



## طراحی و ساخت یک توربین بادی بدون پره و بررسی تأثیر پارامترهای سازه‌ای بر رفتار ارتعاشی آن

سید احمد فخر الحسینی<sup>۱</sup>، مصطفی اسماعیلی<sup>۲\*</sup>، امیرحسین ربیعی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> ایران، تهران، دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی و مهندسی، ۱۴۹۱۱-۱۵۷۱۹، کارشناسی ارشد

<sup>۲</sup> ایران، تهران، دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی و مهندسی، ۱۴۹۱۱-۱۵۷۱۹، دانشیار

<sup>۳</sup> ایران، اراک، دانشگاه صنعتی اراک، دانشکده مکانیک، ۳۸۱۸۱۴۶۷۶۳، دانشیار.

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: [m.esmaeili@khu.ac.ir](mailto:m.esmaeili@khu.ac.ir)

### چکیده

با توجه به رشد روزافزون جمعیت و نیاز به انرژی پایدار، استفاده از منابع تجدیدپذیر مانند انرژی بادی به عنوان جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی مورد توجه قرار گرفته است. توربین‌های بادی بدون پره به دلیل ساختار ساده، هزینه‌های نگهداری کمتر و کاهش اثرات زیست‌محیطی، به عنوان یک فناوری نوین در تولید انرژی بادی مطرح هستند. در این مقاله، به طراحی، ساخت و آزمایش یک نمونه توربین بادی بدون پره با قابلیت تغییر پارامترهای ساختاری شامل ارتفاع، قطر میله و وزن پرداخته شده است. ابتدا مدل‌سازی دینامیکی این توربین با استفاده از معادلات حرکت یک پاندول معکوس انجام شد. سپس، آزمایشات تجربی در فواصل مختلف از منبع جریان هوا و با پارامترهای متغیر ارتفاع و قطر میله و اضافه کردن وزنه انجام گرفت تا تأثیر این عوامل بر فرکانس طبیعی و دامنه ارتعاشات توربین مورد بررسی قرار گیرد. نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع میله، فرکانس طبیعی کاهش یافته و رفتار دینامیکی سازه تغییر می‌کند. به طور مثال، برای میله‌ای با قطر ۸ میلی‌متر، افزایش ارتفاع از ۳۰ به ۵۰ سانتی‌متر، منجر به کاهش ۴۳.۵۷ درصدی فرکانس طبیعی شد. همچنین اضافه کردن وزنه به سازه توربین، ناحیه قفل‌شدگی و دامنه ارتعاشات را تحت تأثیر قرار داد.

**کلمات کلیدی:** توربین بادی بدون پره؛ ارتعاشات ناشی از جریان؛ ارتعاشات ناشی از ریزش گردابه؛ تطابق فرکانسی.

### ۱- مقدمه

با رشد سریع جمعیت و افزایش تقاضای انرژی، بشر با چالش‌های جدی در زمینه تأمین پایدار انرژی مواجه شده است. از طرفی، منابع انرژی فسیلی محدود بوده و مصرف بی‌رویه آن‌ها منجر به آلودگی‌های زیست‌محیطی، گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی می‌شود. در نتیجه، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند باد، خورشید و آب به عنوان گزینه‌های پایدار و پاک اهمیت یافته است. انرژی بادی، به دلیل در دسترس بودن و عدم تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی، به یکی از پرکاربردترین منابع انرژی تجدیدپذیر تبدیل

شده است. با این حال، توربین‌های بادی مرسوم با پره‌های چرخان، اگرچه کارآمد هستند، اما دارای معایبی همچون هزینه‌های بالای ساخت، نگهداری و خطرات ایمنی به‌ویژه برای پرندگان و محیط‌زیست می‌باشند.

در سال‌های اخیر، توجه محققان به طراحی توربین‌های بادی بدون پره جلب شده است که به جای استفاده از پره‌های دوار، از ارتعاشات القایی ناشی از جریان هوا برای تولید انرژی استفاده می‌کنند. این نوع توربین‌ها علاوه بر ساختار ساده‌تر، آلودگی صوتی و خطرات زیست‌محیطی کمتری دارند و هزینه‌های نصب و بهره‌برداری آن‌ها نسبت به توربین‌های سنتی پایین‌تر است. بطور مثال، هاشمی‌نژاد و همکاران [۱] گزارش کرده‌اند که برداشت انرژی از ارتعاشات ناشی از گردابه زمانی قابل توجه است که فرکانس ریزش گردابه نزدیک به فرکانس طبیعی سازه باشد. فرکانس ریزش گردابه برای اجسام با مقطع دایره‌ای به صورت خطی به سرعت جریان آزاد باد بستگی دارد. بیشاپ و حسن [۲] مشاهده کرده‌اند که انحراف سرعت باد از سرعتی که با پدیده قفل‌شدگی مطابقت دارد سبب می‌شود که برداشت انرژی به میزان قابل توجهی کاهش یابد. چیزفهم و همکاران [۳] دریافتند که تولید انرژی از نیروی ارتعاشات ناشی از ریزش گردابه به‌طور کلی و به‌طور خاص، تنها در یک باند باریک از سرعت باد قابل توجه است و برداشت انرژی از ارتعاشات ناشی از ریزش گردابه، خارج از منطقه قفل‌شدگی بسیار کاهش می‌یابد. زمانیان و همکاران [۴] با مدل‌سازی یک توربین بادی، دامنه و بازه سرعت جریان منطقه قفل‌شدگی را محاسبه و عوامل مختلف بر این ناحیه را مورد بررسی قرار دادند. کلوگر و همکاران [۵] پارامترهای هندسی سازه برای دستیابی به حداقل سرعت باد برای قفل‌شدگی و افزایش دامنه ارتعاشات ناشی از ریزش گردابه در سرعت بالای باد و به حداقل رساندن نوسان دامنه برای سرعت‌های مختلف باد را بررسی کردند. یانگ و همکاران [۶] ارتعاشات ناشی از ریزش گردابه در اطراف سازه‌های صاف با مقاطع مربع، مستطیل، مثلث و D شکل را مقایسه کردند. دینگ و همکاران [۷] از شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی دوبعدی ناپایدار برای مطالعه تولید انرژی یک استوانه با اشکال مقطع مختلف از جمله مقاطع مربع، دوزنقه، Q شکل و مثلثی استفاده کردند. فرانسیس و همکاران [۸] یک نمونه توربین بادی با متریال مختلف فایبرگلس و فیبرکربن مدل‌سازی کردند. ژانگ و همکاران [۹] با استفاده از کنترلر حلقه بسته PID و حسگرهای سرعت‌سنجی ذرات و اندازه‌گیری لیزری ارتعاشات به کنترل ارتعاشات استوانه به‌صورت آزمایشگاهی پرداخت. دای و همکاران [۱۰] گزارش کرده‌اند که راندمان قابل برداشت از بار مقاومتی ثابت بسیار کم است، به گونه‌ای که در مطالعات مختلف بازده معمولاً کمتر از ۵٪ برای این روش گزارش شده است. یزدی [۱۱] یک تکنیک کنترل پیش‌بینی مدل غیرخطی که صرفاً هدف آن به حداکثر رساندن توان خروجی یک برداشت‌کننده انرژی ارتعاشات ناشی از ریزش گردابه را پیشنهاد داد.

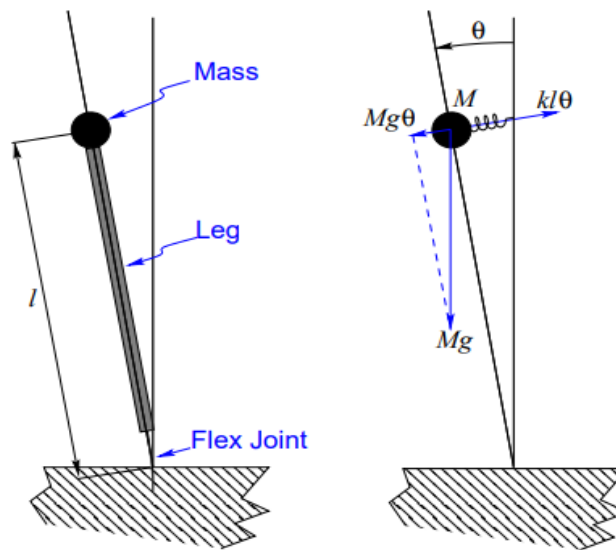
پژوهش حاضر به بررسی تاثیر پارامترهای مختلف ساختاری از جمله ارتفاع و قطر میله در توربین‌های بدون پره بر فرکانس طبیعی و دامنه ارتعاشات آن‌ها می‌پردازد. همچنین، تاثیر اضافه کردن وزنه به ساختار توربین به منظور بهبود کارایی و کنترل رفتار ارتعاشی آن مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف اصلی، ارائه یک طراحی بهینه برای توربین‌های بادی بدون پره است که بتواند در شرایط مختلف، عملکرد پایداری داشته باشد و به عنوان یک راهکار جدید در تولید انرژی پاک مورد استفاده قرار گیرد.

## ۲- مدل سازی ریاضی

در این مقاله به طراحی و ساخت یک نمونه از توربین‌های بادی بدون پره و ثبت داده‌های خروجی آن شامل دامنه ارتعاش‌ها و سرعت باد متناسب آن پرداخته شده است. هدف اصلی این پژوهش ساخت یک نمونه از توربین بادی بدون پره، مورد آزمایش قراردادن آن و بهینه‌سازی عملکرد آن است. مقالات بسیاری به روش‌های مختلف به بررسی ارتعاش ناشی از ریزش گردابه پیرامون بدنه‌های مختلف پرداخته‌اند؛ اما داده‌های آزمایشگاهی پیرامون این موضوع بسیار کم است در این پروژه باتوجه‌به هندسه‌های مختلف موجود، از ابعاد هندسه زمانیان و همکاران [۴] استفاده شده است و باتوجه‌به عوامل مؤثر بر فرکانس طبیعی سازه توربین بگونه‌ای طراحی شده است که پارامترهای مختلف مؤثر، قابل تغییر باشد و مقدار تأثیر هر کدام در تغییر فرکانس طبیعی توربین و ماکسیمم دامنه ارتعاش مورد بررسی قرار گیرد. باتوجه‌به مفاهیم اولیه ارتعاشات، معادله فرکانس طبیعی پاندول ساده به‌صورت زیر است.

$$\omega_0^2 = g/l \quad (1)$$

که در آن جرم نقشی ندارد؛ اما سازه توربین بادی بدون پره به‌صورت پاندول معکوس است که عامل نیروی الاسیته میله تعادل توربین را حفظ می‌کند؛ بنابراین معادل‌سازی پاندول معکوس در شکل ۱ ملاحظه می‌شود.



شکل ۱. مدل سازی ساده پاندول معکوس

باتوجه به مدل سازی پاندول معکوس، فرکانس طبیعی به صورت زیر به دست می‌آید.

$$F_{perp} = +Mg \sin \theta \xrightarrow{\sin \theta \approx \theta} F_{perp} = Mg\theta \quad (2)$$

$$F_{spring} = -kx = -k \ell \theta \quad (3)$$

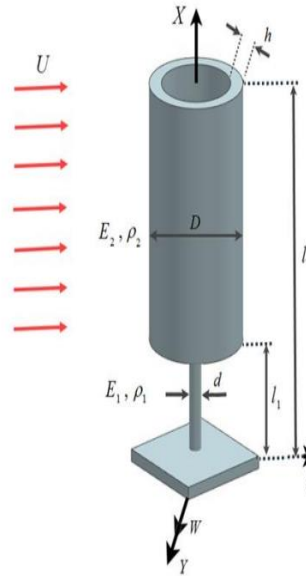
$$M\ddot{X} = F_{perp} + F_{spring} \quad (4)$$

$$M\ell\ddot{\theta} = Mg\theta - k\ell\theta \quad (5)$$

$$\ddot{\theta} + \omega_0^2\theta = 0 \quad (6)$$

$$\omega_0^2 = \frac{k}{M} - \frac{g}{\ell} \quad (7)$$

باتوجه به رابطه به دست آمده،  $\omega_0$  فرکانس طبیعی سازه،  $k$  ضریب سختی الایسته میله،  $M$  جرم پاندول معکوس،  $g$  شتاب گرانش زمین و  $\ell$  ارتفاع مرکز جرم تا تکیه‌گاه است؛ بنابراین مشخص می‌شود که فرکانس طبیعی توربین به ضریب سختی الایسته میله، ارتفاع و جرم سازه وابسته است. لذا توربین بگونه ای طراحی شده است که بتوان تأثیر این پارامترها را مقایسه نمود. در شکل ۲ مدلسازی توربین بادی بدون پره زمانیان و همکاران [۴] مشاهده می‌شود. با استفاده از این مدلسازی و برای اینکه توربین قادر به تغییر عوامل مؤثر بر فرکانس طبیعی یعنی ارتفاع، جرم و ضریب سختی الایسته میله باشد، مستلزم این است که طراحی توربین در یکی از نرم افزارهای طراحی مهندسی، طراحی شود. در نتیجه توربین مطابق ابعاد ارائه شده در مرجع [۴] طراحی و سپس ساخته شده است.



شکل ۲. شماتیک هندسه زمانیان و همکاران [۴]

### ۳- ستاپ آزمایشگاهی

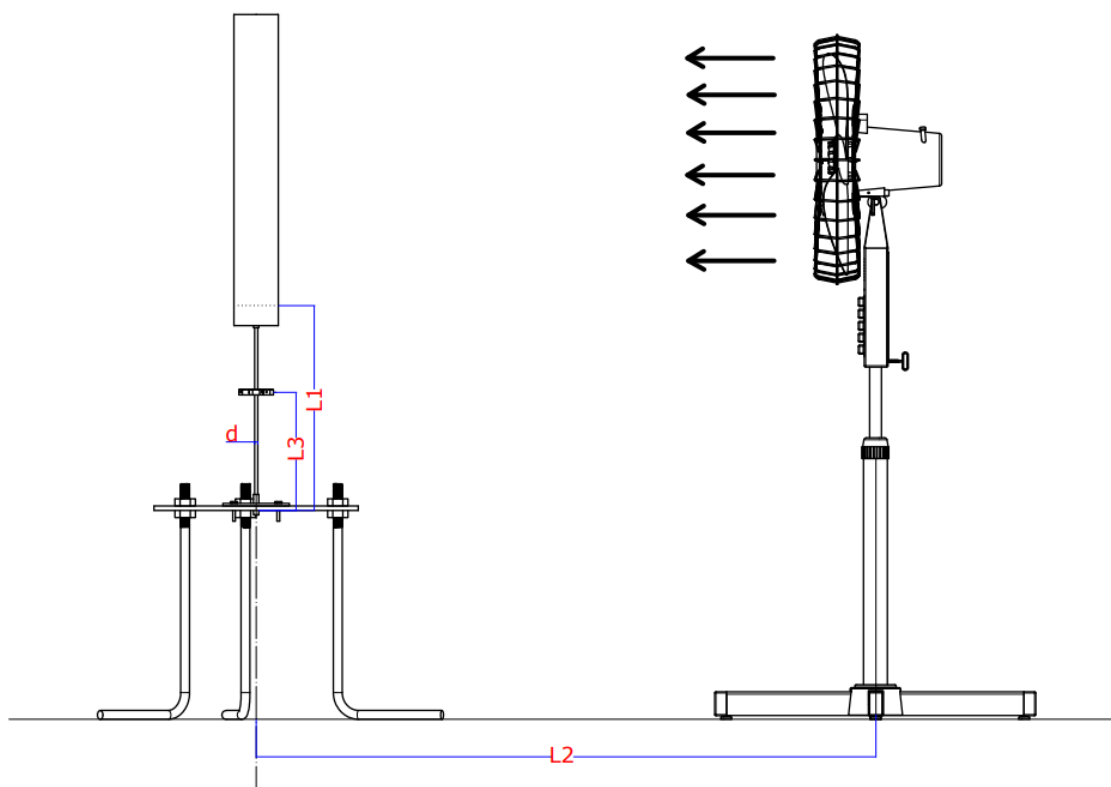
در این پژوهش، برای بررسی عملکرد توربین بادی بدون پره و مطابق مطالب بیان شده در بخش مدل‌سازی، یک ستاپ آزمایشگاهی دقیق طراحی و اجرا شد. این ستاپ شامل یک نمونه توربین بادی بدون پره با بدنه استوانه‌ای از جنس آلومینیوم، تجهیزات داده‌برداری، و سیستم اندازه‌گیری سرعت جریان هوا بود. توربین به گونه‌ای طراحی شده که قابلیت تغییر پارامترهایی مانند ارتفاع، قطر و وزن میله را دارد تا تاثیر این پارامترها بر فرکانس طبیعی و دامنه ارتعاشات بررسی شود. بدنه اصلی توربین از جنس آلومینیوم و با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر طراحی شده است. میله اصلی توربین از دو نوع با قطرهای ۷ میلی‌متر و ۸ میلی‌متر ساخته شده است و برای بررسی اثر پارامترهای مختلف، می‌توان ارتفاع این میله‌ها را بین ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متر تغییر داد. برای اندازه‌گیری داده‌ها، از سنسورهای MPU6050 که شامل حسگرهای شتاب‌سنج وژیروسکوپ هستند، استفاده شده است. این سنسورها به یک برد آردوینو متصل شده و داده‌های مربوط به ارتعاشات سازه را جمع‌آوری می‌کنند. در سیستم داده‌برداری، از یک سیستم مبتنی بر آردوینو استفاده شده که امکان ذخیره‌سازی و تحلیل داده‌ها را فراهم می‌کند. برای ایجاد جریان هوای ثابت و یکنواخت، از یک فن ۵۵ وات استفاده شده که جریان هوایی با سرعت ۴.۱ متر بر ثانیه تولید می‌کند. آزمایشات در فواصل مختلف از ۱۱۰ تا ۳۹۰ سانتی‌متر از فن انجام شده و اثر تغییر فاصله بر دامنه ارتعاشات بررسی شده است. همچنین، اثر اضافه کردن وزنه ۱۷۰ گرمی (تقریباً ۲۰ درصد وزن توربین) در ارتفاع‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته و نشان داده شد که اضافه شدن وزنه به میله اصلی توربین منجر به تغییر فرکانس طبیعی و افزایش یا کاهش دامنه ارتعاشات می‌شود. این ستاپ در فضایی به ابعاد ۳×۷×۲ متر بدون جریان خارجی و در محیط آزمایشگاهی کنترل‌شده اجرا شد تا تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد توربین بادی بدون پره به‌طور دقیق مورد بررسی قرار گیرد.

### ۴- پیکره بندی آزمون‌ها

برای تغییر فرکانس طبیعی توربین بادی بدون پره می‌توان سه عامل اصلی ارتفاع سازه (L)، سختی الاستیسیته میله (K)، و وزن توربین (M) را مورد بررسی قرار داد که براین اساس توربین بادی بدون پره طراحی و ساخته شده است. در شکل ۴ شماتیک نحوه انجام آزمایشات آمده است.



شکل ۳. نمای نهایی از توربین بادی بدون پره ساخته شده

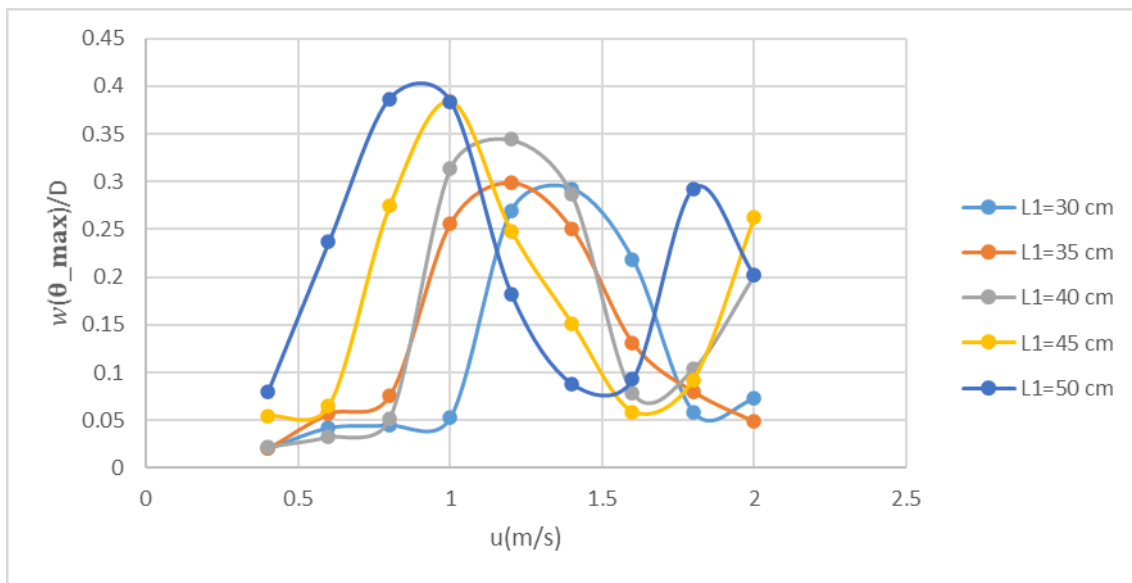


شکل ۴. شماتیک حالت‌های مختلف آزمایش

در این آزمایش‌ها فن در فواصل ۳۹۰، ۳۵۵، ۳۲۰، ۲۸۵، ۲۵۰، ۲۱۵، ۱۸۰، ۱۴۵ و ۱۱۰ سانتی‌متری از توربین قرار گرفته و برای توربین بادی بدون پره با ارتفاع میله‌ی ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵ و ۵۰ سانتی‌متر مورد آزمایش قرار می‌گیرد و داده‌های حاصل با سیستم داده‌برداری ذخیره می‌شوند. از داده‌های به دست آمده ناحیه قفل‌شدگی، ماکسیمم دامنه و سرعت باد دامنه‌ی ماکسیمم به دست می‌آید. برای بررسی اثر سختی الایسته میله از دو میله به قطرهای ۸ و ۷ میلی‌متر استفاده شده است و آزمایشات با ارتفاع‌های گوناگون میله اصلی توربین برای هر دو میله انجام گرفته است که با مقایسه حالت‌های توربین با ارتفاع یکسان میله اصلی اثر سختی الایسته مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای تغییر وزن توربین، وزنه‌ای به جرم ۱۷۰ گرم (معادل با ۲۰ درصد وزن بدنه توربین و میله اصلی) در ارتفاع‌های ۳۵ به توربین اضافه شده است. آزمایشات در فواصل، ۳۵۵، ۳۲۰، ۲۸۵، ۲۵۰، ۲۱۵، ۱۸۰، ۱۴۵ و ۱۱۰ سانتی‌متر از منبع جریان هوا با میله ۸ میلی‌متر و ارتفاع میله‌ی ۴۵ سانتی‌متر و ارتفاع وزنه ۴۰ سانتی‌متری تکرار شده است. از داده‌های به دست آمده ناحیه قفل‌شدگی، ماکسیمم دامنه و سرعت باد دامنه‌ی ماکسیمم به دست می‌آید که با مقایسه آن با توربین با میله ۸ میلی‌متر و ارتفاع ۴۵ سانتی‌متر اثر وزن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

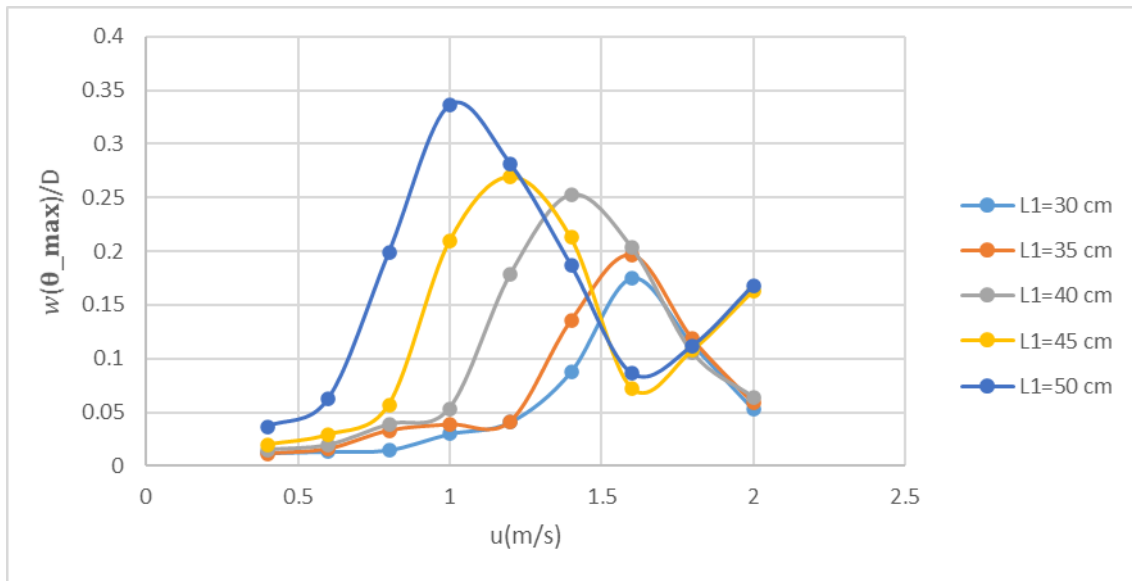
## ۵- بحث و نتایج

در شکل ۵ نمودار مقایسه اثر ارتفاع‌های مختلف توربین با میله‌ی ۷ میلی‌متری آمده است. مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع توربین از ۳۰ سانتی‌متر الی ۵۰ سانتی‌متر، ناحیه قفل‌شدگی در سرعت‌های پایین‌تری رخ می‌دهد و همچنین دامنه‌ی ارتعاشات از ۰.۳ به ۰.۴ افزایش می‌یابد. در حالت‌های توربین با ارتفاع میله‌های ۴۰، ۴۵ و ۵۰ سانتی‌متر در دو بازه قفل‌شدگی رخ داده است.



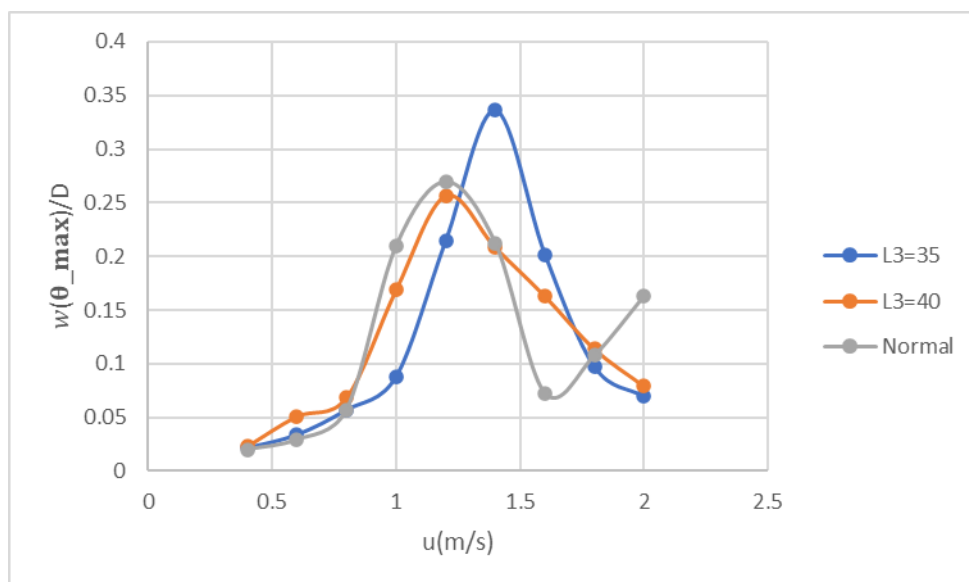
شکل ۵. نمودار مقایسه اثر ارتفاع‌های مختلف توربین با میله ۷ میلی‌متری

در شکل ۶ نمودار مقایسه اثر ارتفاع‌های مختلف توربین با میله‌ی ۸ میلی‌متری آمده است. باتوجه‌به این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع توربین از ۳۰ سانتی‌متر الی ۵۰ سانتی‌متر، ناحیه قفل‌شدگی در سرعت‌های پایین‌تری رخ می‌دهد و همچنین دامنه‌ی ماکسیمم ارتعاشات از ۰.۱۷ به ۰.۳۳ افزایش می‌یابد. در حالت‌های توربین با ارتفاع میله‌های ۴۵ و ۵۰ سانتی‌متر در دو بازه قفل‌شدگی رخ داده است.



شکل ۶. نمودار مقایسه اثر ارتفاع‌های مختلف توربین با میله‌ی ۸ میلی‌متری

در شکل ۷ نمودار مقایسه اثر اضافه نمودن وزنه به توربین با میله‌ی ۸ میلی‌متری و ارتفاع میله ۴۵ سانتی‌متر آمده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که با اضافه شدن وزنه در ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر به توربین با میله ۸ میلی‌متر و ارتفاع میله ۴۵ سانتی‌متر دامنه‌ی ماکسیمم در سرعت یکسان ۱.۲ متر بر ثانیه رخ داده است؛ اما بازه ناحیه قفل‌شدگی حالت با وزنه بیشتر از حالت بدون وزنه آن است. با قرار دادن وزنه در ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر دامنه‌ی ماکسیمم افزایش می‌یابد و در سرعت ۱.۴ متر بر ثانیه رخ می‌دهد.



شکل ۷. نمودار مقایسه اثر اضافه شدن وزنه به توربین با میله‌ی ۸ میلی‌متری و ارتفاع ۴۵ سانتی‌متر

## ۶- جمع‌بندی:

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که طراحی و ساخت توربین بادی بدون پره با قابلیت تغییر پارامترهای سازه‌ای، می‌تواند به طور موثری بر فرکانس طبیعی و دامنه ارتعاشات آن تأثیرگذار باشد. با افزایش ارتفاع میله اصلی توربین، فرکانس طبیعی کاهش یافته و در نتیجه رفتار دینامیکی سازه تغییر می‌کند. به عنوان مثال، با افزایش ارتفاع توربین از ۳۰ سانتی‌متر به ۵۰ سانتی‌متر برای میله‌ای با قطر ۸ میلی‌متر، فرکانس طبیعی به میزان ۴۳.۵۷ درصد و سرعت دامنه‌ی ماکسیمم به میزان ۳۵.۲۹ درصد کاهش یافت. همچنین، برای میله‌ای با قطر ۷ میلی‌متر، افزایش ارتفاع در همین محدوده، منجر به کاهش ۴۳.۶۷ درصدی فرکانس طبیعی و ۳۰.۷۸ درصدی سرعت دامنه‌ی ماکسیمم شد. علاوه بر این، تغییر قطر میله تأثیر بسزایی بر فرکانس طبیعی توربین داشت. کاهش قطر میله از ۸ میلی‌متر به ۷ میلی‌متر، منجر به کاهش ۲۲.۳۶ درصدی فرکانس طبیعی و ۲۰.۹۶ درصدی سرعت دامنه‌ی ماکسیمم شد. این تغییرات نشان می‌دهند که می‌توان با تغییر در ابعاد و قطر میله، توربین را برای دستیابی به دامنه‌های ارتعاشی مطلوب در شرایط مختلف بهینه‌سازی کرد. همچنین، در آزمایشاتی که توربین‌ها دارای فرکانس طبیعی نزدیک به یکدیگر بودند، سرعت دامنه‌ی ماکسیمم نیز در مقادیر مشابهی به دست آمد. این امر نشان‌دهنده‌ی تأثیر مستقیم فرکانس طبیعی بر رفتار ارتعاشی توربین و نقش مهم آن در تعیین سرعت بهینه برای بهینه‌سازی دامنه ارتعاشات است.

## مراجع

- [1] S.M. Hasheminejad, A.H. Rabiee, M. Jarrahi, Semi-active vortex induced vibration control of an elastic elliptical cylinder with energy regeneration capability, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 17 (2017) 1750107.
- [2] R.E.D. Bishop, A. Hassan, The lift and drag forces on a circular cylinder in a flowing fluid, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 277 (1964) 32-50.
- [3] A. Chizfahm, E.A. Yazdi, M. Eghtesad, Dynamic modeling of vortex induced vibration wind turbines, *Renewable Energy*, 121 (2018) 632-643.
- [4] M. Zamanian, L. Garibaldi, Vortex induced vibration analysis of a cylinder mounted on a flexible rod, *Wind and Structures*, 29 (2019) 441-455.
- [5] J. Kluger, F. Moon, R. Rand, Shape optimization of a blunt body Vibro-wind galloping oscillator, *Journal of Fluids and Structures*, 40 (2013) 185-200.
- [6] Y. Yang, L. Zhao, L. Tang, Comparative study of tip cross-sections for efficient galloping energy harvesting, *Applied Physics Letters*, 102 (2013).
- [7] L. Ding, L. Zhang, C. Wu, X. Mao, D. Jiang, Flow induced motion and energy harvesting of bluff bodies with different cross sections, *Energy Conversion and Management*, 91 (2015) 416-426.
- [8] S. Francis, V. Umesh, S. Shivakumar, Design and analysis of vortex bladeless wind turbine, *Materials Today: Proceedings*, 47 (2021) 5584-5588.
- [9] M. Zhang, L. Cheng, Y. Zhou, Closed-loop control of fluid-structure interactions on a flexibly supported cylinder, *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 23 (2004) 189-197.
- [10] H.L. Dai, A. Abdelkefi, Y. Yang, L. Wang, Orientation of bluff body for designing efficient energy harvesters from vortex-induced vibrations, *Applied Physics Letters*, 108 (2016).
- [11] E.A. Yazdi, Nonlinear model predictive control of a vortex-induced vibrations bladeless wind turbine, *Smart Materials and Structures*, 27 (2018) 075005.