ISAV2025
پانزدهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات
۳ و ۴ دی‌ماه ۱۴۰۴ تهران - ایران
انجمن آکوستیک و ارتعاشات ایران

تحلیل مودال یک توربین بادی محور عمودی با قابلیت نصب روی تیرهای چراغ شهری

امیرمحمد افسری[آ]، محمد حاجی‌جعفری[ب*]

[آ] ایران، تهران، لویزان، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، دانشجوی کارشناسی ارشد گرایش دینامیک پرواز و کنترل.

[ب] ایران، قزوین، بلوار امام خمینی ره، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین‌زهرا، استادیار.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: *hajijafari@bzte.ac.ir*

چکیده

در این مقاله، امکان تعبیه یک توربین بادی محور عمودی بر روی یک تیر استاندارد چراغ برق شهری مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، توربین بادی محور عمودی به‌صورت یک جرم متمرکز در بالای تیر مدل شده و تحلیل مودال آزاد سازه انجام گرفته است. با هدف ایمن‌سازی سازه در برابر پدیده تشدید دینامیکی، فرکانس‌های طبیعی حاصل از تغییرات جرمی (صفر تا ۶۰ کیلوگرم) و هندسی (دو طول ۹.۳ و ۵ متر) سامانه استخراج و نقاط بحرانی رفتاری شناسایی شده‌اند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که با کاهش طول تیر، فرکانس طبیعی افزایش می‌یابد که حاکی از پایداری دینامیکی بیشتر در تیرهای کوتاه‌تر است. همچنین، افزایش جرم توربین منجر به کاهش فرکانس طبیعی و تمایل سامانه به برانگیخته‌شدن در هماهنگ‌های پایین‌تر می‌شود. این مطالعه نشان می‌دهد که با شناسایی فرکانس‌های طبیعی و اجتناب از هم‌پوشانی آن‌ها با فرکانس‌های تحریک محیطی، می‌توان از خستگی سازه و شکست زودهنگام سازه جلوگیری نمود.

کلمات کلیدی: تحلیل مودال؛ توربین باد محور عمودی؛ طراحی سازه؛ فرکانس طبیعی.

۱- مقدمه

انرژی‌های تجدیدپذیر از منابع تقریباً بی‌پایانی به دست می‌آیند که به طور طبیعی و بدون نیاز به دخالت انسان بازسازی می‌شوند. با توجه به افزایش قابل توجه مصرف انرژی و استفاده گسترده از سوخت‌های فسیلی در عصر حاضر، تلاش‌های متعددی در سراسر جهان برای دستیابی به توسعه کربن کم و انرژی‌های نوین به کار گرفته شده است تا مشکلات مربوط به کمبود انرژی و وابستگی به سوخت‌های فسیلی مرتفع گردد [۱]. در قرن حاضر، نحوه استفاده معقول از انرژی به یکی از مسائل حیاتی در علم مهندسی تبدیل شده است. توربین بادی به عنوان یکی از منابع انرژی پاک، از باد که منبعی رایگان و ارزشمند است برای تولید انرژی استفاده می‌کند. توربین‌های بادی

عمود محور به عنوان یکی از دو نوع اصلی توربین‌های بادی، به دلیل عدم نیاز به جهت‌دهی به باد و قابلیت کارکرد در هر جهت، به‌ویژه در مناطق شهری و مسکونی که صدا و جهت‌دهی باد اهمیت دارند، مناسب هستند. با این حال، محدودیت‌هایی نیز در استفاده از انرژی باد وجود دارد که باید در طراحی و نصب این توربین‌ها مورد توجه قرار گیرد.

یکی از روش‌های نوآورانه برای بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، تبدیل تیرهای چراغ برق به توربین‌های بادی است [۲]. این فناوری امکان بهره‌برداری دوگانه را فراهم می‌آورد: تبدیل انرژی باد به انرژی الکتریکی و استفاده از پایه‌های توربین به عنوان دکل چراغ برق. به‌طور کلی، استفاده از توربین‌های بادی عمود محور در بزرگراه‌ها و مناطق شهری که از جریان هوای ناشی از وسایل نقلیه عبوری بهره می‌برند، به دلیل ساختار ساده و توانایی نصب در فضاهای محدود، برای استفاده در واحدهای تجاری و صنعتی مناسب بوده و به بهره‌وری بیشتری از فضاهای موجود منجر می‌شود [۳].

از چالش‌های اساسی در طراحی توربین‌های بادی، مدیریت بسامد ارتعاشی و خستگی سازه است. ارتعاشات مکرر و نیروهای دینامیکی ناشی از باد می‌توانند به تدریج باعث ایجاد خستگی در اجزای سازه‌ای توربین شوند و در نهایت منجر به شکست آنها گردند [۴]. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که شناخت دقیق بسامدهای طبیعی سازه می‌تواند نقش کلیدی در جلوگیری از خستگی و افزایش عمر سازه داشته باشد [۵]. این اصول در طراحی توربین‌های بادی به کار گرفته می‌شوند تا با تحلیل دقیق الگوهای بارگذاری و رفتار دینامیکی، از وقوع شکست‌های ناشی از خستگی جلوگیری شود و عملکرد بهینه‌ای در شرایط مختلف محیطی حفظ گردد.

نمونه‌هایی از پروژه‌های مختلف که در ساخت توربین‌های باد از تیر چراغ برق استفاده کرده‌اند، اشاره شده است. با این حال، پژوهش خاصی که به تحلیل بسامد ارتعاشی این نوع توربین‌ها پرداخته باشد، وجود ندارد. در این راستا، پژوهش‌های مختلفی برای بهره‌برداری از این ایده انجام شده است. برای نمونه در تحقیق توبیاس تروبنباخر [۶]، چراغ خیابانی بادی طراحی شده است که از روتور ساوونیوس برای تولید انرژی از باد طبیعی و جریان هوای وسایل نقلیه استفاده می‌کند. در تحقیق چنگ-چونگ کو و همکاران با عنوان «سامانه توربین بادی عمود محور بر اساس تیرهای چراغ خیابان برای مناطق شهری»، طراحی و عملکرد توربین‌های بادی عمود محور متصل به تیرهای چراغ خیابان بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که این روش می‌تواند به بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی کمک کند و همچنین در کاهش هزینه‌های انرژی شهری مؤثر باشد [۷].

در مطالعه‌ای توسط یانگ و همکاران، رفتار توربین‌های بادی با تحلیل مودال بررسی شده است. این تحقیق نشان می‌دهد که شناخت دقیق بسامدهای طبیعی سازه می‌تواند به بهبود طراحی توربین‌ها و کاهش خستگی قطعات کمک کند. نتایج نشان می‌دهد که با مدل‌سازی دقیق ارتعاشات، می‌توان عمر مفید توربین‌ها را افزایش داد و از آسیب‌های احتمالی جلوگیری کرد [۸]. در مقاله جانسون و همکاران با عنوان «تحلیل مودال تیرهای چراغ برق برای بهبود طراحی سازه‌ای»، تحلیل مودال تیرهای چراغ برق مورد بررسی قرار گرفته است. این تحقیق با استفاده از روش‌های عددی به شبیه‌سازی بسامدهای طبیعی و مدهای ارتعاشی تیرها پرداخته و نتایج آن نشان می‌دهند که تحلیل مودال می‌تواند به بهبود طراحی تیرهای چراغ برق کمک کند و تأثیرات بارگذاری محیطی را به طور مؤثری کاهش دهد [۹]. در پژوهشی که محمدجواد مغربی و همکاران انجام داده‌اند، به بررسی امکان استفاده از توربین بادی داریوس چهار پره برای استخراج انرژی از جریان باد ناشی از حرکت خودروها در بزرگراه‌ها پرداخته‌اند. نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار فلوئنت نشان می‌دهد که این توربین قادر است تا ۷۷/۶۱ وات توان تولید کند که این میزان، برای استفاده در بزرگراه‌ها مناسب ارزیابی شده است [۱۰].

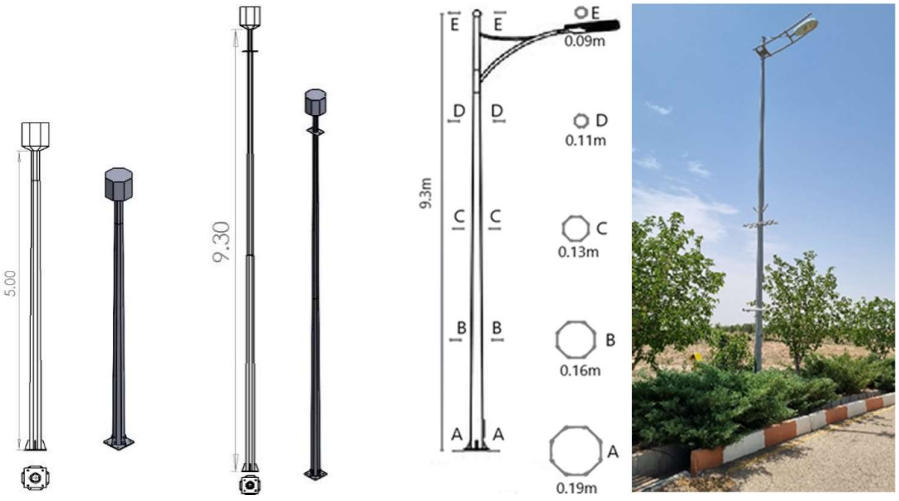
برای کاهش هزینه‌های ساخت و صرفه‌جویی در فضای اشغالی، تیرهای چراغ برق چندوجهی با استانداردهای موجود[۱]، گزینه مناسبی برای تبدیل به توربین بادی هستند. این تیرها نه‌تنها به عنوان پایه توربین عمل می‌کنند، بلکه با بهره‌گیری از مواد و استانداردهای موجود، هزینه‌های ساخت را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهند. بررسی‌های دقیق نشان می‌دهد که این تیرها از نظر ایمنی و تحمل بار برای نصب توربین بادی مناسب هستند. در این پژوهش، یک تیر هشت‌ضلعی مخروطی خیابانی[۲] به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده و قرار است تحلیل مودال روی آن انجام شود تا امکان تبدیل آن به یک توربین بادی عمود محور ارزیابی گردد.

[۱] DIN 2440-2441

[۲] Octagonal Tapered Pole

۲- شرح کار

در این پژوهش، هندسه پایه برج توربین بادی مورد بررسی قرار گرفته و از تیرهای چراغ برق بزرگراهی به عنوان پایه استفاده شده است. طول تیر در هندسه ۱ برابر ۹،۳ متر و در هندسه ۲ برابر ۵ متر در نظر گرفته شده و شکل مقطع آن به‌صورت هشت‌وجهی طراحی شده است. پایه تیر از قطعات ۵ متری تشکیل شده که به‌صورت هم‌پوشان در داخل یکدیگر قرار گرفته و سازه نهایی را تشکیل می‌دهند. مدل سه‌بعدی سازه تیر در نرم‌افزار ترسیم و تحلیل شده است. نمای جانبی تیر چراغ و نمودار مدل هندسی ساده‌شده در شکل (۱-الف) ارائه شده است. تجهیزات توربین و تیغه‌ها به‌صورت جرم متمرکز در نظر گرفته شده‌اند تا تحلیل‌ها با دقت بیشتری انجام شود.



ب) طرح ۱ و طرح ۲ الف) نمای واقعی و هندسه

شکل۱. مشخصات تیر چراغ

روش کار شامل تحلیل مودال تیر در دو هندسه مختلف است. با استخراج فرکانس‌های طبیعی، امکان بررسی ریسک رزونانس با فرکانس‌های تحریک ناشی از باد (با استفاده از روابط استاندارد) فراهم می‌شود. در این راستا، از فرمول‌های زیر برای تخمین فرکانس تحریک باد استفاده شده است.

سرعت باد بحرانی ، سرعتی است که در آن ارتعاشات ناشی از باد ممکن است با بسامد طبیعی برج تداخل کرده و باعث تشدید ارتعاشات شود. فرمول محاسبه سرعت باد بحرانی در فرمول (۱) آورده شده است.[۴]

$$V_{cr} = \frac{f_n . D}{St} \qquad (۱)$$

$$St = 0.198(1 - \frac{19.7}{R_e}) \qquad (۲)$$

که در آن V_{cr} سرعت باد بحرانی$(\mathrm{m/s})$، f_n فرکانس طبیعی سازه (Hz)، D قطر مشخصه سازه(m) و St عدد استروهال.

برای تیر یک سرگیردار[۳] بسامد طبیعی بصورت فرمول شماره (۳) محاسبه می‌گردد.[۹]

$$f_n = \frac{K_n}{2\pi}\sqrt{\frac{EI}{\rho A L^4}} \qquad (۳)$$

[۳] cantilever beam

که در آن f_n فرکانس طبیعی مود n (Hz)، K_n ضریب وابسته به شماره مود (برای مود اول ≈ ۱.۸۷۵)، E مدول یانگ (Pa)، I ممان اینرسی سطح مقطع (m^4)، ρ چگالی (kg/m^3)، A سطح مقطع (m^2) و L طول تیر (m).

بسامد غالب باد یا بسامد توربولانس[۴] باد در یک مکان خاص، ممکن است با بسامد طبیعی سازه تداخل کند. این بسامد غالب باد به‌طور معمول از تحلیل ویژگی‌های جریان باد و شرایط محیطی با استفاده از فرمول شماره (۴) تعیین می‌شود.[۴]

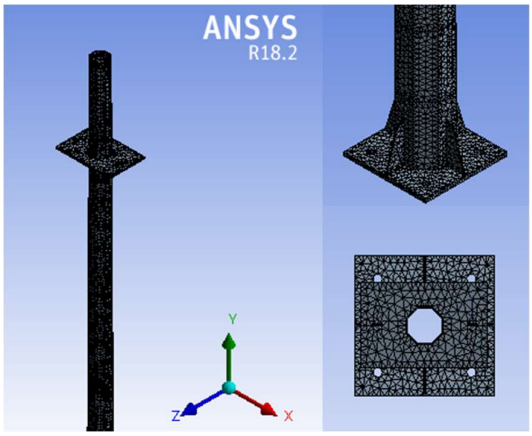
$$f_{wind} = \frac{V}{L_t} \tag{۴}$$

همچنین می‌توان از رابطه (۵) بین بسامد طبیعی سازه و عدد استروهال[۵] استفاده کرد:

$$f_{wind} = \frac{V}{D} \cdot St \tag{۵}$$

که در آن $\boldsymbol{f_{wind}}$ فرکانس توربولانس باد (Hz)، $\boldsymbol{V}$ سرعت باد (m/s) و $\boldsymbol{L_t}$ طول مشخصه (قطر سازه) بر حسب (m).

در مرحله اول، فرکانس‌های تشدید باد در منطقه (بوئین‌زهرا) که تیر قرار است نصب شود، به دست آمده است. سپس، فرکانس‌های طبیعی تیر چراغ برق برای وزن‌های مختلف بررسی شده و در نهایت، فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مود این سازه محاسبه شده است. رفتار دینامیکی برج توربین بادی با استفاده از دکل‌های چراغ برق خیابانی و تحلیل مودال بررسی می‌شود. پدیده تشدید می‌تواند منجر به افزایش دامنه ارتعاشات و خرابی سازه گردد. این تحلیل کمک می‌کند تا فرکانس‌های طبیعی برج توربین باد شناسایی شده و از طراحی‌هایی که ممکن است باعث ایجاد تشدید شوند، اجتناب گردد. برای انجام تحلیل مودال، مدل سه‌بعدی تیر چراغ برق ایجاد می‌شود. برای تعیین شرایط مرزی مناسب، شرایط اتصال تیر به زمین مدل‌سازی شده است. خصوصیات مکانیکی مواد سازنده تیر که از جنس فولاد است، در نرم‌افزار وارد می‌گردد و مدل به عناصر کوچک‌تری به نام مش تقسیم‌بندی می‌شود تا تحلیل با دقت بیشتری انجام شود. نمونه‌ای از این مش در شکل ۲ ارائه شده است.



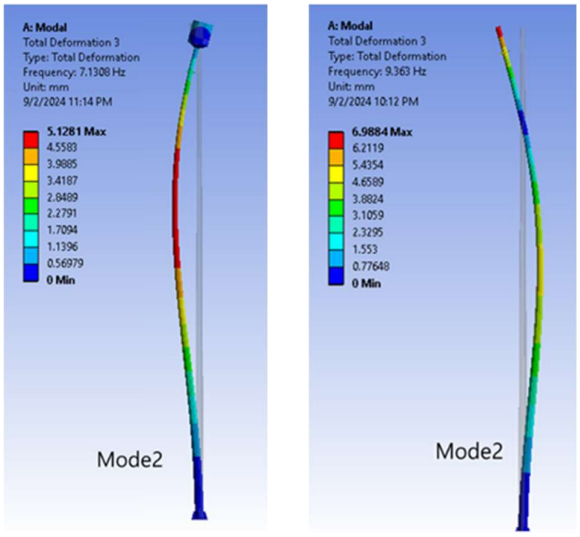
شکل۲. مش‌بندی سازه

[۴] Turbulence

[۵] ST

۳- نتایج

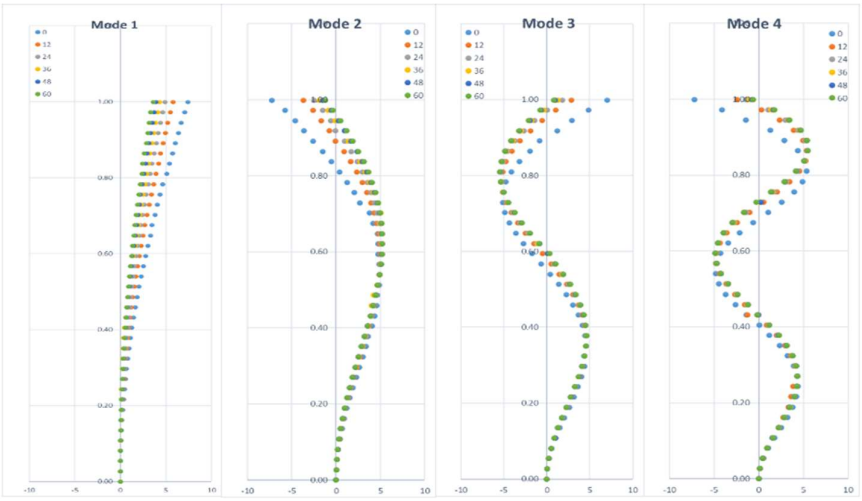
در این بخش به نتایج بدست آمده پرداخته شده است. این نتایج شامل محاسبات تأثیر وزن، تحلیل مودهای ارتعاشی و شکل‌های مود، و همچنین بررسی فرکانس‌های طبیعی برای هندسه‌های مختلف تیر می‌باشد. تحلیل‌ها نشان داد که با افزایش وزن تجهیزات توربین بادی، فرکانس طبیعی سازه کاهش می‌یابد. افزایش وزن به دلیل افزایش جرم متمرکز در بالای تیر چراغ برق، منجر به کاهش فرکانس طبیعی سامانه می‌شود. فرکانس‌های طبیعی در مودهای اولیه پایین‌تر هستند و با افزایش شماره مود، فرکانس‌ها افزایش می‌یابند. نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل مودال در این پژوهش با نتایج تجربی و عددی ارائه‌شده در مقاله [۱۱] توسط دژاردن و همکاران مورد مقایسه قرار گرفت. این مقاله به دلیل همانندی در نوع سازه (تیرهای چراغ برق یک‌سرگیردار) و شرایط مرزی مشابه، به‌عنوان مرجع اعتبارسنجی انتخاب شد. مقایسه فرکانس‌های طبیعی نشان می‌دهد که خطای نسبی نتایج این تحقیق در محدوده کمتر از ۱٪ قرار دارد که گواهی بر دقت بالای مدل‌سازی و تحلیل انجام‌شده است.



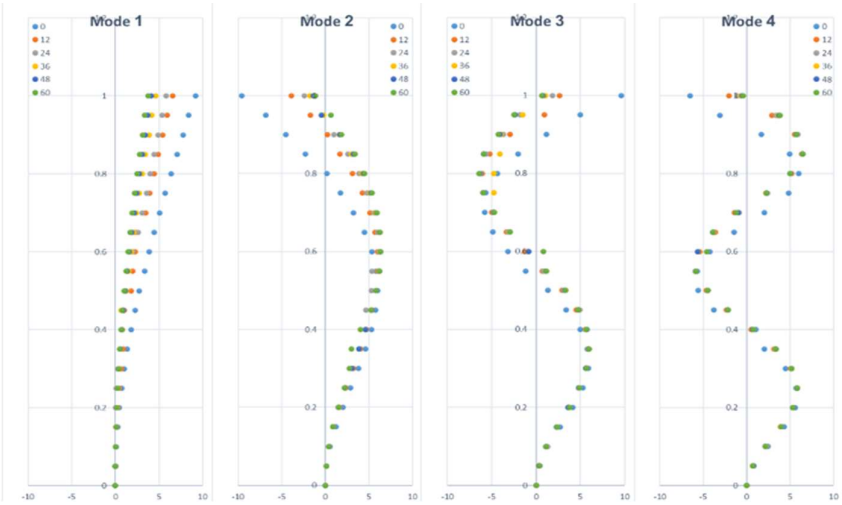
الف) بدون جرم متمرکز **ب) با جرم متمرکز**

شکل ۳. شکل مود دوم برای هندسه ۱

بررسی تصاویر مودها نشان داد که در مودهای اولیه، بیشترین تغییرشکل نسبی در بخش‌های بالایی تیر چراغ برق رخ می‌دهد. این نقاط به عنوان مناطق مستعد برای خستگی و شکست شناسایی شدند و تقویت آن‌ها می‌تواند به افزایش عمر سازه و جلوگیری از خرابی‌های زودهنگام کمک کند. در شکل ۳، شکل مود دوم برای هندسه ۱ به‌صورت کیفی نمایش داده شده است. از آنجا که در تحلیل مودال، جابجایی‌ها بدون واحد و تنها جهت و الگوی ارتعاش را نشان می‌دهند، این نمودارها صرفاً برای شناسایی مناطق حساس و توزیع نیروهای ارتعاشی استفاده می‌شوند. شکل ۴ نیز به‌صورت کیفی، مقایسه شکل مودهای مختلف برای دو هندسه را نشان می‌دهد و اثر وزن توربین بر تغییر شکل مودها را به‌صورت نسبی نمایش می‌دهد.



الف) تأثیر وزن بر شکل مودهای هندسه ۱ (وزن‌های ۰ تا ۶۰ کیلوگرم)



ب) تأثیر وزن بر شکل مودهای هندسه۲ (وزن‌های ۰ تا ۶۰ کیلوگرم)

شکل ۴. نمودار کیفی شکل مود برای دو هندسه

با قرار دادن وزن ۶۰ کیلوگرم در بالای تیر چراغ برق، بسامد طبیعی سازه به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است. کاهش بسامد به دلیل افزایش جرم متمرکز در بالای سازه رخ داده. همچنین، دامنه نوسانات کاهش یافته و پایداری سازه بهبود می‌یابد.
جدول زیر نتایج مودهای ارتعاشی برای تیر چراغ برق با طول ۹.۳ متر و وزن ۶۰ کیلوگرم را نشان می‌دهد:

جدول ۱. نتایج تحلیل مودال هندسه ۱

شماره مود	بسامد طبیعی(Hz)		
	وزن صفر	وزن ۳۶ کیلوگرم	وزن ۶۰ کیلوگرم
۱	۱٫۹۶	۱٫۱۴	۰٫۹۴
۲	۹٫۳۷	۷٫۳۵	۷٫۱۳
۳	۲۴٫۶۹	۲۰٫۸۷	۲۰٫۶
۴	۴۷٫۹۰	۴۱٫۶۵	۴۱٫۳۱

جدول ۲. نتایج تحلیل مودال هندسه۲

شماره مود	بسامد طبیعی(Hz)		
	وزن صفر	وزن ۳۶ کیلوگرم	وزن ۶۰ کیلوگرم
۱	۷٫۵۴	۳٫۶۹	۳٫۰
۲	۳۹٫۶۵	۲۹٫۰۸	۲۸٫۳۹
۳	۱۰۴٫۰۸	۸۵٫۵۸	۸۴٫۸۵
۴	۱۹۷٫۰۳	۱۷۱٫۴۱	۱۷۰٫۶۹

نتایج نشان می‌دهد که با کاهش طول تیر، فرکانس طبیعی سازه افزایش می‌یابد. این امر باعث می‌شود فاصله فرکانسی سازه از محدوده فرکانس‌های تحریک ناشی از باد بیشتر شود و در نتیجه، ریسک وقوع پدیده تشدید (رزونانس) کاهش یابد. از این رو، تیرهای کوتاه‌تر از دیدگاه دینامیک سازه، پایداری بهتری در برابر بارهای دینامیکی ناشی از باد دارند. در مقابل، در هندسه ۱ (تیر بلندتر)، فرکانس طبیعی پایین‌تری مشاهده شده است که نزدیک‌تر بودن آن به فرکانس‌های تحریک محیطی، نیازمند بررسی دقیق‌تر برای جلوگیری از رزونانس است. همچنین، نتایج تحلیل مودال نشان می‌دهد که با افزایش وزن تجهیزات، فرکانس طبیعی در تمام مودها کاهش می‌یابد. این رفتار اهمیت دقت در انتخاب وزن و طراحی تجهیزات را برجسته می‌کند، زیرا جرم بیشتر می‌تواند سازه را به محدوده فرکانس‌های بحرانی نزدیک‌تر کند و خطر رزونانس را افزایش دهد.

٤- نتیجه‌گیری

در این مقاله، امکان استفاده از یک تیر چراغ برق استاندارد در دو هندسه مختلف (با طول‌های ۹.۳ و ۵ متر) به‌عنوان پایه یک توربین بادی محور عمودی مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، توربین به‌صورت یک جرم متمرکز در نوک تیر مدل‌سازی شد و تنها تحلیل مودال آزاد انجام گرفت. نتایج نشان داد که افزایش وزن توربین می‌تواند بسامدهای طبیعی سامانه را به‌طور چشم‌گیری کاهش داده و سامانه را به هماهنگ‌های پایین‌تر سوق دهد. همچنین، با کاهش طول تیر، فرکانس طبیعی افزایش می‌یابد، که نشان‌دهنده پایداری بهتر تیرهای کوتاه‌تر در برابر پدیده تشدید است. یکی از محدودیت‌های این پژوهش، مدل‌سازی توربین بدون در نظر گرفتن جزئیات کامل آن است که ممکن است منجر به جابجایی برخی از بسامدهای طبیعی سامانه گردد. با افزودن این جزئیات در مطالعات آینده می‌توان به درکی واقع‌گرایانه‌تر از رفتار این سامانه در شرایط وزش باد دست یافت.

مراجع

1. International Renewable Energy Agency (IRENA)., 2019, Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050.
2. Handri A. and Nadwan M.A., 2022, Design of a hybrid wind-solar street lighting system to power LED lights on highway poles.
3. Zakaria H.N. and M.S. Hossain Lipu., 2023, Vertical Axis Wind Turbine on Highway Application in Bangladesh: Design and Performance Assessment.
4. Meng Z. and Yang W., 2023, Wind-Induced Vibration and Vibration Suppression of High-Mast Light Poles with Spiral Helical Strakes.
5. Dexter R.J. and Ricker M., 2003, Natural Frequencies of Wind Turbine Structures and Their Impact on Fatigue Life.

6. Tobias Trübenbacher., 2021, PAPILIO: A Self-Sufficient Street Light Generating Energy from Wind.
7. Cheng-Chung Ko ،Chia-Hsiu Chen and Yao-Tsung Lee., 2019, Street Light-Based Vertical Axis Wind Turbine System for Urban Areas.
8. Yang L., Zhu W., Peng Z., and Yan Z., 2013, Modal analysis and vibration testing of wind turbineblades.
9. A. Johnson, B. Smith, et al., 2024, Modal Analysis of Streetlight Poles for Improved Structural Design.
۱۰. محمدجواد مغربی، صادق تودرباری، ۱۳۹۸، تحلیل عددی عملکرد توربین بادی داریوس چهار پره در بزرگراه ، هجدهمین کنفرانس دینامیک شاره ها، دانشگاه فردوسی مشهد.
11. McGinn, D., Desjardins, S., & Poitras, G. J., 2018, Modal Analysis and Damping of Bridge Light Poles.