

Experimental Analysis of Flow-Induced Vibrations and Energy Harvesting in a Wind Tunnel Using Tree Leaf-Inspired Geometries

Amir Hossein Rabiee^{a*}, Ali Yousefi^a, Mostafa Esmaeili^b

^a Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, 38181-41167, Iran

^b Department of Mechanical Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran.

Original Article

Use your device to scan and read the article online



Citation: Rabiee A H, Yousefi A, Esmaeili M. Experimental Analysis of Flow-Induced Vibrations and Energy Harvesting in a Wind Tunnel Using Tree Leaf-Inspired Geometries. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2025;4(4):684-701.

 <https://10.61882/masm.4.4.684>

KEYWORDS

Flow-induced vibration,
Energy harvesting,
Bio-inspired,
Leaf-like geometry,
Piezoelectric,
Wind tunnel.

ABSTRACT

This research explores the potential of biomimetic geometries derived from natural leaf shapes to study flow-induced vibrations (FIV) and energy harvesting through experiments in a wind tunnel. Five real tree leaves (grape, fig, silver maple, hawthorn, and Norway maple) were selected, their 2D profiles extracted, and converted into physical test models. Each model was mounted on a flexible beam inside a wind tunnel and equipped with piezoelectric strips to measure electrical signals generated from oscillations. Simultaneously, a high-speed camera tracked the transverse displacement of each model throughout the test. Among all cases, the fig leaf geometry exhibited the highest vibration amplitude and frequency stability, resulting in the maximum harvested power. The grape leaf followed in performance, combining strong vibration responses with reasonable energy output. Although the silver maple showed limited response at lower wind speeds, it performed efficiently at higher speeds. In contrast, the hawthorn and Norway maple models produced smaller vibrations and lower frequencies, resulting in lower harvested power. These findings clearly demonstrate the crucial role of geometry in optimizing vibration-based energy harvesting performance.

Extended Abstract

1. Introduction

Flow-induced vibrations are significant in the fluid–structure interaction (FSI) field and must be considered in the design of structures exposed to wind or water flows [1–3]. Uncontrolled vibrations, particularly under vortex shedding and frequency lock-in, may lead to material fatigue or structural failure [4,5]. However, such vibrations can also be harnessed as a renewable energy source [6,7]. In recent years, researchers have utilized piezoelectric materials to convert these mechanical vibrations into electricity, powering small wireless sensors and devices [8–10].

Biomimetic approaches have gained attention in this context. For instance, Chatterjee et al. [12] showed that a vibrating flapper with bio-inspired gait can effectively harvest energy. Rabiee et al. [13] demonstrated that shark-fin-shaped bumps enhanced vortex-induced vibrations (VIV) and heat transfer in square cylinders. Kang et al. [14] revealed that fish-scale-inspired biomimetic surfaces significantly increased vibration amplitudes and Nusselt

* Corresponding author. Tel.: +989181621459

E-mail address: rabiee@arakut.ac.ir

DOI: <https://10.61882/masm.4.4.684>

Received: April 21, 2025; Received in revised form: May 18, 2025; Accepted: May 24, 2025.

© Author



number. Natural structures like trees exhibit remarkable mechanical responses to wind [18,19], and their geometries have inspired energy harvesters with optimized vortex interaction [20]. Nevertheless, the full leaf shape has rarely been explored for FIV applications. This study aims to address that gap.

2. Experimental Setup for Leaf-Inspired Cross-Sections

To investigate the dynamic performance and energy output of leaf-inspired cylinders, a dedicated wind tunnel test system was developed (Figure 1). It included a low-speed horizontal wind tunnel, a flexible cantilever beam with an attached piezoelectric strip, and synchronized data acquisition systems for both mechanical displacement and electrical signals. The test section had a 30×30 cm square cross-section and accommodated air speeds from 3 to 15 m/s, regulated via a downstream axial fan and measured using a hot-wire anemometer.

Each vibrating body was attached to a 160 mm long, 8 mm wide, and 0.8 mm thick flexible rectangular beam, with a 41×16×0.205 mm piezoelectric strip (LDT1-028K) bonded near its base. Voltage output was recorded at a 5 kHz sampling rate using a digital oscilloscope, while transverse displacements were captured using a 240-fps high-speed camera. The geometries of five natural leaves (grape, fig, silver maple, hawthorn, and Norway maple) were scanned, CAD-modeled (Figure 2), CNC-fabricated from lightweight foam, and mounted centrally on the beam. Tests were repeated three times per speed step to ensure accuracy.

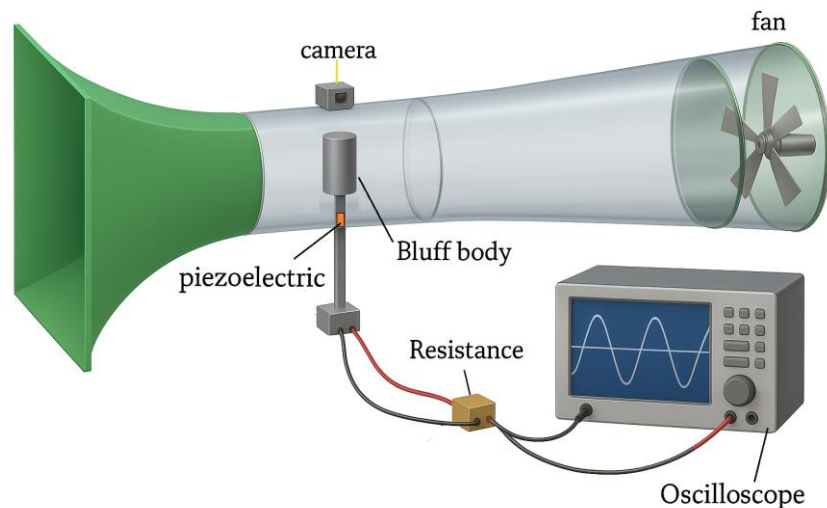


Figure 1. Overview of the experimental wind tunnel system

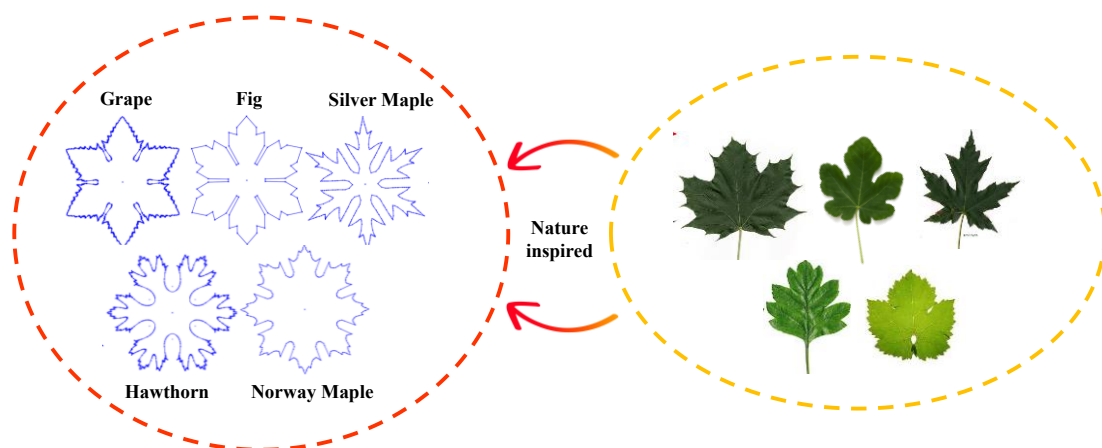


Figure 2. Extracted 2D profiles and CAD geometries of the five leaf types

3. Results and Discussion

Figure 3 presents the normalized transverse displacement amplitudes of three models: grape, fig, and hawthorn, under wind speeds ranging from ~3.3 to 14.5 m/s. The fig leaf geometry demonstrated the highest vibration amplitude, increasing from ~0.4 to 1.72, a rise of over 330%. This strong response is attributed to its wide lobes

and open edges, which facilitate early vortex formation and flow separation. The grape leaf model also performed well, reaching 1.55 in amplitude. Its growth was smoother and more linear, suggesting reliable vortex excitation across speeds. In contrast, the hawthorn leaf showed the weakest response, with displacement growing from ~0.36 to 1.28, equivalent to a ~255% increase. Its compact and dense shape likely dampened vortex-induced motion.

Figure 4 shows results for the silver maple and Norway maple models. The silver maple displayed a threshold-like behavior, with negligible displacement below ~4 m/s, followed by a sharp rise to 1.35. Once activated, its amplitude increased linearly with speed. The Norway maple, on the other hand, exhibited steady but moderate growth, rising from ~0.3 to 1.38. Its response was gradual, suggesting a geometry less sensitive to abrupt vortex interactions but more stable across the range. Overall, the fig model outperformed all others, especially in the low-to-mid wind speed range, due to its geometry that promotes strong vortex shedding. The grape and silver maple followed in performance, while the hawthorn and Norway maple showed reduced but stable vibrations.

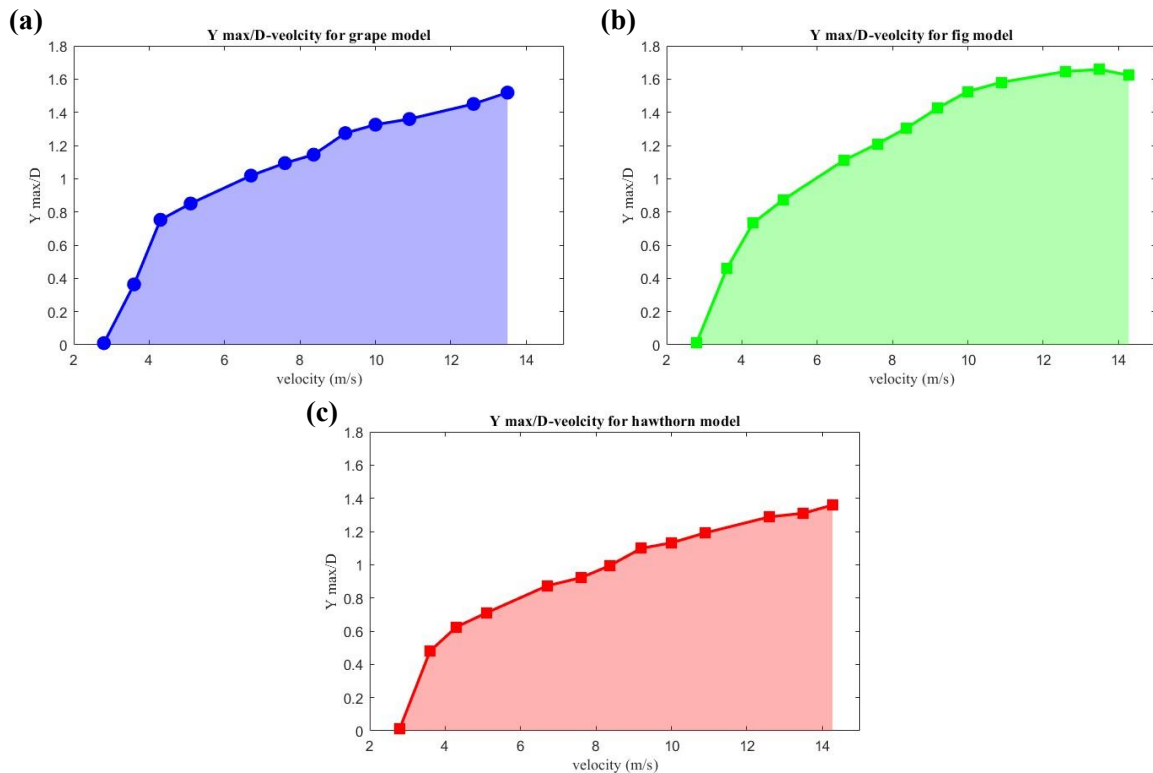


Figure 3. Transverse displacement vs. wind speed for grape, fig, and hawthorn

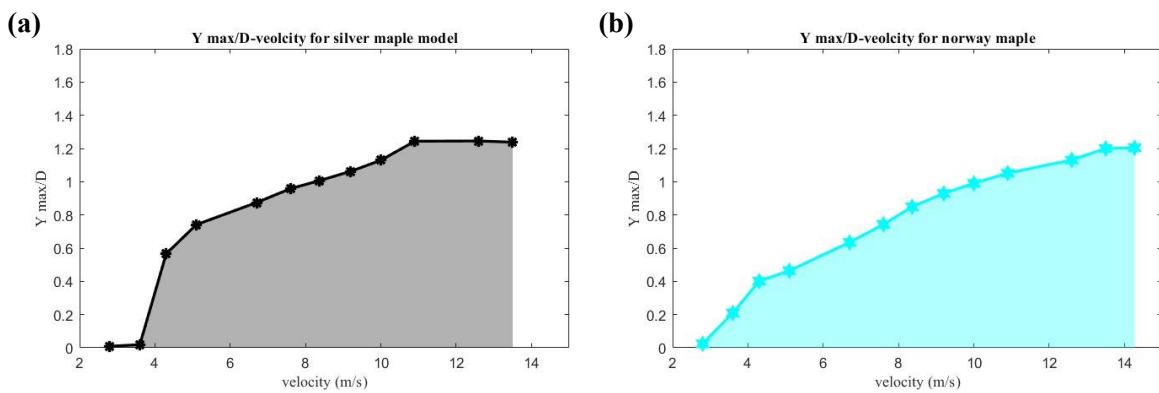


Figure 4. Transverse displacement vs. wind speed for silver maple and Norway maple

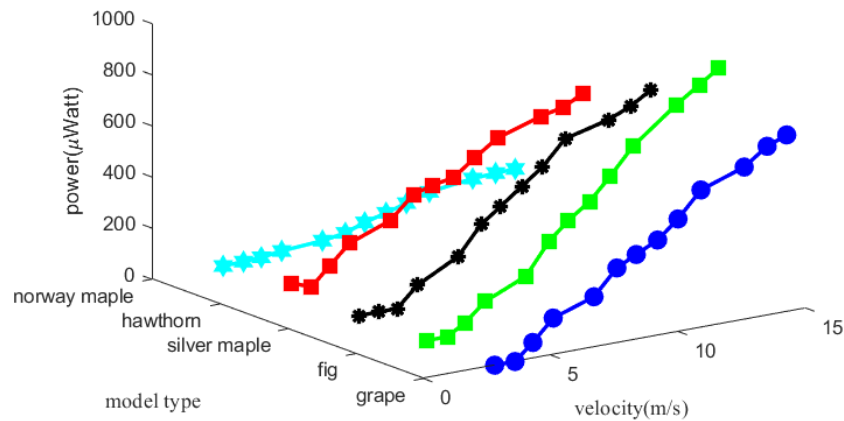


Figure 5. 3D plot of electrical power vs. wind speed and leaf geometry

Figure 5 illustrates the harvested electrical power (in μW) versus wind speed and leaf model. The fig leaf generated the highest power output, reaching $870 \mu\text{W}$ at 14.5 m/s , confirming its superior dynamic response and consistent strain on the piezoelectric strip. The grape leaf followed with a peak of $\sim 700 \mu\text{W}$, showing steady power growth and good reliability. The silver maple achieved $\sim 660 \mu\text{W}$, with lower output at low speeds but a significant rise after 6 m/s , consistent with its delayed activation in displacement. These three models offered strong performance in terms of both amplitude and energy output.

The hawthorn model produced $\sim 580 \mu\text{W}$, performing slightly below the silver maple, possibly due to less efficient strain transmission. Its response was consistent, which may suit applications needing stable, low-power output. The Norway maple had the lowest energy output, peaking at just $\sim 200 \mu\text{W}$. This aligns with its limited vibration amplitude and gradual response, indicating that its geometry is less effective in harvesting energy from wind-induced motion. In summary, the fig leaf model was the most efficient in converting flow-induced vibrations into electrical power, benefiting from its dynamic and responsive structure. The grape and silver maple also showed strong performance with distinct behaviors. While hawthorn and Norway maple generated lower outputs, their stable and predictable responses could be useful in specific low-power contexts.

4. Conclusion

This experimental study demonstrated that leaf-inspired geometries significantly affect the vibration and energy harvesting characteristics of bluff bodies in wind-induced flows. Among the five leaf types analyzed, the fig leaf model achieved the highest transverse vibration amplitude and energy output, showing both a strong and stable dynamic response. The grape leaf also exhibited promising performance. Silver maple showed delayed but effective behavior at higher speeds, while hawthorn and Norway maple had limited displacement and power output, albeit with more stable frequency behavior.

The results highlight that selecting an appropriate biomimetic geometry (such as those inspired by natural leaves) can greatly enhance the performance of vibration-based energy harvesting systems. This work opens up new opportunities for using full leaf shapes, rather than partial bio-inspirations, in designing flow-interactive structures.



تحلیل تجربی ارتعاشات ناشی از جریان و برداشت انرژی در تونل باد با هندسه‌های الهام‌گرفته‌شده از برگ درختان

امیرحسین ربیعی^{الف*}، علی یوسفی^ب، مصطفی اسماعیلی^ج

^{الف} دانشیار، گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، rabiee@arakut.ac.ir

^ب دانشجوی دکتری، گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، yousefilali75@gmail.com

^ج دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران، m.esmaeili@khu.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

این پژوهش با هدف بهره‌گیری از فرم‌های طبیعی و الهام گرفته شده از برگ درختان، به بررسی ارتعاشات ناشی از جریان سیال و برداشت انرژی توسط آزمایش‌های انجام شده در تونل باد پرداخته شده است. پنج نوع برگ درخت شامل برگ انگور، برگ انجیر، افرا نقره‌ای، زالزالک و افرا نروژی به‌عنوان الگوهای اصلی انتخاب شده و هندسه دوبعدی آن‌ها به‌دقت استخراج و به مدل‌های فیزیکی قابل‌آزمایش تبدیل گردید. نمونه‌ها به یک تیر انعطاف‌پذیر در داخل تونل باد متصل شده و با استفاده از نوار پیزوالکتریک، سیگنال‌های الکتریکی حاصل از ارتعاشات ثبت شدند. به‌طور هم‌زمان، یک دوربین با نرخ بالا برای اندازه‌گیری دقیق جابجایی عرضی هر مدل در طول آزمایش به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که مدل برگ انجیر با تولید بیشترین دامنه ارتعاشات و حفظ پایداری فرکانس، بالاترین توان برداشت‌شده را نیز ارائه می‌دهد. برگ انگور در رتبه دوم قرار گرفت و ترکیبی از پاسخ ارتعاشی قوی و تولید انرژی قابل‌قبول از خود نشان داد. مدل افرا نقره‌ای اگرچه در سرعت‌های پایین عملکرد محدودی داشت، اما در سرعت‌های بالاتر بازده مناسبی داشت. در مقابل، مدل‌های زالزالک و افرا نروژی با دامنه ارتعاش کمتر، سطح فرکانس پایین‌تر و توان برداشت‌شده کمتر، در رتبه‌های پایین‌تر قرار گرفتند. این نتایج به‌روشنی بیانگر آن است که هندسه برگ نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت و بازده برداشت انرژی از ارتعاشات دارد.

ارتعاشات ناشی از جریان، برداشت انرژی، زیست‌الهام‌شده، هندسه برگ‌مانند، پیزوالکتریک، تونل باد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳

۱- مقدمه

ارتعاشات ناشی از جریان سیال^۱ (FIV) از پدیده‌های مهم در حوزه اندرکنش سیال و سازه^۲ (FSI) است که در طراحی سازه‌های در معرض جریان سیال باید به‌دقت بررسی شود. سازه‌های بلند و منعطف مانند پل‌های معلق، برج‌ها، لوله‌های انتقال سیال و کابل‌ها تحت جریان باد یا آب ممکن است دچار نوسانات ناشی از گردابه‌های وُن کارمن^۳ شوند که به ارتعاشات ناخواسته می‌انجامد [۱-۳]. کنترل نکردن این ارتعاشات می‌تواند در شرایط تشدید (قفل‌شدگی فرکانسی) به خستگی مصالح و حتی فروپاشی سازه منجر شود. به همین دلیل، مطالعه و درک مکانیزم ارتعاشات ناشی از جریان برای پیش‌بینی و جلوگیری از

^۱ Flow-induced vibration

^۲ Fluid-structure interaction

^۳ Von Kármán

آسیب‌های سازه‌ای ضروری است [۴، ۵]. از سوی دیگر، همین ارتعاشات ناخواسته می‌توانند با رویکردی نوآورانه به عنوان منبعی برای برداشت انرژی استفاده شوند [۶، ۷]. در سال‌های اخیر پژوهشگران تلاش‌های گسترده‌ای در جهت توسعه سامانه‌های برداشت انرژی از ارتعاشات ناشی از جریان انجام داده‌اند، به طوری که با استفاده از موادی نظیر پیزوالکتریک می‌توان انرژی ارتعاشی را به الکتریسیته تبدیل کرد [۸، ۹]. این راهکار امکان تأمین توان برای حسگرهای بی‌سیم و تجهیزات الکترونیکی کوچک را فراهم می‌کند و مورد توجه بسیار قرار گرفته است [۱۰].

پژوهش‌های متعددی به بررسی ارتعاشات ناشی از جریان و کاربردهای آن در برداشت انرژی پرداخته‌اند [۱۱]. برای مثال، چترجی و همکاران [۱۲] با طراحی باله‌ای ارتعاشی که الگوی حرکت آن از جنبش‌های زیستی الهام گرفته شده بود، نشان دادند که می‌توان بازده برداشت انرژی را بهبود داد. در این پژوهش یک باله تخت به صورت نوسانی با الگوهای حرکت بیومیمتیک در جریان سیال قرار گرفت و توانست انرژی قابل توجهی را برداشت کند. ربیعی و همکاران [۱۳] اثر افزودن زائده‌هایی با الهام از باله‌های کوسه بر پاسخ ارتعاشی و انتقال حرارت یک استوانه مربعی را بررسی کردند. نتایج نشان داد این زائده‌ها می‌توانند دامنه ارتعاشات گردابه‌ای را تا ۵۷٪ افزایش داده و منطقه قفل‌شدگی را گسترش دهند، در حالی که ناحیه گالوپینگ^۴ را کاهش می‌دهند و انتقال حرارت را نیز بهبود می‌بخشند. دوگانگ کانگ و همکاران [۱۴] به صورت عددی تأثیر سطح زیست‌الهام روی ارتعاشات ناشی از جریان و انتقال حرارت یک استوانه را بررسی کردند. نتایج نشان داد که ساختارهای کمان‌شکل زیستی مانند پوست یا پولک ماهی‌ها می‌توانند دامنه ارتعاشات را افزایش داده، ناحیه قفل‌شدگی را تغییر دهند و در شرایط بهینه تا ۲۳/۹٪ انتقال حرارت (عدد ناسلت^۵ متوسط) را نسبت به استوانه دایروی افزایش دهند.

این نوع طراحی زیست‌الهام‌شده منجر به ایجاد آشفستگی‌های بهینه در جریان پشت جسم شده و میزان انرژی استحصال‌شده از ارتعاشات را تقویت کرده است. به طور کلی، استفاده از هندسه‌ها و حرکات الهام‌گرفته از موجودات زنده به عنوان رویکردی مؤثر در ارتعاشات ناشی از سیال مطرح شده است که می‌تواند چه در کاهش ارتعاشات مخرب و چه در افزایش راندمان سامانه‌های برداشت انرژی مؤثر باشد [۱۵]. این رویکرد که ذیل عنوان کلی طراحی زیست‌الهام^۶ (الهام گرفته شده از طبیعت) شناخته می‌شود، بر پایه الگوبرداری از سازوکارهای طبیعی است که طی میلیون‌ها سال تکامل یافته و بهینه شده‌اند. به عنوان نمونه، طراحی آیرودینامیکی نوک قطارهای تندرو شینکانسن^۷ با الهام از شکل منقار پرنده ماهی‌خوار باعث کاهش شدید صدای عبور و بهبود بازده انرژی آن‌ها شد [۱۶]. در زمینه‌ی مهندسی باد و ارتعاشات نیز الگوگیری از طبیعت نتایج نویدبخشی به همراه داشته است؛ از شکل بال کوسه برای کاهش نوسانات جریان جت گرفته تا تقلید از لرزش برگ درختان نخل برای برداشت انرژی باد [۱۷، ۱۸].

در این میان، درختان به عنوان یکی از سازه‌های طبیعی که به طور مداوم در معرض باد قرار دارند، الگوی الهام‌بخش بسیار جالبی ارائه می‌کنند. درخت طی ساختاری متشکل از یک تنه اصلی و شاخه‌های پراکنده، سالیان دراز تحت نیروهای باد تاب می‌آورد و به ندرت دچار شکست مکانیکی می‌شود. پژوهش‌های زیست‌مکانیک نشان داده‌اند که شاخه‌های درخت نقشی شبیه میراگرهای جرمی تنظیم‌شده ایفا می‌کنند که می‌توانند انرژی ارتعاشی را جذب کرده و از انتقال آن به تنه اصلی بکاهند [۱۸]. وجود چندین شاخه با فرکانس‌های طبیعی مختلف، عملاً سازه درخت را به مجموعه‌ای از جذب‌کننده‌های ارتعاش (مشابه چندین تنظیم‌کننده جرمی) تبدیل می‌کند که سبب می‌شود انرژی ارتعاشی باد در بین موده‌های مختلف توزیع شده و از تجمع آن در یک فرکانس خاص (تشدید) جلوگیری گردد [۱۹]. افزون بر این، حرکت نوسانی درخت در باد پتانسیل بالقوه‌ای برای تولید انرژی دارد. هابز و هو [۲۰] با الهام از نوسان تنه درخت در باد، آرایه‌ای از چهار استوانه پشت‌سرهم را مجهز به مبدل‌های پیزوالکتریک طراحی کردند و دریافتند که استوانه‌های واقع در پشت (شبیه به درختان پشتیبان در یک بیشه) می‌توانند حتی بیش از استوانه جلویی انرژی تولید کنند. آن‌ها نشان دادند مناسب‌ترین فاصله مرکز به مرکز معادل حدود ۳/۳ برابر قطر استوانه‌ها

^۴ Galloping

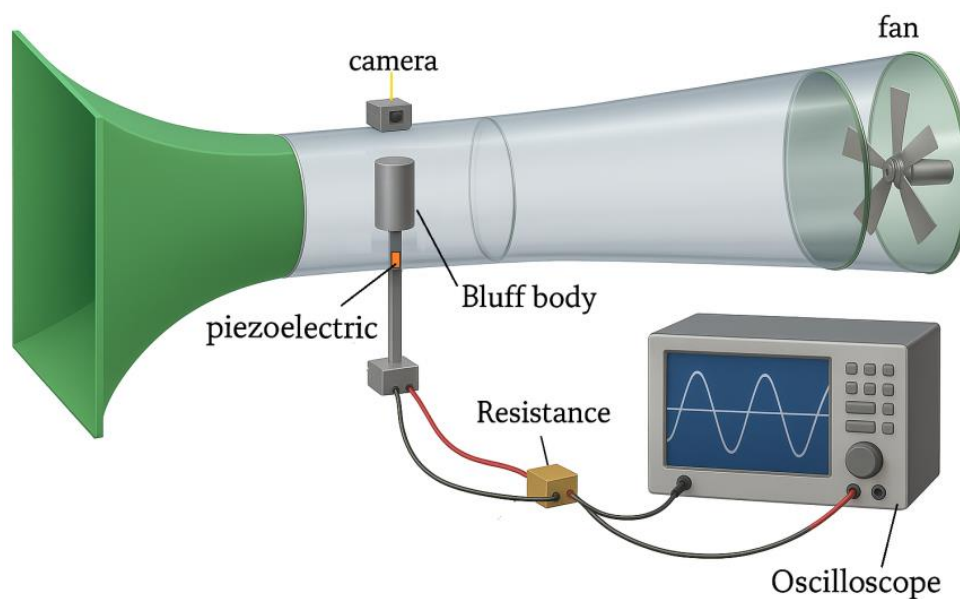
^۵ Nusselt number

^۶ Biomimetics

^۷ Shinkansen

است که در آن شرایط، استوانه‌های عقبی به دلیل بهره‌گیری بهینه از گردابه‌های آزادشده از استوانه جلویی، بیشینه توان الکتریکی را تولید کردند. نتایج این مطالعه تأییدی بر کارایی الگوگیری از آرایش درختان در افزایش بازده برداشت انرژی ارتعاشی بود. به‌طور مشابه، در تحقیق دیگری مشاهده شده است که یک شاخه نخل در تونل باد با سرعت ۷ متر بر ثانیه قادر به تولید توان حدود ۰/۱۵۷ میلی‌وات (معادل چگالی توان ۳۹۳ میلی‌وات بر مترمربع) از طریق المان‌های پیزوالکتریک بوده است [۱۷]. این مقدار هرچند کوچک است، اما نشان می‌دهد که حتی مؤلفه‌های طبیعی نظیر برگ و شاخه نیز انرژی جنبشی باد را به‌صورت ارتعاشی جذب و تا حدی قابل برداشت می‌کنند.

با وجود نمونه‌های محدودی که ذکر شد، هنوز از شکل کامل برگ درخت به‌عنوان یک سازه الهام‌بخش در سامانه‌های ارتعاشی ناشی از جریان یا برداشت انرژی استفاده‌ای نشده است. تقریباً تمامی مطالعات پیشین یا بر اجسام ساده‌ای مانند استوانه و صفحه متمرکز بوده‌اند یا در بهترین حالت از یک بخش محدود طبیعت (مثلاً باله‌ها یا پولک ماهی‌ها) بهره گرفته‌اند. در واقع، هندسه پیچیده برگ درخت در ادبیات فنی این حوزه به‌عنوان یک ساختار یکپارچه مورد بررسی قرار نگرفته است. نوآوری پژوهش حاضر در همین راستا تعریف می‌شود: بهره‌گیری از فرم برگ درختان به‌عنوان الگویی زیست‌الهام‌شده برای طراحی سازه‌هایی که در معرض جریان سیال ارتعاش می‌کنند یا انرژی ارتعاشی را برداشت می‌نمایند. به بیان دیگر، در این کار یک ساختار مکانیکی با الهام از معماری برگ درخت ابداع شده است تا بتواند حداکثر انرژی ممکن را از نوسانات برداشت کند. این رویکرد می‌تواند گامی نوین در ترکیب دانش ارتعاشات ناشی از سیال و مفهوم طراحی الهام‌گرفته از طبیعت باشد که تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است.

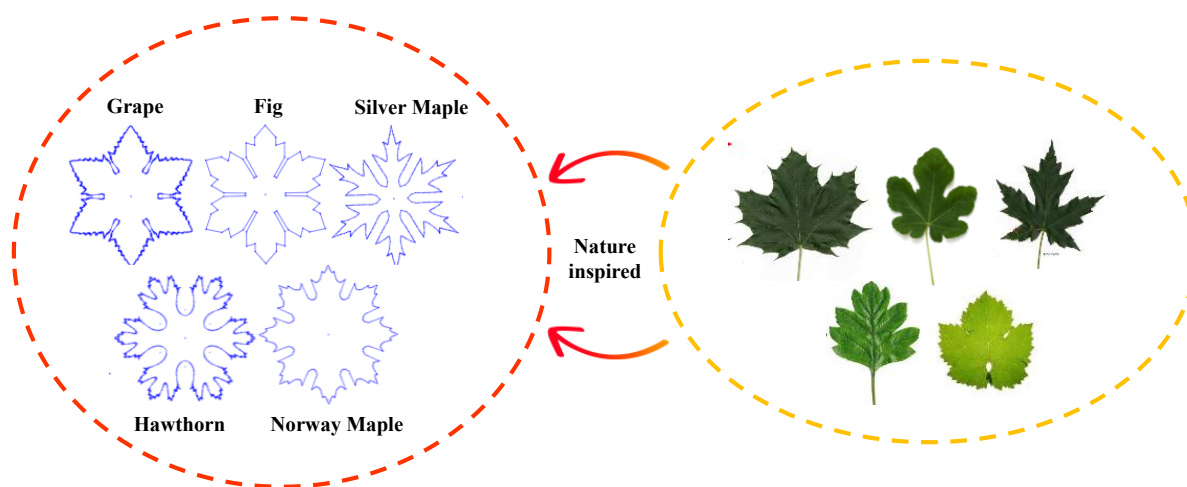


شکل ۱ نمای کلی از سامانه آزمایشگاهی تونل باد برای تحلیل ارتعاشات استوانه‌های برگ‌مانند.

۲- پیکربندی آزمایشگاهی برای تحلیل ارتعاشات مقاطع برگ‌مانند

به‌منظور بررسی تجربی عملکرد دینامیکی و توان برداشت‌شده از استوانه‌هایی با سطح مقطع الهام‌گرفته از برگ درختان، یک سامانه آزمایشگاهی دقیق طراحی و پیاده‌سازی شده است که نمای کلی آن در شکل ۱ ارائه شده است. این سامانه شامل یک تونل باد، تیر انعطاف‌پذیر مجهز به نوار پیزوالکتریک، تجهیزات برداشت داده و ثبت‌کننده‌های ارتعاشی-الکتریکی می‌باشد. سامانه مورد استفاده برای این مطالعه به‌گونه‌ای طراحی شده که قابلیت اندازه‌گیری هم‌زمان جابجایی مکانیکی و توان الکتریکی برداشت‌شده از نوسانات را با دقت بالا فراهم سازد. تونل باد استفاده‌شده از نوع افقی و کم‌سرعت است که دارای یک نازل همگرا با طول ۰/۸ متر و زاویه همگرایی ۱۰ درجه، و بخش آزمون به طول ۱ متر و مقطع مربعی با ابعاد ۳۰×۳۰ سانتی‌متر می‌باشد. جریان توسط یک فن محوری در انتهای خروجی تولید شده و قابلیت تنظیم دقیق سرعت بین ۳ تا ۱۵ متر بر ثانیه را دارد. برای

افزایش یکنواختی جریان، یک شبکه آرام‌ساز جریان^۸ در ورودی تونل تعبیه شده است. سرعت جریان در بخش آزمون توسط یک سنسور بادسنج دقت بالا از نوع حسگر سیم داغ^۹ ثبت و کنترل می‌شود. دقت اندازه‌گیری سرعت در بازه کاری برابر با ± 0.1 متر بر ثانیه بوده و داده‌ها به صورت دیجیتال به رایانه منتقل می‌شوند.



شکل ۲ هندسه‌های دوبعدی برگ‌های طبیعی (انگور، انجیر، افرا نقره‌ای، زالزالک، افرا نروزی) و تطبیق آن‌ها با مدل‌های CAD جهت ساخت نمونه‌های فیزیکی.

در مرکز مقطع آزمون، تنها یک استوانه مرتعش قرار داده شده که به یک تیر انعطاف‌پذیر مستطیلی متصل می‌باشد. این تیر دارای طول ۱۶۰ میلی‌متر، عرض ۸ میلی‌متر و ضخامت 0.8 میلی‌متر است. در بخش نزدیک به پایه تیر، یک نوار پیزوالکتریک با ابعاد $16 \times 16 \times 0.25$ میلی‌متر (LDTI-028K) چسبانده شده است تا کرنش ناشی از نوسانات به تولید ولتاژ بینجامد. پیکربندی کلی اتصال پیزوالکتریک و مقاومت بار در مدار به گونه‌ای تنظیم شده که بیشینه توان قابل برداشت در ناحیه فرکانس طبیعی به دست آید. ولتاژ خروجی با استفاده از یک اسیلوسکوپ دیجیتال با نرخ نمونه‌برداری 5000 نمونه بر ثانیه ثبت شده و هم‌زمان با آن، داده‌های مکانیکی نیز ذخیره می‌شوند. توان الکتریکی برداشت‌شده بر اساس مقدار مؤثر (RMS) ولتاژ خروجی محاسبه شده است که نسبت به ولتاژ بیشینه یا میانگین، معیار دقیق‌تری برای تحلیل توان لحظه‌ای در سیگنال‌های تناوبی به شمار می‌رود. در تمامی آزمایش‌ها، یک مقاومت بار 10 مگا اهم به صورت موازی با نوار پیزوالکتریک قرار داده شده است تا تطبیق بهینه با امپدانس داخلی سامانه و بیشینه‌سازی توان انتقالی حاصل شود. برای ثبت جابجایی عرضی استوانه، از یک دوربین با نرخ بالا با نرخ فریم 240 فریم بر ثانیه استفاده شده است. موقعیت دوربین در امتداد عمود بر مقطع آزمایشگاه قرار گرفته و با استفاده از الگوهای نقطه‌گذاری شده روی نوک استوانه، جابجایی در هر فریم با دقت 0.1 میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. با بهره‌گیری از الگوریتم‌های پردازش تصویر، سیگنال‌های زمانی جابجایی استخراج و به محیط نرم‌افزار متلب^{۱۰} منتقل شده‌اند تا تحلیل فرکانسی و زمانی بر روی آن‌ها صورت گیرد. استوانه‌هایی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند، دارای سطح مقطع برگ‌مانند هستند که به طور مستقیم از فرم پنج برگ واقعی شامل برگ انگور^{۱۱}، انجیر^{۱۲}، افرا نقره‌ای^{۱۳}، زالزالک^{۱۴} و افرا نروزی^{۱۵} استخراج شده‌اند.

این فرم‌ها ابتدا با اسکن دقیق از نمونه‌های طبیعی به فایل‌های دوبعدی تبدیل شده و سپس توسط نرم‌افزارهای مدل‌سازی

⁸ honeycomb

⁹ Hot wire

¹⁰ Matlab Software

¹¹ Grape

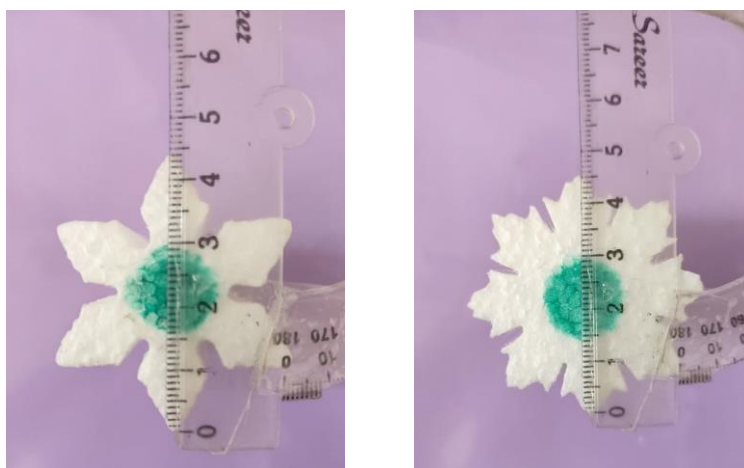
¹² Fig

¹³ Silver Maple

¹⁴ Hawthorn

¹⁵ Norway Maple

اصلاح به فرمت قابل ماشین‌کاری تبدیل شده‌اند. مدل‌های ساخته‌شده به‌صورت استوانه‌های سه‌بعدی با سطح مقطع برگ‌مانند و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر طراحی شده‌اند. فرآیند ساخت استوانه‌ها با استفاده از دستگاه CNC انجام شده و ماده اولیه آن‌ها فوم فشرده سبک با چگالی ۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب بوده است. موقعیت نصب استوانه‌ها در مرکز تیر بوده است. در شکل ۲، هندسه‌های دوبعدی مدل‌ها و تطابق آن‌ها با برگ واقعی، و در شکل ۳، نمونه‌های ساخته‌شده از دو مدل نشان داده شده است. آزمایش‌ها در بازه سرعت ۳/۳ تا ۱۴/۵ متر بر ثانیه انجام شده‌اند. برای هر نقطه داده، آزمایش‌ها سه بار تکرار شده‌اند و انحراف معیار مقادیر ثبت‌شده در بیشتر موارد کمتر از ۳ درصد بوده است. همچنین، عدم قطعیت در اندازه‌گیری سرعت جریان باد برابر با ± 0.1 متر بر ثانیه (بر اساس دقت بادسنج سیم داغ) و عدم قطعیت ولتاژ اندازه‌گیری‌شده برابر با ± 0.1 ولت (بر اساس مشخصات اسیلوسکوپ دیجیتال) در نظر گرفته شده است. این سطح از دقت برای مقایسه عملکرد مدل‌های مختلف هندسی کافی ارزیابی می‌شود. سیگنال جابجایی عرضی برای استخراج دامنه و فرکانس اصلی ارتعاشات با استفاده از FFT تحلیل شده، و از سیگنال ولتاژ برای محاسبه میانگین توان لحظه‌ای خروجی روی مقاومت مرجع استفاده گردیده است. تمامی داده‌ها به‌صورت بی‌بعد شده و نرمال در تحلیل‌ها به‌کار رفته‌اند.



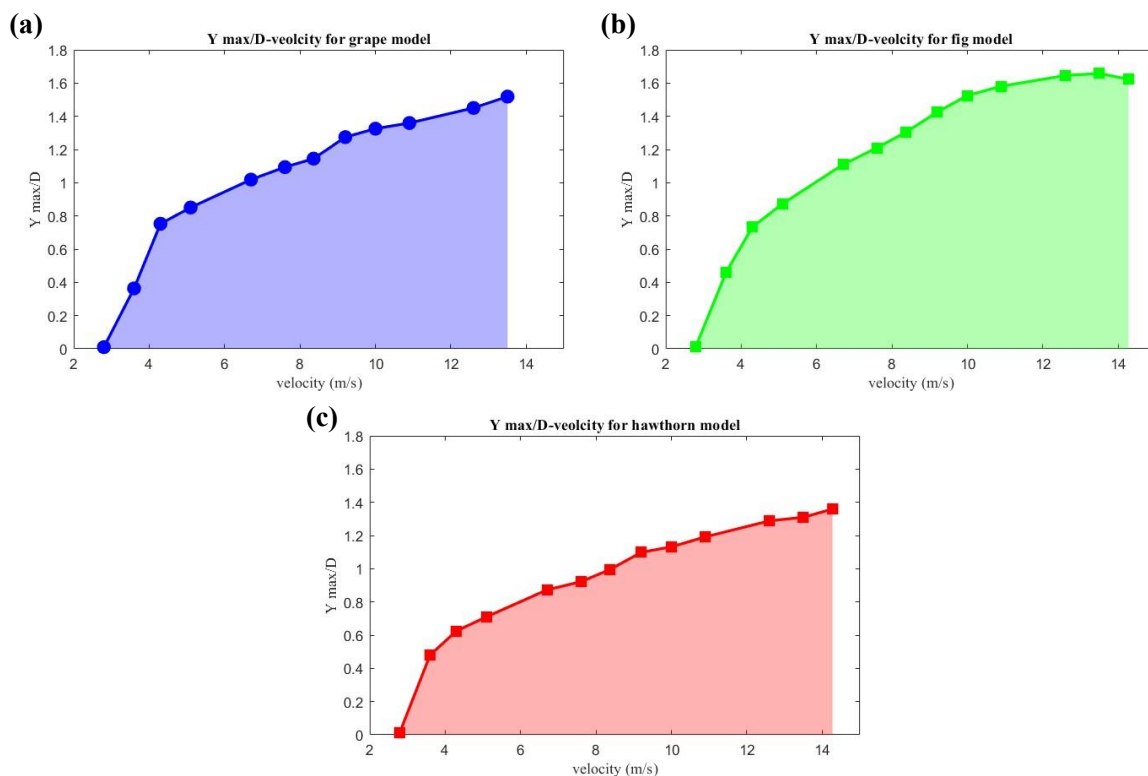
شکل ۳ دو نمونه ساخته‌شده استوانه‌های برگ‌مانند

۳- بحث و نتایج

شکل ۴، نمودار جابجایی عرضی بی‌بعد شده Y_{max}/D استوانه‌های الهام‌گرفته از سه برگ مختلف را در برابر سرعت جریان باد نشان می‌دهد. تمامی مقادیر جابجایی عرضی به‌صورت بی‌بعد و نرمال‌سازی‌شده بر اساس قطر معادل سطح مقطع هر مدل برگ‌مانند بیان شده‌اند تا امکان مقایسه کمی بین هندسه‌های مختلف فراهم گردد. بخش (a) مربوط به هندسه برگ انگور، بخش (b) مربوط به برگ انجیر و بخش (c) به برگ زالک اختصاص دارد. در هر سه نمودار، روند تغییرات جابجایی نسبت به افزایش سرعت جریان در بازه حدودی ۲/۵ تا ۱۴/۲ متر بر ثانیه رسم شده است. داده‌ها نشان‌دهنده پاسخ ارتعاشی مدل‌ها به تحریک ناشی از جریان باد در تونل باد بوده و مقادیر جابجایی‌ها برحسب قطر معادل مدل نرمال‌سازی شده‌اند. در بخش (a)، مدل برگ انگور در سرعت‌های پایین (کمتر از ۴ متر بر ثانیه) جابجایی بسیار محدودی دارد و مقدار Y_{max}/D کمتر از ۰/۴ است. با افزایش سرعت جریان، جابجایی به‌صورت پیوسته افزایش می‌یابد تا در سرعت حدود ۱۳/۸ متر بر ثانیه به مقدار نهایی تقریباً ۱/۵۵ برسد. این مقدار نسبت به مقدار اولیه (در سرعت ۳/۳ متر بر ثانیه با جابجایی حدود ۰/۳۵) نشان‌دهنده افزایشی حدود ۳۴۰٪ در دامنه نوسانات مدل برگ انگور است. روند تغییرات دارای شیب ملایم و پیوسته است.

در بخش (b)، مدل برگ انجیر بیشترین دامنه جابجایی را در بین این سه مدل به نمایش می‌گذارد. مقدار Y_{max}/D در این مدل از مقدار حدود ۰/۴ در سرعت ۳/۳ m/s شروع شده و تا مقدار ۱/۷۲ در سرعت ۱۳/۸ m/s افزایش می‌یابد. این رشد نشان‌دهنده افزایش بیش از ۳۳۰٪ در دامنه نوسانات است. روند رشد در سرعت‌های زیر ۷ m/s بسیار سریع است، به‌گونه‌ای که نیمی از جابجایی نهایی تنها در بازه ابتدایی سرعت حاصل می‌شود. این رفتار می‌تواند ناشی از هندسه بازتر و لبه‌های پهن‌تر مدل

برگ انجیر باشد که منجر به افزایش تحریک گردابه‌ای در سرعت‌های پایین‌تر می‌شود. در بخش (c)، مدل برگ زالک دارای کمترین دامنه جابجایی در این مقایسه سه‌گانه است. مقدار Y_{max}/D در سرعت $3/3$ m/s حدود $0/36$ بوده و در بیشینه مقدار خود در سرعت 14 m/s به $1/28$ می‌رسد. این تغییر معادل افزایش حدود 255% است. منحنی تغییرات برای این مدل نسبت به سایر مدل‌ها خطی‌تر و یکنواخت‌تر است و شدت پاسخ ارتعاشی آن در برابر افزایش سرعت جریان نسبتاً محدودتر بوده است. این می‌تواند به دلیل ساختار هندسی متراکم‌تر برگ زالک باشد که باعث کاهش پدیده گالوپینگ یا تحریک گردابه‌ای شدید می‌شود.

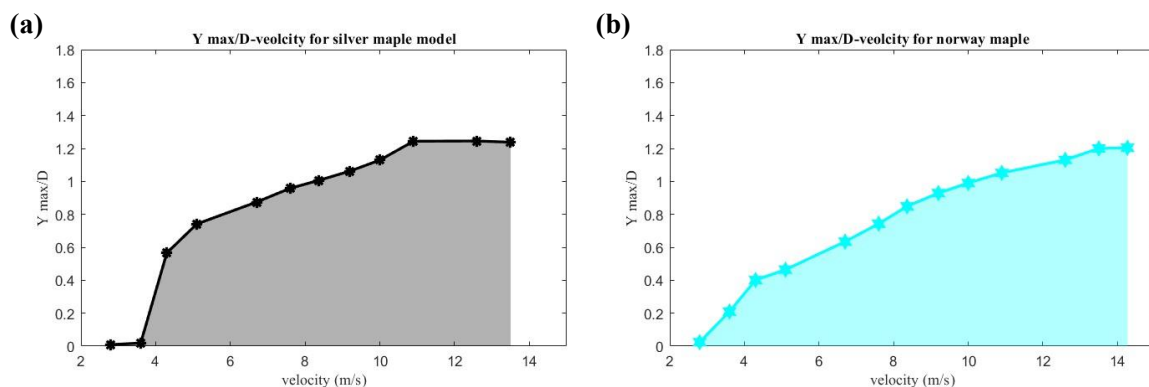


شکل ۴ تغییرات بیشینه جابجایی عرضی بی‌بعد شده استوانه‌های (a) برگ انگور، (b) برگ انجیر و (c) برگ زالک در برابر سرعت جریان باد

شکل ۵ به بررسی جابجایی عرضی بی‌بعد شده (Y_{max}/D) دو هندسه برگ‌مانند دیگر، یعنی (a) مدل برگ افرا نقره‌ای و (b) مدل برگ افرا نروژی اختصاص دارد. در هر دو نمودار، روند تغییرات دامنه ارتعاشی نسبت به سرعت جریان باد در محدوده حدودی $2/5$ تا $14/5$ متر بر ثانیه ارائه شده است. در نمودار (a)، مربوط به مدل افرا نقره‌ای، در سرعت‌های پایین‌تر از $3/5$ متر بر ثانیه جابجایی تقریباً صفر باقی می‌ماند. اما با افزایش سرعت به بالای 4 متر بر ثانیه، جابجایی به صورت ناگهانی افزایش می‌یابد و مقدار Y_{max}/D به حدود $0/75$ می‌رسد. سپس با افزایش تدریجی سرعت باد تا حدود $13/8$ متر بر ثانیه، جابجایی به مقدار بیشینه حدود $1/35$ می‌رسد. نسبت به مقدار اولیه در سرعت $3/5$ m/s، این مقدار نشان‌دهنده رشد بیش از 1185% در دامنه نوسان است. روند افزایش جابجایی در این مدل از سرعت 5 تا 12 متر بر ثانیه به صورت تقریباً خطی و یکنواخت بوده و در سرعت‌های بالا به حالت اشباع نزدیک می‌شود. در نمودار (b)، مربوط به مدل برگ افرا نروژی، جابجایی‌ها در تمامی بازه سرعت به صورت پیوسته و بدون جهش ناگهانی افزایش یافته‌اند. مقدار Y_{max}/D در سرعت اولیه $3/3$ m/s حدود $0/3$ است و در نهایت در سرعت $14/5$ m/s به مقدار $1/38$ می‌رسد. در مقایسه با افرا نقره‌ای، این مدل گرچه از سرعت‌های پایین‌تری شروع به ارتعاش کرده، اما نرخ رشد جابجایی آن نسبت به سرعت، یکنواخت‌تر و با شیب کمتر بوده است. افزایش کلی دامنه ارتعاشی در این مدل معادل حدود 360% است. نبود جهش در ابتدای نمودار می‌تواند نشانه‌ای از تحریک تدریجی و آرام جریان اطراف این هندسه نسبتاً ساده‌تر و متقارن‌تر باشد.

تحلیل مقایسه‌ای پاسخ ارتعاشی پنج هندسه برگ‌مانند نشان می‌دهد که دامنه جابجایی عرضی بی‌بعد شده (Y_{max}/D) در برابر افزایش سرعت جریان تفاوت‌های معناداری دارد که مستقیماً به ویژگی‌های هندسی هر مدل بازمی‌گردد. در میان این پنج مدل، مدل برگ انجیر بیشترین دامنه جابجایی را در تمامی سرعت‌های جریان از خود نشان می‌دهد. در سرعت‌های میانی و بالا، دامنه نوسانات این مدل به بیش از $1/7$ برابر قطر معادل می‌رسد. روند رشد پاسخ ارتعاشی این مدل نسبت به سرعت جریان بسیار سریع و پیوسته است، که احتمالاً به دلیل شکل پهن و لبه‌های خمیده آن است که شرایط مناسبی برای تشکیل گردابه‌های قوی‌تر و تحریک پایدار فراهم می‌کند.

مدل برگ انگور نیز عملکرد ارتعاشی قابل‌توجهی دارد و در اکثر سرعت‌ها پس از برگ انجیر قرار می‌گیرد. حداکثر دامنه نوسان این مدل در حدود $1/55$ برابر قطر معادل است و نرخ رشد آن نسبت به سرعت جریان، نسبتاً یکنواخت و پایدار باقی می‌ماند. در مقایسه با این دو مدل، مدل‌های افرا نقره‌ای، زالزالک و افرا نروژی دامنه‌های ارتعاشی کمتری تولید می‌کنند. اگرچه تفاوت بین آن‌ها در سرعت‌های پایین و میانی اندک است، اما در سرعت‌های بالاتر، مدل افرا نقره‌ای جابجایی بیشتری نسبت به زالزالک و افرا نروژی تولید می‌کند. به‌طور خاص، مدل افرا نقره‌ای با وجود آستانه تحریک بالاتر، در بازه ۶ تا 13 m/s پاسخ ارتعاشی قوی‌تری دارد. مدل‌های زالزالک و افرا نروژی کمترین دامنه ارتعاش را در این مجموعه ثبت کردند. حداکثر جابجایی در این دو مدل به ترتیب در حدود $1/35$ و $1/38$ است، که نشان می‌دهد این هندسه‌ها توان کمتری در تولید نوسان تحت تحریک جریان باد دارند. با این حال، پاسخ یکنواخت‌تر و بدون جهش ناگهانی آن‌ها می‌تواند در کاربردهایی که نیاز به پایداری و فرکانس ثابت دارند، مزیت محسوب شود. در جمع‌بندی می‌توان نتیجه گرفت که هندسه مدل برگ انجیر، بهترین عملکرد ارتعاشی را از نظر دامنه نوسانات ارائه داده و بیشترین پتانسیل را برای برداشت انرژی از ارتعاشات دارد، در حالی که مدل‌های افرا نروژی و زالزالک از پایداری بیشتری برخوردار بوده ولی دامنه نوسانات محدودتری دارند. این نتایج اهمیت انتخاب هندسه مناسب برای طراحی سازه‌های مرتعش با هدف برداشت انرژی را به‌خوبی برجسته می‌سازد. اگرچه در این پژوهش تصویربرداری مستقیم از جریان (مانند دود یا PIV) انجام نشده است، اما رفتار ارتعاشی مدل‌ها را می‌توان با تکیه بر اصول شناخته‌شده‌ی آیرودینامیک و ویژگی‌های هندسی آن‌ها تحلیل کرد. به‌طور خاص، مدل‌های برگ انجیر و انگور دارای لبه‌های باز و بریدگی‌های عمیق هستند که سبب جدایش زودهنگام جریان و ایجاد گردابه‌های قوی‌تر در پشت مدل می‌شوند. در مقابل، برگ‌های متراکم‌تری مانند زالزالک و افرا نروژی با فرم نسبتاً متقارن، جدایش ملایم‌تری دارند و از این‌رو تحریک گردابه‌ای کمتری را تجربه می‌کنند.

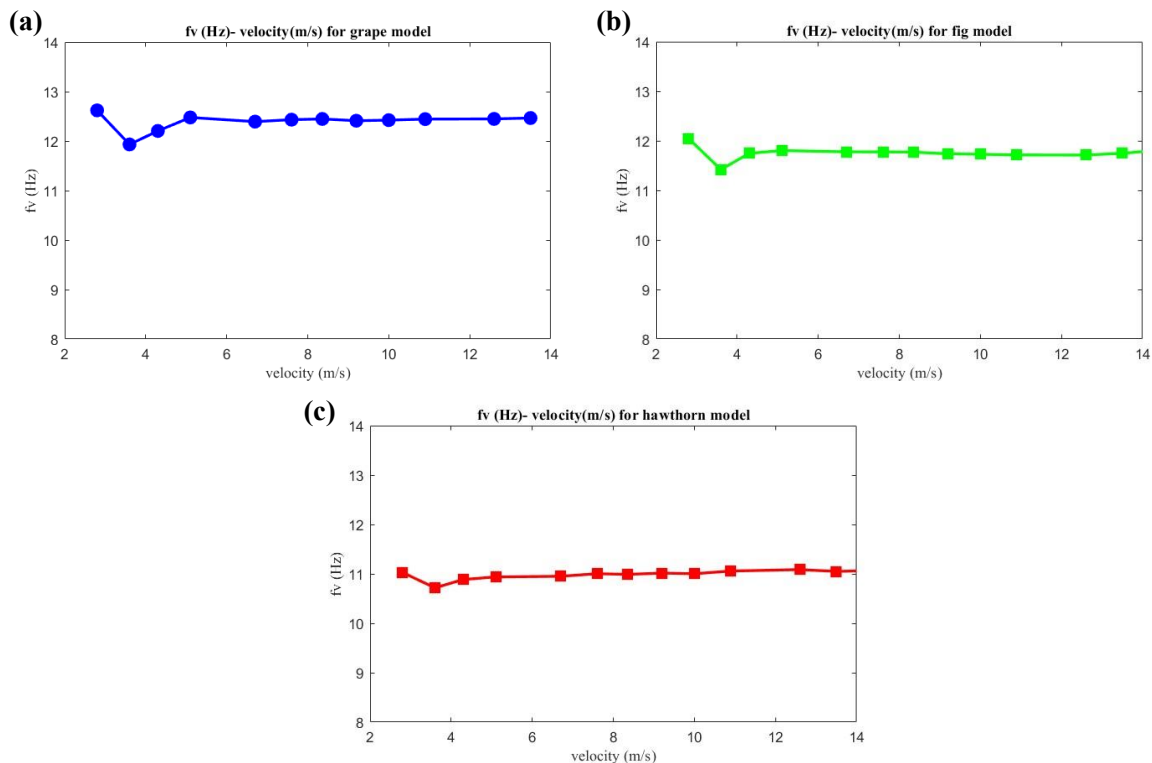


شکل ۵ نمودار بیشینه جابجایی عرضی بی‌بعد شده برای مدل‌های (a) برگ افرا نقره‌ای و (b) افرا نروژی در برابر سرعت جریان باد

شکل ۶، تغییرات فرکانس ارتعاشی مدل‌های برگ‌مانند را در برابر افزایش سرعت جریان باد نمایش می‌دهد. بخش (a) به مدل برگ انگور، بخش (b) به مدل برگ انجیر، و بخش (c) به مدل برگ زالزالک اختصاص دارد. در محور افقی سرعت جریان هوا (برحسب متر بر ثانیه) و در محور عمودی فرکانس ارتعاش (f_v) برحسب هرتز نمایش داده شده است. هدف از این تحلیل، بررسی پایداری فرکانس نوسانات و شناسایی تغییر حالت‌های ارتعاشی است. در نمودار (a)، مقدار فرکانس در سرعت $3/3$ متر بر ثانیه برابر با حدود $12/5$ هرتز بوده و در سرعت‌های میانی و بالا به مقدار تقریباً ثابتی در حدود $12/1$ تا $12/2$ هرتز می‌رسد. تغییرات کل فرکانس در بازه کامل آزمایش کمتر از $0/4$ هرتز است و میانگین فرکانس در این بازه حدود $12/2$ هرتز به‌دست می‌آید. این

رفتار نشان دهنده سختی دینامیکی بالا و ثبات بسیار مناسب در برابر تغییرات سرعت جریان است.

در نمودار (b)، مدل برگ انجیر نیز رفتار فرکانسی بسیار پایداری از خود نشان می‌دهد. مقدار اولیه f_v در سرعت $3/3$ m/s برابر با حدود $11/8$ هرتز است و در ادامه، با یک کاهش ملایم، به مقدار $11/5$ هرتز می‌رسد. در تمام سرعت‌های میانی و بالا، این مقدار تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. میانگین فرکانس در کل بازه حدود $11/6$ هرتز است و نوسان آن کمتر از $0/3$ هرتز گزارش شده است. نکته قابل توجه آن است که این پایداری فرکانسی در حالی رخ داده که مدل برگ انجیر بیشترین دامنه ارتعاش را در بین تمام مدل‌ها ثبت کرده است. به بیان دیگر، ترکیب دامنه بالا و فرکانس ثابت این مدل را به گزینه‌ای ایده‌آل برای برداشت انرژی تبدیل می‌کند. نمودار (c) به مدل برگ زالک اختصاص دارد. مقدار فرکانس ارتعاشی در این مدل در سرعت اولیه $3/3$ برابر با حدود 11 هرتز بوده و پس از یک کاهش جزئی به حدود $10/6$ هرتز، در باقی‌مانده بازه سرعت‌ها به صورت پایدار باقی می‌ماند. میانگین فرکانس در این مدل حدود $10/8$ هرتز محاسبه شده است و میزان تغییرات در کل بازه کمتر از $0/5$ هرتز است. این رفتار نیز مشابه مدل‌های دیگر، گویای پاسخ فرکانسی منظم و قابل پیش‌بینی این هندسه در برابر تحریک جریان باد است. در مجموع، داده‌های این نمودار نشان می‌دهد که هر سه مدل برگ‌مانند ارائه‌شده در این بخش، دارای رفتار فرکانسی تقریباً پایدار با نوسانات کمتر از $0/5$ هرتز هستند که از منظر پایداری دینامیکی و قابلیت پیش‌بینی، مزیت قابل توجهی برای سامانه‌های برداشت انرژی محسوب می‌شود.



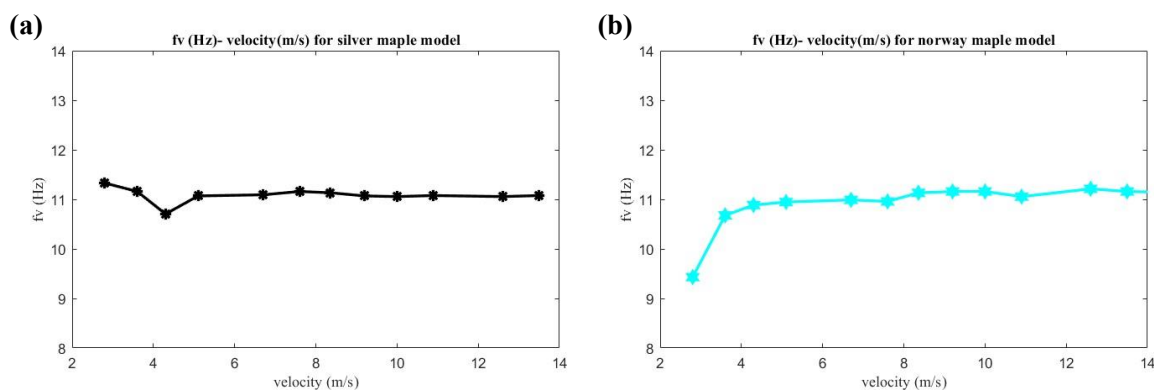
شکل ۶ تغییرات فرکانس ارتعاشی مدل‌های (a) برگ انگور، (b) برگ انجیر و (c) برگ زالک در برابر افزایش سرعت جریان باد

شکل ۷ رفتار فرکانسی دو مدل برگ‌مانند دیگر، شامل (a) مدل افرا نقره‌ای و (b) مدل افرا نروژی، را در برابر افزایش سرعت جریان باد نمایش می‌دهد. در نمودار (a)، در مدل افرا نقره‌ای، مقدار فرکانس در سرعت ابتدایی $3/3$ متر بر ثانیه برابر با حدود $11/2$ هرتز است. با افزایش جزئی سرعت تا حدود 4 m/s، افت محسوسی در فرکانس رخ می‌دهد به طوری که مقدار f_v به حدود $11/6$ هرتز کاهش می‌یابد. این افت اولیه ممکن است ناشی از تقارن لحظه‌ای بین فرکانس گردابه‌ای جریان و فرکانس طبیعی سامانه باشد که می‌تواند منجر به تداخلات دینامیکی و ناپایداری گذرا شود. پس از این نقطه، مقدار فرکانس مجدداً به حدود 11 هرتز بازمی‌گردد و در بازه کامل سرعت‌ها در محدوده‌ی 11 تا $11/2$ هرتز باقی می‌ماند. میانگین فرکانس ارتعاشی این مدل برابر

با حدود ۱۱ هرتز است و کل نوسانات در طول بازه آزمایش کمتر از ۰/۶ هرتز گزارش شده است. این داده‌ها نشان‌دهنده یک رفتار نسبتاً پایدار در اغلب سرعت‌ها با حساسیت گذرا در ابتدای بازه هستند.

در مقابل، مدل افرا نروژی در نمودار (b) رفتاری متمایز از خود نشان می‌دهد. مقدار f_v در سرعت اولیه ۳/۳ m/s برابر با حدود ۹/۵ هرتز است که کمترین مقدار بین همه مدل‌های مورد بررسی در این پژوهش محسوب می‌شود. با افزایش سرعت جریان به حدود ۴ m/s، جهشی ناگهانی در فرکانس رخ داده و مقدار آن به حدود ۱۰/۸ هرتز افزایش می‌یابد. این جهش می‌تواند به دلیل عبور از یک آستانه تحریک دینامیکی یا تغییر رژیم جریان در اطراف هندسه باشد. پس از این تغییر ناگهانی، فرکانس مدل افرا نروژی وارد یک محدوده پایدار شده و در باقی‌مانده بازه سرعت‌ها بین ۱۰/۸ تا ۱۱/۱ هرتز نوسان می‌کند. میانگین مقدار فرکانس در این بازه پایدار برابر با حدود ۱۱ هرتز است و دامنه نوسانات آن کمتر از ۰/۳ هرتز می‌باشد.

مقایسه فرکانس ارتعاشی مدل‌های برگ‌مانند در برابر افزایش سرعت جریان باد نشان می‌دهد که با وجود تفاوت‌های هندسی میان مدل‌ها، همگی دارای رفتار نسبتاً پایدار و غیرخطی محدودی در بازه سرعت آزمایش هستند. با این حال، سطوح فرکانسی و الگوی نوسان در هر مدل تفاوت‌های معناداری دارد که می‌تواند بر عملکرد سامانه‌های برداشت انرژی یا پایش ارتعاشی تأثیرگذار باشد. مدل برگ انگور دارای بالاترین سطح فرکانسی در تمام سرعت‌هاست. مقدار f_v در این مدل در حدود ۱۲/۱ تا ۱۲/۵ هرتز باقی می‌ماند و فقط در سرعت‌های پایین افت کوتاه‌مدتی تا ۱۲/۰ هرتز دارد. این ثبات بالا نشان می‌دهد که این هندسه از نظر سختی مؤثر دینامیکی بالاتر از سایر مدل‌ها بوده و در برابر تغییرات جریان مقاوم‌تر عمل می‌کند. مدل برگ انجیر از نظر مقدار مطلق فرکانس در رتبه دوم قرار می‌گیرد. مقدار f_v در این مدل در بازه ۱۱/۳ تا ۱۱/۷ هرتز متغیر است و روند آن تقریباً یکنواخت و بدون نوسان ناگهانی است. این پایداری نسبی در کنار دامنه جابجایی بالا (طبق نتایج قبلی) نشان می‌دهد که مدل برگ انجیر ترکیبی از پاسخ قوی و فرکانس ثابت را ارائه می‌دهد. سه مدل دیگر یعنی افرا نقره‌ای، زالزالک و افرا نروژی در سطح فرکانس پایین‌تری قرار دارند و میانگین f_v در آن‌ها حدود ۱۰/۸ تا ۱۱/۲ هرتز است. این سه مدل از نظر روند نیز مشابه‌اند: در سرعت‌های پایین کاهش یا جهش اولیه در f_v مشاهده می‌شود و سپس مقدار فرکانس در محدوده نسبتاً ثابتی باقی می‌ماند. به‌طور خاص، مدل افرا نروژی دارای کمترین مقدار f_v در سرعت‌های پایین است (حدود ۹/۵ هرتز) که در سرعت‌های بالاتر به سطح سایر مدل‌ها نزدیک می‌شود. بررسی نتایج ارتعاشی نشان می‌دهد که پدیده گالوپینگ به‌عنوان مکانیسم غالب تحریک ارتعاشی نقش داشته و عامل اصلی افزایش دامنه نوسانات در سرعت‌های بالاتر جریان بوده است.



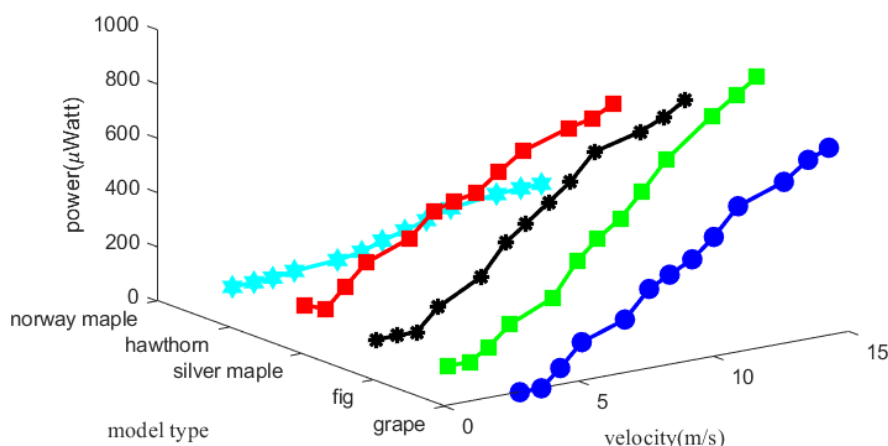
شکل ۷ تغییرات فرکانس ارتعاشی برای مدل‌های (a) افرا نقره‌ای و (b) افرا نروژی در برابر افزایش سرعت جریان باد

شکل ۸ نمودار سه‌بعدی توان الکتریکی تولیدشده (برحسب میکرووات) را در برابر سرعت جریان باد (m/s) و نوع مدل برگ‌مانند نمایش می‌دهد. در این نمودار، محور افقی نمایانگر سرعت جریان باد، محور عمودی مقدار توان تولیدی، و محور جانبی معرف نوع هندسه به‌کاررفته در طراحی استوانه مرتعش است. پنج مدل مورد بررسی شامل برگ انگور، انجیر، افرا نقره‌ای، زالزالک، و افرا نروژی می‌باشند. داده‌های این نمودار برگرفته از اندازه‌گیری‌های تجربی خروجی سنسور پیزوالکتریک نصب‌شده در انتهای تیر ارتعاشی استوانه می‌باشد. در تحلیل این داده‌ها، مشخص می‌شود که مدل برگ انجیر در تمام بازه‌های سرعت عملکرد برتری

نسبت به سایر مدل‌ها دارد. در سرعت $14/5 \text{ m/s}$ ، این مدل بیشترین توان تولیدی را با مقدار حدود 870 میکرووات ثبت می‌کند. شیب افزایش توان در این مدل نسبت به سرعت جریان نیز بیشتر از سایر مدل‌هاست که این موضوع مؤید پاسخ ارتعاشی شدید و مؤثر آن در مواجهه با جریان باد می‌باشد.

در جایگاه دوم، مدل برگ انگور قرار می‌گیرد که در سرعت‌های میانی و بالا توان قابل توجهی تولید می‌کند. مقدار توان تولیدی این مدل در سرعت‌های بالاتر به بیش از 700 میکرووات می‌رسد. اگرچه شیب رشد توان در این مدل کمی کمتر از مدل برگ انجیر است، اما همچنان یک پاسخ پایدار و قابل اتکا ارائه می‌دهد. مدل افرا نقره‌ای نیز در رتبه سوم قرار دارد. این مدل در سرعت‌های پایین توان محدودی تولید می‌کند، اما از سرعت حدود 6 m/s به بعد، رشد نسبتاً پایداری در توان خروجی دارد و در سرعت $14/5 \text{ m/s}$ به حدود 660 میکرووات می‌رسد. این عملکرد نسبتاً قوی را می‌توان ناشی از تحریک گردابه‌ای مناسب و فرکانس ارتعاشی نسبتاً پایدار مدل دانست. در ادامه، مدل زالزالک قرار دارد که عملکردی مشابه با مدل افرا نقره‌ای دارد، اما توان خروجی آن در تمام سرعت‌ها اندکی کمتر است. مقدار نهایی توان تولیدی این مدل در بالاترین سرعت آزمایش حدود 580 میکرووات می‌باشد. علیرغم دامنه جابجایی مناسب، به نظر می‌رسد پایداری کمتر در فرکانس یا ویژگی‌های آیرودینامیکی لبه‌ها منجر به کاهش توان برداشت‌شده شده باشد.

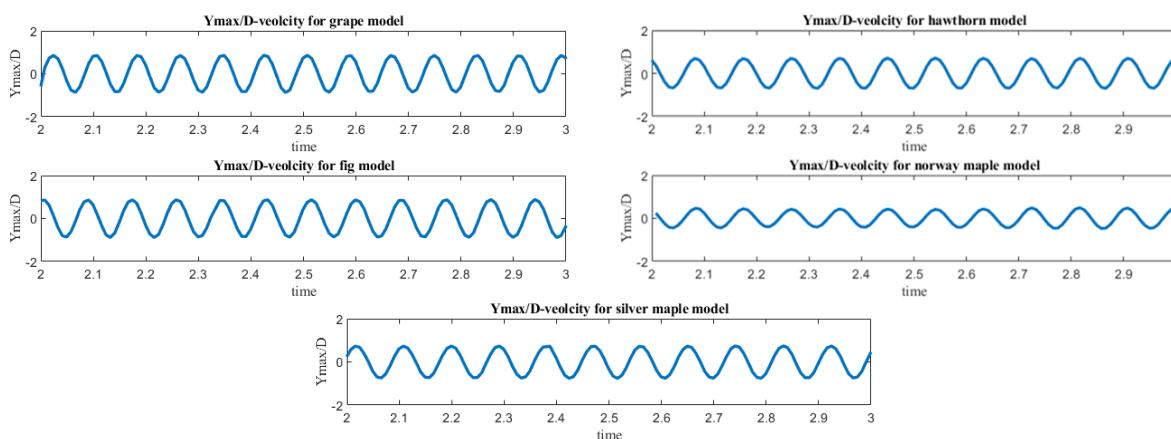
در نهایت، مدل افرا نروژی ضعیف‌ترین عملکرد را در میان مدل‌های بررسی شده دارد. حداکثر توان تولیدی این مدل در حدود 200 میکرووات باقی می‌ماند و شیب رشد توان نسبت به سرعت بسیار ملایم است. این نتایج با داده‌های پیشین درباره دامنه کم نوسانات و سطح پایین فرکانس ارتعاشی این مدل همخوانی دارد. در جمع‌بندی، می‌توان نتیجه گرفت که مدل برگ انجیر با فاصله قابل توجهی بالاترین بازده توان را دارد. مدل‌های برگ انگور و افرا نقره‌ای عملکردهای متوسط تا خوب با شیب رشد مناسب دارند. مدل‌های زالزالک و افرا نروژی به‌ویژه در سرعت‌های پایین تا میانی توان قابل توجهی تولید نمی‌کنند. این نتایج نشان می‌دهد که انتخاب صحیح هندسه برگ‌مانند برای طراحی استوانه مرتعش می‌تواند تأثیر چشمگیری بر عملکرد نهایی سامانه برداشت انرژی از ارتعاشات جریان داشته باشد. برای مقایسه عملکرد، یک نمونه در مقیاس میکرو مبتنی بر تیرک پیزوالکتریک PZT با بار 10 کیلو اهم در شرایط تشدید تا $6/7$ میکرووات تولید کرده است [۲۱]، و یک دستگاه میکروالکترومکانیکی (MEMS^{16}) تحت تحریک معادل $0/39$ حدود $1/1$ میکرووات توان خروجی داشته است [۲۲]. همچنین یک طراحی زیست‌الهام‌شده از آرایه‌ی سیلندرها توان در مرتبه‌ی چند میکرووات تولید کرده است [۲۰]. در مقایسه، طراحی برگ‌مانند ما در مدل برگ انجیر در سرعت باد $14/5 \text{ m/s}$ به بیشینه‌ی 870 میکرووات می‌رسد که تقریباً یک رده‌ی توان بالاتر از برداشت‌کننده‌های میکرونی و به‌روشنی برتری و پتانسیل مقیاس‌پذیری این رویکرد را نشان می‌دهد.



شکل ۸ نمودار سه‌بعدی توان الکتریکی تولیدی در برابر سرعت جریان و نوع مدل برگ‌مانند.

¹⁶ Microelectromechanical system

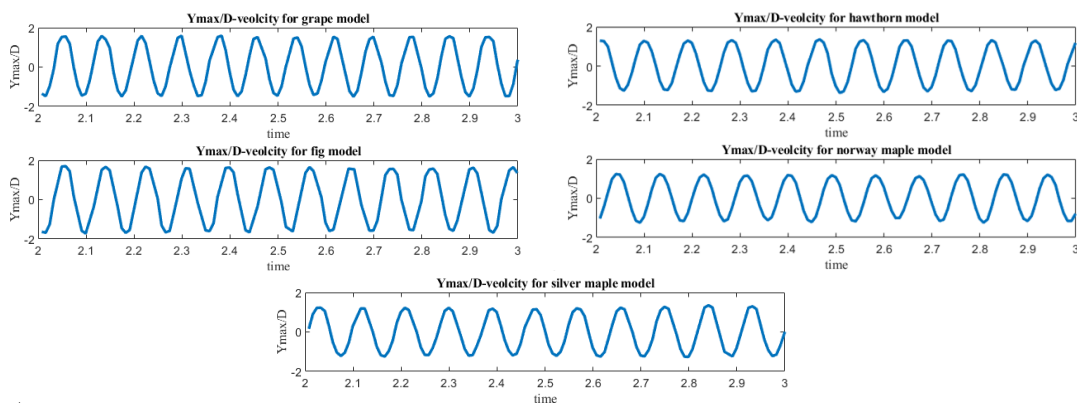
شکل ۹ پاسخ زمانی جابجایی عرضی بی‌بعد شده (Y/D) مدل‌های برگ‌مانند را در برابر زمان، در سرعت جریان ثابت ۵/۱ متر بر ثانیه نمایش می‌دهد. این نمودارها به منظور بررسی رفتار ارتعاشی، نظم سیگنال، و دامنه نوسانات برای هر مدل ارائه شده‌اند. در تمام مدل‌ها، رفتار ارتعاشی تناوبی و پایدار مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تثبیت دینامیکی سازه‌ها در این شرایط جریان است. در مدل برگ انجیر، بیشترین دامنه ارتعاشات ثبت شده و منحنی نوسانات دارای فرم کاملاً سینوسی و متقارن با دامنه‌ای در حدود $\pm 1/6$ مشاهده می‌شود. این رفتار منظم نشان‌دهنده تحریک گردابه‌ای قوی و مؤثر در این هندسه است. مدل برگ انگور نیز پاسخ سینوسی پایداری با دامنه‌ای کمتر از مدل انجیر، در حدود $\pm 1/3$ تولید می‌کند که بر هم‌راستایی مناسب بین فرکانس گردابه‌ای و فرکانس طبیعی مدل دلالت دارد.



شکل ۹ سیگنال‌های زمانی جابجایی عرضی بی‌بعد شده برای پنج مدل در سرعت جریان ۵/۱ متر بر ثانیه.

در مدل افرا نقره‌ای، دامنه نوسانات نسبتاً کمتر و حدود $\pm 1/1$ است، با این حال پاسخ زمانی همچنان منظم و بدون ناپایداری قابل مشاهده است. مدل برگ زالزالک پاسخ ارتعاشی با دامنه‌ای در حدود $\pm 1/0$ تولید کرده و شکل موج آن اگرچه سینوسی باقی مانده، ولی نسبت به مدل‌های پیشین، اندکی مسطح‌تر به نظر می‌رسد. این می‌تواند به دلیل ویژگی‌های خاص هندسی برگ زالزالک و نحوه جداسازی جریان در اطراف آن باشد. در نهایت، مدل افرا نروژی پایین‌ترین دامنه نوسانات را در این سرعت از خود نشان داده است. دامنه آن در حدود $\pm 0/8$ تا $\pm 0/9$ متغیر بوده و رفتار موج نیز منظم اما با شدت کمتر ثبت شده است.

شکل ۱۰، نمودارهای پاسخ زمانی جابجایی عرضی بی‌بعد شده (Y/D) را برای پنج مدل هندسی برگ‌مانند در شرایط جریان با سرعت ۱۴/۳ متر بر ثانیه نمایش می‌دهد. هدف این تحلیل، ارزیابی ثبات، دامنه، و نظم ارتعاشات مدل‌ها در شرایط تحریک شدید جریان است، چرا که این سرعت در نزدیکی مرز بالایی محدوده آزمایش قرار دارد و ممکن است رفتارهای غیرخطی یا اشباعی در سیستم رخ دهد. پاسخ زمانی مدل برگ انجیر در این سرعت نیز بیشترین دامنه را در میان تمام مدل‌ها دارد. نوسانات آن بسیار منظم، سینوسی و متقارن است و دامنه ارتعاشات به حدود $\pm 1/75$ برابر قطر مدل می‌رسد. این امر نشان‌دهنده پایداری دینامیکی حتی در شرایط بارگذاری بالا و حفظ رفتار خطی در تحریک گردابه‌ای قوی است. مدل برگ انگور نیز همچنان دامنه بالایی دارد، در حدود $\pm 1/5$ ، و شکل موج آن مشابه مدل انجیر دارای الگوی منظم و قابل پیش‌بینی است. این دو مدل از نظر دینامیکی، پاسخ ارتعاشی قدرتمند و پایداری را حتی در سرعت بالا از خود نشان می‌دهند. مدل افرا نقره‌ای نیز در این سرعت رفتار سینوسی روشنی دارد و دامنه ارتعاش آن به حدود $\pm 1/3$ می‌رسد. هرچند نسبت به سرعت‌های پایین‌تر رشد قابل توجهی داشته، اما به نظر می‌رسد روند رشد آن به حالت اشباع نزدیک شده باشد. با این حال، فرم موج همچنان منظم و بدون آشفتگی است.



شکل ۱۰ سیگنال‌های زمانی جابجایی عرضی بی‌بعد شده برای پنج مدل در سرعت جریان ۱۴/۳ متر بر ثانیه.

مدل زالک نیز دارای دامنه‌ای در حدود $\pm 1/25$ است. شکل موج نسبتاً صاف و پایدار بوده و نوسانات سینوسی آن حفظ شده‌اند. این مدل با وجود دامنه پایین‌تر نسبت به انگور و انجیر، همچنان رفتار خطی و پایداری را در پاسخ به جریان با سرعت بالا ارائه می‌دهد. در مدل افرا نروژی، اگرچه دامنه ارتعاشات نسبت به سرعت‌های پایین افزایش یافته و به حدود $\pm 1/1$ رسیده، اما همچنان پایین‌ترین دامنه را در میان مدل‌ها دارد. شکل موج آن از نظر نظم و تقارن قابل قبول است، اما نسبت به سایر مدل‌ها با شیب کمتری افزایش یافته است. این موضوع بیانگر ظرفیت پایین‌تر این هندسه در انتقال انرژی ارتعاشی تحت شرایط تحریک قوی می‌باشد. در مجموع، نتایج این شکل نشان می‌دهد که در سرعت $14/3 \text{ m/s}$ ، تمامی مدل‌ها همچنان رفتار پایدار و منظم از خود نشان داده‌اند، اما میزان دامنه ارتعاشات به‌طور قابل توجهی با نوع هندسه مرتبط است. مدل‌های برگ انجیر و انگور در این شرایط نیز برتری خود را از نظر پاسخ دینامیکی حفظ کرده‌اند، درحالی‌که مدل افرا نروژی علیرغم ارتعاشات منظم، همچنان عملکرد ضعیف‌تری در دامنه جابجایی دارد. حفظ شکل سینوسی در همه مدل‌ها نشان‌دهنده پایداری کلی سیستم و عدم ورود به ناحیه نوسانات آشفته یا غیرخطی است.

۴- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش، بررسی تأثیر هندسه برگ‌مانند بر پاسخ ارتعاشی و قابلیت برداشت انرژی از استوانه‌های ارتعاش‌کننده در جریان باد بود. با الهام‌گیری مستقیم از پنج نوع برگ طبیعی (انگور، انجیر، افرا نقره‌ای، زالک و افرا نروژی)، مدل‌هایی فیزیکی ساخته شد و عملکرد آن‌ها در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که هر مدل هندسی دارای رفتار ارتعاشی منحصر به فردی در برابر تغییرات سرعت جریان است. از نظر دامنه جابجایی، مدل برگ انجیر بیشترین مقدار را با بیشینه دامنه حدود $1/75$ برابر قطر مدل ارائه داد. مدل برگ انگور نیز عملکرد ارتعاشی نسبتاً قدرتمندی داشت و در رتبه دوم قرار گرفت. در مقابل، مدل‌های زالک و افرا نروژی کمترین دامنه ارتعاش را نشان دادند، اگرچه رفتار آن‌ها پایدارتر و بدون جهش ناگهانی بود. از منظر فرکانسی نیز تمامی مدل‌ها رفتار نسبتاً ثابت و خطی داشتند، اما مدل برگ انگور بالاترین سطح فرکانس را در بازه آزمایش نشان داد.

در مقایسه عملکرد برداشت انرژی، مدل برگ انجیر با حاشیه قابل توجهی بهترین بازده را ثبت کرد (تا 870 میکرووات در سرعت $14/5 \text{ m/s}$) پس از آن، برگ انگور و افرا نقره‌ای به ترتیب با حدود 700 و 660 میکرووات عملکرد مناسبی داشتند. مدل زالک با توان 580 میکرووات در رتبه چهارم قرار گرفت و در نهایت مدل افرا نروژی، ضعیف‌ترین بازده انرژی را ارائه داد. جمع‌بندی کلی پژوهش نشان می‌دهد که هندسه برگ تأثیر بسزایی در شدت ارتعاشات و میزان توان برداشت‌شده دارد. این نتایج تأکید می‌کنند که انتخاب هندسه زیست‌الهام‌شده مناسب می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در بهینه‌سازی سامانه‌های برداشت انرژی مبتنی بر ارتعاشات ناشی از جریان ایفا کند.

Authorship Contribution Statement

Dr. Amir Hossein Rabiee



Biography: Associate Professor of Mechanical Engineering at Arak University of Technology. His research interests include flow-induced vibrations, energy harvesting, and intelligent system control.

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Writing – original draft, Supervision, Project administration.

Ali Yousefi



Biography: Ph.D. candidate in Mechanical Engineering at Arak University of Technology. His research interests focus on vibrations and dynamic systems.

Contribution Statement: Investigation, Validation, Resources, Software, Data curation.

Dr. Mostafa Esmaeili



Biography: Associate Professor of Mechanical Engineering at Kharazmi University. His research interests include fluid mechanics dynamics and flow-induced vibrations.

Contribution Statement: Methodology, Formal analysis, Writing – review & editing, Visualization.

۵- مراجع

- [1] Rabiee A H, Farahani S D. Effect of synthetic jet on VIV and heat transfer behavior of heated sprung circular cylinder embedded in a channel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2020; 119:104977.
- [2] Esmaeili M, Rabiee A H. Heat transfer characteristics in turbulent FIV of three circular cylinders with different isosceles-triangle arrangements. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 2023; 33:2455–2477.
- [3] Esmaeili M, Fakhri Vayqan H, Rabiee A H. Impact of temperature-induced buoyancy on the 2DOF-VIV of a heated/cooled cylinder. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2025; 50:2807–2822.
- [4] Rabiee A H, Rafieian F, Mosavi A. Active vibration control of tandem square cylinders for three different phenomena: Vortex-induced vibration, galloping, and wake-induced vibration. *Alexandria Engineering Journal*. 2022; 61:12019–12037.
- [5] Esmaeili M, Fakhri Vayqan H, Rabiee A H. The role of flow angle in mixed convection and vortex-induced vibration of a thermally controlled elastic cylinder. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 2025; 35:799–824.
- [6] Rabiee A H. Regenerative semi-active vortex-induced vibration control of elastic circular cylinder considering the effects of capacitance value and control parameters. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2018; 32:5583–5595.
- [7] Rabiee A H, Esmaeili M. Effect of the flow incidence angle on the VIV-based energy harvesting from triple oscillating cylinders. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2023; 57:103312.
- [8] Najafpour A, Rajabi M, Esmaeili M, Rabiee A H. Comprehensive study of fluid-structure interaction in vortex-induced vibrations: Integration of experimental, computational and wake oscillator approaches. *Journal of Theoretical and Applied Vibration and Acoustics*. 2025; 11:1–21.
- [9] Ray A R, Koley S. Performance of piezoelectric beam type energy harvester under flow-induced vibration. *Scientific Reports*. 2025; 15:13433.

- [10] Wang J, Yurchenko D, Hu G, Zhao L, Tang L, Yang Y. Perspectives in flow-induced vibration energy harvesting. *Applied Physics Letters*. 2021; 119.
- [11] Rabiee A H., Naderi A, Esmaili M. Enhancing energy harvesting capability through analysis of flow-induced vibrations in double sprung circular cylinders exposed to turbulent flow: Influence of incidence angle. *Ocean Engineering*. 2024; 309:118598.
- [12] Chatterjee R, Shah C L, Gupta S, Sarkar S. Energy harvesting in a flow-induced vibrating flapper with biomimetic gaits. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2024; 272:109150.
- [13] Rabiee A H, Farahani S D, Mosavi A. Thermal and vibratory response of sprung square cylinder with four nature-inspired fin-shaped bumps. *Ain Shams Engineering Journal*. 2023; 14:102010.
- [14] Kang D, Kang Q, He Z, Li X, Chen J, Wang F, Zou Q. Flow-induced vibration and heat transfer characteristic of cylinder with a bio-inspired surface. *Ocean Engineering*. 2024; 303:117645.
- [15] Gad-el-Hak I, Mureithi N. Mitigation of jet cross-flow induced vibrations using an innovative biomimetic nozzle design inspired by shark gill geometry. *Scientific Reports*. 2022; 12:11107.
- [16] Omidvarnia F, Sarhadi A. Nature-inspired designs in wind energy: a review. *Biomimetics*. 2024; 9:90.
- [17] Bakhtiar S, Khan F U, Fu H, Hajjaj A Z, Theodossiades S. Fluid flow-based vibration energy harvesters: A critical review of state-of-the-art technologies. *Applied Sciences*. 2024; 14:11452.
- [18] Schindler D, Schönborn J, Fugmann H, Mayer H. Responses of an individual deciduous broadleaved tree to wind excitation. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2013; 177:69–82.
- [19] James K R, Haritos N, Ades P K. Mechanical stability of trees under dynamic loads. *American Journal of Botany*. 2006; 93:1522–1530.
- [20] Hobbs W B, Hu D L. Tree-inspired piezoelectric energy harvesting. *Journal of Fluids and Structures*. 2012; 28:103–114.
- [21] Kim S G, Priya S, Kanno I. Piezoelectric MEMS for energy harvesting. *MRS Bulletin*. 2012; 37:1039–1050.
- [22] Park J C, Park J Y. Micromachined piezoelectric energy harvester with low vibration. *Proceedings of the 2009 18th IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics (ISAF)*. 2009; 1–6.