



Investigation of the factors affecting the performance of Savonius wind turbine

Masoud Amin^{1*}, ZoheirSaboohi², Hamed Hashemi Mehne³, Kambiz Ghaemi Osgouie⁴

1- PhD Candidate, Aerospace Research Institute, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Aerospace Research Institute, Tehran, Iran

3- Associate Professor, Aerospace Research Institute, Tehran, Iran

4- Assistant Professor, Caspian Faculty of Engineering, University of Tehran, Rezvanshahr, Iran

* 1465774111 Tehran, Iran, hashemimehne@gmail.com

Received: 13 July 2022 Revised: 13 November 2022 Accepted: 28 December 2022

Abstract

Nowadays, wind energy is considered one of the cleanest sources of energy, and the capacity of wind power plants is growing around the world. In particular, the design and construction of small wind turbines have been the subject of much research. This article deals with the Savonius wind turbine, a well-known vertical axis turbine. First, the mechanical principles of operation of this type of wind turbine are explained. Then, the criteria for determining its efficiency and performance, such as power and torque coefficients, are stated. The sequel discusses the geometric and technical factors affecting its efficiency. These factors include the overlap ratio, number of blades, number of stages, twist angle, shaft diameter, and the installation of end plates. The current paper can be helpful for those trying to improve the performance of this type of turbine. In this regard, there are some proposed innovative designs to enhance the performance of the Savonius turbine concerning experimental results and their numerical simulations. These designs increase the maximum power coefficient to 38%, although they complicate the turbine structure. Some of these innovative designs are also reviewed.

Keywords: Savonius wind turbine, Overlap ratio, Twist angle, Performance, Power coefficient

1. Introduction

In recent decades, the use of renewable energy sources has attracted the attention of many countries due to the reduction of fossil resources, environmental considerations, and sustainable development. Meanwhile, wind energy is one of the most desirable energy sources for electricity generation. According to the GWR2019 report, the total capacity of the world's wind farms has increased from 24 GW in 2001 to 651 GW in 2019 and will continue to grow.

Wind turbines are divided structurally into two categories: the horizontal axis and the vertical axis. Horizontal axis turbines are superior to vertical ones in terms of efficiency, in other words, the amount of mechanical wind energy absorption and its conversion into rotational torque. However, they are compatible with laminar flow. So, the use of these turbines requires alignment of the turbine axis with the wind direction. On the other hand, vertical axis turbines are mainly employed on a small scale and are independent of wind direction and flow stability. In addition, their maintenance costs are lower compared to horizontal ones due to installing a power converter near the ground. These advantages, accompanied by lower initial velocities, have led researchers to investigate, design, manufacture, and optimize vertical-axis turbines.

The vertical axis turbine assemblies are divided into two categories: Darrieus and Savonius. The Savonius turbines that are the subject of this article have poorer efficiencies than the Darrieus type. However, simple design, cheap construction, relatively low operating speed, and low starting torque are some of their advantages over the Darrieus. Moreover, high negative torque and low power coefficient have led to lots of research into Savonius turbines to increase their efficiency, for instance, studying the aspect ratio, the effect of the number of blades and changes in their shape, and the multiplication and addition of walls.

Since the research to enhance the efficiency of the Savonius wind turbine is still ongoing, in this article, while introducing the factors affecting the efficiency of this type of turbine, we try to review the literature conducted so far to clarify the design path of this type of turbine for those who are interested.

2. Principles of operation of Savonius turbine

As indicated in Figure 1, the Savonius turbine consists of two semi-spherical blades connected to each other by a metal shaft. The lower or forwarding blade is concave in the direction of the wind. Therefore, the incoming part of the wind creates a drag force on the surface of this blade. The upper or returning blade is

convex, and some of its parts face the wind. Because the flow-facing surface of the returning blade is less than that of the forwarding blade, the lower drag force is greater than that of the other blade, resulting in torque around the turbine shaft and causing the blades to rotate in the specified direction.

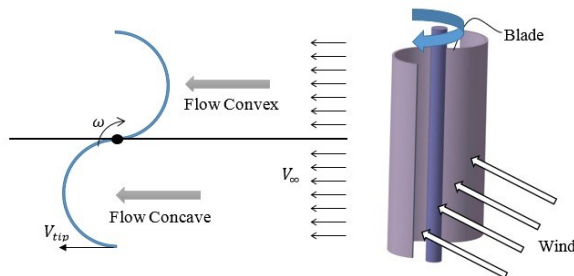


Figure 1. Schematic of Savonius turbine operation

Let V be the wind speed, ρ be the air density, and A be the blade area. Then, the available power in the wind is

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1)$$

As all this power can not be absorbed by the turbine and converted into torque, the proper method to determine the turbine's efficiency is to define its power coefficient, which is the ratio of power extracted by the turbine to wind power,

$$C_p = \frac{P_t}{P_w} = \frac{P_t}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \quad (2)$$

Other factors are tip speed ratio and torque coefficient:

$$\lambda = \frac{V_t}{V} = \frac{\omega R}{V} \quad (3)$$

$$C_T = \frac{T_t}{T} = \frac{T_t}{\frac{1}{2} \rho V^2 A R} \quad (4)$$

As can be seen in Figure 2, the power and the torque coefficient reach their maximum at different tip speed ratios. In most articles, the maximum power coefficient is considered a measure of turbine performance.

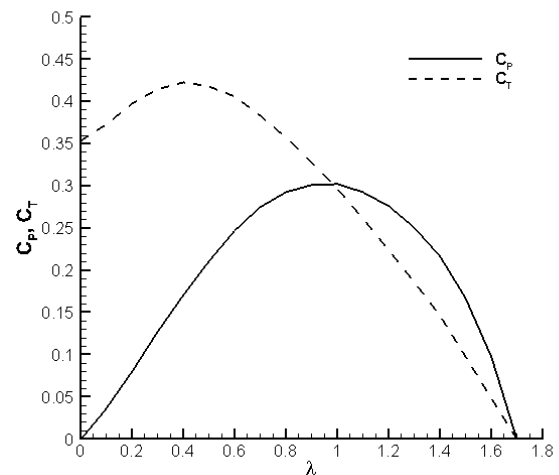


Figure 2. Typical power and torque coefficient curves

3. Performance Affecting Factors

One of the primary geometric factors in Savonius's design is the overlap ratio, which is the ratio of the horizontal gap between the blades in the center of the rotor to the rotor diameter. This gap improves the flow circulation in the rotor and reduces the adverse effect of vortices. Using the experimental results of [1] and computational fluid dynamics of [2], the best overlap ratio in conventional design is 0.15. The optimum overlap ratio can increase performance to 9%.

The second design factor is the aspect ratio, which is the ratio of the rotor's height to its diameter. The effect of aspect ratio was investigated in [3], where rotors with different aspect ratios of 0.48, 0.55, 0.64, 0.77, and 0.99, respectively, were examined in a wind tunnel. Based on the measured power coefficients, the best value for the aspect ratio was 0.77, which led to a 14% increase in performance in the studied cases. The results are confirmed by [4].

The number of stages is another design factor. We propose a two-stage configuration to adjust the effect of negative torque observed in some rotor directions. In this type of turbine, two Savonius rotors are placed on top of each other at a 90-degree relative angle. The numerical and experimental investigations of multi-stage Savonius turbines showed that the performance of the two-stage rotor is better than single and three-stage ones [5-6].

Furthermore, the number of blades is a design parameter investigated by researchers. Experimental results [7-8] indicated that the two-blade rotor has better performance, and increasing the number of blades reduces the power coefficient. For example, the three-blade turbine has a maximum power coefficient of 9%-19% lower than the two-blade turbine.

One of the other aerodynamic approaches to improve the Savonius turbine is to install two circular end plates. Related research, such as [9], revealed that

end plates could increase the maximum power coefficient from 0.16 to 0.20. They should have a low thickness to the rotor height and radii 10% larger than the rotor radii. Otherwise, they will increase the turbine inertia.

Twisted blades are continuous forms of multistage blades introduced to enhance static torque conditions. Their main factor is the twist angle. The effect of twist angle on turbine performance has been quantified in [10]. The results indicated that among twisted turbines with twist angles 0° , 45° , 90° , and 135° , the 45° -degree twisted blade has the highest performance.

Moreover, one of the parameters studied in the references was the diameter of the turbine shaft. In the conventional type, the shaft is central, while there are designs in which the turbine shaft is external. In the conventional one, its diameter is critical because it can block the flow inside the rotor. In a study based on two-dimensional simulations [11], the optimal shaft diameter was estimated as 0.2 of the optimal overlap.

In addition to conventional Savonius turbines with optimized mentioned geometrical parameters, there are some innovative designs. In this regard, optimizing the blade profile, adding small blades, adding guiding walls, and using Darrieus-Savonius hybrid configurations can be addressed. These enhanced designs increase the maximum power coefficient to 38%. However, they cause structural complexity in manufacturing and operations. So, regarding such unconventional design, we should compromise between performance and structural complexity.

4. Conclusions

In this paper, the Savonius vertical axis turbine and its operating principles and performance measurement quantities were introduced. Then, geometric factors affecting the performance of the turbine, such as overlap ratio, aspect ratio, number of blades, and their twist angle, were studied by reviewing the references. Also, we examined the most significant creative designs for increasing the efficiency of the Savonius turbine. At best, these innovations improved performance by 38%. However, they make the simplicity of the Savonius turbine, which is its strength, problematic because of adding structural complexity.

5. References

- [1] B. F. Blackwell, R. E. Sheldahl, L. V. Feltz, Wind Tunnel Performance Data for Two- and Three Bucket Savonius Rotors, *SAND 76-0131*, pp. 1-107, 1977.
- [2] J. V. Akwa, G. A. Júnior, A. P. Petry, Discussion on the verification of the overlap ratio influence on performance coefficients of a Savonius wind rotor using computational fluid dynamics, *Renewable Energy*, Vol. 38, pp. 141-149, 2012.
- [3] N. J. Roth, *A Prototype Design and Performance of the Savonius Rotor Based Irrigation System*, MSc. Thesis, University of British Columbia, 1982.
- [4] M. A. Kamoji, S. B. Kedare, S. V. Prabhu, Experimental investigations on single stage modified Savonius rotor, *Applied Energy*, Vol. 86, pp. 1064-1073, 2009.
- [5] P. Chaisiriroj, N. Tinnachote, S. Usajantragul, T. Leephakpreeda, Experimental Performance Investigation of Optimal Vertical Axis Wind Turbines under Actual Wind Conditions in Thailand, *Energy Procedia*, Vol. 138, pp. 651-656, 2017
- [6] L. B. Kothe, A. P. Petry, Numerical and Experimental Study of a Two-Stage Savonius Wind Turbine, *Engenharia Térmica*, Vol. 18, No. 2, p. 52-61, 2019.
- [7] U. K.Saha, S., Thotla, D. Maity, Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, No. 8-9, pp. 1359-1375, 2008.
- [8] M. H., Ali, Experimental Comparison Study for Savonius Wind Turbine of Two & Three Blades At Low Wind Speed, *International Journal of Modern Engineering Research*, Vol. 3, No. 6, pp. 2978-2986, 2013.
- [9] J. V. Akwa, A. V. Horacio, A. P. Petry, A review on the performance of Savonius wind turbines, *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 16, No. 5, pp. 3054-3064, 2012.
- [10] J. H. Lee, Y. T. Lee, H. C. Lim, Effect of twist angle on the performance of Savonius wind turbine, *Renewable Energy*, Vol. 89, pp. 231-244, 2016.
- [11] J. L.Menet, N. Bourabaa, Increase in the Savonius Rotors Efficiency via a parametric Investigation, *European Wind Energy Conference EWEA, Aerodynamics and Aeroacoustics*, pp.1-11, 2004.

بررسی عوامل موثر بر عملکرد توربین بادی ساونیوس

مسعود امین^{1*}، زهیر صبوچی²، حامد هاشمی مهنه³، کامبیز قائمی اسگوی⁴

1- دانشجوی دکترا، پژوهشگاه هوافضا، تهران، ایران

2- استادیار، پژوهشگاه هوافضا، تهران، ایران

3- دانشیار، پژوهشگاه هوافضا، تهران، ایران

4- استادیار، دانشکده فنی کاسپین، دانشگاه تهران، رضوانشهر، ایران

* تهران، کد پستی 1465774111، hashemimehne@gmail.com

چکیده

امروزه از میان منابع انرژی پاک، انرژی باد بیشتر مورد توجه قرار گرفته و ظرفیت نیروگاه‌های بادی دنیا در حال افزایش است. به ویژه، طراحی و ساخت توربین‌های بادی کوچک دستمایه بسیاری از تحقیقات بوده است. در این مقاله، به توربین بادی ساونیوس که یکی از انواع مورد توجه توربین‌های بادی محور عمودی است، پرداخته شده است. نخست، قواعد و اصول مکانیکی حاکم بر کارکرد این توربین شرح داده می‌شود. سپس معیارهای تعیین بازدهی و عملکرد این توربین مانند ضریب توان و ضریب گشتاور بیان می‌شود. در ادامه، عوامل هندسی و فنی موثر بر بازدهی آن مانند نسبت همپوشانی، تعداد پره‌ها، تعداد طبقات، قطر شفت، زاویه پیچش و نصب صفحات انتهایی نیز مطرح و اثر آنها بحث خواهد شد. مبنای این تحقیق مراجعی بوده که در تلاش برای بهبود عملکرد این نوع توربین بوده‌اند. همچنین، برخی طرح‌های خلاقانه که به منظور بهبود عملکرد توربین ساونیوس پیشنهاد شده با اشاره به نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی آنها عنوان شده‌است. چنین طرح‌هایی بیشینه‌ی ضریب توان را تا 38 درصد افزایش داده و در عین حال ساختار توربین را پیچیده‌تر می‌کنند. برخی از این طرح‌های نوآورانه نیز در پایان بررسی خواهد شد.

کلیدواژه‌گان: توربین باد، ساونیوس، نسبت همپوشانی، زاویه پیچش، عملکرد، ضریب توان

Investigating the factors affecting the performance of Savonius wind turbine

Masoud Amin^{1*}, Zoheir Saboohi¹, Hamed Hashemi Mehne¹, Kambiz Ghamemi Osgouie²

1- PhD Candidate, Aerospace Research Institute, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Aerospace Research Institute, Tehran, Iran

3- Associate Professor, Aerospace Research Institute, Tehran, Iran

4- Assistant Professor, Caspian Faculty of Engineering, University of Tehran, Rezvanshahr, Iran

* 1465774111 Tehran, Iran, hashemimehne@gmail.com

Received: 13 July 2022 Accepted: 28 December 2022

Abstract

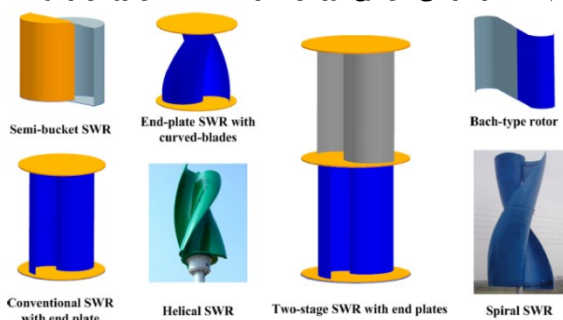
Nowadays, wind energy is considered one of the cleanest sources of energy, and the capacity of wind power plants is growing around the world. In particular, the design and construction of small wind turbines have been the subject of much research. This article deals with the Savonius wind turbine, a well-known vertical axis turbine. First, the mechanical principles of operation of this type of wind turbine are explained. Then, the criteria for determining its efficiency and performance, such as power and torque coefficients, are stated. The sequel discusses the geometric and technical factors affecting its efficiency. These factors include the overlap ratio, number of blades, number of stages, twist angle, shaft diameter, and the installation of end plates. The current paper can be helpful for those trying to improve the performance of this type of turbine. In this regard, there are some proposed innovative designs to enhance the performance of the Savonius turbine concerning experimental results and their numerical simulations. These designs increase the maximum power coefficient to 38%, although they complicate the turbine structure. Some of these innovative designs are also reviewed.

Keywords: Savonius wind turbine, Overlap ratio, Twist angle, Performance, Power coefficient

شکل 2 ظرفیت تولیدی نصب شده توسط شرکت‌های مختلف در جهان (سال 2018-2019) [1]

توربین‌های بادی از نظر ساختار به دو دسته‌ی محور افقی و محور عمودی تقسیم‌بندی می‌شوند که در نوع محور افقی، محور چرخش شفت که به مبدل الکتریکی متصل می‌شود، موازی خط افق و در نوع عمودی، عمود بر آن است. توربین‌های محور افقی از نظر بازدهی یعنی میزان جذب انرژی مکانیکی باد و تبدیل آن به گشتاور دورانی بر توربین‌های محور عمودی برتری دارند و به طور عمده توربین‌های بادی بزرگ از نوع محور افقی ساخته می‌شوند. با این حال، این توربین‌ها با جریان آرام سازگاری دارند و استفاده از این توربین‌ها مستلزم هم‌راستسازی محور توربین با جهت باد است. در توربین‌های محور عمودی که به طور عمده در مقیاس‌های کوچک استفاده می‌شوند، کارکرد توربین مستقل از جهت باد و پایداری جریان است و همچنین به دلیل نصب مبدل برق در نزدیکی سطح زمین هزینه تعمیر و نگهداری پایین‌تری نسبت به توربین‌های محور افقی دارند. این مزایا همراه با سرعت حرکت اولیه پایین‌تر، باعث توجه پژوهشگران به طراحی، ساخت و بهینه‌سازی توربین‌های محور عمودی شده است.

مجموعه توربین‌های محور عمودی خود به دو دسته‌ی داریوس که کارکرد آنها بر نیروی برآ استوار است و ساونیوس که کارکرد آنها به ویژه در آغاز حرکت مبتنی بر نیروی پسا است، تقسیم می‌شوند. توربین‌های ساونیوس که موضوع این مقاله هستند، بازدهی پایین‌تری نسبت به نوع داریوس دارند ولی دارای مزایایی از جمله طراحی ساده و ساخت ارزان، سرعت کارکرد نسبتاً پایین و گشتاور راه‌انداز اندک نسبت به داریوس هستند. در شکل 3 انواع توربین باد ساونیوس نشان‌دهنده شده است. گشتاور منفی زیاد و ضریب توان پایین باعث شده تحقیقات زیادی روی توربین‌های ساونیوس صورت گیرد تا بازدهی آن افزایش پیدا کند. تحلیل نسبت منظری، بررسی اثر تعداد پره‌ها، تغییر در شکل پره، چند طبقه‌ای کردن و افزودن دیواره از جمله این تلاش‌ها بوده است. از آنجا که تحقیقات منجر به افزایش کارایی توربین ساونیوس همچنان ادامه دارد، در این مقاله سعی شده ضمن معرفی عوامل موثر بر کارایی این نوع توربین‌ها، مروری بر تحقیقاتی که تاکنون صورت گرفته انجام دهیم تا مسیر طراحی این نوع توربین‌ها برای علاقه‌مندان روشن‌تر شود.



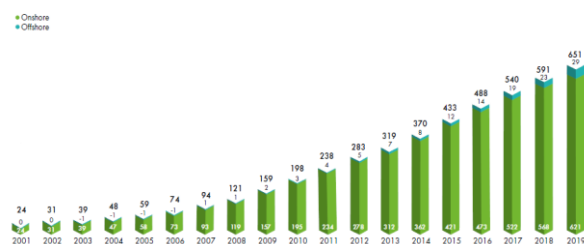
شکل 3 چند نمونه روتور توربین باد ساونیوس [4]

2- اصول کارکرد توربین ساونیوس

توربین ساونیوس در سال 1931 میلادی توسط معمار و مخترع فنلاندی زیگورد یوهانس ساونیوس ابداع شد. این توربین در ساده‌ترین شکل خود از دو نیم استوانه تشکیل شده است که در خلاف جهت هم با یک شفت به هم متصل شده‌اند. به طوری که اگر از بالا به آن نگاه کنیم، شکلی شبیه حرف S

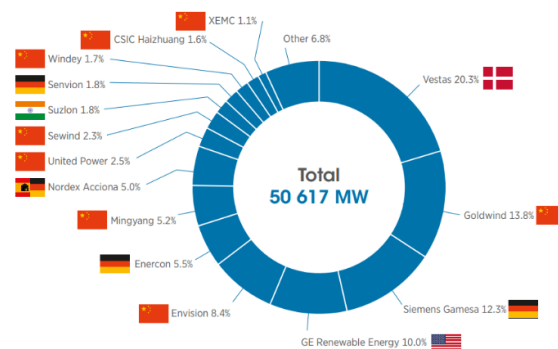
1- مقدمه

درده‌های اخیر به دلیل کاهش منابع فسیلی، ملاحظات محیط زیستی و توسعه پایدار و الزامات بین‌المللی مانند پیمان پاریس که تولید گازهای گلخانه‌ای را محدود کرده است، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مورد توجه بسیاری از کشورها قرار گرفته است. البته، توسعه فناوری و کاهش قیمت‌های تمام شده احداث نیروگاه‌های تجدیدپذیر نیز به این جایگزینی تدریجی سوخت‌های فسیلی با منابع پاک کمک کرده است. در این میان، انرژی باد یکی از مطلوب‌ترین منابع انرژی جهت تولید برق محسوب می‌شود. همان‌طور که در شکل 1 مشاهده می‌شود، براساس گزارش GWR2019 ظرفیت کل نیروگاه‌های بادی دنیا از 24 گیگاوات در سال 2001 به 651 گیگاوات در سال 2019 رسیده و روندی رو به رشد داشته به طوری که در دو سال پایانی 10٪ افزایش در کل ظرفیت و 19٪ رشد در ایجاد نیروگاه‌های جدید رخ داده است. با بررسی این نمودار و تحلیل بازار تولید انرژی تجدیدپذیر، پیش‌بینی می‌شود در سال‌های آتی نیز این روند صعودی ادامه یابد [1].



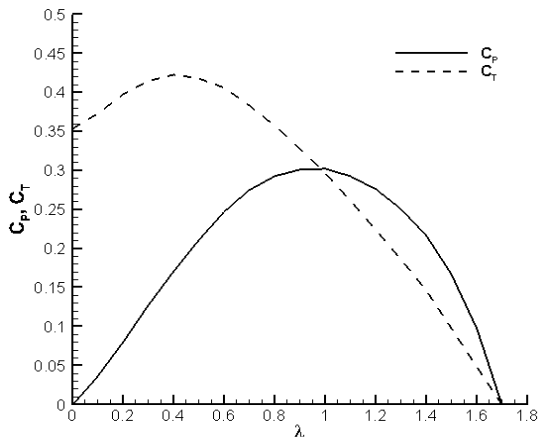
شکل 1 ظرفیت نیروگاه‌های بادی دنیا از سال 2001 تا سال 2019 [1]

در این میان چین، ایالات متحده آمریکا و آلمان به ترتیب رکورددار بیشترین ظرفیت نیروگاه‌های بادی هستند (شکل 2). در ایران بر اساس اطلس باد کشور، 18 هزار مگاوات انرژی قابل استحصال از باد تخمین زده شده است که در حال حاضر بخش کمی از آن در حدود 250 مگاوات بهره‌برداری می‌شود. لذا، در حوزه تولید برق از انرژی باد، ظرفیت استفاده نشده زیادی به ویژه در مناطق بادخیز مانند خراسان جنوبی و سیستان و بلوچستان وجود دارد که باید از آن استفاده کرد. به ویژه این که عمده تولید برق بادی در فصول گرم سال است که مصرف برق در کشور افزایش می‌یابد و این منابع می‌توانند بخش زیادی از این اضافه مصرف را پوشش دهند [3].

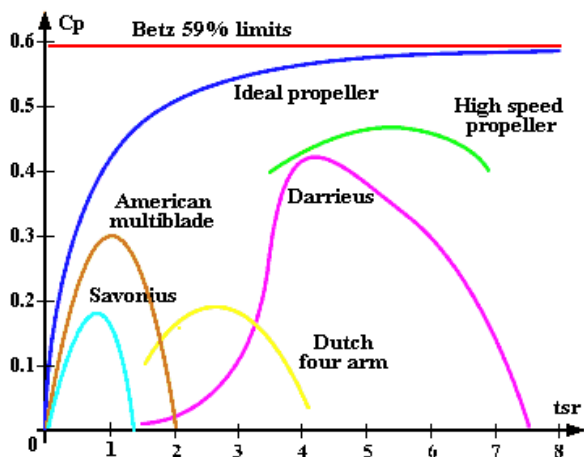


گشتاور توربین را می‌توان با استفاده از گشتاورسنج دوار در تونل باد یا به کمک شبیه‌سازی عددی به دست آورد. همانند ضریب توان، ضریب گشتاور نیز تابع سرعت باد است که به صورت تابعی از نسبت سرعت نوک پره نیز بیان می‌شود. به عنوان نمونه، نمودارهای ضریب توان و ضریب گشتاور یک توربین ساوننیوس در شکل 5 نشان داده شده است.

همان‌طور که در این تصویر مشاهده می‌شود، ضریب توان و ضریب گشتاور در ازای یک نسبت سرعت نوک پره به بیشینه مقدار خود می‌رسند. در بیشتر مقالات از ضریب توان به عنوان معیار سنجش عملکرد توربین استفاده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، بیشینه‌ی ضریب توان این توربین در ازای $\lambda = 1$ برابر 0.3 به دست آمده است. برای توربین‌های ساوننیوس بیشینه ضریب توان در حدود 0.25 تا 0.35 گزارش شده است. به همین دلیل، این توربین‌ها را دارای راندمان پایین می‌دانند و محققان همواره به دنبال راه‌کارهای بعضاً ابتکاری برای افزایش آن هستند. در شکل 6 مقایسه‌ای بین ضریب توان توربین باد ساوننیوس و سایر توربین‌ها آورده شده است.



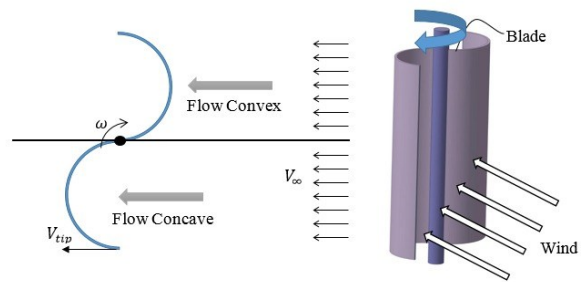
شکل 5 نمونه‌ای از منحنی‌های ضریب توان و ضریب گشتاور برای یک نمونه توربین ساوننیوس [6]



شکل 6 مقایسه ضریب توان توربین ساوننیوس با سایر توربین‌ها [7]

3- عوامل موثر بر بازدهی

لازمین خواهیم دید و به همین دلیل به آن روتور S نیز گفته می‌شود. به هر یک از این نیم استوانه‌ها یک پره گفته می‌شود. شکل 4 طرح‌واره‌ای از این توربین را نشان می‌دهد.



شکل 4 طرح‌واره‌ی توربین ساوننیوس

همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود، پره‌ی پایینی در جهت باد مقعر است و بخشی از باد وارد آن شده و نیروی پسا ایجاد می‌کند. به این پره، پره‌ی پس‌رونده گفته می‌شود چون نیروی پسا حاصل آن را دور می‌کند. پره‌ی بالایی که بخش محدب آن رو به جریان باد است و در حال نزدیک شدن است، پره‌ی بازگشتی نامیده می‌شود. چون سطح مقابل جریان پره‌ی بازگشتی کمتر از پره‌ی پس‌رونده است، نیروی پسا پایینی بیشتر از بالایی است و در نتیجه، گشتاوری حول محور توربین ایجاد شده و باعث چرخش پره‌ها در جهتی که مشخص شده، می‌شود. با فرض اینکه V سرعت باد، ρ چگالی هوا و A مساحت یک پره توربین باشد، آنگاه توان موجود و قابل استفاده برای این پره برابر است با:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1)$$

بدیهی است که تمام این توان توسط توربین قابل جذب و تبدیل به گشتاور دورانی نیست. لذا بهترین عامل برای تعیین کارایی توربین، نسبت توان استخراج شده توسط پره‌ی توربین به توان باد است. یعنی توان خروجی به توان ورودی:

$$C_p = \frac{P_t}{P_w} = \frac{P_t}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \quad (2)$$

این نسبت را ضریب توان توربین می‌نامند که تابعی از سرعت باد است. با این حال، معمولاً ضریب توان را برحسب نسبت سرعت نوک پره (TSR) بیان می‌کنند. این کمیت با تقسیم سرعت نوک پره (V_t) به سرعت باد تعریف می‌شود:

$$\lambda = \frac{V_t}{V} = \frac{\omega R}{V} \quad (3)$$

در اینجا، ω سرعت زاویه‌ای پره و R شعاع نیم دایره پره است. در نتیجه، نسبت فوق یک نسبت بی‌بعد است که حداکثر مقدار آن یک است چون سرعت پره نمی‌تواند از سرعت باد بیشتر باشد. یکی دیگر از عواملی که می‌تواند مبین عملکرد توربین بادی ساوننیوس باشد، ضریب گشتاور است که به صورت نسبت گشتاور توربین (T_t) به گشتاور باد (T) تعریف می‌شود [5]:

$$C_T = \frac{T_t}{T} = \frac{T_t}{\frac{1}{2} \rho V^2 A R} \quad (4)$$

بهرترین مقدار همپوشانی 0.242 به دست آمده که به بیشینه ضریب توان 0.33 منجر شده است. مطالعاتی نیز روی تاثیر نسبت همپوشانی مثبت و منفی به کمک شبیه‌سازی با نرم‌افزارهای تجاری و استفاده از معادلات نویر-استوکس با میانگین‌گیری رینولدز¹ و مدل توربولانس قابل تحقق $k-\epsilon$ صورت گرفته که بر اساس آن بهترین نسبت همپوشانی برای نوع متداول توربین ساونیوس، 0.15 به دست آمده است [10]. به عنوان یکی دیگر از مراجعی که به مطالعه‌ی تاثیر نسبت همپوشانی توربین ساونیوس بر عملکرد آن پرداخته، می‌توان به [11] اشاره کرد. در این تحقیق نوع متداول و یک نوع غیر متداول به نام توربین ساونیوس باخ به صورت عددی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و مقادیر بهینه نسبت همپوشانی برای این دو توربین به ترتیب 0.2 و 0.1 گزارش شده است.

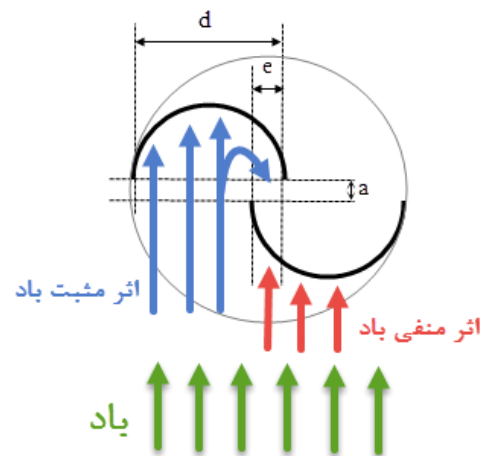
3-2- تعداد پره‌ها

شکل متداول توربین ساونیوس که در شکل (7) آمده‌است، دارای 2 پره است. تاکنون تحقیقاتی در خصوص افزودن تعداد پره‌ها و تاثیر آن بر بازدهی توربین صورت گرفته است. از جمله می‌توان به مرجع [8] اشاره کرد که توربین‌های با دو و سه پره را مورد تست تجربی قرار داده است. بر اساس نتایج این مرجع، بیشینه‌ی ضریب توان توربین 2 پره 1.5 برابر بیشینه ضریب توان نوع 3 پره بوده است. در نتیجه، از نظر عملکردی توربین 2 پره بر 3 پره ارجحیت دارد و تنها مزیت نوع 3 پره در این است که کمینه گشتاور استاتیکی آن بالاتر است. یکی دیگر از مراجعی که در آن بررسی تجربی تاثیر تعداد پره‌ها بر عملکرد توربین ساونیوس پرداخته شده است، مقاله‌ی [12] است. طبق گزارش این مقاله، یک نمونه کوچک شده‌ی توربین ساونیوس به طول 17 سانتی‌متر در فاصله 2 متری خروجی یک تونل باد قرار داده شده و در ازای باد با سرعت بین 6 تا 11 متر بر ثانیه، دور بر دقیقه و گشتاور استاتیکی و دینامیکی آن برآورد شده است. نتایج عملکرد توربین 2 و 3 پره در این تست نشان می‌دهد که عملکرد توربین با افزایش پره‌ها از 2 به 3 کاهش می‌یابد. دلیل این امر این است که بادی که یک پره را به عقب می‌راند، به پره‌ی بازگشتی در جهت خلاف حرکت نیرو وارد می‌کند و در حالت سه پره فاصله‌ی دو پره متوالی کمتر است و اختلاف نیروهای درگ نسبت به حالت 2 پره کمتر می‌شود. در شکل 8 نمودار ضریب توان توربین‌های 2 و 3 پره در سرعت باد مختلف با هم مقایسه شده و برتری توربین 2 پره مشهود است. بیشینه‌ی ضریب توان نوع 2 پره برابر 0.289 در سرعت باد 7.31 متر بر ثانیه حاصل شده در حالی که بیشینه‌ی ضریب توان نوع سه پره تقریباً 9 درصد کمتر و برابر 0.262 در سرعت باد 7.4 متر بر ثانیه به دست آمده است.

در این بخش با عوامل هندسی و ساختاری موثر بر عملکرد و بازدهی توربین ساونیوس آشنا می‌شویم و میزان این تاثیرات را بر اساس مراجع بررسی می‌کنیم.

3-1- نسبت همپوشانی

مطابق شکل 7، فاصله افقی و عمودی بین دو نوک پره نسبت به هم به ترتیب گپ همپوشانی اولیه (e) و ثانویه (a) نامیده می‌شوند. تحقیقات نشان داده است که نسبت گپ همپوشانی یعنی $\frac{e}{d}$ تاثیر زیادی بر عملکرد توربین دارد. در واقع این گپ همان‌طور که در شکل 7 دیده می‌شود، باعث انتقال بخشی از باد به پشت پره‌ی بازگشتی شده و اثر منفی باد در سمت دیگر این پره را کاهش می‌دهد. یکی از اولین تحقیقات در این زمینه در مرجع [8] گزارش شده است. در این مرجع، دو توربین ساونیوس دو و سه پره ساده با صفحات انتهایی مورد تست تجربی در تونل باد قرار گرفتند. توربین‌ها در ازای نسبت همپوشانی اولیه‌ی 0، 0.1، 0.15 و 0.2 آزمایش شده و نمودارهای ضریب توان و ضریب گشتاور برآورد شدند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در حالت دو پره، بهترین مقدار ضریب توان برای نسبت گپ همپوشانی بین 0.1 و 0.15 به دست می‌آید و در مقدار بیشینه منحنی ضریب توان، تاثیر نسبت گپ همپوشانی 9 درصد است.



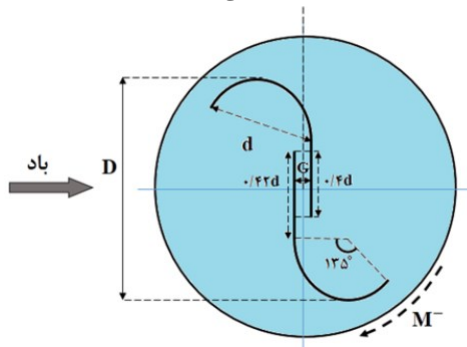
شکل 7 هندسه توربین ساونیوس ساده با همپوشانی‌های اولیه و ثانویه

مرجع [9] نیز به بحث تاثیر نسبت همپوشانی پره بر متوسط گشتاور و ضریب توان پرداخته است. در این مقاله، معادلات دیفرانسیل حاکم بر مسئله شامل معادلات نویر-استوکس میانگین‌گیری شده‌ی رینولدز و پیوستگی با لحاظ کردن مدل آشفتگی انتقال تنش برشی $k-\epsilon$ به کمک نرم‌افزارهای تجاری دینامیک سیالات محاسباتی به صورت عددی حل شده و در نهایت متوسط ضریب گشتاور و ضریب توان در ازای ضرایب همپوشانی مختلف بین 0 تا 0.6 به دست آمده است. بر اساس نتایج این مقاله که با نتایج تجربی [8] نیز سازگار است، بهترین مقدار ضریب همپوشانی 0.15 برآورد شده است. همچنین بیشینه ضریب توان 0.3161 در نسبت سرعت نوک پره 0.125 حاصل شده است.

در مقاله‌ی [6] نیز یک توربین ساونیوس دو طبقه مورد ارزیابی عملکرد قرار گرفته است که یکی از عوامل بررسی، نسبت همپوشانی بوده است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی عددی دو بعدی که برای این توربین انجام شده،

1. Reynolds-averaged Navier-Stocks (RANS)

دست آمده روندی صعودی دارد و بالاترین بازدهی برای نسبت منظری 5 گزارش شده است. در مرجع [11] با استفاده از شبیه‌سازی عددی، به بررسی تاثیر همپوشانی داخلی بر عملکرد توربین بادی محور عمودی دو پره ساوننیوس با دو نوع روتور از نوع متعارف و باخ (شکل 9) پرداخته شده است. به این منظور مشخصه‌های توان توربین بادی در محدوده نسبت سرعت نوک پره از 0/2 تا 1/2 و سرعت باد 3، 5 و 7 متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. رفتار لحظه‌ای جریان و داده‌های متوسط زمانی برای دو روتور مورد نظر یعنی نوع متعارف و نوع باخ ارائه شده است. نتایج به‌دست آمده از تحقیق محققان نشان می‌دهد که به ازای کلیه مقادیر سرعت نوک پره و سرعت باد، مقدار بهینه همپوشانی به ترتیب برای روتورهای نوع متعارف و نوع باخ برابر 0/2 و 0/1 است. از طرفی، حداکثر ضریب توان روتور متعارف و باخ، بدون توجه به مقدار سرعت باد و نسبت همپوشانی، به ترتیب در نسبت سرعت نوک پره 0/8 و 0/7 حاصل می‌شود. در نهایت، مشخص شد که به ازای هر مقدار نسبت سرعت نوک پره و نسبت همپوشانی در هر دو نوع روتور، مقدار ضریب توان با افزایش سرعت باد افزایش می‌یابد.



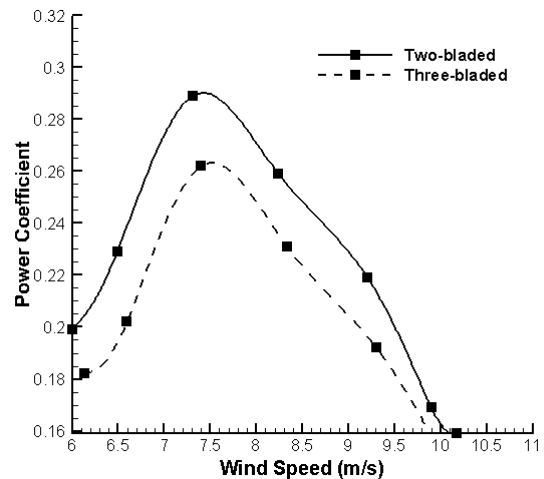
شکل 9 شماتیک توربین بادی ساوننیوس مدل باخ [11]

3-4- قطر شفت

یکی از پارامترهای مورد مطالعه در منابع، قطر شفت توربین بوده است. در نوع متداول شفت به صورت مرکزی است ولی طرح‌هایی نیز وجود دارد که در آنها شفت توربین به صورت بیرونی است. در حالت متداول که شفت مرکزی وجود دارد، قطر آن دارای اهمیت است چون می‌تواند باعث انسداد جریان درون روتور شود. در مطالعاتی که بر اساس شبیه‌سازی دو بعدی در [6] انجام شده، برای یک توربین دو طبقه، مقدار بهینه‌ی قطر شفت برابر یک پنجم همپوشانی بهینه تخمین زده شده است.

3-5- تعداد طبقات

یکی از راه‌کارهای افزایش بازدهی توربین ساوننیوس افزایش تعداد طبقات است. بدین معنی که مثلاً در حالت دو طبقه، دوتوربین ساوننیوس در راستای محوری مشترک روی هم قرار می‌گیرند. به عنوان نمونه در شکل 10 طرح دو توربین دو طبقه و سه طبقه نشان داده شده است. هم‌افزایی جذب و تبدیل انرژی این طبقات متأثر از زوایای مختلف پره‌های هر طبقه نسبت به یکدیگر است. به گونه‌ای که مثلاً وقتی پره‌ی طبقه‌ی بالایی پشت به باد است، پره طبقه پایین رو به باد قرار می‌گیرد.

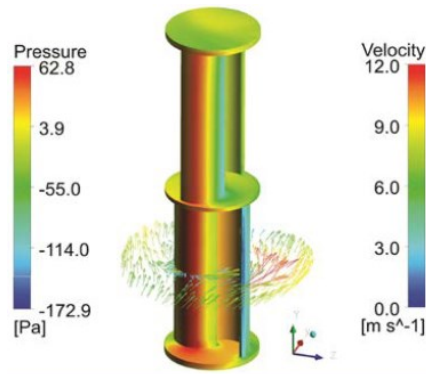


شکل 8 مقایسه‌ی ضریب توان دو توربین ساوننیوس 2 و 3 پره [12]

در مقاله [5] نیز به مطالعه‌ی تاثیر تعداد پره‌ها بر عملکرد توربین با رویکرد تجربی پرداخته اند. براساس گزارش این مقاله، توربین ساوننیوس دو و سه پره‌ی هم اندازه با صفحه‌های انتهایی، به کمک یک تونل باد مادون صوت برای باد با سرعت 2 تا 6 متر بر ثانیه ارزیابی شده‌اند. نتایج این آزمون حاکی از کاهش 19 درصدی بیشینه ضریب توان توربین سه پره نسبت به توربین دو پره است و نتایج سایر مراجع را تایید می‌کند.

3-3- نسبت منظری

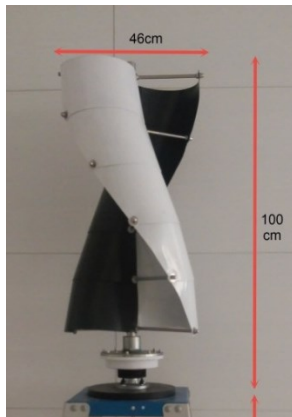
نسبت منظری توربین که با تقسیم ارتفاع روتور توربین (H) به قطر روتور (D = 2d - e) تعریف می‌شود، یکی از عوامل هندسی در بازدهی آن است. از جمله نخستین مطالعات تجربی تاثیر این نسبت می‌توان به نتایج مندرج در [8] اشاره کرد که دو توربین با ارتفاع 1 و 1.5 متر و قطر یکسان 0.5 متر و سایر شرایط مشابه به کمک تونل باد ارزیابی شده‌اند. ضریب توان در حالتی که ارتفاع 1.5 متر بوده، یعنی نسبت منظری 3 نسبت به حالت دیگر که در آن نسبت منظری 2 بوده، حدود 8 درصد افزایش در بیشینه ضریب توان و حدود 10 درصد افزایش در ضریب گشتاور در محدوده $\lambda = 1$ داشته است. البته، در این مقایسه سطح تصویر شده (HD) متغیر بوده است و لازم است در بررسی اثر نسبت منظری، مساحت تصویر شده‌ی روتور برای نسبت‌های مختلف ثابت باشد. این کار در مرجع [13] انجام شده است و یک توربین ساوننیوس متداول دو پره‌ای در ازای نسبت‌های منظری 0.55، 0.48، 0.64، 0.77 و 0.99 در تونل باد و در ازای تمام شرایط یکسان از جمله مساحت تصویر شده ارزیابی شده است. بر اساس نتایج این مرجع، بهترین نمودار ضریب توان در ازای نسبت منظری 0.77 به دست آمده است که بیشینه ضریب توان آن 14 درصد بیشتر از توربین‌های با نسبت منظری 0.48 و 0.55 بوده است. این نتیجه تقریباً با نتیجه مرجع [14] که بررسی اثر نسبت منظری را برای مقادیر بین 0.6 تا 1.0 به صورت تجربی مطالعه کرده و به مقدار بهینه 0.7 رسیده است، تایید می‌شود. البته باید توجه داشت که در این مراجع نسبت‌های بیشتر از 1 ارزیابی نشده‌اند. مرجع [15] اما به نسبت‌های منظری بالاتر از 1 در مساحت تصویر شده‌ی یکسان (برابر واحد) پرداخته و نتیجه گرفته که برای نسبت‌های منظری 0.5 تا 5 ضریب توان به



شکل 11 نمونه‌ای از نتایج شبیه‌سازی عددی توربین ساونیوس دو طبقه [18]

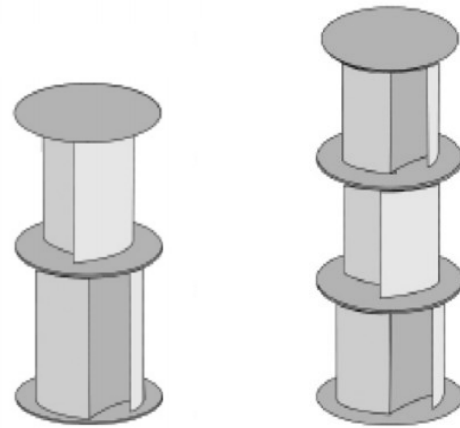
3-6- پیچش پره‌ها

نوع پره پیچیده در واقع تعمیم توربین‌های دو طبقه است. در توربین دو طبقه همان‌طور که دیدیم، دو روتور با زاویه 90 درجه روی هم نصب می‌شوند تا زمانی که یکی پشت به باد است، دیگری رو به باد واقع شود و بدین ترتیب گشتاور دورانی افزایش یابد. این تغییر زاویه در توربین پیچشی بر خلاف دو طبقه، به صورت پیوسته صورت گرفته است. در شکل 12 نمونه‌ای از توربین ساونیوس پیچشی دو پره که در پژوهشگاه هوافضا ساخته شده مشاهده می‌شود. زاویه پیچش این توربین 135 درجه است.



شکل 12 توربین ساونیوس پیچشی پژوهشگاه هوافضا

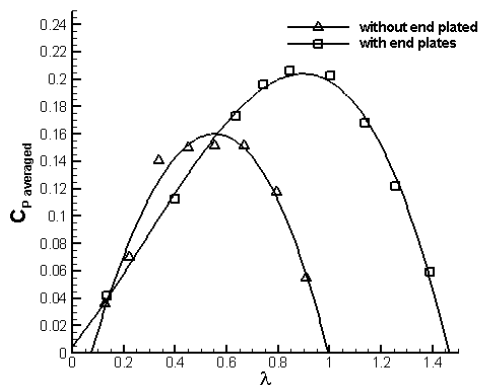
مهم‌ترین عامل هندسی در توربین‌های پیچشی، زاویه دوران مقطع یک پره از بالا تا پایین است که بر شکل و عملکرد آن تاثیر دارد. در شکل 12 چهار توربین با زوایای پیچش 0 درجه، 45 درجه، 90 درجه و 135 درجه نشان داده شده است. اگر از بالا و در راستای محور توربین به آن نگاه کنیم، خطوط پیوسته بالای پره و خطوط نقطه چین پایین پره را نشان می‌دهند که زاویه پیچش در واقع زاویه بین این خطوط است.



شکل 10 نمونه توربین ساونیوس دو طبقه (سمت چپ) و سه طبقه (سمت راست)

اثر تعداد طبقات در مرجع [12] بررسی شده و توربین‌های 1، 2 و 3 طبقه از نظر بازدهی در تونل باد ارزیابی شده‌اند. در این تحقیق مساحت تصویر شده و نسبت منطری هر سه توربین و سایر مشخصات به جز تعداد طبقات یکسان در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که توربین دو طبقه بازدهی بالاتری نسبت به توربین یک طبقه دارد ولی وقتی تعداد طبقات به سه افزایش می‌یابد با افت ضریب توان مواجه می‌شویم زیرا جرم اینرسی توربین اضافه می‌شود. بیشینه ضریب توان برای توربین با دو پره و یک طبقه، 0.18، برای توربین دو طبقه، 0.29 و برای سه طبقه، 0.22 حاصل شده است. سایر حالت‌ها از جمله پره‌های پیچیده نیز حاکی از بهینه بودن توربین دو طبقه است. تحقیق دیگری نیز روی توربین دو طبقه به کمک شبیه‌سازی با نرم‌افزار تجاری اکس-فلو¹ همراه با آزمون تجربی صورت گرفته که نتایج آن در [16] منتشر شده است.

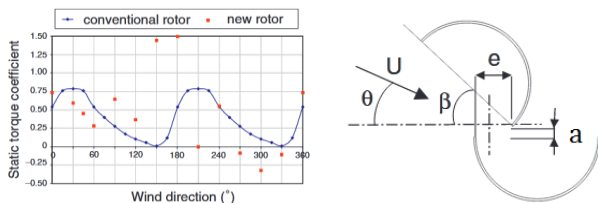
در مرجع [17] نیز یک توربین ساونیوس دو طبقه که هر طبقه‌ی آن دارای 2 پره بدون صفحه‌های انتهایی است، به طور تجربی تحلیل شده است. نمونه توربین در یک تونل باد حلقه باز زیر صوت قرار داده شده و ضرایب توان و گشتاور به منظور بررسی اثر نسبت همپوشانی اندازه‌گیری شده است. از جمله شبیه‌سازی‌های عددی روی توربین‌های دو طبقه می‌توان به [18] اشاره کرد که در آن معادلات RANS همراه با مدل توربولانس $k-\omega$ روش حجم متناهی حل شده و بیشینه ضریب توان به کمک آن محاسبه شده است. شکل 11 بردار سرعت و میدان فشار روی سطح توربین را برای یکی از نمونه‌های شبیه‌سازی شده در این تحقیق نشان می‌دهد.



شکل 14 تاثیر صفحه انتهایی بر ضریب توان [21]

3-8- روتور ساوننیوس اصلاح شده

روتور معمولی ساوننیوس از دو نیم سیلندر عمودی حول یک محور عمودی تشکیل می‌شود. برخی از محققان شکل دیگری از توربین ساوننیوس را تحت عنوان روتور اصلاح شده ساوننیوس پیشنهاد کرده‌اند. همان‌طور که در شکل 15 نشان داده شده، این روتور با بهینه‌سازی سه پارامتر هندسی همپوشانی اولیه e ، همپوشانی ثانویه a و زاویه بین پره‌ها β اصلاح شده است. منحنی مشخصه این روتور (مقادیر ضریب گشتاور سکون C_m در مقابل زاویه باد) در شکل 15 رسم شده است. در مقایسه بیشینه گشتاور سکون این روتور با روتور معمولی ساوننیوس، افزایش قابل توجهی مشاهده شده و این مقایسه، نتایج نسبتاً دلگرم‌کننده‌ای به دست می‌دهد. با این همه، گشتاورهای کم و گاهی منفی به ازای زاویه‌های متعدد، در این روتور نیز مشاهده می‌شود. در مجموع، مقدار متوسط گشتاور حدود 62٪ نسبت به روتور معمولی افزایش یافته است. لذا، نیاز به مطالعات بیشتر به منظور بهبود تجزیه و تحلیل این روتور احساس می‌شود [22].



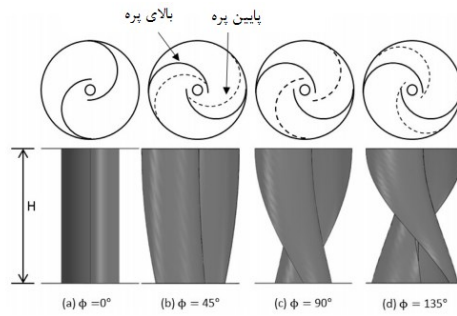
شکل 15- توربین ساوننیوس اصلاح شده (راست) و گشتاور استاتیکی توربین اصلاح شده (چپ) [22]

4- طرح‌های غیرمتداول

علاوه بر بهینه‌سازی‌ها و تغییرات جزئی که در بخش قبل مرور شد، ایده‌های دیگری نیز برای بهبود عملکرد توربین ساوننیوس ارائه شده است که ضمن ایجاد تغییرات کلی آنها را از حالت متداول خارج ساخته است. تعدادی از این نسخه‌های غیرمتداول توربین ساوننیوس در این بخش معرفی می‌شوند.

4-1- پروفایل پره

یکی از عواملی که برای افزایش بازدهی توربین ساوننیوس مورد توجه پژوهشگران بوده، پروفایل یا مقطع پره توربین بوده است. همان‌طور که در ابتدا اشاره شد ساوننیوس متداول دارای پره‌هایی نیم‌دایره است. با این حال

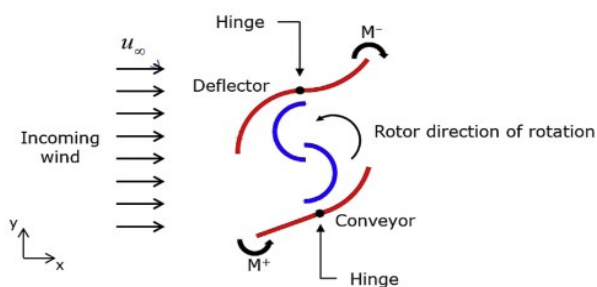


شکل 13 توربین‌های پیچشی با زوایای پیچش مختلف [19]

تاثیر زاویه پیچش روی عملکرد توربین در [19] بررسی شده است. علاوه بر تحلیل عددی، مدل توربین با چهار زاویه پیچش بین 0 و 135 درجه در تونل باد تست شده است. نتایج این تست نشان می‌دهد زاویه پیچش باعث گردش بهتر جریان هوا شده و بازدهی را افزایش می‌دهد. بهترین ضریب توان در زاویه پیچش 45 درجه به دست آمده است. زوایای پیچش 0 و 135 مقادیر ضریب توان کمتری نسبت به توربین بدون پیچش ولی با بیشینه ضریب توان یکسان داشتند. در مرجع [20] نیز یک توربین کوچک با پره‌های پیچیده به کمک نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی فلوئنت تحلیل شده است. بر اساس نتایج، این توربین در نسبت سرعت نوک پره 0.45 به بیشینه ضریب توان 0.17 رسیده است. توان خروجی الکتریکی توربین نیز به کمک یک موتور الکتریکی که با توربین کوپل شده حداکثر 50 وات را در سرعت باد 11 متر بر ثانیه نشان می‌دهد.

3-7- نصب صفحه در انتهای بالا و پایین

نصب صفحه‌های انتهایی ساده‌ترین روش افزایش کارایی توربین ساوننیوس است. همان‌گونه که در شکل 14 مشخص است، متوسط بیشترین ضریب توان با نصب صفحه در انتها، به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. توربین نیز با کارایی بیشتر و با نسبت سرعت نوک بالاتری کار می‌کند. نصب این صفحه‌ها، امکان گریز سیال از قسمت انتهایی بالا و پایین بخش مقعر پره را از بین برده و اختلاف فشار بین بخش‌های مقعر و محدب پره را در سطح قابل قبولی نگه می‌دارد. نکته جالب در مورد این صفحه این است که اکثر محققین نظر یکسانی در مورد ابعاد بهینه این صفحه‌ها دارند. به نظر این محققین، شعاع این صفحه باید 1.1 برابر شعاع توربین بوده و همچنین ضخامت بسیار کمی در مقایسه با ارتفاع توربین داشته باشد، زیرا در غیر این صورت اینرسی توربین به صورت نامطلوبی بالا می‌رود [21].



شکل 17 توربین مجهز به سیستم پرده [27]

یکی از ویژگی‌های این سیستم قابلیت خود تنظیمی آن با جهت باد است. شبیه‌سازی عددی و نتایج تست تونل باد نشان می‌دهد که توربین دارای سیستم پرده دارای ضریب توانی حدود 24 درصد بیشتر از توربین متداول مشابه است. علاوه بر این، بیشینه ضریب توان که در توربین متداول در ازای نرخ سرعت نوک حدود 0.8 به دست آمده در سیستم دارای پرده به نرخ سرعت نوک حدود 0.7 منتقل شده است که نشان می‌دهد این سیستم عملکرد توربین را برای بادهای با سرعت کم بهبود داده است.

یکی دیگر از منابعی که در آن افزودن صفحه‌های هدایت کننده در جلوی توربین را بررسی کرده، مرجع [28] است. در این تحقیق که بر مبنای شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی صورت پذیرفته، اندازه و موقعیت بهینه قرارگیری این صفحات نیز تعیین شده که در نهایت به 38 درصد افزایش ضریب توان و بهبود گشتاور استاتیکی و در نتیجه وضعیت شروع به حرکت بهتر توربین منجر شده است.

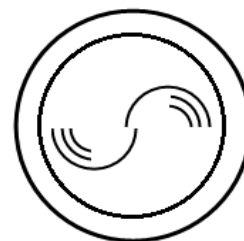
3-4- پره‌های راهنما

استفاده از پره‌های راهنما روشی مناسب برای بهبود عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی ساونیوس است (شکل 18). پره‌های راهنما انرژی جریان باد اطراف توربین را جمع‌آوری و به سمت قسمت مقعر روتور هدایت می‌کنند که موجب افزایش ضریب توان توربین می‌شود. در مرجع [29] به بررسی طرح‌های پیشنهادی با 4، 5 و 6 پره راهنما پرداخته است که در هر کدام از آنها، پره‌ها در زوایای 30، 40، 50 و 60 درجه قرار گرفته‌اند. نتایج عددی ضرایب توان و گشتاور نشان دهنده‌ی این است که پره‌های راهنما، باعث بهبود قابل توجه عملکرد توربین ساونیوس می‌شوند. برای توربین دارای 5 پره راهنما در زاویه‌ی قرارگیری 30 درجه، بیشینه ضریب توان 0/51 است که حاکی از افزایش 183 درصدی در مقایسه با توربین بدون پره‌ی راهنماست. بیشینه ضرایب توان برای توربین با تعداد پره‌های راهنمای 4 و 6 به ترتیب 0/42 و 0/49 است که در مقایسه با توربین ساونیوس بدون پره‌های راهنما به ترتیب به مقدار 133 و 172 درصد افزایش یافته‌اند. همچنین با افزایش تعداد پره‌های راهنما به بیش از 5، جریان باد کمتری به پره‌های توربین منتقل می‌شود و در واقع پره‌های راهنما موجب انسداد مسیر جریان در رسیدن به پره‌های توربین می‌شوند. بنابراین، به طور خلاصه می‌توان در بررسی جریان باد در اطراف روتور و پره‌های راهنما نشان داد که دو پدیده‌ی مهم در بهبود عملکرد توربین اثرگذار است: 1- پره‌های راهنما جریان اطراف روتور را جمع‌آوری و به سمت قسمت مقعر روتور

مطالعاتی روی شکل مقطع پره و تاثیر آن بر بازدهی صورت گرفته است. از این میان، می‌توان به [23] اشاره کرد که در آن رویکردی بر مبنای بهینه‌سازی پیشنهاد شده است. در این مرجع، پروفایل پره به کمک چندجمله‌ای‌های درجه 3، 4 و 5 پارامتری شده و ضریب توان برای هر پره به کمک شبیه‌سازی با نرم‌افزار دینامیک محاسباتی کامسول¹ محاسبه شده است. نتایج حاکی از بالاتر بودن عملکرد پروفایل درجه 5 و رسیدن به بیشینه ضریب توان 0.34 بوده که نسبت به پره‌ی نیم‌دایره‌ای، 47 درصد بهبود دارد. یکی دیگر از طرح‌های پروفایل پره که بازدهی بالاتری نسبت به پره متداول ساونیوس دارد و تقعر آن نیز کمتر است، به پره‌ی پیشرفته معروف است و کارهای تجربی و عددی روی آن در مراجع [24] و [25] انجام شده است. طبق نتایج [24]، ضریب گشتاور استاتیکی پره پیشرفته 11 درصد بیشتر از پره‌ی متداول است.

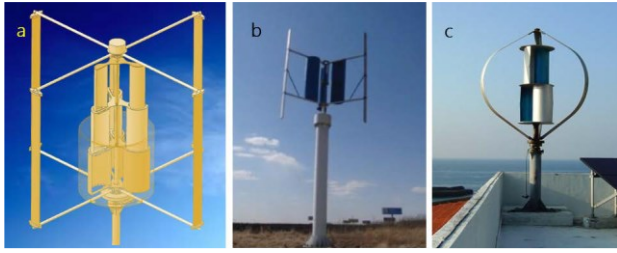
2-4- افزونه‌ها

یک دسته دیگر از بهبودهایی که روی توربین ساونیوس انجام شده است، افزودن بخش‌های اضافی به منظور جریان بهتر هوا و افزایش قابلیت استخراج گشتاور مکانیکی از باد بوده است. به عنوان مثال، توربین ابداعی مرجع [26] حاصل افزودن چهار پره‌ی یک چهارم به توربین متداول است که نمای بالایی آن را در شکل 16 مشاهده می‌کنید.



شکل 16 نمای بالایی توربین پیشنهادی [26]

بر اساس نتایج شبیه‌سازی صورت گرفته در این مرجع، بازدهی توربین جدید در بادهای مختلف، بین 8.9 تا 13.7 درصد نسبت به مدل متداول بیشتر است. یکی دیگر از طرح‌های ابتکاری، سیستم پرده است که در شکل 17 نمایش داده شده است. در این سیستم دو پرده منحرف کننده و حمل کننده در دو طرف توربین نصب می‌شوند که هر یک به کمک یک لولا قابلیت گردش دارند. پرده‌ی حمل کننده که در سمت پره‌ی پس‌رونده نصب شده، باعث هدایت بهتر جریان باد به سمت پره می‌شود. در حالی که پرده‌ی منحرف کننده که در سمت پره‌ی بازگشتی است، سبب کاهش فشار دینامیکی روی این پره شده و در کل گشتاور دورانی بیشتری را موجب می‌شوند.



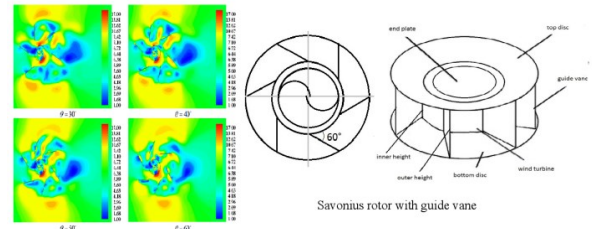
شکل 19 توربین‌های هیبریدی [34]

تاکنون پژوهش‌هایی جهت بهبود عملکرد توربین ساونوس-داریوس انجام پذیرفته است. گوپتا و همکاران عملکرد توربین ترکیبی باد و پره ساونوس و سه پره داریوس را برای حالات متفاوت نسبت همپوشانی توربین ساونوس با مقادیر بین 16/2 تا 25 درصد، در یک تونل باد مدار باز فروصوت، مورد مطالعه قرار دادند. آنها بیشترین ضریب توان را به مقدار 0/25 در نسبت همپوشانی 20 درصد گزارش دادند [31]. مجدداً گوپتا و همکاران، یک توربین سه پره ساونوس را با یک توربین ترکیبی با سه پره ساونوس و سه پره داریوس، برای حالات بدون همپوشانی و با همپوشانی با نسبت‌های 16/2، 20، 25، 30 و 35 در تونل باد مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. آنها نشان دادند که بیشترین ضریب توان توربین ترکیبی مربوط به حالت بدون همپوشانی است و برای توربین ساونوس برای نسبت همپوشانی 20 درصد اتفاق می‌افتد. همچنین بیشترین توان توربین ترکیبی، بیشتر از توربین ساونوس است و مقدار آن 0/51 است [32]. بویان و همکاران، یک توربین داریوس سه پره از نوع مستقیم را با توربین ساونوس به عنوان استارت ترکیب کرده و برای افزایش عملکرد توان توربین ترکیبی، آزمایش‌ها را در اعداد رینولدز متفاوت و همچنین 5 حالت همپوشانی متفاوت برای توربین ساونوس در تونل باد انجام دادند. آنها در بین تمام مدل‌ها بیشینه ضریب توان توربین ترکیبی به مقدار 0/34 و برای حالت بهینه همپوشانی با مقدار 0/15 بدست آوردند و نتیجه گرفتند که توربین ترکیبی بهینه شده دارای عملکرد توان بهتری نسبت به سایر مدل‌های توربین عمودی است [33]. همچنین در مرجع [34] با ترکیب مدلی شامل 3 پره داریوس از نوع مستقیم و دو پره ساونوس، به منظور بهبود عملکرد یک توربین باد ترکیبی ساونوس-داریوس معرفی شده است. مطابق با نتایج بدست آمده ترکیب توربین داریوس و ساونوس تأثیر مطلوبی بر راه‌اندازی خودکار و یکنواخت کردن منحنی عملکرد توربین داشته است. همچنین نتایج نشان داده است که صلبیت 0/75 برای ایرفویل و زاویه 150 درجه برای کمان پره‌ی ساونوس، حالت‌های بهینه شده از نظر بیشینه توان، گشتاور راه‌اندازی و محدوده عملکرد هستند [34].

5- نتیجه گیری

در این مقاله به توربین محور عمودی ساونوس و اصول کارکرد آن و کمیت‌های اندازه‌گیری عملکرد آن پرداخته شد. سپس عوامل هندسی تأثیرگذار بر عملکرد توربین مانند نسبت همپوشانی، نسبت منظری، تعداد پره‌ها و پیچش آنها از رهگذر بررسی منابع مطالعه شد. همچنین مهم‌ترین طرح‌های خلاقانه‌ای که به منظور افزایش کارایی توربین ساونوس ارائه شده‌اند، مرور شد. این ابداعات و بهبودها گرچه در بهترین حالت تا 38 درصد بیشینه ضریب توان را بهبود می‌بخشند ولی به دلیل ایجاد پیچیدگی ساختاری، ماهیت ساده‌ی توربین

هدایت می‌کنند، 2- پره‌های راهنما از میزان برخورد جریان باد به قسمت محدب روتور می‌کاهند.



شکل 18 کانتور سرعت در زوایای مختلف موقعیت قرارگیری پره‌های یک توربین ساونوس شش پره [29]

4-4- توربین‌های هیبریدی (داریوس-ساونوس)

توربین داریوس با وجود بازده بالاتر نسبت به ساونوس، با مشکل اساسی راه‌اندازی خودکار رو به رو است. یکی از موثرترین روش‌ها، ترکیب توربین باد داریوس با ساونوس در قالب یک توربین باد برای استفاده از مزیت‌های منحصر به فرد هر کدام است. از این رو، مدل ترکیبی می‌تواند همزمان از گشتاور راه‌اندازی بالای توربین ساونوس و ضریب توان بالای توربین داریوس بهره‌برد. به طور کلی، در سرعت باد کمتر از 3 متر بر ثانیه توربین ترکیبی ویژگی‌های روتور ساونوس را نشان می‌دهد، درحالی که در بادهای شدیدتر (بزرگ‌تر از 4 متر بر ثانیه) توربین ترکیبی مانند روتور داریوس معمولی رفتار می‌کند. دو پیکربندی عمده برای ترکیب یک روتور ساونوس و داریوس امکان‌پذیر است. روتور ساونوس را می‌توان در بالا یا زیر روتور داریوس قرار داد یا می‌توان در داخل روتور داریوس قرار داد. قرارگرفتن روتور ساونوس در خارج از روتور داریوس باعث افزایش طول محور چرخان می‌شود که به نوبه خود منجر به ارتعاش خواهد شد. از این رو، راه عملی قراردادن روتور ساونوس در داخل روتور داریوس است. هدف بیشتر مطالعات بهینه‌سازی، تعیین قطر روتور ساونوس برای حداکثر عملکرد در باد کم و حفظ ضریب توان روتور داریوس در بادهای شدید با به حداقل رساندن اثر روتور ساونوس است. نتایج نشان می‌دهد که گشتاور راه‌اندازی توربین ترکیبی بسیار بالاتر از روتور داریوس است، درحالی که بیشینه ضریب توان در نسبت سرعت نوک پایین‌تر به دست می‌آید. حداکثر نسبت سرعت نوک عملیاتی برای توربین‌های ترکیبی 1 تا 1.2 است. لازم به ذکر است که حداکثر نسبت سرعت نوک برای روتور ساونوس 1 است و هر تلاشی برای عملکرد فراتر از $\lambda = 1$ ، باعث ایجاد گشتاور منفی می‌شود. در حالی که روتور داریوس در نسبت سرعت نوک، 3 تا 6 کار می‌کند. این عدم تطابق بین حداکثر عملکرد دو روتور یک مشکل اساسی است که توسعه بیشتر این توربین‌های هیبریدی را محدود می‌کند. راه‌حل‌های بالقوه برای رسیدگی به مشکلات فوق مرتبط با ادغام روتورهای داریوس و ساونوس همان‌طور که در شکل 19 نشان داده شده است، پیشنهاد شده‌اند. یکی راه‌کار این است که هرگاه روتور داریوس فراتر از $\lambda = 1$ شتاب گرفت، روتور ساونوس را از آن جدا کرد. اگر چه این راه‌حل از نظر فنی امکان‌پذیر است، اما انرژی جذب شده توسط روتور ساونوس پس از جداسازی به کل انرژی خروجی کمک نمی‌کند و موج تولید شده توسط روتور ساونوس هنوز وجود دارد. استراتژی امیدوارکننده برای حذف اثر منفی روتور ساونوس، این روتور هیبریدی را به عنوان یک راه‌حل بالقوه برای عملیات با سرعت کم باد معرفی می‌کند [30].

- [12] U. K. Saha, S., Thotla, D. Maity, Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, No. 8-9, pp. 1359-1375, 2008.
- [13] N. J., Roth, *A Prototype Design and Performance of the Savonius Rotor Based Irrigation System*, MSc Thesis, University of British Columbia, 1982.
- [14] M. A. Kamoji, S. B. Kedare, S. V. Prabhu, Experimental investigations on single stage modified Savonius rotor, *Applied Energy*, Vol. 86, pp. 1064-1073, 2009.
- [15] N. H. Mahmoud, A. A. El-Haroun, E. Wahba, M. H. Nasef, An experimental study on improvement of Savonius rotor performance, *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 51, pp. 19-25, 2012.
- [16] P. Chaisiriroj, N. Tinnachote, S. Usajantragul, T. Leephakpreeda, Experimental Performance Investigation of Optimal Vertical Axis Wind Turbines under Actual Wind Conditions in Thailand, *Energy Procedia*, Vol. 138, pp. 651-656, 2017.
- [17] K. K. Sharma, R. Gupta, A. Biswas, Performance Measurement of a Two-Stage Two-Bladed Savonius Rotor, *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol. 4, No. 1, pp. 115-121, 2014.
- [18] L. B. Kothe, A. P. Petry, Numerical and Experimental Study of a Two-Stage Savonius Wind Turbine, *Engenharia Térmica*, Vol. 18, No. 2, p. 52-61, 2019.
- [19] J. H. Lee, Y. T. Lee, H. C. Lim, Effect of twist angle on the performance of Savonius wind turbine, *Renewable Energy*, Vol. 89, pp. 231-244, 2016.
- [20] H. Jang, I. Paek, S. Kim, D. Jeong, Performance Prediction and Validation of a Small-Capacity Twisted Savonius Wind Turbine, *Energies*, pp. 1-12, 2019.
- [21] J. V. Akwa, A. V. Horacio, A. P. Petry, A review on the performance of Savonius wind turbines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 5, pp. 3054-3064, 2012.
- [22] J. L. Menet, *Aerodynamic Behaviour of a New Type of Slow-Running VAWT*, In: Peinke, J., Schaumann, P., Barth, S. (eds) *Wind Energy*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-33866-6_43, 2007.
- [23] S. Golabi, S. A. Hosseini, M. Akhavan Hejazi, H. Zamani, Numerical study of optimal design and construction of Savonius wind turbines, *6th Annual Clean Energy Conference*, 2019. (in Persian)
- [24] M. Jamil, S. H. Rasouli, Experimental & Numerical Study on an Advanced Vertical Axis Savonius Rotor, *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, Vol. 22, No. 1, pp. 77-94, 2011. (in Persian)
- [25] H. Khosravi, M. Amani, F. Arkian, A. H. Eshraghi, Analysis of advanced Savonius wind turbine by FLUENT software and its comparison with the results of experiments in wind tunnels, *The first international air conditioning conference and thermal and refrigeration facilities*, 2015. (in Persian)
- [26] S. Sharma, R. K. Sharma, Performance improvement of Savonius rotor using multiple quarter blades – A CFD investigation, *Energy Conversion and Management*, Vol. 127, pp. 43-54, 2016.
- [27] M. Tartuferi, V. D'Alessandro, S. Montelpare, R. Ricci, Enhancement of Savonius wind rotor aerodynamic performance: a computational study of new blade shapes and curtain systems, *Energy*, Vol. 79, pp. 371-384, 2015.
- [28] M. H. Mohamed, F. Alqurashi, D. Thévenin, Performance enhancement of a Savonius turbine under effect of frontal guiding plates, *Energy Reports*, Vol. 7, pp. 6069-6076, 2021.
- [29] V. Etmadeasl, R. Esmailnadjad, B. Farzaneh, M. Jafari, Application of Guide Blades for Improving the Performance of Savonius Wind Turbines, *Journal of Energy Engineering & Management*, Vol. 11, No. 2, pp. 116-127, 2021.
- [30] P. M. Kumar, K. Sivalingam, S. Narasimalu, T. C. Lim, S. Ramakrishna, and H. Wei, A review on the evolution of darrieus vertical axis wind turbine: Small wind turbines, *Journal of Power and Energy Engineering*, Vol. 7, No. 4, pp. 27-44, 2019.
- [31] R. Gupta, R. Das, K. K. Sharma, Experimental study of a Savonius-Darrieus wind machine, in *Proceedings of the International Conference on Renewable Energy for Developing Countries*, University of Columbia, Washington DC, 2006.
- [32] R. Gupta, A. Biswas, K. K. Sharma, Comparative study of a three-bucket Savonius rotor with a combined three-bucket Savonius-

ساوونیوس را که نقطه قوت آن است، مسئله‌زا می‌کنند. در واقع شاید بتوان در آینده به طرحی رسید که در آن نوعی مصالحه بین سادگی ساختار و افزایش عملکرد این توربین‌ها هدف طراحی باشد.

6- فهرست علائم

p	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
A	مساحت یک پره (m^2)
C_p	ضریب توان توربین
C_T	ضریب گشتاور توربین
P_w	توان باد (ms^{-1})
R	شعاع نیم دایره پره (m)
T	گشتاور باد ($\text{kgm}^2\text{s}^{-1}$)
T_t	گشتاور توربین ($\text{kgm}^2\text{s}^{-1}$)
V	سرعت باد (ms^{-1})
علائم یونانی	
ρ	چگالی (kgm^{-3})
ω	سرعت زاویه‌ای (rads^{-1})
λ	نسبت سرعت نوک پره

7- مراجع

- [1] *Future of wind deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects and I.R.E.A.* (A Global Energy Transformation paper), Abu Dhabi, 2019.
- [2] <http://www.wwindea.org/technology/ch01/estructura-en.htm>. Accessed 2022.
- [3] *Renewable Energy Market Update / 2021 Renewable electricity / Renewables deployment geared up in 2020.*
- [4] Kang, Can, Haixia Liu, and Xin Yang, Review of fluid dynamics aspects of Savonius-rotor-based vertical-axis wind rotors, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.33, pp. 499-508, 2014.
- [5] M. H. Ali, Experimental comparison study for Savonius wind turbine of two & three blades at low wind speed, *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, Vol. 3, No. 5, pp. 2978-2986, 2013.
- [6] J. L. Menet, N. Bourabaa, Increase in the Savonius rotors efficiency via a parametric investigation, *In European Wind Energy conference & exhibition*, pp. 22-25, 2004.
- [7] G. Santiago, W. Hernandez, A. C. Costa de Araujo, M. Rosa, M. González, Application of product development process (PDP) in the construction of vertical axis wind turbine with movable blades, *21st International Conference on Engineering Design, ICED17*, pp. 429-438, 2017.
- [8] B. F. Blackwell, R. E., Sheldahl, L. V., Feltz, Wind Tunnel Performance Data for Two- and Three Bucket Savonius Rotors, *SAND 76-0131*, pp. 1-107, 1977.
- [9] J. V. Akwa, G. A. Júnior, A. P. Petry, Discussion on the verification of the overlap ratio influence on performance coefficients of a Savonius wind rotor using computational fluid dynamics, *Renewable Energy*, Vol. 38, pp. 141-149, 2012.
- [10] M. Ebrahimpour, R. Shafaghat, R. Alamian, M. Safdari Shadloo, Numerical Simulation of Savonius Vertical Axis Wind Turbine and Evaluation of the Effect of Horizontal Overlap Parameter on its Performance, *Journal of Soft Computing and Information Technology*, Vol. 6, No. 2, pp.40-50, 2018.
- [11] R. Hassanzadeh, M. Mohammad Nejad, Effect of Overlapping Size on the Performance of the Savonius Wind Turbine, in Both Conventional and the Bach-Type Models, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 19, No. 11, pp. 2599-2606, 2019. (in Persian)

- vertical axis wind rotors, *Energy Conversion and Management*, Vol. 87, pp. 859-867, 2014.
- [34] A. Roshan, M. Maghrebi, Performance improvement of hybrid Darrieus-Savonius wind turbine, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 6, No. 3, pp. 195-212, 2016. (in Persian)
- three-bladed Darrieus rotor, *Renewable Energy*, Vol. 33, No. 9, pp. 1974-1981, 2008.
- [33] S. Bhuyan, A. Biswas, Investigations on self-starting and performance characteristics of simple H and hybrid H-Savonius