

Acoustic Investigation of Hybrid Wind Turbine Consisting of Darrieus Blades and Savonius Conventional Type Blades

Mohammad Asadi,^{1*} Rahim Hasanzadeh²

¹Faculty of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran
Mohammad1371.asadi@yahoo.com

²Faculty of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran
r.hasanzadeh@uut.ac.ir

Keywords:

vertical axis wind turbine
darrieus blades
savonius blades
acoustic
sound pressure level
acoustic pressure

Abstract: Sound produced by vertical axis wind turbines can reduce their popularity for use in urban and residential areas. In order to reduce the produced sound level the acoustic behavior of hybrid rotor is studied in this research with the help of Computational Fluid Dynamics (CFD). In the investigated rotor structure, conventional-type blades were used as the inner rotor, which was connected to the outer rotor at a zero-degree angle. To ensure the modeling, the validation of the results and the measuring of effect of the time step on the output data were undertaken. The purpose of this research was to investigate the effect of a tip speed ratio and free wind speed on the level of sound produced. The results showed that the sound level produced had a direct relationship with a tip speed ratio and the free wind speed in such a way that the lowest sound pressure level in a tip speed ratio of 1.5 and the free wind speed of 5 m/s was reported by the R₄ receiver. Its value was equal to 7.64 dB. Also, by moving away from the rotor, the produced sound level decreases.

Original Research Article

Paper History:

Received: 20/02/2024

Revise: 09/06/2024

Accepted: 11/06/2024

How to cite this article: Asadi, M., Hasanzadeh, R., "Acoustic investigation of hybrid wind turbine consisting of Darrieus blades and Savonius conventional type blades", Energy Engineering and Management, Vol. 14, No. 1, PP. 108-121, Spring 2024. <https://doi.org/10.22052/eem.2024.254451.1054>

© 2023 University of Kashan Press.

This is an open access article under the CC BY license. (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Introduction

Wind energy is one of the renewable resources that are abundantly available in different parts of the world. The most important systems for converting wind energy into electricity are wind turbines. Today, in order to be able to use wind turbines in urban and residential areas, a new generation of turbines with appropriate dimensions called vertical axis turbines has been introduced. The sound produced by wind turbines can be one of the negative points of using this type of system in residential areas. Beyond that, the frequency of the sound level produced by the

wind turbine can be different according to the variability of the wind direction. For this reason, the acoustic study of vertical axis turbines is of special importance for using them inside the city and on the roofs of buildings. By reviewing the previous literature, it can be seen that all studies in the field of acoustics of vertical axis wind turbines have been about Darrieus rotors, and there is no acoustic information about hybrid rotors among these studies. In this article, for the first time, the acoustic performance of Darrieus-Savonius hybrid wind turbine is evaluated numerically, and the results are compared in different conditions.

Materials and Methods

In the present study, the acoustic performance of a hybrid wind turbine, consisting of two conventional (semi-circular) Savonius blades- as the inner rotor- and two Darrieus blades- as the outer main rotor- has been investigated. In the acoustic examination of the wind turbine, the calculation of the produced sound level, which is measured by the unit (dB), is of great importance. To calculate the sound level produced, sound recording receivers have been used at different points of the computing domain.

To solve the acoustic equations, the aerodynamic equations related to the flow was first calculated. For this purpose, the Reynolds Averaged Navier-Stokes method was used to simulate the turbulent flow, and the SST $k-\omega$ was applied to model the Reynolds stress. Alternatively, Ffowcs-Williams and Hawkings (FW-H) equations were employed for acoustic modeling. Discretization and solving of equations were done with the help of Ansys Fluent. Ansys Fluent software processed various acoustic parameters and the related graphs by fast Fourier transform of sound pressure signals.

In order to check the acoustic performance of the hybrid wind turbine, different values of TSR such as 1.5, 2.5 and 3.5 were tested for the hybrid rotor. Calculations were made for two free wind speeds of 5 and 10 m/s, where the corresponding Reynolds number was based on the outer diameter of the rotor, and the free wind speed was equal to 3.425×10^5 and 6.85×10^5 respectively.

Results

The results are shown through contours and graphs related to acoustics. The contour of the streamlines downstream of the hybrid rotor indicated that with an increase in TSR value, the streamlines were distorted, and, finally, vortices were formed at TSR=3.5. By examining the receivers downstream of the rotor, it could be understood that the sound pressure level reported

by the receivers had decreased by moving away from the rotor blades. This event in all TSR modes could be seen. In the following, the effect of the tip speed ratio on the sound level produced in the receivers was studied. The graphs of the sound pressure level in a certain frequency range showed that the lowest and highest sound levels were produced at TSR= 1.5 and TSR= 3.5 respectively. Finally, the effect of free wind speed on the sound pressure level in all receivers was depicted. The data showed that with an increase in free wind speed from 5 to 10 m/s, the level of sound produced increased.

Discussion and Conclusion

In the present study, the acoustic behavior of a hybrid wind turbine consisting of Darrieus and Savonius blades (conventional type) has been investigated. First, to validate the modeling, the sensitivity of the results to the time step was evaluated, and the optimal mode was selected to continue the calculations. In this article, the effect of tip speed ratio, free wind speed, and the distance of the receivers on the noise produced by the rotor was studied numerically. In this regard, the behavior of the hybrid rotor was simulated in different conditions such as TSR = 3.5, 2.5, 1.5 and $U_\infty = 5$ and 10 m/s. The obtained results showed that the produced noise was highly dependent on the formation of vortices, and with the formation of vortices downstream of the rotor, the produced sound level increased. In addition, by moving away from the rotor at downstream, the sound pressure level in the receivers decreased. The tip speed ratio has had a direct relationship with the sound pressure level so much so that with an increase in TSR value, the produced noise level has increased. Also, this relationship has been established between the free speed of the wind and the sound pressure level to the extent that with an increase in the Reynolds number, more noise has been produced.

بررسی آکوستیک توربین بادی ترکیبی متشکل از پره‌های داریوس و پره‌های نوع متعارف ساونیوس

محمد اسدی^{۱*}، رحیم حسن‌زاده^۲

^۱ دانش‌آموخته دکتری دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

Mohammad1371.asadi@yahoo.com

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

r.hassanzadeh@uut.ac.ir

واژه‌های کلیدی:	چکیده: تولید صدا توسط توربین‌های بادی محور عمودی می‌تواند از
توربین بادی ترکیبی	محبوبیت آن‌ها برای به کار بردن در مناطق شهری و مسکونی کم کند.
پره‌های داریوس	به‌منظور کاهش سطح صدای تولیدشده، در این مقاله، رفتار آکوستیکی
پره‌های ساونیوس	روتور ترکیبی با کمک دینامیک سیالات محاسباتی
آکوستیک	((Computational Fluid Dynamics(CFD)) مطالعه شده است. در
سطح فشار صوت	ساختار روتور مورد بررسی، از پره‌های نوع متعارف ساونیوس به‌عنوان
فشار آکوستیک	روتور داخلی استفاده شده که با زاویه صفر درجه به روتور خارجی متصل
	شده است. برای اطمینان از مدل‌سازی، اعتبارسنجی نتایج و تأثیر گام زمانی
	بر داده‌های خروجی صورت گرفته است. هدف از این پژوهش، بررسی
	تأثیر نسبت سرعت نوک و سرعت آزاد باد بر میزان سطح صدای تولیدشده
	است. نتایج نشان دادند که سطح صدای تولیدشده رابطه مستقیم با نسبت
	سرعت نوک و سرعت آزاد باد دارد، به این صورت که کمترین سطح فشار
	صوت در نسبت سرعت نوک ۱/۵ و سرعت آزاد باد ۵ متر بر ثانیه توسط
	دریافت‌کننده R ₄ گزارش شده و مقدار آن برابر ۷/۶۴ دسیبل است. همچنین
	با دور شدن از روتور سطح صدای تولیدشده کاهش می‌یابد.

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۲

<https://doi.org/10.22052/eem.2024.254451.1054>

۱. مقدمه

در داخل شهر و پشت‌بام ساختمان‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ به طوری که با بررسی عملکرد آکوستیکی روتورهای محور عمودی، می‌توان سطح صدای تولیدشده توسط این نوع از روتورها را کاهش داد. در این زمینه مطالعاتی در گذشته صورت گرفته است که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود. برای مثال، محمد [۳] آکوستیک یک توربین بادی داریوس را برای اینکه بتوان در محدوده شهری استفاده کرد مورد بررسی قرار داد. نویسنده، نویز حاصل از پره‌های داریوس را به صورت عددی و به روش فاکس ویلیامز هاوکینز^۷ مورد مطالعه قرار داد. مکان دریافت‌کننده‌های دریافت صدا در پایین دست روتور قرار داده شده است. در این مقاله، محقق، اثرات شکل پره‌ها، نسبت سرعت نوک^۸ و صلبیت پره‌ها بر نویز تولیدشده را بررسی کرده و نتایج نشان‌دهنده آن است که توربین بادی در سرعت نوک بیشتر و همچنین در صلبیت‌های بالا سروصدای بیشتری تولید می‌کند. قاسمیان و نجات [۴] برای بررسی عددی آکوستیک و آیرودینامیک توربین بادی داریوس از روش FW-H و برای مدل‌سازی آشفتگی جریان از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۹ استفاده کردند. برای اعتبارسنجی، ضریب گشتاور متوسط را با داده‌های تجربی مقایسه نمودند که تطابق خوبی داشته است. در تحلیل آکوستیک از چهار دریافت‌کننده در پایین دست روتور داریوس استفاده کردند. آن‌ها تأثیر سرعت چرخش روتور بر نویز تولیدشده را بررسی کردند. نتایج حاکی از آن است که سطح فشار صوت^{۱۰} تولیدشده با سرعت چرخش روتور داریوس رابطه مستقیم دارد. محمد [۵] یک مطالعه انتقادی بر روی پره‌های J شکل انجام داده است. این مطالعه، عملکرد آیرودینامیکی و آکوستیکی پره‌های J شکل را با پره‌های NACA0015، NACA0021 و S1046 مقایسه کرده است. نویسنده، این مطالعه را در نسبت سرعت‌های نوک و صلبیت‌های متفاوت و همچنین در نسبت‌های برش^{۱۱} مختلف پره J شکل انجام داده است. نتایج نشان داد که در تمام حالت‌ها و ساختارها، پره J شکل عملکرد آیرودینامیکی و آکوستیکی ضعیفی نسبت به پره‌های دیگر دارد. اوترمو و همکاران [۶] برای بررسی نویز تولیدشده توسط روتور داریوس از ۴۸ میکروفون در چهار موقعیت مختلف استفاده کردند. نتایج تجربی حاکی از آن است که سطح صدای تولیدشده در بازه مشخصی از

انرژی بادی یکی از منابع تجدیدپذیر است که به وفور در نقاط مختلف کره زمین وجود دارد. باد ریشه در انرژی خورشیدی دارد، به طوری که با تابش نور خورشید بر سطوح ناهموار زمین، بخش‌های مختلف کره زمین نسبت به هم اختلاف دمایی پیدا کرده و این اختلاف دما، باد را در زمین به وجود می‌آورد. تجهیزاتی وجود دارند که با کمک آن‌ها می‌توان از باد برای تولید الکتریسیته، تهویه مطبوع ساختمان‌ها و کاربردهای دیگر استفاده کرد. مهم‌ترین سیستم‌ها برای تبدیل انرژی بادی به انرژی الکتریسیته توربین‌های بادی هستند. امروزه برای اینکه بتوان از توربین‌های بادی در مناطق شهری و مسکونی استفاده کرد، نسل جدیدی از توربین‌ها با ابعاد مناسب به نام توربین‌های محور عمودی^۱ توسط محققان معرفی شده است. روتورهای محور عمودی از نظر تولید گشتاور به دو دسته تقسیم می‌شوند: روتورهای نوع ساونوس^۲ و نوع داریوس^۳. این روتورها به ترتیب با کمک نیروی پسا^۴ و لیفت^۵، گشتاور حاصل از باد را به ژنراتور برای تولید برق منتقل می‌کنند. با برخورد جریان هوا با پره‌های توربین، آشفتگی در دل جریان رخ داده و همچنین این برخورد باعث لرزش پره‌های روتور می‌شود. این تغییرات، امواجی با فشارهای مختلف ایجاد کرده که منجر به تولید صدا می‌شود.

فرکانس صدای تولیدشده انواع توربین‌های بادی از مقادیر کم که گاهی غیرقابل شنیدن است تا مقادیر بالاتر در محدوده شنیداری معمولی متغیر است [۱]. اگرچه افزایش فاصله در کاهش سطح نویز مفید است، باد می‌تواند انتشار صدا را در جهات خاصی تقویت کرده و از آن در جهات دیگر جلوگیری کند. گوش انسان در یک سطح فشار صوت^۶ معین، تمام فرکانس‌ها را احساس نمی‌کند؛ به طوری که محدوده شنوایی طبیعی گوش انسان ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز است [۲]. با توجه به متغیر بودن جهت باد و همچنین پایین بودن سرعت آزاد باد در مناطق شهری و مسکونی، استفاده از توربین‌های محور عمودی انتخاب خوبی است؛ ولی تولید صدایی که توربین‌های بادی ایجاد می‌کنند، می‌تواند از نکات منفی استفاده از این نوع سیستم‌ها در مناطق مسکونی باشد. در همین راستا، مطالعه آکوستیکی توربین‌های محور عمودی برای به کار بردن آن‌ها

7. Ffowcs Williams and Hawkings (FW-H)
8. Tip Speed Ratio (TSR)
9. Large Eddy Simulation
10. Sound Pressure Level (SPL)
11. Cut Ratio

1. Vertical Axis Wind Turbine
2. Svonius
3. Darrieus
4. Drag
5. Lift
6. Sound Pressure Level (SPL)

مختلف دیفیوزر بر عملکرد آیرودینامیکی و آکوستیکی توربین بادی داریوس را به صورت عددی مطالعه کردند. برای شبیه‌سازی نویز تولیدشده از معادلات FW-H استفاده کردند. نتایج نشان داد که استفاده از دیفیوزر بهینه، توان تولیدی را ۸۲ درصد در نسبت سرعت نوک ۲/۷۵ افزایش می‌دهد؛ درحالی‌که توربین بادی مجهز به دیفیوزر، نویز بیشتری نسبت به حالت بدون وجود دهانه^۳ دیفیوزر تولید می‌شود. آرسی و همکاران [۱۲] با تغییر در شکل پره‌ها روتور داریوس عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی محور عمود به صورت عددی ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که پره‌های نوع تروپوسکین^۴ نسبت به حالت‌های نوع مستقیم و هلیکال در فرکانس‌های پایین (۲۰ تا ۳۰ هرتز) صدای بیشتری تولید می‌کند.

شوبهام و همکاران [۱۳] تأثیر افزودن پایه و شفت مرکزی بر عملکرد آیرودینامیکی و آکوستیکی توربین بادی داریوس را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزودن پایه‌ها و شفت مرکزی نویز در فرکانس‌های پایین کاهش و در فرکانس‌های بالا افزایش می‌یابد. قاسمیان و نجات [۱۴] عملکرد آکوستیکی توربین بادی داریوس با شبیه‌سازی ادی در جریان را بررسی کردند. نتایج نشان داد که ارتباط بسیار قوی بی‌سرعت باد با امواج صوتی وجود دارد و با افزایش سرعت باد سطح صدا افزایش می‌یابد. شوبهام و همکاران [۱۵] تأثیر تعداد پره بر عملکرد آیرودینامیکی روتور داریوس را به صورت عددی ارزیابی کردند. آن‌ها نشان دادند که سطح صدای تولیدشده در فرکانس‌های پایین توسط روتور با تعداد پره‌های کمتر بالاتر از روتور چهار پره است؛ درحالی‌که این موضوع در فرکانس‌های بالاتر برعکس است.

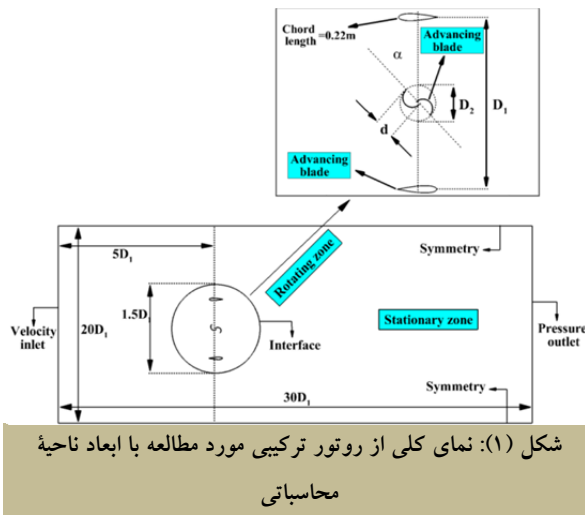
با توجه به مطالعات گذشته در زمینه آکوستیک توربین‌های بادی محور عمودی می‌توان دریافت که در بسیاری از مطالعات گذشته، محاسبات آکوستیک فقط برای یک سرعت آزاد باد انجام گرفته که برای نتیجه‌گیری صحیح نیاز است که سرعت‌های باد دیگری مورد بررسی قرار گیرد. علاوه‌بر آن، اغلب مطالعات صورت گرفته منحصراً برای روتورهای نوع داریوس بوده و هیچ مطالعه‌ای در زمینه آکوستیک توربین‌های ترکیبی داریوس-ساوونیوس انجام نگرفته است؛ به طوری‌که روتورهای ترکیبی متشکل از پره‌های داریوس و ساوونیوس نسل جدیدی از توربین‌های محور عمودی هستند که عملکرد آیرودینامیکی این نوع از روتورها در اغلب شرایط بهتر از روتور داریوس و ساوونیوس گزارش شده است [۱۶-۱۸]. بنابراین بسیار اهمیت دارد تا عملکرد آکوستیکی توربین بادی ترکیبی مورد

زاویه فضایی^۱ افزایش می‌یابد که تصاویر نشان دادند در آن بازه از چرخش توربین بادی، آشفته‌گی جریان بیشتر شده است.

با توجه به بررسی مطالعات گذشته، تعدادی از پژوهشگران برای کاهش سطح صدای تولیدشده روش‌های جدیدی برای توربین بادی محور عمودی پیشنهاد دادند. در همین راستا، غزللا و همکاران [۷] یک توربین بادی داریوس متشکل از دیفیوزر^۲ را معرفی کرده و یک مطالعه جامع توسط دینامیک سیالات محاسباتی برای افزایش عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی انجام دادند. دریافت‌کننده‌ها در پایین و بالادست روتور قرار گرفتند. آن‌ها برای پیش‌بینی عددی سروصدای تولیدشده، از روش FW-H استفاده کردند و نتایج نشان داد که استفاده از دیفیوزر در موقعیت مناسب می‌تواند قدرت تولیدشده را افزایش و میزان نویز تولیدشده را کاهش دهد. محمد [۸] هندسه جدیدی از توربین بادی داریوس (جفت پره) را پیشنهاد داد و آن را از نظر آیرودینامیکی و آکوستیکی به صورت عددی بررسی کرد. برای بررسی سروصدای تولیدشده توسط توربین، از دریافت‌کننده‌های دریافت نویز در موقعیت‌های مختلف استفاده کرده است. تمام دریافت‌کننده‌ها در پایین دست روتور داریوس در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد که توربین بادی پیشنهادشده، نویز تولیدشده توسط پره‌ها را ۵۶/۵۵ درصد کاهش می‌دهد. لیو و همکاران [۹] عملکرد آیرودینامیکی یک توربین بادی نوع داریوس با استفاده از یک روش نوآورانه کنترل جریان سیال مبتنی بر اثر هم‌افزایی دمیدن و مکش بهبود دادند. علاوه‌بر آن، انتشار نویزهای آکوستیک حاصل از این بهبود را ارزیابی کردند. آن‌ها نشان دادند که طرح پیشنهادی، نوسانات میدان فشار را کاهش می‌دهد و باعث تعدیل در ریزش گردابه‌ها می‌شود. همچنین سطح صدای تولیدشده در بازه ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز به اندازه ۶/۵۶ دسیبل کاهش می‌یابد.

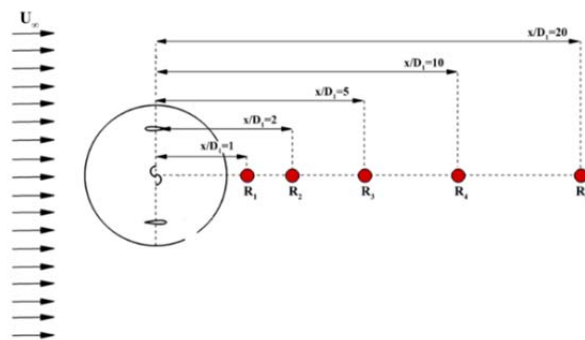
سوو و همکاران [۱۰] عملکرد آیرودینامیکی و آکوستیکی توربین بادی محور عمودی داریوس را به صورت عددی و سه‌بعدی ارزیابی کردند. آن‌ها از پنج دریافت‌کننده در پایین دست روتور داریوس برای بررسی نویز تولیدشده استفاده کردند. علاوه‌بر آن، تأثیر نسبت سرعت نوک، فاصله دریافت‌کننده‌ها و شدت آشفته‌گی بر عملکرد آکوستیکی توربین بادی را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت سرعت نوک، سطح صدای تولیدشده افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش شدت آشفته‌گی، فعل و انفعال بین پره‌ها و گردابه‌های بیشتر شده که در نهایت سطح صدای تولیدشده افزایش یافته است. دسوک و همکاران [۱۱] تأثیر ساختارهای

شده است. همچنین در ادامه برای جلوگیری از تکرار، نتایج آن پژوهش به کار گرفته شده است.



شکل (۱): نمای کلی از روتور ترکیبی مورد مطالعه با ابعاد ناحیه محاسباتی

برای مطالعه و بررسی صدای تولیدشده، تجزیه و تحلیل رفتار آکوستیکی توربین بادی ترکیبی مورد بحث واقع می‌شود. در بررسی آکوستیکی توربین بادی، محاسبه سطح صدای تولیدشده که با واحد (dB) اندازه‌گیری می‌شود، از اهمیت بالایی برخوردار است. برای محاسبه سطح صدای تولیدشده از دریافت‌کننده‌های ضبط صدا در نقاط مختلف میدان محاسباتی استفاده شده است. شکل (۲) مکان دریافت‌کننده‌های استفاده‌شده در اطراف روتور ترکیبی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، در مسئله مورد نظر ۵ دریافت‌کننده در پایین‌دست روتور ترکیبی با فواصل مشخص شده جایگذاری شده است.



شکل (۲): موقعیت دریافت‌کننده‌های ضبط صدا در پایین‌دست روتور ترکیبی

در این بررسی، دامنه محاسبات به دو ناحیه دوار و ساکن تقسیم می‌شود. روتور ترکیبی متشکل از پره‌های ساوونیوس نوع متعارف و داریوس در ناحیه دوار قرار می‌گیرد که با سرعت زاویه‌ای مشخص در جهت پاد ساعتگرد دوران می‌کنند. ناحیه ساکن شامل پیرامون

ارزیابی قرار گیرد. در این مطالعه، برای بررسی سطح صدای تولیدشده توسط روتور ترکیبی در شرایط مختلف، رفتار آکوستیکی توربین بادی ترکیبی داریوس-ساوونیوس به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج در شرایط مختلف باهم مقایسه می‌گردد. به عبارتی دیگر، تحلیل آکوستیکی روتور ترکیبی دو پره داریوس و دو پره ساوونیوس به عنوان پژوهشی جدید در میان مطالعات انجام‌شده به شمار می‌آید.

۲. بیان فیزیک مسئله

در مطالعه حاضر، عملکرد آکوستیکی یک توربین بادی ترکیبی تشکیل‌شده توسط روتور دو پره ساوونیوس نوع متعارف (نیم‌دایره‌ای)، به عنوان روتور داخلی و روتور دو پره داریوس، به عنوان روتور اصلی خارجی بررسی شده است. ابعاد روتورها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که از نظر آیرودینامیکی بهترین عملکرد را داشتند؛ به این صورت که روتور داخلی ساوونیوس با دو پره نیم‌دایره‌ای با نسبت هم‌پوشانی داخلی ۰/۲ در نظر گرفته شده که قبلاً توسط مرجع [۱۹] برای دو پره نیم‌دایره‌ای به عنوان مقدار بهینه گزارش شده است. علاوه بر آن، پره‌های روتور داریوس با ایرفویل مستقیم و متقارن NACA 0018 بررسی شده‌اند که از نظر دانشگاهی و صنعتی محبوب است. همچنین، بهینه بودن این نوع از ایرفویل‌ها توسط مطالعات گذشته گزارش شده است. نسبت قطر روتور داخلی به روتور خارجی برابر ۰/۲ طراحی شده که در مطالعات گذشته به عنوان مقدار بهینه معرفی شده است [۲۰]. زاویه اتصال روتور داخلی با روتور خارجی با پارامتر α مشخص شده که در این مطالعه برابر ۰ در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی عملکرد آکوستیکی توربین بادی ترکیبی، مقادیر مختلف TSR مانند ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ برای روتور ترکیبی آزمایش می‌شود. محاسبات برای دو سرعت آزاد باد ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه انجام می‌گیرد که عدد رینولدز مربوطه بر مبنای قطر خارجی روتور ($D_1=1m$) و سرعت آزاد باد به ترتیب برابر $3/425 \times 10^5$ و $6/85 \times 10^5$ است.

شکل (۱) نمای کلی از روتور ترکیبی مورد بررسی را نشان می‌دهد. در شبیه‌سازی حاضر، توربین بادی ترکیبی پیشنهادی با توجه به ارتفاع یکسان روتور داخلی با روتور خارجی، به صورت دوبعدی بررسی می‌شود. با توجه به شکل (۱) از شفت و میله‌های اتصال در شبیه‌سازی توربین بادی ترکیبی صرف‌نظر شده است. قابل ذکر است که در گذشته رفتار آیرودینامیکی این نوع روتور با ابعاد یکسان توسط نویسندگان حاضر در این مقاله در مرجع [۱۶] ارزیابی شده و اطلاعات ابعادی هندسه مورد بررسی در آن آورده

آکوستیک، معادلات ناویر استوکس به معادله شبه موج تبدیل می‌شوند. ویلیامز و هاوکینز^۵ صورت عمومی معادلات تبدیل را برای محاسبه آکوستیک در سیالات استفاده کردند. در این روش برای حل معادلات جریان آشفته روش‌های DNS، RANS و معادلات فیلترشده توصیه می‌شوند. این روش هم برای جریان تراکم‌پذیر و هم تراکم‌ناپذیر قابل استفاده است و برخلاف روش مستقیم توانایی اندازه‌گیری نویز در فضاهای دوردست را دارد [۲۱]. مهم‌ترین و پرکاربردترین روش انتگرالی، روش فاکس-ویلیامز و هاوکینگز است که در اکثر مطالعات گذشته از این روش برای مدل‌سازی آکوستیک توربین بادی استفاده شده است [۳، ۵، ۷ و ۸].

۱.۳. معادلات حاکم بر روش انتگرالی، مدل فاکس

ویلیامز-هاوکینز

فرمول‌بندی FW-H از رایج‌ترین شکل تشابه آکوستیکی لایت هیل بوده و قادر به پیش‌بینی صوت تولیدشده توسط منابع صوتی است. معادله فاکس ویلیامز-هاوکینز در اصل یک معادله موج ناهمگن است که می‌توان با دستکاری و ساده‌سازی معادله پیوستگی و معادلات ناویر استوکس آن را به دست آورد. معادله FW-H را می‌توان به صورت زیر نوشت [۳]:

$$\frac{1}{a_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \left\{ T_{ij} H(f) \right\} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left[P_{ij} n_j + \rho u_i (u_n - v_n) \right] \delta(f) \right\} + \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \left[\rho_0 v_n + \rho (u_n - v_n) \right] \delta(f) \right\} \quad (1)$$

که در آن، u_i مؤلفه سرعت در جهت x_i ، u_n مؤلفه نرمال سرعت سیال روی سطح $f=0$ ، v_n مؤلفه نرمال سرعت سطح، n_i بردار یکه نرمال، $\delta(f)$ تابع دلتا دیراک و $H(f)$ تابع هویساید است. $F=0$ یک سطح ریاضیاتی است برای معرفی سطوح جامد (پره‌های توربین بادی) به عنوان منبع تولید نویز، که برای جریان خارجی تعبیه شده است. همچنین p' و a_0 به ترتیب معرف فشار صوت و سرعت صوت هستند.

در معادله (۱) ترم‌های سمت راست معادله بیان‌کننده منابع نویز هستند؛ به گونه‌ای که ترم اول شامل تانسور تنش لایت هیل^۶ (T_{ij}) است که بر روی حجم کنترل انتگرال‌گیری می‌شود. این ترم نشان‌دهنده تولید صدا ناشی از جریان آشفته است. با توجه به مقدار

ناحیه دوار است که به صورت مستطیلی شکل است. در شکل (۱) ابعاد ناحیه محاسباتی و شرایط مرزی اعمال‌شده به تصویر کشیده شده است. همان‌طور که در شکل (۱) آورده شده، ابعاد ناحیه دوار و ساکن وابسته به قطر خارجی روتور ترکیبی (D_1) است. قطر ناحیه دوار $1/5 D_1$ انتخاب شده و اندازه طول و عرض ناحیه ساکن به ترتیب $30 D_1$ و $20 D_1$ اعمال شده است. با توجه به شکل (۱)، مرکز روتور ترکیبی $5 D_1$ از طرف ورودی و $10 D_1$ از هر دو مرز بالا و پایین واقع شده است. در مورد شرایط مرزی مورد استفاده در مطالعه حاضر، برای مرزهای ورودی و خروجی، به ترتیب سرعت ورودی یکنواخت با شدت آشفتگی ثابت ۵٪ و فشار خروجی یک اتمسفر مدل شده است. علاوه بر این، در مرزهای فوقانی و پایینی ناحیه ساکن، شرایط مرزی متقارن تعریف شده و شرایط مرزی بدون لغزش بر روی تمام سطوح پرها اعمال شده است. بین ناحیه دوار و ساکن، شرط مرزی مشترک استفاده شده است. شرایط مرزی سطح مشترک با مدل مش لغزشی^۱ استفاده شده است.

۳. جزئیات عددی و معادلات حاکم بر مسئله

برای تجزیه و تحلیل رفتار آکوستیکی توربین بادی ترکیبی نیاز است تا میدان فشار به وجود آمده توسط روتور محاسبه و شبیه‌سازی گردد. برای این منظور، ابتدا معادلات پیوستگی و مومنتوم برای هندسه مورد نظر به صورت عددی و با کمک دینامیک سیالات محاسبه می‌گردد که نتایج آن در مرجع [۱۶] آورده شده است. با توجه به گستردگی و چالش‌های موجود در اندازه‌گیری نویز تولیدشده در سیالات، روش‌ها و تقریب‌های عددی متعددی برای اندازه‌گیری آکوستیک ارائه شده است. به‌طور کلی سه روش متداول محاسباتی برای تعیین نویز آیرودینامیکی در دینامیک سیالات محاسباتی وجود دارد که عبارت‌اند از: ۱. روش مستقیم؛ ۲. روش انتگرالی مبتنی بر مقیاس آکوستیک؛ ۳. مدل‌های پهن باند^۴ [۲۱].

در روش مستقیم انتشار صوت به صورت مستقیم اندازه‌گیری می‌شود. نقطه ضعف این روش این است که توانایی اندازه‌گیری صدا در دوردست‌های میدان حل را ندارد و بیشتر برای اندازه‌گیری نویز در نزدیکی میدان محاسباتی به کار گرفته می‌شود. مدل‌های پهن باند، صوت تولیدشده را رهگیری کرده و هیچ اطلاعاتی در مورد سطح صدای تولیدشده در اختیار نمی‌گذارد. به عبارتی دیگر، هیچ صدایی تن متمایزی ندارد. در روش انتگرالی مبتنی بر مقیاس

1. Sliding Mesh Model
2. Direct Method
3. Integral Method Based on Acoustic Analogy
4. Broadband Noise Source Models

نسبت سرعت نوک (TSR): یک مقدار بی‌بعد بوده و معرف نسبت سرعت نوک پره به سرعت جریان آزاد باد است.

$$TSR = \frac{R \cdot \omega_0}{U_\infty} = \frac{D_1 \cdot \omega_0}{2U_\infty} \quad (4)$$

در معادله فوق، R معرف شعاع روتور ترکیبی و ω_0 بیان‌کننده سرعت زاویه‌ای توربین بادی ترکیبی است. همچنین U_∞ سرعت آزاد باد است.

فشار صوت: یکی از کمیاتی که در مبحث صوت بیشتر در مورد صوت حائز اهمیت است، فشار صوت^۴ است. وقتی که تعادل فشار به هم می‌خورد، چون عامل برهم‌زننده، صوت بوده است، فشار به وجود آمده را فشار صوت می‌نامند. فشار صوت در هر نقطه، نیروی وارده بر واحد سطح به وسیله امواج صوتی است. تغییرات فشار در محیطی را که در آن تعادل فشار به هم خورده است، فشار صوت می‌نامند [۲۳].

$$\text{Sound pressure} = P - P_{\text{atm}} \quad (5)$$

در معادله بالا P فشار اندازه‌گیری شده (توسط دریافت‌کننده) در نقطه مورد نظر است. واحد فشار صوت در دستگاه SI، پاسکال است.

تراز فشار صوت (SPL): گوش انسان به دامنه بسیار وسیع انرژی صوتی یعنی از 0.00002 پاسکال تا 200 پاسکال حساس است؛ بنابراین یک اشل لگاریتمی برای نمایش شدت صدا در نظر گرفته شده است. در این اشل لازم است که یک تراز مبنا به‌عنوان تراز فشار صوت در نظر گرفته شود. این تراز مبنا را ضعیف‌ترین صوتی انتخاب کرده‌اند که یک مرد جوان سالم می‌تواند بشنود. این تراز منطبق است بر تغییر فشاری مساوی 0.00002 پاسکال بر پرده گوش. برای فشارهای مختلف، تراز فشار صوت به صورت زیر به دست می‌آید [۲۳]:

$$SPL = 20 \log \frac{P}{P_{\text{ref}}} \quad (6)$$

در رابطه (۶) پارامتر SPL برابر با تراز فشار صوت برحسب دسیبل (dB)، P مقدار فشار مؤثر اندازه‌گیری شده مورد نظر برحسب پاسکال و P_{ref} فشار مبناست که برابر 0.00002 پاسکال انتخاب می‌شود.

۴. حساسیت نتایج به تعداد و اندازه شبکه‌بندی

عدد رینولدز، جریان در این مطالعه آشفته بوده و برای حل عددی جریان آشفته از روش متوسط‌گیری زمانی^۱ استفاده شده است. همچنین برای مدل‌سازی تنش آشفته‌گی روش SST k- ω به کار گرفته شده که جزئیات کامل در مرجع [۱۶] آورده شده است. ترم‌های دوم و سوم در سمت راست معادله (۱) به ترتیب نشان‌دهنده تولید صدا ناشی از حضور و حرکت جسم جامد است.

T_{ij} تانسور تنش لایت هیل است که به صورت زیر تعریف می‌شود [۳]:

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + P_{ij} - a_0^2 (\rho - \rho_0) \delta_{ij} \quad (2)$$

P_{ij} تانسور تنش فشاری به صورت زیر بیان می‌شود [۳]:

$$P_{ij} = p \delta_{ij} - \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] \quad (3)$$

برای حل معادله (۳) از تابع گرین استفاده می‌شود که در مرجع [۲۲] به صورت کامل توضیح داده شده است.

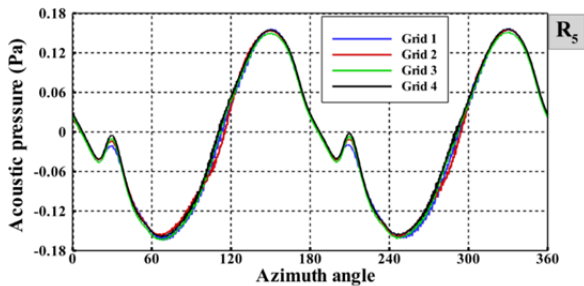
مدل FW-H کلی‌ترین شکل برای محاسبه آکوستیک در نرم‌افزار انسیس فلونت^۲ است که قادر به پیش‌بینی صدای تولیدشده توسط منابع صوتی برای توربین بادی ترکیبی است. نرم‌افزار انسیس فلونت با استفاده از این مدل یک فرمول انتگرال زمانی برای محاسبه فشار صوت تولیدشده در طول زمان را برای توربین بادی اتخاذ می‌کند. برای محاسبه فشار صوت در دریافت‌کننده‌های مورد نظر نیاز به حل متغیرهای میدان جریان است که وابسته به زمان هستند (سرعت و فشار جریان)؛ برای این کار از انتگرال سطح استفاده می‌شود. مدل آکوستیک فاکس ویلیامز-هاوکینز در نرم‌افزار انسیس فلونت این اجازه را می‌دهد که فشار صوت برای دریافت‌کننده‌هایی با موقعیت‌های مختلف و برای تعداد دلخواه سطوح جامد محاسبه گردد. نرم‌افزار انسیس فلونت، سیگنال‌های فشار صوتی به دست آمده را با استفاده از تبدیل سریع فوری^۳ و قابلیت‌های پس‌پردازش، پارامترهای مختلف آکوستیک و نمودارهای مربوطه را پردازش می‌کند.

۲.۳. پارامترهای عملکردی

عملکرد آکوستیکی توربین بادی محور عمودی ترکیبی را می‌توان با روابط مختلف تجزیه و تحلیل کرد. روابط موجود برای تجزیه و تحلیل عملکرد توربین بادی ترکیبی داریوس-ساونیوس به شرح زیر است:

1. Reynolds Averaged Navier-Stokes
2. Ansys Fluent
3. Fast Fourier Transform (FFT)

در این بخش، تأثیر تعداد و اندازه شبکه اعمال شده در میدان محاسباتی بر نتایج عددی حاصل از بررسی رفتار آکوستیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. اندازه، تعداد و نوع شبکه‌های استفاده شده در مطالعه آکوستیک همانند شبکه‌های بررسی شده در رفتار آیرودینامیکی روتور ترکیبی مورد نظر است [۱۶]. در شکل (۳) توزیع شبکه و شبکه‌بندی اعمال شده بر روتور ترکیبی قابل مشاهده است. همان‌طور که دیده می‌شود، شبکه‌بندی در قسمت‌هایی که دریافت کننده‌ها قرار گرفته‌اند، به دلیل مدل‌سازی صحیح گردابه‌ها ریز است. برای بررسی دقیق استقلال نتایج از شبکه‌بندی در عملکرد آکوستیکی توربین بادی ترکیبی، نتایج، برای دورترین دریافت کننده (R_5) و نزدیک‌ترین دریافت کننده (R_1) استخراج شده است. این حساسیت در شرایط $TSR = 3/5$ و $U_\infty = 10 \text{ m/s}$ مطالعه شده است. همه نتایج برای دور بیستم روتور ترکیبی استخراج شده است. شکل (۴) و شکل (۵) تغییرات فشار آکوستیک نسبت به زاویه فضایی در یک دور کامل روتور ترکیبی به ترتیب در دریافت کننده‌های R_5 و R_1 را نشان می‌دهند.



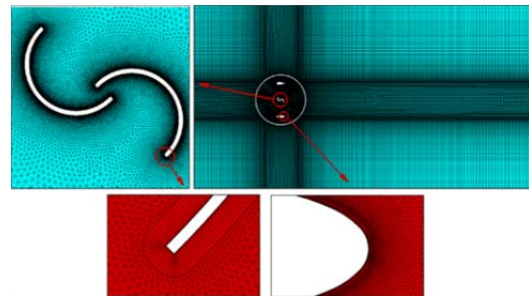
شکل (۵): تجزیه و تحلیل حساسیت شبکه برای روتور ترکیبی در دورترین دریافت کننده (R_5): تغییرات فشار آکوستیک در یک دور کامل روتور ترکیبی برای اندازه‌های مختلف شبکه در $TSR = 3/5$ و $U_\infty = 10 \text{ m/s}$

۵. حساسیت نتایج به گام زمانی

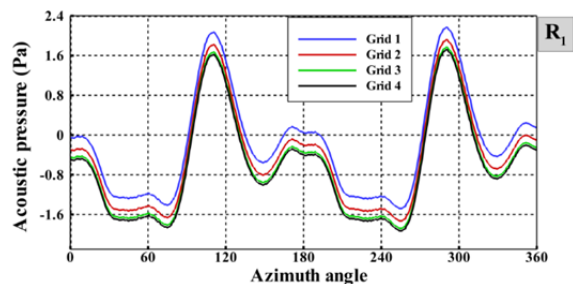
یکی از پارامترهایی که دقت بررسی عددی رفتار آکوستیکی توربین بادی را تحت الشعاع قرار می‌دهد، اندازه گام زمانی است. برای شبیه‌سازی منابع صوتی چهار قطبی که از ساختارهای گردابه‌ای و رتیسیت ناشی می‌شوند، لازم است تا اندازه گام زمانی به درستی انتخاب گردد. در این قسمت از تحلیل حساسیت، استقلال نتایج به دست آمده از اندازه گام زمانی در نزدیک‌ترین دریافت کننده (R_1) و دورترین دریافت کننده (R_5) مورد بحث قرار می‌گیرد. در این مطالعه، برای انتخاب اندازه گام زمانی مناسب و صحیح، پنج اندازه مختلف برای $d\theta$ مانند $0/1^\circ$ ، $0/2^\circ$ ، $0/3^\circ$ ، $0/4^\circ$ و $0/5^\circ$ در دریافت کننده‌های R_5 و R_1 بررسی شدند. قابل ذکر است که مقدار گام زمانی برابر با مدت زمانی است که طول می‌کشد تا روتور $d\theta$ درجه بچرخد. این روش در بسیاری از مطالعات آیرودینامیکی توربین بادی مانند [۱۶-۱۸ و ۲۴] مشاهده شده است. این تجزیه و تحلیل حساسیت برای $TSR = 3/5$ و $U_\infty = 10 \text{ m/s}$ انجام می‌شود و تغییرات به دست آمده از فشار آکوستیک در یک دور کامل برای دریافت کننده R_1 در شکل (۶) و برای دریافت کننده R_5 در شکل (۷)، جداگانه گزارش شده است.

بررسی نتایج به دست آمده در شکل‌های (۶) و (۷) نشان می‌دهد که در دریافت کننده‌های R_5 و R_1 ، تغییرات فشار آکوستیک نسبت

در این بخش، تأثیر تعداد و اندازه شبکه اعمال شده در میدان محاسباتی بر نتایج عددی حاصل از بررسی رفتار آکوستیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. اندازه، تعداد و نوع شبکه‌های استفاده شده در مطالعه آکوستیک همانند شبکه‌های بررسی شده در رفتار آیرودینامیکی روتور ترکیبی مورد نظر است [۱۶]. در شکل (۳) توزیع شبکه و شبکه‌بندی اعمال شده بر روتور ترکیبی قابل مشاهده است. همان‌طور که دیده می‌شود، شبکه‌بندی در قسمت‌هایی که دریافت کننده‌ها قرار گرفته‌اند، به دلیل مدل‌سازی صحیح گردابه‌ها ریز است. برای بررسی دقیق استقلال نتایج از شبکه‌بندی در عملکرد آکوستیکی توربین بادی ترکیبی، نتایج، برای دورترین دریافت کننده (R_5) و نزدیک‌ترین دریافت کننده (R_1) استخراج شده است. این حساسیت در شرایط $TSR = 3/5$ و $U_\infty = 10 \text{ m/s}$ مطالعه شده است. همه نتایج برای دور بیستم روتور ترکیبی استخراج شده است. شکل (۴) و شکل (۵) تغییرات فشار آکوستیک نسبت به زاویه فضایی در یک دور کامل روتور ترکیبی به ترتیب در دریافت کننده‌های R_5 و R_1 را نشان می‌دهند.



شکل (۳): تصویری از شبکه‌بندی اعمال شده بر ناحیه محاسباتی و سطوح پره‌ها

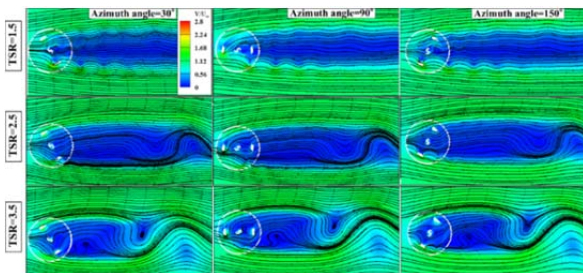


شکل (۴): تجزیه و تحلیل حساسیت شبکه برای روتور ترکیبی در نزدیک‌ترین دریافت کننده (R_1): تغییرات فشار آکوستیک در یک دور کامل روتور ترکیبی برای اندازه‌های مختلف شبکه در $TSR = 3/5$ و $U_\infty = 10 \text{ m/s}$

با توجه به شکل‌های (۴) و (۵) می‌توان دریافت که در نزدیک‌ترین نقطه به ناحیه چرخان که دریافت کننده R_1 قرار دارد اختلاف بین شبکه‌های ۱ تا ۳ بیشتر بوده ولی اثرگذاری شبکه‌بندی

ترکیبی برای $1/5$ و $2/5$ ، $3/5$ و $TSR = 3/5$ و $U_{\infty} = 5 \text{ m/s}$ در زوایای فضایی مختلف مانند 30° ، 90° و 150° را نشان می‌دهد. پس‌زمینه شکل (۸) کاتور سرعت لحظه‌ای بی‌بعد شده را نشان می‌دهد.

همان‌طور که شکل (۸) نشان می‌دهد در $TSR=1/5$ در پایین‌دست روتور، خطوط جریان به‌صورت آرام در لایه‌های مشخص حرکت می‌کنند و نظم مشخصی دارند، به‌طوری‌که این حالت در تمام زوایای فضایی دیده می‌شود؛ اما با افزایش TSR از $1/5$ به $2/5$ و در زاویه فضایی 30° ، در پایین‌دست روتور شاهد بی‌نظمی در خطوط جریان هستیم که با کوچک‌ترین تغییرات می‌تواند گردابه‌هایی در میدان سرعت ایجاد شود. این بی‌نظمی‌ها در زوایای فضایی 90° و 150° هم ادامه دارد. در نهایت، در $TSR=3/5$ این اعوجاج در خطوط جریان باعث تشکیل گردابه‌هایی در قسمت پایین‌دست روتور شده که این اتفاق در زاویه فضایی 30° قابل رؤیت است؛ اما با افزایش زاویه فضایی، این گردابه‌ها ضعیف‌تر شده و در زاویه فضایی 150° ، دورترین گردابه از روتور ضعیف‌تر شده و به‌نوعی از بین رفته است. بنابراین، با توجه به شکل (۸)، می‌توان احتمال داد که روتور ترکیبی در $TSR=3/5$ صدای بیشتری نسبت به حالت‌های دیگر تولید کند.

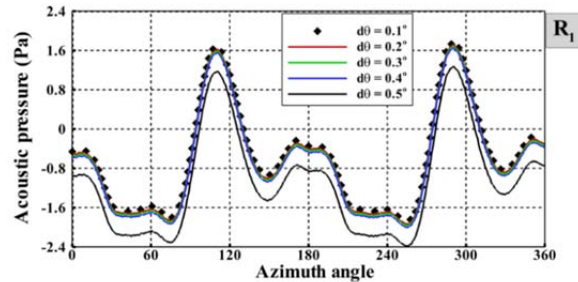


شکل (۸): خطوط جریان و میدان سرعت بی‌بعد شده لحظه‌ای در اطراف روتور ترکیبی در زوایای فضایی مختلف مانند 30° ، 90° و 150° برای $1/5$ و $2/5$ و $3/5$ و $U_{\infty} = 5 \text{ m/s}$

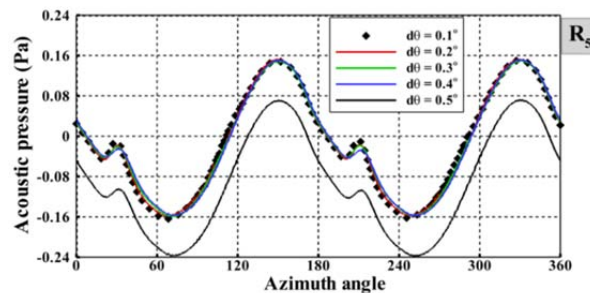
۱.۷. تأثیر فاصله دریافت‌کننده‌ها از روتور بر سطح صدای تولید شده

صدای تولید شده در دریافت‌کننده، به مکان و موقعیت قرارگیری دریافت‌کننده نسبت به منبع نویز وابسته است. با توجه به مکان دریافت‌کننده‌ها در پایین‌دست روتور، سطح صدای تولید شده در هریک از دریافت‌کننده‌ها برای روتور ترکیبی محاسبه می‌شود. این تجزیه و تحلیل سروصدای ناشی از توربین بادی با استفاده از تبدیل سریع فوریه انجام می‌گردد. شکل (۹) سطح فشار صوت (با واحد اندازه‌گیری (dB)) تولید شده در دریافت‌کننده‌های مختلف نسبت به فرکانس چرخشی روتور را نشان می‌دهد. این بررسی در شرایط

به زاویه فضایی برای $d\theta$ های مختلف بین 0.1° تا 0.4° با یکدیگر مطابقت خوبی دارند. با این حال، با افزایش $d\theta$ از 0.4° تا 0.5° ، می‌توان انحراف قابل توجهی بین فشار آکوستیک در هر زاویه فضایی مشاهده کرد. بنابراین، برای داشتن نتایج دقیق‌تر، مقدار 0.4° به‌عنوان $d\theta$ مطلوب در نظر گرفته می‌شود و همه محاسبات با این مقدار انجام شده است.



شکل (۶): تجزیه و تحلیل حساسیت اندازه گام زمانی در فشار آکوستیکی روتور ترکیبی برای دریافت‌کننده R_1 در $TSR = 3/5$ و $U_{\infty} = 10 \text{ m/s}$



شکل (۷): تجزیه و تحلیل حساسیت اندازه گام زمانی در فشار آکوستیکی روتور ترکیبی برای دریافت‌کننده R_5 در $TSR = 3/5$ و $U_{\infty} = 10 \text{ m/s}$

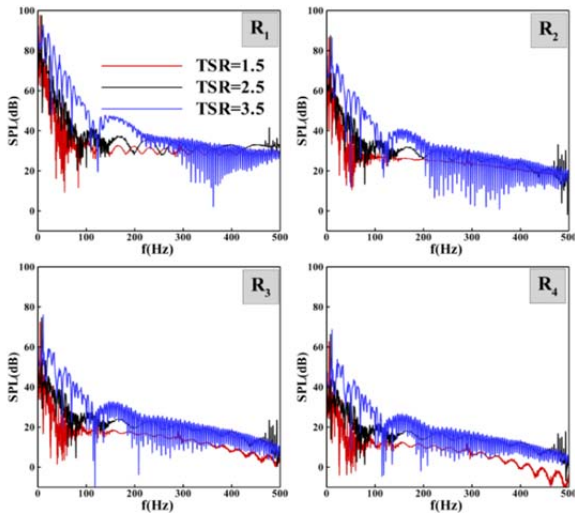
۶. اعتبارسنجی نتایج عددی

اعتبارسنجی مدل حل انتخاب شده برای تحلیل رفتار توربین بادی، آخرین مرحله برای اعتمادسازی نتایج به‌دست آمده است. مقایسه اعتبارسنجی بین توربین بادی جدید با نتایج عددی و تجربی در مرجع [۱۶] منتشر شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌سازی هم‌خوانی خوبی با داده‌های عددی و تجربی دارد.

۷. بحث بر روی نتایج

نتایج به‌دست آمده در مورد فیزیک جریان در اطراف روتور ترکیبی و سطح صدای تولید شده در این بخش مورد بحث قرار گرفته است. نتایج براساس مقادیر TSR و U_{∞} برای یک دور کامل روتور ترکیبی ارائه شده است. شکل (۸) خطوط جریان لحظه‌ای در اطراف روتور

قسمت، تأثیر مقدار نسبت سرعت نوک بر صدای تولیدشده توسط توربین بادی بررسی می‌شود. سه مقدار مختلف نسبت سرعت نوک (۱/۵، ۲/۵، ۳/۵) برای ارزیابی سطح صدای تولیدشده در تمام دریافت‌کننده‌ها استفاده شده است. این مطالعه در شرایط $U_{\infty} = 5$ m/s انجام شده است. شکل (۱۰) تغییرات سطح فشار آکوستیک توربین بادی ترکیبی با روتور داخلی نوع متعارف در دریافت‌کننده‌های مختلف برای سه مقدار متفاوت ۱/۵، ۲/۵، ۳/۵ را به تصویر کشیده است.

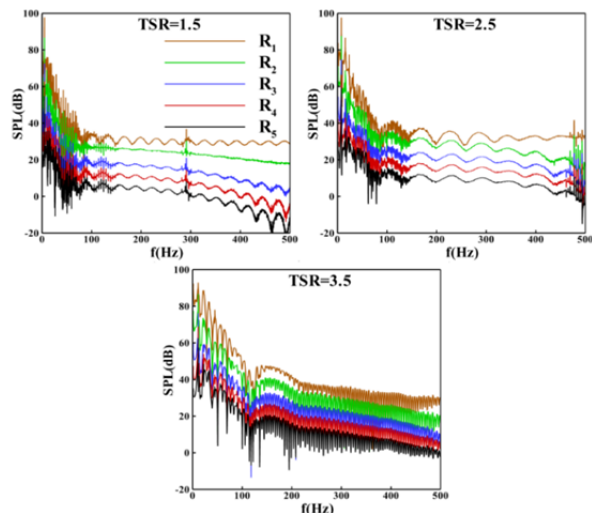


شکل (۱۰): تأثیر مقدار نسبت سرعت نوک بر صدای تولیدشده توسط روتور ترکیبی: تغییرات سطح فشار آکوستیک نسبت به فرکانس چرخشی روتور در دریافت‌کننده‌های مختلف تحت شرایط $U_{\infty} = 5$ m/s

شکل (۱۰) نشان می‌دهد با افزایش مقدار TSR ، سطح نویز تولیدشده افزایش یافته است. این مسئله در تمام دریافت‌کننده‌ها مشهود است. این افزایش سطح فشار صوت، به دلیل تشکیل گردابه در پایین‌دست روتور است که در $TSR = 3/5$ مشاهده می‌شود (شکل ۸). همچنین با افزایش مقدار TSR ، میدان سرعت در داخل روتور ضعیف‌تر می‌شود؛ به عبارتی نفوذ هوا به داخل روتور کاهش می‌یابد و باعث قوی‌تر شدن میدان فشار می‌گردد که این امر منجر به تقویت منبع صوتی دوقطبی شده، سطح صدا افزایش می‌یابد. با بررسی دقیق نتایج می‌توان دریافت در دریافت‌کننده R_1 ، با افزایش TSR از ۱/۵ تا ۲/۵ و ۳/۵ مقدار متوسط سطح فشار صوت به ترتیب برابر ۳۲/۶، ۳۶/۹ و ۴۰/۹ دسیبل است که این مقادیر در دریافت‌کننده R_4 ، به ترتیب برابر ۱۵/۵، ۷/۶۴ و ۱۸/۶ دسیبل ثبت شده است. این گزارش نشان‌دهنده افزایش ۲۵/۵ درصدی سطح فشار صوت با افزایش TSR از ۱/۵ تا ۳/۵ در دریافت‌کننده R_1 است.

۱/۵ و ۲/۵، $TSR = 3/5$ و $U_{\infty} = 5$ m/s و در بازه فرکانسی ۰ تا ۵۰۰ هرتر ارزیابی شده است.

همان‌طور که در شکل (۹) نشان داده شده، با بررسی دریافت‌کننده‌ها می‌توان فهمید که در پایین‌دست توربین بادی، با فاصله گرفتن از روتور سطح فشار صوت کاهش یافته است؛ به طوری که بیشترین سطح صدا در پایین‌دست روتور توسط دریافت‌کننده R_1 ثبت شده است. این موضوع برای هر سه مقدار TSR مشاهده می‌شود. علاوه بر این، کمترین سطح صدای تولیدشده بین تمام دریافت‌کننده‌ها، توسط دریافت‌کننده R_5 گزارش شده است. دلیل این اتفاق می‌تواند اثر منابع دوقطبی و تک‌قطبی باشد که با فاصله گرفتن از روتور اثرات این دو منبع کاهش می‌یابد. به طور کلی مشخص است که سطح فشار صوت در دریافت‌کننده بستگی به فاصله بین دریافت‌کننده و توربین بادی دارد. موضوع دیگری که می‌توان در شکل مشاهده کرد، این است که در $TSR = 3/5$ ، تغییرات سطح صدای گزارش شده نسبت به TSR ‌های ۱/۵ و ۲/۵ در طول بازه فرکانسی مشخص دارای اعوجاج شدیدتری است که دلیل این رخداد را می‌توان با توجه به شکل (۸)، وجود گردابه در پایین‌دست روتور دانست که منجر به ایجاد منبع صوتی چهارقطبی شده است.



شکل (۹): مطالعه تأثیر فاصله بین دریافت‌کننده و منبع نویز بر سطح فشار صوت تولیدشده در روتور ترکیبی برای شرایط ۱/۵ و ۲/۵ و ۳/۵ = TSR و $U_{\infty} = 5$ m/s

۲.۷. تأثیر نسبت سرعت نوک بر سطح صدای تولیدشده

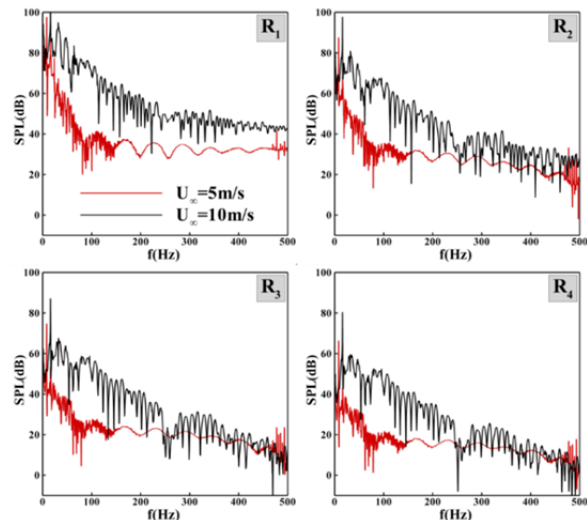
نسبت سرعت نوک (TSR) یک عدد بی‌بعد است که وابسته به سرعت زاویه‌ای، قطر روتور و سرعت آزاد باد است. در این

بر نویز تولیدشده توسط روتور به‌صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفت. در همین راستا، رفتار روتور ترکیبی در شرایطهای مختلف مانند $U_{\infty} = 5, 10, 15, 20, 25$ m/s و $TSR = 1/5$ شبیه‌سازی شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند که صدای تولیدشده وابستگی بسیاری به تشکیل گردابه‌ها داشته و با تشکیل گردابه در پایین‌دست روتور، سطح صدای تولیدشده افزایش می‌یابد. علاوه‌بر آن، با دور شدن از روتور، در پایین‌دست، سطح فشار صوت در دریافت‌کننده‌ها کاهش می‌یابد. نسبت سرعت نوک، رابطه مستقیم با سطح فشار صوت دارد، یعنی با افزایش مقدار TSR ، سطح صدای تولیدشده بالا می‌رود؛ به‌طوری‌که با افزایش مقدار TSR از $1/5$ تا $3/5$ ، سطح فشار صوت در نزدیک‌ترین دریافت‌کننده (R_1) ۲۵ درصد افزایش می‌یابد. همچنین این ارتباط بین سرعت آزاد باد و سطح فشار صوت هم برقرار است، به این صورت که با افزایش عدد رینولدز، صدای بیشتری تولید می‌شود؛ به‌گونه‌ای که با افزایش عدد رینولدز، سطح فشار صوت در نزدیک‌ترین دریافت‌کننده به مقدار $18/5$ دسیبل افزایش یافته است.

۳.۷. تأثیر سرعت آزاد باد بر سطح صدای تولیدشده
یکی از عوامل اصلی ایجاد صوت، سرعت آزاد باد است. در این بخش از مطالعه، تأثیر سرعت آزاد باد بر سطح فشار آکوستیک بررسی می‌شود. این مطالعه در $TSR = 2/5$ ارزیابی شده است. شکل (۱۱) تغییرات فشار آکوستیک نسبت به فرکانس چرخش روتور برای روتور ترکیبی در سرعت‌های آزاد باد ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. همان‌طور که نشان داده شده است، با افزایش سرعت آزاد باد از 5 m/s تا 10 m/s، سطح صدای تولیدشده افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که این اتفاق توسط همه دریافت‌کننده‌ها گزارش شده است. شدت تولید صدای منابع صوتی تک‌قطبی ارتباط مستقیم با سرعت آزاد باد دارند که با افزایش سرعت حرکت سیال، شدت صدای تولیدشده توسط منبع تک‌قطبی افزایش می‌یابد. به همین دلیل در شکل (۱۱)، با افزایش سرعت آزاد باد، سطح فشار آکوستیک نیز افزایش یافته است. بیشترین سطح فشار آکوستیک ایجادشده در روتور توسط دریافت‌کننده R_1 ثبت شده است؛ به‌گونه‌ای که در دریافت‌کننده R_1 با افزایش سرعت آزاد باد، سطح صدای تولیدشده $18/5$ دسیبل و به عبارتی ۵۰ درصد افزایش می‌یابد.

علائم

سرعت صوت	a_0
طول پره‌های روتور ساونیوس	d
تغییر زاویه چرخش روتور	$d\theta$
قطر روتور داریوس	D_1
قطر روتور ساونیوس	D_2
تابع هویساید	$H(f)$
فشار صوت	p'
تانسور تنش فشاری	P_{ij}
عدد رینولدز	Re
زمان	t
تانسور تنش لایت هیل	T_{ij}
نسبت سرعت نوک	TSR
مؤلفه سرعت	u_i
سرعت آزاد باد	U_{∞}
مؤلفه نرمال سرعت سطح	v_n
سرعت (velocity magnitude)	V
مؤلفه مختصات	x_j
سرعت زاویه‌ای روتور	ω_0
تابع دلتا دیراک	$\delta(f)$



شکل (۱۱): تغییرات فشار آکوستیک نسبت به فرکانس چرخش روتور برای روتور ترکیبی در سرعت‌های آزاد باد ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه تحت $TSR = 2/5$

۸. نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر رفتار آکوستیکی توربین بادی ترکیبی متشکل از پره‌های داریوس و ساونیوس (نوع متعارف) بررسی شده است. ابتدا برای صحت‌سنجی مدل‌سازی، حساسیت نتایج نسبت به گام زمانی ارزیابی شد و حالت بهینه برای ادامه محاسبات انتخاب شد. در این مقاله، تأثیر نسبت سرعت نوک، سرعت آزاد باد و فاصله دریافت‌کننده‌ها

- [1] Kelley, ND., McKenna, H., Hemphill, R., Etter, C., Garrelts, R., Linn, N. "Acoustic noise associated with the MOD-1 wind turbine: its source, impact, and control. *Solar Energy Research*", Inst.(SERI), Golden, CO (United States), 1985.
- [2] Robinson, DW., Dadson, RS., "A re-determination of the equal-loudness relations for pure tones", *British Journal of Applied Physics*, Vol. 7, No. 5, pp. 144-166, 1956. <https://doi.org/10.1088/0508-3443/7/5/302>
- [3] Mohamed, M., "Aero-acoustics noise evaluation of H-rotor Darrieus wind turbines", *Energy*, Vol. 65, pp. 596-604, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.031>.
- [4] Ghasemian, M., Nejat, A., "Aero-acoustics prediction of a vertical axis wind turbine using Large Eddy Simulation and acoustic analogy", *Energy*, Vol. 88, pp. 711-7, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.098>.
- [5] Mohamed, M., "Criticism study of J-Shaped Darrieus wind turbine: Performance evaluation and noise generation assessment", *Energy*, Vol. 177, pp. 367-85, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.102>.
- [6] Ottermo, F., Möllerström, E., Nordborg, A., Hylander, J., Bernhoff, H., "Location of aerodynamic noise sources from a 200 kW vertical-axis wind turbine", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 400, pp. 154-66, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.03.033>.
- [7] Ghazalla, R., Mohamed, M., Hafiz, A., "Synergistic analysis of a Darrieus wind turbine using computational fluid dynamics", *Energy*, Vol. 189, pp. 116214, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116214>.
- [8] Mohamed, M., "Reduction of the generated aero-acoustics noise of a vertical axis wind turbine using CFD (Computational Fluid Dynamics) techniques", *Energy*, Vol. 96, pp. 531-44, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.100>.
- [9] Liu, Q., Miao, W., Bashir, M., Xu, Z., Yu, N., Luo, S., et al., "Aerodynamic and aeroacoustic performance assessment of a vertical axis wind turbine by synergistic effect of blowing and suction", *Energy Conversion and Management*, Vol. 271, pp. 116-289, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116289>.
- [10] Su, J., Lei, H., Zhou, D., Han, Z., Bao, Y., Zhu, H., "Aerodynamic noise assessment for a vertical axis wind turbine using Improved Delayed Detached Eddy Simulation", *Renewable energy*, Vol. 141, pp. 559-69, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.038>.
- [11] Dessoky, A., Bangga, G., Lutz, T., Krämer, E., "Aerodynamic and aeroacoustic performance assessment of H-rotor darrieus VAWT equipped with wind-lens technology", *Energy*, Vol. 175, pp. 76-97, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.066>.
- [12] Thambidurai Arasi, TR., Shubham, S., Ianakiev, A., "Effect of blade shape on aerodynamic and aeroacoustic characteristics of vertical axis wind turbines using mid-fidelity and high-fidelity methods", *Conference InAIAA SCITECH 2024*, Forum 2024. <https://doi.org/10.2514/6.2024-1488>.
- [13] Shubham, S., Avallone, F., Brandetti, L., Wright, N., Ianakiev, A., "Effect of struts and central tower on aerodynamics and aeroacoustics of vertical axis wind turbines using mid-fidelity and high-fidelity methods", *InAIAA SCITECH 2024*, Forum 2024. <https://doi.org/10.2514/6.2024-1485>.
- [14] Ghasemian, M., Nejat, A., "Aerodynamic noise prediction of a horizontal axis wind turbine using improved delayed detached eddy simulation and acoustic analogy", *Energy Conversion and Management*, Vol. 15, No. 99, pp. 210-20, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.04.011>.
- [15] Shubham, S., Wright, N., Avallone, F., Ianakiev, A., "Aerodynamic and aeroacoustic investigation of vertical axis wind turbines with different number of blades using mid-fidelity and high-fidelity methods", *InAIAA AVIATION 2023*, Forum 2023. <https://doi.org/10.2514/6.2023-3642>.
- [16] Asadi, M., Hassanzadeh, R., "Effects of internal rotor parameters on the performance of a two bladed Darrieus-two bladed Savonius hybrid wind turbine", *Energy Conversion and Management*, Vol. 238, pp. 114-109, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114109>.
- [17] Asadi, M., Hassanzadeh, R., "Assessment of Bach-type internal rotor on the performance of a hybrid wind turbine: effects of attachment angle, tip speed ratio, and free-wind speed", *International Journal of Green Energy*, Vol. 21, No. 4, pp. 842-60, 2024. <https://doi.org/10.1080/15435075.2023.2220372>.
- [18] Asadi, M., Hassanzadeh, R., "On the application of semicircular and Bach-type blades in the internal Savonius rotor of a hybrid wind turbine system", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 221, pp. 104-903, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2022.104903>
- [19] Hassanzadeh, R., Mohammadnejad, M., "Effects of inward and outward overlap ratios on the two-blade Savonius type of vertical axis wind turbine performance", *International Journal of Green Energy*, Vol. 16, No. 15, pp. 1485-96, 2019. <https://doi.org/10.1080/15435075.2019.1671420>.
- [20] Saini, G., Saini, RP., "A numerical analysis to study the effect of radius ratio and attachment angle on hybrid hydrokinetic turbine performance", *Energy for Sustainable Development*, Vol. 47, pp. 94-106, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.09.005>.
- [21] Pearson, C., "Vertical axis wind turbine acoustics": University of Cambridge, 2014.
- [22] Nitzkorski, ZL., "A novel porous Ffowcs-Williams and Hawkings acoustic methodology for complex geometries": University of Minnesota, 2015.
- [23] Asadi, M., "Aero-acoustic analysis of a hybrid wind turbine composed of Darrieus and Savonius blades": Urmia University of Technology, 2021. <https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/08e125c561e9ac12be8296996cf917c1>

- [24] Rezaeiha, A., Kalkman, I., Blocken, B., "*Effect of pitch angle on power performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine*", Applied energy, Vol. 197, pp. 132-50, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.128>.