



The Effect of Cone Angle on the Aerodynamic Performance and Noise Pollution of a Horizontal Axis Wind Turbine

Alireza Bozorgi ^{a*}, Seyyed Ahmad Nourbakhsh ^b

^a Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

^b Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Original Article

Use your device to scan and read the article online



Citation: Bozorgi B, Nourbakhsh S A. The Effect of Cone Angle on the Aerodynamic Performance and Noise Pollution of a Horizontal Axis Wind Turbine. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2025;5(3):403-420.

 <https://10.66224/masm.5.3.403>

KEYWORDS

Wind Turbine,
Noise Pollution,
Numerical Simulation.

ABSTRACT

Noise pollution, particularly the low-frequency noise generated by wind turbines, is recognized as an environmental challenge that may have adverse effects on human health. In this study, the effect of blade cone angle (0° – 10°) on the low-frequency noise of a horizontal-axis wind turbine was investigated. To this end, the flow field around the turbine was first simulated for wind speeds ranging from 5 to 10 m/s using the Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS) equations coupled with the Shear Stress Transport (SST) turbulence model. Subsequently, the turbine noise, generated by sources located on and around the blades, was predicted using the Ffowcs Williams–Hawkings (FW–H) equation. The results showed that varying the blade cone angle from 0° to 10° changed the turbine power output by less than 5%; however, it had a significant influence on the propagation of low-frequency noise. It was also found that at a blade cone angle of 5° , the turbine not only achieved higher power output but also exhibited a lower peak sound pressure level than the planar turbine (0° blade cone angle 0°).

Extended Abstract

1. Introduction

Wind energy is one of the most important renewable energy sources for reducing dependence on fossil fuels, decreasing greenhouse gas emissions, and improving energy security. The global development of wind energy has increased rapidly in recent years. According to the Global Wind Energy Council (GWEC), more than 164 GW of new wind power capacity was installed worldwide in 2025, increasing the total installed capacity to more than 1.28 TW [1]. Moreover, the International Energy Agency (IEA) predicts continued growth of wind energy capacity until 2030 [2]. Advances in turbine design, cost reduction, and improved maintenance technologies have contributed to the increasing competitiveness of wind power in global energy systems [3–5].

Horizontal-axis wind turbines (HAWTs) are the dominant technology in the wind energy industry [6]. Based on power capacity, wind turbines are generally classified as large-, medium-, and small-scale turbines [7]. While large wind turbines are mainly installed in wind farms, small-scale wind turbines are increasingly used in

* Corresponding author. Tel.: +98-08633400682

E-mail address: bozorgi@arakut.ac.ir

DOI: <https://10.66224/masm.5.3.403>

Received: August 07, 2026; Received in revised form: August 14, 2026; Accepted: August 18, 2025.

© Author



distributed power generation systems, remote areas, residential buildings, and off-grid applications due to their flexibility and proximity to energy consumers [8–14].

Despite their advantages, noise emission is one of the major challenges associated with the application of small wind turbines, particularly in residential areas. Previous studies have shown that wind turbine noise may cause annoyance, sleep disturbance, and psychological effects among nearby residents [15–18]. Wind turbine noise is generally classified into mechanical and aerodynamic noise. Although mechanical noise has been significantly reduced through technological improvements, aerodynamic noise, consisting of low-frequency noise (LFN), inflow turbulence noise, and airfoil self-noise, remains a major problem [19].

The main frequencies of wind turbine LFN are in the infrasound range below 20 Hz. Although these frequencies are generally below the conventional lower limit of human hearing, their potential physiological effects have been investigated in previous studies [20]. Research has indicated that infrasound generated by wind turbines may disturb people exposed to high noise levels [21–23]. However, specific regulations for controlling wind turbine low-frequency noise are still limited, with Denmark being among the few countries that have established specific requirements in this field [24].

Blade cone angle is an important parameter affecting both aerodynamic performance and acoustic behavior of wind turbines. Changing this angle modifies the blade position relative to the incoming flow, affects boundary-layer development, and may influence flow separation and stall behavior [25–29]. Bozorgi et al. [30] investigated the effect of cone angle on the noise of the NREL Phase VI turbine [31], considering only noise sources located on the blade surface. However, later studies demonstrated the importance of noise sources in the flow field surrounding the blade [32].

Therefore, the objective of this study is to investigate the effect of blade cone angle on output power and low-frequency noise of the NREL Phase VI wind turbine by considering both blade and surrounding flow sources. The airflow around the turbine is simulated for cone angles from 0° to 10° and wind speeds of 5–10 m/s. The generated noise is then predicted using the Ffowcs Williams–Hawkings (FW–H) equation [33].

2. Flow Simulation

The investigated turbine is the NREL Phase VI wind turbine with a rotor diameter of 10.058 m. It consists of two twisted and tapered blades based on the S809 airfoil profile. Experimental data reported by Hand et al. [31] were used for validation of the numerical model.

The computational domain was developed using ANSYS Design Modeler. As shown in Figure 1, the tower was neglected due to its limited influence on the aerodynamic performance of upwind turbines. Furthermore, because of rotational periodicity, only one blade was modeled. The computational domain consisted of an inner rotating region around the blade and an outer stationary region. An unstructured mesh was generated in the rotating region, while a structured mesh was used in the stationary region. A boundary-layer mesh was also applied around the blade surface, resulting in y^+ values below 3.

In all cases, the flow simulations were continued until the fluctuations in the predicted power and axial force remained below 0.1% for at least 500 consecutive iterations. Three different mesh resolutions were evaluated to ensure mesh independence. The differences in predicted power and also axial force were less than 1%; therefore, the fine mesh containing approximately 3.6 million cells was selected. The flow field was solved using the Reynolds-averaged Navier–Stokes (RANS) equations with the SST turbulence model. The boundary conditions included uniform velocity at the inlet, static pressure at the outlet, no-slip condition on blade surfaces, and rotational periodicity at lateral boundaries. The numerical results were validated by comparing the predicted power output and axial force with experimental measurements. As shown in Figure 2, the numerical predictions agree well with the experimental data, confirming the reliability of the developed model.

1. FW-H equation

In the present work, the FW-H equation was used for the noise calculation. The equation is given by

$$\left\{ \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right\} [p'(x, t)H(f)] = \frac{\partial}{\partial t} (Q\delta(f)) - \frac{\partial}{\partial x_i} (L_i\delta(f)) + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} (T_{ij}H(f)) \quad (1)$$

where

$$Q = \rho_0 v_j \frac{\partial f}{\partial x_j}; L_i = P_{ij} \frac{\partial f}{\partial x_j} \quad (2)$$

In the above equations, Q , L_i and T_{ij} are monopole, dipole and quadrupole terms, respectively. δ is the Dirac delta function, H is the Heaviside function. c_0 is the speed of sound, ρ_0 is air density, p' is pressure fluctuations, v_j is the velocity component in the j -direction. $f(x,t) = 0$ is the position of data surface enclosing the blade as the noise source, such that $f > 0$ is outside the data surface and $f < 0$ is inside the data surface.

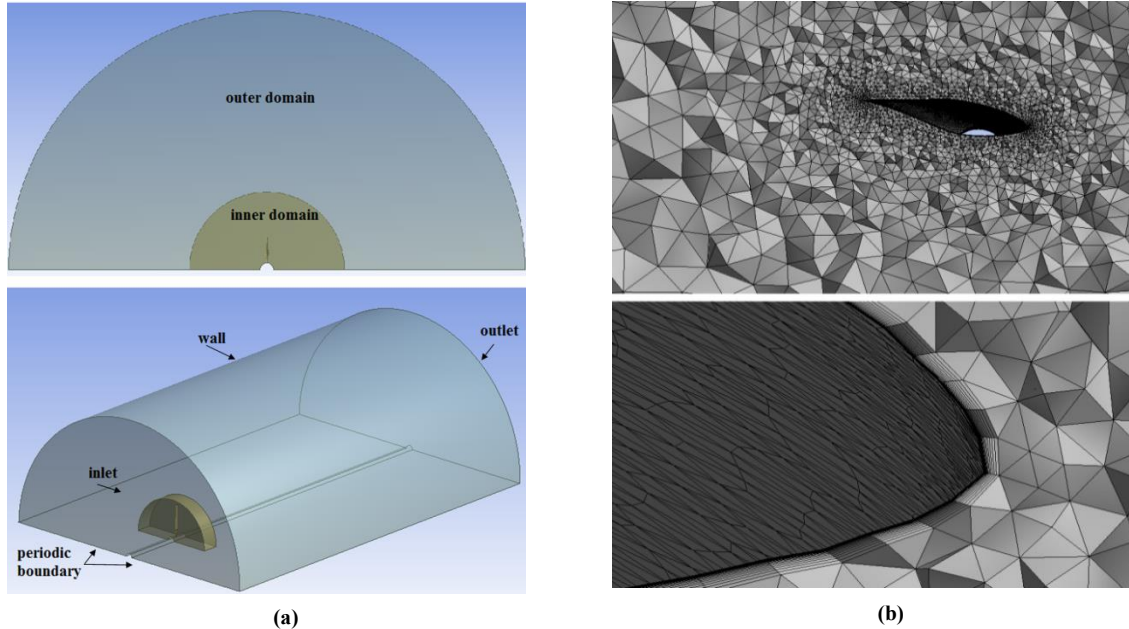


Figure 1. (a) Computational domain and boundary conditions, (b) Mesh and boundary layer grids around the blade

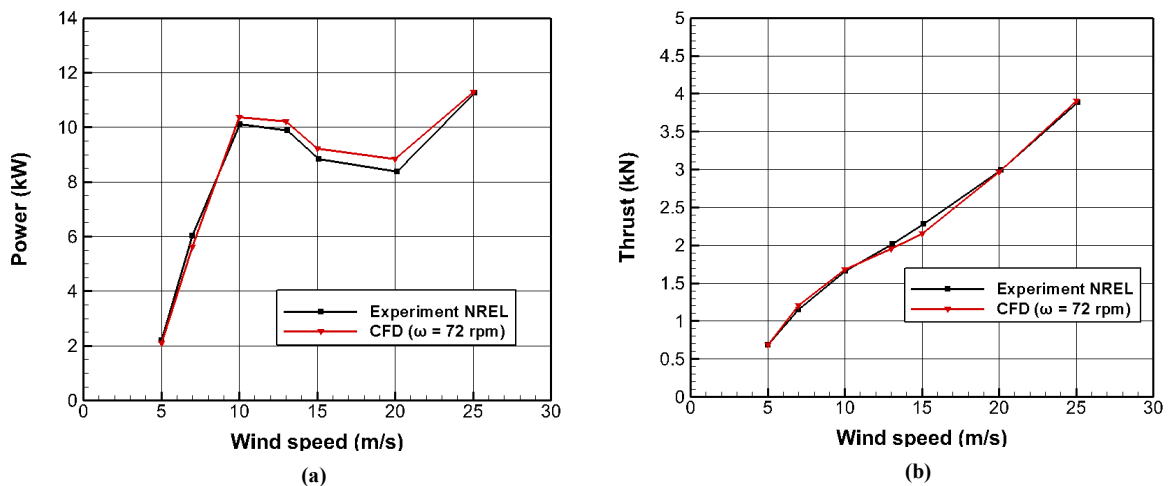


Figure 2. Comparison of CFD results and experimental data for a) power and b) axial force

The data surface was defined as an expanded surface surrounding the blade with a scaling factor of 5. Based on the findings of Bozorgi and Ghorbaniasl [32], this surface captures the major low-frequency noise sources of the turbine over the wind speed range of 5–10 m/s.

Observer points were positioned on a semicircle with a radius of 21 m around the rotor center (Figure 3). The observer angle θ was defined relative to the rotor plane, where $\theta = 90^\circ$ and -90° represent the upstream and downstream positions on the rotation axis, respectively. Due to axial symmetry, the low-frequency noise along the rotation axis is zero [36]. Although IEC 61400-11 recommends noise measurement at $\theta = -55^\circ$ and a distance of 21 m [35], observer points were defined within a wider range of -75° to $+75^\circ$ to provide a more comprehensive analysis.

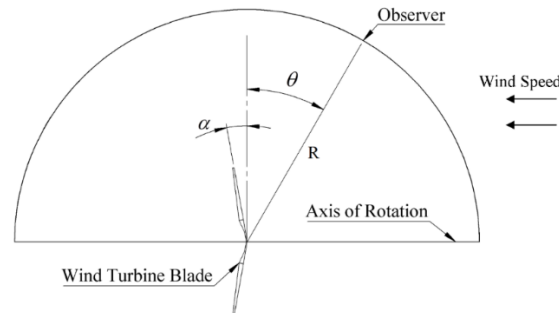


Figure 3. Description of the blade cone angle and the observer location

2. Results and Discussion

The effect of blade cone angle on turbine output power was investigated for cone angles ranging from 0° to 10° . The results showed that changing the cone angle has a limited effect on the aerodynamic performance of the turbine. The maximum change in power compared with the planar configuration (0° cone angle) remained below 5%. Overall, the maximum power within the investigated range of 5–10 m/s was obtained for the 5° cone angle configuration, as shown in Table 1.

Table 1. Turbine power in different blade cone angle

Wind speed (m/s)	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 2.5^\circ$		$\alpha = 5.0^\circ$		$\alpha = 7.5^\circ$		$\alpha = 10^\circ$	
	Power (W)	Power (W)	Diff (%)	Power (W)	Diff (%)	Power (W)	Diff (%)	Power (W)	Diff (%)
5	2094	2142	2.29	2184	4.30	2173	3.77	2151	2.72
7	5619	5715	1.71	5769	2.67	5691	1.28	5590	-0.52
10	10360	10334	-0.25	10493	1.28	10334	-0.25	10198	-1.56

The directivity patterns of low-frequency noise show that the overall sound pressure level (OASPL) increases with wind speed at all observer locations, indicating that higher wind speeds intensify wind turbine noise emissions. For the planar rotor, the maximum OASPL increased from 51.9 dB at 5 m/s to 55.7 dB at 7 m/s and 60.0 dB at 10 m/s. The results also demonstrate that the blade cone angle considerably alters the directivity pattern by increasing OASPL in the upstream region while reducing it in the downstream region. Based on the maximum OASPL, the planar turbine produced the highest noise levels at all investigated wind speeds. In contrast, the lowest maximum OASPL was achieved by the 10° coning angle at 5 m/s (48.2 dB) and by the 7.5° coning angle at 7 and 10 m/s (53.6 and 57.6 dB, respectively)

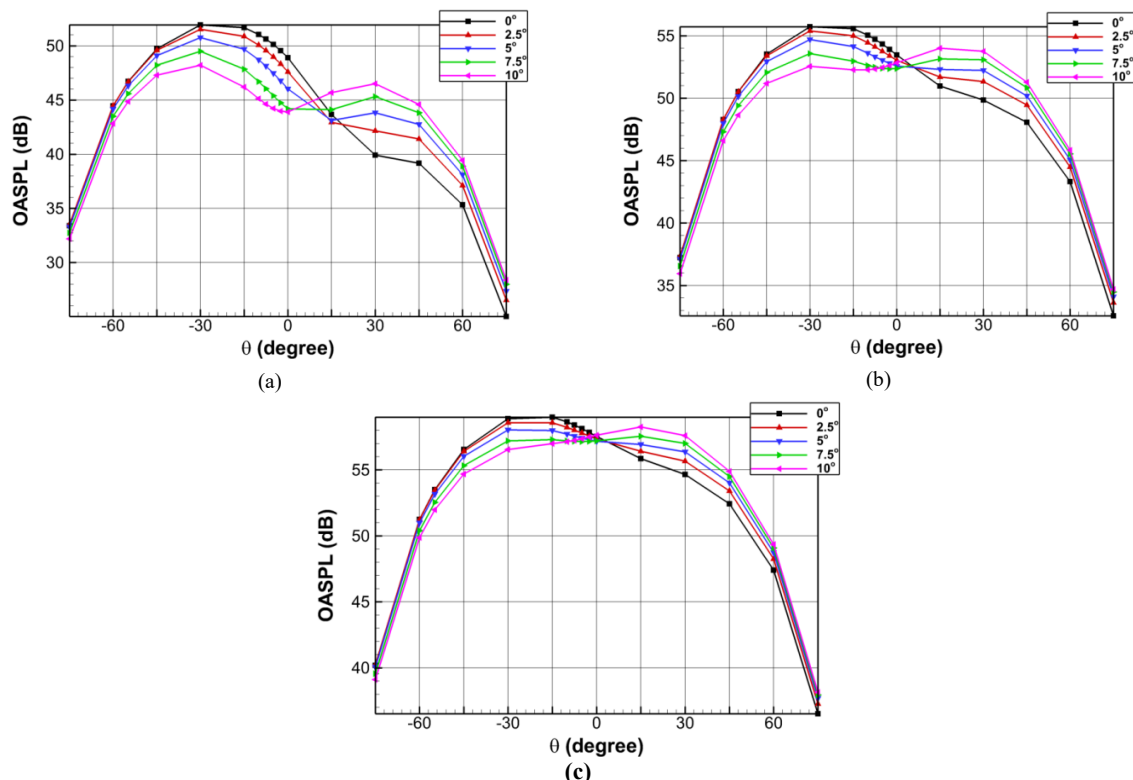


Figure 4. The effect of blade cone angle on the LFN for wind speeds of a) 5 m/s, b) 7 m/s, c) 10 m/s

The results also showed that the location of maximum noise emission differs from the reference measurement position defined by IEC 61400-11 [35]. The maximum noise level in the present study occurred at different directions depending on wind speed and cone angle. Therefore, noise measurements performed only at the standard location may not provide a complete representation of wind turbine acoustic emissions.

Based on the simultaneous evaluation of power enhancement and noise reduction, the 5° cone angle was the only configuration that consistently provided simultaneous improvements in output power and noise reduction over the entire investigated wind speed range.

3. Conclusion

In this study, the effects of blade cone angle on the aerodynamic performance and low-frequency noise of the horizontal-axis NREL Phase VI wind turbine were investigated. The airflow around the turbine was simulated using the RANS equations with the SST turbulence model, and the numerical results were validated against experimental data. The good agreement between numerical predictions and measurements confirmed the reliability of the applied approach.

The results indicated that changing the blade cone angle from 0° to 10° has a limited effect on turbine output power, with the power variation remaining below 5% compared with the planar configuration. However, among all investigated cases, the 5° cone angle turbine achieved the highest power output for wind speeds between 5 and 10 m/s.

It was demonstrated that blade cone angle has a considerable effect on both the magnitude and directivity of low-frequency noise. Increasing the cone angle modified the noise radiation pattern by increasing sound pressure levels in the upstream and reducing them in the downstream. Moreover, the position of maximum noise emission was found to depend on wind speed and cone angle and did not fully correspond to the reference position suggested by IEC 61400-11.

Overall, the results showed that the turbine with a 5° cone angle achieved higher power output than the other configurations while maintaining a lower maximum noise level than the planar configuration. Therefore, based on the criteria of power enhancement and noise reduction, the 5° cone angle turbine provides better performance than the planar configuration.



تأثیر زاویه مخروطی بر عملکرد آیرودینامیکی و آلودگی صوتی توربین بادی محور افقی

علیرضا بزرگی^{الف*}، سید احمد نوربخش^ب

^{الف} استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران. bozorgi@arakut.ac.ir

^ب استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران. anour@ut.ac.ir

چکیده	واژگان کلیدی
آلودگی صوتی به ویژه نویز فرکانس پایین توربین‌های بادی، به عنوان یک چالش زیست‌محیطی شناخته می‌شود که می‌تواند تأثیر منفی بر سلامت انسان داشته باشد. در این پژوهش، تأثیر زاویه مخروطی پره (۰° تا ۱۰°) بر نویز فرکانس پایین یک توربین بادی محور افقی بررسی شد. برای این منظور، ابتدا جریان اطراف توربین در محدوده سرعت باد ۵ تا ۱۰ متر بر ثانیه با استفاده از معادلات RANS و مدل توربولانسی SST شبیه‌سازی گردید. در ادامه، نویز توربین ناشی از منابع روی پره و اطراف آن با استفاده از معادله فاکس ویلیامز-هاوکینگز محاسبه شد. نتایج نشان داد با تغییر زاویه مخروطی پره در محدوده ۰° تا ۱۰°، توان توربین کمتر از ۵٪ تغییر می‌کند، اما این تغییر زاویه تأثیر قابل توجهی بر اندازه و الگوی انتشار نویز فرکانس پایین توربین در محدوده سرعت باد بررسی شده دارد. همچنین مشخص شد که در زاویه مخروطی پره ۵°، علاوه بر افزایش توان تولیدی، نویز بیشینه نیز نسبت به توربین صفحه‌ای (زاویه مخروطی ۰°) کاهش می‌یابد.	توربین بادی، آلودگی صوتی، شبیه‌سازی عددی.
	تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۱۶
	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۲۳
	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۷

۱- مقدمه

بهره‌گیری از انرژی باد به عنوان یکی از منابع تجدیدپذیر، جایگزینی قابل اعتماد برای سوخت‌های فسیلی به منظور کاهش گازهای گلخانه‌ای، آلودگی هوا و بحران امنیت انرژی محسوب می‌شود. استفاده از این انرژی با سرعت زیادی در جهان در حال گسترش است و پیش‌بینی می‌شود که در آینده نزدیک نقش کلیدی در تأمین امنیت انرژی جهانی ایفا کند. بر اساس گزارش شورای جهانی انرژی بادی (GWEC)، در سال ۲۰۲۵ رکورد جدیدی در توسعه انرژی بادی ثبت شد و بیش از ۱۶۴ گیگاوات ظرفیت جدید در سطح جهان نصب گردید که ظرفیت تجمعی نیروگاه‌های بادی را به بیش از ۱۲۸ تراوات رسانده است [۱]. این روند نشان می‌دهد که انرژی بادی همچنان یکی از سریع‌ترین فناوری‌های در حال رشد در صنعت برق جهان است و نقش آن در تأمین برق پاک روزبه‌روز پررنگ‌تر می‌شود. بر اساس پیش‌بینی آژانس بین‌المللی انرژی (IEA)، اگرچه رشد انرژی‌های تجدیدپذیر در برخی مناطق تحت تأثیر سیاست‌های اقتصادی و محدودیت‌های بازار با تعدیل مواجه شده است، اما ظرفیت انرژی بادی تا سال ۲۰۳۰ همچنان افزایش قابل توجهی خواهد داشت [۲]. در سال‌های اخیر، مطالعات عددی و تجربی در زمینه تحلیل جریان حول پره‌ها، کاهش آلودگی صوتی و افزایش بازده توربین‌های بادی از موضوعات مهم پژوهشی در حوزه انرژی و مهندسی مکانیک محسوب می‌شوند [۳، ۴]. خوشبختانه پیشرفت‌های فناوری در طراحی توربین‌های بادی، کاهش هزینه‌های ساخت و بهبود روش‌های نگهداری، موجب کاهش هزینه تولید برق از انرژی باد شده است [۵] که نویدبخش گسترش بهره‌گیری از این

توربین‌ها است.

توربین‌های بادی محور افقی، فناوری غالب در صنعت انرژی بادی هستند [۶]. این توربین‌ها بر اساس توان تولیدی به سه گروه بزرگ (بیش از ۱ مگاوات)، متوسط (۱۰۰ کیلووات تا ۱ مگاوات) و کوچک (کمتر از ۱۰۰ کیلووات) تقسیم می‌شوند [۷]. توربین‌های بزرگ معمولاً در مزارع بادی با منابع باد مناسب نصب می‌شوند، درحالی‌که توربین‌های کوچک بیشتر در سامانه‌های تولید پراکنده، مناطق دور از شبکه و کاربردهای محلی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۸-۱۲]. توربین‌های بادی کوچک به دلیل قابلیت نصب در مقیاس محلی، امکان بهره‌برداری از منابع باد نزدیک به محل مصرف، کاهش وابستگی به شبکه برق و نقش مؤثر در توسعه سامانه‌های تولید پراکنده، به‌عنوان یکی از فناوری‌های مکمل در گذار به سیستم‌های انرژی پایدار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۳]. این توربین‌ها به‌ویژه در مناطق دور از شبکه، کاربردهای کشاورزی، ساختمان‌های مسکونی و سامانه‌های اینترنت اشیا می‌توانند نقش مهمی در تأمین انرژی پاک ایفا کنند [۱۴].

یکی از مهم‌ترین معایب زیست‌محیطی توربین‌های کوچک بادی به‌ویژه در مناطق مسکونی، انتشار آلودگی صوتی (نویز) است. این نویز می‌تواند پیامدهای نامطلوبی مانند ایجاد مزاحمت، اختلال خواب و مشکلات روانی برای افرادی که در نزدیکی توربین‌ها زندگی می‌کنند به همراه داشته باشد [۱۵-۱۸]. نویز توربین بادی بر اساس عامل انتشار به دو نوع مکانیکی و آیرودینامیکی دسته‌بندی می‌شود. امروزه نویز مکانیکی دیگر یک عامل بحرانی محسوب نمی‌شود، اما نویز آیرودینامیکی همچنان یکی از موانع اصلی توسعه استفاده از توربین‌های بادی است. نویز آیرودینامیکی را می‌توان به سه دسته اصلی شامل نویز فرکانس پایین^۱ (LFN)، نویز ناشی از آشفتگی جریان ورودی و سلف‌نویز پره توربین تقسیم کرد [۱۹].

محدوده شنوایی انسان معمولاً در محدوده فرکانس‌های ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز تعریف می‌شود و فرکانس‌های پایین‌تر از ۲۰ هرتز به‌عنوان فروصوت^۲ شناخته می‌شوند. توربین‌های بادی به‌عنوان یکی از منابع تولید فروصوت شناخته می‌شوند، زیرا بسیاری از این توربین‌ها با سرعت چرخش پایین کار می‌کنند، به‌گونه‌ای که فرکانس عبور پره کمتر از ۲۰ هرتز است و بخش قابل توجهی از نویز فرکانس پایین تولید شده در محدوده فروصوت قرار می‌گیرد. اگرچه فروصوت توسط انسان قابل شنیدن نیست، اما قرارگیری در معرض آن می‌تواند بر عملکرد فیزیولوژیکی گوش تأثیر بگذارد [۲۰]. این نویز به‌عنوان یکی از عوامل احتمالی آسیب‌رسان به سلامت انسان مورد بحث و بررسی قرار گرفته است [۲۱-۲۳]. برای مثال، ایناگاکي و همکاران [۲۱] نویز یک توربین بادی با سرعت چرخش ۳۰ دور بر دقیقه را اندازه‌گیری کردند و نتیجه گرفتند که فروصوت منتشر شده توسط توربین می‌تواند برای کارکنانی که در نزدیکی آن کار می‌کنند، ایجاد مزاحمت کند. بااین‌حال، در بیشتر کشورها محدودیت‌های مشخصی برای کنترل فروصوت و نویز فرکانس پایین توربین‌های بادی وجود ندارد. البته کشور دانمارک از معدود کشورهایی است که محدودیت قانونی سخت‌گیرانه‌ای برای کنترل نویز فرکانس پایین توربین‌های بادی تعیین کرده است [۲۴].

از آنجاکه توربین‌های کوچک بادی معمولاً در مناطق با سرعت باد متغیر نصب می‌شوند، قابلیت تغییر موقعیت پره‌ها عملکرد توربین را بهبود می‌بخشد. به‌عنوان مثال، توربین‌های دارای پره با زاویه گام متغیر^۳ امکان کنترل بهتر توان خروجی را فراهم می‌کنند. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که تغییر زاویه گام پره تأثیر قابل توجهی بر عملکرد آیرودینامیکی توربین‌های بادی دارد [۲۵-۲۷]. زاویه مخروطی پره^۴ نیز پارامتر دیگری است که بر عملکرد توربین تأثیر می‌گذارد [۲۸، ۲۹]. با افزایش زاویه مخروطی پره، قطر مؤثر توربین کاهش می‌یابد و به دلیل تغییر موقعیت پره، نوک پره‌ها به سمت پایین‌دست جریان حرکت می‌کند. اگرچه انتظار می‌رود کاهش قطر توربین موجب کاهش توان خروجی شود، اما باید تغییر موقعیت پره نیز مورد توجه قرار گیرد. موقعیت مایل پره‌ها باعث تغییر مسیر جریان موضعی در بخش‌های مختلف پره نسبت به توربین‌های مسطح (زاویه مخروطی ۰°) می‌شود. این تغییر می‌تواند رژیم جریان لایه مرزی را به طور موضعی تغییر دهد و بر وقوع یا عدم وقوع جدایش جریان و واماندگی^۵ در بخش‌های مختلف پره اثرگذار باشد. مجموع این تغییرات، پیش‌بینی اثر زاویه مخروطی پره بر توان خروجی را دشوارتر می‌کند. علاوه بر اثر بر توان خروجی، این پارامتر بر نویز توربین نیز تأثیرگذار است. بزرگی و همکاران [۳۰] تأثیر زاویه مخروطی پره بر

^۱ Low Frequency Noise

^۲ Infrasound

^۳ Variable Pitch Angle

^۴ Blade Cone angle

^۵ Stall

نویز توربین بادی NREL Phase VI [۳۱] را با استفاده از منابع انتشار نویز بر روی پره و نادیده گرفتن منابع انتشار واقع در اطراف پره محاسبه کردند، اما مطالعات بعدی نشان داد که منابع انتشار اطراف پره در انتشار نویز نقش مهمی ایفا می‌کنند [۳۲]. در این پژوهش، اثر زاویه مخروطی پره بر توان تولیدی و نویز فرکانس پایین توربین بادی NREL Phase VI [۳۱] با احتساب منابع اصلی انتشار نویز شامل منابع روی پره و اطراف آن بررسی می‌شود. برای این منظور، ابتدا روتور توربین بادی در ابعاد واقعی مدل‌سازی می‌شود و جریان هوای اطراف توربین برای محدوده سرعت ۵ تا ۱۰ متر بر ثانیه و زوایای مخروطی ۰° تا ۱۰° به صورت عددی شبیه‌سازی می‌شود. سپس منابع تولید نویز با استفاده از داده‌های میدان جریان شناسایی می‌شود و اثر زاویه مخروطی پره بر نویز فرکانس پایین ارزیابی می‌گردد. شبیه‌سازی جریان با استفاده از معادلات ناویر-استوکس میانگین‌گیری‌شده رینولدز (RANS) و مدل توربولانسی SST^۱ انجام می‌شود و نویز فرکانس پایین توربین نیز با استفاده از معادلات فاوکس ویلیامز-هاوکینگز^۲ (FW-H) [۳۳] محاسبه می‌شود.

۲- شبیه‌سازی جریان

توربین NREL Phase VI با قطر ۱۰/۰۵۸ متر دارای دو پره پیچ‌خورده و باریک‌شونده^۳ است که مقطع آیرودینامیکی آن‌ها از ریشه تا نوک بر اساس پروفیل ایرفویل S809 طراحی شده است. این توربین توسط هند و همکاران [۳۱] تحت شرایط مختلف و در مقیاس واقعی مورد آزمایش قرار گرفته است. در پژوهش حاضر از نتایج آزمایشگاهی با سرعت باد در محدوده ۵ تا ۲۵ متر بر ثانیه، سرعت دوران پره ۷۲ دور بر دقیقه و زاویه گام ۳۰° برای اعتبارسنجی محاسبه توان و نیروی محوری وارد بر پره استفاده شده است.

مدل‌سازی دامنه محاسباتی و تولید شبکه با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Design Modeler 16 انجام شد (شکل ۱). در این شبیه‌سازی، برج توربین به دلیل تأثیر ناچیز آن بر عملکرد آیرودینامیکی توربین‌های محور بالادست^۴ حذف گردید و پره به صورت صلب در نظر گرفته شد. همچنین، به دلیل وجود تناوب چرخشی، دامنه محاسباتی تنها در اطراف یک پره مدل‌سازی شد (شکل ۱).

دامنه محاسباتی از دو بخش ناحیه داخلی چرخان و ناحیه خارجی ثابت تشکیل شده است. ناحیه داخلی با شبکه بدون ساختار و ناحیه خارجی با شبکه ساختاری شبکه‌بندی شده است. همچنین، شبکه لایه مرزی در اطراف پره ایجاد شد و اولین لایه شبکه در فاصله ۲×۱۰^{-۵} متر از دیواره پره قرار داده شد که با استفاده از این شبکه‌بندی مقدار پارامتر y^+ در تمامی سطح پره‌ها کمتر از ۳ به دست آمد. در همه موارد، شبیه‌سازی جریان تا جایی ادامه پیدا کرد که مقادیر توان و نیروی محوری محاسبه شده برای بیش از ۵۰۰ تکرار کمتر از ۰/۱٪ نوسان داشته باشند. برای بررسی استقلال حل از شبکه، سه شبکه با اندازه‌های مختلف شامل شبکه درشت با ۱/۶×۱۰^۶ سلول، شبکه متوسط با ۲/۲×۱۰^۶ سلول و شبکه ریز با ۳/۶×۱۰^۶ سلول مورد بررسی قرار گرفتند که اختلاف نتایج کمتر از ۱٪ بوده است. بر اساس نتایج این بررسی، شبکه دارای ۳/۶×۱۰^۶ سلول برای شبیه‌سازی جریان انتخاب شد. با توجه به ناچیز بودن نوسانات مقادیر محاسبه شده، می‌توان عدم قطعیت نتایج شبیه‌سازی عددی را برابر اختلاف نتایج ناشی از تغییر شبکه‌بندی و برابر با ۱٪ در نظر گرفت.

در ورودی جریان از شرط مرزی سرعت یکنواخت عمود بر سطح، در خروجی جریان از شرط مرزی فشار استاتیک، در دیواره‌ها از شرط عدم لغزش و در سطوح جانبی از شرط مرزی تناوبی چرخشی استفاده شده است. همچنین در صفحه تماس نواحی چرخان و ثابت، از مدل روتور منجمد^۵ استفاده شده است. مقایسه نتایج عددی محاسبه توان و نیروی محوری با داده‌های تجربی [۳۱] در شکل ۲ نشان می‌دهد که نتایج عددی تطابق مناسبی با داده‌های تجربی دارند.

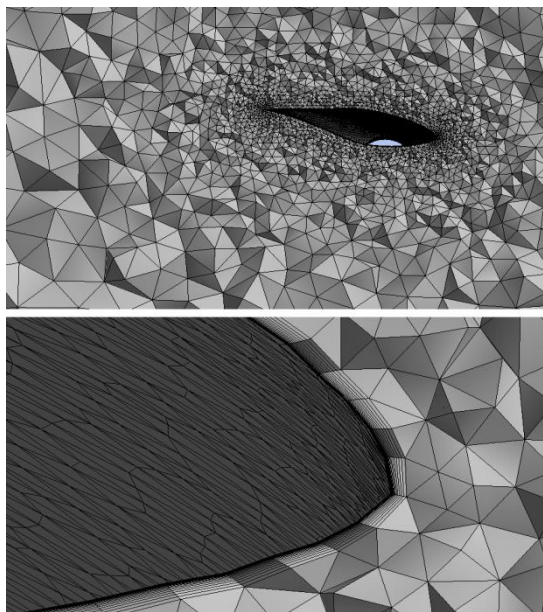
^۱ Shear Stress Transport

^۲ Ffowcs Williams-Hawkins

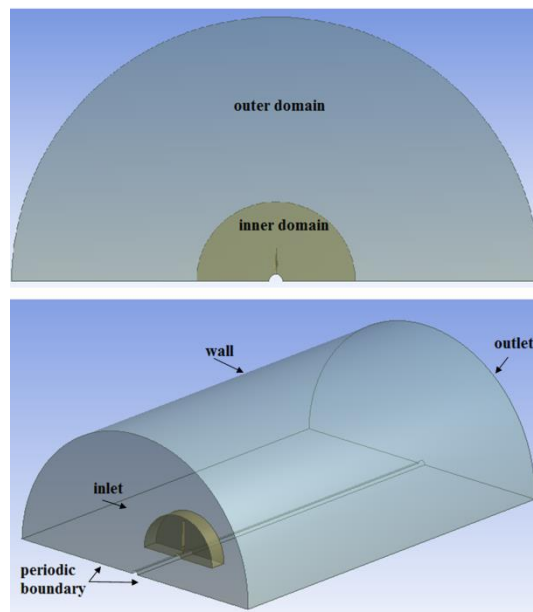
^۳ Twisted-Tapered Blades

^۴ Upwind Turbines

^۵ Frozen Rotor

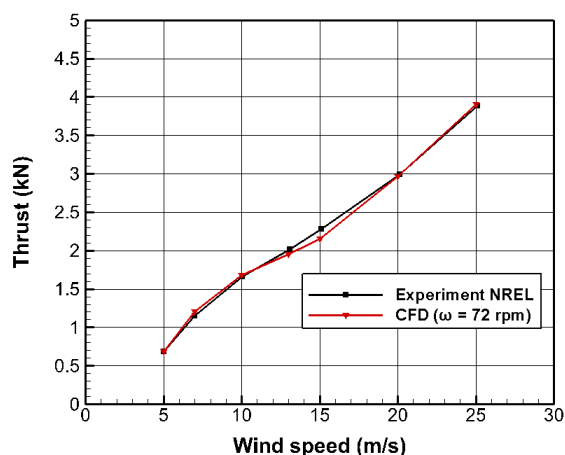


(ب)

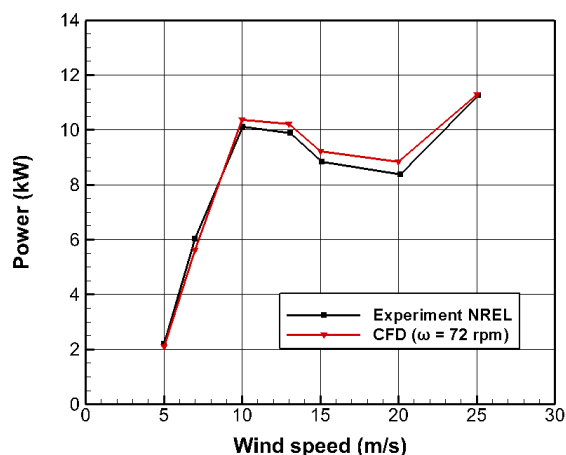


(الف)

شکل ۱ الف) دامنه محاسباتی و شرایط مرزی ب) شبکه‌بندی و لایه مرزی اطراف پره



(ب)



(الف)

شکل ۲ مقایسه نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی (الف) توان توربین (ب) نیروی محوری وارد بر پره‌های توربین

۳- معادله FW-H

فاکس ویلیامز و هاوکینگز [۳۳] یک معادله تحلیلی برای مدل‌سازی انتشار نویز از اجسام متحرک مانند پره توربین باد ارائه دادند. این معادله در رابطه ۱ آورده شده است.

$$\left\{ \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right\} [p'(x, t)H(f)] = \frac{\partial}{\partial t} (Q\delta(f)) - \frac{\partial}{\partial x_i} (L_i\delta(f)) + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} (T_{ij}H(f)) \quad (1)$$

که

$$Q = \rho_0 v_j \frac{\partial f}{\partial x_j}; L_i = P_{ij} \frac{\partial f}{\partial x_j} \quad (2)$$

و f تابعی است که مقدار آن بر اساس موقعیت سطح دیتا از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$f: \begin{cases} < 0 & \text{داخل سطح دیتا} \\ = 0 & \text{روی سطح دیتا} \\ > 0 & \text{بیرون سطح دیتا} \end{cases} \quad (3)$$

در این معادلات v_j نشان‌دهنده مؤلفه سرعت سطح دیتا در راستای j و P_{ij} تانسور تنش فشاری^۱ است. ترم اول، دوم و سوم در سمت راست معادله به ترتیب منابع تک‌قطبی^۲، دوقطبی^۳ و چهارقطبی^۴ نویز نامیده می‌شوند. به دلیل وجود تابع دلتای دیراک^۵ در ترم اول و دوم رابطه ۱، می‌توان Q و L_i را فقط بر روی سطح دیتا محاسبه کرد. بنابراین، در نهایت رابطه ۲ به صورت زیر نوشته می‌شود

$$Q = \rho_0 v_n; L_i = P_{ij} n_j \quad (4)$$

که v_n نشان‌دهنده سرعت نرمال سطح دیتا و n_j بردار یک‌ه نرمال سطح دیتا می‌باشد. در پژوهش حاضر، سطح دیتا برابر با سطح پره بسط یافته با مقیاس ۵ تعریف شده است که بنا بر مطالعات بزرگی و قربانی اصل [۳۲] تمامی منابع اصلی انتشار نویز فرکانس پایین این توربین را در محدوده سرعت ۵ تا ۱۰ متر بر ثانیه شامل می‌شود.

با توجه به وجود تابع پله^۶ (H) در ترم سوم رابطه ۱، برای محاسبه نویز ناشی از منابع چهارقطبی نیاز به انتگرال‌گیری حجمی در خارج سطح دیتا می‌باشد که عملیات محاسباتی را بسیار پیچیده و زمان‌بر خواهد کرد. به همین دلیل از این منابع صرف‌نظر می‌شود [۳۴]. با استفاده از تابع گرین^۷ برای حل انتگرالی رابطه ۱ می‌توان نوسانات فشار را برحسب زمان در نقاط مختلف با استفاده از رابطه ۵ و ۶ محاسبه کرد [۳۴].

$$4\pi p'_T(x, t) = \int_{f=0} \left[\frac{\dot{Q}}{r(1-M_r)^2} \right]_e ds + \int_{f=0} \left[\frac{Q(r\dot{M}_r + c_0 M_r - c_0 M_r^2)}{r^2(1-M_r)^3} \right]_e ds \quad (5)$$

$$4\pi p'_L(x, t) = \frac{1}{c_0} \int_{f=0} \left[\frac{\dot{L}_r}{r(1-M_r)^2} \right]_e ds + \int_{f=0} \left[\frac{L_r - L_i M_i}{r^2(1-M_r)^2} \right]_e ds + \frac{1}{c_0} \int_{f=0} \left[\frac{L_r(r\dot{M}_r + c_0 M_r - c_0 M_r^2)}{r^2(1-M_r)^3} \right]_e ds \quad (6)$$

که

$$M_r = M_i \hat{r}_i; \dot{M}_r = \dot{M}_i \hat{r}_i; L_r = L_i \hat{r}_i; \dot{L}_r = \dot{L}_i \hat{r}_i \quad (7)$$

در رابطه ۵ تا ۷، M_i نشان‌دهنده مؤلفه بردار ماک سطح دیتا و r فاصله بین منبع نویز و ناظر^۸، و $\hat{r}_i$ مؤلفه بردار یک‌ه $\hat{r}$ می‌باشد. زیرنویس e حاکی از این است که مقادیر بایستی در زمان انتشار نویز^۹ محاسبه شوند و علامت " " نیز نشان‌دهنده مشتق زمانی^{۱۰} نسبت به زمان انتشار نویز می‌باشد. رابطه ۵ نوسان فشار ناشی از منابع تک‌قطبی و رابطه ۶ نوسان فشار ناشی از منابع دوقطبی را محاسبه می‌کند.

برای محاسبه نویز توربین توسط روابط ۱ تا ۷، بایستی مختصات ناظر به‌عنوان محل دریافت صوت مشخص باشد. در این پژوهش نقاط ناظر مطابق شکل ۳ بر روی یک نیم‌دایره با شعاع ۲۱ متر حول مرکز روتور قرار گرفته‌اند. زاویه θ به‌عنوان زاویه موقعیت ناظر، نسبت به صفحه چرخش روتور اندازه‌گیری می‌شود، به‌طوری‌که زاویه 90° مربوط به ناظر واقع در راستای محور دوران و در بالادست و در مقابل، زاویه -90° مربوط به ناظر واقع در راستای محور دوران و در پایین‌دست می‌باشد. می‌توان نشان داد با توجه به تقارن محوری، نویز فرکانس پایین بر روی محور دوران صفر خواهد بود [۳۶]. با استفاده از روابط ارائه شده در

¹ Pressure Stress Tensor

² Monopole

³ Dipole

⁴ Quadrupole

⁵ Dirac delta Function

⁶ Step Function

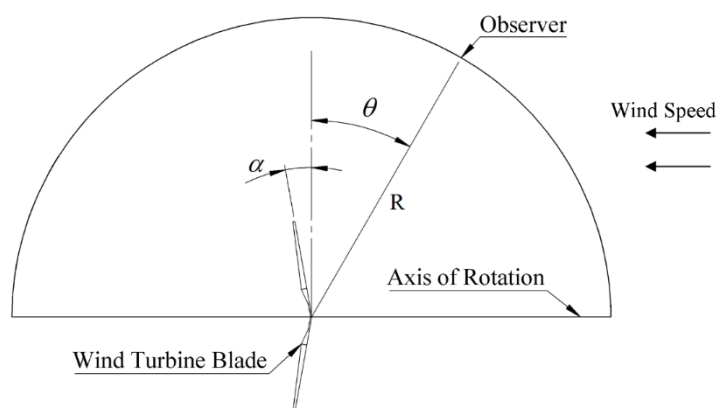
⁷ Green Function

⁸ Observer

⁹ Retarded Time

¹⁰ Time Derivation

استاندارد IEC 61400-11 [۳۵] برای تعیین محل اندازه‌گیری نویز توربین‌های بادی، نویز این توربین بایستی در فاصله ۲۱ متر از مرکز روتور و زاویه θ برابر با 55° - اندازه‌گیری شود [۳۰، ۳۲]. در پژوهش حاضر به‌منظور تحلیل جامع‌تر، نقاط ناظر در فاصله ۲۱ متر از مرکز روتور و در بازه زاویه‌ای 75° - تا 75° + تعریف شدند.



شکل ۳ موقعیت قرارگیری ناظرها اطراف توربین

۴- نتایج

در جدول ۱ تأثیر زاویه مخروطی پره α در محدوده 0° تا 10° بر توان توربین آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود زاویه α نسبت به صفحه چرخش روتور اندازه‌گیری می‌شود. نتایج نشان می‌دهد با تغییر این زاویه توان خروجی نسبت به توربین صفحه‌ای (زاویه مخروطی 0°) کمتر از ۵٪ تغییر می‌کند. در سرعت باد ۵ متر بر ثانیه توان توربین برای تمامی زوایای مخروطی بیشتر از حالت صفحه‌ای است. در سرعت باد ۷ متر بر ثانیه، توان توربین تنها برای $\alpha = 10^\circ$ کمتر از حالت صفحه‌ای است. اما در سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه توان توربین تنها برای $\alpha = 5^\circ$ بیشتر از حالت صفحه‌ای به دست آمده است. این نتایج نشان می‌دهد که در محدوده سرعت ۵ تا ۱۰ متر بر ثانیه بیشترین توان توربین برای $\alpha = 5^\circ$ است.

جدول ۱ توان توربین در زوایای مخروطی مختلف

سرعت باد (m/s)	$\alpha = 0^\circ$		$\alpha = 2.5^\circ$		$\alpha = 5.0^\circ$		$\alpha = 7.5^\circ$		$\alpha = 10^\circ$	
	توان (W)	اختلاف نسبی (%)	توان (W)	اختلاف نسبی (%)	توان (W)	اختلاف نسبی (%)	توان (W)	اختلاف نسبی (%)	توان (W)	اختلاف نسبی (%)
۵	۲۰۹۴	۲/۲۹	۲۱۴۲	۲/۲۹	۲۱۸۴	۴/۳۰	۲۱۷۳	۳/۷۷	۲۱۵۱	۲/۷۲
۷	۵۶۱۹	۱/۷۱	۵۷۱۵	۱/۷۱	۵۷۶۹	۲/۶۷	۵۶۹۱	۱/۲۸	۵۵۹۰	-۰/۵۲
۱۰	۱۰۳۶۰	-۰/۲۵	۱۰۳۳۴	-۰/۲۵	۱۰۴۹۳	۱/۲۸	۱۰۳۳۴	-۰/۲۵	۱۰۱۹۸	-۱/۵۶

در شکل ۴، الگوی جهت‌داری^۱ انتشار نویز آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت باد، تراز کلی فشار صوت^۲ (OASPL) در تمامی نقاط ناظر افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت افزایش سرعت باد آلودگی صوتی ناشی از نویز فرکانس پایین توربین را افزایش می‌دهد. به‌عنوان مثال، در نقطه ناظر با زاویه $\theta = 60^\circ$ برای سرعت باد ۵، ۷ و ۱۰ متر بر ثانیه تراز فشار صوت توربین صفحه‌ای به ترتیب برابر با $35/3$ ، $43/3$ و $47/4$ دسی‌بل می‌باشد.

با بررسی نتایج مشاهده می‌شود که زاویه مخروطی پره الگوی انتشار نویز را تغییر می‌دهد. با افزایش زاویه مخروطی، تراز کلی فشار صوت در بالادست افزایش و در پایین‌دست کاهش می‌یابد. به‌منظور ارزیابی میزان آلودگی صوتی توربین، تراز فشار صوت بیشینه در الگوهای جهت‌داری به‌عنوان معیار مقایسه انتخاب گردید. بر اساس این معیار، هر چه تراز فشار صوت بیشینه کوچک‌تر باشد، توربین آلودگی صوتی کمتری دارد. بر اساس این مقایسه بیشترین آلودگی صوتی در سرعت باد ۵، ۷ و ۱۰ متر بر ثانیه

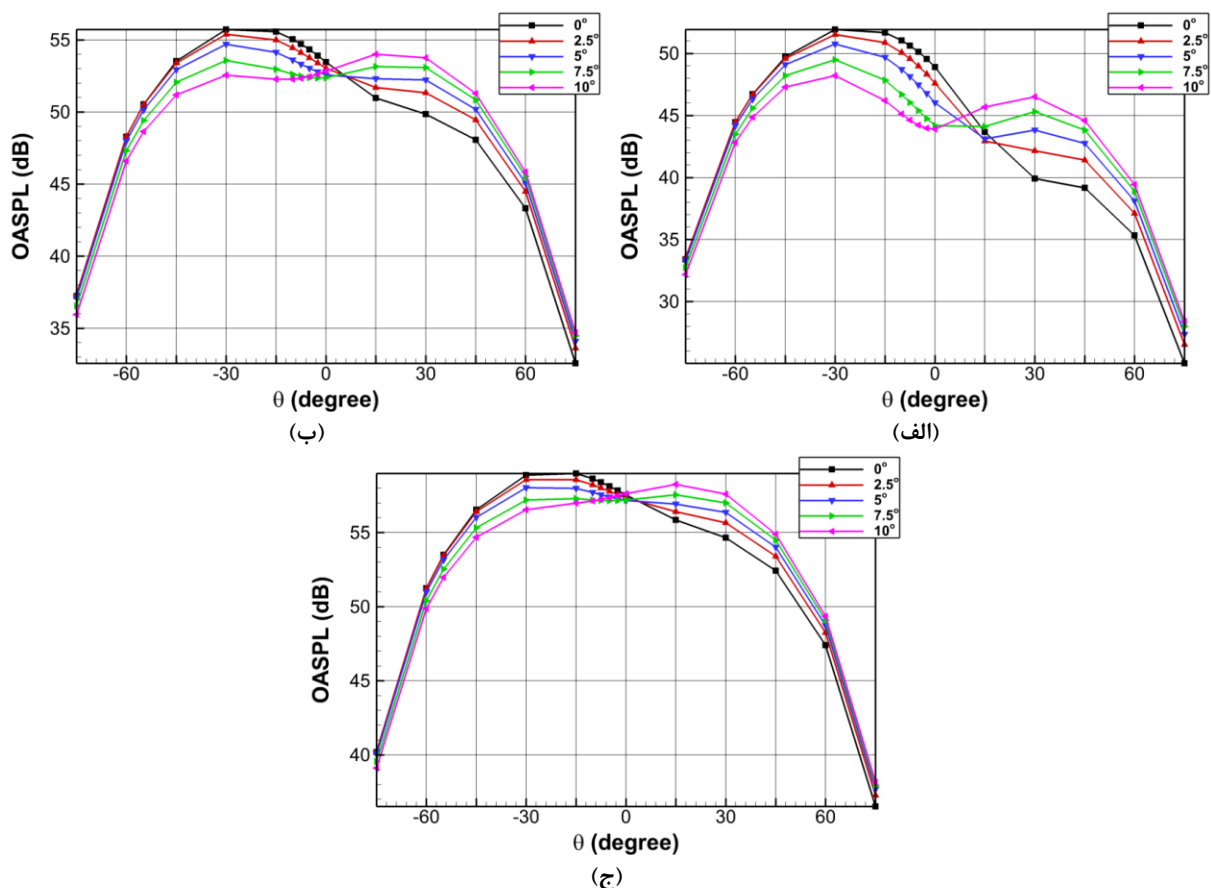
^۱ Directivity

^۲ Overall sound pressure level

مربوط به توربین صفحه‌ای و با تراز فشار صوت بیشینه به ترتیب برابر با $51/9^\circ$ ، $55/7^\circ$ و 60° دسی‌بل می‌باشد. از طرف دیگر، در سرعت باد ۵ متر بر ثانیه، کمترین آلودگی صوتی مربوط به توربین دارای زاویه مخروطی 10° و با تراز فشار صوت بیشینه $48/2^\circ$ دسی‌بل است. همچنین در سرعت باد ۷ و ۱۰ متر بر ثانیه، کمترین آلودگی صوتی مربوط به توربین دارای زاویه مخروطی $7/5^\circ$ و با تراز فشار صوت بیشینه به ترتیب $53/6^\circ$ و $57/6^\circ$ دسی‌بل می‌باشد.

همچنین نتایج نشان می‌دهد در تمامی زوایای مخروطی، موقعیت ناظر متناظر با تراز فشار صوت بیشینه با موقعیت مورد نظر استاندارد IEC 61400-11 [۳۵] (فاصله ۲۱ متر از مرکز روتور و $\theta = -55^\circ$) متفاوت است. برای توربین صفحه‌ای تراز صوت بیشینه در $\theta = -30^\circ$ واقع شده است و برای توربین‌های با زاویه مخروطی غیر صفر نیز، تراز فشار صوت بیشینه در همین زاویه یا بالادست آن قرار دارد که در همه موارد با نقطه مرجع تعریف شده توسط استاندارد اختلاف قابل توجهی دارد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود موقعیت تراز فشار صوت بیشینه به سرعت باد و زاویه مخروطی توربین وابسته است و اندازه‌گیری نويز تنها در موقعیت مرجع استاندارد برای مقایسه آلودگی صوتی کافی نیست.

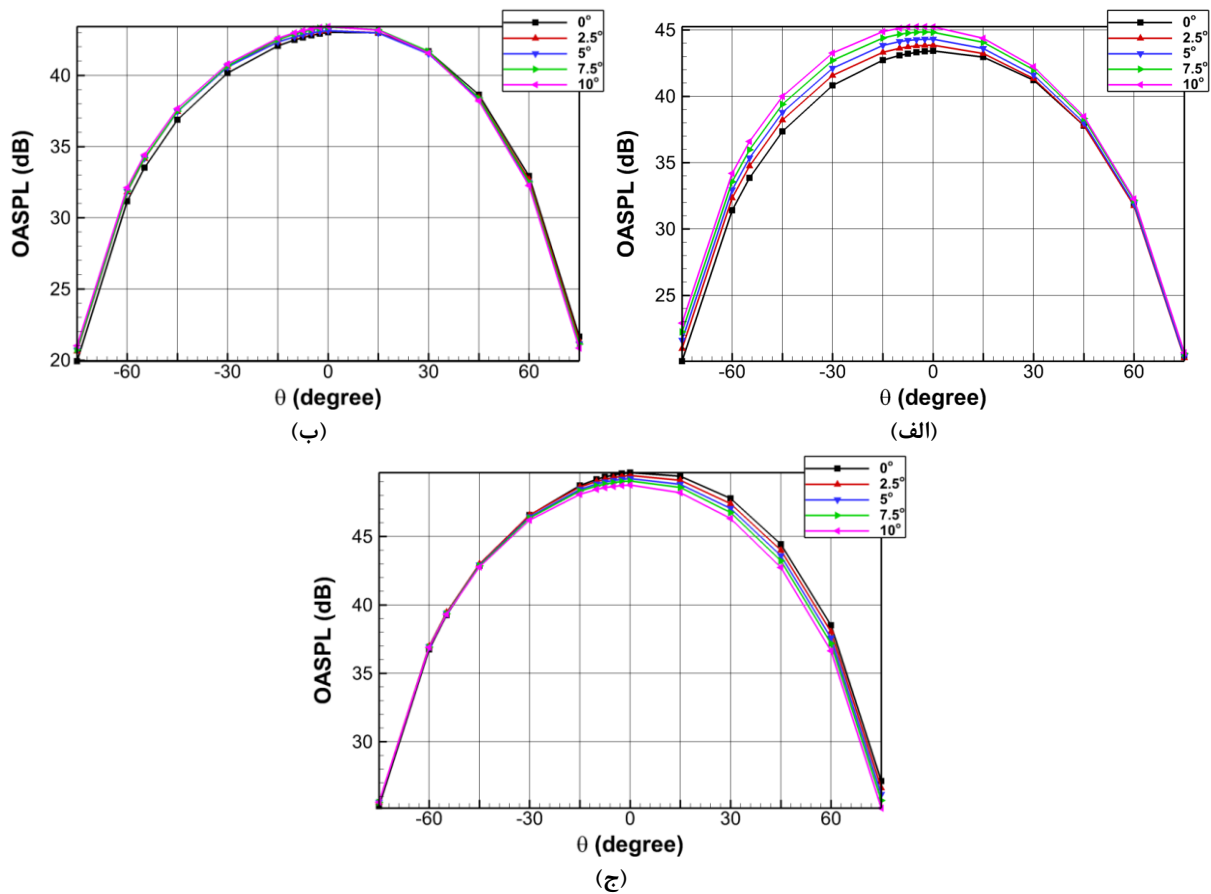
با رعایت دو معیار هم‌زمان افزایش توان و کاهش آلودگی صوتی (جدول ۱ و شکل ۴) عملکرد توربین با زوایای مخروطی مختلف با توربین صفحه‌ای مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد توربین با زاویه مخروطی $2/5^\circ$ و $7/5^\circ$ در سرعت باد ۵ و ۷ متر بر ثانیه، توربین با زاویه مخروطی 5° در سرعت باد ۵، ۷ و ۱۰ متر بر ثانیه و توربین با زاویه مخروطی 10° تنها در سرعت باد ۵ متر بر ثانیه نسبت به توربین صفحه‌ای عملکرد بهتری دارند. بنابراین برای محدوده سرعت بررسی‌شده تنها توربین با زاویه مخروطی 5° در هر دو معیار افزایش توان و کاهش آلودگی صوتی به‌طور هم‌زمان موجب بهبود عملکرد توربین شده است. با توجه به اینکه توربین‌های کوچک بادی معمولاً در نواحی با سرعت باد متغیر نصب می‌شوند و به دلیل ملاحظات اقتصادی دارای پره‌های ثابت هستند، می‌توان توربین با زاویه مخروطی 5° را جایگزین مناسبی برای توربین صفحه‌ای در محدوده سرعت بررسی شده دانست.



شکل ۴ تأثیر زاویه مخروطی بر نويز فرکانس پایین توربین برای سرعت باد: (الف) ۵ m/s (ب) ۷ m/s (ج) ۱۰ m/s

به منظور بررسی دقیق‌تر نحوه انتشار نويز، در ادامه مولفه‌های تک‌قطبی و دوقطبی نیز بررسی می‌شوند. در شکل ۵ الگوی جهت‌داری ناشی از مؤلفه تک‌قطبی نشان داده شده است. در سرعت ۵ متر بر ثانیه، تراز فشار صوت مؤلفه تک‌قطبی در تمامی

نقاط با افزایش زاویه مخروطی افزایش یافته است. البته این افزایش در پایین دست بیشتر بوده است. در سرعت ۷ متر بر ثانیه، تغییرات ناچیزی (کمتر از یک دسی بل) در پایین دست جریان مشاهده می شود. در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه با افزایش زاویه مخروطی، نویز تک قطبی از بالادست جریان تا زاویه ۱۵° تضعیف شده است و در بقیه نقاط تغییرات بسیار ناچیز بوده است.



شکل ۵ تأثیر زاویه مخروطی بر نویز تک قطبی توربین برای سرعت باد: (الف) ۵ m/s (ب) ۷ m/s (ج) ۱۰ m/s

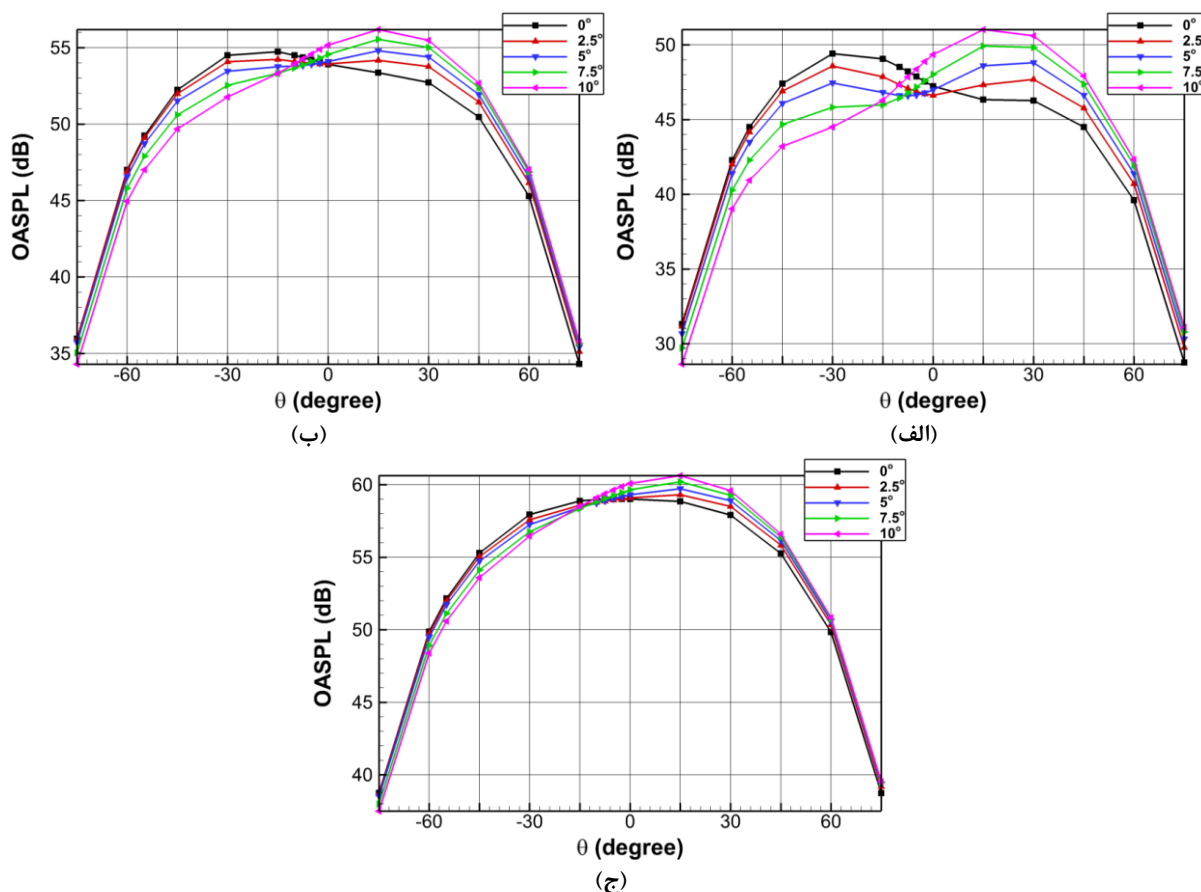
در شکل ۶ الگوی جهت داری ناشی از مؤلفه دوقطبی نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش زاویه مخروطی، تراز فشار صوت در بالادست جریان افزایش و در پایین دست کاهش می یابد. مقایسه شکل ۴ تا ۶ بیانگر تفاوت در الگوی جهت داری نویز فرکانس پایین و مؤلفه های تک قطبی و دوقطبی می باشد. این مقایسه نشان می دهد در بعضی نقاط (برای مثال، زاویه ۳۰°+ θ = توربین صفحه ای) تراز فشار صوت نهایی (نویز فرکانس پایین) از تراز فشار صوت مؤلفه دوقطبی کمتر شده است، اما در بعضی نقاط (برای مثال، زاویه ۳۰°- θ = توربین صفحه ای) عکس این موضوع مشاهده می شود. این رفتار نشان می دهد برهم کنش مؤلفه های تک قطبی و دوقطبی می تواند موجب کاهش یا افزایش تراز فشار صوت نهایی شود. برای بررسی بیشتر، نوسانات زمانی فشار مربوط به هر نویز در شکل ۷ آورده شده است. نتایج نشان می دهد در زاویه θ = ۳۰°+ نویز تک قطبی و دوقطبی همدیگر را تضعیف کرده اند، اما در زاویه θ = ۳۰°- این دو نویز همدیگر را تقویت می کنند.

در شکل ۷ نوسان زمانی فشار در فرکانس عبور پره^۱ (BPF) نیز نشان داده شده است. این فرکانس از رابطه ۸ محاسبه می شود. نتایج نشان می دهد نوسان فشار کلی از نوسان فشار در فرکانس عبور پره انحراف بسیار کمی دارد.

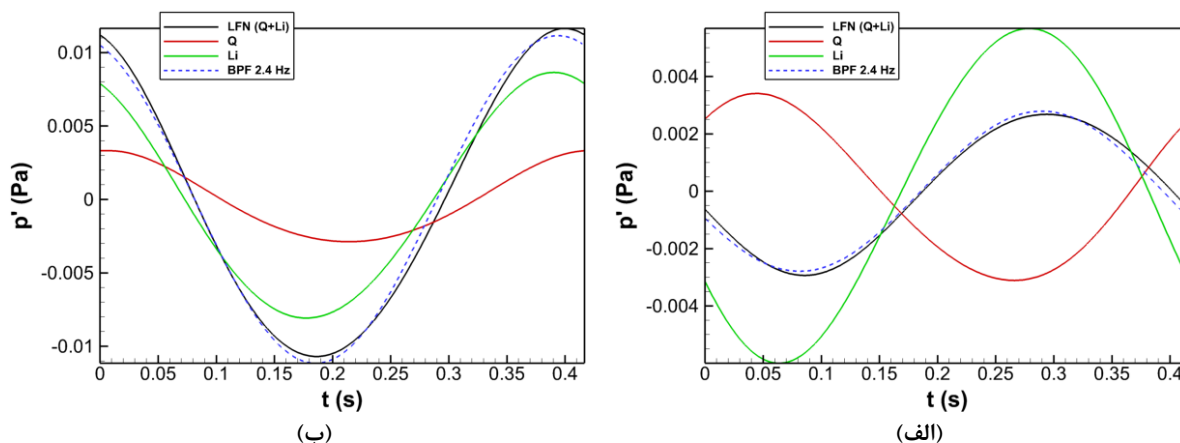
$$BPF = \text{Blade numbers} \times \omega(\text{rpm}) \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \quad (8)$$

$$BPF = 2 \times 72 \times \frac{1}{60} = 2.4 \text{ Hz}$$

¹ Blade Passing Frequency



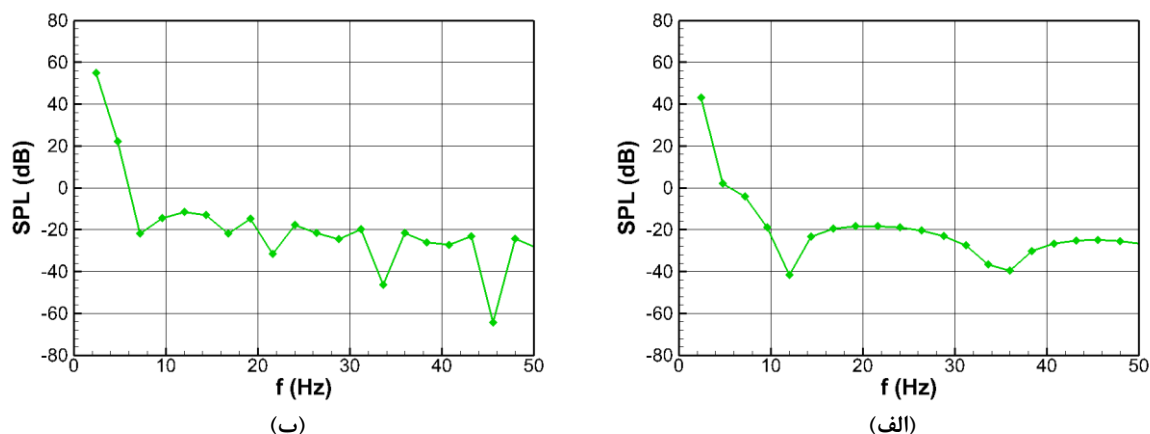
شکل ۶ تأثیر زاویه مخروطی بر نویز دوقطبی توربین برای سرعت باد: الف) ۵ m/s ب) ۷ m/s ج) ۱۰ m/s



شکل ۷ نوسان فشار دریافتی توسط ناظر در موقعیت الف) $\theta = +30^\circ$ و ب) $\theta = -30^\circ$ برای سرعت باد ۵ m/s

در شکل ۸، نمودار توزیع فرکانسی نویز دریافتی در این دو نقطه تا ۱۰ برابر فرکانس عبور پره رسم شده است. برای محاسبه توزیع فرکانسی نویز از تبدیل فوریه سریع^۱ استفاده شده است. مشاهده می‌شود که در هر دو نقطه تراز صوتی فرکانس عبور پره بسیار بیشتر از تراز صوتی مضارب بعدی این فرکانس می‌باشد. بعد از فرکانس عبور پره، بیشترین تراز صوت مربوط به مضرب دوم است که در زاویه $\theta = +30^\circ$ ، اختلاف تراز صوتی این دو فرکانس بیش از ۴۰ دسی‌بل و در زاویه $\theta = -30^\circ$ بیش از ۳۰ دسی‌بل می‌باشد.

^۱ Fast Fourier Transform



شکل ۸ توزیع فرکانسی نویز دریافتی توسط ناظر در موقعیت (الف) $\theta = +30^\circ$ و (ب) $\theta = -30^\circ$ برای سرعت باد ۵ m/s

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر زاویه مخروطی پره بر توان تولیدی و نویز فرکانس پایین توربین محور افقی NREL Phase VI بررسی شد. برای این منظور، ابتدا جریان اطراف توربین با استفاده از معادلات RANS و مدل آشفتگی SST شبیه سازی شد و نتایج با داده های آزمایشگاهی مقایسه شد. تطابق خوب نتایج عددی با داده های آزمایشگاهی نشان داد که روش عددی مورد استفاده برای شبیه سازی مسئله مناسب است. سپس، جریان اطراف توربین برای زوایای مخروطی 0° تا 10° و سرعت باد ۵ تا ۱۰ متر بر ثانیه شبیه سازی شد. مشاهده شد که اختلاف در توان خروجی توربین برای زوایای مخروطی مختلف نسبت به زاویه 0° (توربین صفحه ای) کمتر از ۵٪ است و در این محدوده سرعت، بیشترین توان توربین مربوط به زاویه مخروطی 5° می باشد.

در ادامه، نویز فرکانس پایین توربین با استفاده از معادله FW-H محاسبه شد. بررسی ها نشان داد که زاویه مخروطی پره تأثیر قابل توجهی بر الگوی جهت داری دارد. همچنین مشاهده شد که با افزایش این زاویه، تراز فشار صوت در بالادست توربین افزایش و در پایین دست آن کاهش می یابد. برای مقایسه آلودگی صوتی، تراز فشار صوت بیشینه در الگوهای جهت داری به عنوان معیار سنجش انتخاب شد. بر اساس این معیار، بیشترین آلودگی صوتی در محدوده سرعت بررسی شده مربوط به توربین صفحه ای است. در مقابل، کمترین آلودگی صوتی در سرعت ۵ متر بر ثانیه مربوط به زاویه مخروطی 10° و در سرعت ۷ و ۱۰ متر بر ثانیه مربوط به زاویه مخروطی 5° است. بر اساس استاندارد IEC 61400-11، موقعیت مرجع اندازه گیری نویز در فاصله ۲۱ متر از مرکز روتور و در زاویه $\theta = -55^\circ$ تعریف می شود. با این حال نتایج نشان داد موقعیت دریافت نویز بیشینه با این موقعیت مرجع فاصله قابل توجهی دارد. بنا بر نتایج به دست آمده می توان گفت موقعیت نویز بیشینه به سرعت باد و زاویه مخروطی توربین وابسته است و اندازه گیری نویز در نقطه مرجع استاندارد به تنهایی، برای سنجش آلودگی صوتی کافی نیست.

در مجموع، نتایج نشان داد تنها توربین با زاویه مخروطی 5° در هر دو معیار افزایش توان و کاهش آلودگی صوتی به طور هم زمان موجب بهبود عملکرد نسبت به توربین صفحه ای در محدوده سرعت ۵ تا ۱۰ متر بر ثانیه شده است. بنابراین می توان توربین با زاویه مخروطی 5° را گزینه ای مناسب تر نسبت به توربین صفحه ای در محدوده سرعت بررسی شده دانست.

با توجه به اینکه سرعت باد در برخی مناطق دارای پتانسیل بالای انرژی بادی می تواند از ۱۰ متر بر ثانیه فراتر رود، بررسی اثر زاویه مخروطی پره در محدوده وسیع تری از سرعت های باد می تواند به درک جامع تری از عملکرد آیرودینامیکی و انتشار نویز توربین کمک کند. همچنین، بررسی زوایای مخروطی بیشتر، ارزیابی پیکربندی های مختلف توربین و انجام آزمون های تجربی می تواند در تأیید نتایج عددی و تعیین پیکربندی بهینه مؤثر باشد.

Authorship Contribution Statement

Dr. Alireza Bozorgi



Biography: Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Software, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing.

Dr. Seyyed Ahmad Nourbakhsh



Biography: Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Contribution Statement: Writing – review & editing.

۶- مراجع

- [1] Global Wind Energy Council (GWEC). Global Wind Report 2026. 2026.
- [2] International Energy Agency (IEA). Renewables 2025: Analysis and Forecast to 2030. Paris: IEA; 2025.
- [3] Li Y, Yang S, Feng F, Tagawa K. A review on numerical simulation based on CFD technology of aerodynamic characteristics of straight-bladed vertical axis wind turbines. Energy Reports. 2023; 9:4360–4379.
- [4] Le Bihan J, Lapi T, Halloy J. Beyond 2050: From deployment to renewal of the global solar and wind energy system. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2025.
- [5] International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable Power Generation Costs in 2023. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency; 2024.
- [6] Kassa B, Baheta A, Beyene A. Current trends and innovations in enhancing the aerodynamic performance of small-scale, horizontal axis wind turbines: A review. ASME Open Journal of Engineering. 2024; 3:031001.
- [7] Tummala A, Velamati RK, Sinha DK, Indraja V, Krishna VH. A review on small scale wind turbines. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016; 56:1351–1371.
- [8] Becerra M, Morán J, Jerez A, Cepeda F, Valenzuela M. Wind energy potential in Chile: Assessment of a small scale wind farm for residential clients. Energy Conversion and Management. 2017; 140:71–90.
- [9] Bortolini M, Gamberi M, Graziani A, Manzini R, Pilati F. Performance and viability analysis of small wind turbines in the European Union. Renewable Energy. 2014; 62:629–639.
- [10] Hosseinalizadeh R, Sadat Rafiei E, Alavijeh AS, Ghaderi SF. Economic analysis of small wind turbines in residential energy sector in Iran. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2017; 20:58–71.
- [11] Mostafaeipour A. Economic evaluation of small wind turbine utilization in Kerman, Iran. Energy Conversion and Management. 2013; 73:214–225.
- [12] Mukulo B, Ngaruiya J, Kamau J. Determination of wind energy potential in the Mwingi-Kitui plateau of Kenya. Renewable Energy. 2014; 63:18–22.
- [13] Alam F, Jin Y. The utilisation of small wind turbines in built-up areas: Prospects and challenges. Wind. 2023;3(4):418–438.

- [14] Aravindhan N, Natarajan MP, Ponnuvel S, Devan PK. Recent developments and issues of small-scale wind turbines in urban residential buildings: A review. *Energy & Environment*. 2023; 34(4):1142–1165.
- [15] Waye KP, Öhrström E. Psycho-acoustic characters of relevance for annoyance of wind turbine noise. *Journal of Sound and Vibration*. 2002; 250:65–73.
- [16] Bakker RH, Pedersen E, Van den Berg GP, Stewart RE, Lok W, Bouma J. Impact of wind turbine sound on annoyance, self-reported sleep disturbance and psychological distress. *Science of The Total Environment*. 2012; 425:42–51.
- [17] Van Renterghem T, Bockstael A, De Weirt V, Botteldooren D. Annoyance, detection and recognition of wind turbine noise. *Science of The Total Environment*. 2013; 456–457:333–345.
- [18] Woodland L, Minkin M, Fenech B. Health effects related to wind turbine sound – a rapid evidence review covering 2020–2024. *Proceedings of the 53rd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (INTER-NOISE 2024)*. 2024:7700–7711.
- [19] Wagner S, Bareiss R, Guidati G. *Wind Turbine Noise*. Springer Science & Business Media; 2012.
- [20] Salt AN, Hullar TE. Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines. *Hearing Research*. 2010; 268:12–21.
- [21] Inagaki T, Li Y, Nishi Y. Analysis of aerodynamic sound noise generated by a large-scaled wind turbine and its physiological evaluation. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2015; 12:1933–1944.
- [22] Nissenbaum MA, Aramini JJ, Hanning CD. Effects of industrial wind turbine noise on sleep and health. *Noise and Health*. 2012; 14:237.
- [23] Shepherd D, McBride D, Welch D, Dirks KN, Hill EM. Evaluating the impact of wind turbine noise on health-related quality of life. *Noise and Health*. 2011; 13:333.
- [24] Danish Environmental Protection Agency (EPA). *Statutory Order on Noise from Wind Turbines (Executive Order No. 135 of 7 February 2019)*. Copenhagen: Danish Environmental Protection Agency; 2019.
- [25] Li Y, Paik KJ, Xing T, Carrica PM. Dynamic overset CFD simulations of wind turbine aerodynamics. *Renewable Energy*. 2012; 37:285–298.
- [26] Song Q, Lubitz WD. Design and testing of a new small wind turbine blade. *Journal of Solar Energy Engineering*. 2014; 136:034502.
- [27] Thumthae C, Chitsomboon T. Optimal angle of attack for untwisted blade wind turbine. *Renewable Energy*. 2009; 34:1279–1284.
- [28] Kress C, Chokani N, Abhari R. Downwind wind turbine yaw stability and performance. *Renewable Energy*. 2015; 83:1157–1165.
- [29] Mikkelsen R, Sørensen JN, Shen WZ. Modelling and analysis of the flow field around a coned rotor. *Wind Energy*. 2001; 4:121–135.
- [30] Bozorgi A, Ghorbaniasl G, Nourbakhsh SA. The reduction in low-frequency noise of horizontal-axis wind turbines by adjusting blade cone angle. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2019; 16(6):2573–2586.
- [31] Hand M, Simms D, Fingersh L, Jager D, Cotrell J, Schreck S, Larwood S. Unsteady aerodynamics experiment phase VI: Wind tunnel test configurations and available data campaigns. *National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, Report No. NREL/TP-500-29955*; 2001.

- [32] Bozorgi A, Ghorbaniasl G. Determination of significant sources generating low-frequency noise in horizontal axis wind turbines. *Energy Equipment and Systems*. 2020;8(3):253–262.
- [33] Williams JF, Hawkins DL. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1969; 264:321–342.
- [34] Farassat F. Derivation of formulations 1 and 1A of Farassat. 2007.
- [35] International Electrotechnical Commission (IEC). IEC 61400-11 Wind Turbine Generator Systems—Part 11: Acoustic Noise Measurement Techniques. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission; 2012.
- [36] Bozorgi AR. Investigation of low-frequency noise of horizontal axis wind turbines by a hybrid approach. *Renewable Energy Research and Applications*. 2021;2(2):185–189.