



تحلیل دینامیکی ژنراتورهای بادی بدون پره با استفاده از خودتنظیمی مجازی سفتی (SAVS)

سید مجتبی امامت^۱، محسن ایرانی رهقی^{۲*}، عباس لقمان^۳، مهدی محمدی مهر^۴^۱ دانشجوی دکتری مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.^۳ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۹

چکیده

در ژنراتورهای بادی بدون پره^۱، محدود بودن ناحیه قفل‌شدگی میان فرکانس طبیعی سازه و فرکانس جدایش گردابه‌ها، موجب کاهش بازده برداشت انرژی در شرایط تغییرات سرعت باد می‌شود. در این پژوهش، به منظور رفع این محدودیت، مکانیزم تنظیم سفتی مجازی^۲ طراحی و پیاده‌سازی شد که با تغییر طول آزاد میله ارتعاشی، امکان تطبیق بلادرنگ فرکانس طبیعی سازه با فرکانس گردابه‌ها را فراهم می‌کند. مدل سه‌بعدی سامانه در نرم‌افزار سالیدورکس^۳ ایجاد و تحلیل عددی جریان-سازه با روش CFD انجام شد. اعتبارسنجی نتایج با داده‌های آزمایشگاهی لی و همکاران، تطابق مناسبی را نشان داد. یافته‌ها بیانگر آن است که به کارگیری مکانیزم تنظیم سفتی موجب گسترش ناحیه قفل‌شدگی^۴، افزایش دامنه ارتعاش و در نتیجه افزایش محسوس راندمان برداشت انرژی می‌شود. بر اساس نتایج عددی، این مکانیزم در سرعت‌های بالاتر از ۴ متر بر ثانیه می‌تواند بهره‌وری سامانه را تا حدود ۲۰ برابر افزایش دهد، در حالی که در سرعت‌های پایین‌تر نیز بهبود عملکرد قابل توجه ولی با شدت کمتر مشاهده می‌شود. این رویکرد می‌تواند به عنوان راهکاری مؤثر برای ارتقای عملکرد ژنراتورهای بادی بدون پره در شرایط بادهای شهری ایران مطرح شود.

کلمات کلیدی: توربین بادی بدون پره؛ ارتعاشات القایی گردابه (VIV)؛ سفتی مجازی خودتنظیم (SAVS)؛ بهینه‌سازی دینامیکی، شبیه‌سازی سیالاتی.

Dynamic Analysis of Bladeless Wind Power Generators Using Self-Adjustment Virtual Stiffness (SAVS)

S. M. Emamat¹, M. Irani Rahaghi^{2*}, A. Loghman³, M. Mohammadimehr⁴¹ Ph.D. Student, Mech. Eng., Kashan Univ., Kashan, Iran.² Assoc. Prof., Mech. Eng., Kashan Univ., Kashan, Iran.³ Prof., Mech. Eng., Kashan Univ., Kashan, Iran.

Abstract

In bladeless wind power generators, the narrow lock-in region between the natural frequency of the structure and the vortex-shedding frequency significantly limits the energy harvesting efficiency under variable wind conditions. In this study, a stiffness-adjustment mechanism was designed and implemented to overcome this limitation by altering the free length of the oscillating rod, enabling real-time tuning of the natural frequency to match the vortex frequency. A three-dimensional model of the system was developed in SolidWorks, and coupled fluid-structure simulations were performed using the CFD approach in ANSYS Fluent. The numerical model was validated against the experimental results of Lee et al., showing good agreement. The findings indicate that the proposed stiffness-adjustment mechanism effectively expands the lock-in region, increases the oscillation amplitude, and thereby enhances the energy harvesting efficiency. Numerical results revealed that at wind speeds above 4 m/s, the mechanism can improve system performance by up to 20 times, while at lower wind speeds the improvement remains significant though less pronounced. This approach offers a promising solution to improve the performance of bladeless wind generators operating under urban wind conditions in Iran.

Keywords: Bladeless Wind Turbine; Vortex-Induced Vibrations (VIV); Self-Adjustment Virtual Stiffness (SAVS); Dynamic Optimization; Fluid Simulation.

¹ Bladeless Wind Power Generators – BWPG² Self Adjustment Virtual Stiffness – SAVS³ SolidWorks⁴ Lock-in region

به منظور رفع این محدودیت‌ها، نسل جدیدی از مبدل‌های انرژی بادی تحت عنوان ژنراتورهای بادی بدون پره معرفی شده است. این سامانه‌ها بر پایه‌ی پدیده ارتعاشات القایی گردابه عمل می‌کنند؛ به طوری که برخورد جریان باد با سازه استوانه‌ای باعث ایجاد نوسانات منظم شده و این ارتعاشات قابل تبدیل به انرژی الکتریکی هستند [۳]. مزیت اصلی این فناوری، سادگی سازه، کاهش هزینه نگهداری و امکان استفاده در محیط‌های شهری است که محدودیت فضا و مسائل زیست‌محیطی اهمیت بالایی دارند.



شکل ۱- شماتیک کلی یک ژنراتور بادی بدون پره مبتنی بر پدیده ارتعاشات القایی گردابه

با وجود مزایای فوق، یکی از چالش‌های اصلی در بهره‌برداری از BWPB، محدود بودن ناحیه قفل‌شدگی^۱ است. در این ناحیه، فرکانس طبیعی سازه با فرکانس گردابه‌های جریان هم‌پوشانی دارد و بیشترین دامنه ارتعاش حاصل می‌شود. در سرعت‌های خارج از این محدوده، بازده برداشت انرژی به شدت کاهش می‌یابد [۴]. برای رفع این مشکل، پژوهش‌های اخیر به معرفی رویکردهای نوآورانه جهت بهینه‌سازی دینامیکی سازه‌ها پرداخته‌اند.

یکی از امیدوارکننده‌ترین روش‌ها، مفهوم سفتی مجازی خودتنظیم است. در این روش، با متدهای گوناگون، فرکانس طبیعی سازه در حین عملکرد تغییر کرده و امکان همگام‌سازی

Nomenclatur

Description of variables in this research		
Variable	Formula	Description
Y		Cylinder oscillation displacement
v		Cylinder oscillation velocity
m_d	$\frac{\pi}{4} \rho D^2 L$	The displaced fluid mass
$m_{cylinder}$		Mass of cylinder
m_a	$C_a m_d$	Added mass
m_o	$m_a + m_{cylinder}$	Oscillating system mass
f_n	$\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m_{cylinder}}}$	System natural frequency
f_o		Oscillating frequency of the cylinder
f^*	$\frac{f_o}{f_n}$	Frequency ratio
P_{harm}	$\frac{1}{T_{cyl}} \int_0^{T_{cyl}} c \cdot$	Harnessed power
c	$4\pi\zeta m_o f_n$	System damping

۱- مقدمه

رشد روزافزون جمعیت و افزایش تقاضای انرژی، در کنار محدودیت منابع فسیلی و پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از مصرف آن‌ها، توجه جهانی به انرژی‌های تجدیدپذیر را بیش از پیش معطوف ساخته است. در میان این منابع، انرژی بادی به دلیل فراوانی و قابلیت دسترسی گسترده، جایگاه ویژه‌ای دارد [۱]، [۲]. توربین‌های بادی پره‌دار طی چند دهه اخیر به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند؛ با این حال، این سامانه‌ها با چالش‌هایی همچون هزینه بالای نصب و نگهداری، آلودگی صوتی، نیاز به فضای زیاد و حساسیت به تغییرات سرعت باد روبه‌رو هستند.

¹ Lock-in Region

با فرکانس گردابه‌ها در سرعت‌های مختلف باد فراهم می‌شود [۵]. این مکانیزم سبب افزایش دامنه ارتعاش، گسترش بازه سرعت مؤثر و در نتیجه بهبود کارایی برداشت انرژی می‌گردد.

نوآوری و دستاورد اصلی این پژوهش ارائه یک مکانیزم خودتنظیمی سفتی مجازی (SAVS) برای ژنراتورهای بادی بدون پره است که امکان انطباق بلادرنگ فرکانس طبیعی سازه با فرکانس جداشدگی گردابه‌ها را در گستره‌ای وسیع از سرعت‌های باد فراهم می‌کند. در این راستا، یک چارچوب جامع تحلیل کوپل سیال-سازه به‌صورت دوبعدی با بهره‌گیری از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی و شبکه دینامیکی توسعه داده شده است تا پدیده ارتعاشات القایی ناشی از گردابه‌ها با دقت بالا مورد بررسی قرار گیرد. اثر مکانیزم خودتنظیمی سفتی مجازی بر گسترش ناحیه قفل‌شدگی، افزایش دامنه ارتعاش و بهبود بازده برداشت انرژی به‌صورت کمی تحلیل شده و نتایج حاکی از افزایش قابل توجه بازه عملکرد مؤثر سامانه است. همچنین، به‌منظور اطمینان از صحت مدل عددی، نتایج به‌دست‌آمده با داده‌های تجربی معتبر موجود در منابع علمی اعتبارسنجی شده‌اند. در نهایت، قابلیت کاربرد سامانه پیشنهادی در شرایط واقعی باد شهری ایران مورد ارزیابی قرار گرفته و پتانسیل آن برای استفاده در سامانه‌های برداشت انرژی مقیاس کوچک شهری تبیین شده است. شکل ۱ شماتیک کلی یک ژنراتور بادی بدون پره را نشان می‌دهد.

۲- مروری بر مطالعات پیشین

پژوهش در زمینه برداشت انرژی از ارتعاشات جریان، به‌ویژه ارتعاشات القایی گردابه (VIV)، طی دو دهه اخیر توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. ایده استفاده از سازه‌های استوانه‌ای برای تبدیل انرژی جنبشی باد به ارتعاشات مکانیکی و در ادامه تولید برق، نخستین بار در مقیاس آزمایشگاهی مطرح شد و به‌تدریج به سمت توسعه سامانه‌های کاربردی حرکت کرد.

فرانسیس با معرفی مفهوم ژنراتور بادی بدون پره نشان داد که این فناوری بر مبنای ارتعاشات القایی گردابه (VIV) بوده و پتانسیل تبدیل انرژی باد به برق بدون استفاده از پره‌ها را داراست. این رویکرد از نظر محیطی و ساختاری ساده‌تر از

توربین‌های مرسوم معرفی شد [۶]. بهادر و همکاران مکانیزمی مبتنی بر فتر با سفتی متغیر ارائه دادند که به‌صورت پیوسته با تغییر سرعت باد، سفتی ساختار را تنظیم می‌کند تا فرکانس طبیعی سازه با فرکانس گردابه همسو شود. نتایج عددی آن‌ها نشان داد عملکرد این سامانه به‌طور قابل توجهی در سرعت‌های باد بالاتر از یک آستانه مشخص بهتر می‌شود. به‌طوری‌که در سرعت $4/22 \text{ m/s}$ ، توان rms حدود 110.5 mW در مقابل 17 mW سامانه بدون تنظیم سفتی است [۷]. کنگ و همکاران رویکردی نوین با استفاده از مواد هوشمند با سفتی متغیر ارائه دادند. این سیستم دارای حالت‌های سفتی پایین (Low-K) و بالا (High-K) است که بسته به سرعت باد تغییر می‌کند. نتایج تجربی نشان دادند که این سیستم می‌تواند بیش از ۶۰٪ فرکانس ارتعاش طبیعی سازه را تغییر دهد و عملکرد را تا ۱٫۹ برابر در سرعت‌های باد مختلف بهبود ببخشد [۸]. برین و همکاران در زمینه مدل‌سازی دینامیکی VIV در توربین‌های بدون پره با ارائه رویکردهای دقیق عددی کمک شایانی به تحلیل رفتار ارتعاشی این سازه‌ها کرده و ساختار مناسبی برای تحلیل بارگذاری‌های دینامیکی فراهم ساختند [۹]. ورما و همکاران نشان دادند که حتی یک تغییر کوچک در هندسه (محل شکاف روی سیلندر) می‌تواند رفتار جدایش گردابه‌ها را تغییر دهد و باعث شود سیلندر وارد حالتی شود که دامنه نوساناتش چند برابر بزرگ‌تر است. این یعنی برداشت انرژی بیشتر از باد، به‌خصوص در سرعت‌های پایین باد که معمولاً عملکرد سامانه‌های VIV ضعیف‌تر است [۱۰]. ستی و همکاران نشان دادند که اگر یک سیلندر (مانند سازه اصلی BWPG) در یک فضای باریک بین دیواره‌ها قرار گیرد، انرژی برداشت‌شده از ارتعاشات گردابه‌ای می‌تواند به‌طور چشمگیری افزایش یابد. این موضوع در عمل یعنی در شهرها که باد بین ساختمان‌ها و کوچه‌ها جریان دارد، سامانه‌های VIV می‌توانند خیلی کارا تر از محیط باز عمل کنند [۱۱].

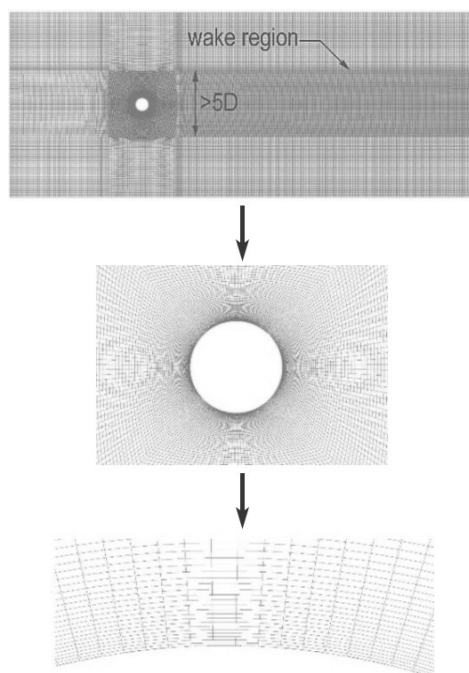
۳- تحلیل عددی

برای تحلیل پدیده ارتعاشات القایی گردابه در ژنراتور بادی بدون پره، از شبیه‌سازی دوبعدی و تحلیل عددی استفاده شد [۱۴]، [۱۳]، [۱۲]. این انتخاب به‌دلیل کاهش هزینه

جدول ۱- بررسی استقلال شبکه برای نسبت دامنه ارتعاش در سرعت باد ۳ متر بر ثانیه

نوع شبکه	تعداد سلول	(A/D)	اختلاف نسبت به شبکه قبلی
شبکه درشت	۴۵,۳۵۶	۰.۲۳۸	—
شبکه متوسط	۷۰,۶۸۶	۰.۲۵	۵.۰۰٪
شبکه ریز	۱۱۰,۷۱۲	۰.۲۵۳	۱.۲۰٪

مطابق شکل ۳، برای گسسته‌سازی، از شبکه ساختاریافته با ریزش‌دگی بالا در نزدیکی سطح استوانه استفاده گردید. ارتفاع اولین لایه شبکه ۰/۰۰۳ برابر قطر دکل تعریف شد تا میدان جریان نزدیک دیواره با دقت کافی حل شود. [۱۶].

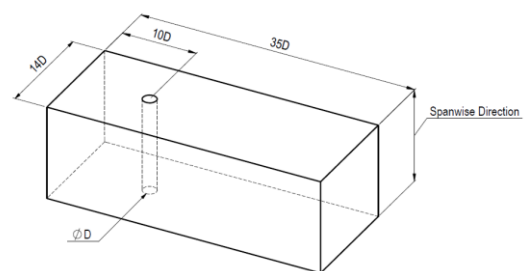


شکل ۳- نمایی از مش ریزی دامنه محاسباتی

الگوریتم حل عددی مسئله در این پژوهش به صورت کوپل سیال-سازه و در قالب یک حل گر زمانی پیاده‌سازی شده است.

محاسباتی و با فرض یکنواختی جریان در راستای طولی^۱ صورت گرفت [۱۵].

شکل ۲، نشانگر نمای شماتیک حجم کنترل شامل یک استوانه ی ارتعاشی با تکیه‌گاه الاستیک است که در مرکز دامنه‌ی محاسباتی قرار داده شد. ابعاد دامنه در بالادست و پایین‌دست به ترتیب ۱۰ و ۲۵ برابر قطر دکل در نظر گرفته شده. در ورودی شرط سرعت یکنواخت، در خروجی شرط فشار ثابت، در سطح استوانه شرط بدون لغزش^۲ و در دیواره‌های بالا و پایین شرط لغزش آزاد^۳ اعمال شد.



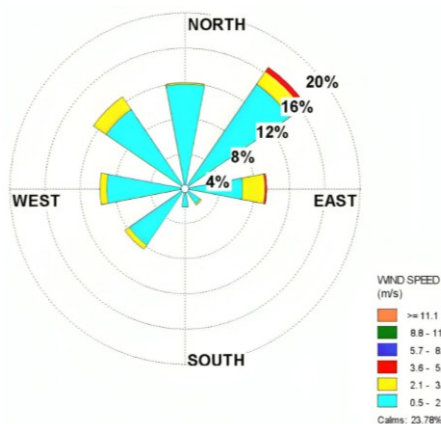
شکل ۲- نمای شماتیک ناحیه ارتعاشات ناشی از گردابه یک استوانه با تکیه‌گاه الاستیکی

به منظور بررسی اثر شبکه محاسباتی بر نتایج شبیه‌سازی، مطالعه استقلال شبکه انجام شد. بدین منظور، سه شبکه با تراکم‌های مختلف شامل شبکه درشت (۴۵,۳۵۶ سلول)، شبکه متوسط (۷۰,۶۸۶ سلول) و شبکه ریز (۱۱۰,۷۱۲ سلول) تولید گردید. معیار مقایسه، نسبت دامنه ارتعاش سازه به قطر استوانه (A/D) در سرعت باد ۳ متر بر ثانیه انتخاب شد. نتایج نشان داد که مقدار A/D برای شبکه درشت، متوسط و ریز به ترتیب برابر با ۰.۲۳۸، ۰.۲۵۰ و ۰.۲۵۳ است. مشاهده می‌شود که با افزایش تراکم شبکه از حالت متوسط به ریز، تغییرات نتایج کمتر از ۲ درصد بوده که نشان‌دهنده همگرایی نتایج و استقلال پاسخ عددی از شبکه محاسباتی است. از این رو، شبکه با ۷۰,۶۸۶ سلول به عنوان شبکه نهایی انتخاب شد که ضمن برخورداری از دقت مناسب، هزینه محاسباتی معقولی نیز دارد. نتایج در قالب جدول ۱ ارائه شده است.

³ Free-slip

¹ Spanwise direction

² No-slip



شکل ۴- گلباد وزش باد منطقه کاشان

۴- مکانیزم و عملکرد سفتی مجازی خودتنظیم

به منظور بهبود عملکرد دینامیکی ژنراتور بادی بدون پره و افزایش بازه قفل شدگی، در این پژوهش از مفهوم سفتی مجازی خودتنظیمی استفاده شده است. در این مکانیزم، سفتی مؤثر سیستم به صورت تطبیقی و بر اساس پاسخ دینامیکی سازه تنظیم می‌شود، به گونه‌ای که فرکانس طبیعی سیستم به طور پیوسته به فرکانس تحریک ناشی از جدادگی گردابه‌ها نزدیک باقی بماند.

سفتی مجازی در این پژوهش به صورت یک پارامتر کنترلی در معادلات حرکت سیستم وارد شده و مقدار آن بر اساس دامنه ارتعاش یا سرعت نسبی تغییر می‌کند. این رویکرد امکان شبیه‌سازی رفتار سیستم‌هایی را فراهم می‌کند که در آن‌ها سفتی سازه می‌تواند به صورت فعال یا نیمه‌فعال تغییر یابد، بدون آنکه نیاز به تغییر فیزیکی مستقیم در خواص ماده باشد. لازم به ذکر است که مفهوم سفتی مجازی پیش‌تر در حوزه‌های کنترل ارتعاشات، سازه‌های هوشمند و سیستم‌های مجهز به عملگرهای فعال و نیمه‌فعال مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال، به کارگیری این مکانیزم در ژنراتورهای بادی بدون پره و در چارچوب بهینه‌سازی دینامیکی پدیده ارتعاشات القایی ناشی از گردابه‌ها، از نوآوری‌های اصلی پژوهش حاضر محسوب می‌شود.

در این مطالعه، مکانیزم سفتی مجازی به صورت عددی و مفهومی پیاده‌سازی شده و هدف اصلی، بررسی پتانسیل این رویکرد در بهبود عملکرد دینامیکی سیستم بوده است. بررسی پیاده‌سازی فیزیکی این مکانیزم در مطالعات آینده انجام خواهد شد.

در گام نخست، میدان جریان اطراف استوانه در حالت پایا و با سرعت ورودی مشخص حل می‌شود تا شرایط اولیه مناسبی برای تحلیل ناپایا فراهم گردد. سپس شبیه‌سازی ناپایا با در نظر گرفتن مش دینامیکی آغاز شده و در هر گام زمانی، معادلات حاکم بر جریان سیال با استفاده از الگوریتم SIMPLEC حل می‌شوند. پس از محاسبه میدان فشار و سرعت، نیروی لیفت وارد بر استوانه استخراج شده و به عنوان نیروی تحریک‌کننده به معادله حرکت سازه اعمال می‌گردد. معادله حرکت استوانه در راستای عرضی حل شده و جابجایی جدید سازه محاسبه می‌شود. این جابجایی از طریق تابع تعریف‌شده توسط کاربر (UDF) به حل‌گر سیال منتقل شده و موقعیت جدید استوانه برای به‌روزرسانی مش دینامیکی استفاده می‌شود. این فرآیند به صورت تکراری در هر گام زمانی ادامه می‌یابد تا پاسخ ناپایای سیستم به‌طور کامل استخراج گردد. معیار همگرایی در هر گام زمانی، کاهش باقی‌مانده معادلات و پایداری پاسخ ارتعاشی سازه در بازه زمانی مشخص در نظر گرفته شده است [۱۷]، [۱۸]، [۱۹]، [۲۰].

روند حل عددی به صورت خلاصه شامل مراحل زیر است:

۱- حل میدان جریان پایا برای استوانه ثابت و تعیین شرایط اولیه.

۲- آغاز شبیه‌سازی ناپایا و فعال‌سازی مش دینامیکی.

۳- حل معادلات جریان سیال در هر گام زمانی با الگوریتم SIMPLEC.

۴- محاسبه نیروی لیفت وارد بر استوانه.

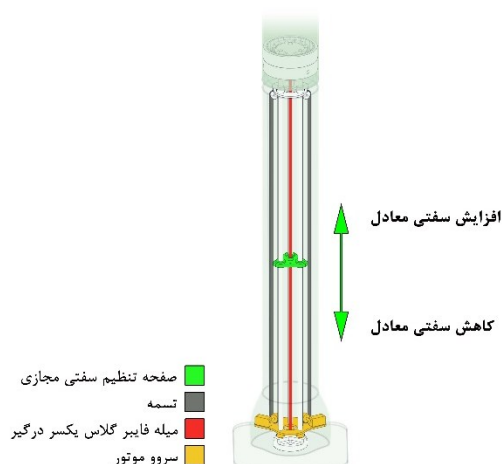
۵- حل معادله حرکت سازه و محاسبه جابجایی عرضی.

۶- انتقال جابجایی به حل‌گر سیال از طریق UDF و به‌روزرسانی مش.

۷- تکرار مراحل فوق تا رسیدن به پاسخ نهایی ناپایا.

بازه‌ی سرعت باد مورد استفاده در این تحلیل بر اساس مطالعه‌ی داده‌های اقلیمی بلندمدت شهر کاشان تعیین شد. سپس، نمودارهای توزیع سالیانه باد و گلبادهای شهر کاشان استخراج گردید. مطابق شکل ۴، بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده، بازه سرعت باد بین ۰/۵ تا ۶ متر بر ثانیه برای تحقیقات بیشتر در این پژوهش انتخاب شد. [۲۱].

یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها در عملکرد ژنراتورهای بادی بدون پره، باریک بودن ناحیه قفل‌شدگی است. در این ناحیه، فرکانس طبیعی سازه با فرکانس جدانشدگی گردابه‌ها هم‌پوشانی دارد و بیشترین دامنه ارتعاش و توان برداشت‌شده حاصل می‌شود. در سرعت‌های خارج از این محدوده، بازده سیستم به شدت کاهش می‌یابد. برای رفع این مشکل، مطابق شکل ۵، مکانیزم سفتی مجازی خودتنظیم طراحی و به سامانه اضافه گردید.

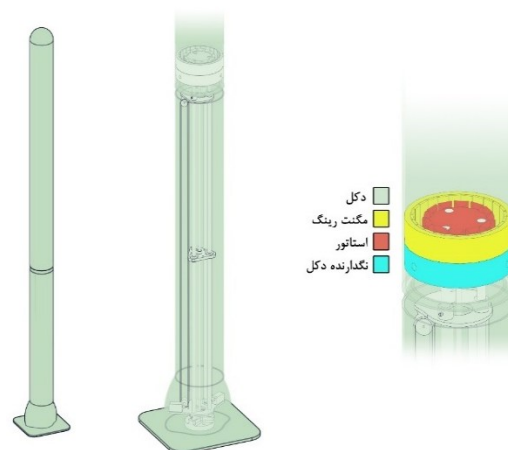


شکل ۶- نحوه تنظیم سفتی معادل سیستم

برای پایش سرعت باد در سامانه کنترل مکانیزم SAVS، دو سنسور مورد بررسی قرار گرفته است. سنسور WS350i به‌عنوان محصول ساخت داخل، دارای مزایایی همچون پشتیبانی فنی بومی، بازه اندازه‌گیری وسیع تا ۷۵ متر بر ثانیه، دقت بالا در حدود ۰٫۲ متر بر ثانیه و خروجی دیجیتال RS232/RS485 مناسب برای اتصال مستقیم به کنترلر می‌باشد؛ هرچند در مقایسه با مدل‌های اقتصادی، هزینه بالاتری دارد [۲۲]. در مقابل، سنسور BK-RSFS به دلیل قیمت اقتصادی‌تر، بدنه آلومینیومی مقاوم با استاندارد حفاظتی IP67 و خروجی‌های متنوع شامل ۵-۰ ولت، ۴-۲۰ میلی‌آمپر و RS485، گزینه‌ای کاربردی محسوب می‌شود؛ با این حال وجود قطعات متحرک از نوع سه‌کاپ در این سنسور می‌تواند در بلندمدت منجر به استهلاک و نیاز به نگهداری دوره‌ای گردد [۲۳]. شکل ۷ نمونه سنسور سنجش سرعت باد قابل استفاده در محل نیروگاه بادی را نشان می‌دهد.



شکل ۷- نمونه سنسور سنجش سرعت باد قابل استفاده در محل نیروگاه بادی [۲۳]



شکل ۵- اجزای تشکیل دهنده برداشت کننده ارتعاشی

در این مکانیزم، مطابق شکل ۶، یک صفحه متحرک موسوم به صفحه تنظیم سفتی در پایین میله ارتعاشی قرار دارد. این صفحه به وسیله ستون‌های راهنما هدایت شده و حرکت عمودی آن توسط تسمه‌هایی که به سروو موتورهای نصب‌شده در پایه متصل‌اند، کنترل می‌شود. با تغییر موقعیت صفحه، طول آزاد میله تغییر یافته و در نتیجه سفتی معادل سیستم اصلاح می‌گردد. به این ترتیب، افزایش طول آزاد میله موجب کاهش سفتی معادل و در نتیجه کاهش فرکانس طبیعی سازه می‌شود. به‌منظور کنترل این فرآیند، یک سنسور سرعت باد در محل نیروگاه بایستی نصب گردد تا داده‌های لحظه‌ای جریان را اندازه‌گیری و به سامانه کنترلی ارسال نماید.

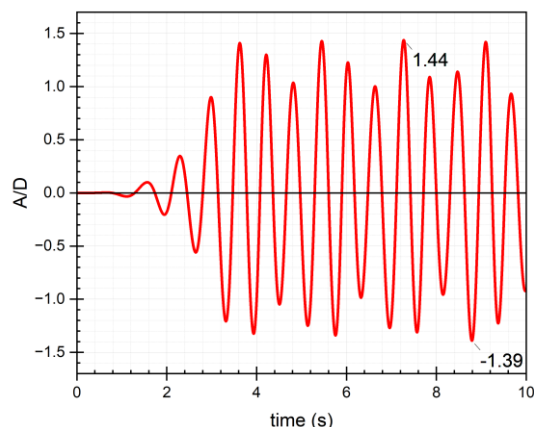
در این مقایسه، مشخصات فنی آزمایش لی مطابق جدول ۲ به عنوان داده‌های پایه در نظر گرفته شد. بخشی از داده‌های مربوط به این آزمایش، در جدول شماره ۳ منبع [۲۴] ارائه شده است که مقدار بیشینه پارامتر A/D را در شرایط خاص آزمایش لی برابر ۱٫۵۳ نشان می‌دهد. این اطلاعات در شکل ۹ مقاله حاضر نیز نمایش داده شده است.

در این راستا، شبیه‌سازی عددی متناظر با شرایط آزمایشگاهی Lee انجام شده و نسبت دامنه ارتعاش (A/D) به عنوان پارامتر اصلی اعتبارسنجی انتخاب گردیده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مقدار A/D محاسبه شده در این پژوهش تطابق مناسبی با مقدار گزارش شده در آزمایش تجربی داشته و اختلاف نتایج در محدوده قابل قبول گزارش شده در منابع معتبر قرار دارد. این انطباق نشان‌دهنده دقت مدل عددی، صحت پیاده‌سازی کوپل سیال-سازه و قابلیت اعتماد نتایج استخراج شده در ادامه پژوهش است.

$$k_{virtual} = 800 \text{ N/m} \quad f_{n,water} = 1.1 \text{ Hz}$$

ζ_{total}	$U \text{ (m/s)}$	Max. A/D
0.024	1.00	1.53

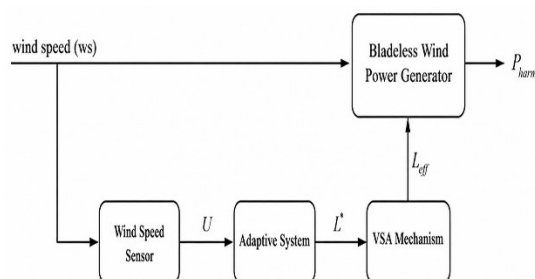
شکل ۹- بریده بخش مربوط به جدول شماره ۳ منبع [۲۴]



شکل ۱۰- مقایسه نسبت دامنه ارتعاش (A/D) حاصل از شبیه‌سازی عددی با داده‌های تجربی Lee جهت اعتبارسنجی مدل

داده‌های دریافتی از سنسور انتخابی، توسط کنترل‌کننده پردازش شده و بر اساس آن فرکانس جداسازی گردابه‌ها محاسبه و با فرکانس طبیعی فعلی سیستم مقایسه می‌شود. در صورت وجود اختلاف، فرمان اصلاحی به سرووموتورها ارسال می‌گردد تا موقعیت صفحه تنظیم سفتی تغییر کرده و فرکانس طبیعی سازه با فرکانس گردابه‌ها منطبق گردد.

این فرآیند یک حلقه بازخورد ایجاد می‌کند که امکان انطباق بلادرنگ سیستم با تغییرات سرعت باد را فراهم می‌آورد. نتیجه این سازوکار، گسترش ناحیه قفل‌شدگی، افزایش دامنه ارتعاش و بهبود بازده برداشت انرژی در گستره وسیع‌تری از سرعت‌های باد است. شکل ۸، ساختار حلقه‌ی کنترلی سامانه‌ی تولید برق بادی بدون پره را نشان می‌دهد که در آن مکانیزم تنظیم سفتی با دریافت داده‌های لحظه‌ای سرعت باد از حسگر و پردازش آن در سامانه تطبیقی، طول مؤثر میله را تغییر داده و فرکانس طبیعی سازه را با فرکانس جدایش گردابه‌ها منطبق می‌سازد.



شکل ۸- دیگرام کنترلی ساده‌شده‌ی سامانه تولید برق بادی بدون پره

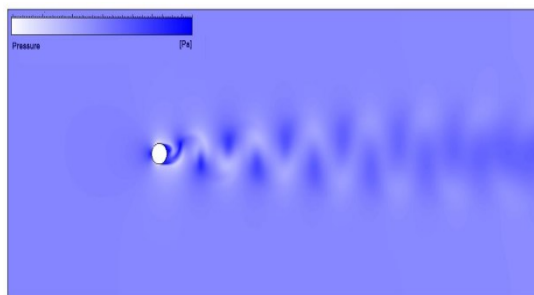
۵- اعتبارسنجی مدل عددی با داده‌های تجربی

به منظور ارزیابی دقت و قابلیت اعتماد مدل عددی ارائه شده، نتایج این پژوهش با داده‌های تجربی گزارش شده توسط Lee [۲۴] مورد مقایسه قرار گرفت.

جدول ۲- مشخصات فنی آزمایش لی [۲۴]

$U = 1 \text{ m/s}$	$\zeta = 0.024$
$D = 8/89 \text{ cm}$	$m_{osc} = 8/88 \text{ kg}$
$L = 91/44 \text{ cm}$	$\max A/D = 1/53$

نواحی بالادست و پایین دست استوانه افزایش یافته و توزیع فشار نامتقارن تری در اطراف هندسه شکل می گیرد. این تغییرات فشار نقش مهمی در ایجاد نیروهای ناپایای آیرودینامیکی و تحریک ارتعاشات القایی ناشی از گردابه ها ایفا می کنند. بیشترین شدت تغییرات فشار مربوط به سرعت متناظر با ناحیه قفل شدگی بوده که در آن، اندرکنش سیال و سازه به بیشترین مقدار خود می رسد.



شکل ۱۲- کانتور فشار استاتیک و الگوی ریزش گردابه ها در دنباله استوانه

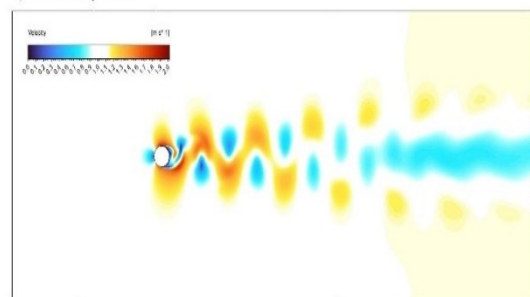
در حالت بدون مکانیزم، فرکانس طبیعی سازه به صورت ثابت در نظر گرفته شد، در حالی که در حالت فعال بودن مکانیزم، فرض بر آن بود که فرکانس طبیعی سازه همواره با فرکانس ریزش گردابه پیرامون دکل ژنراتور منطبق باشد و بر این اساس محاسبات سیالاتی انجام گرفت. تحلیل ها بر سه شاخص اصلی شامل دامنه جابجایی، نیروی لیفت و نیروی درگ در سرعت های مختلف باد متمرکز شدند.

مقایسه نتایج نشان داد که مقادیر نیروهای آیرودینامیکی (لیفت و درگ) در دو حالت اختلاف محسوسی نداشتند و تغییرات آن ها در بازه سرعت های مختلف نسبتاً محدود باقی ماند. در مقابل، دامنه جابجایی میله ارتعاشی در حضور مکانیزم SAVS به طور قابل توجهی افزایش یافت. این نکته حاکی از آن است که کارایی مکانیزم بیشتر به واسطه ی هم پوشانی فرکانسی میان فرکانس تحریک ناشی از جدایش گردابه ها و فرکانس طبیعی سازه ایجاد می شود، نه به علت افزایش مقدار نیروهای آیرودینامیکی. در واقع، زمانی که این هم فازی برقرار گردد، حتی نیروهای لیفت و درگ کوچک نیز می توانند نوسانات بزرگی در سازه ایجاد کنند و توان برداشت شده به طور معناداری افزایش یابد. شکل های ۱۳، ۱۴ و ۱۵، نمودارهای لیفت، درگ

یکی از نتایج کلیدی این تحلیل، محاسبه نسبت دامنه ارتعاش بود که مقدار آن مطابق شکل ۱۰، برابر با ۱،۴۴ به دست آمد. مقایسه این مقدار با گزارش آزمایش های لی نشان داد که نتایج شبیه سازی حاضر هم خوانی مناسبی با داده های تجربی دارد. بر این اساس می توان نتیجه گرفت که مدل عددی ارائه شده از دقت کافی برخوردار بوده و نتایج حاصل از آن برای ادامه تحلیل ها و بررسی اثر مکانیزم SAVS معتبر است.

۶- نتایج

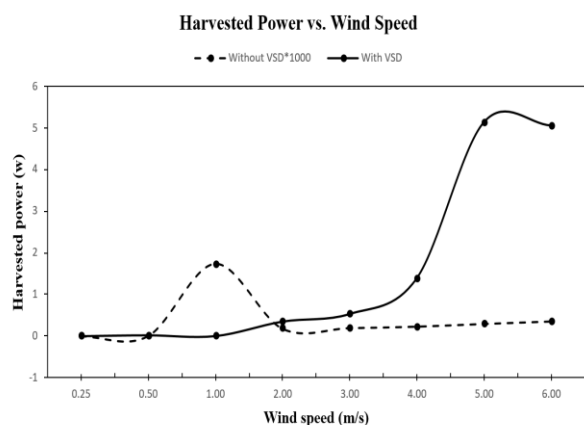
در این پژوهش، رفتار ژنراتور بادی بدون پره در دو حالت با به کارگیری مکانیزم سفتی مجازی خودتنظیم (SAVS) و بدون این مکانیزم در سرعت های مختلف وزش باد به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. به منظور درک بهتر برهم کنش سیال و سازه و تحلیل رفتار دینامیکی جریان اطراف هندسه، الگوی جریان و نحوه جدانشدگی گردابه ها در اطراف استوانه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، کانتورهای گردابه و الگوی جریان اطراف استوانه در لحظه بیشینه جابجایی عرضی سازه استخراج شده اند. این نمایش ها امکان تحلیل دقیق ساختار جریان، ناحیه بیدار (wake) و مکانیزم تولید نیروهای ناپایای آیرودینامیکی را فراهم می کنند که در شکل ۱۱ نشان داده شده است که این نتایج مربوط به سرعت باد $U = 1 \text{ m/s}$ (ناحیه قفل شدگی) است.



شکل ۱۱- الگوی جریان اطراف استوانه و تشکیل خیابان گردابه فون کارمن در لحظه بیشینه جابجایی عرضی

به منظور بررسی اثر سرعت جریان بر توزیع فشار اطراف هندسه، کانتورهای فشار استاتیک در اطراف استوانه برای سرعت های مختلف جریان استخراج و مقایسه شده اند. نتایج نشان می دهد که با افزایش سرعت جریان، اختلاف فشار بین

در نهایت، اثر مکانیزم SAVS بر توان خروجی سیستم، نمودار توان برداشت شده بر حسب سرعت باد با و بدون مکانیزم در شکل ۱۶ نشان داده شده است. این نمودار به خوبی نشان می دهد که در سرعت های متوسط باد، مکانیزم SAVS قادر است بازده سامانه را به طور چشمگیری افزایش دهد.

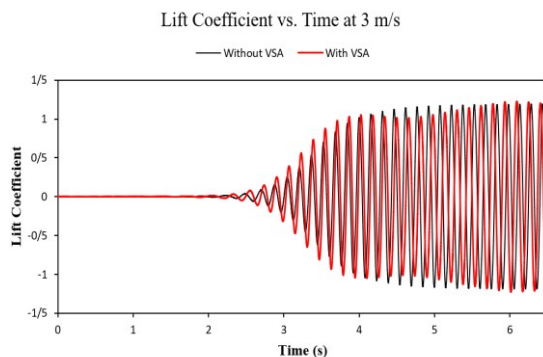


شکل ۱۶- بررسی مقایسه ای اثر عملکرد مکانیزم روی میزان برداشت انرژی در سرعت های مختلف وزش باد منطقه

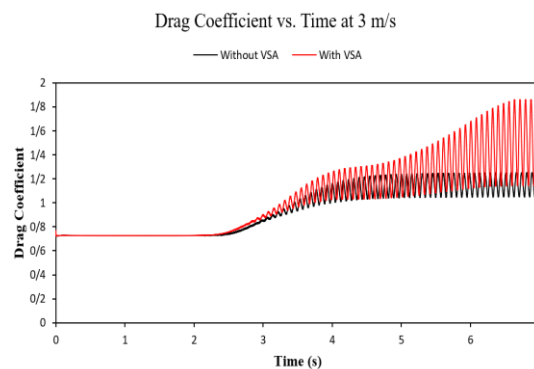
به منظور ارزیابی کارایی مکانیزم سفتی مجازی خودتنظیمی، نتایج حاصل از این مکانیزم با حالت مرجع شامل سفتی ثابت مقایسه شده است. مقایسه نتایج نشان می دهد که استفاده از سفتی مجازی موجب افزایش دامنه ارتعاش مؤثر و گسترش بازه قفل شدگی در سرعت های مختلف جریان می شود. این رفتار بیانگر آن است که مکانیزم پیشنهادی قادر است فرکانس طبیعی سیستم را به صورت تطبیقی با فرکانس تحریک ناشی از گردابه ها هم راستا نگه دارد و در نتیجه، برهم کنش سیال-سازه را تقویت کند. نتایج در شکل ۱۳ تا ۱۵ ارائه شده است.

نتایج عددی ارائه شده نشان می دهد که بدون استفاده از مکانیزم سفتی مجازی، سیستم تنها در یک بازه محدود از سرعت جریان وارد ناحیه قفل شدگی می شود، در حالی که با فعال سازی مکانیزم خودتنظیمی، این بازه به طور محسوسی افزایش می یابد. جمع بندی نتایج در شکل ۱۶ نشان داده شده است.

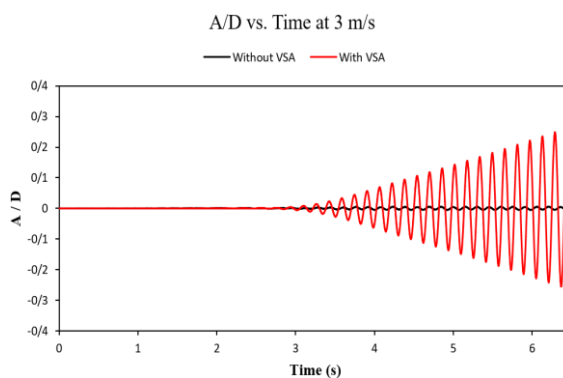
و دامنه جابجایی را برای سرعت وزش باد ۳ متر بر ثانیه نشان می دهند.



شکل ۱۳- مقایسه ضریب لیفت در دو حالت با و بدون مکانیزم تنظیم سفتی



شکل ۱۴- مقایسه ضریب درگ در دو حالت با و بدون مکانیزم تنظیم سفتی



شکل ۱۵- مقایسه نسبت دامنه ارتعاش در دو حالت با و بدون مکانیزم تنظیم سفتی

۷- نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان دادند که به‌کارگیری مکانیزم تنظیم سفتی راهکاری مؤثر برای ارتقای عملکرد ژنراتورهای بادی بدون پره است. این مکانیزم با تغییر طول آزاد میله و در نتیجه تنظیم فرکانس طبیعی سازه متناسب با فرکانس جدایش گردابه‌ها، موجب گسترش ناحیه قفل‌شدگی و افزایش چشمگیر دامنه ارتعاش در محدوده وسیعی از سرعت‌های باد می‌شود. نتایج عددی بیانگر آن است که مکانیزم تنظیم سفتی به‌ویژه در سرعت‌های بالاتر از ۴ متر بر ثانیه، می‌تواند بهره‌وری سامانه را تا حدود ۲۰ برابر افزایش دهد، در حالی که در سرعت‌های پایین‌تر نیز موجب بهبود محسوس عملکرد می‌گردد. ثابت ماندن نیروهای آیرودینامیکی (لیفت و درگ) در دو حالت، نشان می‌دهد که عامل کلیدی در افزایش راندمان، نه بزرگی نیروهای تحریک‌کننده، بلکه هم‌فازی و تطابق فرکانسی میان سازه و جریان است. این ویژگی، امکان برداشت پایدار انرژی حتی در شرایط نوسانی و متغیر باد را فراهم می‌کند. به‌طور کلی، استفاده از این مکانیزم می‌تواند مسیر توسعه بومی‌سازی ژنراتورهای بادی بدون پره را برای کاربردهای شهری با الگوهای باد ناپایدار هموار سازد و به‌عنوان رویکردی نوآورانه، کم‌هزینه و کارآمد در افزایش بهره‌وری انرژی‌های تجدیدپذیر در مقیاس کوچک معرفی شود.

در این پژوهش، رفتار دینامیکی یک ژنراتور بادی بدون پره تحت اثر ارتعاشات القایی ناشی از گردابه‌ها به‌صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج اصلی این تحقیق را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

- نتایج اعتبارسنجی نشان داد که مدل عددی ارائه‌شده قادر است نسبت دامنه ارتعاش (A/D) را با دقت مناسبی نسبت به داده‌های تجربی گزارش‌شده در منابع معتبر پیش‌بینی کند که بیانگر صحت مدل کوپل سیال-سازه به‌کاررفته است.
- تحلیل پاسخ دینامیکی سیستم نشان داد که پدیده قفل‌شدگی در بازه مشخصی از سرعت جریان رخ داده و دامنه ارتعاش عرضی سازه به‌طور قابل‌توجهی به سرعت باد وابسته است.
- استفاده از مکانیزم سفتی مجازی خودتنظیمی موجب افزایش دامنه ارتعاش مؤثر و گسترش بازه قفل‌شدگی

نسبت به حالت سفتی ثابت شد که نشان‌دهنده قابلیت این مکانیزم در تنظیم تطبیقی فرکانس طبیعی سیستم است.

- بررسی الگوی جریان و توزیع فشار اطراف هندسه نشان داد که تشکیل گردابه‌های متناوب و افزایش اختلاف فشار بین نواحی بالادست و پایین‌دست نقش اصلی را در ایجاد نیروهای ناپایای آیرودینامیکی و تحریک ارتعاشات ایفا می‌کنند.
- نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که به‌کارگیری مکانیزم سفتی مجازی می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد مؤثر برای بهبود عملکرد دینامیکی و افزایش پتانسیل برداشت انرژی در ژنراتورهای بادی بدون پره مورد توجه قرار گیرد. در نهایت، لازم به ذکر است که در این پژوهش مکانیزم سفتی مجازی به‌صورت عددی و مفهومی پیاده‌سازی شده و بررسی پیاده‌سازی فیزیکی و انجام آزمایش‌های تجربی می‌تواند به‌عنوان مسیر تحقیقات آینده دنبال شود.

مراجع

- [۱] ج. فرهنگد امین. ج. مغربی، "بررسی عددی عملکرد اثرات میله نصب شده در جلو پره توربین بادی عمود محور با مقطع پره نامتقارن"، *مکانیک سازه ها و شاره ها*, vol. 11, no. 4, pp. 107–120, Sep. 2021, doi: 10.22044/JSFM.2021.9871.3219.
- [۲] س. کریمیان س. س. سهام، "ارزیابی ظرفیت جذب انرژی باد و بومی‌سازی یک توربین بادی محور عمودی مطابق اقلیم شهرهای ایران"، *مکانیک سازه ها و شاره ها*, vol. 12, no. 5, pp. 267–281, Nov. 2022, doi: 10.22044/JSFM.2022.11306.3486.
- [3] L. Ghabuzyan, C. Luengas, and J. Kuo, "Urban Wind Harvesting Using Flow-Induced Vibrations," *Am. J. Undergrad. Res.*, vol. 16, no. 4, pp. 71–79, Mar. 2020, doi: 10.33697/AJUR.2020.008.
- [4] V. D. Bodkhe, "Design and development of vortex blade less wind turbine," *International J. Trend in Scientific Research and Development*, vol. 2, no. 3, pp. 2460–2462, 2018.
- [5] A. M. Elsayed and M. B. Farghaly, "Theoretical and numerical analysis of vortex bladeless wind turbines," *Wind Engineering*, vol. 46, no. 5, pp. 1408–1426, 2022.
- [6] S. Francis, V. Umesh, and S. Shivakumar, "Design and analysis of vortex bladeless wind turbine," *Mater. Today Proc.*, vol. 47, pp. 5584–5588, 2021.

- [18] Y. Xia, P. Stopford, P. Sharkey, and I. Verma, (2021) "Dynamic mesh adaption for scale-resolving reacting flow simulations," in Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, American Society of Mechanical Engineers, p. V03AT04A038.
- [14] N. B. Khan, Z. Ibrahim, M. I. Khan, T. Hayat, and M. F. Javed, (2018) "VIV study of an elastically mounted cylinder having low mass-damping ratio using RANS model," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 121, pp. 309–314.
- [15] H. Ali et al., (2022) "Numerical investigation of the effect of spanwise length and mesh density on flow around cylinder at $Re = 3900$ using LES model," *PLoS One*, vol. 17, no. 4, p. e0266065.
- [16] I. B. Celik, U. Ghia, P. J. Roache, and C. J. Freitas, (2008) "Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications," *J. fluids Engineering-Transactions of the ASME*, vol. 130, no. 7.
- [17] J. H. Ferziger, M. Perić, and R. L. Street, (2019) *Computational methods for fluid dynamics*. Springer.
- [18] Y. Xia, P. Stopford, P. Sharkey, and I. Verma, (2021) "Dynamic mesh adaption for scale-resolving reacting flow simulations," in Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, American Society of Mechanical Engineers, p. V03AT04A038.
- [7] I. Bahadur, "Dynamic modeling and investigation of a tunable vortex bladeless wind turbine," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 18, p. 6773, 2022.
- [8] H. ; Kang et al., "A Novel Small-Scale Bladeless Wind Turbine Using Vortex-Induced Vibration and a Discrete Resonance-Shifting Module," *Applied Sciences* 2024, Vol. 14, Page 8217, vol. 14, no. 18, p. 8217, Sep. 2024, doi: 10.3390/APP14188217.
- [9] J. Breen, W. Mallik, and S. Adhikari, "Performance analysis and geometric optimization of bladeless wind turbines using wake oscillator model," *Renew. Energy*, p. 123549, 2025.
- [10] M. Verma and A. De, "Dynamics of vortex-induced-vibrations of a slit-offset circular cylinder for energy harvesting at low Reynolds number," *Physics of Fluids*, vol. 34, no. 8, 2022.
- [11] A. K. Soti and A. De, "Vortex-induced vibrations of a confined circular cylinder for efficient flow power extraction," *Physics of Fluids*, vol. 32, no. 3, 2020.
- [12] E. Guilmineau and P. Queutey, "Numerical simulation of vortex-induced vibration of a circular cylinder with low mass-damping in a turbulent flow," *J. Fluids Struct.*, vol. 19, no. 4, pp. 449–466, 2004.
- [13] Z. Y. Pan, W. C. Cui, and Q. M. Miao, "Numerical simulation of vortex-induced vibration of a circular cylinder at low mass-damping using RANS code," *J. Fluids Struct.*, vol. 23, no. 1, pp. 23–37, 2007.
- [14] N. B. Khan, Z. Ibrahim, M. I. Khan, T. Hayat, and M. F. Javed, (2018) "VIV study of an elastically mounted cylinder having low mass-damping ratio using RANS model," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 121, pp. 309–314.
- [15] H. Ali et al., (2022) "Numerical investigation of the effect of spanwise length and mesh density on flow around cylinder at $Re = 3900$ using LES model," *PLoS One*, vol. 17, no. 4, p. e0266065.
- [16] I. B. Celik, U. Ghia, P. J. Roache, and C. J. Freitas, (2008) "Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications," *J. fluids Engineering-Transactions of the ASME*, vol. 130, no. 7.
- [17] J. H. Ferziger, M. Perić, and R. L. Street, (2019) *Computational methods for fluid dynamics*. Springer.
- [۱۹] م. ح. شجاعی فرد، م. رجبی اسلامی، ج. زارع، "تحلیل فرکانسی ریزش گردابه در کسکید کمپرسور محوری در اعداد رینولدز متوسط"، *مکانیک سازه ها و شاره ها*, vol. 6, no. 1, pp. 19–27, Mar. 2016, doi: 10.22044/JSFM.2016.687.
- [۲۰] ح. انصاریان ع. داوری، "تحلیل عددی رفتار آیرودینامیکی ایرفویل‌های متداول سرعت پایین"، *مکانیک سازه ها و شاره ها*, vol. 15, no. 3, pp. 215–221, Jul. 2025, doi: 10.22044/JSFM.2025.16052.3958.
- [21] I. P. M. Department, "Climatic profile of Kashan city." [Online]. Available: <https://esfahanmet.ir/uploads/researches/kashan1.pdf>
- [22] "Wind speed sensor model WS350i made in Iran."
- [23] "Wind speed sensor model BK-RSFS."
- [24] J. H. Lee and M. M. Bernitsas, (2011) "High-damping, high-Reynolds VIV tests for energy harnessing using the VIVACE converter," *Ocean engineering*, vol. 38, no. 16, pp. 1697–1712.