

مطالعه عددی مشخصه های توربین بادی داریوس سه پره با پره های کمکی

چکیده: انرژی باد نویدبخش انرژی پاک است و منبع کافی و یک روش تولید برق بدون آلودگی است. توربین های بادی داریوس، بعنوان یکی از مبدل های انرژی باد، همواره با چالش هایی از جمله مشکل خود راه اندازی رو برو هستند. در پژوهش حاضر، از روش حجم محدود برای بررسی عملکرد آیرودینامیکی توربین داریوس سه پره مجهز به پره های کمکی استفاده شده است. پره های کمکی تحت چندین زاویه اتصال (ψ) روی روتور متعارف داریوس سه پره 0° ، 15° ، 30° ، 45° و 60° مورد آزمایش قرار گرفتند. محاسبات برای سه پتانسیل باد ۷، ۱۰ و ۱۴ متر بر ثانیه و نسبت های مختلف سرعت نوک پره (TSR) در محدوده ۰/۵ تا ۲/۵ انجام گرفت. نتایج حاصل برای روتور سه پره متعارف با داده های موجود در ادبیات فن مقایسه شد و توافق منطقی بین آنها بدست آمد. با تجزیه و تحلیل کلی پارامترهای در نظر گرفته شده، مشخص شد که روتور هیبریدی با زاویه اتصال صفر، حداکثر ضریب توان معادل با 0.2714 ، 0.3265 و 0.3607 را به ترتیب در سرعت های جریان آزاد ۷، ۱۰ و ۱۴ متر بر ثانیه در میان کلیه حالت های بررسی شده فراهم می کند.

واژه های راهنما: توربین بادی داریوس، پره کمکی، ضریب توان، نسبت سرعت نوک پره (TSR)

میلاد محمدنژاد
دانشجوی دکتری

رحیم حسنزاده*

دانشیار،
دانشکده مهندسی
مکانیک،
دانشگاه صنعتی ارومیه،
ارومیه

مقاله علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۳
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۱۱
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۶

Milad
Mohammadnejad
PhD. Student

Rahim
Hassanzadeh*
Associate Professor,
Faculty of Mechanical
Engineering
Urmia University of
Technology, Urmia

Numerical analysis of a three-bladed Darrieus wind turbine with auxiliary blades

Abstract: Wind energy is promising clean energy and is a sufficient source and a method of generating electricity without pollution. Darrieus wind turbines, as one of the wind energy converters, have always some challenges such the self-starting problems. In the present research, using the finite volume method, the aerodynamic performance of a three-bladed Darrieus turbine equipped with auxiliary blades is studied. The auxiliary blades have been tested under several attachment angles (ψ) on a conventional three-blade Darrieus rotor of 0° ، 15° ، 30° ، 45° and 60° . Calculations have been done for three wind potentials of 7، 10 and 14 m/s and different tip speed ratios (TSR) in the range of 0.5 to 2.5. The results obtained for the conventional three-bladed rotor are compared with the data available in the available literature and a reasonable agreement has been obtained between them. With the general analysis of the considered parameters, it has been found that, among all cases under consideration, the hybrid rotor with zero attachment angle has the maximum power factor equivalent to 0.2714، 0.3265 and 0.3607 at free-wind speeds of 7، 10 and 14 m/s, respectively.

Keywords: Darrieus wind turbine, Auxiliary blade, Power coefficient, Tip speed ratio (TSR)

۱- مقدمه

مطالعه عددی توربین بادی هیبریدی محور عمودی که با استفاده از ترکیب روتور داریوس سه پره نوع H با ایرفویل NACA0021 و روتور ساونیوس نوع باخ اصلاح شده در سرعت جریان آزاد ۹ متر بر ثانیه پرداختند. نتایج نشان داد توربین هیبریدی حداکثر ضریب توان ۰/۴۱۴ را در نسبت سرعت نوک پره ۲/۵ فراهم کرده و قابلیت خود راه اندازی توربین هیبریدی نسبت به حالت متعارف را بهبود می‌دهد. لیو و همکاران [۱۳] به بررسی عملکرد آیرودینامیکی از جمله قابلیت خود راه اندازی و راندمان استحصال انرژی یک روتور هیبریدی جدید با استفاده از رویکرد تعامل ساختار سیال- جامد پرداختند. در این مطالعه، بهترین عملکرد استحصال انرژی در TSR برابر با ۲/۳ با بهبود ۳۷/۵٪ حاصل می‌گردد. در مطالعه‌ای دیگر، پالاتا و همکاران [۱۴] توربین بادی هیبریدی با روتور خارجی داریوس سه پره با ایرفویل NACA4418 و روتور داخلی ساونیوس نوع باخ اصلاح شده دو پره را در اعداد رینولدز متفاوت در داخل تونل باد تحلیل نمودند. آنها گزارش دادند که توربین هیبریدی در نسبت‌های سرعت نوک پره کمتر از ۱/۵، ضریب توان را نسبت به روتور داریوس، بیش از ۲۰٪ افزایش می‌دهد که این میزان بهبود در نسبت سرعت نوک تقریباً ۰/۷ به ۰/۴۰ می‌رسد. عبدالسلام و همکاران [۱۵] در مطالعه‌ای عددی، تاثیرات نسبت شعاع روتور داریوس دو و سه پره با ایرفویل NACA0021 بر شعاع روتور ساونیوس مارپیچ و زاویه اتصال پره‌های روتور داخلی را بر عملکرد توربین بادی هیبریدی در سرعت جریان آزاد ۷ متر بر ثانیه مطالعه نمودند. در پژوهش آن‌ها، ارتفاع روتور داریوس و ساونیوس به ترتیب برابر با ۱ و ۰/۶ متر در نظر گرفته شده است. مطابق نتایج بدست آمده مشخص شده است در هر دو روتور داریوس دو و سه پره، نسبت شعاع و زاویه اتصال بهینه به ترتیب برابر با ۰/۴۳ و ۳۰° می‌باشد که ضریب توان ماکزیمم ۰/۴۹ را حاصل می‌کند. علاوه بر این، با توجه به افزایش مقدار ضریب گشتاور استاتیکی در توربین هیبریدی در مقایسه با روتور داریوس، توانایی خود راه اندازی نیز بهبود یافته است.

در سال ۲۰۲۲، تریپاتی و همکاران [۱۶] بصورت عددی عملکرد توربین بادی هیبریدی، متشکل از سه پره داریوس- دو پره ساونیوس را در نسبت سرعت نوک پره ۱ تا ۱/۴ و سرعت جریان آزاد ۹ متر بر ثانیه را مورد مطالعه قرار دادند. طبق نتایج حاصل شده، روتور هیبریدی در نسبت سرعت نوک پره ۱/۳ و ۱/۴، مقادیر ضریب توان را در مقایسه با روتور داریوس متعارف به ترتیب ۵/۶۶٪ و ۸/۳۹٪ افزایش می‌دهد.

انرژی باد را می‌توان توسط انواع مختلفی از توربین‌های بادی استخراج کرد که عمدتاً با توجه به محور چرخش آن‌ها طبقه بندی می‌شوند: توربین‌های بادی محور افقی^۱ و توربین‌های بادی محور عمودی^۲. توربین‌های بادی محور عمودی دارای مزایایی نسبت به توربین‌های بادی محور افقی هستند، مانند قابلیت دریافت باد از همه جهات یا امکان نصب ژنراتور در پایین روتور به جای بالای برج. از سوی دیگر، توربین‌های بادی محور عمودی محدودیت‌هایی دارند زیرا کارایی کمتری نسبت به توربین‌های بادی محور افقی دارند [۱] و در معرض نیروهای نوسانی بر روی پره‌ها هستند که می‌تواند منجر به مشکلات خستگی در ساختار توربین شود. علاوه بر این، به دلیل تغییر مکرر زاویه حمله پره‌ها نسبت به جریان باد، توربین‌های محور عمودی دارای آیرودینامیک پیچیده‌ای هستند [۲]. با این حال، توربین‌های بادی محور عمودی برای تولید برق در مقیاس کوچک با سرعت باد کم، مانند استفاده خانگی، به لطف پیشرفت در آیرودینامیک، ساختار و طراحی مواد که آنها را کارآمدتر و قابل اعتمادتر کرده است، بسیار جذاب می‌باشند [۳].

اساس توربین‌های بادی محور عمودی نوع ساونیوس بر نیروی پسا^۳ می‌باشد و عمدتاً برای کاربردهای توان در مقیاس کوچک استفاده می‌شوند. از سوی دیگر، توربین‌های بادی محور عمودی نوع داریوس مبتنی بر نیروی برا^۴ بوده و معمولاً از دو یا چند ایرفویل تشکیل شده‌اند. راندمان تبدیل انرژی بالا اما قابلیت خود راه اندازی بسیار ضعیف از مشخصه‌های روتورهای داریوس می‌باشد [۴]. مطالعات فراوانی در زمینه بهبود عملکرد توربین‌های بادی داریوس انجام گرفته است که عمدتاً بر اساس تغییر شکل پروفیل پره [۵-۸] و یا استفاده از انواع سازه‌های خارجی برای متمرکز کردن جریان باد روی روتور [۹-۱۱] می‌باشد.

توربین‌های بادی هیبریدی از جمله مطالعات صورت گرفته در این زمینه می‌باشد که اساس شکل‌گیری این نوع از توربین‌ها، بر پایه ترکیب دو نوع روتور داریوس و ساونیوس می‌باشد. هدف از اینکار رفع مشکل خود راه اندازی روتور اصلی داریوس در مناطق با پتانسیل باد کم می‌باشد. عمدتاً در توربین‌های هیبریدی، روتور ساونیوس بعنوان روتور داخلی و روتور داریوس بعنوان روتور خارجی توربین در نظر گرفته می‌شود. از جمله‌ای این مطالعات می‌توان به پژوهش صورت گرفته توسط حسینی و گودرزی [۱۲] در سال ۲۰۱۹ اشاره کرد که به

³ Drag⁴ Lift¹ HAWTs² VAWTs

بررسی قرار می‌گیرد. استفاده از پره‌های کمکی یکسان با پره‌های اصلی از نظر هندسی، دامنه وسیع‌تر نسبت سرعت نوک بی بعد، سرعت‌های باد آزاد متفاوت و زوایای اتصال مختلف از نوع آوری-های کار حاضر می‌باشد که در کارهای مشابه قبلی سابقه ندارد.

۲- مشخصات هندسی روتور

در مطالعه حاضر، مشخصات هندسی روتور متعارف در نظر گرفته شده مطابق با پژوهش صورت گرفته توسط غزاله و همکاران [۲۰] می‌باشد. مطابق شکل (۱)، روتور در نظر گرفته شده دارای ۳ پره اصلی و ۳ پره کمکی می‌باشد. پروفیل مقطع پره‌های اصلی و کمکی و مشخصات هندسی آنها یکسان می‌باشد. پره‌های اصلی و کمکی به ترتیب روتور اصلی و روتور کمکی را تشکیل می‌دهند. برای بررسی تاثیر زاویه اتصال (ψ) روتور کمکی نسبت به روتور اصلی و بدست آوردن مقدار مناسب آن، زوایای اتصال مختلفی همچون 0° ، 15° ، 30° ، 45° و 60° بررسی شده است. مضافاً اینکه محاسبات برای مقادیر TSR در محدوده $0/5$ تا $2/5$ انجام شده است. همچنین برای بررسی عملکرد روتور داریوس مجهز به پره‌های کمکی در مناطق با پتانسیل باد مختلف، سرعت‌های جریان باد متفاوتی همچون 7 ، 10 و 14 متر بر ثانیه آزمایش شده است. در این مطالعه، نسبت شعاع روتور داخلی به روتور اصلی (r/R) برابر مقدار ثابت $0/8$ در نظر گرفته شده است. در جدول (۱) جزئیات هندسی روتور مورد نظر ارائه شده است.

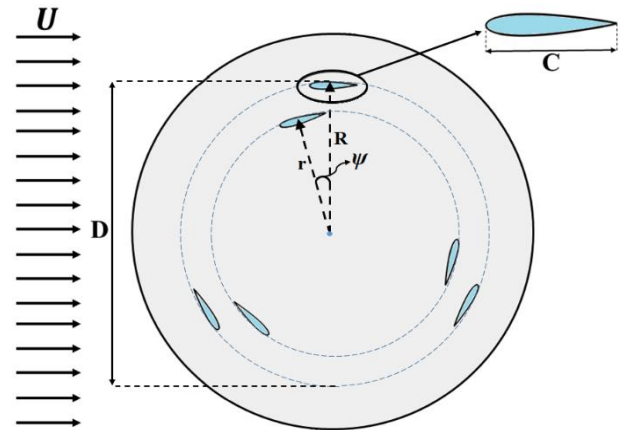
۳- شرایط مرزی و معادلات حاکم

در این پژوهش، عملکرد روتور داریوس مجهز به پره‌های کمکی بصورت دو بعدی با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از یک دامنه محاسباتی مستطیلی شکل، مطابق شکل (۲) استفاده شده است که شامل دو ناحیه مجزا یعنی ناحیه چرخان (ناحیه در برگیرنده روتور) و ناحیه ساکن (ناحیه دور از روتور) می‌باشد. در مرز ورودی دامنه محاسباتی از شرط سرعت یکنواخت با شدت آشفتگی 5% در مرز خروجی از شرط مرزی فشار اتمسفریک و در مرزهای جانبی از شرط مرزی تقارن استفاده شده است. روی پره‌های اصلی و کمکی از شرط عدم لغزش و در مرز مشترک بین ناحیه چرخان و ناحیه ساکن از شرط مرز مشترک استفاده شده است.

اسدی و حسنزاده [۱۷] در یک مطالعه عددی، عملکرد توربین بادی هیبریدی با روتور خارجی داریوس دو پره با ایرفویل‌های متقارن ناکا $10 \cdot 18$ یکسان و روتور داخلی ساوننیوس نیم دایره‌ای و باخ را در دو سرعت جریان آزاد 5 و 10 متر بر ثانیه مقایسه نمودند. طبق نتایج به دست آمده، روتور ساوننیوس نوع باخ عملکرد بهتری نسبت به نیم دایره از خود نشان می‌دهد. علاوه بر این، ماکزیمم بهبود عملکرد توربین بادی هیبریدی مجهز به روتور نوع باخ تحت زاویه اتصال 90° درجه، نسبت سرعت نوک پره $1/5$ و سرعت ورودی 5 متر بر ثانیه 20% گزارش گردیده است. استفاده از پره کمکی از دیگر مطالعات صورت گرفته در زمینه بهبود عملکرد توربین‌های بادی داریوس می‌باشد. آرپینو و همکاران [۱۸] به صورت عددی، عملکرد توربین بادی محور عمودی داریوس با سه زوج پره که هر کدام از یک ایرفویل اصلی و کمکی تشکیل شده‌اند را در نسبت سرعت نوک پره 1 تا 2 و سرعت جریان ورودی 12 متر بر ثانیه مورد بررسی قرار دادند. طول وتر پره اصلی و کمکی به ترتیب برابر با $47/2$ و $26/9$ میلی‌متر می‌باشد. نتایج حاصل بیانگر این موضوع است که حداکثر ضریب توان در نسبت سرعت نوک پره $1/5$ برابر با $0/18$ حاصل می‌شود. همچنین، در سرعت‌های باد کم و نسبت سرعت نوک پره پایین، روتور معرفی شده دارای ضریب توان بالاتری در مقایسه با روتور متعارف می‌باشد.

در سال 2022 ، احمد و همکاران [۱۹] به صورت عددی توربین بادی محور عمودی داریوس سه پره نوع H دوگانه را مورد بررسی قرار دادند. لازم به ذکر است که ایرفویل‌های اصلی و کمکی به ترتیب دارای طول وتر $0/546$ و $0/5$ متر و ارتفاع $3/12$ و $1/605$ متر می‌باشد. حداکثر ضریب توان در نسبت سرعت نوک پره $3/23$ و برابر $0/475$ می‌باشد که در مقایسه با روتور متعارف حدوداً 10 درصد بهبود را نشان می‌دهد. همچنین، مثبت بودن ضریب گشتاور استاتیکی در تمام زوایای حمله نشانگر این موضوع است که توربین بادی پیشنهادی کاملاً خود راه انداز می‌باشد. همچنین در سرعت‌های باد پایین و نسبت سرعت نوک پره پایین در مقایسه با روتور متعارف دارای ضریب توان بالاتری می‌باشد.

در مقاله حاضر عملکرد توربین بادی داریوس متعارف مجهز به پره‌های کمکی یکسان نسبت به پره‌های اصلی با استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی به شکل دو بعدی تحلیل می‌شود. متغیرهایی همچون زاویه اتصال پره‌های کمکی نسبت به پره‌های اصلی، سرعت نوک پره و سرعت جریان آزاد باد مورد



شکل ۱ نمای شماتیک توربین بادی داریوس سه پره با پره‌های کمکی

جدول ۱ مشخصات هندسی روتور

جزئیات	پارامترها
۰/۴ m	طول پره (C)
۲/۵ m	قطر روتور (D)
NACA0015	نوع ایرفویل‌های اصلی
NACA0015	نوع ایرفویل‌های کمکی
پره‌های مستقیم	نوع پره ها
۰/۸	نسبت شعاع (r/R)
۰°، ۱۵°، ۳۰°، ۴۵°، ۶۰°	زاویه اتصال (psi)
۷، ۱۴، ۱۰ m/s	سرعت ورودی (U)

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u_i' u_j'} \right) \quad (۲)$$

برای شبیه‌سازی جریان آشفته حول روتور، مطابق با مطالعات قبلی، از مدل SST $k-\omega$ استفاده شده است. برای حل معادلات حاکم، کلیه عبارات ادوکشن و دیفیوژن به ترتیب از روش بالادست مرتبه دوم و تفاضل مرکزی گسسته شده است. مشتقات زمانی نیز با روش مرتبه دوم ضمنی گسسته شده‌اند. برای اتصال میادین سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل^۱ استفاده شده است. معیار همگرایی حل برای کلیه متغیرها برابر 10^{-6} لحاظ گردیده است. همچنین، از گام زمانی معادل با $0/3$ درجه چرخش روتور برای شبیه‌سازی استفاده شده است. علاوه بر معادلات حاکم بر مساله، از پارامترهای بی بعد زیر برای ارزیابی مشخصه‌های توانی روتور مورد نظر استفاده شده‌است:

$$TSR = \frac{\omega_o D}{2U} \quad (۳)$$

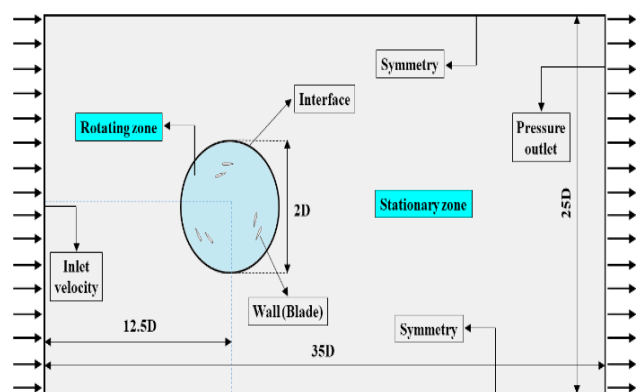
$$C_P = \frac{M \omega_o}{\frac{1}{2} \rho D U^3 H} \quad (۴)$$

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{4} \rho U^2 D^2} \quad (۵)$$

$$C_P = TSR \cdot C_M \quad (۶)$$

۴- شبکه‌بندی و نتایج استقلال از شبکه

در شکل (۳) جزئیات مربوط به شبکه محاسباتی گزارش شده است. شبکه‌بندی ناحیه دوار بصورت متحرک و از نوع لغزشی و ناحیه ساکن بصورت ثابت می‌باشد. ناحیه چرخان، به دلیل تاثیر چرخش روتور بر جریان که باعث ایجاد گرادیان شدید سرعت و فشار می‌شود، از اهمیت بالایی برخوردار است. در این ناحیه برعکس ناحیه ساکن که از شبکه‌بندی با سازمان استفاده شده است، برای پوشش بهتر از شبکه‌بندی بی‌سازمان استفاده شده است. روی پره‌ها، از شبکه‌بندی مرزی مطابق شکل (۳) استفاده شده است که شامل ۱۰ لایه با ضریب رشد ۱/۱ می‌باشد. ضخامت لایه اول برابر با 10^{-4} متر در نظر گرفته شده است که معادل با حداکثر مقدار تابع دیواره بی بعد $3/28$ می‌باشد.



شکل ۲ ابعاد ناحیه محاسباتی و شرایط مرزی

معادلات ناویر استوکس دو بعدی ناپایا برای مساله مورد نظر به صورت زیر می‌باشند:

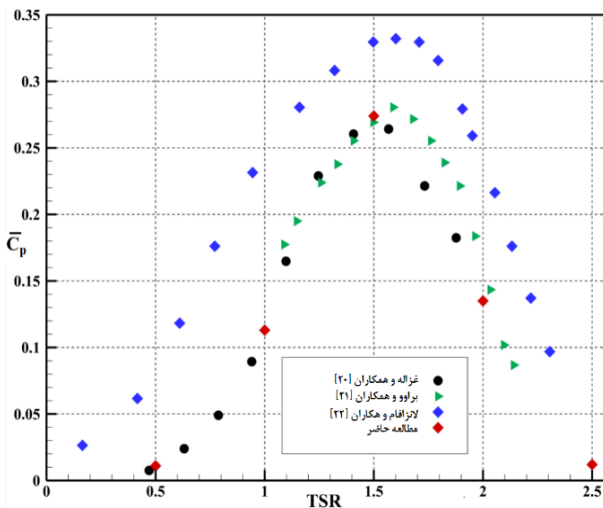
$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۱)$$

^۱ SIMPLE

۰/۰۶۱٪ می‌باشد. لذا از ساختار شبکه‌بندی دوم برای شبیه‌سازی ها در این پژوهش استفاده شده است.

۵- اعتبارسنجی

در مطالعه حاضر، برای اطمینان از صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی، نتایج بدست آمده برای روتور متعارف در سرعت جریان آزاد ۸ متر بر ثانیه با داده‌های عددی و تجربی ارائه شده توسط غزاله و همکاران [۲۰]، براوو و همکاران [۲۱] و لانزافام و همکاران [۲۲] مطابقت داده شده است. نتایج در شکل (۴) ارائه گردیده است. با توجه به نتایج، مشاهده می‌گردد که مقادیر حاصل، تطابق بسیار خوبی با نتایج عددی و تجربی دارند. حداکثر خطای بوجود آمده بین داده‌های حاضر و داده‌های تجربی [۲۲] برابر ۰/۶۱۸۹٪ می‌باشد.



شکل ۴ نتایج اعتبارسنجی

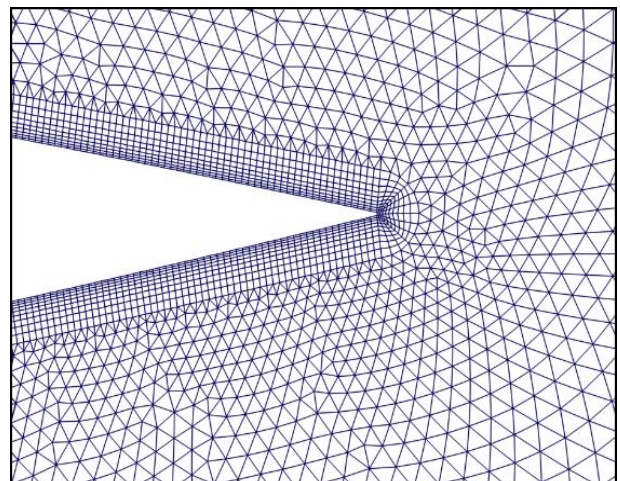
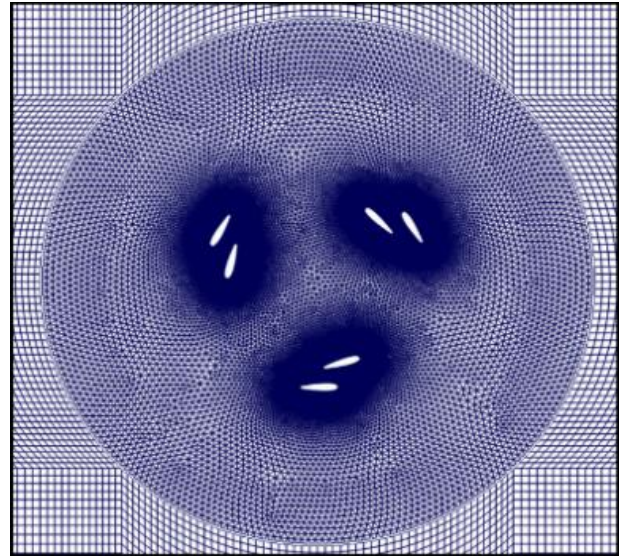
۶- نتایج

در بخش حاضر، ابتدا جریان لحظه‌ای و میدان‌های سرعت بی بعد شده جریان باد آزاد حول روتور توربین مورد بحث قرار می‌گیرد. سپس تغییرات ضریب گشتاور در یک دور کامل روتور تحلیل می‌گردد و در نهایت مقادیر ضریب توان متوسط تمامی روتورهای مورد بررسی ارائه می‌گردد.

در شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) میدان‌های سرعت نرمال شده جریان باد حول روتور ترکیبی به ترتیب در زوایای فضایی ۰°، ۴۵° و ۹۰° برای سرعت نوک بی بعد ۱/۵ و سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه قابل مشاهده می‌باشد. از تجزیه و تحلیل میدان‌های سرعت به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی موجود در شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) می‌توان رفتار فیزیکی روتور در مواجهه با جریان

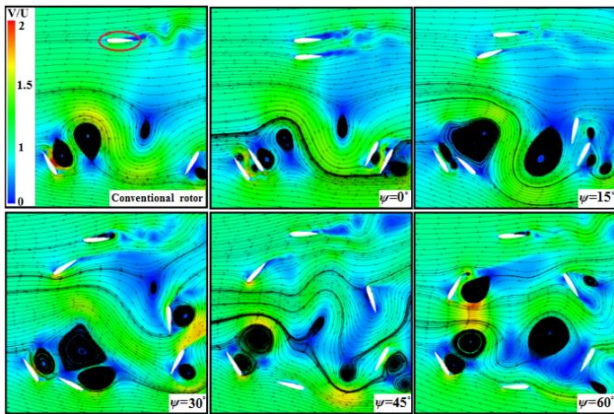
جدول ۲ استقلال نتایج از شبکه‌بندی برای زاویه اتصال ۰°، سرعت نوک بی بعد ۱/۵ و سرعت جریان آزاد ۱۰ متر بر ثانیه

شماره شبکه	تعداد گره	\bar{C}_M	\bar{C}_P	درصد خطا
۱	۴۶۶۷۷۳	۰/۲۳۰	۰/۳۴۵	---
۲	۷۱۳۲۹۱	۰/۲۱۷	۰/۳۲۶	۵/۸۲
۳	۹۵۲۳۳۵	۰/۲۱۶	۰/۳۲۴	۰/۶۱

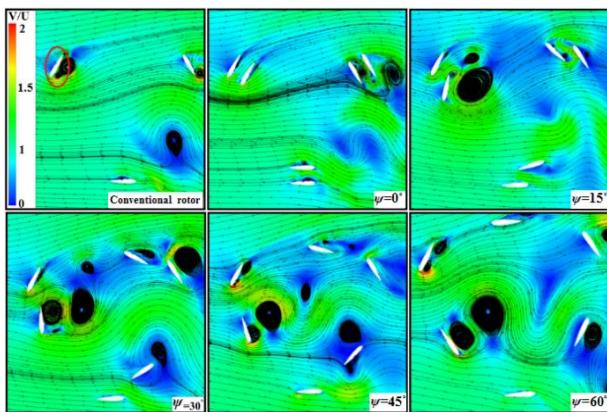


شکل ۳ شبکه‌بندی ناحیه محاسباتی

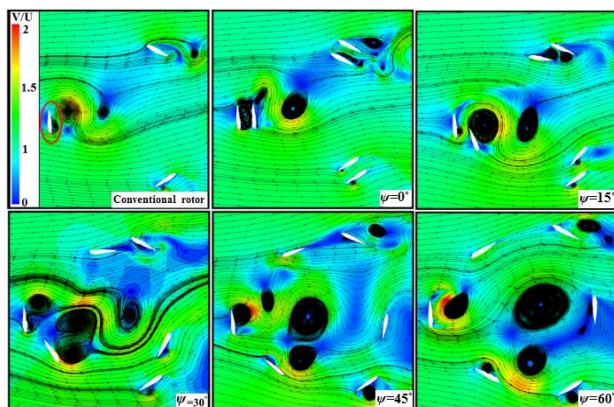
برای مطالعه استقلال نتایج از شبکه‌بندی، سه شبکه‌بندی مختلف شامل ۴۶۶۷۷۳، ۷۱۳۲۹۱ و ۹۵۲۳۳۵ گره مورد بررسی قرار گرفته است. جدول (۲) نتایج تاثیر وضوح شبکه‌بندی بر مقادیر متوسط ضریب توان و گشتاور را برای زاویه اتصال ۰°، سرعت نوک بی بعد ۱/۵ و سرعت جریان آزاد ۱۰ متر بر ثانیه ارائه می‌دهد. با بررسی نتایج ارائه شده در جدول (۲) می‌توان دریافت که مقدار خطای ایجاد شده بین شبکه‌بندی دوم و سوم



شکل ۵ میدان سرعت لحظه‌ای بی‌بعد در اطراف روتور توربین داریوس در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه، نسبت سرعت نوک پره ۱/۵ و زاویه فضایی ۰°



شکل ۶ میدان سرعت لحظه‌ای بی‌بعد در اطراف روتور توربین داریوس در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه، نسبت سرعت نوک پره ۱/۵ و زاویه فضایی ۴۵°

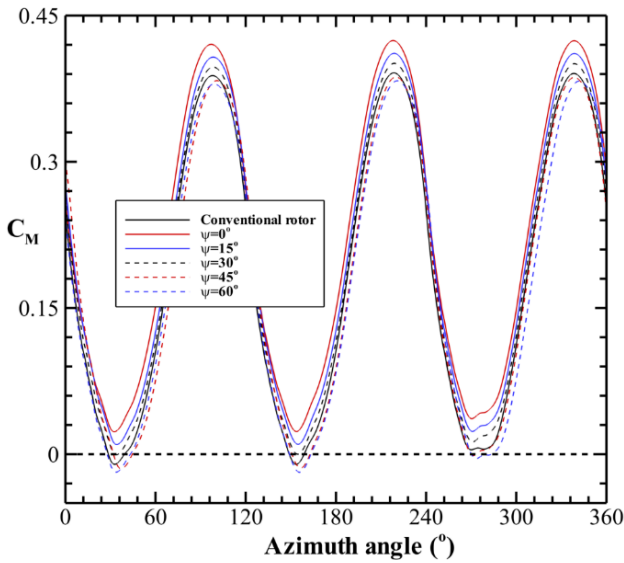


شکل ۷ میدان سرعت لحظه‌ای بی‌بعد در اطراف روتور توربین داریوس در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه، نسبت سرعت نوک پره ۱/۵ و زاویه فضایی ۹۰°

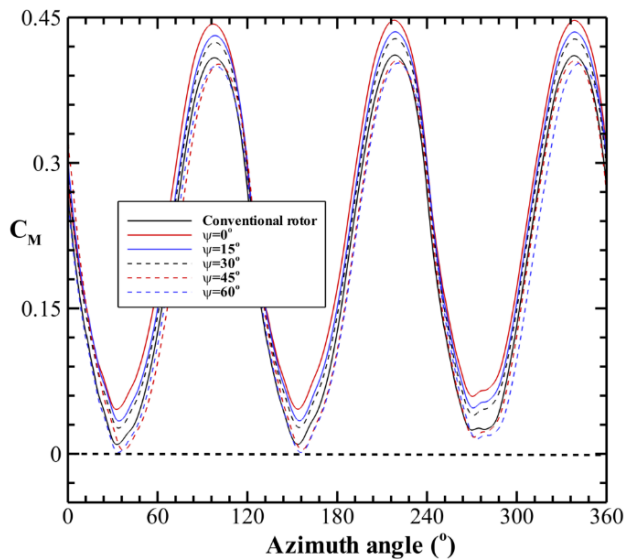
از سوی دیگر، با قرارگیری خط وتر پره‌های اصلی و کمکی ردیف اول عمود بر جریان نزدیک شونده، این ردیف از پره‌ها را می‌توان به‌عنوان بیشترین تولید کننده جریان گردابه‌ای معرفی کرد که منجر به از بین رفتن انرژی جنبشی جریان تزریق شونده

باد آزاد را توضیح داد که منجر به شرایط حداکثر و حداقل گشتاور تولید شده توسط روتور می‌شود. در زاویه فضایی صفر درجه، همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود بیشترین اختلاف فشار و در نتیجه نیروی برا روی پره ردیف اول مشخص شده با رنگ قرمز رخ می‌دهد. لذا این پره هم در روتور رایج و هم در روتورهای مجهز به پره کمکی بدون توجه به زاویه اتصال، بیشترین تولید کننده گشتاور مفید می‌باشد. از سوی دیگر، پره‌های دیگر به دلیل اینکه خط وتر آنها در مقابل جریان باد نزدیک شونده قرار گرفته است تولید گردابه‌های بزرگ می‌کنند که در اثر جدایی جریان از لبه انتهایی پره می‌باشد. این رخداد منفی در روتور ترکیبی به دلیل عبور بخشی از جریان نزدیک شونده از میان دو پره اصلی و کمکی ردیف دوم در زاویه اتصال صفر درجه تعدیل می‌شود و در نتیجه گردابه‌های تولید شده توسط این ردیف از پره‌ها نسبت به پره مشابه حالت مرجع کوچکتر می‌شود. با افزایش زاویه اتصال به ۱۵ درجه گردابه‌های تولید شده توسط پره‌های ردیف دوم سطح وسیعتری در داخل روتور اشغال کرده و جریان تزریقی به درون روتور بدون اندرکنش قابل توجهی با پره‌های ردیف سوم از روتور خارج می‌شود. به همین دلیل میدان سرعت درون روتور نسبت به حالت مرجع و روتور ترکیبی با زاویه صفر درجه تقلیل می‌یابد. با افزایش بیشتر زاویه اتصال تعداد گردابه‌های ایجاد شده درون روتور ترکیبی و انحراف جریان باد تزریق شده به درون روتور تشدید می‌شود. در زاویه فضایی ۴۵ درجه،

مطابق با شکل (۶)، در پشت پره اصلی حالت مرجع گردابه ای بزرگ در اثر جدایی جریان رخ می‌دهد که منجر به تقلیل گشتاور مفید تولید شده توسط این گره می‌شود. همچنین در مرکز روتور، جریان گردابه ای تشکیل می‌شود که عملکرد پره دوم را در حین عبور از این ناحیه کاهش می‌دهد. در روتور مجهز به پره کمکی با زاویه اتصال صفر درجه، با تزریق جریان بین دو پره اصلی و کمکی اول، هیچ گردابه‌ای تشکیل نشده و همچنین گردابه‌ای در مرکز روتور مشاهده نمی‌شود که منجر به افزایش تولید گشتاور مثبت پره‌های اول و دوم می‌شود. با افزایش زاویه اتصال به ۱۵ درجه، پره کمکی ردیف اول تولید کننده گردابه‌های بزرگ می‌شود که عمدتاً به دلیل قرارگیری خط وتر پره مذکور در مقابل جریان می‌باشد. پس از این زاویه اتصال، جریان‌های گردابه‌ای و انحراف شدید جریان در داخل روتور بصورت تابعی از زاویه اتصال درون روتور گسترش پیدا می‌کند. در شکل (۷) میدان سرعت نرمال شده برای زاویه فضایی ۹۰ درجه به تصویر کشیده شده است. در این زاویه، بیشترین گشتاور تولید شده را می‌توان برای پره‌های اصلی و کمکی ردیف سوم اختصاص داد.



شکل ۹ تغییرات ضریب گشتاور در یک دور کامل روتور داریوس با زاویه اتصال پره کمکی متفاوت 0° ، 15° ، 30° ، 45° و 60° و مقایسه داده های تحت سرعت نوک پره $1/5$ و سرعت باد 10 متر بر ثانیه

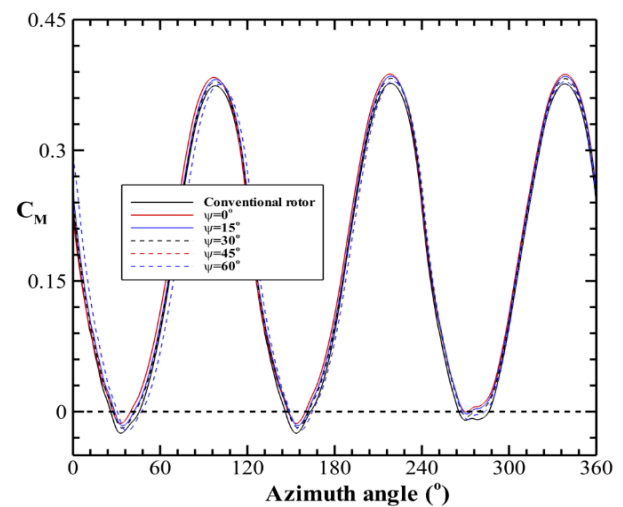


شکل ۱۰ تغییرات ضریب گشتاور در یک دور کامل روتور داریوس با زاویه اتصال پره کمکی متفاوت 0° ، 15° ، 30° ، 45° و 60° و مقایسه داده های تحت سرعت نوک پره $1/5$ و سرعت باد 14 متر بر ثانیه

در ادامه، جداول (۳)، (۴) و (۵) ضریب توان متوسط به ترتیب برای روتورهای داریوس و روتور مجهز به پره های کمکی تحت زوایای اتصال 0° ، 15° ، 30° ، 45° و 60° در سرعت نوک پره $0/5$ تا $2/5$ و سرعت باد آزاد 7 ، 10 و 14 متر بر ثانیه را نشان می دهد. با توجه به نتایج می توان دریافت که افزایش سرعت باد، ضریب توان روتور داریوس و روتور ترکیبی برای تمامی زوایای اتصال و سرعت نوک پره را افزایش می دهد. بیشترین ضریب توان مربوط به زاویه اتصال صفر درجه معادل با $0/2714$ ، $0/3265$ و $0/3607$ را به ترتیب در سرعت های جریان آزاد 7 ، 10 و 14 متر بر ثانیه در میان کلیه حالت های بررسی شده فراهم می کند. پس

به داخل روتور می شود. با مشاهده میدان سرعت درون روتور مجهز به پره های کمکی می توان دریافت که بعد از زاویه اتصال 15° درجه، علاوه بر کاهش میدان سرعت درون روتور، تولید گردابه های بزرگ و انحراف جریان بصورت قابل توجهی توسعه پیدا کرده است.

شکل های (۸)، (۹) و (۱۰) بیانگر تغییرات ضریب گشتاور در یک دور کامل روتور می باشند و تغییرات در هر سه مورد برای زاویه اتصال پره کمکی متفاوت 0° ، 15° ، 30° ، 45° و 60° تحت سرعت نوک پره $1/5$ به ترتیب در سه سرعت باد 7 ، 10 ، 14 متر بر ثانیه می باشد. با هدف مقایسه، داده های روتور مرجع نیز ارائه شده است. با بررسی نتایج ارائه شده مشاهده می گردد که بیشترین مقدار ضریب گشتاور در هر سه سرعت باد آزاد، در زاویه حمله 95° ، 220° و 335° درجه رخ می دهد. از سوی دیگر کمترین مقدار ضریب گشتاور در زاویه حمله 40° ، 155° و 275° ایجاد می گردد. در سرعت باد 7 متر بر ثانیه تمامی روتورها گشتاور منفی را در زوایای بیان شده ایجاد می کنند و با ایجاد گشتاور منفی، بصورت جزئی وارد ناحیه مرده (ناحیه ای با گشتاور منفی) می شوند. ورود به ناحیه مرده عمدتاً مشکلاتی همچون عدم خود راه اندازی روتور را به همراه خواهد داشت. با افزایش سرعت باد آزاد به 10 متر بر ثانیه، روتور با پره کمکی با زاویه اتصال 0° و 15° هیچگونه گشتاور منفی ایجاد نمی کنند و با افزایش سرعت باد آزاد به 14 متر بر ثانیه، هیچ یک از روتورها گشتاور منفی ایجاد نمی کنند. با بررسی بیشتر می توان دریافت که روتور مجهز به پره کمکی تحت زاویه صفر درجه بیشترین گشتاور تولیدی را به همراه خواهد داشت. پس از آن، روتور با زاویه اتصال 15° درجه را می توان به عنوان روتور بهینه معرفی کرد.



شکل ۸ تغییرات ضریب گشتاور در یک دور کامل روتور داریوس با زاویه اتصال پره کمکی متفاوت 0° ، 15° ، 30° ، 45° و 60° و مقایسه داده های تحت سرعت نوک پره $1/5$ و سرعت باد 7 متر بر ثانیه

جدول ۴ تغییرات ضریب توان برای سرعت ۱۰ متر بر ثانیه در نسبت سرعت نوک پره متفاوت

TSR	C_P				
	۱۵°	۳۰°	۴۵°	۶۰°	روتور متعارف
۰/۵	۰/۰۱۳۹	۰/۰۱۱۶	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۶۰	۰/۰۱۰۶
۱	۰/۱۴۵۶	۰/۱۲۵۹	۰/۱۱۵۴	۰/۱۰۴۴	۰/۱۱۲۸
۱/۵	۰/۳۲۶۵	۰/۲۹۱۴	۰/۲۷۱۵	۰/۲۶۲۲	۰/۲۷۴۹
۲	۰/۱۵۸۶	۰/۱۳۴۷	۰/۱۲۲۲	۰/۱۱۷۱	۰/۱۳۵۱
۲/۵	۰/۰۱۹۰	۰/۰۱۶۳	۰/۰۱۵۱	۰/۰۱۴۴	۰/۰۱۱۱

از آن روتور ترکیبی با زاویه اتصال ۱۵ درجه بیشترین ضریب توان را فراهم می‌کند. نکته قابل توجه این است که در مقادیر سرعت نوک بی بعد کوچک همچون ۰/۵، مقدار ضریب توان روتور ترکیبی با زاویه اتصال بزرگتر یا مساوی ۴۵ درجه کمتر از حالت مرجع می‌باشد. لیکن با افزایش سرعت باد آزاد و مقدار سرعت نوک بی‌بعد این شرایط منفی برای روتور ترکیبی در مقایسه با حالت مرجع در زوایای اتصال بزرگتر تعدیل می‌شود.

۷- نتیجه گیری

در مطالعه‌ی حاضر، شبیه‌سازی‌های دوبعدی برای ارزیابی عملکرد یک توربین بادی محور عمودی داریوس مجهز به پره‌های کمکی انجام شده است. اثرات زوایای مختلف اتصال ۰°، ۱۵°، ۳۰°، ۴۵° و ۶۰° و نسبت سرعت نوک پره، مقادیر ۰/۵ تا ۲/۵ تحت سه جریان باد آزاد با مقادیر ۰/۷، ۱۰، ۱۴ متر بر ثانیه بررسی گردید. علاوه بر این، توپولوژی رفتار فیزیکی جریان مربوط به پره‌ها با تحلیل میدان سرعت بر روی سطح ایرفویل‌ها به صورت عددی انجام گردید و عملکرد توربین از نظر ضرایب توان و گشتاور تولید شده بصورت تابعی از زاویه اتصال روتور و نسبت سرعت نوک پره ارزیابی شد.

جدول ۵- تغییرات ضریب توان برای سرعت ۱۴ متر بر ثانیه در نسبت سرعت نوک پره متفاوت

TSR	C_P				
	۱۵°	۳۰°	۴۵°	۶۰°	روتور متعارف
۰/۵	۰/۰۱۵۴	۰/۰۱۳۸	۰/۰۰۹۴	۰/۰۰۶۹	۰/۰۱۵۲
۱	۰/۱۶۱۴	۰/۱۴۷۲	۰/۱۳۲۳	۰/۱۱۵۳	۰/۱۳۹۷
۱/۵	۰/۳۶۰۷	۰/۳۳۲۱	۰/۲۹۹۴	۰/۲۹۲۱	۰/۳۰۴۹
۲	۰/۱۶۷۴	۰/۱۵۴۱	۰/۱۳۲۳	۰/۱۳۱۶	۰/۱۵۶۰
۲/۵	۰/۰۲۴۸	۰/۰۲۳۱	۰/۰۲۱۸	۰/۰۲۰۵	۰/۰۲۴۳

جدول ۳ تغییرات ضریب توان برای سرعت ۷ متر بر ثانیه در نسبت سرعت نوک پره متفاوت

TSR	C_P				
	۱۵°	۳۰°	۴۵°	۶۰°	روتور متعارف
۰/۵	۰/۰۱۱۷	۰/۰۱۰۲	۰/۰۰۸۷	۰/۰۰۶۱	۰/۰۰۹۳
۱	۰/۱۳۱۵	۰/۱۱۱۲	۰/۱۰۰۱	۰/۰۹۰۷	۰/۱۱۱۳
۱/۵	۰/۳۷۱۴	۰/۳۴۳۹	۰/۳۰۶۰	۰/۲۵۷۲	۰/۳۵۳۴
۲	۰/۱۳۸۳	۰/۱۲۴۹	۰/۱۱۲۶	۰/۱۰۰۵	۰/۱۳۳۶
۲/۵	۰/۰۱۷۱	۰/۰۱۵۲	۰/۰۱۴۸	۰/۰۱۴۱	۰/۰۱۰۶

sustainable wind energy option for Barbados," *Energy Convers Manage*, Vol. 49, pp. 1652-1661, 2007/11/08/ 2008, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.11.008>.

[4] M.A. Singh, A. Biswas, R.D. Misra, "Investigation of self-starting and high rotor solidity on the performance of a three S1210 blade H-type Darrieus rotor," *Renewable Energy*, Vol. 76, pp. 381-387, 2014/11/27/ 2015, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.027>.

[5] S.M.H. Karimian, A. Abdolahifar, "Performance investigation of a new Darrieus Vertical Axis Wind Turbine," *Energy*, Vol. 191, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116551>.

[6] M.H. Mohamed, A. Dessoky, F. Alqurashi, "Blade shape effect on the behavior of the H-rotor Darrieus wind turbine: Performance investigation and force analysis," *Energy*, Vol. 179, pp. 1217-1234, 2019/07/25/ 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.069>.

[7] O.S. Mohamed, A.A. Ibrahim, A.K. Etman, A.A. Abdelfatah, A.M.R. Elbaz, "Numerical investigation of Darrieus wind turbine with slotted airfoil blades," *Energy Conversion and Management*, Vol. 5, 2020/01/01/ 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2019.100026>.

[8] T. Zhang, Zh.Wang, W. Huang, D. Ingham, L. Ma, M. Pourkashanian, "A numerical study on choosing the best configuration of the blade for vertical axis wind turbines," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 201, 2020/06/01/ 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104162>.

[9] K. H. Wong, W. T. Chong, S. Ch. Poh, Y.Ch. Shiah, N. L. Sukiman, Ch.T. Wang, "3D CFD simulation and parametric study of a flat plate deflector for vertical axis wind turbine," *Renewable Energy*, Vol. 129, 2018/05/01/ 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.085>.

[10] H. Jeong, A. Abdolahifar, S.M.H. Karimian, "Numerical analysis of the pitch angle effect on the performance improvement and flow characteristics of the 3-PB Darrieus vertical axis wind turbine," *Energy*, Vol. 239, 2022/01/15. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122339>.

[11] K. Qasemi, L.N. Azadani, "Optimization of the power output of a vertical axis wind turbine augmented with a flat plate deflector," *Energy*, Vol. 202, 2020/04/01/ 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117745>.

[12] A. Hosseini, N. Goudarzi, "Design and CFD study of a hybrid vertical-axis wind turbine by employing a combined Bach-type and H-Darrieus rotor systems,"

بیشترین مقدار ضریب گشتاور در هر سه سرعت باد آزاد در زاویه حمله 95° ، 220° و 335° درجه رخ می‌دهد. از سوی دیگر کمترین مقدار ضریب گشتاور در زاویه حمله 40° ، 155° و 275° ایجاد می‌گردد.

حداکثر مقدار ضریب توان برای روتور هیبریدی با زاویه اتصال صفر، حداکثر ضریب توان معادل با $0/2714$ ، $0/3265$ و $0/3607$ را به ترتیب در سرعت‌های جریان آزاد 7 ، 10 و 14 متر بر ثانیه در میان کلیه حالت‌های بررسی شده فراهم می‌کند. همچنین افزایش اندازه زاویه اتصال، تفاوت بین پره‌های کمکی و VAWT های متعارف به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

۸- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

A	مساحت جاروب توربین (m^2)
D	قطر روتور (m)
H	ارتفاع روتور (m)
M	گشتاور ($N.m$)
U	سرعت جریان آزاد باد ($m.s^{-1}$)
V	مقدار سرعت ($m.s^{-1}$)
p	فشار (Pa)
P	توان (W)
R	شعاع روتور اصلی (m)
r	شعاع روتور کمکی (m)
ω_o	سرعت دورانی ($rad.s^{-1}$)

علائم یونانی

μ	لزجت دینامیکی ($kg.m^{-1}.s^{-1}$)
ρ	چگالی ($kg.m^{-3}$)
ψ	زاویه اتصال پره کمکی
اعداد بی بعد	
Re	عدد رینولدز
CM	ضریب گشتاور
CP	ضریب توان
TSR	نسبت سرعت نوک پره بی بعد

۹- مراجع

- [1] R.V Brulle. "Feasibility investigation of the giromill for generation of electrical power. Technical discussion," *Energy Research and Development Administration*, COO/2617, 1976/1/2/ 1977.
- [2] Y. Bazilevs, A. Korobenko, X. Deng, J. Yan, M. Kinzel, J. O. Dabiri, "Fluid-structure interaction modeling of vertical-axis wind turbines," *J Appl Mech Trans ASME*, Vol. 81, 2014/08/01/ 2014, <https://doi.org/10.1115/1.4027466>.
- [3] J.D.K. Bishop, G.A.J. Amarantunga, "Evaluation of small wind turbines in distributed arrangement as

- [18] F. Arpino, G. Cortellessa, M. Scungio, G. Fresilli, A. Facci, A. Frattolillo, "PIV measurements over a double bladed Darrieus-type vertical axis wind turbine: A validation benchmark," *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 82, 2021/12/01/ 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.102064>.
- [19] M. Ahmad, A. Shahzad, F. Akram, F. Ahmad, S.I. AliShah, "Design optimization of Double-Darrieus hybrid vertical axis wind turbine," *Ocean Engineering*, Vol. 254, 2022/06/15/ 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111171>.
- [20] R.A. Ghazalla, M.H. Mohamed, A.A. Hafiz, "Synergistic analysis of a Darrieus wind turbine using computational fluid dynamics," *Energy*, Vol. 189, 2019/12/15 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116214>.
- [21] R. Bravo, S. Tullis, S. Ziada, "Performance testing of a small vertical-axis wind turbine," *Proceedings of the 21st Canadian Congress of Applied Mechanics (CANCAM07)*, Toronto, Canada, Vol. 3-7, 2007.
- [22] R. Lanzafame, S. Mauro, M. Messina, "2D CFD modeling of H-Darrieus wind turbines using a transition turbulence model," *Energy Proced.* Vol. 45, pp. 131–140, 2014/01/15 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116214>.
- Energy Conversion and Management*, Vol. 189, pp. 49-59, 2019/03/68/ 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.03.068>.
- [13] K. Liu, M. Yu, W. Zhu, "Enhancing wind energy harvesting performance of vertical axis wind turbines with a new hybrid design: a fluid-structure interaction study", *Renewable Energy*, Vol. 140, pp. 912-927, 2019/03/12/ 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.120>.
- [14] A. Pallotta, D. Pietrogiaconi, G.P. Romano, "HYBRI-A combined Savonius- Darrieus wind turbine: performances and flow fields," *Energy*, Vol. 191, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116433>.
- [15] A.M. Abdelsalam, M.A. Kotb, Kh. Yousef, I.M. Sakr, Performance study on a modified hybrid wind turbine with twisted Savonius blades, Vol. 241, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114317>.
- [16] A. Tripathi, P. Das, T. Aggarwal, "Sahil, Efficiency enhancement of a hybrid Vertical axis wind turbine by utilizing Optimum parameters," *Materials Today: Proceedings*, 2022.
- [17] M. Asadi, R. Hassanzadeh, "On the application of semicircular and Bach-type blades in the internal Savonius rotor of a hybrid wind turbine system," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 221, 2022/10/15/ 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2022.104903>.