

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(special issue 3) (2021) 415-418 DOI: 10.22060/mej.2020.17269.6557



Investigation of the effect of free-wind velocity on the performance of small-scale vertical axis wind turbine

F. Sepehrianazar^{1,*}, R. Hassanzadeh¹, I. Mirzaee²

¹ Faculty of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran
² Faculty of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

ABSTRACT: In the present research, the effects of various parameters in simulating wind flow around an H-type vertical axis wind turbine with NACA0018 airfoils are studied. All computations are carried out using the computational fluid dynamics method and finite volume approach. Free-wind velocities of 5, 10, and 15 m/s, and tip speed ratios of 3 and 5 are considered. Grid size, time-step size, rotating zone diameter, and domain size independence studies are investigated. All obtained results are compared with experimental data and show good agreement. Examination of obtained results reveals that by increasing Free-wind velocity, maximum momentum coefficient occurs at higher azimuthal angles. Also, by decreasing tip speed ratio, more volume of air penetrates the rotor and therefore, fluctuations of wind turbine increase and, lifecycle and performance of wind turbine decrease. Furthermore, the effect of tip speed ratio on the performance of wind turbine is more significant than Free-wind velocity so that by increasing tip speed ratio from 3 to 5 at a constant Free-wind velocity of 10 m/s, the power coefficient increases by 81.87% and by increasing Free-wind velocity from 5 to 10 m/s at a constant tip speed ratio of 3, power coefficient increases by 58.2%.

Review History:

Received: Mar. 28, 2019 Revised: Dec. 31, 2019 Accepted: Mar. 10, 2020 Available Online: Mar. 29, 2020

Keywords:

Wind Turbine Free-wind Velocity Vorticity Momentum Coefficient Power Coefficient

1-Introduction

By increasing the global population, demand to use energy sources increases. Among these energy sources, fossil fuels are used in most countries because of their benefits to the traders and their compatibility with machines and devices. Using fossil fuels as providing energy sources has disadvantages such as increasing greenhouse gases, global warming, pollution, acidic rain, polar ice caps melting, draining water resources, etc. The best solution to prevent the mentioned results of using fossil fuels are renewable energy resources such as wind, solar, ocean waves, hydroelectric and geothermal. Among these energy resources, wind energy is one of the most available energy resources. Wind Energy can be harnessed in residential and nonresidential places, coastlines, offshore, during the day and night, and in many climate conditions if the wind velocity is within the proper limit for harnessing energy by wind turbines. Wind turbines are used to capture wind energy source. Wind turbines are manufactured in two types of Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) and Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT). HAWTs are more efficient than VAWTs but have more installation and maintenance costs. Also, HAWTs need more space for installation and are sensitive to wind flow direction but VAWTs need a small space of installation and are not sensitive to the wind flow direction. In the following, some published papers about VAWTs are reviewed.

Li et al. [1-3] studied the effects of aerodynamic forces, the number of blades, and pitch angles of blades. They showed that by increasing the number of blades, power coefficient of the wind turbine decrease, and maximum power coefficient occurs at a pitch angle of 6 deg. Howell et al. [4] showed that by increasing surface smoothness of blades, power coefficient of wind turbine decrease at low Reynolds numbers (Re<30000). Rezaeiha et al. [5, 6] studied the minimum requirements for wind turbine simulation and concluded that by reducing time-step size smaller than 0.5 degree of revolution of wind turbine, numerical results do not change significantly. Mohamed [7] investigated noise emission of a double-airfoil VAWT and revealed that 60% spacing between two airfoils is the best configuration to reduce noise emission.

In the present study, the effects of several parameters to simulate flow field around a VAWT accurately, are investigated. Also, performance of a two-bladed H-type Darrieus VAWT under several free-wind velocities and tip speed ratios are studied.

2- Computational Domain

A two-bladed H-type Darrieus VAWT with NACA0018 airfoils is simulated numerically to study the performance of wind turbine under different conditions. Two-dimensional computational domain is shown in Fig. 1. In Table 1, geometric specifications of the computational domain are shown.

*Corresponding author's email:sep.farid@yahoo.com

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.



Fig. 1. Two-dimensional computational domain



Fig. 2. Time-step size independence study for blade A

3- Governing Equations

Transition SST turbulence model is employed to evaluate turbulence effects. The governing equations for 2D, unsteady, turbulent, and incompressible flow are given as follows;

Conservation of mass: $\nabla \vec{V} = 0$

$$\nabla . V = 0$$

Conservation of momentum:

$$\rho \frac{DV}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \bar{V}$$

The dimensionless coefficients are defined by the following equations [8]:

$$C_{D} = \frac{F_{D}}{0.5 \times \rho U^{2}S}$$
$$C_{L} = \frac{F_{L}}{0.5 \times \rho U^{2}S}$$
$$C_{m} = \frac{M}{0.5 \times \rho U^{2}S}$$



Fig. 3. Please delete the Persian sentence just under this figure!

	Table 1.	Geometric and	functional	specifications of	of studied	wind	turbine	model
--	----------	---------------	------------	-------------------	------------	------	---------	-------

parameter	value		
Airfoil	NACA0018		
Number of blades	2		
Diameter of rotor (D_t)	1 m		
Chord length	60 mm		
Shaft Diameter (D_s)	40 mm		

4- Results and Discussion

In Fig. 2, instantaneous momentum coefficient of blades A and B for the last revolution of the rotor are shown. According to this figure, by increasing free-wind velocity, maximum momentum coefficients of blades increase and occur at higher azimuthal angles. Also, maximum momentum coefficient of blade A occurs at azimuthal angles of around 90 deg and that of blade B occurs at azimuthal angles of around 270 deg.

5- Conclusions

In this paper, numerical and geometrical parameters of an H-type VAWT have been studied in order to have an accurate simulation. Free-wind velocities of 5, 10, and 15 m/s and tip speed ratios of 3 and 5 have been investigated. By increasing free-wind velocity, maximum momentum coefficient increases. More volume of air penetrates the rotor at a tip speed ratio of 3 and therefore, by increasing fluidsolid interaction, vorticity patterns inside the rotor increase.

References

- [1] Q.a. Li, T. Maeda, Y. Kamada, J. Murata, K. Furukawa, M. Yamamoto, Effect of number of blades on aerodynamic forces on a straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine, Energy, 90, Part 1 (2015) 784-795.
- [2] Q.a. Li, T. Maeda, Y. Kamada, J. Murata, T. Kawabata, K. Shimizu, T. Ogasawara, A. Nakai, T. Kasuya, Wind tunnel and numerical study of a straight-bladed vertical axis wind turbine in three-dimensional analysis (Part I: For predicting aerodynamic loads and performance), Energy, 106 (2016) 443-452.
- [3] Q.a. Li, T. Maeda, Y. Kamada, J. Murata, T. Kawabata, K. Shimizu, T. Ogasawara, A. Nakai, T. Kasuya, Wind tunnel and numerical study of a straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine in three-dimensional analysis (Part II: For predicting flow field and performance), Energy, 104 (2016) 295-307.
- [4] R. Howell, N. Qin, J. Edwards, N. Durrani, Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine, Renewable Energy, 35(2) (2010) 412-422.

- [5] A. Rezaeiha, I. Kalkman, B. Blocken, CFD simulation of a vertical axis wind turbine operating at a moderate tip speed ratio: Guidelines for minimum domain size and azimuthal increment, Renewable Energy, 107 (2017) 373-385.
- [6] A. Rezaeiha, H. Montazeri, B. Blocken, Towards accurate CFD simulations of vertical axis wind turbines at different tip speed ratios and solidities: Guidelines for azimuthal increment, domain size and convergence,

Energy Conversion and Management, 156 (2018) 301-316.

- [7] M.H. Mohamed, Reduction of the generated aeroacoustics noise of a vertical axis wind turbine using CFD (Computational Fluid Dynamics) techniques, Energy, 96 (2016) 531-544.
- [8] J.D. Anderson Jr, Fundamentals of aerodynamics, Tata McGraw-Hill Education, 2010.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

F. Sepehrianazar, R. Hassanzadeh, I. Mirzaee, Investigation of the effect of free-wind velocity on the performance of small-scale vertical axis wind turbine. Amirkabir J. Mech. Eng., 53(special issue 3) (2021).415-418.

DOI: 10.22060/mej.2020.17269.6557



نشريه مهندسي مكانيك اميركبير



نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ویژه ۳، سال ۱۴۰۰، صفحات ۱۷۰۹ تا ۱۷۲۸ DOI: 10.22060/mej.2020.17269.6557

بررسی تأثیر سرعت جریان آزاد باد بر عملکرد توربین باد محور عمودی مقیاس کوچک

فرید سپهریان آذر ^{(و*}، رحیم حسنزاده ۱، ایرج میرزایی^۲

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران ۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

خلاصه: در تحقیق حاضر، تأثیر عوامل مختلف در شبیهسازی جریان اطراف یک توربین باد محور عمودی نوع H با پرههایی از مقطع ایرفویل NACA0018 مورد مطالعه قرار گرفته است. تمامی محاسبات با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی و روش حجم محدود انجام شدهاند. سرعتهای جریان باد ۵، ۱۰ و ۱۵ متربرثانیه و نسبت سرعت نوکهای ۳ و ۵ مورد بررسی قرار گرفته اند. استقلال نتایج عددی از شبکه بندی، گام زمانی، قطر ناحیهی چرخشی و ابعاد دامنه محاسباتی مطالعه شده است. تمامی نتایج عددی از شبکه بندی، گام زمانی، قطر ناحیهی چرخشی و نشان می دهند. با توجه به نتایج بهدست آمده، با افزایش سرعت جریان آزاد باد، ماکزیمم مقدار ضریب مومنتوم در زوایای نبزرگتری اتفاق می افتد. همچنین با کاهش نسبت سرعت نوک، به دلیل نفوذ حجم هوای بیشتر به درون روتور، میزان نوک در راندمان توربین باد چشمگیرتر از تأثیر سرعت جریان آزاد باد می باشد به طوری که با افزایش نسبت سرعت نوک در راندمان توربین باد چشمگیرتر از تأثیر سرعت جریان آزاد باد می باشد به طوری که با افزایش نسبت سرعت از ۳ به ۵ در سرعت جریان باد ثابت ۳. متربی توان ۲۸/۸ % و با افزایش سرعت جریان آزاد باد از ۵ می از از ۱۰ باد از متربر ثانیه در نسبت سرعت نوک ثابت ۳. متربی توان ۲۵/۸ % و با افزایش سرعت جریان آزاد باد از ۵ می ان از ۱۰ باد از

تاریخچه داوری: دریافت: ۱۳۹۸ / ۱۳۹۸ بازنگری: ۱۲/۱۰ / ۱۳۹۸ پذیرش: ۱۲/۲۰ / ۱۳۹۹ ارائه آنلاین: ۱۱/۱۰ / ۱۳۹۹

> کلمات کلیدی: توربین باد سرعت جریان باد دنباله ضریب مومنتوم ضریب توان

۱– مقدمه

با افزایش جمعیت کرهی زمین، استفاده از منابع انرژی برای تأمین انرژی موردنیاز، افزایش مییابد. از میان منابع انرژی، سوختهای فسیلی به دلیل منافع مالی و همچنین سازگار بودن دستگاهها و ماشینآلات با این نوع سوختها، در اکثر کشورهای جهان مورداستفاده قرار می گیرند. استفاده از سوختهای فسیلی بهعنوان منبع تأمین انرژی معایب زیادی دارد ازجمله، افزایش میزان انتشار گازهای گلخانهای، افزایش میزان آلایندهها، گرم شدن کرهی زمین، خشک شدن منابع آب، بارانهای اسیدی، ذوب شدن یخهای قطبی و... . برای جلوگیری از معایب ذکرشده، باید از منابع انرژی تجدید

هسم sep.farid@yahoo.com نویسنده عهدهدار مکاتبات: *

پذیر مانند انرژی خورشید، انرژی باد، انرژی امواج دریا، زمین گرمایی و... استفاده کنیم. از میان این منابع انرژی تجدید پذیر، انرژی باد یکی از در دسترس ترین منابع برای تأمین انرژی موردنیاز است. انرژی باد در اکثر نقاط کرهی زمین، در مناطق خشکی و دریایی، در شب و روز و در اکثر شرایط آب و هوایی بهطوری که میزان سرعت باد در محدودهی مناسب برای توربین باد موردنظر قرار داشته باشد، قابل بهرهبرداری است. برای بهرهبرداری از انرژی باد، توربینهای بادی مورداستفاده قرار می گیرند. توربینهای باد معمولاً در دو نوع محور افقی و محور عمودی ساخته میشوند. توربینهای محور افقی دارای راندمان بیشتر ولی هزینهی نصب و تعمیر و نگهداری بیشتری هستند. همچنین، توربینهای محور افقی نیاز به فضای بیشتر و

کو بی ای مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) ای بی مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) دیدن فرمائید.

نسبت به جهت وزش باد دارای حساسیت زیادی هستند. در مقابل، توربینهای محور عمودی هزینه نصب و راهاندازی کمتری دارند و مستقل از جهت وزش باد هستند. همچنین، این نوع توربینها حساسیت کمتری نسبت به نوسانات سرعت جریان باد دارند. در ادامه به مرور چند نمونه از تحقیقات انجام گرفته در مورد توربین باد محور عمودی پرداخته شده است.

مشخصات هندسی توربین باد مانند، تعداد پرهها، نوع پرهها، نوع روتور و... توسط نویسندگان مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. لی و همکاران ([۱–۴] تأثیر نیروهای آئرودینامیک، تعداد پرهها و زاویهی حملهی پرهها را مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که با افزایش تعداد پرهها، راندمان توربین باد کاهش می ابد و همچنین، ماکزیمم راندمان در زاویهی استقرار ۶۶ درجه اتفاق میافتد. هول و همکاران ۳ [۵] نشان دادند که با افزایش میزان صافی سطح پرههای توربین باد، راندمان آن در اعداد رینولدز پایین (رینولدزهای کمتر از ۳۰۰۰۰) کاهش می یابد. مکفی و بین ٔ [۶] نشان دادند که پرههای انعطاف پذیر در یک نوع توربین باد محور عمودی باعث افزایش راندمان توربین باد می شود. رضاییها و همکاران^ [۹–۹] حداقل شرایط عددی موردنیاز برای شبیهسازی توربین باد را مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با کاهش گام زمانی محاسبات از ۰/۵ تا ۰/۰۵ درجه دوران توربین باد، نتایج عددی تفاوت چندانی نمی کنند. عبدالهی فر و کریمیان [۱۰] یک نوع توربین باد ترکیبی داریوس- ساونیوس را بهصورت عددی شبیهسازی کردند. آنها با قراردادن یک دیواره در پرههای پشت به باد ساونیوس، نشان دادند که گشتاور متوسط توربین باد افزایش می یابد. الخوری و همکاران [۱۱] با مطالعهی پرههای با زوایای استقرار تغییرپذیر در یک توربین باد محور عمودی نشان دادند که پرههای نازکتر (NACA0018) در نسبت سرعت نوک^۷های پایین دارای عملکرد بهتری نسبت به پرههای ضخیمتر (NACA0021) هستند. محمد [۱۲] میزان انتشار صوت را در یک توربین باد با پرههای دو-ایرفویله را بررسی کرد و به این نتیجه رسید که با وجود ۶۰% فاصله در بین دو ایرفویل، میزان انتشار صوت

به اندازهی ۵۶/۵۵ % کاهش می یابد. لی و همکاران^ [۱۳] نشان دادند که با اتصال انحرافی پرهها به شفت، عملکرد توربین باد افزایش مى يابد. ميزان انحراف، بستكى به نوع ايرفويل دارد.

مشخصات جریانهای گردابه ای و جریانهای آشفته و سایر پارامترهای فیزیکی جریان توسط نویسندگان مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. لی و همکاران [۱۴] با بررسی تأثیر اضافهشدن مواد خارجی مانند برف و یخ بر روی پرههای توربین باد، نشان داد که با افزایش میزان مواد خارجی، عملکرد توربین باد کاهش می یابد. بار گاو و همکاران [10] تأثیر نوسانات سرعت جریان باد را بر عملکرد یک نوع توربین باد محور عمودی با ۳ پرهی NACA0015 را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که سرعت جریان باد با دامنه ی نوسانات ۵۰% منجر به ماکزیمم عملکرد توربین باد می شود. دانو و همکاران ۱۰ [۱۶] با بررسی نوسانات سرعت جریان باد نشان دادند که در نسبت سرعت نوکهای پایین، با افزایش نوسانات، راندمان توربین باد کاهش می یابد و در نسبت سرعت نوکهای بالا، نوسانات سرعت باد تأثیر چندانی بر عملکرد توربین باد ندارد. بوساس و دانو'' [۱۷] تأثیر نوسانات جریان باد را بر عملکرد توربین باد محور عمودی با پرههای خمیده بررسی کردند و با مقایسهی عملکرد آن با پرههای متقارن، نشان دادند که با افزایش نوسانات جریان باد، عملکرد توربین باد با پرههای خمیده کاهش می یابد. تسیونی و همکاران^{۱۲} [۱۸] مشخصههای جریان آشفته توربین باد در ناحیه پشت توربین را با استفاده از روش سرعت سنجی تصویری ذرات^{۱۳} در یک تونل باد جت باز بررسی کردند. آنها دنبالهی جریان را در صفحات افقی و عمودی مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که در فواصل بزرگتر از ۳ برابر شعاع توربین باد، ساختارهای گردابهای قابل تشخیص نیستند.

در این تحقیق، به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در حل عددی بهمنظور شبیهسازی دقیق و همچنین عملکرد یک نوع توربین باد محور عمودی نوع H در سرعتهای مختلف جریان آزاد باد و نسبت سرعتهای نوک مختلف پرداخته می شود. بدین منظور ابتدا استقلال از شبکهبندی، گام زمانی، تعداد دورانها و ابعاد دامنهی محاسباتی مورد مطالعه قرارگرفته و نتایج با دادههای آزمایشگاهی مقایسه

- Bausas and Danao 11 Tescione et al. 12

¹ Li et al. 2

Pitch angle Howell et al. 3

Macphee and Beyene 4

⁵ Rezaeiha et al.

Elkhoury et al. 6

Tip Speed Ratio (TSR) 7

Li et al. 8

Bhargav et al.

¹⁰ Danao et al.

Particle Image Velocimetry (PIV) 13

می شوند. برای بررسی تأثیر سرعت جریان باد و نسبت سرعت نوک بر عملکرد توربین باد، سرعتهای جریان باد ۵، ۱۰ و ۱۵ متربر ثانیه و نسبت سرعت نوکهای ۳ و ۵ مطالعه می شوند.

۲- مدل عددی

یک توربین باد محور عمودی نوع H دارای دو پره برای شبیه سازی دوبعدی استفاده شده است. پرههای متقارن NACA0018 در یک توربین باد به قطر یک متر، ارتفاع یک متر با سطح جاروب شدهی یک مترمربع در نظر گرفته شده است. طول وتر^۲ پرهها ۶۰ میلی متر میباشند و قطر شفت، ۴۰ میلی متر است. ابعاد ذکر شده، با توجه به کار آزمایشگاهی تسیونی و همکاران [18] در نظر گرفته شده است. در شکل ۱، توربین باد محور عمودی نوع H و فضای محاسباتی دوبعدی به همراه شرایط مرزی برای مطالعه عددی، نشان داده شده است. با توجه به این شکل، در ورودی، خروجی و دیوارههای کناری به ترتیب از شرط مرزی سرعت ورودی، فشار خروجی و شرط مرزی متقارن فیزیکی مدل عددی نشان داده شده است. مرکز محورهای مختصات در نقطهی میانی دامنهی محاسباتی و در مکان L برابر 15D و Wبرابر $_{1}$ میانی دامنهی محاسباتی و در مکان ای برابر مختصات در نقطه میانی دامنه محاسباتی و در مکان ای درسی تأثیر سرعت

1 Chord Length

U U Inlet D_t D_t D_t Symmetry Symmetry Symmetry

شکل ۱: شماتیک سهبعدی توربین باد و دامنه محاسباتی دوبعدی

Fig. 1. Three-dimensional schematic of wind turbine and two-dimensional computational domain

۳- معادلات حاکم

بسیاری از نویسندگان [۶, ۱۵, ۱۹–۲۲] صحت نتایج ارائهشده با استفاده از مدلهای آشفتگی انتقال تنش برشی گذرا^۲ و انتقال تنش برشی کا-امگا^۳ را به اثبات رساندهاند. در این تحقیق مدل آشفتگی انتقال تنش برشی گذرا [۲۳, ۲۴] برای بررسی اثرات آشفتگی در میدان جریان استفاده شده است. معادلات بنیادی حاکم بر میدان جریان برای بقای جرم و مومنتوم و معادلات حاکم بر آئرودینامیک توربین باد بهصورت زیر میباشند.

معادله مومنتوم:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V}$$
(7)

ضرایب بیبعد پسا
$$(C_D)$$
، برا (C_L) و مومنتوم (C_m) بهصورت زیر تعریف میشوند [۲۵]:

$$C_D = \frac{F_D}{0.5 \times \rho U^2 S} \tag{(7)}$$

$$C_L = \frac{F_L}{0.5 \times \rho U^2 S} \tag{(f)}$$

2 Transition SST

3 SST k-ω

 $\nabla \vec{V} = 0$

مقدار	پارامتر			
NACA0018	نوع پره			
٢	تعداد پرەھا			
$r \cdot D_t$	L			
$r \cdot D_t$	W			
۱ متر	قطر توربين باد (D _t)			
۱/۵ متر	قطر ناحيه دورانی (Dr)			
۱ متر	ارتفاع توربين باد			
۶۰ میلیمتر	طول وتر پره			
۴۰ میلیمتر	(D_s) قطر شفت			

جدول ۱: مشخصات هندسی و عملکردی توربین باد مدل مورد مطالعه
Table 1. Geometric and functional specifications of studied wind
turbine model

شكل

شدہ

$$C_m = rac{M}{0.5
ho U^2 S}$$
 (۵)
در روابط فوق، S مساحت سطح ایرفویل، ho چگالی هوا و U
سرعت جریان آزاد میباشند. همچنین ضریب توان و نسبت سرعت

$$C_P = \frac{P}{0.5\rho U^3 S} \tag{9}$$

$$TSR = \frac{R\omega}{U} \tag{Y}$$

نوک بصورت زیر تعریف می شوند:

تمامى ترمهاى جابجايي و أشفتكي بهصورت بالادست مرتبه گسستهسازی شدهاند. همچنین ترمهای زمانی بهصورت مرتبه ضمنی گسستهسازی شدهاند.

۴- استقلال نتایج عددی از شبکهبندی

جهت کاهش خطاهای محاسباتی به دلیل ابعاد نامناسب و در ش شبکهبندی میدان سیال و همچنین استقلال نتایج عددی از تأثیر اندازهی شبکه، مدل عددی توربین باد محور عمودی با تعداد شبکهه مختلف تحلیل شده است. مطالعه استقلال از شبکهبندی برای حا سرعت جریان آزاد ۹/۳ متربر ثانیه و نسبت سرعت نوک ۳/۵ انجام شده است. در این تحلیلها تمامی شرایط هندسی و پارامترهای فیزیکی جریان مطابق با کار آزمایشگاهی تسیونی و همکاران [۱۸] است.

خواهند شد.

Y-plus - Dimensionless Wall Distance

Power Coefficient 2



شکل ۲: شبکه تولید شده برای مدل عددی دوبعدی





شکل ۳: استقلال نتایج عددی از شبکهبندی Fig. 3. Grid size independence study

شماره شبکه	تعداد شبکه	ضريب توان	میزان خطا (٪)	روی پره y ⁺ max	y ⁺ max روی شفت
١	γ	•/۲۵۷		۲/۸۶	•/۴۵۶
٢	197	•/۲۸٨	17/+8	۲/٨۶	•/۴۵۶
٣	۳۷۵۰۰۰	۰/۲۹۱	1/• 4	۲/٨۶	•/۴۵۶
۴	۵۲۲۰۰۰	•/٢٩•	-•/٣۴	۲/٨۶	•/۴۵۶
۵	۷۵۹۰۰۰	•/٢٩•	• • •	۲/۸۶	•/۴۵۶

جدول ۲: مقادیر ضریب توان و میزان خطای آنها نسبت به شبکه قبلی برای مطالعه استقلال از شبکهبندی Table 2. Power coefficient and deviations of grids for grid size independence study

۵- استقلال نتایج عددی از گام زمانی

برای کاهش خطای محاسباتی ناشی از گام زمانی و کاهش زمان محاسبات، استقلال نتایج عددی از گام زمانی مطالعه شده است. در تحلیل جریان اطراف توربین باد، گام زمانی محاسبات را با توجه به سرعت دورانی و میزان افزایش زاویهی سمتی^۱ دوران توربین باد محاسبه می کنند. بسیاری از نویسندگان زاویه سمتی ۱/۱ الی ۱ درجه از دوران روتور را برای گام زمانی پیشنهاد دادهاند. در شکل ۴ نمودار ضریب مومنتوم لحظهای توربین باد برای یک دور آخر دوران روتور برای زوایای سمتی مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴، مقادیر لحظهای مومنتوم برای پره A و پره B در گامهای شکل ۴، مقادیر لحظهای مومنتوم برای پره ۸ و پره از در جه مشابه هم شکل ۴، مقادیر لحظهای مومنتوم برای پره ۸ دوران درجه دارند. نومانی معادل با دوران به اندازهی ۱/۱ درجه و ۵۰/۰ درجه مشابه هم بنابراین با توجه به پایداری و ثابتشدن نتایج که استقلال نتایج را از نظر گرفته شده است.

۶- استقلال نتایج عددی از تعداد دورانهای روتور

برای دستیابی به حالت شبه پایای زمانی و همگرایی پریودیک، توربین باد ۲۵ دورِ کامل را انجام داده است. در شکل ۵ نمودار ضریب مومنتوم لحظهای روتور برحسب زمان بیبعد $\left(\frac{t.U}{D_{i}} = * \right)$ برای ۲۵ دورِ کامل نشان داده شده است. با توجه به این شکل، مقادیر ضریب مومنتوم بعد از زمان بیبعدِ مساوی ۶ بهصورت تناوبی تکرار میشوند که این امر حکایت از عملکرد توربین باد در حالت شبه پایا و پریودیک است. در شبیهسازیهای عددی، تمامی دادهها بعد از دورِ

۱۵ میانگین گیری زمانی شدهاند. تعداد قابل توجه دوران روتور در وضعیت شبه پایا نشانگر متوسط گیری زمانی دقیق در این تحقیق میباشد. در شکل ۶ نمودار ضریب توان برای دورهای مختلف نشان داده شده است. با توجه به این شکل ضریب توان توربین باد بعد از دورِ دهم تغییر چندانی نمی کند به طوری که اختلاف مقدار ضریب توان دورِ ۱۰ و دورِ ۲۵، ۷% ، اختلاف ضریب توان برای دورهای ۱۵ و ۲۵، ۲/۸ % و اختلاف ضریب توان برای دورهای ۲۰ و ۲۵، ۳۵/۷ % میباشد. با توجه به شکل ۶، مقدار ضریب توان بعد از دورِ ۲۰ % میباشد. با توجه به شکل ۶، مقدار ضریب توان بعد از دورِ ۲۰ په میباشد. با توجه به شکل ۶ مقدار ضریب توان بعد از دورِ ۲۰ پر می اشد. با توجه به شکل ۶ مقدار ضریب توان بعد از دورِ ۲۰ میباشد. با توجه به شکل ۶ مقدار ضریب مومنتوم لحظه ای پره ۲ پر می اشد. با توجه به شکل ۶ مقدار می ۲۰ و ۲۵ مقابه م و پره B برای دور آخر دوران روتور نشان داده شده است. با توجه به این شکل نمودار ضریب مومنتوم برای دورهای ۲۰ و ۲۵ مشابه هم بوده و بر روی یکدیگر قرار گرفته اند و این یعنی بعد از دورِ ۲۰ مقادیر مربوط به ضریب مومنتوم تغییر چندانی نمی کنند.

۷- استقلال نتایج عددی از ابعاد دامنه محاسباتی

برای بررسی و مطالعه یدقیق ابعاد دامنه ی محاسباتی تأثیر طول و عرض ناحیه ی محاسباتی و همچنین قطر ناحیه ی چرخشی مطالعه شده است. در شکل ۸ تأثیر طول و عرض دامنه ی محاسباتی و در شکل ۹ تأثیر قطر ناحیه چرخشی بر ضریب مومنتوم پرههای A و B نشان داده شدهاند. با توجه به این شکلها، با افزایش طول و عرض دامنه محاسباتی و همچنین با افزایش قطر ناحیه ی چرخشی، نمودارهای ضریب مومنتوم مشابه هم بوده و بر روی هم قرار گرفتهاند. حداکثر میزان اختلاف ضریب مومنتوم در شکل ۹، ۱/۱ % می باشد.

۸- اعتبار سنجی

¹ Azimuthal Increment





Fig. 4. Time-step size independence study



شکل ۵: ضریب مومنتوم لحظهای روتور برای مطالعهی استقلال نتایج عددی از تعداد دورانهای روتور

Fig. 5.Instantaneous momentum coefficient of rotor for number of revolutions independence study



شکل ۶: متوسط زمانی ضریب توان روتور برای دورهای مختلف برای مطالعهی استقلال نتایج عددی از تعداد دورانهای روتور

Fig. 6. Time-averaged power coefficient of rotor for various revolutions for number of revolutions independence study



شکل ۷. ضریب مومنتوم لحظهای پرهها برای مطالعهی استقلال نتایج عددی از تعداد دورانهای روتور

Fig. 7. Instantaneous momentum coefficient of blades for number of revolutions independence study



شکل ۸: ضریب مومنتوم لحظهای پرهها برای مطالعهی استقلال نتایج عددی از ابعاد دامنهی محاسباتی

Fig. 8. Instantaneous momentum coefficient of blades for domain-size independence study



شکل ۹: ضریب مومنتوم لحظهای پرهها برای مطالعهی استقلال نتایج عددی از قطر ناحیهی چرخشی

Fig. 9.Instantaneous momentum coefficient of blades for rotating zone diameter independence study

پروفیلهای میانگین گیریشده سرعت در جهت جریان و پروفیلهای میانگین گیریشده سرعت عمود برجهت جریان نشان داده شدهاند. نتایج بهدست آمده برای پروفیلهای سرعت با نتایج آزمایشگاهی تسیونی و همکاران [۱۸] و نتایج عددی رضاییها و همکاران [۷] مقایسه شده و تطابق قابل قبولی را نشان میدهند.

همچنین متوسط زمانی ضریب توان روتور در تحقیق حاضر با

نتایج بهدستآمده از مدل عددی، با نتایج آزمایشگاهی تسیونی و همکاران [۱۸] مقایسه شده و تطابق قابل قبولی را نشان میدهند. تمامی شرایط هندسی و ترموفیزیکی جریان در مدل عددی مطابق با کار آزمایشگاهی تسیونی و همکاران [۱۸] میباشد. دادههای تجربی بر اساس پروفیلهای میانگینگیریشده سرعت در جهت جریان و عمود برجهت جریان بیان شدهاند. در شکل ۱۰



شکل ۱۰. اعتبارسنجی نتایج عددی با نتایج کار آزمایشگاهی تسیونی و همکاران [۱۸] و کار عددی رضاییها و همکاران [۷]





شکل ۱۱: اعتبارسنجی نتایج عددی تحقیق حاضر با کار عددی لام و پنگ [۲۱]

Fig. 11.Validation of present numerical study with numerical study of Lam and Peng [21]

نتایج عددی لام و پنگ^۱ [۲۱] مقایسه شدهاند. در شکل ۱۱ نتایج این مقایسه نشان داده شده است. با توجه به این شکل، روند نمودار ضریب توان متوسط برای تحقیق عددی حاضر مطابق با روند کار عددی لام و پنگ [۲۱] نشان میدهد. بهطوری که میزان انحراف نتایج عددی دوبعدی در نسبت سرعت نوک ۵ تقریبا برابر ۲۰% میباشد.

۹- نتایج و بحث

در شکلهای ۱۲ و ۱۳ ضریب مومنتوم لحظهای پرههای A، Bو روتور به ترتیب برای حالتهای نسبت سرعت نوک ۳ و ۵ برای یک دور آخر دوران توربین باد نشان داده شدهاند. با تغییر سرعت زاویهای روتور، نسبت سرعت نوک نیز تغییر می کند. با توجه به شکل ۱۳، با افزایش سرعت جریان آزاد، نوسانات مقدار ضریب مومنتوم کاهش می یابد و ماکزیمم مقدار ضریب مومنتوم برای یک پره افزایش مومنتوم در زوایای بزرگتری مشاهده می شود. ضریب مومنتوم پره A در موقعیت ۲۷۰ درجه به دلیل جریان گردابه ای^۲ ناشی از پره Bو شفت روتور، کاهش می یابد. ماکزیمم مقدار ضریب

. پره A در موقعیت زاویهی فضایی تقریبی ۹۰ درجه اتفاق میافتد. کمترین مقدار ضریب مومنتوم پره A در موقعیت زاویهی فضایی ۱۸۰ درجه و ۲۷۰ درجه اتفاق می افتد. در زاویه های فضایی ۲۰۰ تا ۳۱۵ درجه برای پره A، نوساناتی در نمودار ضریب مومنتوم مشاهده می شود. این نوسانات می تواند به دلیل دنباله های ناشی از شفت رو تور و پره مقابل (پره B) باشد. در شکلهای ۱۴ و ۱۵ ضریب برا و پسای لحظهای پره A در یک دور آخر دوران روتور برای حالتهای مختلف نشان داده شده است. با توجه به این شکلها، با افزایش سرعت جریان آزاد باد، ماکزیمم مقدار ضرایب برا و پسا در زوایای بزرگتری اتفاق می افتد. در حالت نسبت سرعت نوک برابر ۵ (شکل ۱۵)، ماکزیمم مقدار ضریب پسا برای پرهی A در موقعیتهای زاویهای ۸۲/۶ درجه، ۸۵ درجه و ۸۸/۲ درجه به ترتیب برای سرعتهای ۵، ۱۰ و ۱۵ متربرثانیه قرار دارد. مقدار ضریب پسا برای پرهی A در زاویه ۱۸۰ درجه، به صفر می رسد. با افزایش سرعت جریان آزاد باد، ماکزیمم مقدار ضریب برا افزایش می یابد. این افزایش در ضرایب برا و پسا، برای افزایش سرعت جریان آزاد از ۵ به ۱۰ متربر ثانیه محسوس تر است. در شکل ۱۶ کانتورهای سرعت لحظهای در دور آخر دوران روتور به همراه خطوط جریان نشان داده شدهاند.

¹ Lam and Peng

² Vortical flow



شکل ۱۲: ضریب مومنتوم لحظهای برای یک دورِ آخر دوران روتور برای حالت TSR=3

Fig. 12. Instantaneous momentum coefficient for the last revolution of rotor for TSR=3



شکل ۱۳: ضریب مومنتوم لحظهای برای یک دورِ آخر دوران روتور برای حالت TSR=5

Fig. 13.Instantaneous momentum coefficient for the last revolution of rotor for TSR=5









شکل ۱۵: ضرایب پسا و برا برای یک دورِ آخر دوران روتور برای حالت TSR=3

Fig. 15. Drag and lift coefficients for the last revolution of rotor for TSR=5



شکل ۱۶: سرعت لحظهای در دورِ آخر دوران روتور به همراه خطوط جریان برای حالتهای مختلف

Fig. 16. Instantaneous velocity with streamlines for the last revolution of rotor for various cases





Fig. 17. Vorticity Patterns inside rotor at different azimuthal angles for TSR=3



شکل ۱۸: دنبالههای جریان درون روتور در زوایای فضایی مختلف برای حالت TSR=5

Fig. 18. Vorticity Patterns inside rotor at different azimuthal angles for TSR=5



شکل ۱۹: ضریب توان روتور برای حالتهای مختلف سرعت جریان باد

Fig. 19. Power coefficient of rotor for different free-wind speeds

با توجه به خطوط جریان در این شکل، در حالتهای نسبت سرعت نوک برابر ۳، جریان باد از درون روتور عبور می کند و به دلیل برخورد با اجزای روتور (شفت و پرهها) در پایین دست روتور یک جریان نوسانی با دامنه یکوچک دیده می شود. کوچک بودن دامنه ی نوسانات به دلیل کوچک بودن ابعاد هندسی اجزای درون روتور می باشد که سیال هوا با عبور از درون روتور به آن ها برخورد کرده است. ولی در حالتهای نسبت سرعت نوک برابر ۵، به دلیل سرعت دورانی بالای روتور، جریان هوا به راحتی نمی تواند از درون روتور عبور کند و حجم استوانه در برابر جریان عمل می کند و نوساناتی در پایین دست جریان مشاهده می شود ولی دامنه ی این نوسانات در مقایسه با حالتهای نسبت سرعت نوک برابر ۳ بزرگتر است و در فاصله ی دورتری نسبت به روتور شکل می گیرند.

در شکلهای ۱۷ و ۱۸ کانتورهای دنبالههای جریان درون روتور به ترتیب برای حالتهای نسبت سرعت نوک های ۳ و ۵ و زوایای فضایی مختلف نشان داده شدهاند. وجود اندازهی زیاد دنبالهها درون روتور باعث ایجاد نوسانات زیاد در اجزای درونی روتور میشود که این امر باعث کاهش راندمان و کاهش عمر مفید اجزا به دلیل ارتعاشات می شود. با توجه به این شکلها، مساحت بیشتری از فضای درون روتور در حالت نسبت سرعت نوک ۳ دارای نوسانات سرعت باد می باشد و اندازه ی دنباله ها در حالت نسبت سرعت نوک ۳ بیشتر از حالت نسبت سرعت نوک ۵ می باشد. در حالت نسبت سرعت نوک ۳ به دلیل سرعت دورانی پایین روتور، حجم هوای بیشتری به درون روتور نفوذ می کند و با برخورد با اجزای درونی روتور دنبالههای جریان بیشتری ایجاد میشود ولی در حالت نسبت سرعت نوک ۵ به دلیل سرعت دورانی بالای روتور، حجم هوای کمتری به درون روتور نفوذ می کند و روتور مانند یک استوانه در برابر جریان عمل می کند. در این حالت به دلیل اندر کنش کم سیال با اجزای درونی روتور، دنبالههای جریان درون روتور کمتر از حالت نسبت سرعت نوک ۳ می باشند. همچنین با توجه به موقعیت پرهها در زوایای مختلف، نوسانات موجود در نمودارهای ضریب مومنتوم، برا و پسا (شکلهای ۱۲ تا ۱۵) در زوایای فضایی خاص، به دلیل برخورد دنبالههای جریان با پرهها در این زوایا میباشد.

در شکل ۱۹، ضریب توان روتور برای حالتهای مختلف سرعت

جریان باد و سرعت دورانی روتور نشان داده شده است. در یک سرعت جريان باد ثابت، با افزايش نسبت سرعت نوک، ضريب توان روتور افزایش مییابد. همچنین در نسبت سرعت نوک ثابت، با افزایش سرعت جريان باد، ضريب توان روتور افزايش مىيابد. افزايش نسبت سرعت نوک، تأثیر بیشتری نسبت به سرعت جریان باد در افزایش ضریب توان روتور دارد به طوری که ضریب توان روتور در حالت نسبت سرعت نوک ۳ و سرعت جریان آزاد ۱۰ متربرثانیه، برابر ۰/۱۹۳ ، در حالت نسبت سرعت نوک ۵ و سرعت جریان آزاد ۱۰ متربرثانیه، برابر ۳۵۱/۰ و در حالت نسبت سرعت نوک ۳ و سرعت جریان آزاد ۵ متربرثانیه، برابر ۰/۱۲۲ میباشد. یعنی با افزایش نسبت سرعت نوک از ۳ به ۵ در سرعت ثابت ۱۰ متربرثانیه، ضریب توان روتور ۸۱/۸۷ % افزایش یافته و با افزایش سرعت جریان باد از ۵ به ۱۰ متربرثانیه در نسبت سرعت نوک ثابت ۳، ضریب توان روتور ۵۸/۲ % افزایش می یابد. بنابراین توربین باد باید به گونه ای طراحی شود تا برای دستیابی به حداکثر راندمان، در سرعتهای پایین جریان باد دارای نسبت سرعت نوک بالا باشد.

۱۰- نتیجهگیری

در تحقیق حاضر پارامترهای هندسی و عددی برای شبیهسازی صحیح یک نوع توربین باد محور عمودی نوع H مورد بررسی قرار گرفت. سرعتهای جریان آزاد باد ۵، ۱۰ و ۱۵ متربرثانیه و نسبت سرعت نوکهای ۳ و ۵ مورد مطالعه قرار گرفت. برای بررسی صحت شبیهسازیها، مطالعات استقلال نتایج عددی از شبکهبندی، استقلال نتایج عددی از گام زمانی، استقلال نتایج عددی از تعداد دورانهای روتور و استقلال نتایج عددی از ابعاد دامنه محاسباتی انجام گرفت و نتایج عددی حاصل با دادههای آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد. برای بررسی عملکرد توربین باد در شرایط مختلف سرعت جریان باد و نسبت سرعت نوک، پارامترهای ضریب مومنتوم، ضریب برا، ضریب پسا و دنبالههای تشکیلشده درون روتور مورد بررسی دقیق قرار گرفتند. با توجه به نتایج بهدستآمده، ماکزیمم مقدار ضریب مومنتوم برای پره A در اطراف زاویهی فضایی ۹۰ درجه و برای پره B در اطراف زاویهی فضایی ۲۷۰ درجه اتفاق میافتد. همچنین ضریب مومنتوم پره A در اطراف زاویه ۲۷۰ درجه و ضریب مومنتوم پره B در اطراف Aزاویه ۹۰ درجه دارای نوساناتی میباشد که اندازهی این نوسانات برای

- [3] Q.a. Li, T. Maeda, Y. Kamada, J. Murata, T. Kawabata, K. Shimizu, T. Ogasawara, A. Nakai, T. Kasuya, Wind tunnel and numerical study of a straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine in three-dimensional analysis (Part II: For predicting flow field and performance), Energy, 104 307-295 (2016).
- [4] Q.a. Li, T. Maeda, Y. Kamada, J. Murata, M. Yamamoto, T. Ogasawara, K. Shimizu, T. Kogaki, Study on power performance for straight-bladed vertical axis wind turbine by field and wind tunnel test, Renewable Energy, (2016) 90 300-291.
- [5] R. Howell, N. Qin, J. Edwards, N. Durrani, Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine, Renewable Energy, 422-412 (2010) (2)35.
- [6] D.W. MacPhee, A. Beyene, Fluid–structure interaction analysis of a morphing vertical axis wind turbine, Journal of Fluids and Structures, 159-143 (2016) 60.
- [7] A. Rezaeiha, I. Kalkman, B. Blocken, CFD simulation of a vertical axis wind turbine operating at a moderate tip speed ratio: Guidelines for minimum domain size and azimuthal increment, Renewable Energy, -373 (2017) 107 385.
- [8] A. Rezaeiha, I. Kalkman, B. Blocken, Effect of pitch angle on power performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine, Applied Energy, 150-132 (2017) 197.
- [9] A. Rezaeiha, H. Montazeri, B. Blocken, Towards accurate CFD simulations of vertical axis wind turbines at different tip speed ratios and solidities: Guidelines for azimuthal increment, domain size and convergence, Energy Conversion and Management, 316-301 (2018) 156.
- [10] A. abdolahifar, S.M.H. Karimian, Aerodynamic Performance Improvement of Hybrid Darrieus-Savonius Vertical Axis Wind Turbine, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, (2019) -.(in Persian)
- [11] M. Elkhoury, T. Kiwata, E. Aoun, Experimental and numerical investigation of a three-dimensional verticalaxis wind turbine with variable-pitch, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, (2015) 139 123-111.
- [12] M.H. Mohamed, Reduction of the generated aero-

حالت نسبت سرعت نوک ۳ بیشتر از حالت نسبت سرعت نوک ۵ میباشد. در نسبت سرعت نوکهای پایین، حجم بیشتری از هوا به درون روتور نفوذ میکند و به دلیل افزایش اندرکنش بین سیال و اجزای درونی روتور، گردابه های بیشتری درون روتور شکل میگیرد. این گردابه ها باعث افزایش نوسانات و ارتعاشات اجزا شده و عمر مفید اجزا و راندمان توربین باد کاهش مییابد.

فهرست علائم

يسى	علائم انگل
مساحت، m ²	A
ضريب پسا	C_{D}
ضریب برا	C_{L}
ضريب مومنتوم	C_m
صريب توان	C_p dt^*
تام رمانی بیبعد تمان ۶/۱	P
عدد رينولد:	Re
شدت آشفتگی (%)	ΤĪ
نسبت سرعت نوک	TSR
زمان بىبعد	t^*
سرعت جریان ازاد، m/s	U
نى	علائم يونا
چگالی، kg/m³	ρ
ویسکوزیته دینامیک، ۱.s	μ
طول سلول	ζ
ورتیسیتی rad/s	ω ω*
ورىيسىتى بى بعد	ω
	زيرنويس
ماكزيمم	max
	بالانويس

میانگین زمانی

منابع و مراجع

 Q.a. Li, T. Maeda, Y. Kamada, J. Murata, K. Furukawa, M. Yamamoto, Effect of number of blades on aerodynamic forces on a straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine, Energy, 90, Part 795-784 (2015) 1.

Kg/m

[2] Q.a. Li, T. Maeda, Y. Kamada, J. Murata, T. Kawabata, K. Shimizu, T. Ogasawara, A. Nakai, T. Kasuya, Wind tunnel and numerical study of a straight-bladed vertical axis wind turbine in three-dimensional analysis (Part I: For predicting aerodynamic loads and performance), Energy, 452-443 (2016) 106.

- [19] W.-H. Chen, C.-Y. Chen, C.-Y. Huang, C.-J. Hwang, Power output analysis and optimization of two straightbladed vertical-axis wind turbines, Applied Energy, 185, Part 232-223 (2017) 1.
- [20] M. Jafaryar, R. Kamrani, M. Gorji-Bandpy, M. Hatami, D.D. Ganji, Numerical optimization of the asymmetric blades mounted on a vertical axis cross-flow wind turbine, International Communications in Heat and Mass Transfer, 104-93 (2016) 70.
- [21] H.F. Lam, H.Y. Peng, Study of wake characteristics of a vertical axis wind turbine by two- and three-dimensional computational fluid dynamics simulations, Renewable Energy, 398-386 (2016) 90.
- [22] S. Wang, D.B. Ingham, L. Ma, M. Pourkashanian, Z. Tao, Turbulence modeling of deep dynamic stall at relatively low Reynolds number, Journal of Fluids and Structures, 209-191 (2012) 33.
- [23] F.R. Menter, R. Langtry, S. Völker, Transition Modelling for General Purpose CFD Codes, Flow, Turbulence and Combustion, 303-277 (2006) (1)77.
- [24] F.R. Menter, R.B. Langtry, S.R. Likki, Y.B. Suzen, P.G. Huang, S. Völker, A Correlation-Based Transition Model Using Local Variables—Part I: Model Formulation, Journal of Turbomachinery, 422-413 (2006) (3)128.
- [25] J.D. Anderson Jr, Fundamentals of aerodynamics, Tata McGraw-Hill Education, 2010.

acoustics noise of a vertical axis wind turbine using CFD (Computational Fluid Dynamics) techniques, Energy, 96 544-531 (2016).

- [13] Y. Li, S. Zhao, C. Qu, F. Feng, T. Kotaro, Effects of Offset Blade on Aerodynamic Characteristics of Small-Scale Vertical Axis Wind Turbine, Journal of Thermal Science, 339-326 (2019) (2)28.
- [14] Y. Li, K. Tagawa, W. Liu, Performance effects of attachment on blade on a straight-bladed vertical axis wind turbine, Current Applied Physics, 2)10, Supplement) (2010) S-335S338.
- [15] M.M.S.R.S. Bhargav, V. Ratna Kishore, V. Laxman, Influence of fluctuating wind conditions on vertical axis wind turbine using a three dimensional CFD model, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 108-98 (2016) 158.
- [16] L.A. Danao, O. Eboibi, R. Howell, An experimental investigation into the influence of unsteady wind on the performance of a vertical axis wind turbine, Applied Energy, 411-403 (2013) 107.
- [17] M.D. Bausas, L.A.M. Danao, The aerodynamics of a camber-bladed vertical axis wind turbine in unsteady wind, Energy, 93, Part 1164-1155 (2015) 1.
- [18] G. Tescione, D. Ragni, C. He, C.J. Simão Ferreira, G.J.W. van Bussel, Near wake flow analysis of a vertical axis wind turbine by stereoscopic particle image velocimetry, Renewable Energy, 61-47 (2014) 70.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم F. Sepehrianazar , R. Hassanzadeh, I. Mirzaee. Investigation of the effect of free-wind velocity on the performance of small-scale vertical axis wind turbine. Amirkabir J. Mech Eng., 53(special issue 3) (2021).1709-1728.



DOI: 10.22060/mej.2020.17269.6557

بی موجعه محمد ا