
- [44] Zheng, P., Qi, L., Sun, M., Luo, D., Zhang, Z. "A novel wind energy harvesting system with hybrid mechanism for self-powered applications in subway tunnels", *Energy*, Vol. 227, No. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120446>.
- [45] Wang, G., Song, R., Luo, L., Yu, P., Yang, X., Zhang, L., "Multi-piezoelectric energy harvesters array based on wind-induced vibration: Design, simulation, and experimental evaluation", *Energy*, Vol. 300, No. 2024, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131509>.
- [46] Chen, J., Nabulsi, N., Wang, W., Kim, J. Y., Kwon, M.K. J.H., "Output characteristics of thin-film flexible piezoelectric generators: A numerical and experimental investigation", *Applied Energy*, Vol. 255, No. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113856>.
- [47] Alshdefat, A., Al-Oran, O., Alhadidi, A.H., "Self-adjustable nonlinear galloping energy harvester under actual wind conditions", *Results in Engineering*, Vol. 25, No. 2025, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104452>.
- [48] Zou, H.X., Zhao, L.C., Gao, Q.H., Zuo, L., Liu, F.R., Tan, T., Wei, K.X., Zhang, W.M., "Mechanical modulations for enhancing energy harvesting: Principles, methods and applications", *Applied Energy*, Vol. 255, No. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113871>.
- [49] Cheng, S., Wang, N., Arnold, D.P., "Modeling of magnetic vibrational energy harvesters using equivalent circuit representations", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 17, No. 11, 2007, <https://doi.org/10.1088/0960-1317/17/11/021>.