



Numerical study of self-starting torque in Darrieus vertical axis wind turbines with J-type blades

Ramin Farzadi, Majid Bazargan*

Department of Mechanical Engineering , K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT: The current study has used a three-dimensional simulation of flow around the three-bladed Darrieus turbine to investigate the turbine's self-starting power. Two types of straight and helical-bladed turbines, which are equipped with J-type blades are considered. The effects of various parameters including wind speed, blade height, and the tip shape of J-type blades which could be open or closed have been studied and compared with those of the turbine with conventional blade form. The flow analysis around the J-type blades determined that the vortices formed on the pressure raise the torque production. By closing the ends of the J-type blade, these vortices are prevented from exiting at the ends that leads to a substantial improvement in the self-starting and low tip speed ratios. The average torque produced by the straight and helical-bladed turbines equipped with closed-end J-type blades is respectively 38.5% and 21% higher than the turbines with full profile blades under self-start-up conditions, and the aforementioned percentages are 49% and 41.9% at low tip speed ratios. The positive effect of using J-type blades under self-starting conditions is more pronounced at low wind speeds and higher blade heights, which makes these blades a viable option for urban applications.

Review History:

Received: Mar. 16, 2024
Revised: May, 11, 2024
Accepted: Jul. 17, 2024
Available Online: Jul. 26, 2024

Keywords:

Darrieus Turbine
J-type Blade
Self-starting Power
Straight Bladed Turbine
Helical Bladed Turbine

1- Introduction

Generally, one of the fundamental issues with Darrieus vertical axis wind turbines (VAWTs) is the lack of self-starting capability [1, 2].

To address the self-starting issue, researchers have proposed combined Darrieus and Savonius turbines. The combination of these turbines involves utilizing the Savonius section for self-starting and the Darrieus section for high TSR torque generation. Various studies have been conducted to optimize the combined turbines, considering factors such as the placement of the Savonius section, the number of blades, and the shape of the blades. The findings indicate that combined turbines can enhance the self-starting power but lead to reduced performance at high TSRs [3, 4].

Numerous researchers have endeavored to improve the performance of Darrieus turbines by altering the structure of turbines and blades. Investigations into helical blades, three-section blades, airfoils plus cavities, serrated leading edges, and grooved blades have provided valuable insights into improving turbine efficiency. However, they did not seem sufficient for solving the self-starting problem [5, 6].

The previous research efforts aimed to enhance their overall performance and enable self-starting capability. One approach involved using blades that could harness both driving and drag forces simultaneously. The introduction

of J-shaped blades showed promise in utilizing drag forces during startup and transitioning to Darrieus turbine behavior. However, previous studies mainly focused on performance under operational conditions rather than self-starting conditions [7-9].

This research utilizes 3D simulation to compare the torque production of a J-type bladed turbine with a turbine equipped with complete blades. The study examines the self-starting torque generated by both turbine types under urban wind conditions, considering the contributions of driving and drag forces. The research also explores innovative ideas such as closing the ends of J-type blades, changing blade height, and implementing helical J-type blades, comparing their performance to turbines with complete blades during self-starting. The investigations cover various wind angles and low TSRs to assess the effectiveness of J-type blades during self-starting comprehensively.

2- Numerical simulation

The cross-sectional profile of the J-type blade is illustrated in Fig. 1. As evident, the J-type blade is generated by removing the pressure surface from the maximum thickness location to the blade trailing edge.

The complete view of the straight-bladed turbine is depicted in Figure 2. Considering urban environmental

*Corresponding author's email: bazargan@kntu.ac.ir



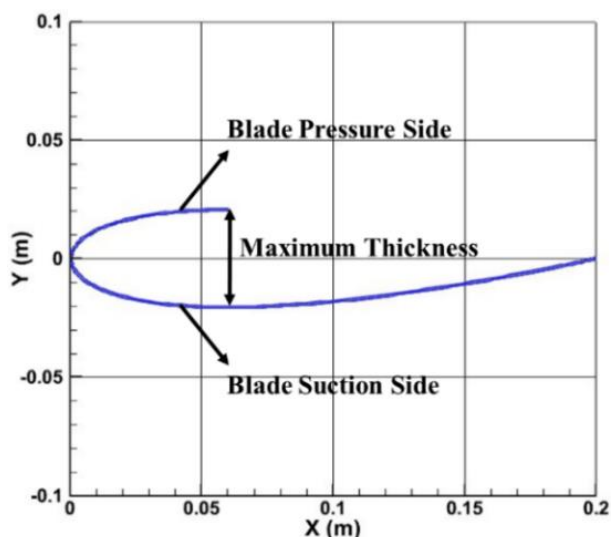


Fig. 1. J-type blade cross-sectional profile

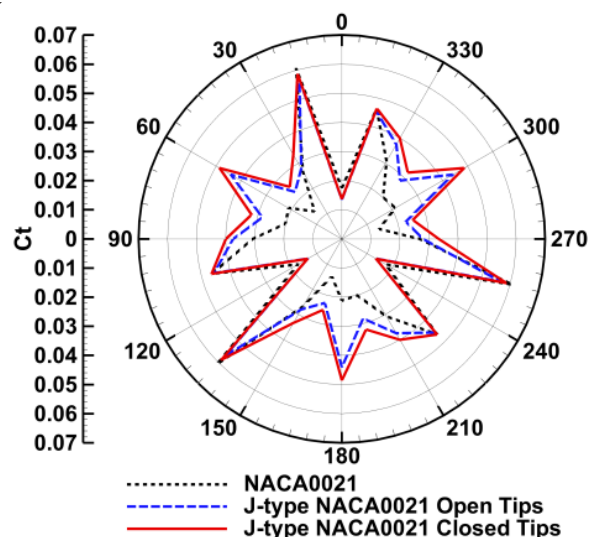


Fig. 3. Self-starting torque of straight-bladed turbine equipped with open and closed-end J-type blades compared to complete blades

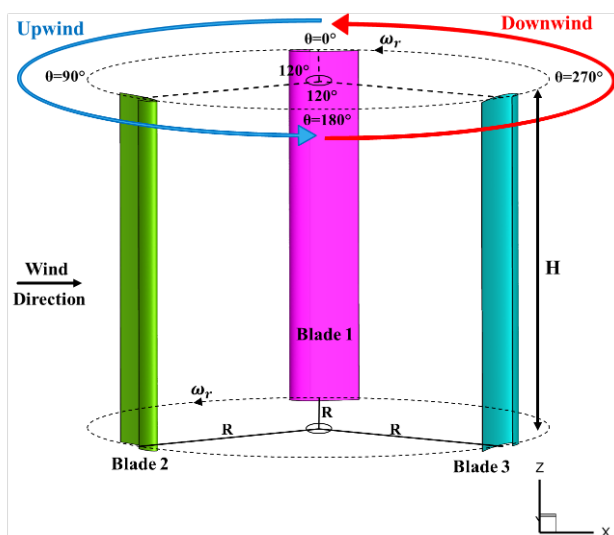


Fig. 2. 3D view of the straight J-type bladed turbine

conditions, a maximum wind speed of 10 m/s is taken into account.

The URANS equations have been employed to simulate the fluid flow around the wind turbine. The $k-\omega$ SST turbulence model has been utilized to estimate the Reynolds stress tensor in these equations. In the present study, 3D turbulent incompressible flow around the turbine has been simulated using the finite volume method. The sliding mesh technique has been utilized at the interface between the rotating and stationary regions. Second-order discretization has been applied for the pressure and momentum equations.

After achieving independence in terms of computational grid and time step, it is observed that when the rotor is rotating, the results exhibit an average error of 11% with the experiments of Ref. [10]. In the self-starting condition, the results are compared with the numerical results of Ref. [6], showing an average error of 3.2%. The comparison of the results with experimental and numerical studies demonstrates a satisfactory agreement between the findings of this research and the numerical and experimental studies.

3- Results and Discussion

A straight-bladed turbine equipped with J-shaped blades generates higher torque than a turbine with complete blades under self-starting conditions. At wind speeds of 10 and 5 meters per second, the torque produced by the turbine equipped with J-shaped blades was 26.9% and 37.6% higher than the turbine with complete blades, respectively. These J-shaped blades appear to be a suitable option for replacing complete blades in urban wind turbine applications. For a rotor configuration where one blade is positioned at 60 degrees and the other blade is at 180 degrees, the maximum difference in torque production between the J-shaped blade and the complete blade reaches approximately 107%.

It has been shown in Fig. 3 that J-shaped blades with closed tips have higher startup power than blades with open tips, with an improvement in performance of 26.9% for the blade with an open tip and 38.5% for the blade with a closed tip compared to the complete blade. The J-shaped blade with a closed tip also exhibits better performance when the rotor has low TSRs. For a tip speed ratio of 0.5, this blade increases the average torque coefficient by 11.2% and 49.5% compared

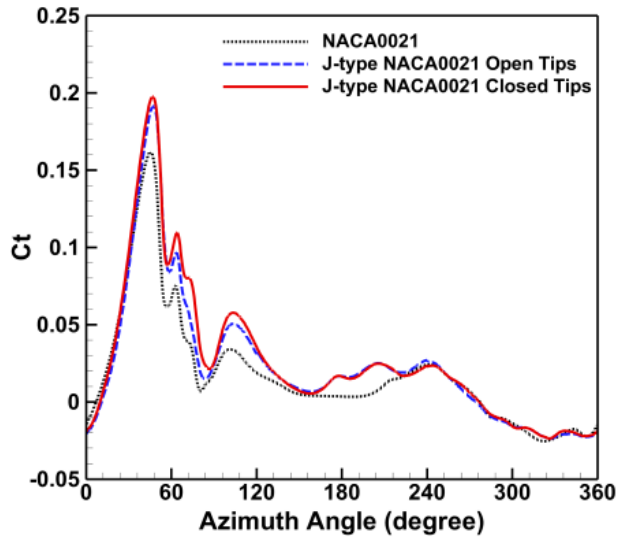


Fig. 4. Instantaneous C_t in one revolution for one blade

to the open-tipped J-shaped and complete blade, respectively (Fig. 4).

4- Conclusion

- The straight-bladed or helical-bladed turbine equipped with J-shaped blades produces higher torque under self-starting conditions. This performance improvement is more pronounced at lower wind speeds and higher blade heights.

- It has been demonstrated that the J-shaped blade with a closed tip exhibits higher self-starting power compared to the blade with an open tip, as well as low TSRs situations.

- In a helical-bladed turbine, similar to a straight-bladed turbine, the use of a J-shaped blade with a closed tip enhances self-starting power and improves performance at low TSRs.

References

- [1] M. Ghasemian, Z.N. Ashrafi, A. Sedaghat, A review on computational fluid dynamic simulation techniques for Darrieus vertical axis wind turbines, *Energy Conversion and Management*, 149 (2017).
- [2] Z. Driss, O. Mlayeh, S. Driss, M. Maaloul, M.S. Abid, Study of the incidence angle effect on the aerodynamic structure characteristics of an incurved Savonius wind rotor placed in a wind tunnel, *Energy*, 113 (2016).
- [3] B.K. Debnath, A. Biswas, R. Gupta, Computational fluid dynamics analysis of a combined three-bucket Savonius and three-bladed Darrieus rotor at various overlap conditions, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 1(3) (2009).
- [4] D. MacPhee, A. Beyene, Recent advances in rotor design of vertical axis wind turbines, *Wind Engineering*, 36(6) (2012).
- [5] M.R. Castelli, E. Benini, Effect of blade inclination angle on a darrieus wind turbine, *Journal of Turbomachinery*, 134(3) (2011).
- [6] S.M.H. Karimian, A. Abdolahifar, Performance investigation of a new Darrieus Vertical Axis Wind Turbine, *Energy*, 191 (2020).
- [7] M. Zamani, S. Nazari, S.A. Moshizi, M.J. Maghrebi, Three-dimensional simulation of J-shaped Darrieus vertical axis wind turbine, *Energy*, 116 (2016).
- [8] R. Farzadi, M. Bazargan, 3D numerical simulation of the Darrieus vertical axis wind turbine with J-type and straight blades under various operating conditions including self-starting mode, *Energy*, 278 (2023) 128040.
- [9] Y. Celik, D. Ingham, L. Ma, M. Pourkashanian, Design and aerodynamic performance analyses of the self-starting H-type VAWT having J-shaped aerofoils considering various design parameters using CFD, *Energy*, 251 (2022) 123881.
- [10] M. Elkhoury, T. Kiwata, E. Aoun, Experimental and numerical investigation of a three-dimensional vertical-axis wind turbine with variable-pitch, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 139 (2015).



بررسی عددی گشتاور راهاندازی توربین باد محور عمودی داریوس با پره جی-شکل

رامین فرزندی، مجید بازارگان*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۶
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۲۲
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۵/۰۵

کلمات کلیدی:

توربین داریوس
پره جی-شکل
قدرت راهاندازی
توربین پره مستقیم
توربین پره مارپیچ

خلاصه: پژوهش کنونی با بهره‌گیری از شبیه‌سازی سه بعدی جریان حول توربین داریوس سه پره‌ای به بررسی توان راهاندازی توربین می‌پردازد. دو نوع توربین پره مستقیم و پره مارپیچ مجهز به پره‌هایی با پروفیل جی-شکل مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تاثیر کمیت‌های گوناگون نظیر سرعت باد، ارتفاع پرها و باز یا بسته بودن انتهای پره جی-شکل مورد مطالعه قرار گرفته و با توربین مجهز به پره‌های کامل مقایسه شده است. تحلیل جریان حول پره آشکار ساخت که گردابه‌های شکل گرفته در سطح فشار پره جی-شکل موجب افزایش گشتاور تولیدی می‌شوند. با بستن انتهای پره جی-شکل از خروج این گردابه‌ها در لبه‌های انتهایی جلوگیری می‌شود که تاثیر مثبت قابل ملاحظه‌ای در شرایط راهاندازی و شرایطی که روتور دارای چرخش است، دارد. متوسط گشتاور تولیدی برای توربین پره مستقیم و پره مارپیچ مجهز به پره جی-شکل با انتهای بسته به ترتیب تحت شرایط راهاندازی ۳۸/۵ و ۲۱ درصد و در نسبت سرعت نوک پره کم ۴۹/۵ و ۴۱/۹ درصد نسبت به توربین با پره کامل افزایش داشته است. اثر مثبت استفاده از پره‌های جی-شکل تحت شرایط راهاندازی برای سرعت‌های کم باد و ارتفاع‌های بلندتر پره بارزتر می‌باشد که این پره را به گزینه مناسبی برای به کارگیری توربین در مناطق شهری بدل می‌کند.

۱- مقدمه

ساده‌ترین نوع توربین‌های محور عمودی، توربین ساوونیوس^۳ بوده که بر اساس نیروی پسا کار می‌کند. این نوع توربین‌ها از قدرت راهاندازی مناسبی برخوردار است و در نسبت‌های سرعت نوک پره^۴ کم، عملکرد مناسبی دارند ولی در نسبت‌های سرعت نوک پره بالا عملکرد ضعیفی دارند که در کل منجر به بازده پایین این توربین‌ها می‌شود [۵]. در مقابل، توربین‌های داریوس^۵ قرار دارند که از بازده کلی بالا برخوردار هستند. این توربین‌ها بر اساس نیروی برآ کار می‌کنند و در نسبت‌های سرعت نوک پره بالا دارای عملکرد بالایی می‌باشند ولی در راه اندازی و نسبت‌های سرعت نوک پره پایین از شرایط مناسبی برخوردار نیستند. به طور کلی یکی از اساسی‌ترین مشکلات این توربین‌ها عدم قابلیت خودراهاندازی^۶ است [۹-۱۳]. منظور از قابلیت خودراهاندازی، توانایی توربین برای تامین میزان گشتاور لازم در شروع حرکت می‌باشد. گشتاور راهاندازی، برابر با میزان گشتاور تولیدی توربین در شرایطی است که توربین ثابت است و نسبت سرعت

نگرانی‌های زیست محیطی و هزینه‌های تامین انرژی از جمله مواردی هستند که موضوع انرژی‌های تجدیدپذیر را به موضوعی مهم و رایج بین محققین بدل کرده است. در میان ابزارهای تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر، توربین‌های باد یکی از امیدوارکننده‌ترین ابزارها محسوب می‌شوند [۱، ۲]. به طور کلی توربین‌های باد به دو دسته توربین‌های محور افقی^۱ و محور عمودی^۲ تقسیم بندی می‌شوند. در حالی که توربین‌های باد محور افقی در مقیاس‌های بزرگ و مزارع بادی توجیه اقتصادی پیدا می‌کنند، توربین‌های محور عمودی دارای ویژگی‌هایی نظیر عملکرد مناسب در مقیاس کوچک، امکان نصب نزدیک به زمین، عدم وابستگی به جهت باد و هزینه ساخت و تعمیر و نگهداری کم می‌باشند که آن‌ها را به گزینه‌ای مناسب جهت کاربرد شهری بدل می‌کند [۳-۸].

- 3 Savonius
- 4 Tip Speed Ratio (TSR)
- 5 Darrieus
- 6 Self-Starting

- 1 Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)
- 2 Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: bazargan@kntu.ac.ir



تعداد قابل توجهی از محققین تلاش کردند با تغییر ساختار پره‌های توربین داریوس، گشتاور راه‌اندازی و عملکرد کلی را بالا ببرند. کاستلی و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۱۱ توربین پره ماریپج^۳ را بررسی کردند. نتایج آن پژوهش نشان داد که اگرچه پره‌های ماریپج گشتاور راه‌اندازی را افزایش می‌دهند در عین حال موجب کاهش گشتاور کلی توربین نسبت به توربین پره مستقیم^۴ می‌شوند. این مسئله به طور محسوس در نسبت‌های سرعت نوک پره بالاتر از ۲/۵ نمایان می‌شود. این اثر منفی در پژوهش انجام گرفته توسط تجیو و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۵ در نسبت‌های سرعت نوک پره بالا، نیز تصدیق شد. برای حل این مشکل، ایده استفاده از پره سه بخشی^۵ به جای پره ماریپج در سال ۲۰۱۹ توسط کریمیان و همکاران [۲۳] مطرح شد. در این طرح از سه پره مستقیم با اختلاف فاز به جای پره ماریپج استفاده گردید که در نسبت‌های سرعت نوک پره بالا تا حدود ۱۵۰ درصد بهبود عملکرد را به همراه داشت ولی از نظر قدرت راه‌اندازی همچنان برتری با پره‌های ماریپج بود.

با توجه به بالاتر بودن گشتاور کلی پره‌های مستقیم، تغییر در ساختار این پره‌ها همواره توجهات بیشتری را به خود جلب کرده است. بر همین مبنی استفاده از باله و حفره در تعداد قابل توجهی از پژوهش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است [۲۴-۲۶]. در سال ۲۰۱۷ شوکلا [۲۴] چندین حالت از اعمال باله و حفره بر ایرفویل^۶ ناکا^۷ را مورد بررسی قرار داد و به این نتیجه رسید که ترکیبی از این دو می‌تواند عملکرد کلی را افزایش دهد. از دیگر پژوهش‌ها در این بخش می‌توان به استفاده از پره‌ها با لبه دندانه‌ای و یا پره‌های شیاردار اشاره کرد [۲۷-۳۰].

دو هدف اصلی در پژوهش‌های صورت گرفته تا کنون، بالاتر بردن عملکرد کلی توربین داریوس و فراهم آوردن توان خودراه‌اندازی با استفاده از توربین‌های ترکیبی و یا تغییر در ساختار پره بوده‌اند. در این میان ایده بهره‌گیری از پره‌ای که بتواند به طور همزمان از نیروی برآ و پسا استفاده کند نیز موضوع بسیاری از تحقیقات بوده است. توربینی مجهز به چنین پره‌ای، نه تنها هزینه ساخت و پیچیدگی کمتری از توربین‌های ترکیبی و پره ماریپج دارد، بلکه می‌تواند از نیروی پسا اضافه شده به نیروی برآ جهت تامین گشتاور اولیه مورد نیاز راه‌اندازی و عملکرد کلی بالاتر بهره‌بردار. پره

نوک پره برابر با صفر است. اگر میزان این گشتاور کافی باشد توربین شروع به چرخش کرده و پس از تجربه نسبت‌های سرعت نوک پره کم، رفته رفته افزایش سرعت داشته تا سرعت به یک میزان حدی برسد. بنابراین گشتاور تولیدی در شرایطی که توربین ثابت است و در شرایطی که توربین نسبت‌های سرعت نوک پره کم را تجربه می‌کند بسیار حائز اهمیت است.

در جهت رفع مشکل خود راه‌اندازی تعدادی از محققین استفاده از توربین‌های ترکیبی داریوس و ساوونیوس را پیشنهاد دادند. پیشنهاد توربین‌های ترکیبی بر ایده استفاده از نیروی برآ^۱ و پسا^۲ به صورت همزمان استوار است. در این توربین‌ها از بخش ساوونیوس جهت راه‌اندازی توربین بهره گرفته می‌شود و از بخش داریوس برای تولید گشتاور مناسب در نسبت‌های سرعت نوک پره بالا استفاده می‌گردد. واکویی و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۰۵ از ترکیب توربین داریوس و ساوونیوس دو پره با محور دوران مشترک استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که قرارگیری توربین ساوونیوس در قسمت میانی توربین داریوس موجب کاهش عملکرد هر دو توربین می‌شود. آن‌ها همچنین دریافتند که قرارگیری توربین ساوونیوس در قسمت تحتانی توربین داریوس باعث می‌شود که تاثیر منفی توربین‌ها روی یکدیگر کمتر گردد و وضعیت مناسب‌تری پدید می‌آید. پژوهشگران دیگر، نظیر کوپتا و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۰۸ و دینات و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۰۹ به مطالعه توربین ترکیبی با سه پره شامل بخش ساوونیوس و بخش داریوس پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که بخش ساوونیوس سه پره دارای عملکرد بهتر از حالتی است که این بخش شامل دو پره باشد. در سال ۲۰۱۲ و ۲۰۱۴ به ترتیب مکفی و همکاران [۱۷] و بویان و همکاران [۱۸] به بررسی توربین‌های ترکیبی با پره‌های مختلف پرداختند. نتیجه این پژوهش‌ها نشان می‌داد که استفاده از توربین ترکیبی موجب بالا بردن قدرت راه‌اندازی توربین می‌شود ولی در نسبت‌های سرعت نوک پره بالا به دلیل حضور بخش ساوونیوس عملکرد توربین افت خواهد کرد. در ادامه، اکبری و همکاران [۱۹] نیز در سال ۲۰۱۸ طی یک مطالعه عددی از توربین ترکیبی به نتیجه‌ای مشابه رسیدند و بهترین حالت پیشنهادی در این پژوهش شرایط عملکردی در نسبت سرعت نوک پره ۰/۴۴ بود. در جهت بهبود این شرایط، روشن و همکاران [۲۰] به بررسی تاثیر زاویه کمان پره ساوونیوس و صلیبیت پره پرداختند. همچنین عبدالهی‌فر و همکاران [۲۱] طی یک پژوهش عددی به بررسی تاثیر اضافه کردن دیواره در مقابل پره‌های پشت به باد در جهت کاهش نیروی منفی پسا پرداختند.

3 Helical bladed turbine
4 Straight bladed turbine
5 Three parts blade
6 Airfoil
7 NACA0021

1 Lift
2 Drag

نوبنی نظیر بستن دو انتهای پره جی-شکل، تغییر ارتفاع پره و همچنین پره ماریچ جی-شکل تحت شرایط راهاندازی مورد بررسی و مقایسه با نمونه متناظر مجهز به پره کامل قرار می‌گیرند. هریک از این مقایسه‌ها علاوه بر شرایطی که توربین در وضعیت ثابت (بدون چرخش) است، در سرعت نوک پره پایین نیز انجام می‌شود تا عملکرد پره جی-شکل در راهاندازی به طور کامل مورد بررسی قرار گیرد.

۲- تعریف مسئله و مدلسازی عددی

در این بخش به وسیله شبیه سازی سه بعدی، جریان هوا حول یک توربین باد داریوس سه پره مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ابتدا فیزیک مسئله و توربین توضیح داده می‌شوند. سپس روابط حاکم بر جریان سیال ارائه و در ادامه به بحث در مورد دامنه محاسباتی و شبکه‌بندی پرداخته می‌شود.

۲-۱- هندسه مسئله

در این مطالعه پره جی-شکل در مقایسه با پره کامل مورد بررسی قرار می‌گیرد. سطح مقطع هر دو نوع پره در شکل ۱ نشان داده شده است. همان طور که مشخص است پره جی-شکل با حذف سطح فشار از محل بیشینه ضخامت تا لبه فرار از پره کامل تولید شده است.

از پره‌های مطرح شده در شکل ۱ در دو نوع توربین پره ماریچ و پره مستقیم استفاده می‌شود. مشخصات هندسی این توربین‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

نمای کامل توربین‌های پره ماریچ و پره مستقیم در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۲(الف) و ۲(ب) مشخص است پره‌های اول، دوم و سوم توربین پره مستقیم به ترتیب در زوایای ۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ درجه قرار گرفته‌اند. محل قرارگیری پره اول به عنوان معیار برای سنجش زاویه روتور^۲ در نظر گرفته می‌شود. در توربین پره ماریچ صفحه میانی پره‌ها به عنوان معیار محل قرارگیری آن‌ها مورد نظر قرار می‌گیرد که همانند توربین پره مستقیم، پره‌ها در سه زاویه ۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ درجه قرار می‌گیرند (شکل ۲(ج) و ۲(د)). جهت وزش باد در راستای مثبت محور X است که بنا بر در نظر گرفتن شرایط محیط‌های شهری میزان سرعت باد حداکثر ۱۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود.

۲-۲- معادلات حاکم

برای شبیه‌سازی جریان سیال حول توربین باد از معادلات متوسط‌گیری

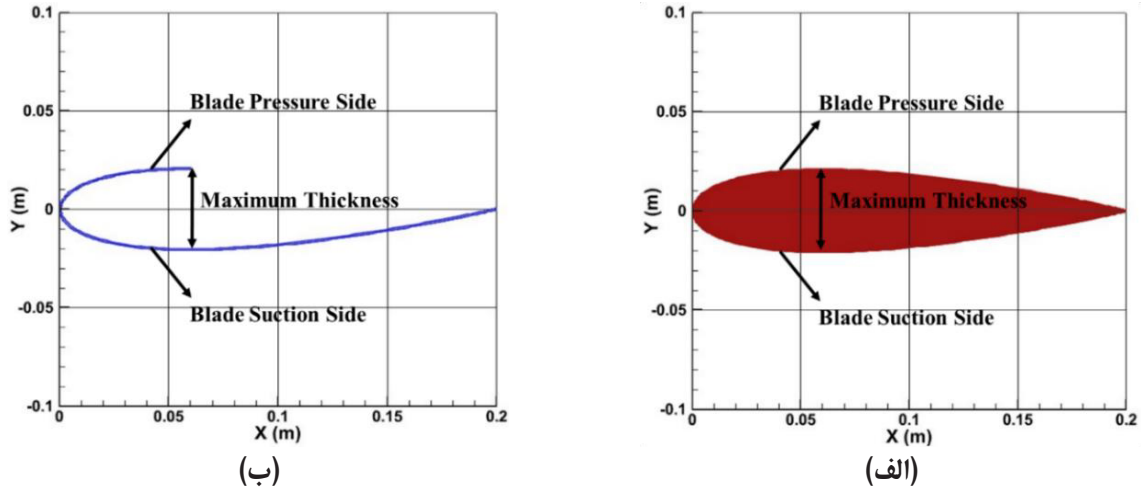
جی-شکل^۱ که در سال ۲۰۱۶ توسط زمانی و همکاران [۳۱] معرفی شد می‌تواند گزینه مناسبی جهت این کاربرد باشد. یادآوری می‌شود که جریان هوا از دو سوی پره عبور می‌کند. به سمتی که فشار روی پره بیشتر است، سطح فشار و به سمت مقابل که فشار کمتر است سطح مکش می‌گویند. در پره جی-شکل، سطح فشار^۲ از ضخامت بیشینه تا لبه فرار حذف شده است. بنابراین می‌تواند در حالت راهاندازی مانند توربین ساوونوس عمل کرده و از نیروی پسا بهره‌برداری مناسبی داشته باشد و پس از راهاندازی به دلیل شکل ایرفول‌گونه‌اش همانند توربین داریوس رفتار کند.

توربین پره مستقیم مجهز به پره جی-شکل در سال ۲۰۱۶ توسط زمانی و همکاران [۳۲] به صورت سه بعدی مورد شبیه‌سازی قرار گرفت که نشان داده شد این توربین تا سرعت نوک پره ۱/۶ در مقایسه با توربین با پره کامل از عملکرد مناسبی برخوردار است. با این وجود این پژوهش شرایط راهاندازی را مورد بررسی قرار نداد. منظور از پره‌ی کامل، حالتی است که پره پروفیل اولیه‌ی خود را حفظ کرده و هیچ بخشی از آن بریده و حذف نشده است. در سال‌های اخیر پژوهش‌های مرتبط با این نوع پره به بررسی مواردی نظیر در صد برش سطح فشار، شکل بهینه پره جی-شکل و یا عملکرد این پره تحت شرایط مختلف شامل سرعت‌های باد مختلف، شدت آشفتگی‌های متفاوت و یا شرایط راهاندازی پرداختند [۳۳-۳۷]. این پژوهش‌ها به دنبال راهکارهای متفاوتی در جهت بالاتر بردن عملکرد کلی این پره در شرایط عملکردی بودند و هیچ یک به بررسی شرایط راهاندازی با استفاده از پره جی-شکل نپرداختند. از آن‌جا که یکی از مزایای توربین باد محور عمودی قابلیت استفاده آن‌ها در محیط‌های شهری است و گشتاور تولیدی در شرایط راهاندازی از مشکلات اساسی توربین‌های داریوس است، بررسی میزان گشتاور تولیدی تحت شرایط راهاندازی در محیط‌های شهری بسیار مهم است.

این پژوهش قصد دارد به کمک شبیه‌سازی سه بعدی توربین مجهز به پره جی-شکل میزان گشتاور راهاندازی تولیدی این نوع توربین در مقایسه با توربین با پره کامل را مورد بررسی قرار دهد. در این مطالعه سرعت بادهای متناسب با محیط شهری به هر دو نوع توربین اعمال شده و سهم هریک از نیروهای برآ و پسا در تولید گشتاور راهاندازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که میزان گشتاور تولیدی در شرایطی که توربین ثابت است به عنوان گشتاور راهاندازی در نظر گرفته شده و از آنجا که توربین‌های محور عمودی وابستگی به جهت وزش باد ندارد تمام زوایای محتمل برخورد باد به توربین مورد تحقیق قرار خواهند گرفت. همچنین در این پژوهش ایده‌های

1 J-shaped blade

2 Pressure side



شکل ۱. سطح مقطع پره ها، (الف) پره کامل ناکا ۰۰۲۱، (ب) پره جی-شکل ناکا ۰۰۲۱

Fig. 1. Blade Cross-Sectional Profiles, (a) Complete NACA0021, (b) J-type NACA0021

جدول ۱. مشخصات توربین پره مستقیم و پره مارپیچ با پره جی-شکل و پره کامل

Table 1. Specifications of straight and helical bladed turbines with J-type and complete blade

توربین پره مستقیم	توربین پره مارپیچ	نماد	کمیت
مقدار	مقدار		
۰/۶ متر	۰/۹۹ متر	R	شعاع روتور ^۱
۰/۸ متر - ۱/۲ متر - ۱/۶ متر	۱/۱۵ متر	H	ارتفاع پره
۳	۳	n	تعداد پره
۰/۲ متر	۰/۳ متر	c	کورد ^۲ پره
۰ درجه	۶۰ درجه	α	زاویه پیشش
ناکا ۰۰۲۱ - جی شکل ناکا ۰۰۲۱	ناکا ۰۰۲۱ - جی شکل ناکا ۰۰۲۱	-	نوع پره

¹ Rotor

² Chord

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}) + \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (2)$$

در این روابط ρ ، \bar{p} ، \bar{u}_i و U به ترتیب نشان دهنده سرعت متوسط، فشار متوسط، چگالی و لزجت سینماتیکی^۴ می باشند. ترم آخر معادله (۲)،

شده ناویر-استوکس^۱ استفاده شده است. این معادلات با متوسط گیری زمانی از معادلات پیوستگی^۲ و ممنتوم^۳ برای سیال تراکم ناپذیر بدست آمده اند که در قالب معادله های (۱) و (۲) ارائه می شوند [۳۵].

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

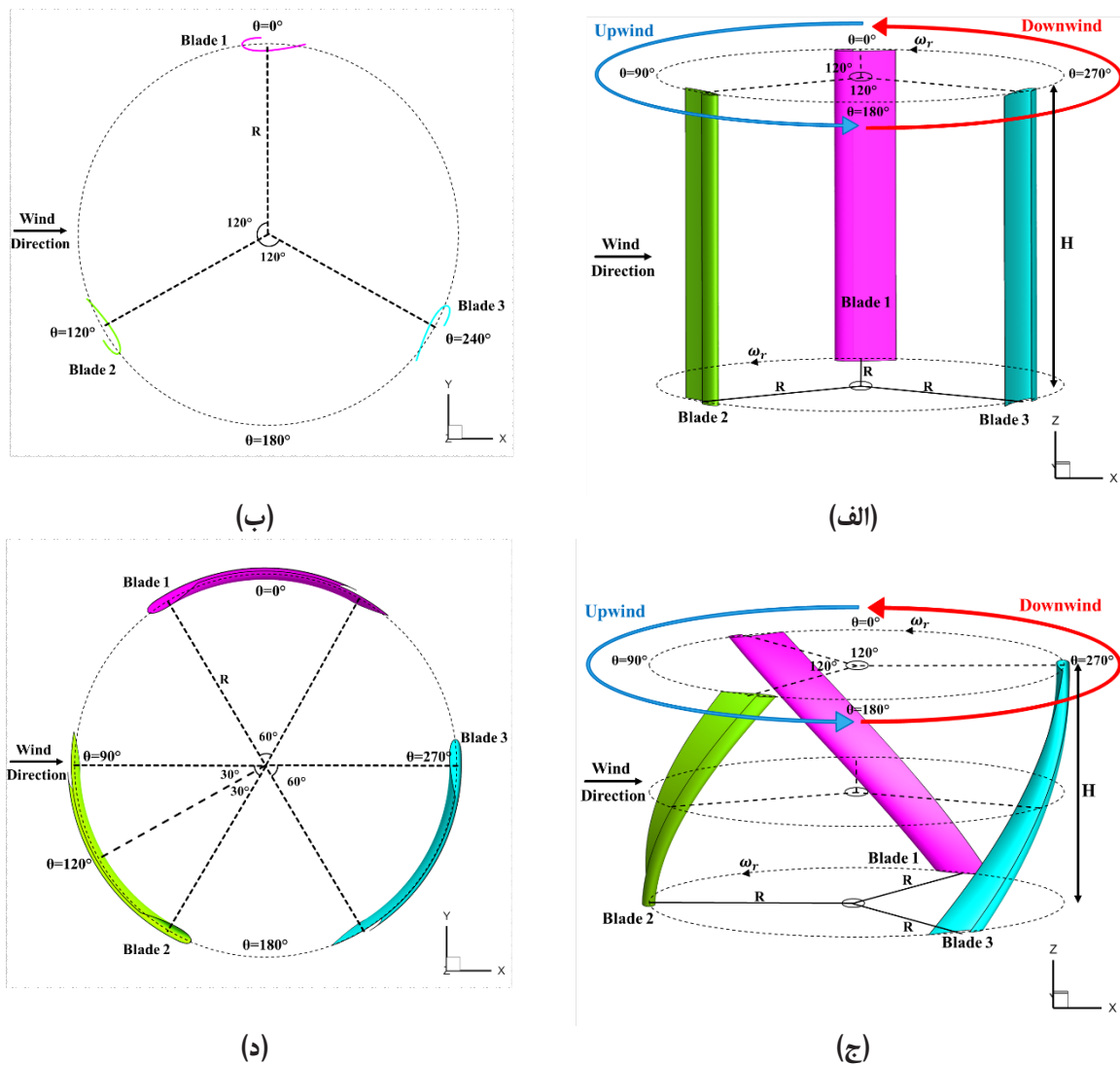
4 Kinematic viscosity

5 J-type NACA0021

1 Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations (URANS)

2 Continuity

3 Momentum



شکل ۲. توربین باد با سه پره، (الف) نمای سه بعدی توربین پره مستقیم، (ب) نمای از بالای توربین پره مستقیم، (ج) نمای سه بعدی توربین پره مارپیچ، (د) نمای از بالای توربین پره مارپیچ

Fig. 2. Three bladed wind turbine, (a) 3D view of the straight bladed turbine, (b) Top view of the straight bladed turbine, (c) 3D view of the helical bladed turbine, (d) Top view of the helical bladed turbine

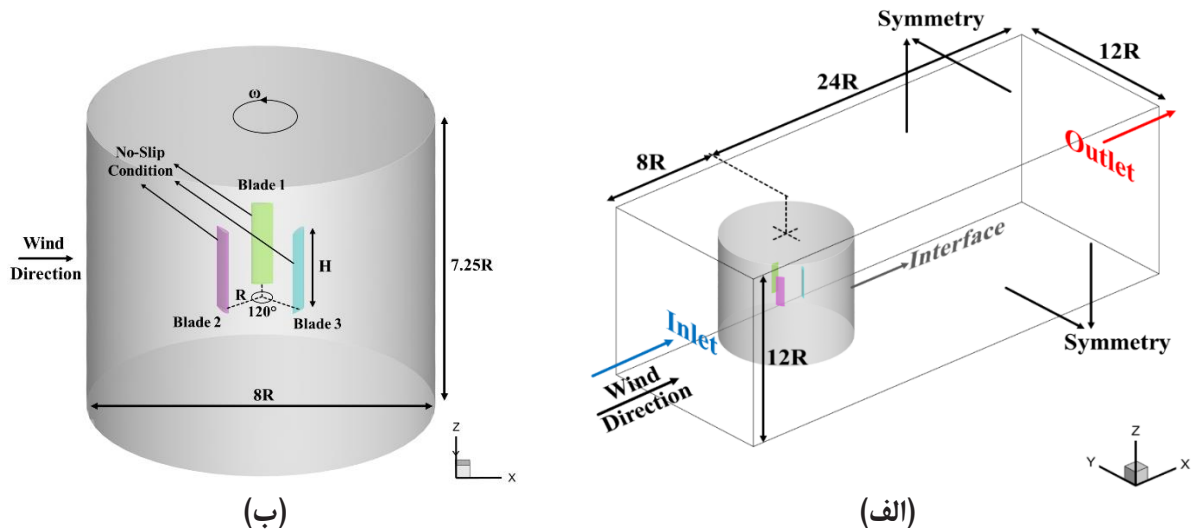
را با نتایج تجربی نشان داد. تعداد قابل توجهی از تحقیقات دیگر [۲۳، ۳۲، ۳۵] نیز از مدل آشفتگی $k-\omega SST$ در جهت شبیه‌سازی دو و سه بعدی جریان حول توربین باد استفاده کردند و تطابق مناسب این مدل آشفتگی را با نتایج تجربی تصدیق کردند. بنابراین در پژوهش حاضر از این مدل آشفتگی استفاده گردیده است.

شبیه‌سازی سه بعدی جریان آشفته تراکم ناپذیر حول توربین در پژوهش حاضر با گسسته‌سازی معادلات دیفرانسیل به روش حجم محدود در نرم‌افزار

$\overline{u_i' u_j'}$ ، که از نوسانات سرعت تشکیل شده با نام تانسور تنش رینولدز شناخته می‌شود که دارای مرتبه بزرگی یکسان با ترم‌های متوسط بوده که نیاز است با مدل‌های آشفتگی تخمین زده شود.

مدل‌های مختلف آشفتگی در پژوهش مک‌لارن و همکاران [۳۸] برای شبیه‌سازی جریان حول توربین پره مستقیم در عدد رینولدز $10^{+5} \times 3/6$ مورد بررسی قرار گرفتند که از میان آن‌ها مدل $k-\omega SST$ بهترین همخوانی

1 Reynolds stress tensor



شکل ۳. دامنه محاسباتی و شرایط مرزی، (الف) ناحیه ثابت، (ب) ناحیه ثابت

Fig. 3. Computational domain and boundary conditions, (a) Stationary domain, (b) Rotating domain

محور X در سمت راست دامنه محاسباتی خارج می‌شود. شرایط مرزی اعمالی در ورودی و خروجی به ترتیب سرعت ثابت جریان آزاد (سرعت ورودی^۵) و فشار استاتیک اتمسفری (فشار خروجی^۶) است و بر روی پره‌های توربین شرط مرزی عدم لغزش^۷ استفاده شده است. سطوح جانبی دامنه محاسباتی دارای شرط مرزی تقارن بوده بدان معنی که تنش برشی و گرادیان سرعت روی آن‌ها وجود ندارد [۳۵]. باید توجه شود که در سطح استوانه چرخان برای برقراری ارتباط میان ناحیه ثابت و ناحیه چرخان از شرط دیواره داخلی^۸ استفاده شده است.

در شکل ۴ شبکه بی‌سازمان تولید شده بر روی صفحه میانی دامنه محاسباتی برای هر دو بخش ثابت و چرخان نمایش داده شده است. به دلیل اهمیت لایه مرزی حول پره‌ها، به ویژه زیر لایه لزج^۹ که گرایان‌های فشار معکوس شدید در آن اتفاق می‌افتد، در نواحی اطراف پره‌ها از شبکه لایه مرزی استفاده شده است. از آنجا که تحقیقات پیشین [۲۳، ۳۰، ۳۵] نشان داده‌اند که میزان γ^+ برای رسیدن به نتیجه مناسب باید کمتر از یک باشد، این شبکه بندی قدرت کنترلی مناسبی بر روی ارتفاع اولین ردیف از

فلوئنت^۱ انجام شده است. در سطح مشترک ناحیه چرخان و ثابت از تکنیک شبکه لغزان^۲ بهره گرفته شده و برای معادلات فشار و مومنتوم گسسته‌سازی مرتبه دوم مورد استفاده قرار گرفته است. برای همگرایی نتایج میزان خطای باقیمانده^۳ برای معادله پیوستگی، پارامترهای k و ω در مدل آشفتگی و مولفه‌های سه بعدی سرعت به ترتیب 1×10^{-4} ، 1×10^{-5} و 1×10^{-7} در نظر گرفته شده‌اند.

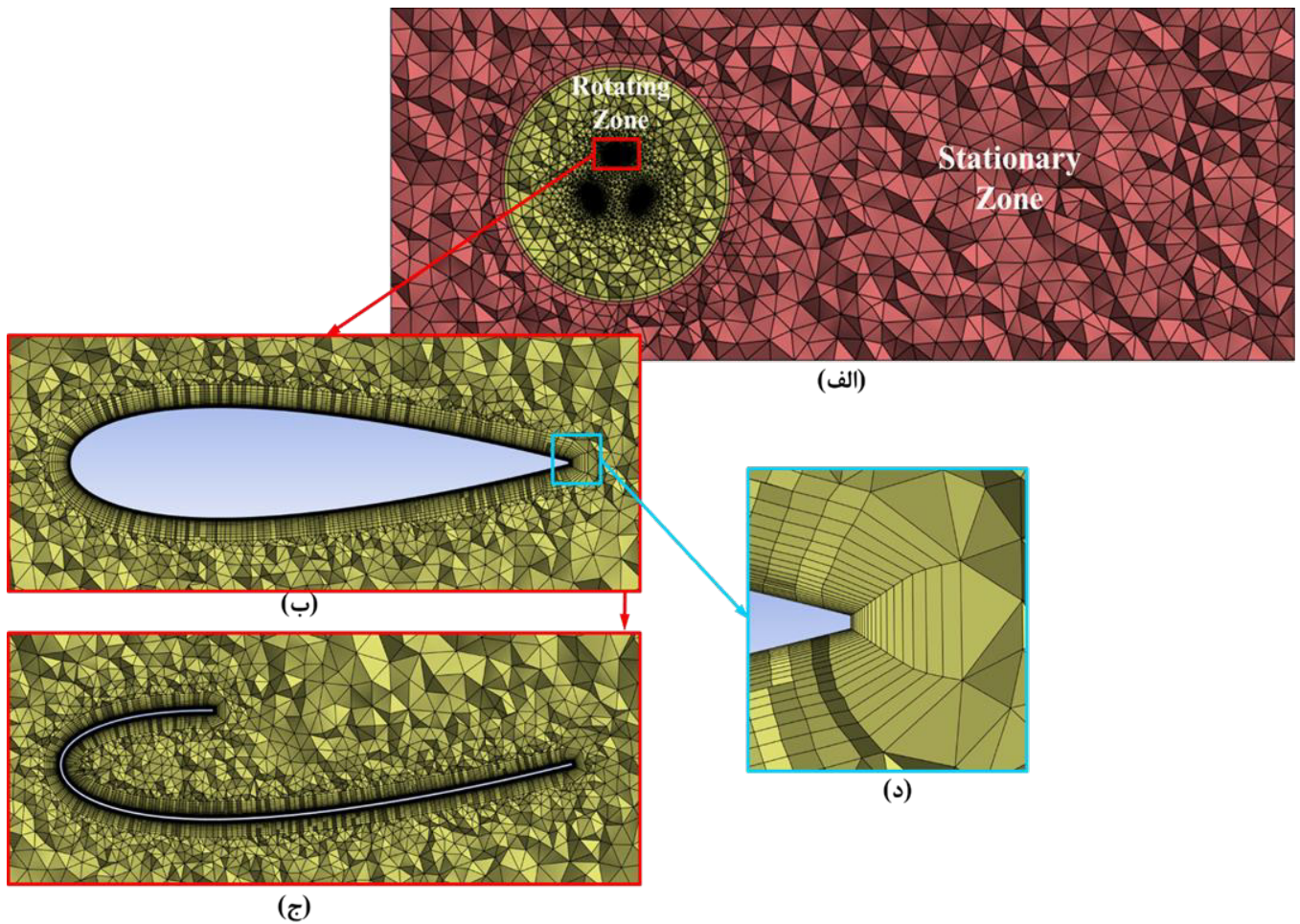
۲-۳- دامنه محاسباتی و تولید شبکه

دامنه محاسباتی از یک مکعب مستطیل به ابعاد $12R$ ، $12R$ ، $12R$ و $12R$ به ترتیب در راستای محور X ، Y و Z تشکیل شده است (شکل ۳(الف)). این دامنه شامل یک قسمت استوانه‌ای چرخان است (شکل ۳(ب)) که توربین در مرکز آن واقع شده و توسط یک قسمت ثابت احاطه شده است. قطر و ارتفاع ناحیه چرخان به ترتیب $8R$ و $7/25R$ در نظر گرفته شده که به فاصله R از سطح ورودی دامنه محاسباتی واقع گردیده است.

جریان هوا تحت شرایط اتمسفری^۴ با سرعت ثابت و یکنواخت از سطح عمود بر محور X در سمت چپ دامنه محاسباتی وارد و از سطح عمود بر

- 5 Velocity inlet
- 6 Pressure outlet
- 7 No-slip condition
- 8 Interior wall
- 9 Viscous sublayer

- 1 Fluent
- 2 Sliding mesh technique
- 3 Residual
- 4 Atmospheric condition



شکل ۴. نمای از بالای شبکه تولید شده، (الف) ناحیه چرخان و ثابت، (ب) سطح پره کامل، (ج) سطح پره جی-شکل، (د) لبه فرار

Fig. 4. Top view of the generated mesh, (a) Rotating and stationary domains, (b) Complete blade surface, (c) J-type blade surface, (d) Trailing edge

در ابتدا دامنه محاسباتی باید به قدری بزرگ انتخاب شود که مرزها تاثیری بر نتایج نداشته باشند. از طرف دیگر، این دامنه باید تا حد امکان کوچک انتخاب شود که موجب کاهش بار محاسباتی شود. در پژوهش حاضر میزان متوسط ضریب گشتاور تولید شده توسط توربین مستقیم با پره کامل در نسبت سرعت نوک پره $0.5/R$ و سرعت باد 10 متر بر ثانیه در چهار دامنه با ابعاد مختلف مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۲). نتایج بدست آمده حاکی از آن بودند که میزان اختلاف بین دامنه‌های محاسباتی با ابعاد $12R$ ، $32R$ ، $12R$ و $40R$ ، $15R$ ، $15R$ در حدود 0.23% درصد است. بنابراین دامنه محاسباتی با ابعاد $12R$ ، $12R$ ، $32R$ به عنوان دامنه مناسب انتخاب گردید.

سلول‌های محاسباتی را به همراه خواهد داشت.

۳- استقلال نتایج

برای دستیابی به نتایج قابل اتکا ضروری است که نتایج از اندازه دامنه محاسباتی، شبکه و گام زمانی مستقل باشند. در قسمت اول این بخش به بررسی استقلال نتایج از اندازه دامنه محاسباتی پرداخته و در قسمت دوم استقلال نتایج از شبکه و گام زمانی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۳-۱- بررسی استقلال نتایج از دامنه محاسباتی

برای تعیین اندازه دامنه محاسباتی دو عامل باید مورد توجه قرار گیرند.

جدول ۲. تاثیر ابعاد دامنه محاسباتی بر ضریب گشتاور متوسط

Table 2. Effect of computational domain dimensions on average torque coefficient

ابعاد دامنه محاسباتی	فاصله مرکز توربین از ورودی	قطر استوانه چرخان	متوسط Ct	درصد اختلاف Ct (*)
۶R x ۶R x ۱۶R	۴R	۴R	۰/۰۵۵۳۲	-
۹R x ۹R x ۲۴R	۶R	۶R	۰/۰۵۳۹۴	-۲/۴۹
۱۲R x ۱۲R x ۳۲R	۸R	۸R	۰/۰۵۳۴۳	-۰/۹۵
۱۵R x ۱۵R x ۴۰R	۱۰R	۱۰R	۰/۰۵۳۳۰	-۰/۲۳

(*) درصد اختلاف با سطر قبل

جدول ۳. تاثیر طول سلول‌های سطح پره بر ضریب گشتاور متوسط

Table 3. Effect of blade surface cell length on average torque coefficient

طول سلول (متر)	تعداد کلی سلول‌ها	متوسط Ct	درصد اختلاف Ct (*)
۰/۰۰۹۵	۱/۱۱×۱۰ ^{+۶}	۰/۰۳۳۴۵	-
۰/۰۰۶۵	۱/۹۶×۱۰ ^{+۶}	۰/۰۴۳۲۵	۲۹/۳۲
۰/۰۰۵	۳/۰۰×۱۰ ^{+۶}	۰/۰۴۹۱۲	۱۳/۵۶
۰/۰۰۴	۴/۳۶×۱۰ ^{+۶}	۰/۰۵۱۹۰	۵/۶۷
۰/۰۰۳	۷/۱۰×۱۰ ^{+۶}	۰/۰۵۳۴۳	۲/۹۴
۰/۰۰۲	۱/۴۴×۱۰ ^{+۷}	۰/۰۵۳۸۲	۰/۷۳

(*) درصد اختلاف با سطر قبل

پره ۰/۰۰۳ متر است و ریزتر کردن شبکه تغییر چندانی را به همراه ندارد. پس از مشخص شدن طول مناسب سلول‌های متصل به پره، به بررسی ارتفاع سلول‌ها پرداخته می‌شود. برای این بررسی سه ارتفاع $۱/۰ \times ۱۰^{-۴}$ ، $۶/۰ \times ۱۰^{-۵}$ و $۴/۰ \times ۱۰^{-۵}$ متر برای سلول‌های موجود در ردیف اول که به ترتیب منتج به شبکه محاسباتی با تعداد $۶/۶۹ \times ۱۰^{+۶}$ ، $۷/۱۰ \times ۱۰^{+۶}$ و $۷/۵۰ \times ۱۰^{+۶}$ سلول شده انتخاب می‌شوند. تاثیر این پارامتر بر ضریب گشتاور متوسط به همراه بیشینه و متوسط مقدار γ^+ در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به جدول ۴ دریافت می‌گردد که ارتفاع $۶/۰ \times ۱۰^{-۵}$ متر، ارتفاع مناسبی است و اختلاف آن با شبکه‌های ریزتر ناچیز است به علاوه این ارتفاع شرایط متوسط γ^+ کمتر از واحد را نیز برآورده می‌کند.

با اعمال ابعاد بهینه سلول روی سطح که از جداول ۳ و ۴ مشخص شد و نرخ رشد $۱/۱۵$ برای لایه‌های روی سطح، برای توربین با پره کامل و پره جی-شکل به ترتیب تعداد $۷/۱ \times ۱۰^{+۶}$ و $۹/۳ \times ۱۰^{+۶}$ سلول بدست خواهند آمد.

۳-۲- بررسی استقلال نتایج از شبکه و گام زمانی

با توجه به گردادیان‌های شدید سرعت که در سطح پره بوجود می‌آیند، اندازه و کیفیت سلول‌ها در این بخش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. بنابراین اندازه سلول در دو راستا مورد بررسی قرار خواهند گرفت، در ابتدا اندازه سلول‌ها در راستای سطح پره بررسی شده و سپس ارتفاع آن‌ها در راستای عمود بر سطح پره مورد تحقیق قرار می‌گیرند.

برای دستیابی به طول مناسب سلول‌ها، ارتفاع سلول‌ها در ردیف اول ثابت فرض شده و طول آن‌ها از $۰/۰۰۹۵$ متر به $۰/۰۰۲$ متر در شش مرحله کاهش داده می‌شود. طی اعمال این طول‌ها تعداد کلی سلول‌ها از $۱/۱۱ \times ۱۰^{+۶}$ به $۱/۴۴ \times ۱۰^{+۷}$ افزایش داده می‌شود. با توجه به جدول ۳ که تاثیر طول سلول‌ها بر متوسط ضریب گشتاور تولیدی توسط توربین مستقیم با پره کامل در نسبت سرعت نوک پره $۰/۵$ و سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد، دریافت می‌شود که طول مناسب برای سلول‌های متصل به

جدول ۴. تاثیر ارتفاع سلول‌های سطح پره بر ضریب گشتاور متوسط

Table 4. Effect of blade surface cell height on average torque coefficient

ارتفاع سلول (متر)	تعداد کلی سلول‌ها	پیشینه y^+	متوسط y^+	متوسط C_t	درصد اختلاف C_t (*)
$1/0 \times 10^{-4}$	$6/69 \times 10^{+6}$	۷/۳۴۸	۲/۰۶۸	۰/۰۵۱۲۳	-
$6/0 \times 10^{-5}$	$7/10 \times 10^{+6}$	۴/۶۸۳	۰/۸۹۲	۰/۰۵۳۴۳	۴/۲۸
$4/0 \times 10^{-5}$	$7/50 \times 10^{+6}$	۱/۹۴۲	۰/۶۳۷	۰/۰۵۲۹۸	-۰/۸۵

(*) درصد اختلاف با سطر قبل

جدول ۵. تاثیر گام زمانی بر ضریب گشتاور متوسط

Table 5. Effect of time step size on average torque coefficient

گام زمانی (درجه)	متوسط C_t	درصد اختلاف C_t (*)
۵	۰/۰۵۹۰۴	-
۲	۰/۰۵۴۲۱	-۸/۱۸
۱	۰/۰۵۳۴۳	-۱/۴۴
۰/۵	۰/۰۵۳۱۴	-۰/۵۴

(*) درصد اختلاف با سطر قبل

سنجی که مربوط به شرایطی است که توربین ثابت است و گشتاور راه‌اندازی اندازه‌گیری می‌شود از پژوهش عددی کریمیان و همکاران [۲۳] که میزان این گشتاور را برای توربین پره ماریچ در سرعت ۷ متر بر ثانیه بدست آورد استفاده شده است. مشخصات توربین مورد استفاده در هر دو پژوهش فوق‌الذکر در جدول ۶ ارائه گردیده است.

برای اعتبارسنجی نتایج پژوهش حاضر به مقایسه ضریب توان و گشتاور تعریف شده در معادله‌های (۳) و (۴) و (۵) با مراجع [۳۹] و [۲۳] پرداخته می‌شود.

$$C_t = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_s R} \quad (3)$$

$$C_p = C_t * TSR \quad (4)$$

در جهت کاهش بار محاسباتی و دستیابی به نتایج دقیق، گام زمانی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهش حاضر زمان لازم برای چرخش روتور به میزان ۵، ۲، ۱ و ۰/۵ درجه به عنوان گام زمانی در نظر گرفته شده و تاثیر استفاده از این گام‌ها بر ضریب گشتاور متوسط توربین در جدول ۵ آورده شده است. این مقایسه برای توربین مستقیم با پره کامل و تعداد $7/1 \times 10^{+6}$ سلول در نسبت سرعت نوک پره ۰/۵ و سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه انجام شده است. همان طور که در جدول ۵ مشخص است تفاوت گام زمانی ۱ و ۰/۵ درجه به حدی کم است که می‌توان گام زمانی متناسب با ۱ درجه را به عنوان مناسب‌ترین گام انتخاب نمود.

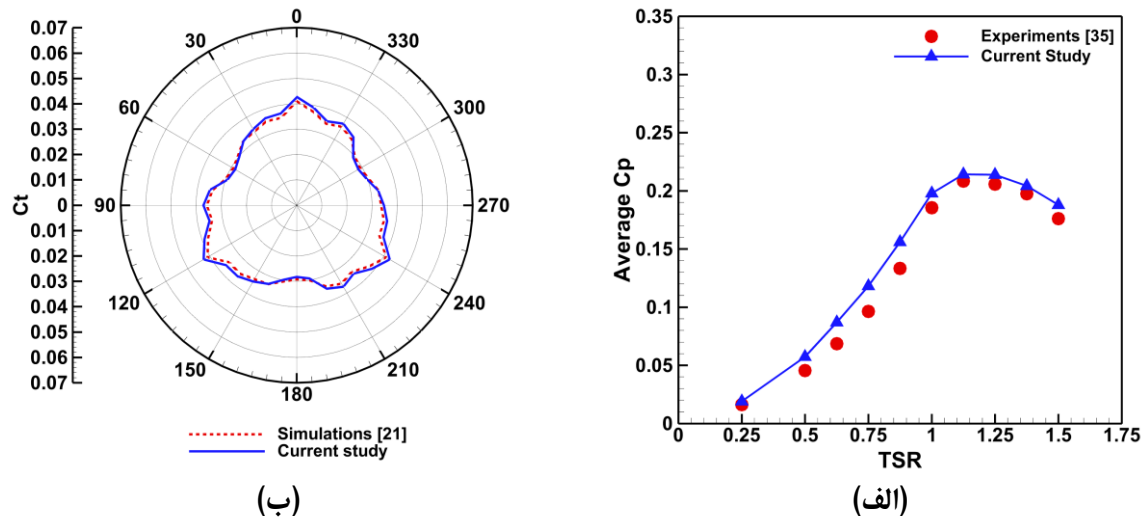
۴- اعتبارسنجی

اعتبارسنجی نتایج از دو طریق انجام شده است. در قسمت اول برای شرایطی که توربین دارای حرکت است از پژوهش تجربی الخوری و همکاران [۳۹] استفاده شده که یک توربین پره مستقیم با سه پره را به صورت تجربی در سرعت باد ۸ متر بر ثانیه مورد آزمایش قرار دادند. در قسمت دوم اعتبار

جدول ۶. مشخصات توربین مورد استفاده در پژوهش‌های [۲۳] و [۳۹]

Table 6. Specifications of the turbine used in Refs. [23] and [39]

مقدار	الخوری و همکاران [۳۹]	کریمیان و همکاران [۲۳]
کمیت		
شعاع روتور	متر ۰/۴	متر ۰/۹۹
ارتفاع پره	متر ۰/۸	متر ۱/۱۵
تعداد پره	۳	۳
کورد پره	متر ۰/۲	متر ۰/۳
نوع توربین	پره مستقیم	پره مارپیچ
نوع پره	ناکا ۰۰۲۱	ناکا ۰۰۲۱



شکل ۵. مقایسه نتایج پژوهش حاضر، (الف) با نتایج تجربی مرجع [۳۹]، (ب) با نتایج عددی مرجع [۲۳]

Fig. 5. Comparison of results from the current study with, (a) experimental results from Ref. [39], (b) numerical results from Ref. [23]

نتایج پژوهش حاضر و نتایج تجربی مرجع [۳۹] پرداخته است. با توجه به عدم شبیه‌سازی شفت^۲ مرکزی و بازوهای اتصال، مشاهده می‌شود در حالتی که روتور دارای چرخش است نتایج از هم‌خوانی مناسبی با نتایج تجربی برخوردار هستند و متوسط خطا حدود ۱۱ درصد است. برای اعتبارسنجی نتایج مربوط به گشتاور راه‌اندازی شکل ۵(ب) ارائه می‌شود. در این شکل نتایج پژوهش حاضر در خصوص گشتاور تولیدی توربین در حالتی که روتور

$$TSR = R * \omega_r / V \quad (۵)$$

در روابط فوق TSR ، T ، ω_r و A_p به ترتیب نسبت سرعت نوک پره، گشتاور، سرعت چرخشی و سطح جاروب شده^۱ می‌باشند.

شکل ۵(الف) برای بازه وسیعی از نسبت‌های سرعت نوک پره به مقایسه

2 Shaft

1 Swept area

جدول ۷. مقایسه نتایج پژوهش کنونی با نتایج تجربی [۳۹] و عددی [۲۳]

Table 7. Comparison of results from the current study with experimental results [39] and numerical results [23]

خطای نسبی (%)	نتایج عددی [۲۳]	نتایج تجربی [۳۹]	نتایج پژوهش حاضر	نسبت سرعت نوک پره (TSR)
	متوسط Ct		متوسط Ct	۰ (*)
۲/۳۱	۰/۰۳۴	-	۰/۰۳۵	
	متوسط Cp	متوسط Cp		
۱۴/۶۲	-	۰/۰۱۶	۰/۰۱۹	۰/۲۵۰
۲۰/۴۵	-	۰/۰۴۶	۰/۰۵۷	۰/۵۰۰
۲۱/۱۷	-	۰/۰۶۹	۰/۰۸۷	۰/۶۲۵
۱۸/۴۲	-	۰/۰۹۶	۰/۱۱۸	۰/۷۵۰
۱۴/۵۴	-	۰/۱۳۳	۰/۱۵۶	۰/۸۷۵
۶/۲۰	-	۰/۱۸۶	۰/۱۹۸	۱/۰۰۰
۲/۷۷	-	۰/۲۰۸	۰/۲۱۴	۱/۱۲۵
۳/۷۸	-	۰/۲۰۶	۰/۲۱۴	۱/۲۵۰
۳/۳۳	-	۰/۱۹۸	۰/۲۰۴	۱/۳۷۵
۶/۲۳	-	۰/۱۷۶	۰/۱۸۸	۱/۵۰۰

(*) برای تمامی موقعیت‌های قرارگیری روتور در مقابل جریان باد بین ۰ درجه الی ۱۲۰ درجه

۵-۱- توربین پره مستقیم مجهز به پره جی-شکل

۵-۱-۱- گشتاور راه‌اندازی توربین پره مستقیم

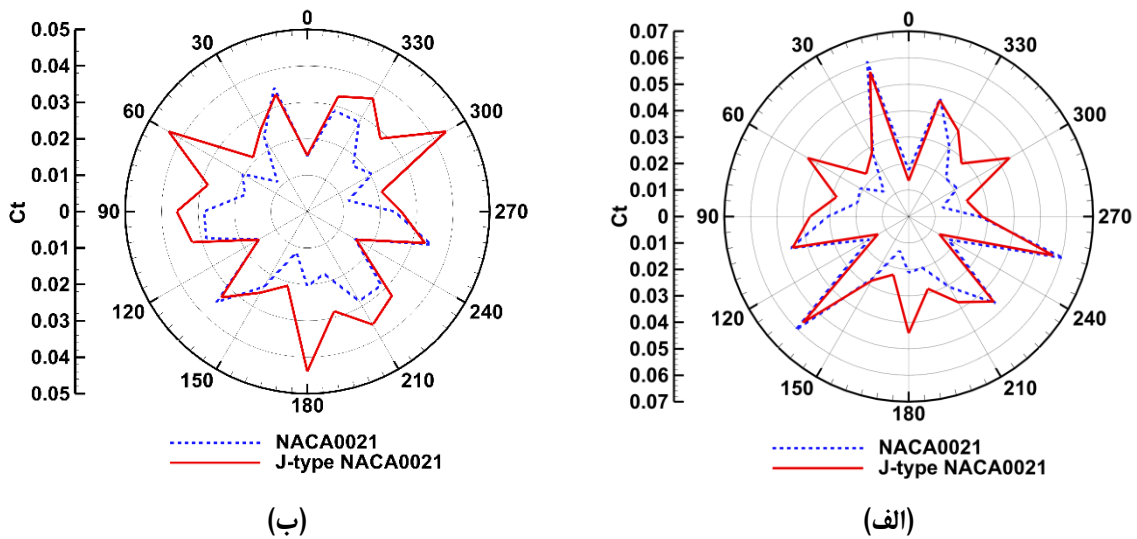
توربین معرفی شده در شکل ۲(الف) با هر دونوع پره کامل و پره جی-شکل در شرایطی که روتور فاقد چرخش است مورد شبیه‌سازی عددی قرار می‌گیرد. در شرایطی که روتور فاقد چرخش است نسبت سرعت نوک پره برابر با صفر خواهد بود. از آن‌جا که پره‌های توربین دارای اختلاف فاز ۱۲۰ درجه‌ای هستند، واضح است که برای در نظر گرفتن تمامی جهات ممکن وزش باد، نیاز است که موقعیت‌های مختلف روتور بین ۰ درجه تا ۱۲۰ درجه مورد شبیه‌سازی قرار گیرند. این مسئله با گام ۱۵ درجه در پژوهش حاضر انجام گردیده است. با در نظر گرفتن شرایط محیط‌های شهری سرعت وزش باد در دو مقدار ۱۰ و ۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است که نتایج مربوط به گشتاور راه‌اندازی برای هر دو سرعت به ترتیب در شکل ۶(الف) و ۶(ب) نشان داده شده است.

هر دو شکل از رفتار مشابه پره جی-شکل در مقایسه با پره کامل حکایت دارند که در هر دو سرعت پره جی-شکل در موقعیت‌های بین ۳۰ و ۱۰۵ درجه گشتاور بالاتری از پره کامل تولید می‌کند. به طور متوسط استفاده از پره جی-شکل ضریب گشتاور در حالت راه‌اندازی را برای سرعت باد ۱۰ متر

دارای چرخش نبوده برای تمامی زوایای ممکن وزش باد، با نتایج عددی مرجع [۲۳] مورد قیاس قرار گرفته که خطای متوسط ۲/۳ درصد است. مقایسه نتایج با پژوهش‌های تجربی و عددی نشان دهنده تطابق مناسب نتایج این پژوهش با پژوهش‌های عددی و تجربی است. مقایسه نتایج پژوهش حاضر به نتایج تجربی [۳۹] و عددی [۲۳] به صورت دقیق‌تر به همراه درصد خطای نسبی در قالب جدول ۷ نمایش داده شده که در هر دو مورد تطابق مناسبی بدست آمده است.

۵- نتایج و بحث

در این بخش تاثیر استفاده از پره جی-شکل بر گشتاور تولیدی در شرایط راه‌اندازی و نسبت‌های سرعت نوک پره پایین مورد بررسی قرار می‌گیرد. عملکرد توربین مجهز به پره جی-شکل تحت شرایط مختلف با توربین پره کامل قیاس می‌شود تا بتوان تاثیر آن را بهتر مشاهده و داوری کرد. در قسمت اول این بخش توربین پره مستقیم مورد بررسی قرار می‌گیرد و تاثیر متغیرهایی نظیر سرعت باد، ارتفاع پره و باز یا بسته بودن انتهای پره جی-شکل بر عملکرد توربین مورد سنجش قرار می‌گیرد. در بخش دوم به بررسی تاثیر استفاده از پره جی-شکل در توربین پره مارپیچ پرداخته می‌شود.



شکل ۶. مقایسه گشتاور راه اندازی توربین پره مستقیم مجهز به پره جی-شکل و پره کامل با ارتفاع ۱/۲ متر در سرعت باد، (الف) ۱۰ متر بر ثانیه، (ب) ۵ متر بر ثانیه

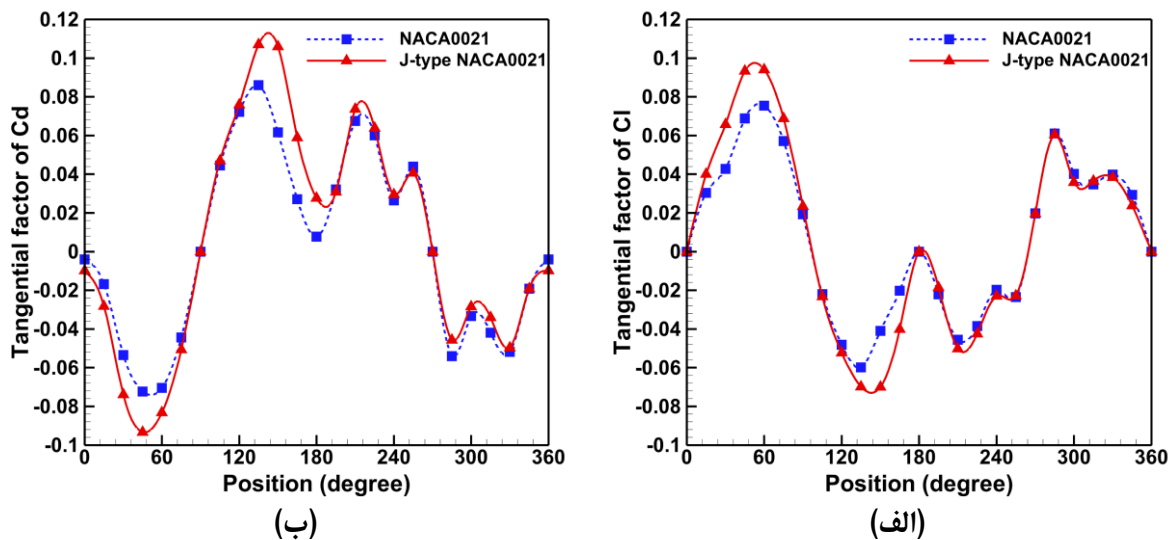
Fig. 6. Comparison of self-startup torque for straight bladed turbine equipped with J-type blade and complete blade at a height of 1.2 m at wind speed, (a) 10 m/s, (b) 5 m/s

و نیروی پسا دارای تاثیر مثبت می‌باشد. تاثیر نیروها در موقعیت‌های مختلف برای هر دو نوع پره از لحاظ کیفی یکسان می‌باشد.

با وجود یکسان بودن تاثیر نیروی برآ و پسا به لحاظ کیفی، تفاوت در میزان گشتاور تولیدی از آنجا نشات می‌گیرد که با جایگزینی پره جی-شکل هر دو نیروی برآ و پسا در ربع اول و دوم افزایش پیدا می‌کنند. این افزایش به دلیل آن است که جریان هوا به دلیل ساختار هندسی پره جی-شکل وارد قسمت مقعر آن شده و فشار را در سطح فشار پره بالا می‌برد. با توجه به اینکه تاثیر نیروی برآ و پسا عکس یکدیگر است در ربع اول اثر مثبت افزایش نیروی برآ بر اثر منفی افزایش نیروی پسا و در ربع دوم اثر مثبت افزایش نیروی پسا بر اثر منفی نیروی برآ غلبه می‌کنند. به عنوان مثال با جایگزینی پره جی-شکل به جای پره کامل در موقعیت ۴۵ درجه نیروی برآ در حدود ۳۵/۶ درصد افزایش پیدا کرده و نیروی پسا در حدود ۲۹/۱ درصد که موجب افزایش گشتاور تولیدی می‌گردد. در ربع سوم و چهارم میزان تغییرات قابل ملاحظه نیست و عملاً رفتار توربین با هر دو نوع پره یکسان است. لازم به ذکر است برای موقعیت ۶۰ درجه که در حدود ۱۰۷ درصد بهبود مشاهده می‌شود، پره اول از افزایش نیروی برآ در ربع اول و پره دوم از افزایش نیروی

بر ثانیه ۲۶/۹ درصد و برای سرعت ۵ متر بر ثانیه ۳۷/۶ درصد در مقایسه با پره کامل بهبود می‌دهد. بنابراین استفاده از توربین با پره جی-شکل در سرعت‌های پایین باد مناسب‌تر است که این موضوع این نوع پره را جهت کاربرد شهری مناسب می‌سازد. با توجه به شکل ۶ دیده می‌شود که بیشترین بهبود ضریب گشتاور در اثر استفاده از پره جی-شکل برای هر دو سرعت در ۶۰ درجه اتفاق می‌افتد که به ترتیب برای سرعت ۱۰ و ۵ متر بر ثانیه ۱۰۷ و ۱۱۳ درصد است.

علت اختلاف گشتاور تولیدی در اثر استفاده از این دو نوع پره در قالب تحلیل مولفه مماسی نیروی برآ و پسا وارد بر یک پره در یک سیکل کامل توضیح داده می‌شود. به دلیل اینکه روتور ثابت است تاثیر نیروی برآ و پسا بر تولید گشتاور در هر ربع از چرخش متفاوت خواهد که این موضوع در شکل ۷ با در نظر گرفتن مولفه مماسی این نیروها در موقعیت‌های مختلف قرارگیری روتور در سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ربع اول (۰ تا ۹۰ درجه) و چهارم (۲۷۰ تا ۳۶۰ درجه) نیروی برآ دارای تاثیر مثبت بوده و نیروی پسا دارای تاثیر منفی. به همین ترتیب در ربع دوم (۹۰ تا ۱۸۰ درجه) و سوم (۱۸۰ تا ۲۷۰ درجه) نیروی برآ تاثیر منفی بر گشتاور تولیدی داشته



شکل ۷. تاثیر استفاده از پره جی-شکل در زوایای مختلف وزش باد در شرایط ثابت بودن روتور بر، (الف) مولفه مماسی نیروی برآ، (ب) مولفه مماسی نیروی پسا

Fig. 7. The effect of using J-type blade at different wind incidence angles with rotor being fixed on, (a) Tangential component of lift force, (b) Tangential component of drag force

جی-شکل در زاویه ۶۰ درجه به میزان بیشینه آن که در زاویه ۱۵ درجه اتفاق افتاده نزدیک شده در حالی که در ارتفاعهای کم، این اختلاف بسیار زیاد بوده است.

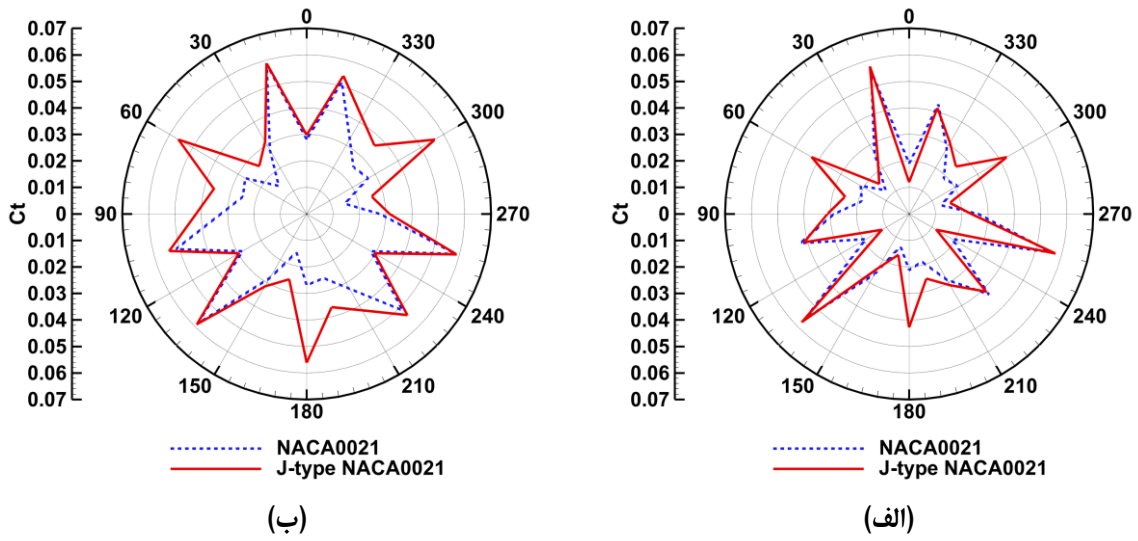
پس از بررسی عملکرد پره جی-شکل در قسمت‌های قبل، همان طور که در شکل ۲ دیده می‌شود هر دو انتهای پره جی-شکل باز هستند. طرح پره با انتهای بسته بدین گونه تعریف می‌شود که دو صفحه به شکل ایرفویل کامل ناکا ۰۰۲۱ با ضخامت ناچیز در دو سمت پره جی-شکل قرار داده شده‌اند. شکل ۹ نمایی از توربین پره مستقیم مجهز به پره جی-شکل با انتهای بسته را نمایش می‌دهد.

در شکل ۱۰ تاثیر بسته بودن انتهای پره جی-شکل بر گشتاور راه‌اندازی توربین در مقایسه با حالت‌هایی که توربین مجهز به پره جی-شکل با انتهای باز و مجهز به پره کامل است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. نمودار موجود در شکل ۱۰ برای سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه و ارتفاع پره ۱/۲ متر ترسیم شده است.

همان طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود رفتار توربین مجهز به پره جی-شکل با انتهای باز و بسته به لحاظ کیفی یکسان است. با بستن انتهای پره‌ها

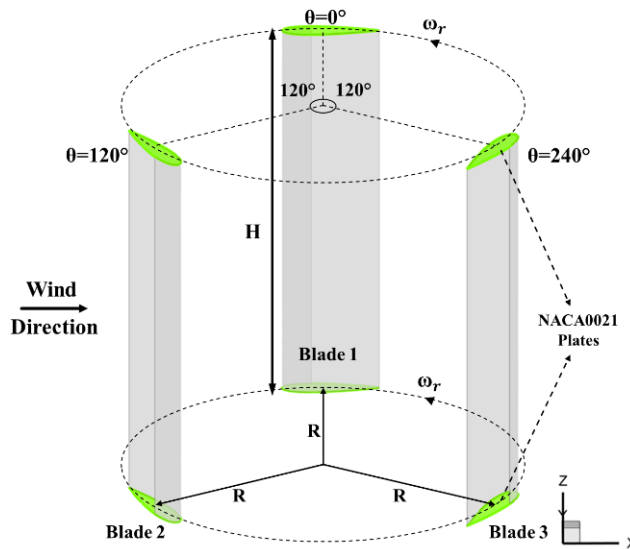
پس از ۱۸۰ درجه سود می‌برند.

پس از مشخص شدن دلیل افزایش گشتاور تولیدی در شرایط راه‌اندازی با استفاده از پره جی-شکل، تاثیر ارتفاع پره بر این بهبود عملکرد مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این امر ارتفاع پره‌ها در هر دو نوع توربین از ۱/۲ متر در حالت قبل به ۰/۸ متر و ۱/۶ متر تغییر داده می‌شود. نتایج در اثر تغییر ارتفاع برای سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. همان طور که در این شکل دیده می‌شود در ارتفاع ۰/۸ متر توربین مجهز به پره جی-شکل در بازه ۳۰ تا ۱۰۵ درجه ضریب گشتاور بالاتری تولید می‌کند در حالی که در ارتفاع ۱/۶ تقریباً در تمامی زوایا عملکرد توربین مجهز به پره جی-شکل بالاتر است. به طور متوسط با افزایش ارتفاع، میزان بهبود عملکرد توربین مجهز به پره جی-شکل در مقایسه با توربین مجهز به پره کامل بیشتر شده به طوری که از میزان ۱۵/۶ درصد در ارتفاع ۰/۸ متر به ۳۴/۶ درصد در ارتفاع ۱/۶ متر می‌رسد. علت این امر آن است که سطح پره جی-شکل که موجب بهبود عملکرد می‌شود در اثر افزایش ارتفاع بزرگتر شده و در نتیجه توربین گشتاور بیشتری تولید می‌کند. نکته جالب توجه این است که با افزایش ارتفاع، میزان گشتاور تولیدی توسط توربین مجهز به پره



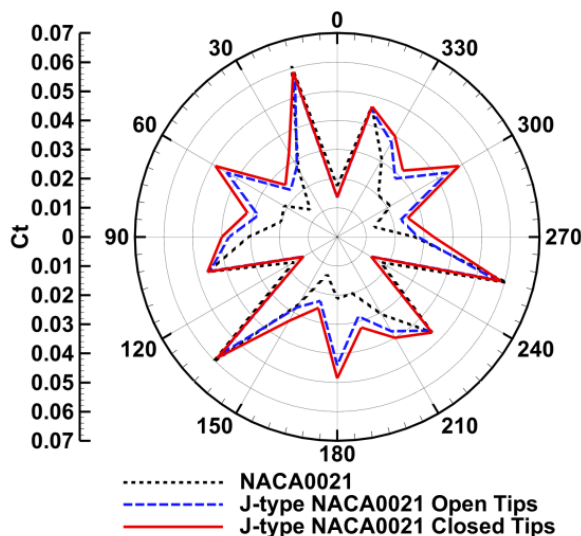
شکل ۸. گشتاور راه اندازی توربین پره مستقیم مجهز به پره جی-شکل در مقایسه با توربین مجهز به پره کامل در ارتفاع، (الف) ۰/۸ متر، (ب) ۱/۶ متر

Fig. 8. Self-starting torque of straight bladed turbine equipped with J-type blades compared to complete blades at height of, (a) 0.8 m, (b) 1.6 m



شکل ۹. توربین پره مستقیم با پره های جی-شکل با انتهای بسته

Fig. 9. Straight bladed turbine with closed end J-type blades



شکل ۱۰. گشتاور راه اندازی توربین پره مستقیم مجهز به پره جی-شکل با انتهای باز و بسته در مقایسه با توربین مجهز به پره کامل

Fig. 10. Self-starting torque of straight bladed turbine equipped with open and closed end J-type blades compared to complete blades

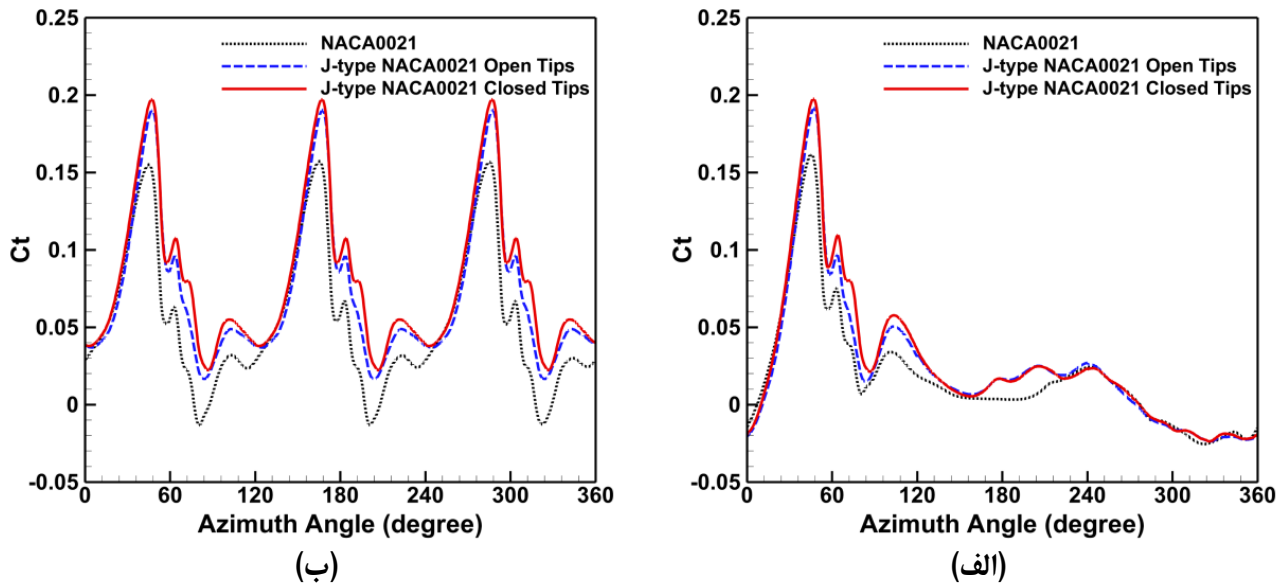
حرکت از شرایط بدون چرخش، نسبت‌های سرعت نوک پره پایین را تجربه کرده تا به حالت ایده‌آلی برسد. بنابراین میزان گشتاور تولیدی توربین در حین چرخش در این نسبت‌ها نیز اهمیت پیدا می‌کند. در این قسمت شبیه‌سازی سه بعدی برای توربینی با ارتفاع ۱/۲ متر در سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه انجام می‌گیرد. این شبیه‌سازی در نسبت سرعت نوک پره ۰/۵ برای سه نوع پره شامل، پره جی-شکل با انتهای بسته، پره جی-شکل با انتهای باز و پره کامل در یک دور کامل از چرخش روتور انجام می‌گیرد.

شکل ۱۱(الف) و ۱۱(ب) به ترتیب میزان ضریب گشتاور تولیدی توسط یک پره و توربین سه پره را برحسب زاویه چرخش برای توربین مجهز به پره‌های مختلف نشان می‌دهد. همان طور که در شکل ۱۱(الف) مشاهده می‌شود به دلیل زوایای حمله بزرگی که در این نسبت سرعت نوک پره وجود دارد پدیده واماندگی دینامیکی^۱ در حدود زاویه ۴۷ درجه رخ می‌دهد. تحت این شرایط پره‌های جی-شکل گشتاور بالاتری تولید می‌کنند و در زوایای بیشتر چرخش به دلیل بهره‌گیری از نیروی پسا توانایی بالاتری در تولید گشتاور دارند. با توجه به شکل ۱۱(ب) توربین سه پره مجهز به پره

به دلیل اینکه جریان، امکان فرار از لبه‌ها را نمی‌یابد، فشار در سطح فشار پره بالاتر رفته که این امر موجب افزایش ضریب گشتاور متوسط می‌شود. با مسدود کردن دو انتهای پره‌ی جی-شکل، بهبود عملکرد توربین نسبت به توربین با پره کامل از ۲۶/۹ درصد به ۳۸/۵ درصد افزایش پیدا می‌کند. همچنین بیشینه‌ی اختلاف دو نوع توربین در ۶۰ درجه از ۱۰۷ درصد به ۱۲۹ درصد می‌رسد. نتایج حاضر نشان می‌دهند که توربین مجهز به پره جی-شکل با انتهای بسته کاربردی‌تر بوده و می‌تواند گزینه مناسبی برای کاربرد شهری باشد.

۵-۱-۲- گشتاور تولیدی توربین پره مستقیم در نسبت سرعت نوک پره پایین

بررسی گشتاور راه اندازی در قسمت قبل برای توربین پره مستقیم، نشان داد که پره جی-شکل با انتهای بسته گزینه مناسبی برای جاگزینی با پره کامل می‌باشد. بر همین اساس در این بخش به بررسی عملکرد توربین مجهز به این پره در مقایسه با توربین مجهز به پره جی-شکل با انتهای باز و پره کامل در نسب سرعت نوک پره پایین پرداخته می‌شود. هدف از این مقایسه بررسی کامل قدرت راه‌اندازی توربین است چرا که توربین پس از شروع به



شکل ۱۱. ضریب گشتاور آنی برحسب زاویه چرخش روتور در یک دور کامل برای، (الف) یکی از سه پره توربین، (ب) کل توربین

Fig. 11. Instantaneous torque coefficient against azimuth angle in one complete revolution for, (a) One of the three blades of the turbine, (b) the entire turbine

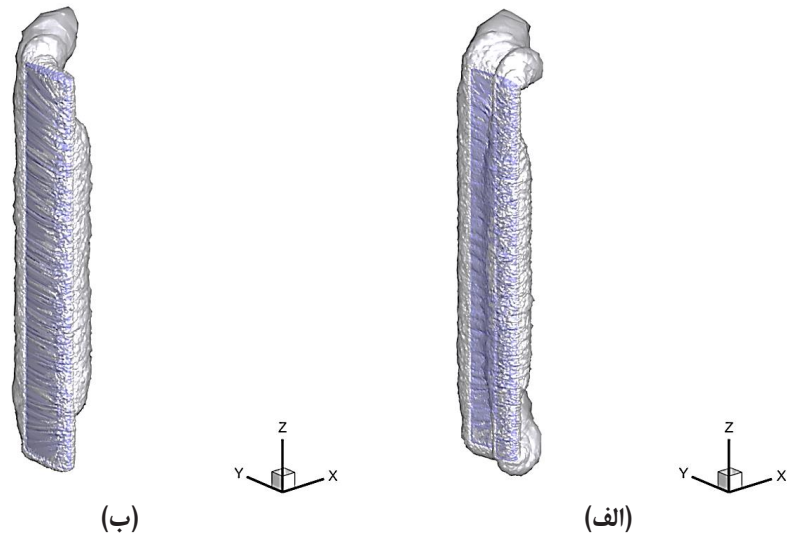
می‌شود. در نتیجه عملکرد پره در این بخش‌ها نسبت به بخش‌ها میانی کاهش می‌یابد. نمایی سه بعدی از این گردابه‌ها برای یک پره جی-شکل در زاویه ۶۰ درجه در شکل ۱۲(الف) به تصویر کشیده شده و با گردابه‌های حول پره کامل در شکل ۱۲(ب) مورد قیاس قرار گرفته است. همان طور که دیده می‌شود گردابه‌های تشکیل شده در قسمت مقعر پره جی-شکل، در نواحی نزدیک به لبه‌ها کوچک‌تر شده و از انتهای پره خارج می‌شوند.

برای ممانعت از خارج شدن گردابه‌ها از پره با انتهای بسته استفاده شد که تاثیر مثبت آن بر عملکرد در قبل بیان شد. این تاثیر از آنجا نشات می‌گیرد که اضافه کردن صفحه‌های انتهایی با جلوگیری از خروج گردابه‌ها موجب می‌شوند که اندازه گردابه‌ها در مقایسه با قسمت‌های میانی یکسان بماند و فشار در نواحی نزدیک به لبه پره همچنان بالا باشد. همچنین با استفاده از پره با انتهای بسته اجازه فرار و ملحق شدن گردابه‌ها با گردابه‌های حاصل از لبه پره داده نمی‌شود که در نتیجه گشتاور بالاتری در قسمت لبه پره تولید می‌شود. نمایی سه بعدی از تاثیر استفاده از صفحه انتهایی بر ساختار جریان در شکل ۱۳ آورده شده است.

جی-شکل با انتهای بسته به طور متوسط ضریب گشتاوری ۱۱/۲ درصد و ۴۹/۵ درصد به ترتیب بیشتر از توربین مجهز به پره جی-شکل با انتهای باز و پره کامل تولید می‌کند.

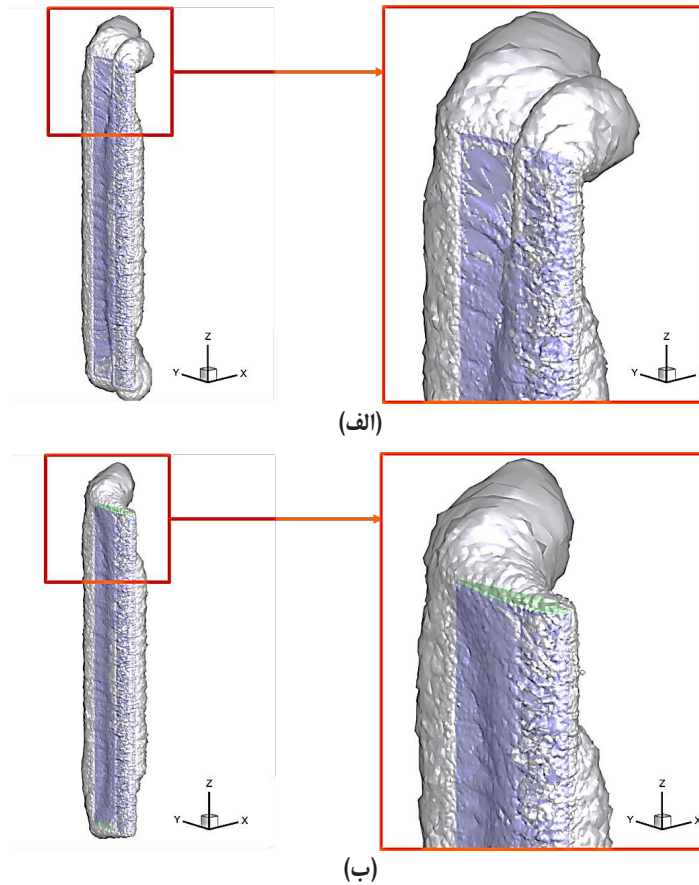
تحلیل ساختار جریان هوا حول پره می‌تواند به دلایل بهبود عملکرد توربین در اثر جایگزینی پره جی-شکل به جای پره کامل کمک شایانی داشته باشد. با جایگزینی پره جی-شکل گردابه‌هایی^۱ در قسمت مقعر پره (سطح فشار) تشکیل شده که موجب افزایش فشار در این سطح می‌گردند. در نتیجه اختلاف فشار بین دو سطح پره افزایش پیدا می‌کند و پره قادر است گشتاور بیشتری تولید کند. این گردابه‌ها در نواحی نزدیک به لبه‌های پره جی-شکل به سمت انتهای پره کشیده شده و با فرار از لبه پره به گردابه‌های حاصل از لبه ملحق می‌شوند. این امر موجب افزایش سایز این گردابه‌ها در لبه پره شده و افت گشتاور تولیدی در ناحیه لبه پره را به همراه دارد. از طرف دیگر حرکت گردابه‌ها و افزایش سرعت آن‌ها در قسمت مقعر پره به سمت لبه پره موجب کاهش فشار و کوچک شدن سایز گردابه‌ها در این نواحی

1 Vortices



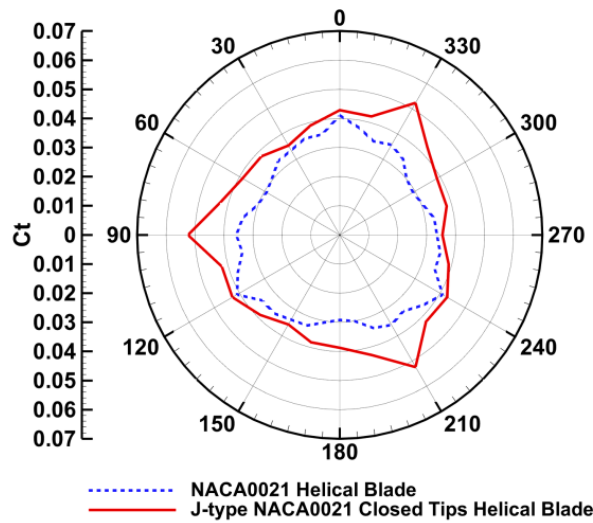
شکل ۱۲. نمای سه بعدی گردابه های تولید شده حول، (الف) پره جی-شکل، (ب) پره کامل

Fig. 12. 3D view of generated vortices around, (a) J-type blade, (b) Complete blade



شکل ۱۳. نمای سه بعدی گردابه ها در انتهای پره جی-شکل، (الف) پره با انتهای باز، (ب) پره با انتهای بسته

Fig. 13. 3D view of vortices at the end of J-type blade, (a) Blade with open end, (b) Blade with closed end



شکل ۱۴. گشتاور راه اندازی توربین پره مارپیچ مجهز به پره جی-شکل با انتهای بسته در مقایسه با توربین مجهز به پره کامل

Fig. 14. Self-starting torque of helical bladed turbine equipped with closed end J-type blade compared to complete blade

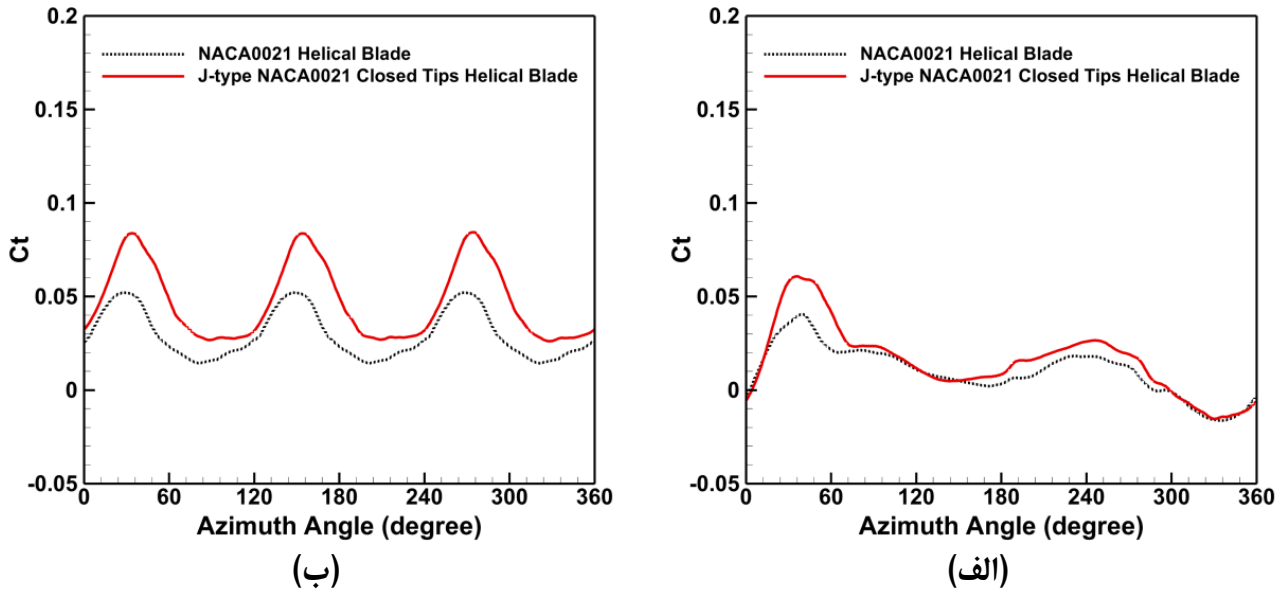
بیشتر موقعیت‌های مختلف با توربین پره مارپیچ می‌باشد که نوسان کمتری هم را در نتایج به همراه دارد.

۵-۲-۲- گشتاور تولیدی توربین پره مارپیچ در نسبت سرعت نوک پره پایین

برای بررسی قدرت راه‌اندازی توربین پره مارپیچ مجهز به پره جی-شکل نیاز است که عملکرد این توربین در نسبت سرعت نوک پره پایین نیز مورد بررسی قرار گیرد. برای برآورد شدن این موضوع در شکل ۱۵ به مقایسه گشتاور آبی تولید شده توسط توربین پره مارپیچ مجهز به پره جی-شکل با انتهای بسته و پره کامل در نسبت سرعت نوک پره ۰/۴۴ پرداخته می‌شود. شکل ۱۵ (الف) و ۱۵ (ب) به ترتیب برای یک پره توربین و توربین سه پره به بررسی تاثیر استفاده از پره جی-شکل با انتهای بسته در توربین پره مارپیچ پرداخته است. این شکل نشان می‌دهد که همانند گشتاور راه‌اندازی در توربین پره مارپیچ، استفاده از پره جی-شکل موجب بهبود عملکرد تحت شرایطی که توربین در حال چرخش است می‌گردد. با توجه به شکل ۱۵ (ب) میزان بهبود عملکرد توربین پره مارپیچ مجهز به پره جی-شکل با انتهای بسته به طور متوسط ۴۱/۹ درصد بهتر از توربین با پره کامل در نسبت سرعت نوک پره ۰/۴۴ است.

۵-۲-۲- توربین پره مارپیچ مجهز به پره جی-شکل
۵-۲-۱- گشتاور راه‌اندازی توربین پره مارپیچ

یکی از اصول اساسی در طراحی توربین‌های پره مارپیچ بالابردن گشتاور راه‌اندازی بوده، به همین منظور بررسی گشتاور راه‌اندازی در این نوع توربین با پره جی-شکل ارزشمند خواهد بود. نظر به اینکه پره جی-شکل با انتهای بسته در توربین پره مستقیم عملکرد بهتری داشت، در این بخش این پره در توربین پره مارپیچ مورد بررسی قرار خواهد گرفت. شکل ۱۴ به بررسی گشتاور راه‌اندازی برای تمام زوایای ممکن برخورد باد به توربین پره مارپیچ در سرعت باد ۷ متر بر ثانیه می‌پردازد. مشخصات توربین پره مارپیچ در جدول ۱ گزارش شده است. همان طور که در شکل ۱۴ مشخص است توربین مجهز به پره جی-شکل در تمامی موقعیت‌های قرارگیری روتور، ضریب گشتاور بالاتری از توربین با پره کامل تولید می‌کند. به طور متوسط ضریب گشتاور راه‌اندازی با پره جی-شکل با انتهای بسته ۲۱ درصد بالاتر از توربین پره مارپیچ با پره کامل است و بیشینه اختلاف تولید گشتاور در زاویه ۹۰ درجه اتفاق می‌افتد که میزان آن ۴۶/۵ درصد است. یادآوری این نکته ارزشمند است که برای توربین پره مستقیم موقعیت‌هایی که پره جی-شکل دارای عملکرد بالاتر بود، محدود به زوایای ۳۰ الی ۱۰۵ درجه می‌شد و بیشینه اختلاف در زاویه ۶۰ درجه وجود داشت. علت این اختلاف پوشش



شکل ۱۵. ضریب گشتاور آنی برحسب زاویه چرخش روتور ماریچج در یک دور کامل برای، (الف) یکی از سه پره توربین، (ب) کل توربین

Fig. 15. Instantaneous torque coefficient against azimuth angle of the helical bladed turbine in one complete revolution for, (a) One of the three blades, (b) The entire turbine

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از شبیه‌سازی سه بعدی به بررسی قدرت راه‌اندازی توربین داریوس سه پره مجهز به پره جی-شکل در مقایسه با پره کامل پرداخته شده است. مقایسه عملکرد پره جی-شکل و پره کامل در شرایط گوناگون مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج زیر را به همراه داشت.

- توربین پره مستقیم مجهز به پره جی-شکل تحت شرایط راه‌اندازی، گشتاور بالاتری از توربین با پره کامل تولید می‌کند. در سرعت باد ۱۰ و ۵ متر بر ثانیه گشتاور تولیدی توربین مجهز به پره جی-شکل به ترتیب ۲۶/۹ و ۳۷/۶ درصد بیشتر از توربین با پره کامل بود. این پره گزینه مناسبی جهت جایگزینی پره کامل در کاربردهای شهری توربین به نظر می‌رسد.
- با تحلیل هر دو نیروی برآ و پسا در تمامی زوایا نشان داده شد که با استفاده از پره جی-شکل هر دو نیرو افزایش می‌یابند و برای موقعیتی از روتور که یکی از پره‌ها در ۶۰ درجه قرار دارد و پره دیگر در ۱۸۰ درجه، بیشینه اختلاف گشتاور تولیدی پره جی-شکل و پره کامل رقم می‌خورد که در حدود ۱۰۷ درصد است.
- با افزایش ارتفاع پره‌ها به دلیل آنکه سطح بیشتری از پره جی-

شکل در مقابل باد قرار می‌گیرد، اختلاف گشتاور تولیدی در راه‌اندازی بین توربین با پره جی-شکل و پره کامل افزایش می‌یابد. این موضوع با بررسی گشتاور تولیدی در دو ارتفاع ۰/۸ و ۱/۶ متر که به ترتیب افزایش گشتاور تولیدی ۱۵/۶ و ۳۴/۶ درصد را برای توربین با پره جی-شکل به نسبت پره کامل به همراه داشت، مورد تصدیق قرار گرفت.

- نشان داده شد که پره جی-شکل با انتهای بسته دارای قدرت راه‌اندازی بالاتری از پره با انتهای باز است به نحوی که میزان بهبود عملکرد به نسبت پره کامل از ۲۶/۹ درصد برای پره با انتهای باز به ۳۸/۵ درصد برای پره با انتهای بسته تغییر کرد.
- علاوه بر شرایط راه‌اندازی پره جی-شکل با انتهای بسته در شرایطی که روتور دارای سرعت چرخشی کم است نیز عملکرد مناسب‌تری از پره با انتهای باز و پره کامل دارد. برای نسبت سرعت نوک پره ۰/۵ این پره متوسط ضریب گشتاور تولیدی را در مقایسه با پره جی-شکل با انتهای باز و پره کامل به ترتیب ۱۱/۲ و ۴۹/۵ درصد افزایش می‌دهد.
- در توربین پره ماریچج همانند توربین پره مستقیم، استفاده از پره جی-شکل با انتهای بسته موجب بهبود قدرت راه‌اندازی می‌شود. توربین پره

منابع

- [1] D.Y.C. Leung, Y. Yang, Wind energy development and its environmental impact: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1) (2012).
- [2] H.Y. Peng, B.W. Zhong, G. Hu, H.J. Liu, Optimization analysis of straight-bladed vertical axis wind turbines in turbulent environments by wind tunnel testing, *Energy Conversion and Management*, 257 (2022) 115411.
- [3] A. Rezaeiha, H. Montazeri, B. Blocken, Characterization of aerodynamic performance of vertical axis wind turbines: Impact of operational parameters, *Energy Conversion and Management*, 169 (2018).
- [4] W. Tjiu, T. Marnoto, S. Mat, M.H. Ruslan, K. Sopian, Darrieus vertical axis wind turbine for power generation I: Assessment of Darrieus VAWT configurations, *Renewable Energy*, 75 (2015).
- [5] M. Ghasemian, Z.N. Ashrafi, A. Sedaghat, A review on computational fluid dynamic simulation techniques for Darrieus vertical axis wind turbines, *Energy Conversion and Management*, 149 (2017).
- [6] 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).
- [7] A. Tummala, R.K. Velamati, D.K. Sinha, V. Indrajaya, V.H. Krishna, A review on small scale wind turbines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56 (2016) 1351-1371.
- [8] Z. Zhao, D. Wang, T. Wang, W. Shen, H. Liu, M. Chen, A review: Approaches for aerodynamic performance improvement of lift-type vertical axis wind turbine, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 49 (2022) 101789.
- [9] H. Riegler, R. Ag, HAWT versus VAWT: Small VAWTs find a clear niche, *Refocus*, 4(4) (2003).
- [10] A. Shires, Design optimisation of an offshore vertical axis wind turbine, *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Energy*, 166(1) (2013).
- [11] S. Zanforlin, S. Deluca, Effects of the Reynolds number and the tip losses on the optimal aspect ratio of straight-

ماریچ مجهز به این نوع پره در شرایط راهاندازی و چرخش با سرعت نوک پره ۰/۴۴ به ترتیب متوسط ضریب گشتاور تولیدی را ۲۱ و ۴۱/۹ درصد در مقایسه با پره کامل افزایش می‌دهد.

۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی

R	شعاع روتور، m
H	ارتفاع پره، m
n	تعداد پره
c	کورد پره، m
\bar{u}_i	سرعت متوسط، $m s^{-1}$
\bar{P}	فشار متوسط، Pa
$\overline{u_i' u_j'}$	تانسور تنش رینولدز، $m^2 s^{-2}$
k	انرژی جنبشی توربولانس، $J kg^{-1}$
C_t	ضریب گشتاور
C_p	ضریب توان
y^+	فاصله بدون بعد دیوار
V	سرعت باد، $m s^{-1}$
A_s	سطح جاروب شده، m^2
T	گشتاور، Nm

اختصارات

$HAWT$	توربین بادی محور افقی
$VAWT$	توربین بادی محور عمودی
TSR	نسبت سرعت نوک پره
$URANS$	معادلات متوسط گیری شده ناویر-استوکس
SST	انتقال تنش برشی

علائم یونانی

α	زاویه پیمچش، degree
θ	زاویه چرخش، degree
$r\omega$	سرعت چرخش، rad/s
ρ	چگالی، $kg m^{-3}$
ν	لزجت سینماتیکی، $m^2 s^{-1}$
ω	نرخ ویژه اضمحلال توربولانس، s^{-1}

- [21] A. Abdolahifar, S.M.H. Karimian, Aerodynamic Performance Improvement of Hybrid Darrieus-Savonius Vertical Axis Wind Turbine, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 52(7) (2019) 1865-1884. (in persian)
- [22] M.R. Castelli, E. Benini, Effect of blade inclination angle on a darrieus wind turbine, *Journal of Turbomachinery*, 134(3) (2011).
- [23] S.M.H. Karimian, A. Abdolahifar, Performance investigation of a new Darrieus Vertical Axis Wind Turbine, *Energy*, 191 (2020).
- [24] V. Shukla, A.K. Kaviti, Performance evaluation of profile modifications on straight-bladed vertical axis wind turbine by energy and Spalart Allmaras models, *Energy*, 126 (2017).
- [25] D. Neuhart, O. Pendergraft, A water tunnel study of Gurney flaps (NASA TM 4071), Washing-ton, DC: NASA Langley Research Center, (1988).
- [26] J. Qian, Z. Zhang, S. Luo, F. Liu, Numerical study of the aerodynamic characteristics of a plunging rigid airfoil with elastic trailing-edge plate, AIAA 2011-3062. 20th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, Hawaii (June 2011).
- [27] Z. Wang, M. Zhuang, Leading-edge serrations for performance improvement on a vertical-axis wind turbine at low tip-speed-ratios, *Applied Energy*, 208 (2017).
- [28] S. Beyhaghi, R.S. Amano, A parametric study on leading-edge slots used on wind turbine airfoils at various angles of attack, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 175 (2018).
- [29] O. Mohamed, A. Ibrahim, A. Etman, A. Abdelkader, A. Elbaz, Numerical Investigation of Darrieus Wind Turbine with Slotted Airfoil Blades, *Energy Conversion and Management*, 5 (2020) 100026.
- [30] A. Abdolahifar, S. Karimian, A comprehensive three-dimensional study on Darrieus vertical axis wind turbine with slotted blade to reduce flow separation, *Energy*, 248 (2022) 123632.
- [31] M. Zamani, M.J. Maghrebi, S.R. Varedi, Starting torque bladed Vertical Axis Wind Turbines, *Energy*, 148 (2018).
- [12] 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*, 90 (2016).
- [13] Z. Driss, O. Mlayeh, S. Driss, M. Maaloul, M.S. Abid, Study of the incidence angle effect on the aerodynamic structure characteristics of an incurved Savonius wind rotor placed in a wind tunnel, *Energy*, 113 (2016).
- [14] T. Wakui, Y. Tanzawa, T. Hashizume, T. Nagao, Hybrid configuration of darrieus and savonius rotors for stand-alone wind turbine-generator systems, *Electrical Engineering in Japan*, 150(4) (2005).
- [15] R. Gupta, A. Biswas, K.K. Sharma, Comparative study of a three-bucket Savonius rotor with a combined three-bucket Savonius-three-bladed Darrieus rotor, *Renewable Energy*, 33(9) (2008).
- [16] B.K. Debnath, A. Biswas, R. Gupta, Computational fluid dynamics analysis of a combined three-bucket Savonius and three-bladed Darrieus rotor at various overlap conditions, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 1(3) (2009).
- [17] D. MacPhee, A. Beyene, Recent advances in rotor design of vertical axis wind turbines, *Wind Engineering*, 36(6) (2012).
- [18] S. Bhuyan, A. Biswas, Investigations on self-starting and performance characteristics of simple H and hybrid H-Savonius vertical axis wind rotors, *Energy Conversion and Management*, 87 (2014).
- [19] N. Akbari, a. abdolahifar, Performance Investigation of Hybrid Darrieus-Savonius Wind Turbine Compared to Straight-Bladed Darrieus Turbine by Three-Dimensional Numerical Simulation, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 51(6) (2020) 1443-1454. (in persian)
- [20] A. Roshan, M.J. Maghrebi, Performance improvement of hybrid Darrieus-Savonius wind turbine, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 6(3) (2016) 195-212. (in persian)

- [36] Y. Celik, D. Ingham, L. Ma, M. Pourkashanian, Design and aerodynamic performance analyses of the self-starting H-type VAWT having J-shaped aerofoils considering various design parameters using CFD, *Energy*, 251 (2022) 123881.
- [37] Y. Celik, D. Ingham, L. Ma, M. Pourkashanian, Novel hybrid blade design and its impact on the overall and self-starting performance of a three-dimensional H-type Darrieus wind turbine, *Journal of Fluids and Structures*, 119 (2023) 103876.
- [38] K. McLaren, S. Tullis, S. Ziada, Computational fluid dynamics simulation of the aerodynamics of a high solidity, small-scale vertical axis wind turbine, *Wind Energy*, 15(3) (2012).
- [39] M. Elkhoury, T. Kiwata, E. Aoun, Experimental and numerical investigation of a three-dimensional vertical-axis wind turbine with variable-pitch, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 139 (2015).
- improvement using J-shaped straight-bladed Darrieus vertical axis wind turbine by means of numerical simulation, *Renewable Energy*, 95 (2016) 109-126.
- [32] M. Zamani, S. Nazari, S.A. Moshizi, M.J. Maghrebi, Three dimensional simulation of J-shaped Darrieus vertical axis wind turbine, *Energy*, 116 (2016).
- [33] L. Pan, Z. Zhu, H. Xiao, L. Wang, Numerical Analysis and Parameter Optimization of J-Shaped Blade on Offshore Vertical Axis Wind Turbine, *Energies*, 14(19) (2021).
- [34] A. García Auyanet, R.E. Santoso, H. Mohan, S.S. Rathore, D. Chakraborty, P.G. Verdin, CFD-Based J-Shaped Blade Design Improvement for Vertical Axis Wind Turbines, *Sustainability*, 14(22) (2022).
- [35] R. Farzadi, M. Bazargan, 3D numerical simulation of the Darrieus vertical axis wind turbine with J-type and straight blades under various operating conditions including self-starting mode, *Energy*, 278 (2023) 128040.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Ramin Farzadi, Majid Bazargan, Numerical study of self-starting torque in Darrieus vertical axis wind turbines with J-type blades, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 56(3) (2024) 439-464.

DOI: [10.22060/mej.2024.23060.7714](https://doi.org/10.22060/mej.2024.23060.7714)



