

کنترل بهینه ارتعاشات میله مولدهای بادی بدون پره

مهسا پهلوان زاده^۱، محسن ایرانی رهقی^۲، مهدی محمدی مهر^۳

^۱ دانشجوی دکتری مکانیک جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

^۲ دانشیار گروه مکانیک جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

^۳ استاد گروه مکانیک جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

پست الکترونیکی نویسندگان:

^۱ - m.pahlavanzadeh@grad.kashanu.ac.ir

^۲ - Irani@kashanu.ac.ir

^۳ - mmohammadimehr@kashanu.ac.ir

چکیده

بحران جهانی انرژی، توجه گسترده‌ای را به سمت مولدهای بادی بدون پره (^۱BWPGs) به عنوان راهکاری نوین برای تولید انرژی پاک جلب کرده است. این سامانه‌ها با استفاده از پدیده ارتعاشات القایی جریان باد، انرژی مکانیکی ناشی از نوسانات میله را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. از میان عوامل مؤثر بر افزایش بازده این مولدها، پایداری فرکانس طبیعی سیستم در ناحیه تشدید از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف این پژوهش، ارائه روشی بهینه برای کنترل ارتعاشات مولدهای بادی بدون پره از طریق تنظیم سفتی مؤثر سازه است؛ سفتی که به طور مستقیم با طول مؤثر میله در ارتباط است. با کنترل این پارامتر، فرکانس طبیعی سازه در مجاورت فرکانس تشدید حفظ می‌شود و در نتیجه، بیشینه توان قابل استحصال از جریان باد حاصل می‌گردد. در این مطالعه، تأثیر پارامترهای کلیدی همچون سفتی، جرم و میرایی به صورت تحلیلی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با بهره‌گیری از روش‌های بهینه‌سازی دینامیکی، ابعاد و ویژگی‌های طراحی به گونه‌ای تعیین شده‌اند که فرکانس طبیعی سیستم در محدوده تشدید باقی بماند. نتایج شبیه‌سازی عددی با داده‌های تجربی تطبیق داده شده و اعتبار مدل تحلیلی و اثربخشی روش کنترل پیشنهادی به صورت کمی مورد تأیید قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی

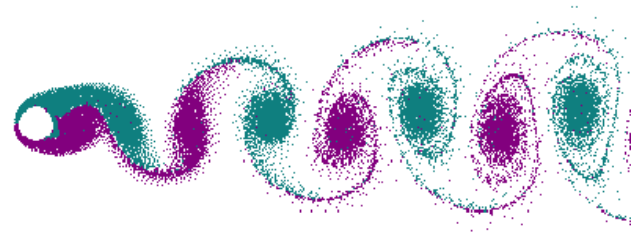
ارتعاشات، انرژی تجدیدپذیر، بهینه‌سازی، مولد بادی بدون پره، ناحیه تشدید

۱. مقدمه

این پژوهش به تحلیل ارتعاشات و کنترل توربین بادی بدون پره (BWPG) اختصاص دارد. این توربین‌ها از یک میله‌ی انعطاف‌پذیر تشکیل شده‌اند که از پایین به پایه‌ی ثابت و از بالا به دکل متصل است. وزش باد موجب نوسان میله می‌شود و در نتیجه، انرژی مکانیکی ناشی از ارتعاشات در محفظه‌ی داخلی (هوزینگ) به انرژی الکتریکی تبدیل می‌گردد. در گام نخست، پژوهش حاضر به بررسی ارتعاشات آزاد و اجباری تیرهای ساندویچی کامپوزیتی می‌پردازد. هدف از تحلیل این تیر، شبیه‌سازی رفتار دینامیکی توربین بادی بدون پره است که به صورت تیر یک‌سر گیردار و یک‌سر آزاد (تیر طره‌ای) مدل‌سازی شده است. در مدل‌سازی حاضر، خواص مواد در راستای ضخامت متغیر در نظر گرفته شده و معادلات حاکم بر تیر با استفاده از اصل همپلتون استخراج شده‌اند. سپس با استفاده از توابع مثلثاتی و تحت شرایط مرزی مختلف، حل تحلیلی سیستم ارائه گردیده است. مقایسه‌ی نتایج با پژوهش‌های پیشین، هم‌خوانی مناسبی را نشان می‌دهد که بیانگر صحت مدل‌سازی تحلیلی ارائه‌شده است. در ادامه، تأثیر پارامترهای طراحی نظیر نسبت طول به ضخامت، نوع هسته (از جمله هسته‌های لانه‌زنبوری با نسبت پواسون منفی، هسته‌های فومی و پلیمری)، میزان تخلخل، و نوع تقویت‌کننده‌های لایه‌های رویی شامل نانوصفحات گرافنی (GPL) و نانولوله‌های کربنی (CNT) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از هسته‌ی لانه‌زنبوری با ترکیب مواد بهینه و توزیع مناسب GPL موجب افزایش محسوس فرکانس‌های طبیعی تیر می‌شود، به گونه‌ای که افزودن تنها ۱ درصد وزنی از تقویت‌کننده‌ی GPL باعث بهبود قابل ملاحظه‌ای در عملکرد دینامیکی تیر شده است. بر اساس یافته‌ها، نانوصفحات گرافنی

^۱ Bladeless Wind Power Generators

(GPL) می‌توانند جایگزینی اقتصادی و کارآمد برای نانولوله‌های کربنی در تقویت ساختار باشند. پیش‌بینی‌ها حاکی از آن است که به‌کارگیری این مواد در طراحی می‌تواند توان خروجی مولد را تا حدود ۳۰۰ درصد افزایش دهد. در نهایت، پژوهش با هدف کنترل و بهینه‌سازی ارتعاشات تیر ادامه می‌یابد تا شرایطی فراهم شود که فرکانس طبیعی سازه در مجاورت فرکانس تشدید قرار گرفته و حداکثر انرژی از جریان باد برداشت گردد.



شکل ۱: مسیر تاوه ای فن کارمن پشت استوانه
Figure ۱: Kármán vortex street behind the cylinder

۲. پیشینه پژوهش

✓ تحقیقات انجام شده در بخش توربین های بادی بدون پره:

در تحقیق انجام شده توسط چیزفهم و همکاران [۱]، محققان توربین‌های بادی بدون پره را مدل‌سازی کردند. برای انجام پژوهش از روش گالرکین استفاده شده است. چیزفهم و همکاران در مقاله‌شان با مدل‌سازی دینامیکی چهار پیکربندی ارتعاشات ناشی از گردابه های توربین‌های بادی بدون پره را بررسی کرده که این بلوف^۲ها (جسم جامد سختی که در معرض سیال قرار دارد) روی یک ساختار انعطاف‌پذیر نصب شده‌اند آن‌ها در نهایت برای صحت‌سنجی کار خود را با شبیه‌سازی عددی مقایسه کرده اعمال نیروهای مغناطیسی به ساختار تشدید کننده اجازه می‌دهد تا به طور غیرفعال استحکام سازه تغییر داده شود که منجر به افزایش محدوده قفل و در نتیجه افزایش تعداد ساعات کار در سال می‌شود. ویلارل و همکاران [۲] در مقاله‌شان خلاصه‌ای از کلی‌ترین جنبه‌های یک فناوری جایگزین مبتنی بر تعامل ساختار سیال^۳ VIV آورده است که از استفاده از چرخ دنده یا شفت اجتناب می‌کند. اعمال نیروهای مغناطیسی به ساختار تشدید کننده، امکان تغییر غیرفعال سختی سازه را فراهم می‌سازد که این امر موجب گسترش بازه‌ی قفل‌شدگی و در

نتیجه افزایش مدت زمان عملکرد سالیانه‌ی سامانه می‌گردد. هان و همکاران در تحقیقشان نشان داده اند که حتی در شرایط میرایی ساختاری بالا، مشاهده پدیده VIV همیشه محتمل است زمانی که نسبت جرم بسیار پایین باشد. پژوهش با آزمایش‌های کانال آب همراه با مدل مرتبه کاهش یافته (ROM) انجام شده است [۳]. ویلیامسون و گواردن در تحقیقشان نتایج و اکتشافات اساسی در مورد ارتعاشات ناشی از گردابه را که در دو دهه گذشته انجام شده است، خلاصه کرده‌اند، که بسیاری از آنها مربوط به فشار به جرم و میرایی بسیار کم، و تکنیک‌های محاسباتی و تجربی جدید است که قبل از تحقیق آن‌ها در دسترس نبوده است [۴]. برنیتساس و همکاران [۵] در مقاله‌شان مفهومی جدید در تولید انرژی پاک و تجدیدپذیر از جریان سیال را ارائه داده‌اند. اختراع آن‌ها برای اولین بار با استفاده از VIV، انرژی هیدروکنتیک جریان رودخانه را به شکل قابل استفاده‌ای از انرژی مانند الکتریسیته با موفقیت و کارآمدی تبدیل می‌کند. در این پژوهش، مفاهیم اساسی مبدل VIVACE مورد بررسی قرار گرفته است. مدل فیزیکی و نمونه‌ی اولیه‌ی آزمایشگاهی آن ارائه شده و یک مدل ریاضی نیز توسعه داده شده است تا مشخصات طراحی برای طیف گسترده‌ای از مقیاس‌های کاربردی محاسبه گردد. طراحی جدید توربین بادی فاقد یاتاقان، چرخ دنده و غیره است، بنابراین نیازهای تعمیر و نگهداری را می‌توان به شدت کاهش داد و انتظار می‌رود طول عمر آنها بیشتر از توربین‌های بادی سنتی باشد. هوک و همکاران [۶] با هدف بررسی تعامل سیال-سازه (FSI^۴) در تیغه‌های توربین بادی با نوک تیز، مدل سه‌بعدی دقیقی از تیغه را در محیط CAD ایجاد و جریان باد را با حل معادلات ناویر-استوکس در ANSYS Fluent شبیه‌سازی کرده است. سازه تیغه به‌صورت پوسته کامپوزیتی در ANSYS Mechanical مدل‌سازی شده و تحلیل به دو روش کوپل یک‌طرفه و دوطرفه انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد جابجایی نوک تیغه در سرعت‌های بالا قابل توجه بوده و بیشترین تنش در ناحیه ریشه رخ می‌دهد. همچنین، کوپل دوطرفه پیش‌بینی دقیق‌تری از رفتار آیرودینامیکی و استحکام سازه‌ای ارائه داده و بر اساس آن پیشنهادهایی برای بهینه‌سازی شکل نوک و تقویت بخش ریشه ارائه شده است. سالوادور و همکاران [۷] در تحقیقشان استفاده از دو نوع آونگ قوسی شکل دیسکی را بر روی یک توربین باد بدون پره گردابی (VBW^۵) نشان داده که در آن‌ها انرژی جنبشی باد به عنوان ورودی به

^۴ Fluid-Structure Interaction

^۵ vortex bladeless wind

^۲ bluff body

^۳ Vortex Induced Vibration

توربین VBW به انرژی الکتریکی مفید برای هر دو نوع آونگ تبدیل می‌شود. همچنین طراحی و توسعه یک توربین بادی بدون پره گردابی و یک ژنراتور الکترونیکی مبتنی بر ژيروسکوپ توسط فرانسس و همکاران [۸] صورت گرفته که توربین برای تولید برق به ژنراتور متصل می‌شود. بونزل و فرازینی نیز بررسی عددی در رابطه با برداشت انرژی پیزوالکتریک از ارتعاشات موجودآمده ناشی از گرداب را انجام داده‌اند. آن‌ها یک استوانه صلب که به صورت الاستیک پشتیبانی می‌شود را در دو جهت متقاطع تحت نوسان قرار داده‌اند و سپس وابستگی توان الکتریکی برداشت شده را به پارامترهای سیستم بررسی کرده‌اند [۹].

✓ مرور مطالعات کنترل و بهینه‌سازی توربین‌های بادی بدون پره:

آزادی یزدی [۱۰] کنترل یک برداشت کننده انرژی ارتعاش ناشی از گردابه را انجام داده است. در بیشتر تولیدکننده‌های انرژی تحریک شده توسط گردابه، قدرت خروجی تنها در یک باند باریک اطراف سرعت باد معمولاً قابل توجه است که فرکانس ریزش گردابه با فرکانس طبیعی ساختار مطابقت داشته باشد. برای پیشگیری از این محدودیت، یک مکانیزم جرم تنظیم شده در تولیدکننده انرژی تحریک شده توسط گردابه پیشنهاد شده است که می‌تواند فرکانس طبیعی توربین را به گونه‌ای تغییر دهد که با فرکانس ریزش گردابه در یک باند گسترده‌ای از سرعت‌های باد مطابقت داشته باشد. آزادی یزدی [۱۱]، در تحقیق دیگری یک کنترل کننده پیش‌بینی کننده غیرخطی (NMPC^۶) برای یک توربین بادی بدون پره که ارتعاشات آن ناشی از گردابه می‌باشد را پیشنهاد می‌دهد. او برای تولید بیشترین نرخ تولید انرژی از روش NMPC برای طراحی یک کنترل کننده استفاده کرده است همچنین نشان داده است که تولید انرژی NMPC در سرعت‌های باد بالا به دلیل عدم تطابق بین فرکانس ریزش گردابه و فرکانس طبیعی سازه کاهش می‌یابد. بنابراین، یک کنترل کننده دومی با عنوان GS^۷ پیشنهاد داده است که برای افزایش مجازی فرکانس طبیعی ساختار به منظور تطابق با فرکانس ریزش گردابه در بادهایی با سرعت بالا استفاده شده است. و با استفاده از این روش GS-NMPC پیشنهادی، توان خروجی را از ۱۰۰ وات به مقدار ۱ کیلووات رسانده است. حسنی و ایرانی [۱۲] یک برداشت کننده انرژی الکترومغناطیسی که از سه سیم پیچ تشکیل شده است ارائه

داده‌اند. همچنین دو مدل جدید برای میرایی الکترومغناطیسی پیشنهاد کرده‌اند. یک الگوریتم بهینه‌سازی برای به حداکثر رساندن توان تولید شده توسط برداشت کننده انرژی پیاده سازی کرده‌اند. توان تولید شده توسط برداشت کننده به عنوان تابع هدف انتخاب شده تا الگوریتم بهینه‌سازی برای یافتن بهترین پیکربندی بر اساس انتخاب پارامترهای بهینه‌سازی مانند تعداد دور سیم پیچ ها، پیکربندی سیم پیچ های سیم پیچ و ابعاد آهنربا عمل کند. و همچنین برای اولین بار اثر داخلی بین سیم پیچ‌ها را مورد بررسی قرار دادند و نتایج کار خود را با تست عملی صحت بخشیدند.

در سال‌های اخیر، چندین مطالعه جدید تلاش کرده‌اند فناوری مولدهای بادی بدون پره را ارتقا دهند. محمد و همکاران (Mohamed et al., ۲۰۲۵) دو مکانیزم نو در طراحی این توربین‌ها ارائه کرده‌اند که امکان عملکرد موثر در بازه باد ۲ تا ۱۰ متر بر ثانیه را فراهم می‌کند. کانگ و همکاران (Kang et al., ۲۰۲۴) یک توربین بدون پره طراحی کردند که از ماده‌ای با سختی متغیر بهره می‌برد و قادر است فرکانس تشدید را تا ۶۰٪ جابجا کند تا عملکرد بهتری در سرعت‌های مختلف باد داشته باشد. همچنین Awadallah و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از پیکربندی چند سیلندر و ژنراتور گردابه‌ای غیرفعال نشان داده‌اند که بهره‌برداری انرژی از ارتعاشات پشت سر هم افزایش می‌یابد. افزون بر این، برین و همکاران (Breen et al., ۲۰۲۵) به بهینه‌سازی هندسی توربین‌های بدون پره پرداخته‌اند و راهکارهایی برای افزایش توان خروجی همراه با حفظ استحکام سازه‌ای پیشنهاد داده‌اند. این مطالعات اخیر نشان می‌دهد که گرایش فعلی در این حوزه معطوف به کنترل تطبیقی، طراحی چند پارامتری و ترکیب هندسی است و پژوهش حاضر نیز با تمرکز بر کنترل بهینه طول راد و طراحی کامپوزیتی پیشرفته، در ادامه‌ی همین مسیر نوآوری قرار دارد.

این پژوهش رویکردی نوین در طراحی و کنترل توربین‌های بادی بدون پره ارائه می‌دهد که در آن با استفاده از یک مکانیزم کنترلی سازه‌ای تطبیقی، طول مؤثر راد به صورت پیوسته تنظیم می‌شود تا سازه همواره در ناحیه تشدید با فرکانس ریزش گردابه باقی بماند. برخلاف مطالعات پیشین که معمولاً بر هندسه ثابت یا کنترل غیرفعال تمرکز داشتند، در این تحقیق یک راهبرد کنترلی فعال با مدل تیر ساندوپیچی کامپوزیتی شامل هسته‌ی لانه‌زنبوری با نسبت پواسون مثبت و لایه‌های تقویت‌شده با GPL تلفیق شده است. چارچوب بهینه‌سازی دینامیکی مبتنی

بر تابع هدف بولزا و حل عددی Collocation-NLP به منظور تنظیم بلادرنگ پارامترهای سازه‌ای به کار گرفته شده

^۶ nonlinear model predictive controller

^۷ Secondary Gain-Scheduling

فهرست علائم

E_c	مدول الاستیسیته هسته
E_c	مدول الاستیسیته هسته
E_0	مدول الاستیسیته آلومینیوم
G_c	مدول برشی هسته
G_0	مدول برشی آلومینیوم
ρ_c	چگالی هسته
ρ_0	چگالی جرم آلومینیوم
v_{core}	ضریب پواسون هسته
v_{CNT}	ضریب پواسون نانولوله کربنی
z	مختصات در راستای ضخامت
h	ضخامت کل تیر
e_m	ضریب توزیع
W_{GPL}	کسر وزنی نانوصفحات گرافنی
ρ_{GPL}	چگالی نانوصفحات گرافنی
E_m	مدول الاستیسیته ماتریس پلیمری
ρ_m	چگالی ماتریس
V_{i1}	کسر حجمی نانوصفحات گرافنی در توزیع (GPL-U)
V_{i2}	کسر حجمی نانوصفحات گرافنی در توزیع (GPL-A)
V_{i3}	کسر حجمی نانوصفحات گرافنی در توزیع (GPL-S)
V_{CNT}^*	کسر حجمی مؤثر نانولوله‌های کربنی
ρ_{CNT}	چگالی نانولوله کربنی
η_1	نسبت ارتفاع به طول سلول
η_3	نسبت ضخامت به طول مشخصه سلول
S	عدد استروهل
V	سرعت جریان سیال
D	قطر استوانه
P_{harn}	توان برداشت شده
C_{harn}	ضریب میرایی برداشت کننده انرژی
T_{cyl}	دوره تناوب ارتعاش استوانه

۳. هندسه تیر و شبیه‌سازی

همان‌گونه که در شکل ۲ شماتیک کلی مولدهای بادی بدون پره نشان داده شده است، این پژوهش به کنترل بهینه‌ی ارتعاشات میله‌ی اصلی (راد) در این سامانه‌ها می‌پردازد. در ادامه، مدل‌سازی دینامیکی تیر و معرفی ساختار کامپوزیتی آن ارائه شده است. برای دستیابی به عملکرد ارتعاشی مطلوب، انتخاب بهینه‌ی مواد در هسته و لایه‌های تقویتی تیر ساندویچی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بدین منظور، از میان گزینه‌های بررسی‌شده در بخش مقدمه، ترکیبات مختلفی برای هسته و لایه‌های رویی مورد ارزیابی قرار گرفتند. بر اساس نتایج تحلیلی

است. روش پیشنهادی به‌طور چشمگیری بازده برداشت انرژی را افزایش داده و مسیر تازه‌ای را در توسعه‌ی سامانه‌های تطبیقی BWPB معرفی می‌کند.

مرور انجام‌شده نشان می‌دهد که تحقیقات متعددی در زمینه‌ی پدیده‌ی ارتعاشات ناشی از گردابه (VIV) و کاربرد آن در توربین‌های بادی بدون پره (BWPBs) صورت گرفته است. پژوهش‌های اولیه مانند مطالعات چیزفهم و همکاران [۱] و ویلارنل و همکاران [۲] عمدتاً بر تحلیل دینامیکی و مقایسه‌ی شکل هندسی بلوف‌ها متمرکز بوده‌اند و جنبه‌ی آزمایشگاهی توصیفی داشته‌اند. در مقابل، پژوهش‌های آزادی یزدی [۱۰، ۱۱] و حسنی و ایرانی [۱۲] گام مهمی در حوزه‌ی کنترل و بهینه‌سازی عملکرد این مولدها برداشتند، اما مدل‌های ارائه‌شده در آن‌ها دارای چند محدودیت اساسی بوده است.

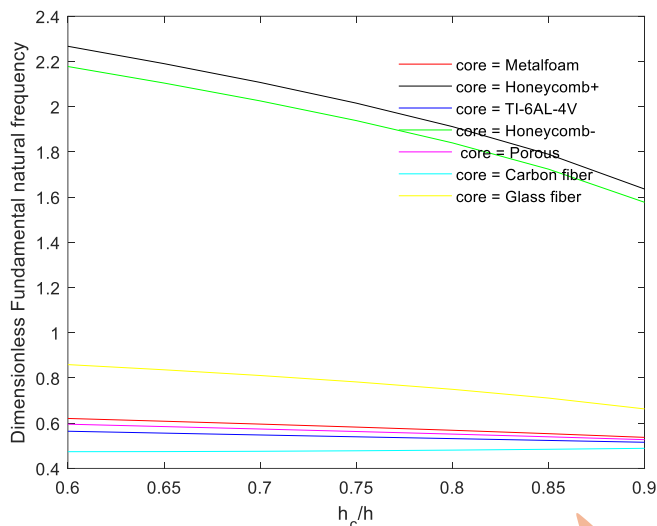
نخست، در اغلب مطالعات پیشین، فرض شده است که خواص مکانیکی سازه یکنواخت و ثابت است و اثر توزیع ناهمگن مواد در راستای ضخامت (مانند GPL یا CNT) بر رفتار ارتعاشی در نظر گرفته نشده است. دوم، بیشتر مدل‌های کنترل، تنها بر تنظیم جرم یا سختی به‌صورت پارامتری تمرکز داشته‌اند و سازوکار تغییر هم‌زمان طول و سفتی تیر در ناحیه‌ی تشدید مورد توجه قرار نگرفته است. سوم، در هیچ‌یک از کارهای پیشین، اثر میرایی ویسکوالاستیک مصالح کامپوزیتی بر بازده انرژی برداشت‌شده به‌صورت هم‌زمان با کنترل بهینه تحلیل نشده است.

بر این اساس، خلأ پژوهشی موجود را می‌توان در قالب زیر بیان کرد:

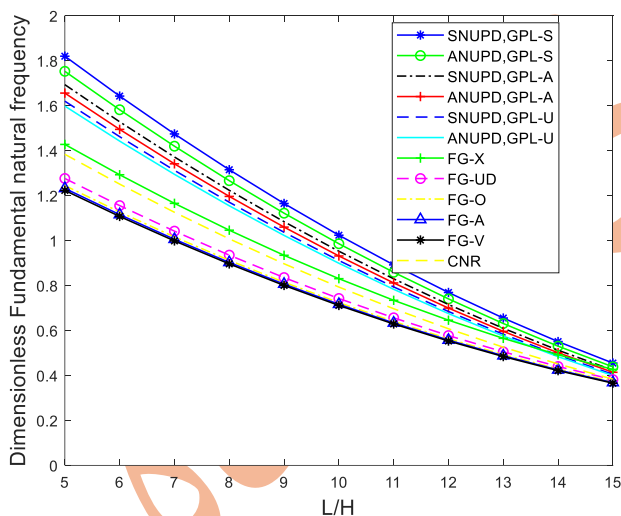
تاکنون مدلی جامع که در آن بهینه‌سازی دینامیکی طول مؤثر راد، توزیع مواد کامپوزیتی (GPL و هسته لانه‌زنبوری)، و میرایی ویسکوالاستیک به‌صورت هم‌زمان و تحت شرایط واقعی تغییرات باد بررسی شود، ارائه نشده است.

بنابراین، ایده‌ی اصلی این پژوهش توسعه‌ی مدلی است که با استفاده از روش کنترل بهینه‌ی مستقیم و غیرمستقیم تلفیقی، بتواند با تغییر لحظه‌ای طول راد، فرکانس طبیعی سازه را با فرکانس ریزش گردابه هم‌تراز نگه دارد و در نتیجه توان برداشت‌شده را بیشینه سازد. این مسیر تحقیق، شکاف میان مدل‌های ساختاری و روش‌های کنترلی موجود را پر کرده و مبنایی برای طراحی نسل جدید مولدهای بادی بدون پره با کارایی بالاتر و پایداری ارتعاشی بهینه فراهم می‌کند.

از منظر طراحی، این توربین‌ها می‌توانند در قالب‌های مختلفی نظیر میله‌ی یک‌سر گیردار، میله‌ی مخروطی یا آرایه‌های چندمیله‌ای ساخته شوند تا بیشترین بازدهی در گستره‌ی متغیر سرعت‌های باد حاصل گردد.



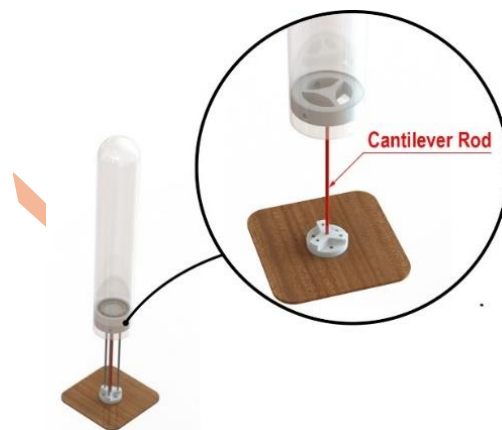
شکل ۳: تاثیر انواع هسته‌ها بر روی فرکانس طبیعی
Figure ۳: Effect of different cores on the natural frequency



شکل ۴: تاثیر انواع تقویت کننده بر روی فرکانس طبیعی
Figure ۴: Effect of different reinforcements on the natural frequency

همان‌گونه که در شکل ۲ شماتیک کلی مولدهای بادی بدون پره نشان داده شده است، این پژوهش به کنترل بهینه‌ی ارتعاشات میله‌ی اصلی (راد) در این سامانه‌ها می‌پردازد. در ادامه، مدل‌سازی دینامیکی تیر و معرفی ساختار کامپوزیتی آن ارائه شده است. برای دستیابی به عملکرد ارتعاشی مطلوب، انتخاب بهینه‌ی مواد در هسته و لایه‌های تقویتی تیر ساندویچی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

و شبیه‌سازی‌های انجام‌شده که در شکل‌های ۳ و ۴ نمایش داده شده‌اند، هسته‌ی لانه‌زنبوری با نسبت پواسون مثبت به‌عنوان گزینه‌ی بهینه برای بخش مرکزی و نانوصفحات گرافنی (GPL) به‌عنوان مؤثرترین تقویت‌کننده‌ی لایه‌های رویی انتخاب گردیدند. این انتخاب‌ها بر پایه‌ی معیارهایی همچون افزایش سختی ویژه، پایداری دینامیکی، و بهبود پاسخ ارتعاشی در ناحیه‌ی تشدید انجام شده‌اند.



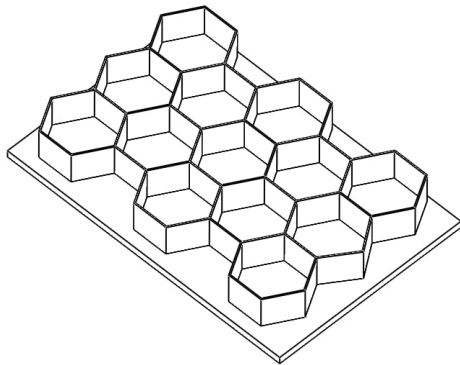
شکل ۲: شماتیک مولد و تیر طره به عنوان راد
Figure ۲: Schematic of the generator and cantilever beam as the rod

۱.۳. اصول عملکرد توربین‌های بادی بدون پره

توربین‌های بادی بدون پره بر پایه‌ی پدیده‌ی ارتعاشات ناشی از گردابه VIV عمل می‌کنند. هنگامی که جریان باد از کنار یک میله‌ی استوانه‌ای یا مخروطی عبور می‌کند، در ناحیه‌ی پشت آن گردابه‌های متناوبی شکل می‌گیرند که موجب اعمال نیروهای آیرودینامیکی نوسانی بر سازه می‌شوند. این نیروها سبب ارتعاش دوره‌ای میله گردیده و در نتیجه، انرژی جنبشی حاصل از این نوسانات قابل استخراج خواهد بود. تبدیل این انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی از طریق مبدل‌های الکترومکانیکی انجام می‌شود که بسته به نوع طراحی، می‌توانند از نوع الکترومغناطیسی، پیزوالکتریک یا الکترواستاتیکی باشند. اجزای اصلی یک توربین بادی بدون پره شامل موارد زیر است:

۱. میله‌ی ارتعاشی به‌عنوان بخش اصلی در معرض جریان باد؛
۲. پایه و سامانه‌ی تکیه‌گاهی برای تثبیت و اعمال شرایط مرزی مناسب؛
۳. سامانه‌ی کنترل و تنظیم برای تغییر سختی مؤثر یا طول میله به‌منظور هم‌زمان‌سازی فرکانس طبیعی با فرکانس ریزش گردابه‌ها؛
۴. واحد برداشت و ذخیره‌سازی انرژی شامل مدارهای یکسوساز و باتری‌ها.

که در آن:
 δ_c (m) ضخامت سلول لانه زنبوری و l_c (m) طول لانه زنبوری و به ترتیب برابر با ۰.۲۵۴ نانومتر و ۱.۸۳۳ نانومتر می‌باشند.



شکل ۵: هسته لانه زنبوری
 Figure ۵: Honeycomb core

در سازه‌های ساندویچی، ضریب پواسون نقش مهمی در رفتار مکانیکی و دینامیکی دارد. در حالت معمول، مواد با ضریب پواسون مثبت در اثر کشش، منقبض می‌شوند، اما مواد با ضریب پواسون منفی (مواد آکستیک) رفتار معکوس دارند و در هنگام کشش، در جهت عرضی نیز منبسط می‌شوند. این ویژگی باعث افزایش سختی خمشی و ظرفیت جذب انرژی می‌گردد. به‌ویژه، استفاده از هسته‌ی لانه‌زنبوری با ضریب پواسون منفی موجب بهبود پایداری ارتعاشی و افزایش فرکانس طبیعی سازه می‌شود. در مقابل، هسته‌های با ضریب پواسون مثبت انعطاف‌پذیری بیشتری داشته و تغییر شکل‌های بزرگ‌تری را در ناحیه‌ی تشدید تجربه می‌کنند. بنابراین، انتخاب نوع هسته بر اساس ضریب پواسون آن باید متناسب با هدف طراحی (افزایش سختی یا افزایش دامن‌ی نوسان) صورت گیرد. در زیر به روابط مکانیکی این نوع هسته اشاره شده است:

$$\begin{aligned} \rho^c &= \rho_s \gamma_0 \frac{2 + \phi_0}{2 \cos \theta_0 (\phi_0 - \sin \theta_0)} \\ E_{11}^c &= E_s \gamma_0^3 \frac{1}{(\tan^2 \theta_0 + \gamma_0^2)(\phi_0 - \sin \theta_0) \cos \theta_0} \\ E_{22}^c &= E_s \gamma_0^3 \frac{\phi_0 - \sin \theta_0}{(1 + \gamma_0^2 (\phi_0 \sec^2 \theta_0 + \tan^2 \theta_0)) \cos^3 \theta_0} \quad (۲) \\ \nu_{12}^c &= -\frac{\sin \theta_0 (1 - \gamma_0^2)}{(\gamma_0^2 + \tan^2 \theta_0)(\phi_0 - \sin \theta_0)} \\ \phi_0 &= \frac{h_0}{l_0}, \quad \gamma_0 = \frac{t_0}{l_0} \end{aligned}$$

که در آن، ϕ_0 و γ_0 به ترتیب نسبت ابعادی داخلی و ضخامت بدون بعد سلول هستند، همچنین، هسته‌ی آلومینیومی با خواص

در این راستا، به منظور انتخاب ترکیب بهینه‌ی مواد، ابتدا تأثیر نوع هسته بر رفتار ارتعاشی بررسی گردید. در این مرحله، هسته‌های مختلف شامل فوم فلز (metal foam)، لانه‌زنبوری پلیمری، لانه‌زنبوری آلومینیومی با نسبت پواسون مثبت، تیتانیوم Ti-۶Al-۴V، هسته متخلخل (porous core)، فیبر کربن و فیبر شیشه‌ای مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج تحلیل عددی نشان داد که با افزایش نسبت ضخامت به طول، فرکانس طبیعی کاهش می‌یابد، اما نوع ماده‌ی هسته تأثیر قابل توجهی بر مقدار مطلق آن دارد. به‌ویژه، هسته‌ی لانه‌زنبوری آلومینیومی با نسبت پواسون مثبت به دلیل سختی ویژه‌ی بالا و جذب انرژی مناسب در نوسانات عرضی، بیشترین جابه‌جایی و پایداری ارتعاشی را ایجاد کرده و به عنوان گزینه‌ی نهایی برای بخش مرکزی انتخاب شد.

در گام بعد، تأثیر نوع تقویت‌کننده‌ی لایه‌های رویی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، نانوصفحات گرافنی (GPL) با سه الگوی توزیع مختلف و نیز نانوالیاف کربنی (CNR) تحلیل شدند. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، افزایش نسبت طول به ضخامت موجب کاهش فرکانس طبیعی می‌شود، ولی توزیع بهینه‌ی نانوصفحات گرافنی به‌ویژه در الگوی GPL-S باعث افزایش سختی خمشی و بهبود پاسخ دینامیکی تیر گردیده است.

در نهایت، هدف از این تحلیل‌ها یافتن بهینه‌ترین ترکیب مواد و ابعاد هندسی (به‌ویژه طول مؤثر تیر) بوده است تا فرکانس طبیعی سازه همواره نزدیک به فرکانس ریزش گردابه باقی بماند. بر این اساس، ترکیب هسته‌ی لانه‌زنبوری آلومینیومی به همراه تقویت‌کننده‌ی GPL به عنوان ساختار نهایی بهینه برای طراحی راد انتخاب گردید.

۳.۲. هسته لانه زنبوری با نسبت پواسون مثبت

در این پژوهش، برای بخش هسته‌ی تیر کامپوزیتی، ساختار لانه‌زنبوری با نسبت پواسون مثبت مورد بررسی قرار گرفته است. انتخاب این نوع هسته به دلیل پایداری مکانیکی بالا، جذب انرژی مؤثر، و توزیع یکنواخت تنش در راستای ضخامت انجام شده است. در شکل ۵ این ساختار نشان داده شده است.

$$\begin{aligned} E_c &= \frac{4}{\sqrt{3}} \left(\frac{\delta_c}{l_c} \right)^3 \left[1 - 3 \left(\frac{\delta_c}{l_c} \right) \right] E_0 \\ G_c &= \frac{G_0}{\sqrt{3}} \left(\frac{\delta_c}{l_c} \right)^3 \\ \rho_c &= \frac{8}{3\sqrt{3}} \left(\frac{\delta_c}{l_c} \right) \rho_0 \end{aligned} \quad (۱)$$

شکل ۶: انواع مختلف توزیع صفحه های گرافنی (الف) S-GPL،
(ب) A-GPL و (ج) U-GPL

Figure ۶: Different distributions of graphene plates:
(a) GPL-S, (b) GPL-A, and (c) GPL-U

۳.۳. صحت سنجی:

در گام نخست، نتایج حاصل از پژوهش حاضر با نتایج گزارش شده توسط صفری و همکاران [۱۷] مورد مقایسه قرار گرفته است. ویژگی های هندسی و مکانیکی مدل مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده اند. شایان ذکر است که تحلیل عددی با بهره گیری از نرم افزار MATLAB انجام گرفته است.

جدول ۱: خواص مکانیکی و هندسی

Table ۱: Mechanical and geometric properties

Mechanical properties of the core (Ti-۶Al-۴V)	$\nu_{core} = 0,342,$ $\rho_{core} = 4430 (kg/m^3)$ $E_{core} = 113,8 (GPa)$
Material constants of the composite face sheets	$E_{CNT} = 0,6466 (TPa),$ $\nu_{CNT} = 0,175,$ $\rho_{CNT} = 1400 (kg/m^3)$ $E_m = 2,5 (GPa),$ $V_{CNT}^* = 0,12, \nu_m = 0,3$ $\rho_m = 1190 (kg/m^3)$
Geometric properties	$L = 20 h, \eta_1 = 0,137,$ $\eta_2 = 0,715$

جدول ۲: اعتبارسنجی ۳ فرکانس اول

Table ۲: Validation of the first three frequencies

Mode number	This study	Safari et al.	Error (%)
۱	۰,۱۳۸۳	۰,۱۳۸۴	۰,۰۷
۲	۰,۵۴۵۸	۰,۵۴۰۵	۰,۹۸
۳	۱,۲۰۲۲	۱,۱۸۲۵	۱,۶۶

نتایج به دست آمده از مدل حاضر با نتایج صفری و همکاران [۱۷] مقایسه شده است. اختلاف کمتر از ۲ درصد بین مقادیر عددی نشان دهنده دقت بالای مدل تحلیلی پیشنهادی در پیش بینی رفتار دینامیکی تیر ساندویچی است. بنابراین، روش مدل سازی و پارامترهای به کار رفته از صحت قابل قبولی برخوردارند.

مکانیکی مدول یانگ برابر با ۶۸.۹ GPa و چگالی ۲۸۰۰ kg/m^۳ انتخاب شده است.

در این بخش، به منظور بررسی تأثیر نحوه ی توزیع نانوصفحات گرافنی بر خواص مکانیکی و رفتار ارتعاشی تیر ساندویچی، سه نوع الگوی توزیع مختلف برای تقویت کننده های GPL در راستای ضخامت لایه ها در نظر گرفته شده است. این الگوها عبارتند از: ۱- توزیع یکنواخت (GPL-U^۸): در این حالت، نسبت حجمی نانوصفحات در تمام ضخامت لایه ثابت فرض می شود. ۲- توزیع متقارن (GPL-S^۹): بیشترین غلظت نانوصفحات در نواحی سطحی بوده و به صورت متقارن نسبت به محور میانی ضخامت کاهش می یابد. ۳- توزیع نامتقارن (GPL-A^{۱۰}): تراکم نانوصفحات در یک سمت لایه بیشینه بوده و به تدریج در جهت مقابل کاهش می یابد. که در شکل ۶ نمایش داده شده است.

الگوهای کسر حجمی نانوصفحات گرافنی مطابق با معادله (۳) تعریف شده اند و در محاسبه ی خواص معادل الاستیکی لایه ها به کار رفته اند.

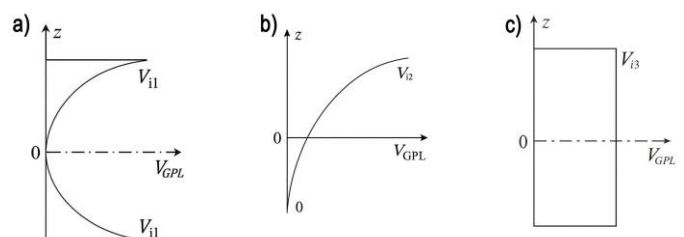
$$V_{GPL} = \begin{cases} V_{i1} \rightarrow GPL-U \\ V_{i2} = [1 - \cos(\frac{\pi(4z+h)}{4h})] \rightarrow GPL-A \\ V_{i3} = [1 - \cos(\frac{\pi z}{h})] \rightarrow GPL-S \end{cases} \quad (3)$$

V_{i1}, V_{i2} و V_{i3} حداکثر مقادیر V_{GPL} هستند که به صورت زیر بدست می آید:

$$\int V_{GPL} [1 - e_m \psi(z)] dz = V_{Total} \int [1 - e_m \psi(z)] dz \quad (4)$$

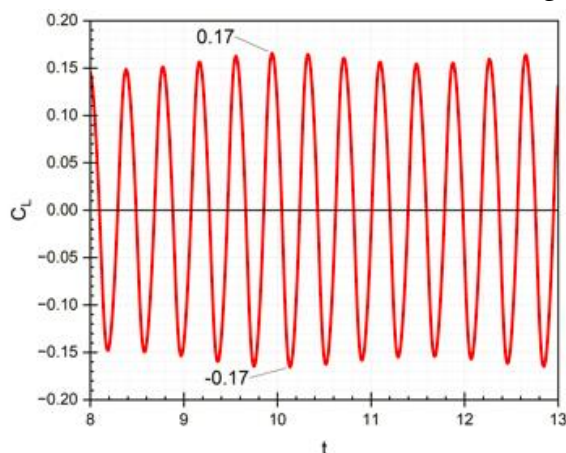
که در آن:

$$V_{Total} = \frac{W_{GPL}}{W_{GPL} + (\rho_{GPL} / \rho_m)(1 - W_{GPL})} \quad (5)$$



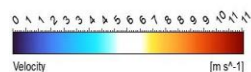
^۸ uniform distribution
^۹ symmetric distribution
^{۱۰} asymmetric distribution

تعریف می‌شود و اثرات ناپایداری جریان، آشفتگی باد، و اندرکنش گردابه‌ها در مرتبه‌ی بالاتر در این مدل لحاظ نشده است. رفتار تیر بر اساس فرضیات تیر کلاسیک اوپلر-برنولی در نظر گرفته شده است، به گونه‌ای که تغییر شکل‌ها کوچک، زاویه دوران کم و رابطه‌ی تنش-کرنش خطی فرض شده است. برای بهینه سازی عملکرد توربین سفتی تیر به صورتی در نظر گرفته شده است که فرکانس طبیعی سازه در محدوده فرکانس تشدید باشد که نمودار سرعت آن در شکل ۸ و کانتور سرعت در شکل ۹ نشان داده شده است:



شکل ۸: ضریب لیفت در سرعت بحرانی

Figure ۸: Lift coefficient at critical speed

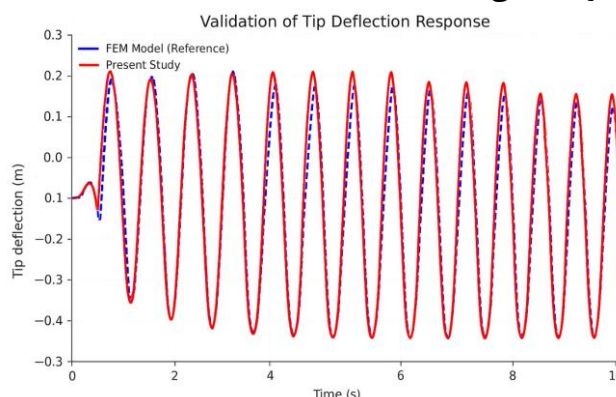


شکل ۹: کانتور سرعت بحرانی

Figure ۹: Critical speed contour

در شکل ۸، تغییرات ضریب برا C_L بر حسب زمان نمایش داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، ضریب برا دارای نوسانات متناوب و پایدار با دامنه‌ی تقریباً ثابت بین ۰.۱۷ و ۰.۱۷- است که بیانگر پدیده‌ی ریزش گردابه‌های متناوب در دو سوی سازه می‌باشد. این نوسانات دوره‌ای نیروی برا باعث تحریک عرضی سازه و ایجاد ارتعاشات منظم در طول زمان می‌شود. پایداری دامنه و تناوب موج‌ها نشان‌دهنده‌ی وضعیت قفل‌شدگی (Lock-in) بین فرکانس طبیعی سازه و فرکانس ریزش گردابه‌ها است که در این حالت، بیشینه‌ی توان ارتعاشی و در نتیجه بیشترین بازده برداشت انرژی حاصل می‌گردد.

برای ارزیابی دقت مدل عددی و اطمینان از صحت روابط به‌کاررفته در تحلیل ارتعاشی، نتایج حاصل از مدل حاضر با داده‌های گزارش‌شده در مرجع [۱] مقایسه گردید. همان گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، تطابق مناسبی بین فرکانس طبیعی به‌دست‌آمده از مدل تحلیلی و نتایج عددی/تجربی مرجع وجود دارد. اختلاف نسبی بین دو مجموعه داده کمتر از ۵٪ بوده که نشان‌دهنده‌ی دقت بالای مدل پیشنهادی در پیش‌بینی رفتار دینامیکی سامانه است.



۳.۴. فرضیات و محدودیت‌های مدل:

در مدل‌سازی دینامیکی، رفتار ارتعاشی راد مولد به صورت یک سیستم یک درجه آزادی (SDOF) در نظر گرفته شده است. این مدل بر پایه‌ی معادله‌ی اوپلر-لاگرانژ و بر اساس فرضیات مدل کلاسیک جرم-فنر-میرایی توسعه یافته است. در این مدل، حرکت عرضی رأس میله به عنوان متغیر حالت اصلی انتخاب شده و نیروهای آیرودینامیکی، میرایی ساختاری و سختی مؤثر سازه در معادلات تعادل لحاظ گردیده‌اند. نیروی برای آیرودینامیکی (F_L) ناشی از پدیده‌ی ریزش گردابه‌ها، بر اساس ضریب برا (C_L) و ویژگی‌های جریان باد شامل چگالی هوا (ρ)، قطر مؤثر استوانه (D) و سرعت باد (U)، به صورت زیر مدل‌سازی شده است، که در آن f_s فرکانس ریزش گردابه است که مطابق رابطه‌ی زیر با عدد استروهال (St) تعریف می‌شود:

$$F_L(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 C_L D L \sin(2\pi f_s t) \quad (6)$$

$$f_s = \frac{U}{D} St$$

$$F_L(y, \dot{y}, t) = m_s \ddot{y} + c \dot{y} + ky$$

که در آن F_L نیروی برا آیرودینامیکی است که بر اساس رابطه‌ی شبهه پایا:

$$F_L(y, \dot{y}, t) = \frac{1}{2} C_L \rho D U \quad (7)$$

سرعت‌های باد بین ۰.۵ تا ۶ متر بر ثانیه انجام شده است و نتایج به‌عنوان مرجع پایه برای ارزیابی بهبود عملکرد در حالت بهینه‌سازی شده مورد استفاده قرار گرفت.

۳.۵. روش کنترلی

در راستای برداشت بالاترین انرژی همواره باید تلاش شود فرکانس طبیعی سازه $(\omega_n = \sqrt{\frac{3EI}{mL^3}})$ و فرکانس ریزش گردابه $(\omega_s = 2\pi S \frac{V}{D})$ نزدیک به هم باشند. لازم به ذکر است جهت جلوگیری از ناپایداری یک حاشیه پایداری برای تطابق فرکانس طبیعی و فرکانس گردابه در هر لحظه در نظر گرفته شده است. برای هم‌راستا کردن فرکانس طبیعی سازه با فرکانس ریزش گردابه، لازم است یکی از پارامترهای مؤثر بر فرکانس طبیعی تغییر یابد، به‌گونه‌ای که بر فرکانس ریزش گردابه تأثیر نگذارد. از آن‌جا که قطر سازه بر ممان اینرسی اثرگذار بوده و تغییر آن موجب تغییر در رفتار آیرودینامیکی جریان می‌شود، این پارامتر ثابت در نظر گرفته شده است. بنابراین، تنها پارامترهای جرم و طول قابلیت تنظیم دارند. در این پژوهش، با بهره‌گیری از مکانیزم معرفی شده در بخش بعد، تغییر طول به‌عنوان راهکار کنترلی انتخاب شده است. به‌منظور تعیین طول بهینه، از روش کنترل بهینه و بهینه‌سازی دینامیکی استفاده گردیده است. هدف از استفاده از بهینه‌سازی دینامیکی به‌دست آوردن مجموعه‌ای از متغیرهای تصمیم‌گیری وابسته به زمان که یک تابع معیار عملکرد را بهینه می‌کند. در اینجا از توابعی آماده در حل مسئله بهینه‌سازی دینامیکی استفاده شده است که توسط سیزنبار و همکارانش [۱۳] ارائه شده است. معیار عملکرد به فرم بولزا یعنی رابطه ۹ می‌باشد.

$$J(u(t), p) = G(x(t_f), p, t_f) + \int_0^{t_f} F(x(t), u(t), p, t) dt \quad (9)$$

در این پژوهش، فرآیند بهینه‌سازی با هدف بیشینه‌سازی توان برداشت‌شده از سازه ارتعاش‌پذیر انجام گرفته است. برای این منظور، مسأله بهینه‌سازی به‌صورت یک مسأله کنترل بهینه غیرخطی (NLP) فرموله شده و با استفاده از الگوریتم درونی تابع fmincon در محیط MATLAB حل گردیده است.

تابع هدف به‌صورت زیر تعریف شد:

$$J = \int_0^T [(P_{\max} - P(t))^2 + \alpha L(t)^2] dt \quad (10)$$

که در آن $P(t)$ توان لحظه‌ای برداشت‌شده، $P_{\max}$ بیشترین توان ممکن در شرایط تشدید، و α وزن جریمه برای تغییرات سریع طول است تا از نوسانات شدید مکانیزم جلوگیری شود.

شکل ۹ الگوی میدان سرعت اطراف میله را در جریان عبوری باد نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در ناحیه‌ی پشت میله، گردابه‌های متناوبی در دو سمت تشکیل شده‌اند که در فواصل منظم از سازه جدا می‌شوند. این پدیده که به ریزش گردابه فون کارمن (Von Kármán Vortex Street) معروف است، موجب ایجاد نیروهای آیرودینامیکی نوسانی در راستای عمود بر جریان می‌شود و عامل اصلی تحریک ارتعاشات عرضی سازه به شمار می‌آید. تغییرات متناوب ناحیه‌های با سرعت بالا (قرمز) و پایین (آبی) نشان‌دهنده‌ی نوسانات فشار در پشت سازه است که به تناوب تغییر علامت داده و در هر چرخه نیروی برای مثبت و منفی ایجاد می‌کند. پایداری و تقارن این الگو تأییدکننده‌ی صحت شبیه‌سازی عددی و وجود وضعیت قفل‌شدگی بین فرکانس ریزش گردابه‌ها و فرکانس طبیعی سازه می‌باشد.

توان برداشت‌شده از طریق میرایی به‌عنوان پارامتر اصلی استخراج انرژی محاسبه می‌شود. برای توان برداشت شده از معادله ۸ استفاده شده است:

$$P_{\text{ham}} = \frac{1}{T_{\text{cyl}}} \int_0^{T_{\text{cyl}}} c_{\text{ham}} \rho U^3 dt \quad (8)$$

این معادله بیانگر سهم انرژی استخراج‌شده از ارتعاشات در هر سیکل کاری است و بر پایه‌ی فرض جریان پایدار و رفتار سینوسی حرکت تدوین شده است. بر اساس این فرضیات، مدل برای بازه‌ی سرعت باد ۲ تا ۱۰ متر بر ثانیه (ناحیه‌ی جریان آرام تا نیمه‌آشفته) معتبر است و در سرعت‌های بالاتر، مدل‌سازی دقیق‌تر آیرودینامیکی و اندرکنش سیال با سازه چنددرجه آزادی مورد نیاز خواهد بود.

توان محاسبه شده برای سرعت‌های مختلف به شرح جدول ۳ است:

جدول ۳: محاسبه توان برای سرعت‌های مختلف
Table ۳: Power calculation for different velocities

Wind velocity (m/s)	Power (w)
۰.۵	۰.۰۲۸۶۴
۱	۰.۴۹۵۱
۲	۰.۰۲۴۶
۳	۰.۰۲۴۶
۴	۰.۰۳۸۶
۵	۰.۰۵۰۵
۶	۰.۰۶۷۴

در جدول ۳، به‌منظور ایجاد یک مبنای مقایسه برای فرآیند بهینه‌سازی، توان برداشت‌شده از مولد در حالتی که طول راد ثابت در نظر گرفته شده، بدون اعمال هیچ‌گونه الگوریتم بهینه‌سازی محاسبه گردید. این بررسی برای محدوده‌ای از

روش حل با چند جمله ای لاگرانژ بر روی المان i ،
 $\xi_i \leq t \leq \xi_{i+1}$ تقریب زده می شود. حال به بیان معادله ی
 پیوستگی که مورد نیاز پس از گسسته سازی رابطه ی ۹ بر روی
 المان های محدود، برای متغیرهای حالت و سایر محدودیت های
 برابری و نابرابری دیگر می باشد، توسط رابطه ی ۱۴ پرداخته
 شده است.

$$\min_{x_{ij}, u_{ij}, \Delta \zeta_i, p} \{G(x(t_f), p, t_f)\}$$

such that

$$x_{i0} - x_0(p) = 0$$

$$r(t_{ik}) = 0 \quad i=1, \dots, NE \quad k=1, \dots, K_x$$

$$x_{i0} - x_{K_x}^{i-1}(\zeta_i) = 0 \quad i=2, \dots, NE$$

$$x_f - x_{K_x}^{NE}(\zeta_{NE+1}) = 0$$

$$u_i^L \leq u_{K_u}^i(\zeta_i) \leq u_i^U \quad i=1, \dots, NE$$

$$u_i^L \leq u_{K_u}^i(\zeta_{i+1}) \leq u_i^U \quad i=1, \dots, NE$$

$$u_{ij}^L \leq u_{K_u}(\tau_j) \leq u_{ij}^U \quad i=1, \dots, NE \quad j=1, \dots, K_u$$

$$x_{ij}^L \leq x_{K_x}(\tau_j) \leq x_{ij}^U \quad i=1, \dots, NE \quad j=1, \dots, K_x$$

$$\Delta \zeta_i^L \leq \Delta \zeta_i \leq \Delta \zeta_i^U \quad i=1, \dots, NE$$

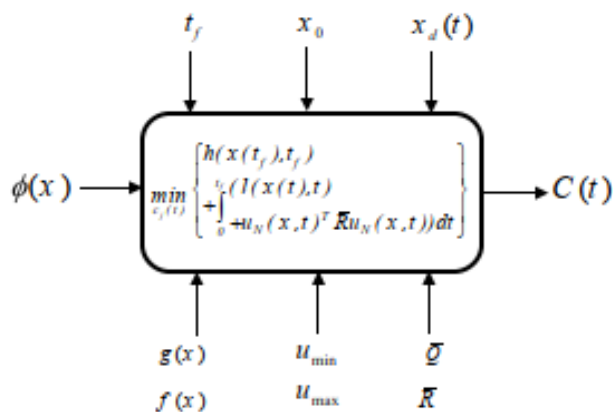
$$p^L \leq p \leq p^U$$

$$\sum_{i=1}^{NE} \Delta \zeta_i = \zeta_{total}$$

$$h(t_{ij}, x_{ij}, u_{ij}, p) = 0$$

$$g(t_{ij}, x_{ij}, u_{ij}, p) \leq 0$$

برای حل این مسئله در متلب، از جعبه ابزار بهینه سازی
 استفاده شده است. این جعبه ابزار شامل چندین برنامه برای
 حل مسائل بهینه سازی است. در این مورد تابع `fmincon`
 انتخاب شده است.



شکل ۱۰: بهینه سازی غیر خطی

Figure ۱۰: Nonlinear optimization

متغیرهای تصمیم شامل طول مؤثر راد $L(t)$ ، ضریب میرایی
 c ، و سختی مؤثر k هستند. پارامترهای ثابت شامل جرم سازه
 m ، چگالی هوا ρ ، ضریب برآ C_L و قطر مؤثر D می باشند.
 قیود مسأله نیز به صورت زیر تعریف شدند:

$$L_{\min} \leq L(t) \leq L_{\max}$$

$$L_{\max} \leq \mathcal{L}_{\lim}$$

$$|y(t)| \leq y_{\max}$$

به منظور جلوگیری از ناپایداری دینامیکی، در هر تکرار عددی
 تطابق بین فرکانس طبیعی و فرکانس ریزش گردابه با شرط زیر
 کنترل شده است:

$$|\omega_n - \omega_s| \leq 0.05 \omega_s$$

نتایج بهینه سازی در قالب تغییرات زمانی طول و توان
 برداشت شده در شکل ۱۰ نمایش داده شده اند که نشان می دهند
 الگوریتم پیشنهادی با تغییر پیوسته طول، شرایط تشدید را
 حفظ کرده و توان خروجی را بهینه می سازد.

به منظور بهینه سازی توان خروجی، یک مسأله کنترل بهینه با
 در نظر گرفتن پارامترهای طراحی (طول، سختی، میرایی) و
 شرایط کنترلی (محدوده جابه جایی، محدوده نیروی محرک، و
 محدودیت های فیزیکی سیستم) فرموله گردید. مدل بهینه سازی
 بر اساس کمینه سازی تابع هدف شامل مجموع خطاها و توان
 تلف شده تحت قیود دینامیکی و فیزیکی اجرا شد. در نهایت،
 فرآیند بهینه سازی به صورت یک مسأله کنترل بهینه غیرخطی
 (NLP) با استفاده از الگوریتم های بهینه سازی عددی
 پیاده سازی گردید که دیاگرام بلوکی آن در شکل ۹ نشان داده
 شده است. لذا مسئله کنترل زیر در نظر گرفته می شود:

$$\min_{u(t), p} \{G(x(t_f), p, t_f)\}$$

$$M \mathcal{X}(t) = f(x(t), u(t), p, t)$$

$$x(t_0) = x_0(p)$$

$$h(x(t), u(t), p, t) = 0$$

$$g(x(t), u(t), p, t) \leq 0$$

$$x(t)^L \leq x(t) \leq x(t)^U$$

$$u(t)^L \leq u(t) \leq u(t)^U$$

$$p^L \leq p \leq p^U$$

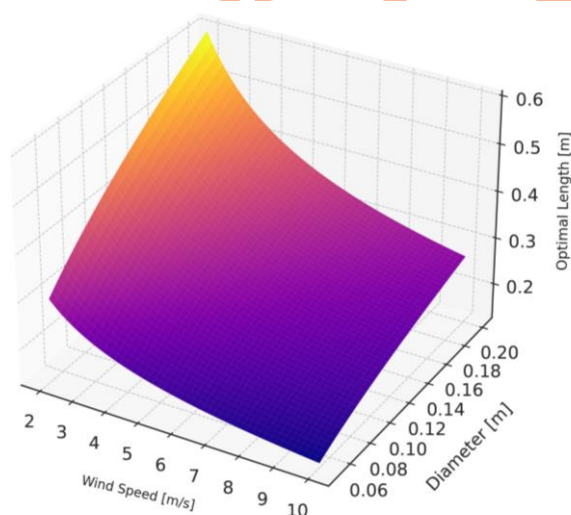
به منظور استخراج مسئله NLP، معادلات دیفرانسیل با استفاده
 از روش کالوکیشن بر روی المان محدود به معادلات جبری
 تبدیل می شوند. سپس معادلات باقی مانده به عنوان
 مجموعه ای از معادلات جبری شکل گرفته و حل می شوند.

این شرایط، اختلاف عددی اندکی میان دو حالت وجود دارد.

در سایر شرایط کاری و به‌ویژه در سرعت‌های بالاتر، اعمال کنترل بهینه‌ی طول موجب افزایش توان برداشت‌شده تا حداکثر حدود ۱۰۰.۰۲ درصد نسبت به حالت پایه شده است. این نتایج بیانگر آن است که تطبیق لحظه‌ای فرکانس طبیعی سازه با فرکانس ریزش گردابه‌ها منجر به بیشینه‌سازی پاسخ ارتعاشی و افزایش بازده انرژی برداشت‌شده از باد می‌شود.

به‌منظور تحلیل جامع‌تر، تأثیر دو پارامتر کلیدی سرعت باد و قطر سازه نیز بر طول بهینه‌ی تیر ارتعاش‌پذیر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌صورت نمودارهای سه‌بعدی ارائه شده‌اند تا امکان تحلیل هم‌زمان اثر این دو متغیر فراهم شود. تأثیر ترکیبی سرعت باد و قطر سازه بر طول بهینه‌ی تیر ارتعاش‌پذیر بر اساس شبیه‌سازی عددی دوبعدی در محیط MATLAB و با استفاده از مدل دینامیکی جرم-فنر-میرایی انجام گرفته است. در این روش، با تغییر هم‌زمان سرعت باد و قطر سازه در بازه‌های تعیین‌شده، فرکانس طبیعی سازه (ω_n) و فرکانس ریزش گردابه (ω_s) محاسبه و طول بهینه‌ی تیر به‌گونه‌ای تعیین شد که نسبت ω_n / ω_s حداقل اختلاف را داشته باشد.

در این تحلیل، طول بهینه به حالتی اطلاق می‌شود که در آن، فرکانس طبیعی سازه با فرکانس برانگیزش گردابه‌ای منطبق یا نزدیک‌ترین مقدار ممکن باشد. این تطابق موجب افزایش دامنه‌ی ارتعاشات و در نتیجه افزایش توان قابل استحصال از جریان باد می‌گردد.



شکل ۱۱: نمودار سه‌بعدی طول بهینه بر حسب سرعت باد و قطر سازه

Figure ۱۱: 3D plot of optimal length versus wind velocity and structure diameter

همان‌گونه که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، خروجی فرآیند بهینه‌سازی در قالب یک کنترل‌کننده‌ی فیدبک غیرخطی (Nonlinear Feedback Controller) به سامانه‌ی برداشت انرژی اعمال شده است. این کنترل‌کننده بر مبنای روش مستقیم در حل مسائل کنترل بهینه طراحی شده و با روش غیرمستقیم مبتنی بر معادلات کوش-همیلتون تلفیق گردیده است. استفاده از این ترکیب، موجب حذف بسیاری از محاسبات پیچیده‌ی عددی موجود در روش‌های کلاسیک و تسهیل در پیاده‌سازی الگوریتم کنترل‌ی شده است. مزیت اصلی این رویکرد در آن است که تغییرات سرعت باد در هر لحظه به‌صورت خودکار در سامانه لحاظ می‌شود؛ به‌گونه‌ای که با افزایش یا کاهش سرعت باد، فرکانس ریزش گردابه نیز تغییر کرده و کنترل‌کننده با تنظیم طول مؤثر راد، فرکانس طبیعی سازه را به‌صورت لحظه‌ای با آن هم‌تراز می‌نماید. بدین ترتیب، سامانه در ناحیه‌ی تشدید کنترل‌شده باقی مانده و بیشینه‌ی توان قابل برداشت حاصل می‌شود.

نتایج عددی نشان می‌دهد که به‌کارگیری این روش کنترل‌ی، توان برداشت‌شده از سامانه را در مقایسه با حالت بدون کنترل، به‌طور میانگین بین ۷۵ تا ۱۲۰ درصد افزایش داده است. جزئیات تغییرات توان و مقادیر بهینه‌ی طول در سرعت‌های مختلف باد در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴: توان برداشت‌شده در حالت بهینه و حالت غیربهینه

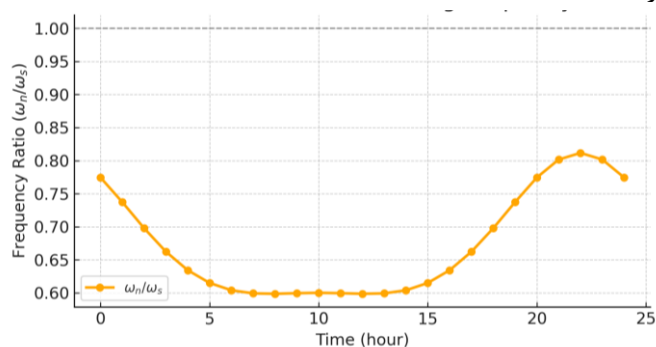
Table ۴: Extracted power in optimal and non-optimal conditions

Wind velocity (m/s)	Power at constant length (w)	Extracted power at optimal length (w)	Percentage increase
۱	۰.۳۴	۰.۶۳	۸۵.۲۹
۲	۱.۶۵	۳.۳۴	۱۰۰.۰۲
۳	۴.۳۲	۷.۶۲	۷۶.۳۹
۴	۱۲.۹۷	۱۳.۱۲	۱.۱۵
۵	۹.۳۷	۱۳.۴۳	۳۰.۲۳

نتایج ارائه‌شده در جدول (۴) نشان می‌دهد که تغییر طول مؤثر راد تأثیر مستقیم بر توان برداشت‌شده از مولد دارد. در حالتی که سرعت باد برابر با ۴ متر بر ثانیه است، مقدار طول بهینه تقریباً برابر با طول ثابت اولیه‌ی راد بوده و توان برداشت‌شده تنها حدود ۱.۱۵ درصد بیشتر از حالت پایه است؛ بنابراین در

شکل ۱۱ نشان می‌دهد که با افزایش سرعت باد، طول بهینه کاهش می‌یابد، در حالی که با افزایش قطر، طول بهینه رشد می‌کند.

شکل ۱۱ نشان می‌دهد که با افزایش سرعت باد، طول بهینه کاهش می‌یابد، در حالی که با افزایش قطر، طول بهینه رشد می‌کند.



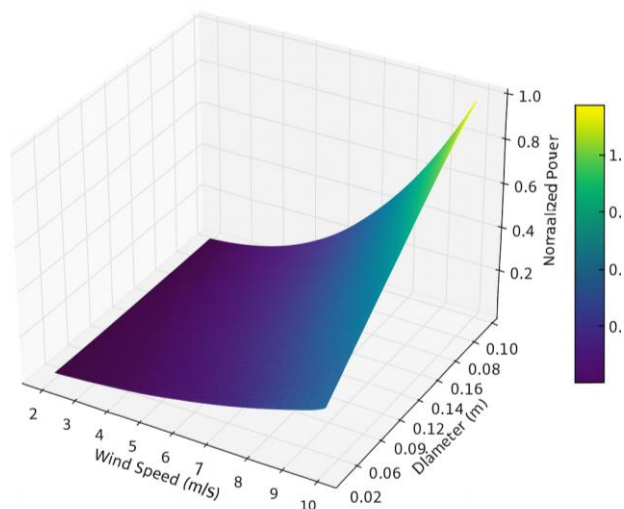
شکل ۱۴: نسبت فرکانس طبیعی سازه به فرکانس ریزش گردابه
Figure ۱۴: Ratio of structural natural frequency to vortex-shedding frequency

شکل ۱۴ نسبت فرکانس طبیعی سازه به فرکانس ریزش گردابه (ω_n / ω_s) نشان می‌دهد که مقدار این نسبت در محدوده‌ی تقریباً ثابت و نزدیک به ۰.۶ باقی مانده است. این امر بیانگر عملکرد مناسب سامانه‌ی کنترل طول راد در هم‌زمان‌سازی نسبی فرکانس‌ها و حفظ سیستم در ناحیه‌ی نیمه‌تشدید است. با افزایش سرعت باد، فرکانس تحریک گردابه‌ای افزایش یافته و طول راد کاهش یافته است تا نسبت فرکانسی در همین بازه‌ی پایدار باقی بماند. پایداری این نسبت در بازه‌ی زمانی ۲۴ ساعته نشان می‌دهد که کنترل‌کننده به‌صورت پیوسته توانسته است با تغییر طول سازه، شرایط ارتعاشی را در محدوده‌ی پیشینه‌ی توان برداشت حفظ کند، هرچند هم‌فرکانسی کامل (نسبت برابر با ۱) حاصل نشده است.

در این پژوهش، مکانیزم تغییر طول راد به‌صورت یک سامانه الکترومکانیکی خطی مجهز به سرووموتور و پیچ بال‌اسکرو طراحی و مدل‌سازی شده است. این مکانیزم قادر است طول مؤثر سازه را در بازه‌ی حدود ۰.۲ تا ۰.۶ متر (معادل تقریباً ۲۰ تا ۳۰ درصد تغییر نسبت به طول اولیه) تنظیم کند. محدوده مذکور بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی (شکل ۱۰) تعیین شده و هدف از آن، حفظ تطابق بین فرکانس طبیعی سازه و فرکانس ریزش گردابه در سرعت‌های مختلف باد است. فرمان تغییر طول در هر لحظه توسط کنترل‌کننده فیدبک غیرخطی تولید شده و مکانیزم تنها در زمان تغییر محسوس سرعت باد فعال می‌شود.

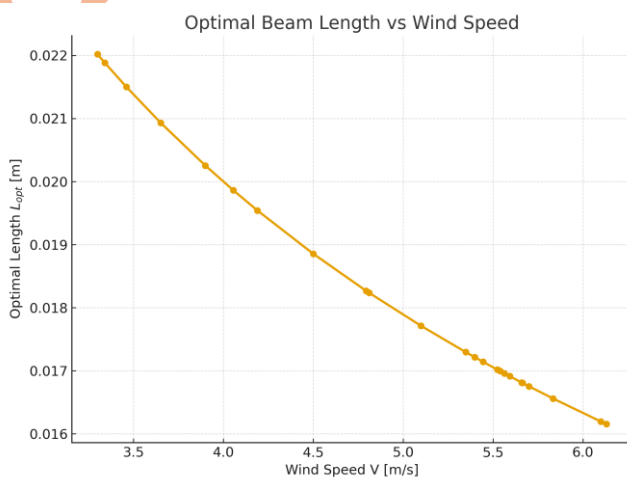
برای ارزیابی عملی بودن این سامانه، توان مصرفی مکانیزم خطی در شرایط واقعی برآورد گردید. فرض می‌شود محرک الکترومکانیکی با توان نامی ۱۰ وات قادر به تغییر طولی معادل ۰.۰۵ متر در مدت زمان ۱ ثانیه باشد. انرژی مصرفی هر سیکل تغییر طول از رابطه ۱۵ محاسبه شد:

$$E_{act} = P_{motor} t = 10 \times 1 = 10J \quad (۱۵)$$



شکل ۱۲: نمودار سه‌بعدی توان استخراجی بر حسب سرعت باد و قطر سازه
Figure ۱۲: ۳D plot of extracted power versus wind velocity and structure diameter

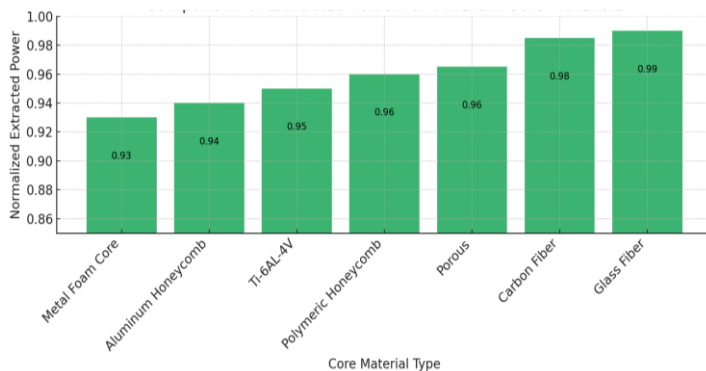
همان‌گونه که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، توان برداشت‌شده از مولد تابعی غیرخطی از سرعت باد و قطر سازه است، به‌طوری‌که نواحی مشخصی از ترکیب این دو پارامتر، عملکرد بهینه‌ی سیستم را نشان می‌دهند.



شکل ۱۳: طول بهینه در برابر سرعت باد

Figure ۱۳: Optimal beam length vs wind speed

در شکل ۱۳ طول بهینه روندی یکنواخت کاهشی دارد؛ علت این رفتار آن است که برای هم‌فاز ماندن با ورتکس‌شدینگ $(\omega_s \propto V)$ باید فرکانس طبیعی سازه همگام شود، لذا افزایش V مستلزم کاهش طول (افزایش سختی مؤثر) است. از دید طراحی، این منحنی مستقیماً پنجره‌ی کاری مکانیزم تغییر طول را تعیین می‌کند: با دانستن بازه‌ی سرعت سایت، می‌توان حدود



شکل ۱۵: توان استخراجی برای جنس های مختلف با احتساب میرایی ویسکوالاستیک

Figure ۱۵: Extracted power for different materials considering viscoelastic damping

در شکل ۱۵، توان استخراج شده نرمال شده برای هسته‌هایی با جنس‌های مختلف بدنه در حضور میرایی ویسکوالاستیک مقایسه شده است. فرض شده است که افزایش میرایی موجب کاهش دامنه نوسان و در نتیجه کاهش توان برداشت شده می‌گردد. همان‌طور که دیده می‌شود، فوم فلزی و هسته‌های لانه‌زنبوری عملکرد ضعیف‌تری نسبت به الیاف کربن و شیشه دارند.

بررسی نتایج عددی نشان می‌دهد که تغییرات مشاهده شده در توان برداشت شده، فرکانس طبیعی و طول بهینه‌ی راد، کاملاً منطبق بر رفتار فیزیکی سیستم تحت اثر پدیده‌ی ریزش گردابه‌ها (VIV) است. با افزایش سرعت باد، فرکانس ریزش گردابه افزایش یافته و در نتیجه برای حفظ شرط هم‌فرکانسی، طول مؤثر سازه باید کاهش یابد تا فرکانس طبیعی افزایش یابد. این رفتار در نمودارهای سه‌بعدی طول بهینه و توان برداشت شده (اشکال ۱۱ و ۱۲) به خوبی دیده می‌شود. از سوی دیگر، در سرعت‌های پایین‌تر، فاصله‌ی فرکانسی بین سازه و گردابه‌ها بیشتر بوده و توان برداشت شده کمتر است، اما با نزدیک شدن این دو فرکانس در ناحیه‌ی تشدید، بیشینه‌ی دامنه‌ی ارتعاش و در نتیجه حداکثر توان قابل استحصال به دست می‌آید. این تحلیل با روابط حاکم دینامیکی مدل جرم-فنر-میرایی (روابط ۶ و ۷) سازگار است و نشان می‌دهد کنترل هم‌زمان طول راد و سختی معادل، کلید دستیابی به بازدهی بالا در توربین‌های بدون پره است.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از روش کنترل بهینه‌ی پیشنهادی موجب افزایش قابل توجه توان برداشت شده از مولدهای بادی بدون پره می‌شود. مقایسه‌ی عددی نتایج با حالت طول ثابت نشان می‌دهد که در سرعت‌های پایین و

درحالی‌که انرژی برداشت شده از ارتعاشات در همان شرایط (برای سرعت باد متوسط ۴ متر بر ثانیه) طبق جدول (۴) حدود ۱۳ ژول برآورد شده است. با در نظر گرفتن اینکه تغییر طول صرفاً در بازه‌های زمانی کوتاه انجام می‌شود، نسبت واقعی انرژی مصرفی مکانیزم به انرژی برداشت شده در طول زمان بهره‌برداری کمتر از ۲ درصد است.

نتایج نشان می‌دهد که مصرف توان مکانیزم در مقایسه با افزایش تا بیش از ۱۰۰ درصدی توان برداشت شده (جدول ۴) کاملاً ناچیز بوده و استفاده از آن از دیدگاه انرژی کاملاً مقرون به صرفه است. در نتیجه، به کارگیری این مکانیزم ضمن حفظ پایداری سازه، سبب هم‌زمانی پیوسته فرکانس طبیعی با فرکانس ریزش گردابه و افزایش چشمگیر بازده برداشت انرژی می‌شود.

در مرحله‌ی نهایی تحلیل، با توجه به اینکه در توربین‌های بادی بدون پره، انرژی از طریق نوسانات بدنه ناشی از پدیده‌ی (VIV) استخراج می‌شود، بررسی رفتار میرایی مصالح سازه‌ای اهمیت ویژه‌ای می‌یابد. میرایی مصالح تأثیر مستقیمی بر پایداری دینامیکی و توان خروجی مؤثر دارد، زیرا بخشی از انرژی ارتعاشی به صورت گرما تلف می‌شود و تنها بخشی از آن به انرژی الکتریکی تبدیل می‌گردد.

برای مدل‌سازی این رفتار، از مدل ویسکوالاستیک به منظور شبیه‌سازی اثر میرایی داخلی مصالح استفاده شده است. این نوع میرایی به زمان و تاریخچه‌ی تغییر شکل وابسته است و به صورت یک پدیده‌ی حافظه‌دار در نظر گرفته می‌شود. یکی از مدل‌های متداول در این زمینه، مدل Kelvin-Voigt است که در عین سادگی، توانایی مناسبی در توصیف رفتار میرایی خطی مواد پلیمری و کامپوزیتی دارد.

در چارچوب این مدل، نیروی مقاوم در برابر تغییر شکل ترکیبی از نیروی الاستیک ناشی از سختی ماده و نیروی ویسکوز وابسته به نرخ تغییر شکل است. بنابراین، معادله‌ی حرکت سیستم با در نظر گرفتن میرایی ویسکوالاستیک به صورت زیر اصلاح می‌شود:

$$f(x,t) = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} m + \frac{\partial^5 y}{\partial^4 x \partial t} \eta + \frac{\partial^4 y}{\partial^4 x} EI \quad (۱۶)$$

در معادله ۱۶، $\frac{\partial^4 y}{\partial^4 x} EI$ سختی خمشی، $\frac{\partial^5 y}{\partial^4 x \partial t}$ میرایی ویسکوالاستیک (وابسته به مشتق زمانی تغییر شکل خمشی)،

$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} m$ نیروی لختی و $f(x,t)$ نیروی تحریک (نیروی حاصل از نوسانات ورتکس) می‌باشد.

۷. Salvador, C.S., Teresa, J.A., Martinez, J.M., Bacasnot, M.C., Orilla, K.V., Cabana, R.J. and Ladaran, W.I., ۲۰۱۷, August. Design and construction of arc shaped and disc shaped pendulum for vortex bladeless wind generator. In *2017 25th International conference on systems engineering (ICSEng)* (pp. ۳۶۳-۳۶۹). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSEng.2017.39>

۸. Francis, S., Umesh, V. and Shivakumar, S., ۲۰۲۱. Design and analysis of vortex bladeless wind turbine. *Materials Today: Proceedings*, 47, pp.۵۵۸۴-۵۵۸۸. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.469>

۹. Franzini, G.R. and Bunzel, L.O., ۲۰۱۸. A numerical investigation on piezoelectric energy harvesting from Vortex-Induced Vibrations with one and two degrees of freedom. *Journal of Fluids and Structures*, 77, pp.۱۹۶-۲۱۲. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2017.12.007>

۱۰. Azadi Yazdi, E., ۲۰۲۰. Optimal control of a broadband vortex-induced vibration energy harvester. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 31(۱), pp.۱۳۷-۱۵۱. <https://doi.org/10.1177/1045389X19888711>

۱۱. Yazdi, E.A., ۲۰۱۸. Nonlinear model predictive control of a vortex-induced vibrations bladeless wind turbine. *Smart Materials and Structures*, 27(۷), p.۰۷۵۰۰۵. <https://doi.org/10.1088/1361-6650/Xaa0b1>

۱۲. Hasani, M. and Rahaghi, M.I., ۲۰۲۲. The optimization of an electromagnetic vibration energy harvester based on developed electromagnetic damping models. *Energy Conversion and Management*, 254, p.۱۱۵۲۷۱. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115271>

۱۳. Mohamed, Z., Soliman, M., Fetea, M. and Saber, E., ۲۰۲۰. A novel optimal design approach for bladeless wind turbines considering mechanical properties of composite materials used. *Scientific Reports*, 15(۱), p.۱۳۵۵. <https://www.nature.com/articles/s41598-024-82380-9>

۱۴. Kang, H., Kook, J., Lee, J. and Kim, Y.K., ۲۰۲۴. A novel small-scale bladeless wind turbine using vortex-induced vibration and a discrete resonance-shifting module. *Applied Sciences*, 14(۱۸), p.۸۲۱۷. <https://doi.org/10.3390/app14188217>

۱۵. Awadallah, M.O., Jiang, C., el Mactar, O. and Hassan, A.A., ۲۰۲۵. Boosting energy harvesting efficiency from wake-induced vibration using a multi-cylinder configuration. *Applied Energy*, 381, p.۱۲۵۱۸۱. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.125181>

۱۶. Breen, J., Mallik, W. and Adhikari, S., ۲۰۲۵. Performance analysis and geometric optimization of bladeless wind turbines using wake oscillator model. *Renewable Energy*, p.۱۲۳۵۴۹. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123549>

۱۷. Safari, M., Mohammadimehr, M. and Ashrafi, H., ۲۰۲۳. Forced vibration of a sandwich Timoshenko beam made of GPLRC and porous core. *Struct. Eng. Mech*, 88(۱), pp.۱-۱۲. <https://doi.org/10.12989/sem.2023.88.1.001>

متوسط باد (۱ تا ۵ متر بر ثانیه)، توان خروجی در مدل بهینه به‌طور میانگین حدود ۵۸ درصد بیشتر از حالت ثابت است. بیشترین افزایش توان در سرعت باد ۲ متر بر ثانیه مشاهده می‌شود که برابر با ۱۰۰ درصد بوده است، در حالی که در سرعت‌های بالاتر، اختلاف کمتر ولی همچنان مثبت باقی مانده است. این نتایج تأیید می‌کند که مکانیزم کنترل طول راد توانایی حفظ سازه در ناحیه‌ی تشدید را دارد و در شرایط ناپایدار باد نیز منجر به پایداری و افزایش بازده می‌شود. از سوی دیگر، ترکیب هسته‌ی لانه‌زنبوری با نسبت پواسون مثبت و لایه‌های تقویت‌شده با GPL موجب بهبود رفتار ارتعاشی و افزایش استحکام ویژه‌ی سازه گردیده است. در مقایسه با تقویت‌کننده‌های CNT، استفاده از GPL ضمن کاهش وزن و هزینه‌ی ساخت، بازده فرکانسی را به میزان تقریبی ۱۰ تا ۱۲ درصد افزایش داده است. از دیدگاه صنعتی، نتایج این تحقیق می‌تواند در طراحی نسل جدیدی از توربین‌های بادی بدون پره با مکانیزم تطبیق‌پذیر مورد استفاده قرار گیرد. چنین سامانه‌هایی در مقیاس کوچک و محیط‌های شهری، بدون نیاز به پره و گیربکس، قادر به برداشت انرژی از بادهای کم‌سرعت هستند و با کنترل بلادرنگ طول مؤثر، پایداری ارتعاشی و دوام سازه‌ای بیشتری نسبت به سامانه‌های متداول خواهند داشت.

مراجع

۱. Chizfahm, A., Yazdi, E.A. and Eghtesad, M., ۲۰۱۸. Dynamic modeling of vortex induced vibration wind turbines. *Renewable Energy*, 121, pp.۶۳۲-۶۴۳. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.038>

۲. Villarreal, D.Y. and SL, V.B., ۲۰۱۸. VIV resonant wind generators. *Vortex Bladeless SL*. DOI: N/A. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.038>

۳. Han, P., De Langre, E., Thompson, M.C., Hourigan, K. and Zhao, J., ۲۰۲۳. Vortex-induced vibration forever even with high structural damping. *Journal of Fluid Mechanics*, 962, p.A۱۳. <https://doi.org/10.1017/jfm.2023.268>

۴. Williamson, C.H.K. and Govardhan, R., ۲۰۰۸. A brief review of recent results in vortex-induced vibrations. *Journal of Wind engineering and industrial Aerodynamics*, 96(۶-۷), pp.۷۱۳-۷۳۵. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2007.06.019>

۵. Bernitsas, M.M., Raghavan, K., Ben-Simon, Y. and Garcia, E.M.H., ۲۰۰۶, January. VIVACE (vortex induced vibration aquatic clean energy): a new concept in generation of clean and renewable energy from fluid flow. In *International conference on offshore mechanics and arctic engineering* (Vol. ۴۷۴۷۰, pp. ۶۱۹-۶۳۷). <https://doi.org/10.1115/1.2907913>

۶. Huque, Z., Zemmouri, F., Lu, H. and Kommalapati, R.R., ۲۰۲۴. Fluid-Structure interaction simulations of wind turbine blades with pointed tips. *Energies*, 17(۵), p.۱۰۹۰. <https://doi.org/10.3390/en17051090>