



مروری بر توربین بادی محور عمودی اچ روتور داریوس با پره‌های متخلخل

حسین سیفی^{1*}، محسن سیفی داوری² و شهریار کوراوند³

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار، ایران
 2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گرمی، گرمی، ایران
 3- دانشیار، مهندسی مکانیک، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران
 * چابهار، صندوق پستی 9971756499، hseifidavary@gmail.com

چکیده

تحولات در طراحی توربین‌های بادی با تقویت در سراسر جهان با هدف تولید برق نزدیک به کاربر در مناطق ساخته شده در حال پیشرفت است. این امر به کاهش بار تولید برق و همچنین هزینه‌های شبکه توزیع و انتقال با کاهش فاصله بین کاربر و منبع انرژی کمک می‌کند. اهداف اصلی توسعه و پیشرفت توربین‌های بادی محور عمودی، افزایش ضریب قدرت و ضریب گشتاور با بهینه‌سازی باد بالادستی است که به پره‌های روتور برخورد می‌کند. برخلاف توربین‌های بادی محور افقی، توربین‌های محور عمودی نه تنها گشتاور مثبت، بلکه گشتاور منفی نیز در حین کار تولید می‌کنند. گشتاور منفی تولید شده توسط پره برگشتی یک مسئله کلیدی برای توربین‌های بادی محور عمودی است که نتیجه معکوس دارد. استفاده از پره‌های متخلخل برای افزایش جریان به کاهش گشتاور منفی تولید شده توسط پره‌های برگشتی و همچنین افزایش گشتاور مثبت با ایجاد انحراف در باد بالادست به سمت پره پیشرو در حین کار کمک می‌کند. این مقاله طرح‌ها، آزمایش‌های مختلف انجام شده بر روی توربین بادی محور عمودی داریوس با پره‌های متخلخل گزارش شده تا به امروز را بررسی می‌کند. نتایج پژوهش‌های انجام یافته نشان می‌دهد که توربین بادی محور عمودی داریوس با پره‌های متخلخل، خود راه‌اندازی و دوران بیش‌تری را نسبت به توربین بادی محور عمودی داریوس با پره‌های مستقیم ثبت کرده است و گشتاور، نیرو و توان راه‌اندازی کم‌تری نسبت به توربین بادی محور عمودی داریوس با پره‌های مستقیم نیاز دارد.

کلیدواژگان: انرژی بادی، توربین بادی، پره متخلخل، راه‌اندازی، داریوس

A review of Darriues H-rotor vertical axis wind turbine with porous blades

Hossein Seifi^{1*}, Mohsen seifi davary², Shahriar kouravand³

1- Master of Mechanical Engineering, Department Marine of Engineering, Chabahar Maritime University, Chabahar, Iran

2- Master Civil Engineering Student, Islamic Azad University- Germei Branch, Germei, Iran

3- Associate Professor, Mechanical Engineering, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran

* P.O.B. 9971756499 Chabahar, Iran, hseifidavary@gmail.com

Received: 11 October 2022 Accepted: 9 May 2023

Abstract

Over the world, advancements in the design of wind turbines with augmentation are being made with the aim of producing electricity nearby users in built-up regions. By reducing the distance between the consumer and the power source, this is certain to aid in lowering the burden on the power generation system as well as the costs associated with the distribution and transmission network. By maximizing the upstream wind striking on the rotor blades, the major goals driving the development and progress of vertical-axis wind turbines (VAWTs) are raising the power coefficient and torque coefficient. VAWT produce both positive and negative torque while operating, in contrast to horizontal axis wind turbines (HAWTs). For VAWTs, the negative torque produced by the returning blade is a major problem that is counterproductive. When used to boost flow, porous blades lessen the negative torque generated by the return blades and also increase the torque by causing upstream airflow to be bent toward the leading blade. The studies conducted so far on the Darriues VAWT with porous blades are examined in this paper. Research results show that Darriues VAWT with porous blades has recorded more self-starting and turn than the Darriues VAWT base with straight blades. Moreover, the ability to self-starting torque, power, force less than the vertical axis of Darriues is required with straight blades.

Keywords: Wind Energy, Wind Turbine, Porous Blade, Self-Starting, Darriues

1- مقدمه

انرژی باد به عنوان انرژی تجدیدپذیر می‌تواند به انسان و محیط زیست کمک کند تا با استفاده از توربین‌های بادی انرژی پاک تولید کند [1]. ایده فعلی تولید برق از جریان‌های باد با استفاده از درایوهای چرخ دنده و یک ژنراتور الکتریکی جدا از سایر سیستم‌های ثانویه انجام می‌شود. با استفاده از یک مبدل الکترونیکی قدرت مناسب، این الکترونیسته ممکن است مستقیماً در شبکه یکپارچه شود، یا همچنین ممکن است برای تامین برق یک ایستگاه شارژ عمل کند [2].

استفاده از توربین‌های بادی محور عمودی¹ به دلیل مزایایی که در مقایسه با توربین‌های بادی محور افقی² دارند، در صنعت شهری مرسوم‌تر شده‌اند. به طوری که محققان برای دستیابی به ضریب توان بالاتر به بهینه‌سازی یک توربین بادی ساوینیوس چند پره با تیغه‌های مبتنی بر قوس‌های دایره‌ای روی آوردند و نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که ضریب توان 0.32 با نسبت تصویر 1.5 و ضریب توان 0.32 با افزایش نسبت تصویر 2.5 بهبود می‌یابد و در توربین بادی دو پره ای، عملکرد توربین بادی نسبت به مدل کلاسیک آن، 12 درصد افزایش پیدا می‌کند [3]. مهم‌ترین ویژگی توربین بادی محور عمودی، استقلال آن‌ها از جهت باد و عملکرد قابل قبول آن‌ها در شرایط باد شهری با سرعت باد کم و سطوح تلاطم زیاد است. علاوه بر این، با توجه به محدودیت فضای موجود در مناطق شهری، توربین‌هایی با اندازه‌های مناسب جهت نصب در محیط‌های شهری مورد نیاز است. به طور خاص، اخیراً توربین‌های بادی در مقیاس میکرو به دلیل توانایی خوب آن‌ها در انطباق با هر فضایی، در تعداد زیاد و چیدمان‌های مختلف، بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته‌اند [4] و توربین با محور عمودی در نهایت جای توربین افقی را خواهد گرفت. توربین محور عمودی دارای چندین مزیت است که از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: این توربین همه جهته است، برخلاف توربین محور افقی که برای تنظیم در جهت جریان به یک مکانیسم انحراف نیاز دارد. ساخت و ساز آن به قدری ساده است که می‌توان آن را نزدیک به هم قرار داد تا انرژی بیش‌تری در هر منطقه تولید کرده و برای محیط‌هایی با سطوح بالای آشفستگی مناسب و نسبتاً ارزان است [5].

1-1- انواع توربین‌های بادی

دو نوع توربین بادی محور عمودی در صنعت شهری مورد استفاده قرار گرفته است: ساوینیوس³ و داریوس⁴ [6]. بر اساس توان خروجی میکرو، مینی و کوچک توربین‌های جریان متقاطع هستند. میکروتوربین‌ها در حال توسعه بوده و نمونه‌های اولیه پیش‌تجاری متعددی با ظرفیت‌های مختلف در حال آزمایش هستند [7]. توربین محور عمودی توسط نیروی بالابر به حرکت در می‌آید. با این حال، ظرفیت خود راه‌اندازی آن در حد متوسط است. هنگامی که توربین داریوس⁵ با سرعت جریان کم به یک نقطه زاویه آزمون خاص می‌رسد، ممکن است پره‌ها در چرخش مشکل داشته باشند. جهت جریان ورودی هیچ تأثیری بر نحوه عملکرد توربین بادی محور عمودی ندارد. با این حال، ظرفیت کمی برای خود راه‌اندازی دارد [8].

1-2- خود شروع شونده‌گی⁶

عبارت شروع خودشونده‌گی باید پس از درک کامل، ابتدا به طور جمعی مورد توافق قرار گیرد. خود شروع شونده‌گی توسط برخی از محققان تعریف شده است. با توجه به این توصیف، توربین زمانی که مقدار قابل توجهی نیرو را استخراج کرد، می‌تواند خود را راه‌اندازی کند [9]. اگر چه اولین مطالعه در مورد راه‌اندازی در سال 1983 انجام شد [10]، تعریف بعدی که موضع کمی متفاوت داشت، نشان داد که اگر توربین بتواند از حالت استراحت به موقعیتی که در آن شروع به تولید خروجی قابل استفاده می‌کند، حرکت کند، می‌تواند خود شروع شونده باشد [11].

1-3- مطالعات انجام یافته

مطالعه بر روی یک توربین با محور عمودی با گام ثابت با استحکام کم و بدون قابلیت راه‌اندازی خودکار انجام شد. این مطالعه به صورت تئوری انجام شد و بینشی در مورد مکانیک توانایی خود شروعی ارائه کرد [11]. برای ایجاد توان متعادل در هر جهت چرخش، مطالعات مربوط به مقایسه توربین‌های بادی پره متخلخل و مستقیم از سه پره استفاده شد [12]. اما ابتدا باید در موقعیت مناسب تنظیم شوند [13]. همچنین ثابت شده است که چرخاندن پره می‌تواند به مشکل خود راه‌اندازی کمک کند [14]. برای دستیابی به بهترین زاویه حمله، هنگام چرخش پره‌ها، زاویه گام تنظیم می‌شود. این سیستم را متغیر-پیچ⁷ می‌نامند [15]. فناوری ارزیابی عملکرد توربین‌های بادی [16] و آبی [17] بیش‌تر از طریق استفاده از شبیه‌سازی عددی توسعه یافته است.

استراتژی‌های بهبود عملکرد به سه دسته تقسیم می‌شوند: بهینه‌سازی پیکربندی توربین بادی [18]، استفاده از یک دستگاه تقویت کننده اضافی [19] و استفاده از تعامل آیرودینامیکی سودآور بین توربین بادی محور عمودی‌ها. زانفورلین و همکاران⁸ [20] مجموعه‌ای جامع از شبیه‌سازی‌های دو بعدی ناپایدار ناوبر استوکس⁹ از جریان حول یک جفت توربین بادی محور عمودی ضد چرخش ارائه کردند. چن¹⁰ و همکاران [21]، از یک رویکرد همراه شامل دو مرحله برای ارزیابی یک خانواده ایرفویل استفاده کردند، که در آن مرحله اول الگوریتم متعامد همراه با یک مازول تحلیل دینامیکی سیالات محاسباتی خودکار¹¹ و مرحله دوم ترکیبی از الگوریتم عامل در یک زمان¹² و مازول ACFDA بود. نتایج نشان داد که نسبت ضخامت به وتر¹³ بیش‌ترین تأثیر و حداکثر ضخامت در یک دهم وتر¹⁴ کم‌ترین تأثیر را بر ضریب عملکرد توربین دارد. نتایج پژوهش محمد¹⁵ و همکاران [22]، نشان داد که پیکربندی بهینه توربین با استفاده از ایرفویل S-1046 برای تولید انرژی بادی، به ویژه در مناطق شهری، بسیار امیدوارکننده به نظر می‌رسد. یافته‌های تحقیق ساغریچی¹⁶ و همکاران [23] نشان داد که می‌توان کاهش توان توربین بادی محور عمودی با گام ثابت در سالیبدیتی بالا را با استفاده از تکنیک گام متغیر حل کرد. حداکثر ضریب توان بادی 7.4٪ با استفاده از یک منحرف‌کننده صفحه تخت که در پایین دست یک میکرو توربین بادی اچ روتور توسط وانگ¹⁷ و همکاران [24] قرار گرفته بود نسبت به توربین بدون منحرف کننده افزایش داشت. همچنین

10. Chen
11. ACFDA
12. OFAAT
13. TCR
14. MTITOC
15. Mohamed
16. Sagharichi
17. Wong

1. VAWT
2. HAWT
3. Savonius
4. Darrieus
5. Darrieus
6. Self-starting
7. Pitch
8. Zanforlin et al
9. URANS

دید و تاثیر آن بر نیروی راه‌اندازی و مقایسه آن با پره مستقیم و نتایج بدست آمده پرداخته می‌گردد.

2- ایرفویل‌ها

2-1- طراحی آیرودینامیکی با استفاده از نرم افزار Q-blade

از نرم افزار Q-blade v0.9 برای انتخاب ایرفویل و انجام روند شبیه‌سازی استفاده گردید. نرم افزار Q-blade برای محاسبات توربین‌های بادی استفاده می‌گردد که ایرفویل مناسب را با استفاده از سرعت می‌توان انتخاب و عملکرد قطبی آن را در زوایای 360 درجه بررسی و در طراحی و شبیه‌سازی روتورهای توربین بادی مورد استفاده قرار داد. نرم‌افزار Q-blade با استفاده از مدل‌های مومنتم و الگوریتم صحیح، شبیه‌سازی را انجام می‌دهد [40]. برای مقایسه حداقل کیفیت مقاطع ایرفویل متفاوت و طرح‌های توربین از یک ابزار منحصر به فرد استفاده شد که این ابزار باید زمان پردازش کوتاهی داشته باشد به همین دلیل در نرم‌افزار Q-blade از ابزار X-Foil Direct Analysis استفاده گردید [41].

2-2- انتخاب ایرفویل

اثر بخشی روتورها در تولید گشتاور کافی با افزایش لیفت به طور قابل توجهی تحت تاثیر مشخصات تیغه‌ها قرار می‌گیرد [42]. علاوه بر این، در توربین‌های محور عمودی که عملکرد خوبی در آب [43] و هوا [44] داشتند، اغلب از NACA چهار رقمی استفاده شده است. همچنین به خوبی شناخته شده است که از نقطه نظر جداسازی که یک مشخصه اساسی در شرایط سرعت کم است، افزایش ضخامت تیغه مطلوب است [45]. هنگامی که سه پروفایل متنوع NACA با اعداد رینولدز پایین ارزیابی شدند، ضخامت آن‌ها 15٪، 18٪ و 21٪ بود، NACA-0015 بهترین نتایج را ایجاد کرد [46]. علاوه بر این، انواع مختلفی از ایرفویل‌های NACA 4-Digit، NACA 5-Digit و Selig توسط سیفی داوری و همکاران [47] مورد بررسی عددی قرار گرفتند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که NACA-0015 بهترین عملکرد را برای اعداد رینولدز کم دارد. با توجه به ضخامت متوسط و کمبر صفر آن، NACA-0015 به عنوان یکی از ایرفویل-های متقارن مورد بررسی قرار گرفت.

برای انتخاب ایرفویل پره توربین بادی محور عمودی داریوس سه ایرفویل NACA0015، NACA0018 و NACA0021 در نرم‌افزار Q-Blade مورد بررسی قرار گرفته و نسبت ماکزیمم ضریب لیفت به ضریب درگ در سرعت‌های 5 و 10 متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت ایرفویلی که نسبت بیشینه ضریب برآ به ضریب پسا بالایی داشته باشد، انتخاب می‌گردد که در ادامه به بررسی آن می‌پردازیم. در شکل 1 ایرفویل NACA0015 نسبت ضریب لیفت به ضریب درگ بیش‌تری نسبت به دو ایرفویل دیگر در سرعت 5 متر بر ثانیه داشته به طوری که بیش‌ترین مقدار نسبت ضریب لیفت به ضریب درگ در زاویه حمله 13 درجه، برابر 2/58 و نسبت ضریب لیفت به ضریب درگ برای ایرفویل NACA0018 در زاویه حمله 15 درجه، 2/40 می‌باشد که کم‌تر از ایرفویل NACA0015 و برای ایرفویل NACA0021 ماکزیمم نسبت ضریب لیفت به ضریب درگ در زاویه 15 درجه برابر با 2 بوده که کم‌تر از دو ایرفویل دیگر می‌باشد و در این سرعت ایرفویل NACA0015 نسبت به دو ایرفویل دیگر شرایط بهتری داشت.

تاثیر ترکیب تولید شده توسط یک پشت دو گام¹ و یک دیفیوزر² پخش کننده شکل نصب شده بر روی توربین داریوس بررسی و نتایج نشان داد که با ادغام عملکرد پشت دو گام و دیفیوزر، توان افزایش قابل توجهی در بادهای خلاف جهت به دست می‌آید و دیفیوزر امکان کاهش شدید نوسانات گشتاور را فراهم می‌کند [25]. یک توربین بادی با محور عمودی با پره مستقیم اس شکل³ توسط تاکائو⁴ و همکاران [26] آزمایش و مشخص شد که عملکرد توربین را می‌توان با استفاده از ردیف پره هدایت شده بهبود بخشید.

واتانابه⁵ و همکاران [27] از یک ساختار پخش کننده در اطراف یک توربین بادی محور عمودی برای افزایش ضریب توان آن استفاده کرد. چندین آزمایش توسط دبیری⁶ [28] برای آرایه‌های توربین بادی انجام و افزایش توان خروجی گزارش شد. وگارد⁷ و همکاران [29] قدرت بهبود یافته یک جفت توربین بادی محور عمودی در آزمایش‌های تونل باد را تأیید کرد. افزایش توان مربوط به فواصل، نسبت سرعت نوک و جهت چرخش دو توربین بادی بود. سفیدگر و همکاران [30] با اولویت قرار دادن توربین جریان متقاطع (کراس فلو)⁸ به دلیل کوچک بودن نسبی حداکثر ضریب توان در توربین کراس فلو، روش‌هایی برای هدایت جریان باد به درون توربین پیشنهاد دادند. یک ایرفویل J شکل ترکیبی از ایرفویل‌های ساوینیوس و داریوس توسط کورواند و همکاران [31] بررسی شد. نتایج آن‌ها نشان داد که ایرفویل طراحی شده دارای گشتاور راه‌اندازی هست. نتایج طریقی و همکاران [32] نشان داد که توربین بادی متقاطع محوری⁹ می‌تواند جایگزین مناسبی برای توربین‌های بادی محور عمودی پره مستقیم در مناطق شهری باشد. همچنین وارد کردن شکاف‌ها در ایرفویل پایه، راندمان از نظر ضریب بالابر و ضریب توان به ترتیب 2.32٪ و 17.94٪ در زاویه حمله 15 درجه افزایش داد [33].

زمانی و همکاران [34] طراحی جدید توربین بادی محور عمودی داریوس را با استفاده از محیط متخلخل روی پره‌های توربین و شبیه‌سازی دو بعدی برای مشاهده رفتار جریان در اطراف پره‌های توربین انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که پدیده استال به تأخیر افتاده و در زاویه حمله بالاتر رخ می‌دهد. طراحی فلپ تطبیقی با گسترش بیداری و تقویت گردابه‌های پشت پره توربین داریوس، عملکردش را افزایش می‌دهد [35]. نتایج آزمایش سو¹⁰ و همکاران [36] نشان داد که بهبود بیش‌تر ضریب توان متوسط را می‌توان با بهینه‌سازی پیکربندی آرایه توربین‌ها به دست آورد. مطالعه یان¹¹ و همکاران [37] نشان داد که برآمدگی لبه پیشرو می‌تواند به طور قابل توجهی ضریب توان توربین بادی محور عمودی را در نسبت‌های نوک سرعت پایین، که تحت شرایط پس از استال است، افزایش دهد. نتایج پژوهش رنجبر و همکاران [38] نشان داد که هندسه بهینه مجرای سه جزء شامل نازل، دیفیوزر و فلنج، امکان دو برابر شدن سرعت جریان را فراهم می‌کند. نتایج پژوهش لی¹² و همکاران [39] نشان داد که حداکثر مقادیر گشتاور لحظه‌ای و توان لحظه‌ای در جهت بالادست و پایین دست ظاهر می‌گردد.

طی چند سال اخیر برای بهبود عملکرد خود شروع کنندگی توربین‌های بادی محور عمودی مطالعاتی در زمینه پره آن‌ها انجام گرفته است و به جای استفاده از توربین بادی پره مستقیم، از پره متخلخل استفاده شده است که در این مقاله به بررسی دوران، نیرو، گشتاور و توان مورد نیاز برای راه‌اندازی، نسبت

7. Vergaerde
8. Cross-flow
9. cross-axis wind turbine
10. Su
11. Yan
12. Li

1. dual-pitched roof
2. diffuser
3. S-VAWT
4. Takao
5. Watanabe
6. Dabiri

الف



ب

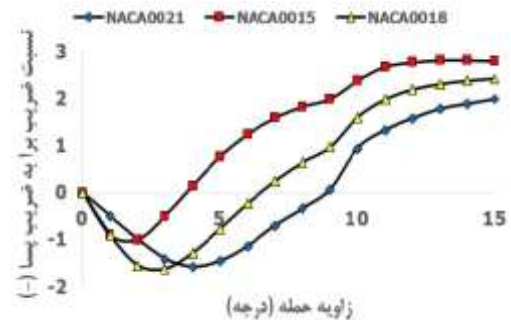
شکل 3 شماتیک (الف) و ساخت توربین (ب)

3-1- استفاده از ورق آلومینیوم برای ساخت پره

آلومینیوم و آلیاژهای آن به طور وسیعی در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. این آلیاژها به دلیل هدایت حرارتی بالا، دانسیته پایین و خواص الکترومغناطیس، در صنایع هوافضا، قطعات هواپیما و سایر صنایع کاربرد گسترده‌ای دارند [17]. ورق آلومینیومی استفاده شده در ساخت پره‌ها، نوع خاصی از ورق بوده که از آلیاژ سری یک، با ویژگی‌های فلز آلومینیوم تولید و در دسته‌های ورق فلزی سبک قرار می‌گیرد. برای ساخت پره‌ها از ورق ساده آلومینیوم، شکل (4-الف) به ضخامت 0/3 میلی‌متر و برای ساخت پره متخلخل از ورق آلومینیوم متخلخل یا امباس، شکل (4-ب) که به صورت خلل و فرج به ضخامت 3/ میلی‌متر استفاده شد که پره‌ها دارای پیچش نبوده و از نوع راست پره می‌باشند، همچنین می‌توان برای ساخت پره‌های توربین‌های بادی از ورق آلومینیوم برنز استفاده نمود. برنزه‌های آلومینیومی به دلیل استحکام و مقاومت بالاتر در برابر خوردگی در مقایسه با سایر آلیاژهای برنز ارزش بیشتری دارند. این آلیاژها در برابر کدر شدن مقاوم هستند و نرخ خوردگی پایینی در شرایط جوی، نرخ اکسیداسیون پایین در دماهای بالا و واکنش‌پذیری کم با ترکیبات گوگردی و سایر محصولات خروجی از احتراق را نشان می‌دهند. آن‌ها همچنین در برابر خوردگی در آب دریا مقاوم هستند. مقاومت برنزه‌های آلومینیومی در برابر خوردگی ناشی از آلومینیوم موجود در آلیاژها است که با اکسیژن اتمسفر واکنش می‌دهد و یک لایه سطحی نازک و سخت از آلومینا (اکسید آلومینیوم) تشکیل می‌دهد که به عنوان مانعی در برابر خوردگی آلیاژ غنی از مس عمل می‌کند. افزودن قلع نیز می‌تواند مقاومت در برابر خوردگی را بهبود بخشد.

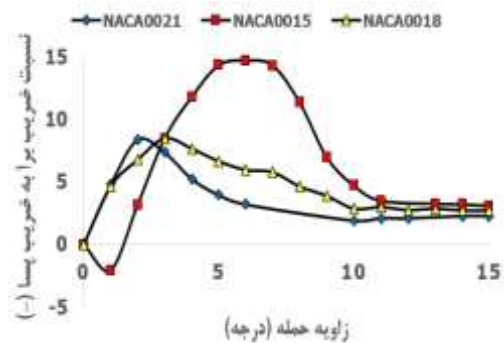


الف



شکل 1 نسبت ضریب لیفت به ضریب درگ در سرعت 5 متر بر ثانیه

در سرعت 10 متر بر ثانیه ایرفویل NACA0015 نسبت ضریب لیفت به ضریب درگ بیش‌تری نسبت به دو ایرفویل دیگر دارد و بیش‌ترین مقدار نسبت ضریب لیفت به ضریب درگ در زاویه حمله 6/5 درجه برابر با مقدار 15/3 و نسبت ضریب لیفت به ضریب درگ ایرفویل NACA0018 در زاویه حمله 3 درجه، 8/2 و در ایرفویل NACA0021 ماکزیمم نسبت ضریب لیفت به ضریب درگ در زاویه 3 درجه برابر با مقدار 8/5 می‌باشد که کم‌تر از ایرفویل NACA0015 بوده و در این سرعت نسبت به سایر ایرفویل‌ها، نسبت ضریب لیفت به ضریب درگ بهتری داشت، (شکل 2). بخاطر همین برای ادامه طراحی و ساخت از ایرفویل NACA0015 استفاده گردید.



شکل 2 نسبت ضریب لیفت به درگ ایرفویل‌ها در سرعت 10 متر بر ثانیه

3- طراحی و ساخت

در وهله اول میکرو توربین بادی عمود محور داریوس در نرم افزار کتیا طراحی و سپس در مقیاس 5:1 نمونه اصلی با ارتفاع پره 35 سانتی‌متر، شعاع پره 18/5 سانتی‌متر و طول ایرفویل برابر 6/4 سانتی‌متر ساخته شد، (شکل 3).



ب

شکل 4 ورق ساده آلومینیوم (الف) و امباس لوزی شکل (ب)

دوران توربین بادی پره متخلخل از توربین بادی پره صاف بیش‌تر بوده و تا سرعت نه متر بر ثانیه دورانی تقریباً برابر با هم داشته و در سرعت 10 متر بر ثانیه دوران توربین بادی پره صاف بیش‌تر از دوران توربین بادی پره متخلخل می‌باشد، جدول 1.

لازم است تا برای راه‌اندازی توربین بادی محور عمودی داریوس نیاز به تولید نیروی درگ در سرعت‌های پایین ایجاد شود. برای ایجاد نیروی درگ در سرعت‌های پایین، باید بر روی پره، اصطکاک ایجاد گردد تا توربین بادی محور عمودی داریوس بتواند شروع به دوران نماید. اصطکاک پره متخلخل نسبت به پره صاف زیادتر می‌باشد و این عامل موثری است تا توربین بادی محور عمودی داریوس بتواند در سرعت‌های پایین نسبت به پره صاف شروع به دوران نماید. اما اصطکاک ایجاد شده در پره متخلخل در سرعت‌های بالا، باعث ایجاد نیروی درگ منفی شده و این نیروی درگ باعث کاهش عملکرد توربین بادی پره متخلخل در سرعت‌های بالا می‌شود، ولی چون توربین بادی محور عمودی داریوس پره صاف، اصطکاک و نیروی درگ را در سرعت‌های بالا ندارد، به خاطر همین در سرعت‌های بالا با استفاده از نیروی لیفت دوران بهتری نسبت به توربین بادی محور عمودی داریوس پره متخلخل که هم نیروی لیفت و هم نیروی درگ در سرعت‌های بالا دارد، بشود و نیروی درگ پره متخلخل باعث افزایش دوران در سرعت‌های پایین و کاهش دوران در سرعت‌های بالا را برای توربین بادی محور عمودی داریوس پره متخلخل منجر می‌گردد [48]. برای صحت‌سنجی داده‌های بدست آمده در نتایج آزمایشگاه حاصل از دوران توربین بادی پره صاف و متخلخل در سرعت بادی مختلف، نتایج را در نرم افزار Q-blade تحلیل کرده که با افزایش سرعت باد، دوران توربین بادی افزایش پیدا کرده و مدل عددی، نتایج آزمایشگاهی را به دقت پیش‌بینی کرده بود و خطای نتایج تجربی شامل خطای دستگاه اندازه‌گیری یا سرعت دمنده، خطای ساخت مدل و تنظیم موقعیت قرارگیری می‌باشد که در جدول 2 نتایج صحت‌سنجی آورده شد [48]. در جدول 3 مقایسه دوران توربین بادی با پره صاف و متخلخل برحسب رادیان بر ثانیه نیز آورده شده است.

جدول 1 مقایسه دوران توربین بادی پره صاف و متخلخل برحسب دور بر دقیقه

سرعت توربین (متر بر ثانیه)	پره مستقیم	پره متخلخل
1	0	0
2.5	0	2
3	0	4
3.5	0	7
4	3	9
4.5	8	17
5	15	22
6	30	33
7	41	44
8	53	52
9	56	54
10	65	61

جدول 2 صحت‌سنجی داده‌های به دست آمده با نرم افزار Q-blade

سرعت توربین (متر بر ثانیه)	پره مستقیم	پره متخلخل	داده Q-Blade
1	0	0	0

برای ساخت پره‌ها از ابرفویل NACA0015 و ورق‌های آلومینیوم با استفاده از پرچ و پیچ خودرو به هم وصل و با استفاده از ساعت اندیکاتور، لقی و فرورفتگی پره‌های مستقیم و متخلخل کنترل شده بود تا فرورفتگی و برآمدگی در پره‌ها نباشد و کنترل پره‌ها به صورت دقیق انجام پذیرفت و هر کدام از پره‌ها شرایط و کنترل یکسانی و دقیقی داشتند تا خطایی در محاسبات و ساخت به حداقل ترین مقدار ممکن برسد.

3-2- انواع خطاها

الف- خطای اندازه‌گیری سرعت دمنده، سرعت در مقطع تست باد با استفاده از سرعت‌سنج و حسگر نصب شده بر روی دمنده تعیین شد.

ب- خطای تنظیم موقعیت قرارگیری مدل در فاصله مورد نظر، با استفاده از ساعت اندیکاتور، شابلون و ترازسنج دیجیتالی سعی شد که مدل دقیقاً در محل خود قرار گیرد.

ج- خطای موجود در ساخت مدل، به دلیل خطای دستگاه‌های ساخت مدل، همواره در این مرحله مقداری خطا ایجاد می‌شود که بر نتایج تست تاثیر می‌گذارد.

د- خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری، اگر چه دستگاه به دقت واسنجی شده ولی وجود مقداری خطا در ثبت اطلاعات اجتناب‌ناپذیر است. خطاهای دستگاه می‌تواند مربوط به نیروسنج، دورسنج یا سرعت‌سنج باشد که دارای دقت 0/2 درصد می‌باشد.

4- بحث و نتایج

4-1- بررسی دوران توربین بادی

یکی از عوامل مهم تأثیرگذار در بازدهی توربین، دوران توربین است که قابلیت راه‌اندازی توربین در سرعت‌های مختلف باد، تأثیر بیش‌تری در بازدهی توربین بادی دارد. در صورتی که توربین بتواند در سرعت‌های پایین به دور مشخص برسد، باعث افزایش بازدهی توربین می‌شود. هر چه دوران روتور در سرعت مختلف بخصوص در سرعت‌های پایین، بیش‌تر باشد باعث افزایش سرعت دورانی و در نتیجه باعث افزایش توان توربین می‌گردد. توربین بادی در وضعیت پره صاف در سرعت‌های پایین هیچ دورانی نداشت، به طوری که تا سرعت باد 3/9 متر بر ثانیه، توربین عملاً هیچ حرکتی از خود نداشته و بعد از این سرعت با افزایش سرعت باد، دوران توربین شروع به افزایش کرده و وقتی دارای پره متخلخل است، در سرعت 2/3 متر بر ثانیه شروع به دوران نموده و با افزایش سرعت باد، دوران توربین افزایش پیدا کرده است. با توجه به شکل مورد نظر می‌توان نتیجه گرفت که در سرعت‌های اولیه، دوران توربین در حالت پره متخلخل بهتر از توربین بادی پره صاف بوده که در جدول 1 قابل مشاهده است. توربین بادی پره صاف تا سرعت چهارمتر برثانیه هیچ دورانی نداشت و در سرعت چهار متر بر ثانیه شروع به دوران کرده و سه دور بر دقیقه دوران داشته است. اما توربین بادی پره متخلخل در سرعت 2/5 متر بر ثانیه دورانی برابر دو دور بر دقیقه، در سرعت سه متر بر ثانیه دورانی برابر چهار دور بر دقیقه، در سرعت 3/5 متر بر ثانیه دورانی برابر هفت دور بر دقیقه و در سرعت چهار متر بر ثانیه، نه دور بر دقیقه چرخش داشته که سه برابر دوران تولید شده نسبت به توربین بادی پره صاف در این سرعت می‌باشد و تا سرعت 7/5 متر بر ثانیه

بادی پره متخلخل 0/055 نیوتن متر و برای توربین بادی پره مستقیم برابر 0/111 نیوتن متر می‌باشد که دو برابر گشتاور مورد نیاز توربین بادی پره متخلخل می‌باشد. در سرعت نه متر بر ثانیه گشتاور مورد نیاز برای چرخش توربین بادی پره متخلخل 0/13875 نیوتن متر است و برای توربین بادی پره مستقیم 0/1295 نیوتن متر می‌باشد. در سرعت ذکر شده برعکس سرعت‌های قبل از نه متر بر ثانیه، برای توربین بادی پره متخلخل گشتاور بیش‌تری نسبت به پره مستقیم لازم می‌باشد. در سرعت 9/5 متر بر ثانیه گشتاور راه‌اندازی توربین بادی پره متخلخل 0/1665 نیوتن متر و برای توربین بادی پره مستقیم 0/13875 نیوتن متر می‌باشد که در سرعت ذکر شده نیز مثل سرعت نه متر بر ثانیه، گشتاور راه‌اندازی توربین بادی پره متخلخل نسبت به پره مستقیم بیش‌تر می‌باشد. در سرعت 10 متر بر ثانیه گشتاور راه‌اندازی توربین بادی پره متخلخل 0/17205 نیوتن متر و برای توربین بادی پره مستقیم 0/148 نیوتن متر می‌باشد. در سرعت ذکر شده گشتاور مورد نیاز برای راه‌اندازی توربین بادی پره متخلخل بیش‌تر از توربین بادی پره مستقیم می‌باشد و در این سرعت دوران پره متخلخل برای شروع به چرخش انرژی زیادی نسبت به پره مستقیم خواهد نمود. ولی برای سرعت‌های یک تا نه متر بر ثانیه گشتاور مورد نیاز برای راه‌اندازی در توربین بادی پره متخلخل کم‌تر از پره مستقیم می‌باشد و در سرعت نه تا 10 متر بر ثانیه گشتاور مورد نیاز برای دوران توربین بادی پره متخلخل بیش‌تر از توربین بادی پره مستقیم می‌باشد [49].

جدول 4 مقایسه گشتاور راه‌اندازی توربین بادی پره مستقیم و متخلخل

سرعت توربین (متر بر ثانیه)	پره مستقیم	پره متخلخل
1	0.0185	0.00925
2	0.0185	0.00925
3	0.02775	0.00925
4	0.037	0.0185
5	0.037	0.0185
7	0.04625	0.02775
7.5	0.06475	0.037
8.5	0.111	0.055
9	0.1295	0.13875
9.5	0.13875	0.1665
10	0.148	0.17205

3-4- بررسی تجربی توان لحظه‌ای لازم برای راه‌اندازی توربین باد محور عمودی داریوس

جدول 5 مقایسه توان راه‌اندازی توربین باد محور عمودی داریوس پره مستقیم و متخلخل را در سرعت‌های مختلف باد نشان می‌دهد. در سرعت یک و دو متر بر ثانیه چون توربین باد در دو حالت پره مستقیم و متخلخل دورانی نداشته است، توان لحظه‌ای آن صفر می‌باشد. برای پره متخلخل توان لحظه‌ای راه‌انداز در سرعت سه متر بر ثانیه برابر 0/35 وات بوده و پره مستقیم دورانی نداشته و توان راه‌اندازی آن صفر می‌باشد. در سرعت چهار متر بر ثانیه پره متخلخل دوران بیش‌تری نسبت به پره مستقیم داشته و گشتاور راه‌اندازی کم‌تری نسبت به پره مستقیم لازم داشته و چون دوران بیش‌تری در این سرعت نسبت به پره مستقیم داشته، توان راه‌اندازی پره متخلخل در این سرعت بیش‌تر از پره صاف است. در توربین‌های باد پره مستقیم و متخلخل در سرعت یک و دو متر بر ثانیه مقدار توان مورد نیاز برای شروع صفر بوده و در سرعت سه متر بر ثانیه توان لازم برای حرکت در توربین باد پره مستقیم صفر و برای توربین باد محور

2.5	0	2	3
3	0	4	5
3.5	0	7	8
4	3	9	10
4.5	8	17	16
5	15	22	23
6	30	33	33
7	41	44	46
8	53	52	48
9	56	54	53
10	65	61	67

جدول 3 مقایسه دوران توربین بادی پره صاف و متخلخل برحسب رادیان بر ثانیه

سرعت توربین (متر بر ثانیه)	پره مستقیم	پره متخلخل
1	0	0
2.5	0	19.08
3	0	38.16
3.5	0	66.78
4	28.62	85.86
4.5	76.32	162.18
5	162.18	209.88
6	286.2	314.82
7	391.14	419.76
8	505.62	496.08
9	534.24	515.16
10	607.1	851.94

4-2- بررسی تجربی گشتاور لازم برای راه‌اندازی توربین بادی محور عمودی داریوس

در جدول 4 توربین بادی محور عمودی داریوس پره متخلخل گشتاور راه‌اندازی کم‌تری نسبت به توربین بادی محور عمودی داریوس پره مستقیم نیاز دارد تا شروع به دوران کند، به طوری که در سرعت‌های یک، دو و سه متر بر ثانیه گشتاور مورد نیاز برای راه‌اندازی برابر 0/00925 نیوتن متر می‌باشد ولی در توربین بادی محور عمودی داریوس پره مستقیم در سرعت یک و دو متر بر ثانیه مقدار گشتاور مورد نیاز برای شروع برابر 0/0185 نیوتن متر که دو برابر مقدار گشتاور لازم برای دوران توربین پره متخلخل و در سرعت سه متر بر ثانیه مقدار گشتاور لازم برای حرکت در توربین بادی پره مستقیم برابر سه برابر همین مقدار برای توربین بادی محور عمودی داریوس پره متخلخل می‌باشد. در سرعت چهار و پنج متر بر ثانیه مقدار گشتاور مورد نیاز برای پره متخلخل برابر 0/0185 نیوتن متر می‌باشد که برای پره مستقیم در سرعت‌های ذکر شده 0/037 نیوتن متر که برای راه‌اندازی آن در سرعت‌های ذکر شده دو برابر پره متخلخل گشتاور باید وارد گردد تا شروع به دوران نماید.

در سرعت هفت متر بر ثانیه برای راه‌اندازی توربین بادی پره متخلخل مقدار 0/02775 نیوتن متر و برای راه‌اندازی توربین بادی پره مستقیم 0/04625 نیوتن متر گشتاور لازم است تا توربین شروع به چرخش نماید. در سرعت 7/5 متر بر ثانیه گشتاور مورد نیاز برای شروع به چرخش توربین بادی پره متخلخل 0/037 نیوتن متر و برای توربین بادی پره مستقیم برابر 0/06475 نیوتن متر می‌باشد. در سرعت ذکر شده باید نیروی زیادتری به توربین بادی محور عمودی پره مستقیم اعمال گردد تا بتواند شروع به چرخش نماید. در سرعت 8/5 متر بر ثانیه گشتاور مورد نیاز برای راه‌اندازی توربین

عمودی داریوس پره متخلخل 0/35 وات می‌باشد. در سرعت چهار متر بر ثانیه توان راه‌انداز توربین باد پره صاف 1/59 وات و متخلخل 1/06 وات می‌باشد و در سرعت پنج متر بر ثانیه توان پره مستقیم 3/88 و متخلخل 5/6 وات می‌باشد. در سرعت هفت متر بر ثانیه برای توربین باد پره متخلخل توان راه‌انداز 11/66 و پره مستقیم 18/56 وات لازم است تا توربین شروع به چرخش نماید. در سرعت 8 متر بر ثانیه توان لحظه‌ای راه‌انداز پره متخلخل 24/8 وات و پره مستقیم 48/08 وات می‌باشد. در سرعت ذکر شده باید توان لحظه‌ای زیادتری به توربین بادی محور عمودی پره مستقیم اعمال گردد تا بتواند شروع به چرخش نماید [50].

جدول 6 مقایسه نیروی راه‌اندازی توربین بادی با پره مستقیم و متخلخل برحسب

سرعت توربین (متر بر ثانیه)	پره مستقیم	پره متخلخل
1	0.10	0.05
2	0.1	0.05
3	0.15	0.057
4	0.2	0.1
5	0.2	0.097
7	0.25	0.158
7.5	0.35	0.2
8.5	0.6	0.3
9	0.7	0.75
9.5	0.75	0.9
10	0.8	0.95

4-4-2- مطالعه تجربی نیروی لازم برای راه‌اندازی توربین بادی عمود محور

داریوس در ارتفاع 75 سانتی‌متر برای پره مستقیم و متخلخل

جدول 7 مقایسه نیروی راه‌اندازی توربین بادی عمود محور داریوس در ارتفاع 75 سانتی‌متری برای پره مستقیم و متخلخل را نشان می‌دهد. در سرعت یک متر بر ثانیه نیروی راه‌انداز توربین بادی پره متخلخل 0/10 نیوتن و پره صاف برابر 0/15 نیوتن، در سرعت دو متر بر ثانیه نیروی راه‌انداز پره متخلخل 0/15 نیوتن و پره مستقیم برابر 0/20 نیوتن و در سرعت سه متر بر ثانیه نیروی مورد نیاز پره متخلخل و مستقیم 0/20 و 0/25 نیوتن می‌باشد. در سرعت چهار متر بر ثانیه نیروی مورد نیاز پره متخلخل و مستقیم 0/25 و 0/35 نیوتن می‌باشد. در سرعت پنج متر بر ثانیه نیروی راه‌انداز پره متخلخل 0/30 نیوتن و پره مستقیم برابر 0/45 نیوتن، در سرعت هفت متر بر ثانیه برای راه‌اندازی توربین بادی پره متخلخل 0/40 نیوتن و مستقیم 0/60 نیوتن، در سرعت 7/5 متر بر ثانیه نیروی مورد نیاز برای شروع به چرخش توربین بادی پره متخلخل 0/50 نیوتن و برای توربین بادی پره مستقیم برابر 0/65 نیوتن، در سرعت 8/25 متر بر ثانیه نیروی راه‌اندازی توربین بادی پره متخلخل و مستقیم 0/60 و 0/75 نیوتن، در سرعت 8/5 متر بر ثانیه نیز برای پره متخلخل 0/70 نیوتن و پره مستقیم 0/85 نیوتن، در سرعت نه متر بر ثانیه نیروی راه‌انداز توربین بادی پره متخلخل و مستقیم 0/85 نیوتن و 0/95 نیوتن و در سرعت 9/5 متر بر ثانیه نیروی راه‌اندازی توربین بادی پره مستقیم و متخلخل 1/05 نیوتن می‌باشد که در سرعت 9/5 متر بر ثانیه نیروی راه‌اندازی توربین بادی پره متخلخل و مستقیم با هم برابر می‌باشد. در سرعت 10 متر بر ثانیه نیروی راه‌انداز توربین بادی پره متخلخل 1/20 و پره مستقیم 1/15 نیوتن بود که در سرعت ذکر شده نیروی راه‌انداز توربین بادی پره متخلخل بیش‌تر از توربین بادی پره صاف می‌باشد و در این سرعت دوران پره متخلخل برای شروع به چرخش انرژی زیادی نسبت به پره مستقیم صرف خواهد نمود. ولی برای سرعت‌های یک تا 9/5 متر بر ثانیه نیروی مورد لازم برای راه‌اندازی در توربین بادی پره متخلخل کم‌تر از پره مستقیم بوده و در

عمودی داریوس پره متخلخل 0/35 وات می‌باشد. در سرعت چهار متر بر ثانیه توان راه‌انداز توربین باد پره صاف 1/59 وات و متخلخل 1/06 وات می‌باشد و در سرعت پنج متر بر ثانیه توان پره مستقیم 3/88 و متخلخل 5/6 وات می‌باشد. در سرعت هفت متر بر ثانیه برای توربین باد پره متخلخل توان راه‌انداز 11/66 و پره مستقیم 18/56 وات لازم است تا توربین شروع به چرخش نماید. در سرعت 8 متر بر ثانیه توان لحظه‌ای راه‌انداز پره متخلخل 24/8 وات و پره مستقیم 48/08 وات می‌باشد. در سرعت ذکر شده باید توان لحظه‌ای زیادتری به توربین بادی محور عمودی پره مستقیم اعمال گردد تا بتواند شروع به چرخش نماید [50].

جدول 5 مقایسه توان لحظه‌ای توربین باد با پره مستقیم و متخلخل برحسب وات

سرعت توربین (متر بر ثانیه)	پره مستقیم	پره متخلخل
1	0	0
2	0	0
3	0	0.35
4	1.59	1.06
5	3.88	5.6
7	18.56	11.66
8	48.08	24.8
9	67.87	72.26
10	90.20	98.30

4-4- مطالعه آزمایشگاهی نیروی لازم برای راه‌اندازی توربین بادی عمود

محور داریوس در ارتفاع 35 و 75 سانتی متر

4-4-1- مطالعه تجربی نیروی لازم برای راه‌اندازی توربین بادی عمود محور

داریوس در ارتفاع 35 سانتی‌متر برای پره مستقیم و متخلخل

جدول 6 مقایسه نیروی راه‌اندازی توربین بادی پره مستقیم و متخلخل را در سرعت‌های مختلف باد نشان می‌دهد. توربین بادی پره متخلخل نیروی راه‌انداز کم‌تری نسبت به توربین بادی پره مستقیم نیاز دارد تا شروع به دوران کند، به طوری که در سرعت‌های یک، دو و سه متر بر ثانیه نیروی راه‌انداز 0/050 نیوتن و در پره مستقیم در سرعت یک و دو متر بر ثانیه نیروی مورد نیاز برای شروع 0/10 نیوتن که دو برابر مقدار نیروی لازم دوران توربین پره متخلخل است و در سرعت سه متر بر ثانیه نیروی لازم پره مستقیم سه برابر توربین بادی پره متخلخل می‌باشد. در سرعت چهار و پنج متر بر ثانیه نیروی مورد نیاز پره متخلخل برابر 0/10 نیوتن و پره مستقیم 0/20 نیوتن می‌باشد که برای راه‌اندازی آن در سرعت‌های ذکر شده دو برابر پره متخلخل نیرو باید وارد گردد تا شروع به دوران نماید. در سرعت هفت متر بر ثانیه برای راه‌اندازی توربین بادی پره متخلخل و مستقیم 0/15 نیوتن و 0/25 نیوتن و در سرعت 7/5 متر بر ثانیه نیروی مورد نیاز برای شروع به چرخش توربین بادی پره متخلخل و مستقیم 0/20 و 0/35 نیوتن و در سرعت 8/5 متر بر ثانیه نیروی راه‌اندازی توربین بادی پره متخلخل و مستقیم برابر 0/30 و 0/60 نیوتن و در سرعت نه متر بر ثانیه برای پره متخلخل 0/75 نیوتن و پره مستقیم 0/70 نیوتن می‌باشد، (جدول 6). اما در سرعت 9/5 متر بر ثانیه نیروی راه‌اندازی پره متخلخل 0/90 نیوتن و پره مستقیم 0/75 نیوتن می‌باشد که در سرعت 9 و 9/5 متر بر ثانیه، نیروی راه‌اندازی توربین بادی پره متخلخل نسبت به پره مستقیم بیش‌تر است. در سرعت 10 متر بر ثانیه نیز نیروی راه‌انداز توربین

ده متر بر ثانیه توان راه‌اندازی توربین باد پره متخلخل چهار و هشت درصد بیش‌تر از توان لحظه‌ای توربین باد پره مستقیم بوده است. در کل توان لحظه‌ای لازم برای راه‌اندازی توربین باد پره متخلخل در سرعت‌های تست شده 22/8 درصد کم‌تر از توربین باد پره مستقیم می‌باشد. نتایج نشان داد که برای راه‌اندازی توربین بادی پره متخلخل در ارتفاع 75 سانتی‌متری در سرعت یک متر بر ثانیه 66/6 درصد، در سرعت دو متر بر ثانیه 75 درصد، در سرعت سه متر بر ثانیه 80 درصد، در سرعت چهار متر بر ثانیه 71/4 درصد، در سرعت پنج و هفت متر بر ثانیه 66/6 درصد، در سرعت 7/45 متر بر ثانیه 76/9 درصد، در سرعت 8/25 متر بر ثانیه 80 درصد، در سرعت 8/5 متر بر ثانیه 82 درصد، در سرعت 9 متر بر ثانیه 89 درصد و برای راه‌اندازی توربین بادی پره صاف در سرعت 10 متر بر ثانیه 95٪ نیروی توربین بادی پره متخلخل لازم است تا شروع به دوران نماید.

6- مراجع

- [1] R. Shahbazi, S. Kouravand, R. Hassan-Beygi, Analysis of wind turbine usage in greenhouses: wind resource assessment, distributed generation of electricity and environmental protection, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, pp. 1-21, 2019.
- [2] Z. Zhao, D. Wang, T. Wang, W. Shen, H. Liu, M. Chen, A review: Approaches for aerodynamic performance improvement of lift-type vertical axis wind turbine, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 49, 2022.
- [3] I. Marinić-Kragić, D. Vučina, Z. Milas, Global optimization of Savonius-type vertical axis wind turbine with multiple circular-arc blades using validated 3D CFD model, *Energy*, Vol. 241, 2022.
- [4] W. Xu, C. C. Li, S. X. Huang, Y. Wang, Aerodynamic performance improvement analysis of Savonius Vertical Axis Wind Turbine utilizing plasma excitation flow control, *Energy*, Vol. 239, pp. 122-133, 2022.
- [5] D. Satrio, I. Utama, Experimental investigation into the improvement of self-starting capability of vertical-axis tidal current turbine, *Energy Report*, Vol. 7, pp. 4587-4594, 2021.
- [6] A. R. Sengupta, A. Biswas, R. Gupta, Studies of some high solidity symmetrical and unsymmetrical blade H-Darrieus rotors with respect to starting characteristics, dynamic performances and flow physics in low wind streams, *Renewable Energy*, Vol. 93, pp. 536-547, 2016.
- [7] C. Boccaletti, G. Fabbri, J. Marco, F. Santini, An overview on renewable energy technologies for developing countries: the case of Guinea Bissau, *Renewable Energy Power Quality Journal*, Vol. 1, No. 6, pp. 343-348, 2008.
- [8] B. K. Kirke, L. Lazauskas, Limitations of fixed pitch Darrieus hydrokinetic turbines and the challenge of variable pitch, *Renewable Energy*, Vol. 36, No. 3, pp. 893-897, 2011.
- [9] P. R. Ebert, D. H. Wood, Observations of the starting behavior of a small horizontal-axis wind turbine, *Renewable Energy*, Vol. 12, No. 3, pp. 245-257, 1997.
- [10] J. R. Baker, Features to aid or enable self-starting of fixed pitch low solidity vertical axis wind turbines, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 15, No. 1, pp. 369-380, 1983.
- [11] N. Hill, R. Dominy, G. Ingram, J. Dominy, Darrieus turbines: The physics of self-starting, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, Vol. 223, No. 1, pp. 21-29, 2009.
- [12] R. G. Dominy, P. Lunt, A. Bickerdyke, J. Dominy, Self-starting capability of a darrieus turbine, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A Journal of Power and Energy*, Vol. 221, No. 1, pp. 111-120, 2007.
- [13] M. Douak, Z. Aouachria, R. Rabehi, N. Allam, Wind energy systems: analysis of the self-starting physics of vertical axis wind turbine, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 81, No. 1, pp. 1602-1610, 2018.
- [14] M. T. Nguyen, F. Balduzzi, A. Goude, Effect of pitch angle on power and hydrodynamics of a vertical axis turbine, *Ocean Engineering*, Vol. 238, 2021.

سرعت 10 متر بر ثانیه نیروی مورد نیاز برای دوران توربین بادی پره متخلخل بیش‌تر از پره مستقیم می‌باشد [51].

جدول 7 مقایسه نیروی راه‌اندازی توربین بادی با پره مستقیم و متخلخل برحسب نیوتن در ارتفاع 75 سانتی‌متر

پره متخلخل	پره مستقیم	سرعت توربین (متر بر ثانیه)
0.10	0.15	1
0.15	0.20	2
0.20	0.25	3
0.25	0.35	4
0.30	0.45	5
0.40	0.60	7
0.50	0.65	7.5
0.70	0.75	8.5
0.85	0.95	9
1.05	1.05	9.5
1.20	1.15	10

5- نتیجه‌گیری

هدف از این مقاله مقایسه دستاوردهای حاصل از مطالعه بر روی توربین بادی پره متخلخل و مستقیم و بررسی تاثیر پره متخلخل بر خود شروع شونده‌گی توربین بادی محور عمودی داریوس می‌باشد. جهت اجرای این طرح، توربین بادی محور عمودی داریوس با پره‌های صاف و متخلخل طراحی، ساخته و تست شده است. آزمایش‌های تجربی در یک دمنده چهار فن در سرعت‌های یک تا 10 متر بر ثانیه انجام شد. نتایج مطالعات تجربی به دست آمده از مقایسه پژوهش‌های انجام شده به صورت موارد ذیل خلاصه می‌شوند:

مطالعات تجربی سرعت زاویه‌ای در سرعت 2/5 و سه متر بر ثانیه توربین باد پره متخلخل دو برابر و در سرعت چهار متر بر ثانیه سه برابر توربین باد پره مستقیم و در سرعت 4/5، پنج، 5/5، شش، 6/5 و هفت متر بر ثانیه، سرعت زاویه‌ای توربین باد پره متخلخل نسبت به توربین باد پره مستقیم 56/25٪، 20٪، 22٪، 15٪، 7/5٪ و 12٪ بیش‌تر بوده در سرعت نه و 10 متر بر ثانیه دوران توربین بادی پره مستقیم 1/8 و 6/4 درصد نسبت به توربین باد پره متخلخل بهتر بوده است. برای راه‌اندازی توربین باد پره متخلخل در سرعت‌های یک و دو متر بر ثانیه 50٪، سرعت سه متر بر ثانیه 33٪، سرعت چهار و پنج متر بر ثانیه 50٪، سرعت هفت متر بر ثانیه 60٪، سرعت 7/45 متر بر ثانیه 57٪، سرعت 8/25 متر بر ثانیه 55٪ و در سرعت 8/5 متر بر ثانیه 50٪ گشتاور و نیروی توربین بادی پره مستقیم لازم است تا شروع به دوران نماید. برای راه‌اندازی توربین باد پره مستقیم در سرعت نه و 10 متر بر ثانیه 93٪ و 86٪ گشتاور لحظه‌ای و نیروی راه‌اندازی توربین بادی پره متخلخل لازم است تا شروع به دوران نماید. برای راه‌اندازی توربین در سرعت‌های یک و دو متر بر ثانیه، چون توربین در دو حالت پره مستقیم و متخلخل دورانی نداشته است، توان راه‌اندازی در این دو حالت وجود نداشته و در سرعت سه متر بر ثانیه توان راه‌اندازی توربین باد پره متخلخل 35 درصد کم‌تر از توربین باد پره مستقیم بوده، در سرعت چهار متر بر ثانیه توان راه‌اندازی 33 درصد، در سرعت پنج متر بر ثانیه توان راه‌اندازی 31 درصد، در سرعت هفت متر بر ثانیه توان راه‌اندازی برابر با 37 درصد و در سرعت هشت متر بر ثانیه توان راه‌اندازی پره متخلخل 48 درصد کم‌تر از توربین باد پره مستقیم بوده ولی در سرعت نه و

- [35] H. E. Tanürün, Improvement of vertical axis wind turbine performance by using the optimized adaptive flap by the Taguchi method. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 46, No. 1, pp. 71-90, 2024.
- [36] H. Su, H. Meng, T. Qu, L. Lei, Wind tunnel experiment on the influence of array configuration on the power performance of vertical axis wind turbines. *Energy Conversion and Management*, Vol. 241, 114299, 2021.
- [37] Y. Yan, E. Avital, J. Williams, J. Cui, Aerodynamic performance improvements of a vertical axis wind turbine by leading-edge protuberance. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 211, 104535, 2021.
- [38] M. H. Ranjbar, B. Rafiei, S. A. Nasrazadani, K. Gharali, M. Soltani, A. Al-Haq, J. Nathwani, Power enhancement of a vertical axis wind turbine equipped with an improved duct, *Energies*, Vol. 14, No. 18, 5780, 2021.
- [39] L. Li, I. Chopra, W. Zhu, M. Yu, Performance analysis and optimization of a vertical-axis wind turbine with a high tip-speed ratio, *Energies*, Vol. 14, No. 4, 996, 2021.
- [40] H. Seifi and M. Seify Davari, Optimization of E387 Airfoil Used in Wind Turbine Blades for Maximizing its Lift to Drag Coefficients Ratio, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 7, No. 1, pp. 96-101, 2020.
- [41] M. Shahmari, P. Zarafshan, S. Kouravand and M. Khashehchi, Design and analysis of a combined savonius-darrieus wind turbine for irrigation application, *Journal of Renewable Energy and Environment*, Vol. 7, No. 3, pp. 80-86, 2020.
- [42] J. Wata, M. Faizal, B. Talu, L. Vanawalu, P. Sotia and M. R. Ahmed, Studies on a low Reynolds number airfoil for small wind turbine applications, *Science China Technological Sciences*, Vol. 54, pp. 1684-1688, 2011.
- [43] M. H. Khanjanpour, and A. A. Javadi, Optimization of the hydrodynamic performance of a vertical Axis tidal (VAT) turbine using CFD-Taguchi approach, *Energy Conversation Management* 222: 113235, 2020.
- [44] M. M. Elsakka, D. B. Ingham, L. Ma and M. Pourkashanian, CFD analysis of the angle of attack for a vertical axis wind turbine blade, *Energy Conversation Management*, Vol. 182, pp. 154-165, 2019.
- [45] S. M. Jain, and U. K. Saha, On the influence of blade thickness-to-chord ratio on dynamic stall phenomenon in H-type Darrieus wind rotors, *Energy Conversation Management*, Vol. 218, 113024, 2020.
- [46] H. Seifi, S. Kouravand, and M. Seifi Davary, Numerical and experimental study of NACA airfoil in low Reynolds numbers for use of Darrieus vertical axis micro-wind turbine, *Journal of Renewable and New Energy*, 2023.
- [47] H. Seifi Davari, S. Kouravand, M. Seify Davari, and Z. Kamalnejad, Numerical investigation and aerodynamic simulation of Darrieus H-rotor wind turbine at low Reynolds numbers, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 45, No. 3, pp. 6813-6833, 2023.
- [48] H. Seifi Davary, S. Kouravand and I. Khatami, Experimental Study of Porous Blade Effect on the Rotation of Darrieus Vertical Axis Wind Turbine, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 20, No. 1, pp. 181-191, 2020.
- [49] H. Seifi, S. Kouravand, M. S. Davary and S. Mohammadzadeh, Experimental study of self-starting torque required to operate darrieus the vertical axis wind turbine, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 9, No. 2, pp. 9-19, 2022.
- [50] H. Seifi Davari and S. Kouravand, Improving the Performance Self-Starting of the Vertical Axis Wind Turbine Using Porous Blade, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 20, No. 5, pp.1199-1209, 2020.
- [51] H. Seifi, S. Kouravand, M.S. Davary and S. Mohammadzadeh, Numerical and Experimental study of the effect of increasing aspect ratio of self-starting force to vertical axis wind turbine, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 10, No. 1, pp. 1-14, 2023.
- [15] B. Zouzou, I. Dobrev, F. Massouh, R. Dizene, Experimental and numerical analysis of a novel darrieus rotor with variable pitch mechanism at low TSR, *Energy*, Vol. 186, 2019.
- [16] H. Seifi, M. Seify Davari, Aerodynamic Analysis and Numerical Simulation of Naca0012 Airfoils Wind Turbine Using Vortex Plates Numerical Method, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 7, No. 1, pp. 20-27, 2020.
- [17] H. Seifi, M. Seifi Davari, Hydrofoil of Darrieus H-Rotor Vertical Axis Water Micro Turbine, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 8, No. 1, pp. 113-124, 2021.
- [18] M. Elkhoury, T. Kiwata, E. Aoun, Experimental and numerical investigation of a three-dimensional vertical-axis wind turbine with variable-pitch, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 139, pp. 111-123, 2015.
- [19] I. Hashem, M. H. Mohamed, Aerodynamic performance enhancements of H-rotor Darrieus wind turbine, *Energy*, Vol. 142, pp. 531-545, 2018.
- [20] S. Zanforlin, T. Nishino, Fluid dynamic mechanisms of enhanced power generation by closely spaced vertical axis wind turbines, *Renewable Energy*, Vol. 99, pp. 1213-1226, 2016.
- [21] J. Chen, L. Chen, H. Xu, H. Yang, C. Ye, D. Liu, Performance improvement of a vertical axis wind turbine by comprehensive assessment of an airfoil family, *Energy*, Vol. 114, pp. 318-331, 2016.
- [22] M. H. Mohamed, Performance investigation of H-rotor Darrieus turbine with new airfoil shapes, *Energy*, Vol. 47, No. 1, pp. 522-530, 2012.
- [23] A. Sagharichi, M. Zamani, A. Ghasemi, Effect of solidity on the performance of variable-pitch vertical axis wind turbine, *Energy*, Vol. 161, pp. 753-775, 2018.
- [24] K. H. Wong, W. T. Chong, N. L. Sukiman, Y. Shiah, S. C. Poh, K. Sopian, Experimental and simulation investigation into the effects of a flat plate deflector on vertical axis wind turbine, *Energy Conversion and Management*, Vol. 160, pp. 109-125, 2018.
- [25] S. Zanforlin, S. Letizia, Improving the performance of wind turbines in urban environment by integrating the action of a diffuser with the aerodynamics of the rooftops, *Energy Procedia*, Vol. 82, pp. 774-781, 2018.
- [26] M. Takao, H. Kuma, T. Maeda, Y. Kamada, M. Oki, A. Minoda, A straight-bladed vertical axis wind turbine with a directed guide vane row – effect of guide vane geometry on the performance, *Journal of Thermal Science*, Vol. 18, No. 1, pp. 54-57, 2009.
- [27] K. Watanabe, S. Takahashi, Y. Ohya, Application of a diffuser structure to vertical-axis wind turbines, *Transdisciplinary Energy Research*, Vol. 9, No. 6, pp. 406- 414, 2016.
- [28] J. O. Dabiri, Potential order-of-magnitude enhancement of wind farm power density via counter rotating vertical-axis wind turbine arrays, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 3, No. 4, pp. 104-117, 2011.
- [29] A. Vergaerde, T. De Troyer, L. Standaert, J. Kluczevska-Bordier, D. Pitance, A. Immas, Experimental validation of the power enhancement of a pair of vertical-axis wind turbines, *Renewable Energy*, Vol. 146, pp. 181-187, 2020.
- [30] Z. Sefidgar, A. Ashrafzadeh, A. Arabkoohsar, Cross-Flow Small Scale Wind Turbines: An Overview of Technology Development and Applications, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 9, pp. 158-169, 2022.
- [31] S. Kouravand, B. Moetakef Imani, A. Mashaallah Kermani, Design and analysis of a small wind turbine with combined airfoil, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 3, No. 2, pp. 65-73, 2017.
- [32] J. Tarighi, Analysis of wind flow of cross-axis wind turbine in Ansys Fluent software and its comparison with vertical axis wind turbine, *Journal of Environmental Science Studies*, Vol. 7, No. 4, pp. 5605-5614, 2022.
- [33] D. Sarkar, S. Shukla, N. Alom, P. Sharma, and B. J. Bora, Investigation of a Newly Developed Slotted Bladed Darrieus Vertical Axis Wind Turbine: A Numerical and Response Surface Methodology Analysis. *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 145, No. 5, 051302, 2023.
- [34] M. Zamani, A. Sangtarash, and M. J. Maghrebi, Numerical study of porous media effect on the blade surface of vertical axis wind turbine for enhancement of aerodynamic performance, *Energy Conversion and Management*, Vol. 245, 114598, 2021.