

# مطالعه عددی عملکرد یک توربین باد محور عمودی مرکب شامل ساوینوس با مقاطع آیرودینامیکی و داریوس با مقاطع جی شکل

سعید کریمیان علی آبادی<sup>۱\*</sup> و حامد کمالپور<sup>۲</sup>

۱- دانشیار، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

نویسنده مسؤول

پست الکترونیک: [Karimian@modares.ac.ir](mailto:Karimian@modares.ac.ir)

۲- کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا گرایش آیرودینامیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

پست الکترونیک: [h.kamalpoor@modares.ac.ir](mailto:h.kamalpoor@modares.ac.ir)

## چکیده

توربین‌های باد محور عمودی به دلیل عملکرد مناسب در جریان‌های آشفته شهری، گزینه‌ای مطلوب برای تولید انرژی تجدیدپذیر به شمار می‌روند. با این حال، مشکل خودراه‌اندازی در توربین‌های داریوس و بازده پایین ساوینوس در سرعت‌های بالا از چالش‌های اصلی این فناوری است. در پژوهش حاضر، عملکرد یک توربین هیبرید جدید متشکل از روتور داریوس با پره‌های جی‌شکل مبتنی بر ناکا ۰۰۲۱ و روتور ساوینوس با پره ایرفویلی با مقطع FX74-CL5-140 مورد بررسی قرار گرفته است. ماهیت کار آرایه شده عددی است. شبیه‌سازی‌ها بصورت دوبعدی و ناپایا با استفاده از نرم‌افزار انسیس ۲۰۲۱ فلونت و مدل آشفتگی  $k-\omega$  SST انجام شده. پارامترهای مورد مطالعه شامل آرایش دوپره و سه‌پره در روتور داریوس و گپ بین دو پره روتور ساوینوس داخلی است که این پارامتر در دو مقدار ۰.۰۳ و ۰.۰۶ متر، معادل به ترتیب ۰.۱۵ و ۰.۳۰ برابر شعاع روتور ساوینوس، ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد که پیکربندی سه‌پره با گپ ۰.۰۳ متر بین دو پره ساوینوس، بهترین عملکرد را ارائه می‌دهد و ضریب توان آن در نسبت سرعت نوک (TSR) ۲.۵ به حدود ۰.۴۶ می‌رسد که نشان‌دهنده بهبود ۳۵.۳٪ ضریب توان نسبت به مدل هیبرید سنتی است. تحلیل کانتورهای سرعت و فشار بیانگر آن است که کاهش گپ بین دو پره ساوینوس، برهم‌کنش آیرودینامیکی جریان خروجی روتور ساوینوس با روتور داریوس را تقویت کرده و با افزایش گشتاور و بهبود عملکرد همراه است. این مطالعه زمینه مناسبی برای اهداف طراحی و بهینه‌سازی هندسی در حوزه توربین‌های باد محور عمودی هیبریدی در مقیاس شهری می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** توربین باد محور عمودی، داریوس با مقطع جی‌شکل، ساوینوس با پره ایرفویلی، حل عددی دو بعدی، عملکرد آیرودینامیکی

# Numerical Study of the Performance of a Hybrid Vertical-Axis Wind Turbine Consisting of a Savonius Rotor with Airfoil-Shaped Blades and a J-Type Darrieus Rotor

Saeed Karimian Aliabadi

Hamed Kamalpour

Tarbiat Modares university, mechanical engineering faculty

## Abstract

Vertical-axis wind turbines (VAWTs) are promising for urban applications due to their ability to operate in turbulent flows. However, the poor self-starting capability of Darrieus turbines and the low efficiency of Savonius turbines at high tip speed ratios remain significant challenges. In this study, a novel and hybrid wind energy system, composed of a J-type Darrieus rotor and an airfoil-bladed Savonius rotor, has been defined. Consequently, the proposed system has been numerically investigated. The Darrieus rotor employs J-type blades based on the NACA 0021 profile, while the Savonius rotor is equipped with airfoil-shaped blades based on the FX74-CL5-140 section. Two-dimensional unsteady simulations are performed using ANSYS Fluent 2021 with the  $k-\omega$  SST turbulence model. The parameters investigated are the two- and three-blade Darrieus configurations and the inter-blade gap of the inner Savonius rotor, with  $G = 0.03 \text{ m}$  ( $0.15R_s$ ) and  $G = 0.06 \text{ m}$  ( $0.30R_s$ ). The results indicate that the three-blade configuration with an inter-blade gap of  $G = 0.03 \text{ m}$  ( $0.15R_s$ ) achieves the best performance, with a peak power coefficient of approximately 0.46 at a tip speed ratio (TSR) of 2.5, representing a 35.3% improvement in power coefficient compared with the conventional hybrid design. Analysis of the velocity and pressure contours indicates that reducing the Savonius inter-blade gap strengthens the aerodynamic interaction between the inner Savonius and outer Darrieus rotors, contributing to improved torque and power performance. The three-blade configuration also exhibits more favorable torque behavior than the two-blade configuration. Overall, the presented numerical study provides a basis for the design and geometric optimization of hybrid vertical-axis wind turbines for urban applications.

**Keywords:** Vertical Axis Wind Turbine, J-type section Darrieus, airfoil section Savonius, Numerical Simulation, Aerodynamic performance

## ۱. مقدمه

باد و شناخت شرایط اقلیمی محل نصب از عوامل مؤثر در انتخاب و طراحی توربین‌های بادی است؛ چنان‌که صداقت و رضویه با استفاده از داده‌های سرعت و جهت باد، پتانسیل نصب توربین‌های بادی را در چند ایستگاه استان سیستان و بلوچستان بررسی کردند<sup>[۱]</sup>. توربین‌های بادی به‌طور کلی به دو دسته اصلی محور افقی و محور عمودی تقسیم می‌شوند. توربین‌های محور افقی با بازده بالا، فناوری غالب در مزارع بادی بزرگ هستند<sup>[۲]</sup>، اما توربین‌های محور عمودی به دلیل عدم نیاز به سیستم جهت‌گیری، سهولت نگهداری و عملکرد مطلوب در جریان‌های آشفته شهری، برای کاربردهای مقیاس کوچک و مناطق با الگوی باد متغیر جذابیت ویژه‌ای دارند<sup>[۳، ۴]</sup>. توربین‌های محور عمودی عمدتاً در دو نوع درگ پایه نظیر ساوینوس و لیفت پایه نظیر داریوس طراحی می‌شوند. در مطالعات انجام‌شده در داخل

افزایش تقاضای جهانی انرژی در کنار نگرانی‌های فزاینده پیرامون انتشار گازهای گلخانه‌ای و گرمایش زمین، توسعه و بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر را به یک ضرورت انکارناپذیر تبدیل کرده است. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی، پیش‌بینی می‌شود تقاضای جهانی انرژی تا سال ۲۰۴۰ حدود ۲۵ تا ۳۰٪ افزایش یابد که بخش عمده آن همچنان از منابع فسیلی تأمین می‌گردد<sup>[۱]</sup>. در این میان، انرژی بادی به دلیل پتانسیل گسترده و بلوغ فناوری، جایگاه ویژه‌ای یافته است؛ به‌گونه‌ای که ظرفیت بهره‌برداری از باد تا پایان سال ۲۰۲۳ به ۱.۰۲۱ تراوات رسیده و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۰ از مرز ۲ تراوات عبور کند<sup>[۲]</sup>. همچنین، ارزیابی پتانسیل

کشور نیز، صداقت و همکاران در طراحی آیرودینامیکی یک توربین باد محور عمودی با استفاده از روش المان پره - تکانه، امکان سنجی و طراحی یک روتور محور عمودی با پره های مستقیم را بررسی کردند.<sup>[۳۰]</sup> در کنار روتورهای داریوس، گورلوف نیز یکی از پیکربندی های شناخته شده توربین های محور عمودی لیفت پایه است که با استفاده از پره های مارپیچی توسعه یافته است. هندسه مارپیچی پره ها موجب توزیع پیوسته تر بار آیرودینامیکی در طول ارتفاع روتور و کاهش نوسانات گشتاور در مقایسه با برخی پیکربندی های مستقیم می شود.<sup>[۲۹]</sup> توربین ساوینوس که نخستین بار در دهه ۱۹۲۰ توسط مهندس فنلاندی سیگورد ساوینوس به ثبت رسید<sup>[۶]</sup>، از قابلیت گشتاور اولیه مناسبی برخوردار است و از این رو برای کاربردهایی که نیازمند راه اندازی در سرعت های پایین هستند، جذاب است.<sup>[۷]</sup> با این حال، بازده آیرودینامیکی آن به دلیل غلبه نیروی پسا محدود بوده و حداکثر ضریب توان آن به ندرت از ۰.۲۵ فراتر می رود.<sup>[۶]</sup> از سوی دیگر، توربین داریوس که در سال ۱۹۳۱ توسط ژرژ داریوس اختراع شد<sup>[۴]</sup>، با بهره گیری از نیروی برای پره های آیرودینامیکی، قادر به دستیابی به ضرایب توان بالاتری (در محدوده ۰.۳۵ تا ۰.۴۵) است، با این حال، یکی از محدودیت های اصلی توربین داریوس، گشتاور راه اندازی پایین و در نتیجه ضعف در خودراه اندازی در شرایط سرعت باد پایین است.<sup>[۹]</sup> این تضاد عملکردی یعنی گشتاور راه اندازی بالا در ساوینوس و بازده بالاتر در داریوس، پژوهشگران را به سمت توسعه توربین های هیبرید مرکب از این دو روتور سوق داده است.<sup>[۷، ۶]</sup> در این چیدمان، روتور ساوینوس در بخش داخلی و روتور داریوس در بخش خارجی حول یک محور مشترک قرار می گیرند تا گشتاور اولیه مورد نیاز سامانه را تأمین کرده و در ادامه، سهم روتور داریوس در تولید توان افزایش یابد. پژوهش های متعددی در زمینه بهینه سازی این ترکیب انجام شده است. ساگریچی و همکاران (۲۰۲۰)<sup>[۱۵]</sup> با بررسی پارامترهای بی بعد مختلف نشان دادند که ترکیب این دو روتور می تواند ضریب گشتاور را در سرعت نوک پایین تا ۲۲ برابر نسبت به داریوس تنها افزایش دهد. بیسواس و بویان (۲۰۱۴)<sup>[۱۸]</sup> در یک مطالعه تجربی عددی، خودراه اندازی موفق توربین هیبرید در سرعت ۴ متر بر ثانیه را گزارش کردند. ژانگ و همکاران (۲۰۲۳)<sup>[۲۰]</sup> با بهینه سازی پارامترهای هندسی یک توربین هیبرید به روش تاگوچی، ضریب توان ۰.۳۸ را در نسبت سرعت نوک ۱.۹ به دست آوردند. همچنین ژانگ و همکاران (۲۰۲۴)<sup>[۱۴]</sup> با معرفی طراحی های کلاچ دار و دیفرانسیلی برای کنترل روتور داخلی، راهکاری برای کاهش گشتاور منفی در سرعت های بالا ارائه دادند. در کنار بهینه سازی چیدمان هیبرید، تحقیقات گسترده ای بر روی بهبود هندسه پره های منفرد

داریوس و ساوینوس متمرکز بوده است. در حوزه روتور داریوس، پن و همکاران (۲۰۲۳)<sup>[۱۱]</sup> با تحلیل برهم کنش گردابه ها نشان دادند که انتخاب زاویه اتصال مناسب بین پره ها می تواند ضریب توان را تا ۱۰٪ افزایش دهد. زمانی و همکاران (۲۰۱۶)<sup>[۱۹]</sup> با معرفی پره های جی شکل که از حذف بخشی از لبه فرار پروفیل ناکا ۰۰۲۱ حاصل می شود، دریافتند که این طراحی با بهره گیری هم زمان از نیروهای لیفت و درگ، گشتاور راه اندازی را تا ۳۰٪ و همینطور ضریب توان را در برخی از سرعت های نوک بهبود می بخشد. فرزادی و همکاران (۲۰۲۴)<sup>[۱۳]</sup> نیز با مطالعه جامع بر روی توربین داریوس با پره های جی شکل، تأیید کردند که این پره ها در نسبت های سرعت نوک پایین (حدود ۰.۵ تا ۱) عملکرد بسیار مطلوب تری دارند و ضریب توان را تا ۴۹٪ افزایش می دهند. در حوزه روتور ساوینوس نیز، دین هلی و همکاران (۲۰۲۴)<sup>[۱۲]</sup> نشان دادند که جایگزینی پره های نیم دایره ای سنتی با مقاطع آیرودینامیکی FX74-CL5-140، منجر به افزایش ۲۵٪ در ضریب توان و همینطور بهبود گشتاور در برخی سرعت های نوک نیز می شود. مهرپویا و همکاران (۲۰۲۳)<sup>[۲۱]</sup> با بهینه سازی پارامترهای یک توربین داریوس، به ضریب توان ۰.۵۸ در شرایط دوبعدی دست یافتند و نشان دادند که پروفیل ناکا ۰۰۲۱ عملکرد بهتری نسبت به ناکا ۰۰۱۸ و ناکا ۰۰۱۵ دارد. اخلاقی و همکاران (۲۰۲۴)<sup>[۲۲]</sup> نیز با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی، پیکربندی بهینه برای یک توربین داریوس جی شکل را شناسایی کردند. در زمینه مطالعات عددی، هاول و همکاران (۲۰۱۰)<sup>[۱۶]</sup> با مقایسه شبیه سازی های دوبعدی و سه بعدی نشان دادند که حل های دوبعدی به دلیل عدم مدل سازی گردابه های نوک پره، ضریب توان را بیش برآورد می کنند هرچند روند کلی عملکرد می تواند به درستی بازتولید شود. غفوریان و همکاران (۲۰۲۵)<sup>[۱۷]</sup> در یک مطالعه سیستماتیک بر روی توربین هیبرید داریوس-ساوینوس، با افزودن یک پرده هدایت کننده جریان، بهبود قابل توجهی در خودراه اندازی و ضریب توان مشاهده کردند. تومی و همکاران (۲۰۲۴)<sup>[۲۴]</sup> با بررسی اثر زاویه برخورد باد بر توربین ساوینوس مجهز به دفلکتور، در زاویه ۴۰° افزایش ۱۲۵٪ در ضریب توان را گزارش کردند. پرانتا و همکاران (۲۰۲۱)<sup>[۲۵]</sup> با اصلاح هندسه پره ساوینوس، ضریب توان را در سرعت نوک ۰.۷ به ۰.۵۹ رساندند. وکسا و همکاران (۲۰۲۰)<sup>[۲۶]</sup> نیز در یک مطالعه تجربی و شبیه سازی عددی، برتری عملکرد توربین های داریوس سه پره بر دوپره را تأیید کردند. مرور جامع ادبیات نشان می دهد که اغلب مطالعات پیشین بر روی ترکیب روتور داریوس با پره های مستقیم و روتور ساوینوس با پره های کاسه ای متمرکز بوده اند. با وجود تأیید کارایی مجزای پره جی شکل در داریوس<sup>[۱۳]</sup>

|                      |   |     |
|----------------------|---|-----|
| Bucket diameter (mm) | - | 200 |
| Overlap gap (mm)     | - | 30  |

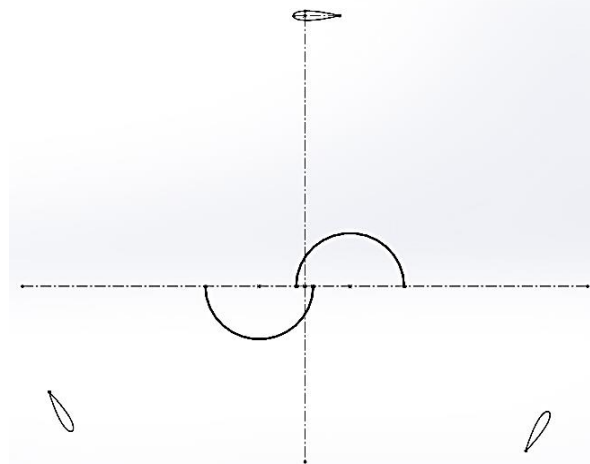


Figure 1- Schematic view of the baseline turbine.

شکل ۱. نمای شماتیک توربین مبنا.

## ۲-۲. دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

مطابق با مقاله مبنا<sup>[۱۷]</sup>، برای اطمینان از توسعه کامل جریان و کاهش اثرات انسدادی، دامنه محاسباتی به صورت یک مستطیل بزرگ با فاصله ۷D از مرکز روتور تا مرز ورودی و ۲۰D تا مرز خروجی انتخاب شده است. سرعت باد آزاد با شرط مرزی سرعت ورودی برابر با ۹ متر بر ثانیه و شدت آشفتگی ۵٪ به دامنه اعمال می شود. در مرز خروجی، شرط فشار خروجی با فشار گنج نسبی صفر استفاده می شود. دیواره های بالا و پایین دامنه نیز به صورت متقارن تعریف می شوند. برای شبیه سازی چرخش روتور، یک ناحیه دایروی در مرکز دامنه ایجاد و از تکنیک شبکه لغزان<sup>۱</sup> استفاده شده است.

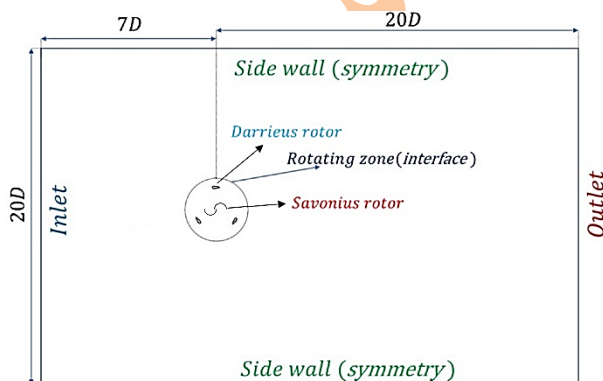


Figure 2- Computational domain and its dimensions based on rotor diameter (D)<sup>[۱۷]</sup>.

شکل ۲. دامنه محاسباتی و ابعاد آن بر حسب قطر روتور.

## ۲-۳. هندسه توربین هیبرید و پارامترهای طراحی

<sup>[۱۹]</sup> و مقطع آیرودینامیکی FX74-CL5-140 در ساوینوس<sup>[۱۲]</sup>، در مطالعات بررسی شده، ترکیب همزمان و هم محور این دو هندسه به صورت موردنظر در قالب یک توربین هیبرید به طور مشخص بررسی نشده است. علاوه بر این، اثر همزمان تعداد پره های روتور داریوس و گپ بین دو پره روتور ساوینوس بر ضرایب توان و گشتاور و همچنین بر ساختار میدان جریان در یک چارچوب عددی یکسان، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین نوآوری پژوهش حاضر عبارت از ترکیب هندسی و شبیه سازی عددی و تحلیل عملکرد یک توربین باد محور عمودی هیبرید با روتور داریوس جی شکل مبتنی بر ناکا ۰۰۲۱ و روتور ساوینوس ایرفولی با مقطع FX74-CL5-140 می باشد. هدف اصلی این مطالعه، بررسی تأثیر دو پارامتر کلیدی بر عملکرد آیرودینامیکی توربین است: (۱) تعداد پره های داریوس (دوپره و سه پره) و (۲) فاصله بین دو پره روتور ساوینوس داخلی (۰۰۳ و ۰۰۶ متر). عملکرد پیکربندی های مختلف با استفاده از ضرایب توان و گشتاور در بازه ای از نسبت سرعت نوک ۱.۵ تا ۳.۲۵ ارزیابی شده است.

## ۲. مدل سازی عددی و روش حل

### ۲-۱. هندسه توربین مبنا

در این پژوهش، به منظور اعتبارسنجی و مقایسه عملکرد، هندسه مرجع شبیه سازی بر اساس ترکیب سنتی دو توربین باد، داریوس و ساوینوس مطابق مقاله ی غفوریان و همکاران (۲۰۲۵)<sup>[۱۷]</sup> انتخاب شده است. همچنین شایان ذکر است که در مقاله مرجع، اعتبارسنجی روتور داریوس و ساوینوس به صورت جداگانه با داده های تجربی (کستلی و همکاران (۲۰۱۰)<sup>[۲۷]</sup>، ونهنبون و همکاران (۲۰۱۵)<sup>[۲۸]</sup> انجام شده است که در این پژوهش به دلیل راستی آزمایی قبلی، تنها حالت ترکیبی بازتولید شد.

جدول ۱- مشخصات هندسی توربین هیبرید مرجع<sup>[۱۷]</sup>

Table 1- Geometric specifications of the reference turbine.<sup>[۱۷]</sup>

| Parameter               | Darrieus Rotor | Savonius Rotor |
|-------------------------|----------------|----------------|
| Number of blades        | 3              | 2              |
| Blade chord length (mm) | 85.8           | -              |
| Rotor diameter (mm)     | 1030           | 370            |
| Blade profile           | NACA 0021      | Semicircular   |
| Blade thickness (mm)    | -              | 2              |

<sup>۱</sup> Sliding Mesh

شکل ۳. نمای شماتیک توربین باد ترکیبی پیشنهادی و گپ بین دو پره روتور ساوینوس: (الف) سه پره با  $G = 0.03$ ، (ب) سه پره با  $G = 0.06$ ، (ج) دوپره با  $G = 0.03$ ، (د) دوپره با  $G = 0.06$ .

#### ۴-۲. شبکه محاسباتی و استقلال از شبکه

شبکه محاسباتی از نوع بی‌سازمان مثلثی با لایه مرزی در اطراف سطوح پره‌ها تولید شده است. برای اطمینان از کیفیت حل در نزدیکی دیواره و با توجه به استفاده از مدل آشفتگی  $k-\omega$  SST،  $50 \times$  لایه با نرخ رشد  $1.2$  بر روی سطوح پره‌ها ایجاد گردید. به منظور بررسی استقلال حل از ابعاد شبکه، سه سطح شبکه با تعداد سلول‌های تقریبی  $1.2 \times 10^6$  و  $1.6 \times 10^6$  میلیون سلول برای حالت سه پره با  $G = 0.03$  در  $TSR = 2$  مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول ۳). نتایج نشان داد با ریزتر شدن شبکه، مقدار متوسط  $y^+$  از  $3.67$  در شبکه درشت به  $1.15$  در شبکه ریز کاهش یافت (شکل ۴). همچنین، مقدار  $y^+ < 5$  برای شبکه منتخب نشان می‌دهد که تفکیک شبکه در ناحیه نزدیک دیواره مناسب بوده و شرایط لازم برای استفاده از مدل آشفتگی  $k-\omega$  SST فراهم شده است. مقدار متوسط ضریب توان از  $0.429$  در شبکه درشت به  $0.412$  در شبکه ریز تغییر کرد. اختلاف نسبی  $C_p$  بین شبکه‌های متوسط و ریز حدود  $2.14$  درصد است؛ از این رو، از نظر حساسیت عملکردی، شبکه متوسط و ریز نتایج نزدیک به هم ارائه می‌کنند. با وجود این، شبکه ریز به دلیل تفکیک بهتر لایه‌های برشی و ساختارهای گردابه‌ای، برای شبیه‌سازی‌های ناپایا و تحلیل میدان جریان انتخاب شد. کیفیت شبکه با معیارهای استاندارد ارزیابی شد، میانگین اسکینوس<sup>۲</sup> حدود  $0.07$  و میانگین ارتوگونال<sup>۳</sup> حدود  $0.95$  به دست آمد که در محدوده مطلوب برای حل‌های ناپایای آشفته قرار دارد. نمای نزدیک از شبکه محاسباتی در اطراف پره‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات شبکه بی‌سازمان.

Table 2- Specifications of the unstructured mesh.

| Zone                 | Constraint Type               | Value/Setting                  |
|----------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Outer domain         | Body sizing 1                 | Element size $\approx 0.05$ m  |
| Rotating zone        | Body sizing 2                 | Element size $\approx 0.005$ m |
| Interface boundaries | Edge sizing (Interface 1 & 2) | Element size $\approx 0.005$ m |
| Blade edges          | Edge sizing (Blade)           | Number of Divisions = 524      |

روتور خارجی از نوع داریوس با پره‌های جی شکل و روتور داخلی از نوع ساوینوس با دو پره آیرودینامیکی تشکیل شده است. پره‌های داریوس بر پایه پروفیل ناکا  $0021$  با حذف حدود  $25\%$  از بخش لبه فرار (مطابق هندسه جی شکل) ساخته شده‌اند [۱۹] و طول وتر آن‌ها  $85.8$  میلی متر می‌باشد. روتور ساوینوس داخلی دارای دو پره با مقطع آیرودینامیکی FX74-CL5-140 است که نسبت به پره‌های نیم‌دایره‌ای سنتی عملکرد بهتری در تولید گشتاور اولیه دارد. پارامتر هندسی اصلی در این مطالعه، گپ یا فاصله  $G$  بین دو پره روتور ساوینوس است که در دو مقدار  $0.03$  و  $0.06$  متر بررسی شد. این مقادیر به ترتیب معادل  $0.15$  و  $0.30$  برابر شعاع روتور ساوینوس هستند. روتور ساوینوس در بخش داخلی و روتور داریوس در بخش خارجی قرار گرفته و دو روتور حول یک محور مشترک مدل شده‌اند. در مدل عددی، روتورهای داخلی و خارجی به صورت هم‌محور و با سرعت زاویه‌ای یکسان دوران داده شدند و اندرکنش آیرودینامیکی میان دو ناحیه از طریق سطح مشترک بین ناحیه چرخان و ساکن محاسبه شد. برای بررسی اثر تعداد پره‌ها، روتور داریوس در دو آرایش دوپره و سه پره مدل‌سازی گردید. نمای شماتیک از هندسه توربین هیبرید و پارامترهای اصلی آن در شکل ۳ ارائه شده است.

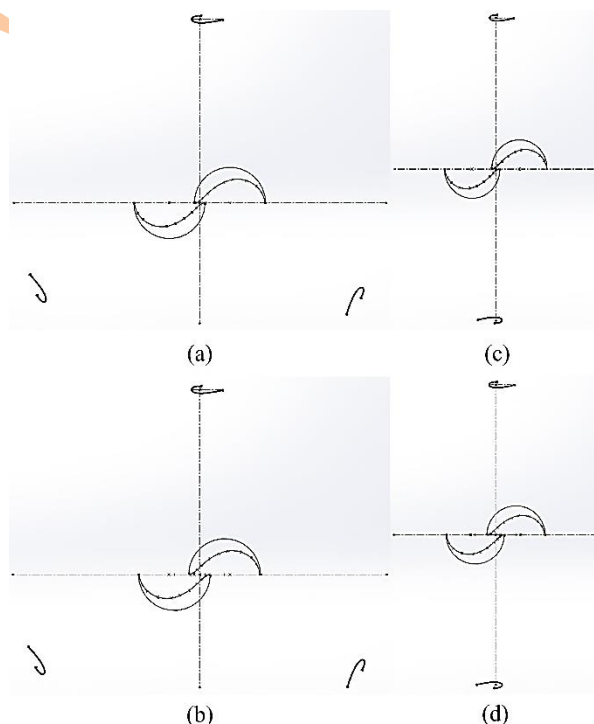


Figure 3. Schematic view of the proposed hybrid wind turbine and the inter-blade gap of the inner Savonius rotor: (a) three-blade with  $G = 0.03$ , (b) three-blade with  $G = 0.06$ , (c) two-blade with  $G = 0.03$ , (d) two-blade with  $G = 0.06$ .

<sup>۲</sup> Orthogonal quality

<sup>۳</sup> Skewness

**Figure 5. Close-up view of the unstructured triangular mesh and boundary layers around the blades.**

شکل ۵. شبکه محاسباتی بی‌سازمان مثلثی و لایه مرزی اطراف پره‌ها.

## ۵-۲. معادلات حاکم و مدل آشفتگی

میدان جریان تراکم‌ناپذیر و ناپایای اطراف روتور با حل معادلات ناویر-استوکس میانگین‌گیری‌شده رینولدز<sup>۴</sup> شبیه‌سازی شده است. معادلات حاکم شامل معادله پیوستگی (۱) و معادله مومنتم (۲) به صورت زیر هستند:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \overline{u_i u_j} \right) \quad (2)$$

در روابط فوق،  $u_i$  مؤلفه‌های سرعت میانگین،  $p$  فشار،  $\rho$  چگالی سیال،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی و  $\overline{u_i u_j}$  تنش‌های رینولدز هستند. تنش‌های رینولدز ناشی از نوسانات آشفتگی بوده و برای بسته‌شدن دستگاه معادلات، توسط مدل آشفتگی مدل‌سازی می‌شوند. برای بیان عملکرد توربین به صورت بی‌بعد، از نسبت سرعت نوک، ضریب گشتاور و ضریب توان استفاده شد. این کمیت‌ها به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V_\infty^3} \quad (3)$$

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho A R V_\infty^2} \quad (4)$$

$$TSR = \frac{\omega R}{V_\infty} \quad (5)$$

$$P = M\omega \quad (6)$$

$$A = 2RH \quad (7)$$

نسبت سرعت نوک پره (TSR) به صورت نسبت سرعت محیطی روتور داریوس به سرعت جریان آزاد تعریف می‌شود؛ بنابراین در رابطه TSR، شعاع  $R$  برابر شعاع خارجی روتور داریوس و  $\omega$  سرعت زاویه‌ای مشترک روتورهای داریوس و ساوینوس است. سطح مرجع  $A$  (۳ و ۴) در محاسبه ضریب توان و ضریب گشتاور بر اساس سطح جاروب‌شده روتور خارجی داریوس در مدل دوبعدی تعریف شده

|                |                         |                              |
|----------------|-------------------------|------------------------------|
| Boundary layer | Smooth transition layer | 50 layers, growth rate = 1.2 |
| Mesh type      | Unstructured triangular | —                            |

جدول ۳- مطالعه‌ی استقلال از شبکه برای پیکربندی سه‌پره با

$$TSR = 2 \text{ در } G = 0.03$$

**Table 3- Mesh independence study for the three-blade configuration with  $G = 0.03$  at  $TSR = 2$**

| Mesh ( $10^3$ )                     | Coarse | Medium | Fine  |
|-------------------------------------|--------|--------|-------|
| Number of elements (thousands)      | 1200   | 1600   | 2000  |
| Rotating zone size (mm)             | 6      | 5.5    | 5     |
| Outer zone size (mm)                | 60     | 55     | 50    |
| Average power coefficient ( $C_p$ ) | 0.429  | 0.421  | 0.412 |
| Averaged $y^+$                      | 3.67   | 2.76   | 1.15  |

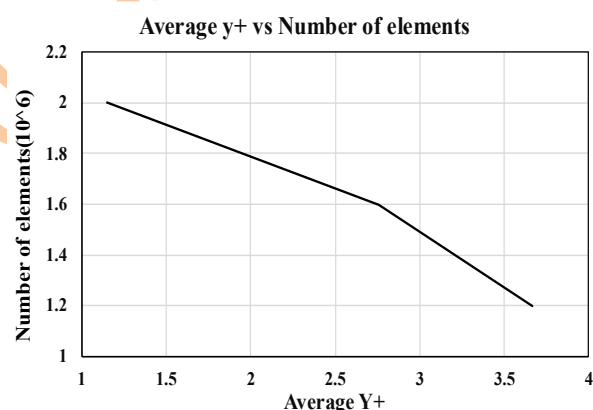
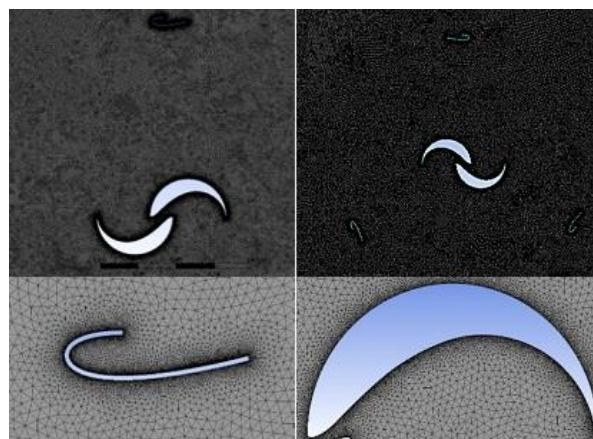


**Figure 4. Variations of the average  $y^+$  on the all blade surfaces with the increase in the number of mesh elements.**

شکل ۴. تغییرات میانگین  $y^+$  روی همه سطوح پره‌ها با افزایش تعداد المان‌های شبکه.



<sup>۴</sup> URANS

برای اعتبارسنجی چارچوب عددی، مدل توربین هیبرید سنتی (داریوس مستقیم ناکا ۲۰۲۱ + ساوینوس کاسه‌ای) مطابق با مشخصات مقاله غفوریان و همکاران (۲۰۲۵)<sup>[۱۷]</sup> شبیه‌سازی و منحنی ضریب توان بر حسب نسبت سرعت نوک استخراج گردید. مقایسه نتایج حاضر با داده‌های مرجع در شکل ۶ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی حاضر و داده‌های مقاله مبنا وجود دارد (میانگین خطای کمتر از ۵.۵٪ در کل بازه را نشان می‌دهد) که دقت و قابلیت اطمینان مدل عددی به کار رفته را تأیید می‌کند.

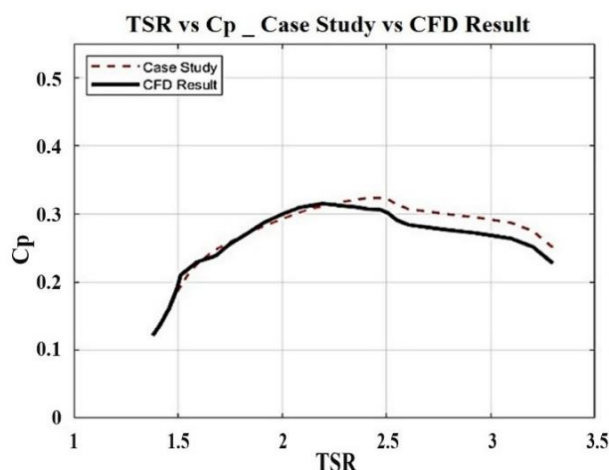


Figure 6. Validation of the present numerical results with the reference data <sup>[17]</sup> for the conventional hybrid turbine.

شکل ۶. اعتبارسنجی نتایج عددی حاضر با داده‌های مقاله‌ی مرجع برای توربین هیبرید سنتی.<sup>[۱۷]</sup>

### ۳. ارایه نتایج و بحث

در این بخش، عملکرد آیرودینامیکی توربین هیبرید پیشنهادی بر اساس شبیه‌سازی‌های عددی انجام‌شده مورد تحلیل قرار می‌گیرد. برای افزایش دقت منحنی‌های عملکرد و تعیین دقیق‌تر نقاط بهینه، افزون بر سه نسبت سرعت نوک اصلی (۱.۵، ۲.۵، ۳.۲۵)،  $(TSR = 1.5, 2.5, 3.25)$ ، شبیه‌سازی‌های تکمیلی در سرعت‌های میانی نیز انجام شده است تا روند تغییرات ضرایب توان و گشتاور با وضوح بیشتری قابل ردیابی باشد. تمام کمیت‌های میانگین ارائه‌شده در این بخش پس از دستیابی به شرایط تناوبی پایا از یک دور کامل نهایی استخراج شده‌اند. برای مقایسه پیکربندی‌ها، ضریب توان و ضریب گشتاور به‌عنوان شاخص‌های اصلی عملکرد و رفتار گشتاور لحظه‌ای و میدان‌های سرعت، فشار و ورتیسیته به‌عنوان شاخص‌های تکمیلی تحلیل جریان در نظر گرفته شده‌اند.

است. گشتاور  $M$  گزارش‌شده در این پژوهش، گشتاور کل روتور هیبرید بوده و از مجموع ممان‌های حاصل از روتورهای داریوس و ساوینوس حول محور مشترک به‌دست آمده است. در این پژوهش، از مدل آشفتگی دو معادله‌ای  $k-\omega$  SST بهره گرفته شده است. این مدل با ترکیب مزایای مدل  $k-\omega$  در نزدیکی دیواره و مدل  $k-\epsilon$  در نواحی دور از دیواره، برای شبیه‌سازی جریان اطراف پره‌ها انتخاب شد. انتخاب این مدل با توجه به ماهیت ناپایایی جریان، وجود گرادیان‌های فشار معکوس و احتمال جدایش جریان در اطراف پره‌ها انجام گرفت.

### ۲-۶. تنظیمات حل عددی و اعتبارسنجی

حل عددی در نرم‌افزار آنسیس فلونت ۲۰۲۱ به‌صورت ناپایا و با الگوریتم فشار مبنا<sup>۵</sup> انجام شده است. برای جفت‌سازی میدان فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل<sup>۶</sup> استفاده شده است. چرخش روتور با تکنیک شبکه لغزان مدل‌سازی شده و گام زمانی حل معادل ۱ درجه چرخش روتور  $(\Delta t = \frac{\Delta \theta}{\omega})$  انتخاب گردیده است. مطالعه استقلال

از گام زمانی نیز به‌منظور ارزیابی حساسیت نتایج نسبت به گام زمانی، سه مقدار گام زاویه‌ای ۱، ۲ و ۳ درجه بررسی شد. نتایج حاصل در جدول ۴ ارائه شده است. با کاهش گام زاویه‌ای از ۳ به ۱ درجه، اختلاف نسبی میانگین ضریب توان حدود ۱.۹ درصد به‌دست آمد. از این‌رو، گام زاویه‌ای ۱ درجه به‌عنوان گام نهایی انتخاب شد تا دقت زمانی مناسب برای ثبت تغییرات گذرای میدان جریان و گشتاور فراهم شود. همچنین مقدار باقی‌مانده معادلات مومنتوم و آشفتگی در هر گام زمانی تا حدود  $10^{-4}$  کاهش یافت. حل برای هر حالت تا رسیدن به شرایط تناوبی پایا ادامه یافت؛ به‌گونه‌ای که اختلاف شاخص عملکرد بین دو دور متوالی کمتر از ۵ درصد شود. پس از برقراری این شرط، یک دور کامل پایانی برای استخراج و میانگین‌گیری کمیت‌های عملکردی مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۴- مطالعه‌ی استقلال از گام زمانی برای پیکربندی سه‌پره با  $G = 0.03$  در  $TSR = 2$ .

Table 4- Time step independence study for the three-blade configuration with  $G = 0.03$  at  $TSR = 2$

| $\Delta \theta^\circ$ | $\Delta t$ (s) | $C_p$ |
|-----------------------|----------------|-------|
| 3°                    | 0.00149        | 0.431 |
| 2°                    | 0.00099        | 0.419 |
| 1°                    | 0.00049        | 0.411 |

<sup>۶</sup> SIMPLE

<sup>۵</sup> Pressure-base

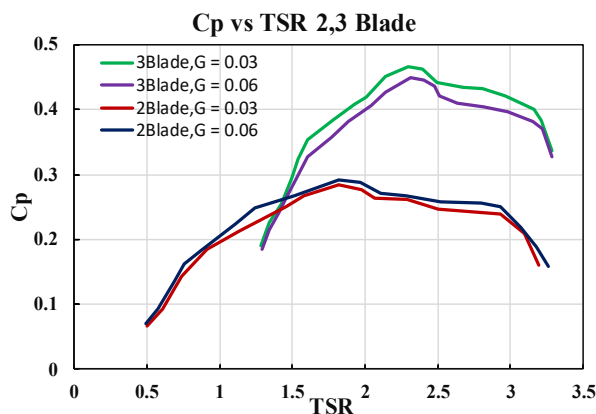


Figure 7. Power coefficient ( $C_p$ ) versus tip speed ratio (TSR) for two-blade and three-blade configurations.

شکل ۷. منحنی ضریب توان ( $C_p$ ) بر حسب نسبت سرعت نوک برای پیکربندی‌های دوپره و سه‌پره.

شکل ۸. منحنی ضریب گشتاور متوسط را نشان می‌دهد. روند نزولی  $C_m$  با افزایش TSR در تمامی منحنی‌ها مشهود است. بیشینه ضریب گشتاور در نسبت‌های سرعت نوک پایین رخ می‌دهد که بیانگر تولید گشتاور بالاتر در این ناحیه عملیاتی است. با این حال، ارزیابی مستقیم خودراه‌اندازی نیازمند شبیه‌سازی گذرا از حالت سکون و بررسی فرآیند شتاب‌گیری روتور است و در مطالعه حاضر انجام نشده است. در پیکربندی سه‌پره با گپ ۰.۰۳ متر دو پره ساوینوس، ضریب گشتاور متوسط در نسبت‌های سرعت نوک پایین به حدود ۰.۲۲ می‌رسد و با افزایش نسبت سرعت نوک، روند کاهشی نشان می‌دهد. بنابراین، نتایج حاضر بیانگر عملکرد مطلوب گشتاور در نسبت‌های سرعت نوک پایین هستند، اما به‌تنهایی نمی‌توانند به‌عنوان اثبات مستقیم قابلیت خودراه‌اندازی تفسیر شوند.

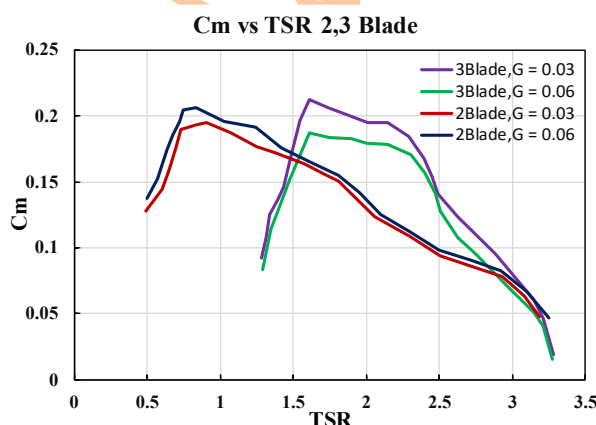


Figure 8. Average torque coefficient ( $C_m$ ) versus tip speed ratio (TSR) for two-blade and three-blade configurations.

شکل ۸. منحنی ضریب گشتاور متوسط ( $C_m$ ) بر حسب نسبت سرعت نوک برای پیکربندی‌های دوپره و سه‌پره.

### ۳-۱. تحلیل ضرایب توان و گشتاور متوسط

شکل ۷ منحنی ضریب توان  $C_p$  بر حسب نسبت سرعت نوک TSR را برای پیکربندی‌های سه‌پره و دوپره در دو مقدار گپ بین دو پره روتور ساوینوس نشان می‌دهد. مطابق انتظار، روند کلی ضریب توان در تمامی حالت‌ها با افزایش TSR ابتدا صعودی بوده و پس از رسیدن به یک نقطه اوج کاهش می‌یابد. این رفتار مشخصه توربین‌های هبیرید است که در TSR های پایین، گشتاور ساوینوس غالب بوده و در TSR های بالا، بخش داریوس سهم اصلی را ایفا می‌کند. نتایج به‌وضوح نشان می‌دهند که پیکربندی سه‌پره با گپ ۰.۰۳ متر بین دو پره ساوینوس بالاترین ضریب توان را در میان تمامی حالت‌ها به خود اختصاص داده است و به حدود  $C_{p,max} \approx 0.46$  در  $TSR = 2.5$  دست یافته است. این در حالی است که در همان نسبت سرعت نوک، ضریب توان برای حالت سه‌پره با  $G = 0.06$  حدود ۰.۴۴ و برای حالت دوپره با  $G = 0.06$  حدود ۰.۲۸ ثبت شده است. مقایسه این مقادیر دو نکته را آشکار می‌سازد:

۱. اثر تعداد پره: پیکربندی سه‌پره نسبت به آرایش دوپره عملکرد بالاتری نشان می‌دهد که می‌توان آن را به توزیع یکنواخت‌تر گشتاور و کاهش سهم نواحی با گشتاور منفی در چرخه چرخش نسبت داد؛ این موضوع در تحلیل گشتاور لحظه‌ای بخش بعدی بررسی می‌شود.
۲. اثر گپ بین پره‌های ساوینوس ( $G$ ): در آرایش سه‌پره، کاهش گپ از ۰.۰۶ به ۰.۰۳ متر باعث افزایش ضریب توان می‌شود، در حالی که در آرایش دوپره، فاصله ۰.۰۶ متر در ناحیه عملکرد بهینه ضریب توان اندکی بالاتری نسبت به گپ ۰.۰۳ متر ایجاد می‌کند. این رفتار متفاوت را می‌توان به الگوی متفاوت برهم‌کنش دنباله ساوینوس با پره‌های داریوس در فرکانس‌های مختلف عبور پره نسبت داد.

جدول ۵- خلاصه شاخص‌های عملکردی پیکربندی‌های مختلف در

نقطه بهینه

Table 5- Summary of performance indicators for various configurations at the optimal point.

| Configuration | G (m) | TSR     | $C_{p,max}$ |
|---------------|-------|---------|-------------|
| Two_blade     | 0.03  | 1.7–2   | 0.26-0.28   |
| Two_blade     | 0.06  | 1.7–2   | 0.28        |
| Three_blade   | 0.03  | 2.5     | 0.46        |
| Three_blade   | 0.06  | 2.2–2.4 | 0.44-0.45   |

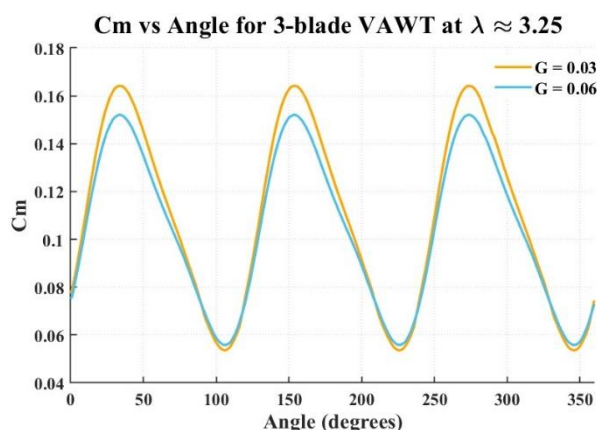


Figure 9. Instantaneous torque coefficient ( $C_m$ ) versus rotation angle ( $\theta$ ) for the three-blade configuration with  $G=0.03$  at  $TSR=3.25$ .

شکل ۹. تغییرات ضریب گشتاور لحظه‌ای کل روتور ( $C_m$ ) بر حسب زاویه چرخش ( $\theta$ ) برای پیکربندی سه‌پره با  $G=0.03$  در  $TSR=3.25$ .

### ۳-۳. تحلیل میدان جریان برای پیکربندی مناسب

برای درک فیزیک حاکم بر تفاوت‌های عملکردی مشاهده‌شده در منحنی‌های توان و گشتاور، تحلیل میدان جریان بر روی دو پیکربندی شاخص که بهترین عملکرد را در هر آرایش پره‌ای داشته‌اند، متمرکز شده است. در این بخش، برای مقایسه مستقیم ساختار میدان جریان، نتایج هر دو پیکربندی در  $TSR=2.5$  و پس از رسیدن جریان به شرایط تناوبی پایا ارائه شده‌اند. کانتورهای میدان جریان در این بخش با هدف تفسیر کیفی سازوکار برهم‌کنش جریان و پره‌ها ارائه شده‌اند، در حالی که مقایسه کمی عملکرد پیکربندی‌ها بر اساس ضرایب توان و گشتاور انجام شده است.

#### ۱- پیکربندی سه‌پره $TSR=2.5$ با $G=0.03$

این پیکربندی بالاترین ضریب توان  $C_{p,max} \approx 0.46$  را در میان تمامی حالات به خود اختصاص داد. برای تحلیل دلایل این برتری، کانتورهای فشار، سرعت و ورتیسیته در یک لحظه مشخص از چرخه تناوبی پایدار در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ ارائه شده‌اند. در شکل ۱۰، کانتور فشار برای پیکربندی سه‌پره با  $G=0.03$  متر در  $TSR=2.5$  ارائه شده است. در ناحیه جلوی لبه حمله پره پیش‌رونده، ناحیه‌ای با فشار بالاتر و در سطح مکشی همان پره، ناحیه‌ای با فشار پایین‌تر مشاهده می‌شود که بیانگر شکل‌گیری اختلاف فشار آیرودینامیکی در دو سوی پره است. در این پیکربندی، ناحیه کم‌فشار اطراف پره با جریان داخلی روتور برهم‌کنش بیشتری دارد که می‌تواند به تقویت شرایط مکش روی سطح پره و افزایش گشتاور آیرودینامیکی کمک کند. در حالت با گپ کمتر، الگوی جریان خروجی از روتور ساوینوس

### ۲-۳. تحلیل گشتاور لحظه‌ای

برای درک بهتر دینامیک روتور و نوسانات گشتاور، تغییرات ضریب گشتاور لحظه‌ای کل روتور (مجموع سهم ساوینوس و داریوس) بر حسب زاویه چرخش ( $\theta$ ) در یک دور کامل بررسی شده است. شایان ذکر است که در این پژوهش، مبدأ زاویه ( $\theta$ ) بر اساس موقعیت اولیه هندسی روتور در دستگاه مختصات کارتزین (هم‌راستا با محور  $X$ ) تعریف شده است و صرفاً یک شیفت فاز ثابت نسبت به زاویه آزیموتی مرسوم (نسبت به بردار باد) دارد. این تعریف زاویه صرفاً مبنای گزارش نتایج است و بر مقادیر میانگین و مقایسه عملکردی تأثیری ندارد.

در نتیجه، اعداد مطلق زوایای قله‌ها متفاوت از مقادیر گزارش‌شده برای تک‌پره هستند، اما الگوی تناوب و اختلاف فاز بین پره‌ها کاملاً منطبق بر اصول آیرودینامیک است. شکل ۹ این منحنی را برای پیکربندی بهینه سه‌پره با  $G=0.03$  در نسبت سرعت نوک  $TSR=3.25$  نشان می‌دهد. انتخاب  $TSR=3.25$  به این دلیل است که در این سرعت دورانی بالا، پدیده‌های گذرا مانند استال دینامیکی و برهم‌کنش گردابه‌ها شدیدتر بوده و تحلیل رفتار نوسانی اهمیت بیشتری دارد. مطابق انتظار برای یک روتور سه‌پره، الگوی گشتاور دارای سه قله اصلی در هر دور با فاصله تقریبی  $120^\circ$  درجه است (برای مثال، قله‌های اصلی در این مرجع خاص در حوالی زوایای  $40^\circ$ ،  $160^\circ$  و  $280^\circ$  درجه ظاهر می‌شوند). لازم به ذکر است که زوایای ارائه‌شده در این نمودار، بر اساس موقعیت اولیه روتور تعریف شده‌اند و نسبت به زاویه آزیموتی متداول (نسبت به جهت باد) دارای یک شیفت فاز ثابت هستند. از این رو، مقدار مطلق زوایای قله‌ها اهمیت فیزیکی مستقیمی ندارد و آنچه در این تحلیل حائز اهمیت است، تکرارپذیری فاصله زوایای  $120^\circ$  درجه بین قله‌های گشتاور و همچنین دامنه نوسانات در هر چرخه می‌باشد. این قله‌ها متناظر با لحظاتی هستند که یکی از پره‌ها در ناحیه پیش‌رونده قرار گرفته و نیروی برآی زیادی تولید می‌کند. در مقابل، در نواحی بین قله‌ها، گشتاور کاهش یافته و حتی به مقادیر منفی جزئی می‌رسد که ناشی از حرکت پره در ناحیه پس‌رونده و افزایش نیروی پسا است. این رفتار می‌تواند از منظر بهره‌برداری، بارگذاری گشتاوری یکنواخت‌تری ایجاد کند؛ با این حال، بررسی مستقیم ارتعاشات سازه‌ای خارج از دامنه شبیه‌سازی حاضر است. مثبت بودن گشتاور در بخش قابل‌توجهی از چرخه نشان‌دهنده وجود ظرفیت تولید گشتاور محرک در این پیکربندی است؛ با این حال، این نتیجه به‌تنهایی به‌منزله اثبات خودراندازی از حالت سکون نیست.

شکل ۱۱. کانتور سرعت برای پیکربندی سه پره با  $G = 0.03$  در  $TSR = 2.5$ .

در شکل ۱۲، کانتور ورتیسیته برای پیکربندی سه پره با  $G = 0.03$  متر در  $TSR = 2.5$  ارائه شده است. بیشترین مقادیر ورتیسیته در نواحی نزدیک لبه فرار و نوک پره‌ها متمرکز شده‌اند که با تشکیل لایه‌های برشی و دنباله جریان در این نواحی سازگار است. همچنین، در فضای بین روتور ساوینوس و پره‌های داریوس نواحی با ورتیسیته متوسط مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده برهم‌کنش جریان خروجی ساوینوس با میدان جریان روتور خارجی است. در این پیکربندی، ساختار دنباله و نواحی با ورتیسیته بالا در نزدیکی پره‌ها متمرکزتر به نظر می‌رسند و این الگو با نوسانات گشتاور کمتر در آرایش سه پره سازگار است. با توجه به اینکه شدت و توزیع ورتیسیته به صورت کمی از کانتور حاضر استخراج نشده است، این تصویر صرفاً برای تبیین کیفی ساختار جریان مورد استفاده قرار گرفته است.

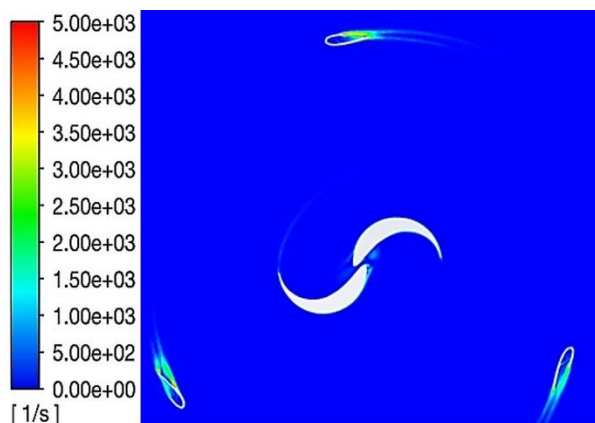


Figure 12. Vorticity contour for the three-blade configuration with  $G = 0.03$  at  $TSR = 2.5$ .

شکل ۱۲. کانتور ورتیسیته برای پیکربندی سه پره با  $G = 0.03$  در  $TSR = 2.5$ .

در مجموع، کانتورهای فشار، سرعت و ورتیسیته نشان می‌دهند که در پیکربندی سه پره با گپ  $G = 0.03$  متر بین دو پره ساوینوس، برهم‌کنش جریان خروجی روتور داخلی با پره‌های داریوس قوی‌تر و متمرکزتر است. این رفتار کیفی با دستیابی به ضریب توان حدود ۰.۴۶ و عملکرد بالاتر این پیکربندی نسبت به سایر حالات سازگار است. نتایج کانتورها نشان می‌دهد که در این پیکربندی، ترکیب فاصله کم  $0.03$  و مقطع آیرودینامیکی ساوینوس، یک هم‌افزایی آیرودینامیکی ایجاد کرده است. جریان خروجی روتور ساوینوس با نزدیک شدن به پره‌های داریوس، الگوی جریان و توزیع فشار در اطراف پره را تغییر می‌دهد. این تغییرات کیفی با افزایش ضریب توان و گشتاور مشاهده شده در این پیکربندی سازگار است، هرچند برای

تغییر کرده و ساختار جریان ناشی از روتور داخلی تعامل متفاوتی با پره‌های داریوس ایجاد می‌کند. این رفتار کیفی می‌تواند در تغییر مومنوم موضعی جریان اطراف پره و در نتیجه عملکرد آیرودینامیکی مؤثر باشد.

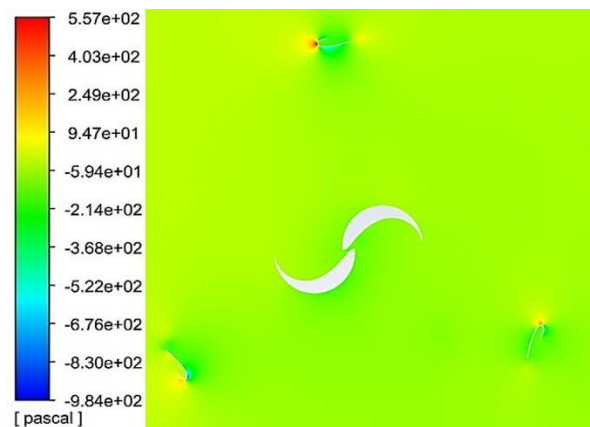


Figure 10. Pressure contour for the three-blade configuration with  $G = 0.03$  at  $TSR = 2.5$ .

شکل ۱۰. کانتور فشار برای پیکربندی سه پره با  $G = 0.03$  در  $TSR = 2.5$ .

در شکل ۱۱، کانتور سرعت برای پیکربندی سه پره با  $G = 0.03$  متر در  $TSR = 2.5$  نشان داده شده است. در ناحیه مرکزی روتور و در پایین دست پره‌ها، نواحی با سرعت کمتر از جریان آزاد مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تغییر انرژی جنبشی جریان در اثر عبور از روتور است. در اطراف پره پیش‌رونده نیز نواحی با سرعت بالاتر از جریان آزاد شکل گرفته است که ناشی از برهم‌کنش سرعت جریان آزاد، سرعت چرخشی پره و جریان خروجی روتور ساوینوس است. به دلیل گپ کمتر، جریان خروجی ساوینوس پیش از اختلاط کامل با جریان آزاد به ناحیه پره داریوس نزدیک می‌شود و برهم‌کنش متمرکزتری با جریان اطراف آن ایجاد می‌کند. این رفتار می‌تواند به افزایش مومنوم موضعی جریان اطراف پره و بهبود شرایط آیرودینامیکی آن کمک کند.

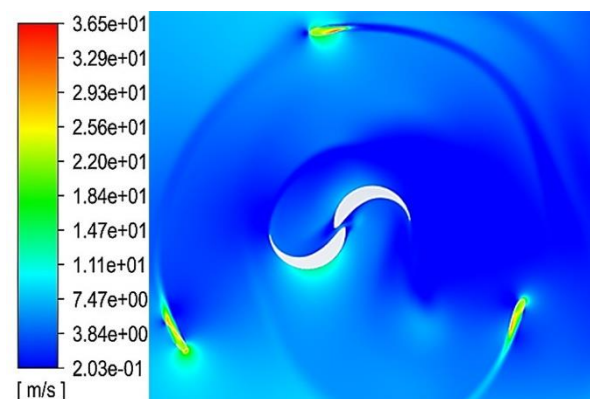


Figure 11. Velocity contour for the three-blade configuration with  $G = 0.03$  at  $TSR = 2.5$ .

اثبات کمی این سازوکار نیاز به استخراج کمیت‌های موضعی جریان وجود دارد.

## ۲- پیکربندی دوپره $TSR = 2.5$ با $G = 0.06$

در میان آرایش‌های دوپره، پیکربندی با  $G = 0.06$  بهترین عملکرد را از خود نشان داد ( $C_{p,max} \approx 0.28$ ) در  $TSR = 2.5$ . با این حال، ضریب توان این حالت به‌طور محسوسی کمتر از پیکربندی بهینه سه‌پره است. برای واکاوی دلایل این افت عملکرد، کانتورهای فشار، سرعت و ورتیسیته در همان نسبت سرعت نوک  $TSR = 2.5$  در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ ارائه شده‌اند. در شکل ۱۳، کانتور فشار برای پیکربندی دوپره با  $G = 0.06$  متر در  $TSR = 2.5$  نشان داده شده است. در مقابل لبه حمله پره پیش‌رونده، ناحیه پرفشار و در سطح مکشی آن ناحیه کم‌فشار ایجاد شده است که بیانگر شکل‌گیری نیروی آیرودینامیکی روی پره است. با توجه به گپ بیشتر بین دو پره ساوینوس، الگوی جریان خروجی از روتور داخلی با حالت  $G = 0.03$  متفاوت است و جریان حاصل، برهم‌کنش متفاوتی با میدان جریان اطراف پره‌های داریوس ایجاد می‌کند. این رفتار با ضریب توان پایین‌تر این پیکربندی  $C_p = 0.28$ ، در مقایسه با حدود ۰.۴۶ برای پیکربندی سه‌پره با  $G = 0.03$  متر سازگار است.

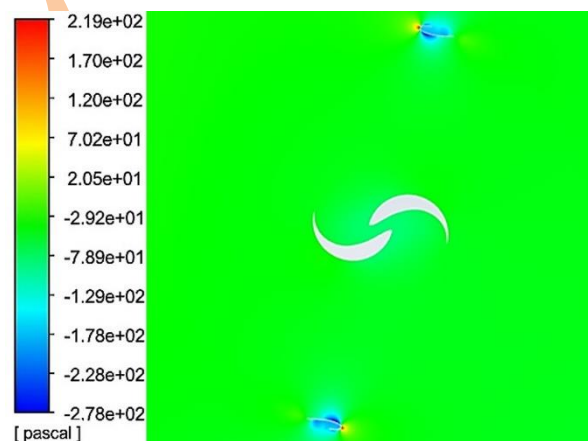


Figure 13. Pressure contour for the two-blade configuration with  $G = 0.06$  at  $TSR = 2.5$ .

شکل ۱۳. کانتور فشار برای پیکربندی دوپره با  $G = 0.06$  در  $TSR = 2.5$ .

در شکل ۱۴، کانتور سرعت برای پیکربندی دوپره با  $G = 0.06$  متر در  $TSR = 2.5$  ارائه شده است. یک ناحیه کم‌سرعت نسبتاً گسترده در بخش داخلی روتور و اطراف دنباله پره‌ها مشاهده می‌شود، در حالی که نواحی با سرعت بالاتر عمدتاً در نزدیکی پره پیش‌رونده و نوک آن متمرکز هستند. فاصله بیشتر بین دو پره ساوینوس باعث می‌شود جریان خروجی ساوینوس پیش از رسیدن به ناحیه پره

داریوس بیشتر پخش و با جریان آزاد مخلوط شود؛ بنابراین، برهم‌کنش متمرکز جریان خروجی ساوینوس با پره داریوس نسبت به حالت  $G = 0.03$  متر کاهش می‌یابد. این الگوی جریان با عملکرد پایین‌تر پیکربندی دوپره، که ضریب توان آن حدود ۰.۲۸ است، سازگاری دارد.

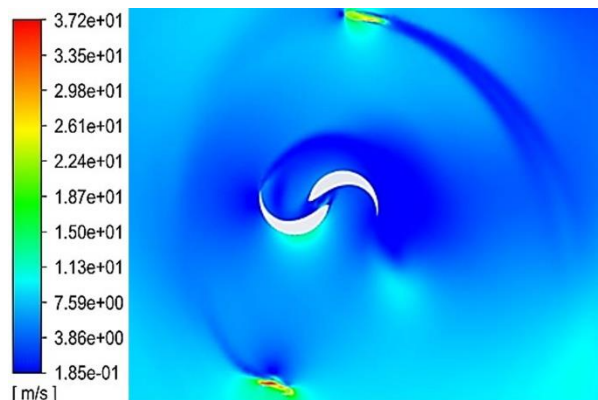


Figure 14. Velocity contour for the two-blade configuration with  $G = 0.06$  at  $TSR = 2.5$ .

شکل ۱۴. کانتور سرعت برای پیکربندی دوپره با  $G = 0.06$  در  $TSR = 2.5$ .

در شکل ۱۵، کانتور ورتیسیته برای پیکربندی دوپره با  $G = 0.06$  متر در  $TSR = 2.5$  نشان داده شده است. مقادیر بالاتر ورتیسیته عمدتاً در نزدیکی لبه‌های پره و نوک آن‌ها متمرکز شده و ساختارهای دنباله‌ای مشخصی در پایین‌دست مشاهده می‌شود. در مقایسه کیفی با پیکربندی سه‌پره، گستردگی بیشتر نواحی ورتیسیته در اطراف پره‌ها و دنباله جریان را می‌توان نشانه‌ای از برهم‌کنش پیچیده‌تر و ناپایداری بیشتر ساختار جریان دانست. با این حال، از آنجا که شدت ورتیسیته به‌صورت کمی از میدان جریان استخراج نشده است، این نتیجه صرفاً بر اساس الگوی کیفی کانتور بیان می‌شود. این رفتار با دامنه بیشتر تغییرات گشتاور و ضریب توان پایین‌تر این پیکربندی سازگار است.

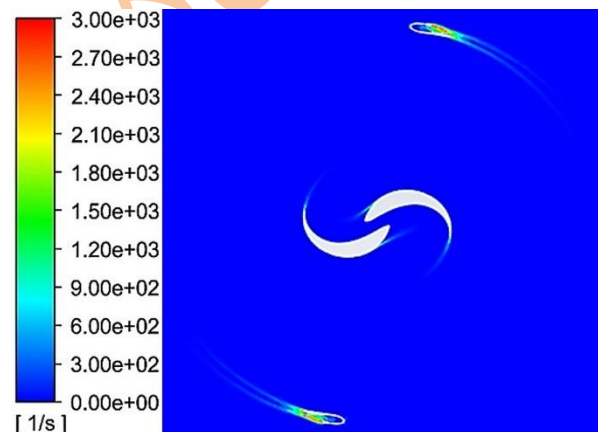


Figure 15. Vorticity contour for the two-blade configuration with  $G = 0.06$  at  $TSR = 2.5$ .

شکل ۱۵. کانتور ورتیسیتیه برای پیکربندی دوپره با  $G = 0.06$  در  $TSR = 2.5$ .

در مجموع، کانتورهای فشار، سرعت و ورتیسیتیه برای پیکربندی دوپره با  $G = 0.06$  متر نشان می‌دهند که گپ بیشتر بین دو پره ساوینوس با تغییر الگوی جریان خروجی از روتور داخلی همراه است و بر نحوه برهم‌کنش این جریان با پره‌های داریوس اثر می‌گذارد. این رفتار کیفی با ضریب توان حدود  $0.28$  این پیکربندی سازگار است که به‌طور محسوسی کمتر از مقدار حدود  $0.46$  در پیکربندی سه‌پره با  $G = 0.03$  متر است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد آیرودینامیکی یک توربین باد محور عمودی هیبریدی متشکل از روتور داریوس جی شکل مبتنی بر مقطع ناکا ۰۰۲۱ و روتور ساوینوس با پره‌های آیرودینامیکی FX74-CL5-140 به‌صورت عددی بررسی شد. در میان پیکربندی‌های مورد مطالعه، آرایش سه‌پره داریوس با گپ  $G = 0.03$  متر بین دو پره روتور ساوینوس، بهترین عملکرد را ارائه داد و در  $TSR = 2.5$  به ضریب توان حدود  $0.46$  رسید که نسبت به مقدار حدود  $0.34$  برای طرح هیبرید مرجع، نشان‌دهنده بهبود  $35.3\%$  است. نتایج نشان داد که افزایش تعداد پره‌های داریوس با توزیع یکنواخت‌تر گشتاور و عملکرد بالاتر همراه است. همچنین، کاهش گپ بین دو پره ساوینوس، به‌ویژه در پیکربندی سه‌پره، برهم‌کنش آیرودینامیکی میان روتورهای داخلی و خارجی را تقویت کرده و با افزایش ضریب توان و گشتاور همراه است. نتایج گشتاور در نسبت‌های سرعت نوک پایین نیز عملکرد مطلوب این پیکربندی را نشان می‌دهد؛ با این حال، اگرچه شبیه‌سازی‌ها ناپایا بوده‌اند، سرعت زاویه‌ای روتورها برای هر  $TSR$  به‌صورت مشخص اعمال شده و فرایند شتاب‌گیری روتور از حالت سکون شبیه‌سازی نشده است. بنابراین، این نتایج را نمی‌توان به‌عنوان اثبات مستقیم قابلیت خودراه‌اندازی در نظر گرفت.

تحلیل کیفی میدان‌های فشار، سرعت و ورتیسیتیه نیز تفاوت در ساختار جریان و برهم‌کنش روتورها را نشان داد که با روند مشاهده‌شده در ضرایب توان و گشتاور سازگار است. با توجه به دویعده بودن شبیه‌سازی‌ها و عدم لحاظ پدیده‌هایی مانند گردابه‌های نوک پره، ارزیابی نهایی عملکرد توربین نیازمند شبیه‌سازی سه‌بعدی و اعتبارسنجی تجربی است. در مجموع، پیکربندی سه‌پره با  $G = 0.03$  متر به‌عنوان پیکربندی برتر در محدوده پارامترهای بررسی‌شده شناخته شد.

#### فهرست علائم

|              |                                                     |
|--------------|-----------------------------------------------------|
| $V_{\infty}$ | سرعت جریان آزاد ورودی (m/s)                         |
| $A$          | سطح مرجع مورد استفاده در محاسبه ضریب توان ( $m^2$ ) |
| $M$          | گشتاور کل روتور هیبریدی ( $N \cdot m$ )             |
| $P$          | توان آیرودینامیکی روتور (W)                         |
| $R$          | شعاع روتور خارجی داریوس (m)                         |
| $R_s$        | شعاع روتور ساوینوس (m)                              |
| $H$          | ارتفاع روتور (m)                                    |
| $C_p$        | ضریب توان                                           |
| $C_m$        | ضریب گشتاور                                         |
| $TSR$        | نسبت سرعت نوک پره                                   |
| $\rho$       | چگالی سیال ( $kg/m^3$ )                             |
| $\omega$     | سرعت زاویه‌ای روتور (rad/s)                         |
| $\mu$        | ویسکوزیته دینامیکی سیال                             |
| $G$          | گپ بین دو پره روتور ساوینوس داخلی (m)               |

#### مراجع

1. International Energy Agency (IEA), 2023, *World Energy Outlook*, IEA Publications, Paris.
2. Lee, J. and Zhao, F. 2024. *Global Wind Report*, Global Wind Energy Council, Brussels.
3. Burton T. Jenkins N. Sharpe D. and Bossanyi, E. 2011. *Wind Energy Handbook*, 2nd Edn., John Wiley & Sons, Chichester.
4. Paraschivoiu, I. 2002. *Wind Turbine Design: With Emphasis on Darrieus Concept*. Presses Internationales Polytechnique, Montreal.
5. Eriksson S. Bernhoff H. and Leijon M. 2008. Evaluation of different turbine concepts for wind power. *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(5), pp.1419–1434, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.017>
6. Akwa J. V. Vielmo H. A. and Petry A. P. 2012. A review on the performance of Savonius wind turbines. *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), pp.3054–3064, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.056>
7. Bhutta M. M. A. Hayat N. Farooq A. U. Ali Z. Jamil S. R. and Hussain Z. 2012. Vertical axis wind turbine – a review of various configurations and design techniques. *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), pp.1926–1939, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.12.004>
8. Saha, U. K. Thotla, S. and Maity D. 2008. Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(8-9), pp.1359–1375, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.03.005>
9. Islam, M. Ting D. S.K. and Fartaj A. 2008. Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. *Journal of Renewable and Sustainable*

- Journal of Sustainability*, 15(11), p.8848, <https://doi.org/10.3390/su15118848>
21. Mehrpooya M. Asadbeigi M. and Ghafoorian F. 2023. Investigation and optimization on effective parameters of a H-rotor Darrieus wind turbine, using CFD method. *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 42(9), <https://doi.org/10.30492/ijcce.2023.562396.5610>
  22. Akhlaghi M. Asadbeigi M. and Ghafoorian F. 2024. Novel CFD and DMST dual method parametric study and optimization of a Darrieus vertical axis wind turbine, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 17(1), pp.205-218, <https://doi.org/10.47176/jafm.17.1.1985>
  23. Najib A. A. Didane D. H. Behery M. R. and Kabrein H. A. 2024. Comparison of 2D and 3D simulations on predicting the performance of a Savonius wind turbine, *CFD Letters*, 16(7), pp. 71-88 <https://doi.org/10.37934/cfdl.17.6.7188>
  24. Toumi Y. Aboujaoude H. and Murer S. 2024. Comparative study of deflector configurations under variable vertical angle of incidence and wind speed through transient 3D CFD modeling of Savonius turbine. *Journal of Computation*, 12, p.204, <https://doi.org/10.3390/computation12100204>
  25. Pranta M. H. Rabbi M. S. and Roshid M. M. 2021. A computational study on the aerodynamic performance of modified Savonius wind turbine. *Journal of Results in Engineering*, 10,100237 <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100237>
  26. Wekesa, C. J. Saake, C. O. and Kamau J. N. 2020. An experimental investigation into performance characteristics of H-shaped and Savonius-type VAWT rotors. *Scientific African*, 10, e00603 <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00603>
  27. Raciti Castelli M. and Ardizzon G. 2010. Modeling strategy and numerical validation for a Darrieus vertical axis micro-wind turbine: fluid flow, heat transfer and thermal systems. *International Mechanical Engineering Congress and Exposition Conference*, pp. 409-418. <https://doi.org/10.1115/IMECE2010-39548>
  28. Wenehenubun F. Saputra A. and Sutanto H. 2015. An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades. *Journal of Energy Procedia*, 68, pp. 297-304, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.259>
  29. Motawej H. Moghimi M. 2019. Developed DMST model for performance analysis and parametric evaluation of Gorlov vertical axis wind turbines. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37,100616, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100616>
  30. Saeidi D. Sedaghat A. and Alamdari P. 2013. Aerodynamic design of vertical axis wind turbines using blade element momentum theory and wind data in the province of south Khorasan. *Sharif Journal of Mechanical Engineering (SJME)*, 29(3), pp. 97-107. [In Persian].
  31. Sedaghat A. and Razavieh A. 2014. Wind potential assessment for installing wind turbines in the province of sisthan and baluchestan. *Sharif Journal of Mechanical Engineering (SJME)*, 30(3), pp. 21-29. [In Persian].
  10. Rezaeiha A. Kalkman I. and Blocken B. 2017. CFD simulation of a vertical axis wind turbine operating at a moderate tip speed ratio: guidelines for minimum domain size and azimuthal increment. *Journal of Renewable Energy*, 107, pp.373-385, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.006>
  11. Pan J. Ferreira C. and van Zuijlen A. 2023. A numerical study on the blade-vortex interaction of a two-dimensional Darrieus-Savonius combined vertical axis wind turbine. *Journal of Physics of Fluids*, 35(12), 125152 <https://doi.org/10.1063/5.0174394>
  12. Le A. D. Pham T. H. Nguyen V. T. and Kim D. H. 2024. Enhancement of aerodynamic performance of Savonius wind turbine with airfoil-shaped blade for the urban application. *Journal of Energy Conversion and Management*, 310, p.118469, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118469>
  13. Farzadi R. Gharapetian D. and Bazargan M. 2024. Comprehensive study of vortices interaction and blades height effect in a Darrieus vertical axis wind turbine with J-type blades. *Journal of Energy Science & Engineering*, 12(10), pp.4371-4393. <https://doi.org/10.1002/ese3.1892Digital>
  14. Zhang W. Li Y. Wang X. and Chen H. 2024. Research on aerodynamic performance of asynchronous-hybrid dual-rotor vertical-axis wind turbines, *Energies, Journal of Energies*, 17(17), p.4424, <https://doi.org/10.3390/en17174424>
  15. Roshan A. Sagharichi A. and Maghrebi M. J. 2020. Nondimensional parameters' effects on hybrid Darrieus-Savonius wind turbine performance. *Journal of Energy Resources Technology*, 142(1), pp. 011202. <https://doi.org/10.1115/1.4044517>
  16. Howell R. Qin N. Edwards J. and Durrani N. 2010. Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine. *Journal of Renewable Energy*, 35(2), pp.412-422, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.025>
  17. Ghafoorian F. Mirmotahari S. R. Eydzadeh M. and Mehrpooya M. 2025. A systematic investigation on the hybrid Darrieus-Savonius vertical axis wind turbine aerodynamic performance and self-starting capability improvement by installing a curtain. *Journal of Next Energy*, 6, p100203, <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2024.100203>
  18. Bhuyan S. and Biswas A. 2014. Investigations on self-starting and performance characteristics of simple H and hybrid H-Savonius vertical axis wind rotors. *Journal of Energy Conversion and Management*, 87, pp. 859-867, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.056>
  19. Zamani M. Maghrebi M. J. and Varedi S. R. 2016. Starting torque improvement using J-shaped straight-bladed Darrieus vertical axis wind turbine by means of numerical simulation. *Journal of Renewable Energy*, 95, pp.109-126, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.069>
  20. Zhang J. Wang C. Liu W. Zhu J. Yan Y. and Zhao H. 2023. Optimization of the energy capture performance of the lift-drag hybrid vertical-axis wind turbine based on the Taguchi experimental method and CFD simulation.