



Improving the Performance Self-Starting of the Vertical Axis Wind Turbine Using Porous Blade

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Seifi Davari H.^{*1} MSc,
Kouravand Sh.² PhD,
Khatami I.¹ PhD

How to cite this article

Seifi Davari H, Kouravand Sh, Khatami I. Improving the Performance Self-Starting of the Vertical Axis Wind Turbine Using Porous Blade. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(5):1199-1209.

ABSTRACT

In this research, airfoil turbine blade airfoil Darrieus vertical axis selected from three airfoils NACA0015, NACA0018 and NACA0021. The maximum ratio of the lift coefficient to the drag coefficient was determined in the Q-Blade software, and finally the airfoil NACA 0015 at speeds of 5 and 10M/s has the maximum value of the lift coefficient to the drag coefficient at an attack angle of 13 degrees equal to 2.58 and an attack angle of 6.5 degrees equal to 15.3. Then airfoil NACA 0015 was selected for numerical analysis and the turbulence method K- ω SST was used for numerical analysis and the results were verified using laboratory results. The wind turbine was designed and developed in CATIA software. Four wind fans were used to create wind power. The instruments used in measuring, testing and fabricating were calibrated. The results showed that the Self-Starting power of the porous blade in the speeds of 3, 4, 5, 7, 8m/s was %35, %33, %31, %37 and %48 less than the direct blade wind turbine, respectively.

Keywords Wind Speed; Self-Starting; Porous; Instantaneous Power; Darrieus

¹Ocean Engineering Faculty, Chabahar Maritime University, Chabahar, Iran

²Agriculture Faculty, Abouraihan College, University of Tehran, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Ocean Engineering Faculty, Chabahar Maritime University, Chabahar, Iran Postal Code: 9971756499

Phone: -

Fax: -

hsefidavary@gmail.com

Article History

Received: May 23, 2019

Accepted: October 30, 2019

ePublished: May 09, 2020

CITATION LINKS

[1] Characteristics of ice accretions on blade of the straight-bladed vertical axis wind turbine rotating at low tip speed ratio [2] Numerical study of the aerodynamic performance of a 500 W Darrieus-type vertical-axis wind turbine [3] 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 [4] Determination of vertical axis wind turbines optimal configuration through CFD simulations [5] Cost optimization of wind turbines for large scale offshore wind farms [6] Optimal design of horizontal-axis wind turbines using blade element theory and evolutionary computation [7] Robust design of horizontal axis wind turbines using Taguchi method [8] Self-starting capability of a Darrieus turbine [9] Effect of the number of blades and solidity on the performance of a vertical axis wind turbine [10] Full scale behavior of a small size vertical axis wind turbine [11] Numerical investigation of dimple effects on Darrieus vertical axis wind turbine [12] Mathematics for computer graphics (undergraduate topics in computer science) [13] The variation with Reynolds number of pressure distribution over an airfoil section [14] Design analysis of a horizontal axis tidal turbine

بهبود عملکرد راه‌اندازی توربین باد محور عمودی داریوس نوع اچ با استفاده از سطوح متخلخل

حسین سیفی‌داوری^{*MSc}

دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار، ایران

شهریار کوروند PhD

دانشکده فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

ایمان خاتمی PhD

دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار، ایران

چکیده

در این تحقیق برای انتخاب ایرفویل پره توربین باد محور عمودی داریوس سه ایرفویل NACA0015، NACA0018 و NACA0021 انتخاب و در نرم‌افزار Q-Blade نسبت ماکزیمم ضرایب برآ به پسا مشخص و در نهایت ایرفویل ناکا ۰۰۱۵ در سرعت ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه بیشترین مقدار نسبت ضریب برآ به ضریب پسا در زاویه حمله ۱۳ درجه برابر ۲/۵۸ و زاویه حمله ۶/۵ درجه برابر ۱۵/۳ داشت و در ادامه ایرفویل ناکا ۰۰۱۵ انتخاب و برای تحلیل عددی از روش توربولانسی K- ω SST استفاده و با نتایج آزمایشگاهی صحت‌سنجی شد. در ادامه توربین باد در نرم‌افزار CATIA طراحی و ساخته شد. برای ایجاد جریان باد از دمنده چهار فن و برای محاسبه دقیق‌تر وسایل مورد استفاده در اندازه‌گیری، آزمون و ساخت کالیبره شده‌اند. نتایج نشان داد که توان راه‌اندازی پره متخلخل در سرعت ۳، ۴، ۵، ۷ و ۸ متر بر ثانیه ۳۵، ۳۳، ۳۱، ۳۷ و ۴۸٪ کمتر از توربین باد پره مستقیم بوده است.

کلیدواژه‌ها: سرعت باد، راه‌اندازی، تخلخل، توان لحظه‌ای، داریوس

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۰۸

*نویسنده مسئول: hsefidavary@gmail.com

۱- مقدمه

توربین باد از انرژی جنبشی استفاده کرده و آن را به توان مکانیکی و سپس به توان الکتریکی تبدیل می‌کند. طراحی روتور و عملکرد آیرودینامیکی پره‌های توربین خیلی مهم است و انتظار داشتن ماکزیمم راندمان بدون انجام عملیات بهینه‌سازی غیرممکن است [1]. دو نوع اولیه از توربین‌های محور عمودی وجود دارد: نوع کشیدنی و لیفتی. توربین‌های نوع کشش یا ساوینیوس در سرعت اولیه راه‌اندازی بهتری نسبت به توربین باد داریوس از خود نشان می‌دهند اما توربین باد عمود محور داریوس تحت شرایط سرعت باد زیاد عملکرد بهتری نسبت به نوع ساوینیوس دارند [2]. در حال حاضر سیستم‌های توربین باد محور عمودی داریوس به دلیل سادگی ساختاری خود، استقلال جهت باد، اثره‌بخشی هزینه و تعمیر و نگهداری آسان‌تر مورد توجه قرار گرفته‌اند. این توربین دارای پره عمودی مستقیم هستند که از نظر ساختمانی و طراحی ساده‌تر هستند و این پره‌ها را می‌توان با استفاده از بازو به طور مستقیم به شفت روتور متصل کرد. اما عیب اصلی این روتور راه‌اندازی ضعیف آن در سرعت‌های پایین است [3]. از جمله علی که باعث پیشرفت کم این نوع توربین‌ها در مقایسه با توربین‌های محور افقی شده ناتوانی آن‌ها در راه‌اندازی اولیه است [4].

پره توربین باد نقش بسیار مهمی در بازده و توان خروجی یک توربین باد ایفا می‌کند به همین دلیل تحقیقات متعددی در زمینه بهینه‌سازی پره توربین باد صورت گرفته است. فولگس‌انگ و تامسن، بنینی و توفالو و همچنین هو و رائو در مورد بهینه‌سازی ویژگی توربین‌های باد نظیر وتر، توپی، تعداد پره‌ها و سرعت روتور که در راه‌اندازی اولیه تاثیر داشت، تحقیق نموده‌اند [5-7]. لیچر و همکاران [2] نشان دادند که ترکیب توربین باد داریوس و ساوینیوس می‌تواند به راه‌اندازی بهتر داریوس کمک کند. دومینی و همکاران [8] اثبات کردند که توربین باد محور عمودی نوع سه پره نسبت به دو پره، پتانسیل بهتری برای خود راه‌اندازی دارد زیرا راه‌اندازی خودکار در نوع دو پره وابستگی شدید به زاویه قرارگیری اولیه پره‌ها دارد. دوآک و همکاران [9] تحلیل فیزیکی نقطه شروع توربین بادی محور عمودی داریوس را مطالعه کردند. آن‌ها از یک سیستم نظارت و کنترل زاویه برای راه‌اندازی خود به خودی توربین باد محور عمودی داریوس استفاده کرده و خودشروع شونده‌گی توربین در سرعت‌های پایین بهبود یافته بود. پاگنینی و همکاران [10] بر روی ارزیابی تولید برق و رفتار ساختاری توربین بادی محور عمودی داریوس مطالعه و به این نتیجه رسیدند که دو این مساله چگونه با هم مرتبط هستند و نتایج بدست آمده می‌تواند نشانه‌های مناسبی برای بهبود عملکرد راه‌اندازی توربین‌های باد محور عمودی باشد.

استفاده از توربین‌های باد محور عمودی به عنوان یکی از منابع تولید انرژی باد از اهمیت بالایی برخوردار است. از جمله مزیت توربین‌های باد محور عمودی نسبت به سایر توربین‌ها هزینه اولیه تولید، سبکی، راحتی نصب و استفاده در مناطق مسکونی است. توربین باد داریوس راندمان بالاتری نسبت به سایر توربین‌های بادی محور عمودی دارد. با وجود اینکه توربین باد محور عمودی داریوس خودشروع شونده خوبی در سرعت‌های پایین نیستند، اما کارایی بالای آن نسبت به سایر توربین‌های باد محور عمودی داریوس و از همه مهم‌تر عدم حساسیت به جهت وزش باد، آن را به صرفه و اقتصادی‌تر از سایر توربین‌ها کرده که در این پژوهش به بررسی تاثیر پره متخلخل بر بهبود عملکرد راه‌اندازی توربین باد محور عمودی داریوس نوع اچ که برای اولین بار مورد مطالعه قرار گرفته شده و مقایسه آن با عملکرد راه‌اندازی پره مستقیم انجام شده که برای متخلخل کردن فضای پره از ورق امباس لوزی شکل به ضخامت ۳/۰ میلی‌متر و برای ساخت پره مستقیم، از ورق ساده آلومینیومی هم‌ضخامت با ورق امباس لوزی استفاده شد که در ادامه به روند انتخاب ایرفویل‌ها برای هر دو پره پرداخته می‌شود.

برای انتخاب ایرفویل پره توربین باد محور عمودی داریوس مورد مطالعه ابتدا سه ایرفویل NACA0015، NACA0018 و NACA0021 را انتخاب و در نرم‌افزار Q-Blade نسبت ماکزیمم ضریب برآ به ضریب پسا را بدست آورده و در نهایت ایرفویلی که در سرعت‌های ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه نسبت ماکزیمم ضریب برآ به ضریب پسا بالایی داشته باشد، انتخاب شد. همان‌طور که در نمودار ۱ قابل

۲- روش‌ها

۲-۲- تئوری حل و معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان هوا در توربین‌های محور عمودی داریوس همان معادلات بقای جرم یا پیوستگی و اندازه حرکت یا همان معادلات مومنتم هستند. جریان سیال در این مسئله تراکم‌ناپذیر بوده و معادلات پیوستگی حاکم برای حالت ناپا به صورت فرمول ۱ تعریف می‌شود [11]:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1)$$

معادله بقای اندازه حرکت را هم می‌توان به صورت فرمول ۲ بیان کرد.

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho v v) = -\nabla p + v \cdot (\tau) + \rho g + F \quad (2)$$

در معادله بالا F و g نیروهای حجمی و نیروهای گرانشی هستند و همچنین T تانسور تنش است که به صورت فرمول ۳ تعریف می‌شود [11].

$$\tau = \mu[(\nabla v + \nabla v^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot v I] \quad (3)$$

۲-۲- طراحی و ساخت

شماتیک توربین باد در نرم‌افزار کتیا طراحی، شکل ۱- الف و سپس در مقیاس $\frac{1}{5}$ ساخته و در شکل ۱- ب نشان داده شده و ارتفاع پره ۳۵ سانتی‌متر، شعاع پره ۱۸/۵ سانتی‌متر و طول ایرفویل برابر ۴/۶ سانتی‌متر است.



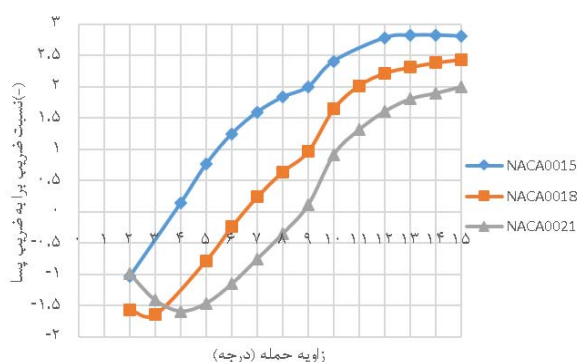
الف



ب

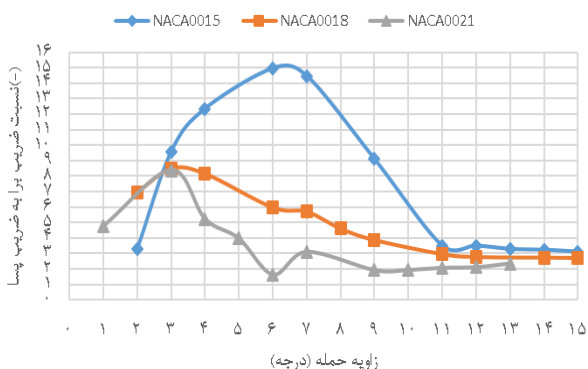
شکل ۱) شماتیک (الف) و ساخت توربین (ب)

مشاهده است، ایرفویل ناکا ۰۱۵ نسبت ضریب برآ به ضریب پسای بیشتری نسبت به دو ایرفویل دیگر در سرعت ۵ متر بر ثانیه داشته به طوری که بیشترین مقدار نسبت ضریب برآ به ضریب پسای زاویه حمله ۱۳ درجه و برابر با ۲/۵۸ بوده و نسبت ضریب برآ به ضریب پسای برای ایرفویل ناکا ۰۱۸ در زاویه حمله ۱۵ درجه و برابر با ۲/۴۰ بوده که کمتر از ایرفویل ناکا ۰۱۵ است و برای ایرفویل ناکا ۰۲۱ ماکزیمم نسبت ضریب برآ به ضریب پسای در زاویه ۱۵ درجه و برابر ۲ بوده که کمتر از دو ایرفویل دیگر است و در این سرعت ایرفویل ناکا ۰۱۵ نسبت به دو ایرفویل دیگر شرایط مناسب‌تری برای انتخاب دارد.



نمودار ۱) نسبت ضریب برآ به ضریب پسای ایرفویل‌ها در سرعت ۵ متر بر ثانیه

همانطور که در نمودار ۲ قابل مشاهده است ایرفویل ناکا ۰۱۵ نسبت ضریب برآ به ضریب پسای بیشتری نسبت به دو ایرفویل دیگر در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه داشته به طوری که بیشترین مقدار نسبت ضریب برآ به ضریب پسای در زاویه حمله ۶/۵ درجه و برابر با ۱۵/۳ بوده و نسبت ضریب برآ به ضریب پسای برای ایرفویل ناکا ۰۱۸ در زاویه حمله ۳ درجه و برابر با ۸/۲ بوده که کمتر از ایرفویل ناکا ۰۱۵ است و برای ایرفویل ناکا ۰۲۱ ماکزیمم نسبت ضریب برآ به ضریب پسای در زاویه ۳ درجه و برابر ۸/۵ بوده که کمتر از ایرفویل ناکا ۰۱۵ است و در این سرعت ایرفویل ناکا ۰۱۵ نسبت به دو ایرفویل دیگر شرایط مناسب‌تری برای انتخاب داشته و در نهایت ایرفویل NACA0015 با استفاده از نرم‌افزار Q-Blade انتخاب و در طراحی و ساخت پره استفاده شد.



نمودار ۲) نسبت ضریب برآ به ضریب پسای ایرفویل‌ها در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه

۲-۲-۱- استفاده از ورق آلومینیوم برای ساخت پرها

آلومینیوم و آلیاژهای آن به طور گسترده‌ای در صنایع مختلف به کار گرفته می‌شود. این آلیاژها به دلیل دانسیته پایین، هدایت حرارتی بالا و خواص الکترومغناطیس، در صنایع هوافضا، قطعات هواپیما و سایر صنایع کاربرد فراوانی دارند [12].

ورق آلومینیومی نوع خاصی از ورق است که از آلیاژ سری یک، با ویژگی‌های فلز آلومینیوم تولید و در دسته‌های ورق فلزی سبک قرار می‌گیرد. برای ساخت پرها از یک ورق ساده آلومینیوم، شکل ۲- الف به ضخامت $\frac{3}{8}$ میلی‌متر به ابعاد 2×1 متر و برای ساخت پره متخلخل از ورق آلومینیوم امباس لوزی، شکل ۲- ب که به صورت خلل و فرج است، به ضخامت $\frac{3}{8}$ میلی‌متر استفاده شد.



الف



ب

شکل ۳ (تصویر نیروسنج (الف) و نحوه نصب نیروسنج به توربین بادی محور عمودی داریوس (ب))

۳- تست آزمایشگاهی

یکی از مهم‌ترین قسمت در این کار اندازه‌گیری متغیرهای مورد نظر جهت بررسی و آنالیز سیستم راه‌انداز، داده‌برداری با استفاده از ابزار اندازه‌گیری دقیق شامل ساعت اندیکاتور، دورسنج، سرعت‌سنج و دیگر ابزارآلات اندازه‌گیری است.

ساعت اندیکاتور یا ساعت اندازه‌گیری شکل ۴- الف، جزو ابزارهای اندازه‌گیری متغیر است که با دقت $\frac{1}{100}$ میلی‌متر بعد از برش قطعات و تعیین اختلاف سطح پیچ متری و سایر قطعات مورد استفاده در ساخت توربین با دقت $\frac{1}{100}$ میلی‌متر استفاده و برای ایجاد جریان باد از یک دمنده شکل ۴- ب که از چهار فن با قابلیت هوادهی و برای اندازه‌گیری سرعت باد از سرعت‌سنج لوترون مدل YK2004AH شکل ۴- ج و برای اندازه‌گیری دوران توربین از یک دورسنج لوترون مدل DT-2268 شکل ۴- د استفاده شد.



الف



ب

شکل ۲ (ورق ساده آلومینیوم (الف) و امباس لوزی شکل (ب))

برای ساخت پرها از ایرفویل NACA0015 و جنس مورد استفاده برای روکش پرها از ورق آلومینیوم ساده برای پره مستقیم و برای پره متخلخل از روکش ورق امباس لوزی که به صورت خلل و فرج است، استفاده شد که 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 تا برآمدگی و فرورفتگی در پرها ایجاد نشود و کنترل پرها دقیق است و در هر حالت مقایسه، هر کدام از پرها شرایط و کنترل دقیق و یکسانی دارند تا خطایی در محاسبات و ساخت پیش نیاید.

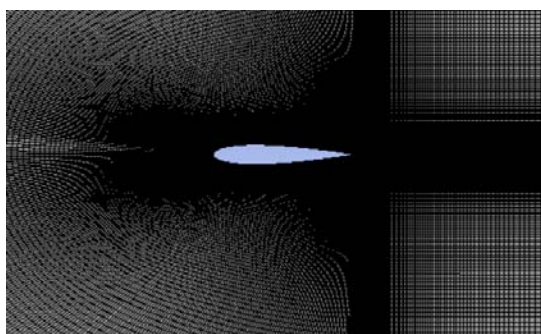
۲-۲-۲- نیروی راه‌اندازی

یکی از مشکلات توربین‌های باد محور عمودی داریوس توانایی کم آن‌ها در راه‌اندازی اولیه است که اساس کار این پژوهش هم بر این اساس است. برای همین لازم است در ابتدا نیروی لازم برای شروع به حرکت توربین را اندازه‌گیری کرد. شکل ۳ نحوه استفاده

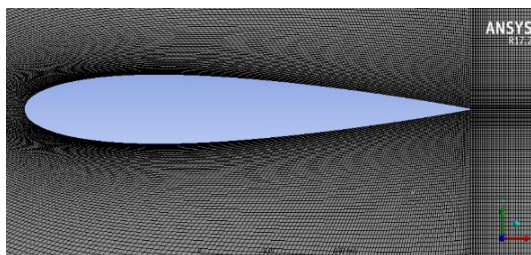
روش Second Order و برای جداسازی باقی معادلات از روش Second Order Upwind و جهت کوپل فشار و سرعت، از روش SIMPLE استفاده شد.

۴-۱- نحوه مش‌بندی

با ایجاد یک شبکه‌بندی مناسب حل یک سیستم معادلات دیفرانسیل را تا حد زیادی تسریع و بالعکس انتخاب نامناسب محل نقاط شبکه باعث ناپایداری یا عدم همگرایی در محاسبات گردد. روش متداول این است که در نزدیکی و اطراف ایرفویل برای افزایش دقت محاسبات از شبکه ریزتری در این نواحی استفاده شود. به علت پیچیدگی هندسه ایرفویل، جهت بهبود کیفیت شبکه‌بندی، دامنه محاسباتی را به چند ناحیه تقسیم و هر ناحیه به صورت جداگانه شبکه‌بندی شد. این امر کیفیت شبکه‌بندی را به خصوص در نواحی نزدیک سطح ایرفویل افزایش داده که این گونه مش‌زنی سبب بهبود خاصیت تعامدپذیری خطوط شبکه بر سطح ایرفویل در لبه حمله شد. هندسه مقطع پره برای ایرفویل در محیط Design Modeler انسیس ترسیم و شبکه‌بندی شده است. با توجه به اینکه در شبکه با سازمان، قدرت کنترل شبکه بهتر است و همچنین در محاسبه جریان همگرایی بهتری صورت می‌گیرد، شبکه ایجاد شده برای ایرفویل مورد بررسی ساختار یافته بوده و دامنه محاسباتی C شکل حول ایرفویل استفاده شده است. شعاع نیم‌دایره حول دامنه ۱۱ برابر وتر و فاصله مرز خروجی دامنه تا لبه فرار ۱۸ برابر وتر ایرفویل و برای راحتی مش‌زنی شکل مورد نظر به ۴ قسمت تقسیم و برای تولید شبکه از شبکه‌بندی نوع C دو بعدی و سازمان یافته استفاده و سعی شده تا مقدار ضریب بی بعد γ^+ به اندازه‌ای باشد تا اولین گره در نزدیکی ایرفویل در زیر لایه لزج قرار گرفته باشد. دامنه محاسباتی و نمای نزدیک در شکل ۶ نشان داده شده است.



الف



ب

شکل ۶) نمایی از شبکه‌بندی کل دامنه حل (الف) و نمای نزدیک ایرفویل (ب)



ب



د



الف



ج

شکل ۴) ابزارهای اندازه‌گیری

بعد از ساخت توربین باد محور عمودی داریوس با پره‌های مستقیم و متخلخل شروع به تست و در جلوی دمنده قرار و در سرعت‌های مختلف، نیرو و دوران توربین بادی در هر دو حالت پره مستقیم و متخلخل اندازه‌گیری و در شکل ۵ قرارگیری توربین بادی را در مقابل دمنده نشان می‌دهد.



الف



ب

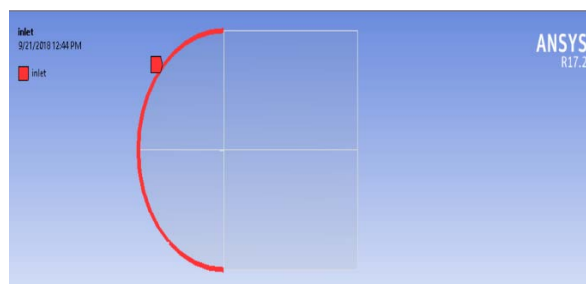
شکل ۵) تست توربین

۴- شبیه‌سازی عددی

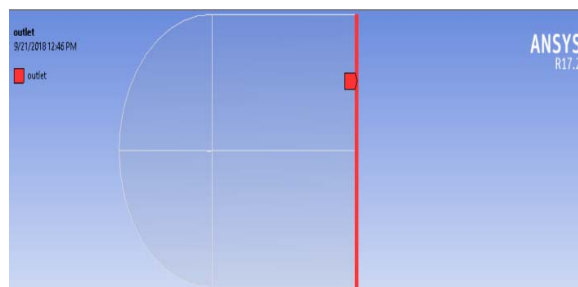
نرم‌افزار انسیس فلوئنت دارای مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی ایرفویل مورد نظر است که با مطالعه کارهای انجام شده و امتحان چند مدل مختلف، در نهایت مدل $K\omega - SST$ برای این کار انتخاب و از شرط سرعت ورودی و مرز فشار خروجی در خروجی بهره گرفته شد. همچنین برای دیواره از شرط مرزی (WALL) و از نوع No slip استفاده و برای جداسازی معادلات مومنتم، از

۲-۴- شرایط مرزی

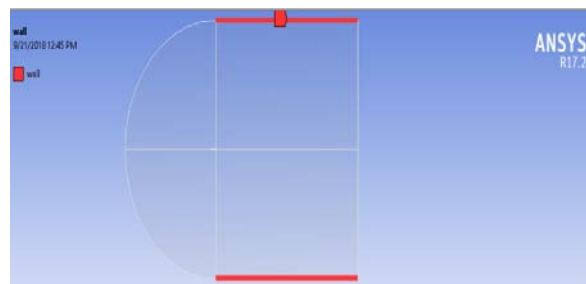
تا قبل از زاویه واماندگی، ضریب نیروی برآ به صورت خطی افزایش و در روش حاضر مدل انتخاب شده به صورت دقیق‌تر نسبت به مدل *دانلو*، نتایج را پیش‌بینی و با نزدیک شدن به مرحله واماندگی در زاویه حمله بالا، به خاطر مسائلی همچون جدایی جریان، نتایج دارای اختلاف در نزدیکی‌های زاویه واماندگی است و مقدار ماکزیمم ضریب برآی پیش‌بینی شده در این تحقیق خیلی نزدیک‌تر نسبت به مدل حل شده *دانلو* برای مدل تجربی است.



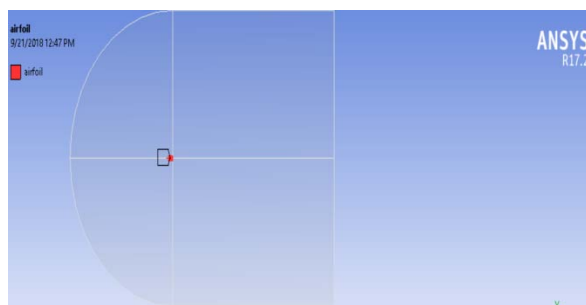
الف



ب



ج



د

در ورودی جریان که علاوه بر مرز ورودی، خطوط بالا و پایین دامنه محاسباتی را نیز شامل می‌شود، با توجه به اینکه جریان هوای اطراف توربین باد تراکم‌ناپذیر است، شرط مرزی ورودی سرعت و در خروجی جریان، شرط مرزی فشار خروجی مورد استفاده که در این شرط مرزی فشار استاتیک به صورت نسبی در مرز خروجی وارد می‌شود. برای سطح ایرفویل شرط مرزی دیوار و با توجه به وجود لزجت، شرط عدم لغزش به صورت پیش فرض در حرکت سیال از روی سطح ایرفویل اعمال می‌شود و در ادامه مقدار دمای جریان آزاد ۳۰۰ کلوین و فشار یک اتمسفر در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه جریان هوای اطراف توربین باد تراکم‌ناپذیر است، شرط مرزی ورودی سرعت *Inlet Velocity* و در خروجی جریان، *Pressure Outlet* که در این شرط مرزی فشار استاتیک به صورت نسبی در مرز خروجی وارد و برای سطح ایرفویل شرط مرزی دیوار *Wall* و شرط عدم لغزش به صورت پیش‌فرض در حرکت سیال از روی سطح ایرفویل اعمال و قسمت خروجی شبکه را *outlet*، قسمت بالا و پایین شبکه را *Wall* و ایرفویل مورد نظر *Airfoil* نام‌گذاری شد (شکل ۷).

۳-۴- استقلال از شبکه

از آن جایی که نتایج حل عددی می‌تواند به شبکه ایجاد شده وابسته باشد، لذا برای بدست آوردن جواب دقیق، نتایج می‌بایست مستقل از شبکه ایجاد شده باشند. برای بررسی استقلال حل عددی از سه نوع شبکه متفاوت در حالت پایا و در زاویه حمله پنج و ۱۰ درجه و برای ایرفویل *NACA0015* سه نوع شبکه‌بندی درشت با تعداد ۱۵۰۰۰۰، متوسط با تعداد ۲۵۰۰۰۰ و ریز به تعداد ۳۵۰۰۰۰ مورد ارزیابی قرار گرفت که بررسی نتایج در نمودارهای ۳ و ۴ نشان داده شده است.

با توجه به نمودارهای ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که نتایج با افزایش سلول‌های شبکه ضریب برآ و پسا در زاویه‌های پنج و ۱۰ درجه تاثیر گذاشته و تغییر کرده است.

۴-۴- اعتبارسنجی نتایج انسیس فلوئنت

برای اعتبارسنجی نتایج انسیس فلوئنت، با نتایج تجربی *Pinkerton* [13] مقایسه شده با نزدیک شدن به مرحله واماندگی و در زوایای حمله بالا، به خاطر مسائلی همچون جدایی جریان و لرزش مدل که به دمنده نیز وارد می‌شود، نتایج دارای اختلاف در واماندگی هستند و در زمان افزایش زاویه حمله تا قبل از واماندگی، ضریب نیروی برآ به صورت خطی تغییر کرده است (نمودار ۵).

۵-۴- اعتبارسنجی داده‌های Q-blade

برای صحت کار انجام شده در مرحله اول نتایج بدست آمده را با داده‌های عملی بدست آمده توسط پینکرتون [13] و تحلیل *دانلو* [14] برای ایرفویل *NACA4412* در عدد رینولدز ۲۵۰۰۰۰ و زوایای صفر تا ۲۰ درجه اعتبارسنجی شد، نمودار ۶ در زمان افزایش زاویه حمله

شکل ۷) نمایی از شبکه‌بندی کل دامنه حل (الف) و نمای نزدیک ایرفویل (ب)

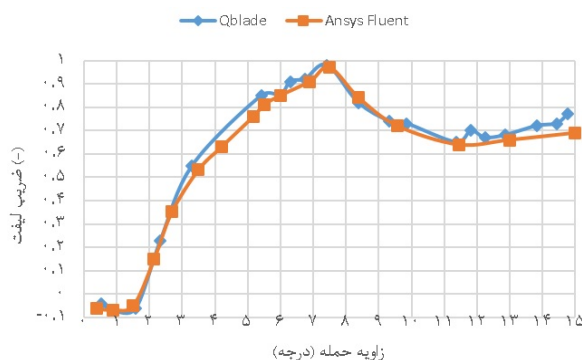
۵- نتایج

۵-۱- مقایسه نتایج ضریب برآ در نرم‌افزارهای Q-blade و ANSYS Fluent

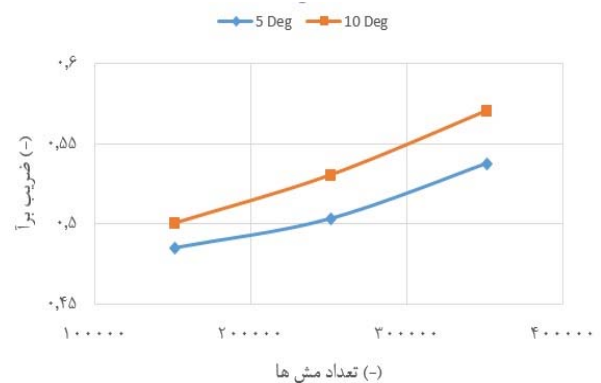
در نمودار ۷ مقایسه داده‌های ضریب برآ در عدد رینولدز ۱۸۰۰۰ برحسب زاویه حمله نشان داده شده است. با افزایش زاویه حمله، ضریب برآ سیر صعودی به خود گرفته و افزایش یافته و در زاویه هفت درجه به مقدار ماکزیمم خود ۹۷۰٪ رسیده و در این زاویه، واماندگی برای ایرفویل NACA0015 اتفاق و با افزایش بیشتر زاویه حمله نمودار سیر نزولی به خود گرفته و در زمان افزایش زاویه حمله تا قبل از واماندگی، ضریب نیروی برآ به صورت خطی افزایش پیدا کرده و در دو مدل Q-Blade و انسیس فلوئنت به خوبی پیش‌بینی شده و هر دو مدل به خوبی مقدار بیشینه را با دقت مناسب پیش‌بینی کرده‌اند.

۵-۲- بررسی تجربی سرعت زاویه‌ای توربین باد

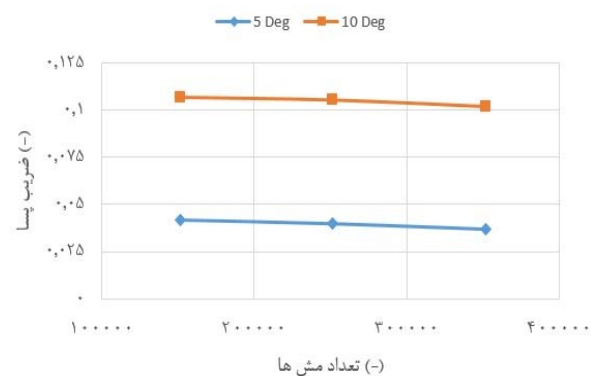
یکی از عوامل مهم تاثیرگذار در بازدهی توربین، دوران توربین است که قابلیت راه‌اندازی توربین در سرعت‌های مختلف باد، تاثیر بیشتری در بازدهی توربین باد دارد. در صورتی که توربین بتواند در سرعت‌های پایین به دور مشخص برسد، باعث افزایش بازدهی توربین و توان تولیدی می‌شود. توربین باد در وضعیت پره مستقیم تا سرعت باد ۳/۹ متر بر ثانیه هیچ حرکتی از خود نداشته و با افزایش سرعت باد، توربین شروع به دوران کرده و وقتی دارای پره متخلخل است، در سرعت ۲/۳ متر بر ثانیه شروع به دوران نموده و با افزایش سرعت باد دوران توربین افزایش پیدا میکند. می‌توان نتیجه گرفت که در سرعت‌های اولیه، دوران و سرعت زاویه‌ای توربین در حالت پره متخلخل بهتر از توربین باد پره مستقیم بود (نمودار ۸). برای صحت‌سنجی داده‌های بدست آمده در نتایج آزمایشگاه حاصل از دوران توربین باد پره مستقیم و متخلخل در سرعت بادی مختلف، نتایج را در نرم‌افزار Q-blade تحلیل کرده که با افزایش سرعت باد، دوران توربین باد افزایش پیدا کرده و مدل عددی، نتایج آزمایشگاهی را به دقت پیش‌بینی و خطای نتایج تجربی شامل خطای دستگاه اندازه‌گیری یا سرعت دمنده، خطای ساخت مدل و تنظیم موقعیت قرارگیری می‌باشد (نمودار ۹).



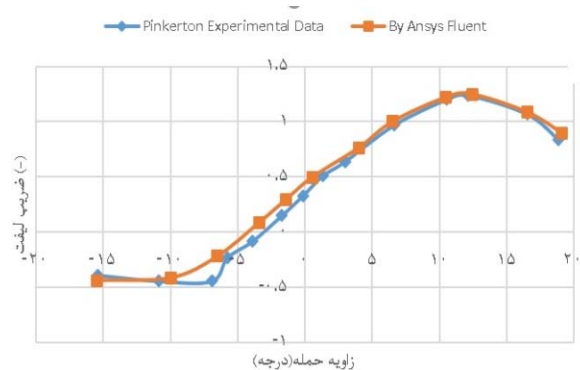
نمودار ۷) مقایسه داده‌های Q-blade و Fluent ضریب لیفت بر زاویه آلفا در عدد رینولدز ۱۸۰۰۰



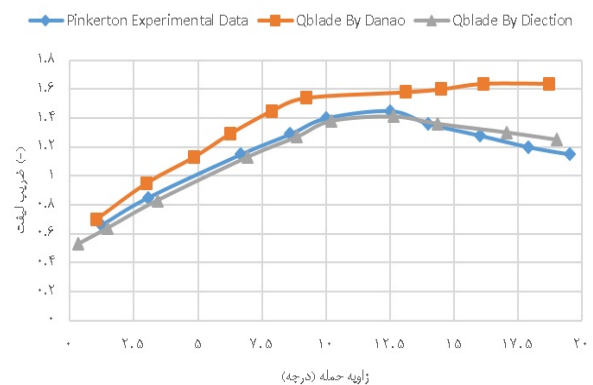
نمودار ۳) استقلال از شبکه ضریب برآ در زوایای مختلف



نمودار ۴) استقلال از شبکه ضریب پسا در زوایای مختلف



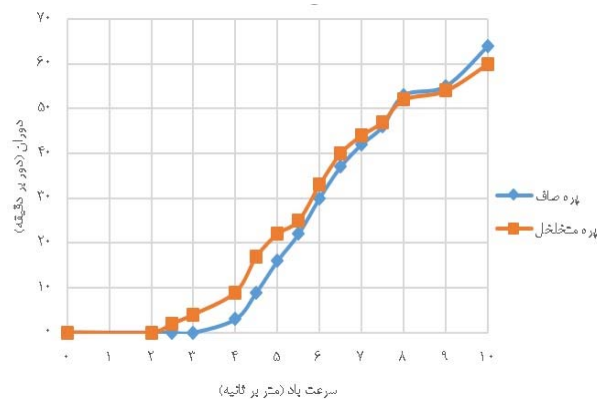
نمودار ۵) مقایسه تحلیل عددی ضریب لیفت به زاویه حمله با نتایج تجربی



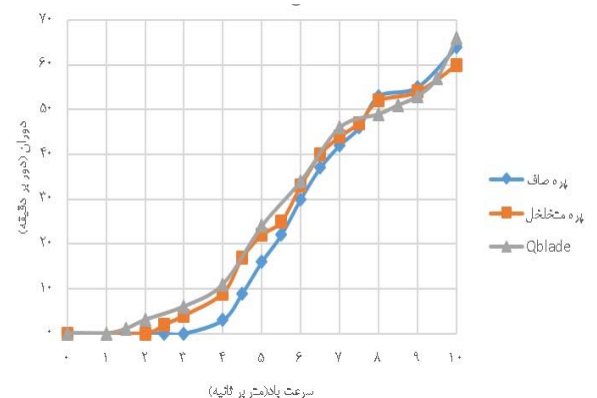
نمودار ۶) اعتبارسنجی داده‌های Q-blade

توربین باد پره متخلخل نیروی راه‌انداز کمتری نسبت به توربین باد پره مستقیم نیاز دارد تا شروع به دوران کند، به طوری که در سرعت‌های یک، دو و سه متر بر ثانیه نیروی راه‌انداز $0/05$ نیوتن و در پره مستقیم در سرعت یک و دو متر بر ثانیه نیروی مورد نیاز برای شروع $10/1$ 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 باد پره متخلخل است. در سرعت چهار و پنج متر بر ثانیه نیروی مورد نیاز پره متخلخل برابر $10/1$ نیوتن و پره مستقیم $20/2$ نیوتن است که برای راه‌اندازی آن در سرعت‌های ذکر شده دو برابر پره متخلخل نیرو باید وارد شود تا شروع به دوران نماید. در سرعت هفت متر بر ثانیه برای راه‌اندازی توربین باد پره متخلخل $15/10$ نیوتن و مستقیم $25/20$ نیوتن و در سرعت $7/45$ متر بر ثانیه نیروی مورد نیاز برای شروع به چرخش توربین باد پره متخلخل $20/20$ نیوتن و برای توربین بادی پره مستقیم برابر $35/30$ نیوتن و در سرعت $8/25$ متر بر ثانیه نیروی راه‌اندازی توربین باد پره متخلخل برابر $25/20$ نیوتن و پره مستقیم $45/40$ نیوتن است و در سرعت $8/5$ متر بر ثانیه مقدار نیروی لازم برای راه‌اندازی توربین باد پره متخلخل برابر $30/30$ نیوتن و پره مستقیم $60/60$ نیوتن است و در سرعت 9 متر بر ثانیه نیروی راه‌انداز توربین باد پره متخلخل $75/70$ نیوتن و پره مستقیم $70/70$ نیوتن است. در سرعت $9/5$ متر بر ثانیه نیروی راه‌اندازی توربین باد پره متخلخل $90/90$ نیوتن و پره مستقیم $75/70$ نیوتن است که در سرعت‌های $9/5$ و 9 متر بر ثانیه، نیروی راه‌اندازی توربین باد پره متخلخل نسبت به پره مستقیم بیشتر است. در سرعت 10 متر بر ثانیه نیروی راه‌انداز توربین باد پره متخلخل $93/90$ نیوتن و پره مستقیم $80/80$ نیوتن است. در سرعت ذکر شده نیروی راه‌انداز توربین باد پره متخلخل بیشتر از توربین باد پره صاف است 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 متر بر ثانیه نیروی مورد لازم برای راه‌اندازی در توربین باد پره متخلخل کمتر از پره مستقیم و در سرعت‌های 9 تا 10 متر بر ثانیه نیروی مورد نیاز برای دوران توربین باد پره متخلخل بیشتر از پره مستقیم است.

همانطور که در نمودار ۱۰ و نتایج ارایه شده قابل مشاهده است توربین باد پره متخلخل نیروی راه‌اندازی کمتری در سرعت‌های پایین نسبت به پره صاف داشته و راه‌اندازی توربین باد محور عمودی داریوس پره متخلخل در سرعت‌های کمتر بهبود یافته و این به دلیل ایجاد نیروی درگ بر روی پره متخلخل که باعث اختلاف فشار بر روی پره شده و این اختلاف فشار باعث ایجاد نیروی اصطکاک بر روی پره شده و خود شروع شونده را در پره متخلخل به همراه خواهد داشت و نیروی راه‌اندازی کمتری نسبت به توربین باد محور عمودی پره صاف خواهد داشت و بهبود عملکرد توربین باد محور عمودی داریوس پره متخلخل را نسبت به توربین باد محور عمودی داریوس پره صاف حاصل خواهد شد که در نمودار ۱۰ به خوبی قابل مشاهده است.



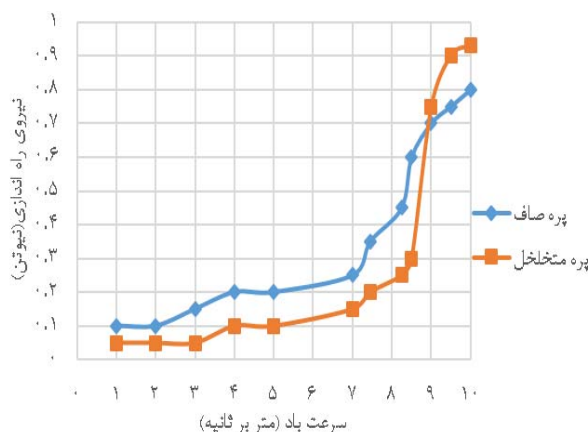
نمودار ۸) مقایسه دوران توربین بادی پره صاف و متخلخل برحسب دور بر دقیقه



نمودار ۹) صحت‌سنجی داده‌های به‌دست آمده با نرم‌افزار Q-blade

۳-۵- مطالعه آزمایشگاهی نیروی لازم برای راه‌اندازی توربین باد محور عمودی داریوس

مقدار نیرویی که لازم است تا توربین در سرعت‌های مختلف شروع به دوران کند. اگر نیروی لازم برای راه‌اندازی توربین باد در سرعت‌های مختلف بیشتر باشد، به جای اینکه صرف تولید توان و شروع دوران شود، صرف تولید نیروی راه‌انداز می‌شود. نمودار ۱۰ مقایسه نیروی راه‌اندازی توربین باد پره مستقیم و متخلخل را در سرعت‌های مختلف باد نشان می‌دهد.



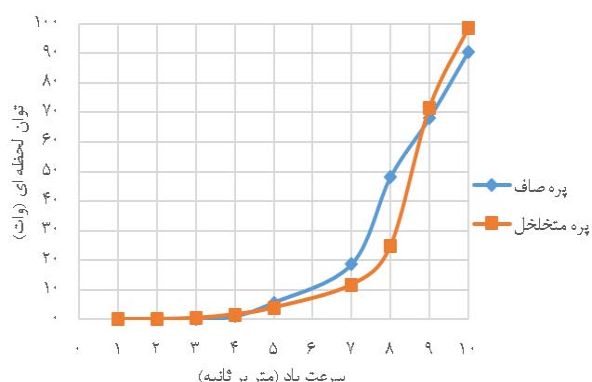
نمودار ۱۰) مقایسه نیروی راه‌اندازی توربین بادی با پره مستقیم و متخلخل برحسب نیوتن

۰/۱۷۲۰۵ نیوتن متر و پره صاف ۰/۱۴۸ نیوتن متر است. در سرعت ذکر شده گشتاور راهانداز توربین باد پره متخلخل بیش‌تر از توربین باد پره صاف است و در این سرعت دوران پره متخلخل برای شروع به چرخش انرژی زیادی نسبت به پره صاف خواهد نمود. ولی برای سرعت‌های یک تا ۹ متر بر ثانیه گشتاور مورد لازم برای راهاندازی در توربین باد پره متخلخل کم‌تر از پره صاف است.

همانطور که در نمودار ۱۱ و نتایج ارایه شده قابل مشاهده است توربین باد پره متخلخل گشتاور لحظه‌ای کمتری در سرعت‌های پایین نسبت به پره صاف داشته و راهاندازی توربین باد محور عمودی داریوس پره متخلخل در سرعت‌های کمتر بهبود یافته و این به دلیل ایجاد نیروی درگ بر روی پره متخلخل که باعث اختلاف فشار بر روی پره شده و این اختلاف فشار باعث ایجاد نیروی اصطکاک بر روی پره شده و خود شروع شونده‌گی را در پره متخلخل به همراه خواهد داشت و گشتاور لحظه‌ای کمتری نسبت به توربین باد محور عمودی پره صاف خواهد داشت و بهبود عملکرد توربین باد محور عمودی داریوس پره متخلخل را نسبت به توربین باد محور عمودی داریوس پره صاف خواهد داشت که در نمودار ۱۱ به خوبی قابل مشاهده است.

۵-۵- بررسی تجربی توان لحظه‌ای لازم برای راهاندازی توربین باد محور عمودی داریوس

مقدار توان لازم برای دوران توربین در سرعت‌های مختلف که شروع به دوران کند. اگر توان لازم برای راهاندازی توربین باد در سرعت‌های مختلف بیشتر باشد، به جای اینکه صرف تولید توان الکتریکی شود، صرف تولید توان راهاندازی می‌شود و نمی‌تواند در سرعت‌های مختلف دوران بهتری داشته و توان الکتریکی کمتری تولید خواهد کرد. نمودار ۱۲ مقایسه توان راهاندازی توربین باد محور عمودی داریوس پره مستقیم و متخلخل را در سرعت‌های مختلف باد نشان می‌دهد.

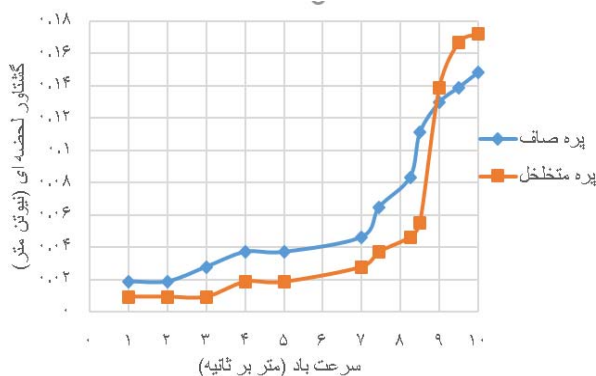


نمودار ۱۲) مقایسه توان لحظه‌ای توربین باد با پره مستقیم و متخلخل برحسب وات

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 است. برای پره متخلخل توان لحظه‌ای راهانداز در سرعت سه متر بر

۵-۴- بررسی تجربی گشتاور لحظه‌ای لازم برای راهاندازی توربین باد محور عمودی داریوس

نمودار ۱۱ مقایسه گشتاور لحظه‌ای راهاندازی توربین باد محور عمودی داریوس پره مستقیم و متخلخل را در سرعت‌های مختلف باد نشان می‌دهد.



نمودار ۱۱) مقایسه گشتاور لحظه‌ای توربین باد با پره صاف و متخلخل برحسب رادیان بر ثانیه

اگر گشتاور لازم برای راهاندازی توربین باد در سرعت‌های مختلف بیشتر باشد، به جای این‌که صرف تولید توان تولیدی شود، صرف تولید گشتاور راهاندازی می‌شود و نمی‌تواند در سرعت‌های مختلف دوران بهتری داشته باشد. در سرعت‌های یک، دو و سه متر بر ثانیه گشتاور راهانداز ۰/۰۹۲۵ نیوتن متر ولی در توربین باد پره صاف در سرعت یک و دو متر بر ثانیه گشتاور راهانداز برای شروع ۰/۱۸۵ نیوتن متر که دو برابر مقدار گشتاور برای دوران توربین پره متخلخل است و در سرعت سه متر بر ثانیه گشتاور لازم برای حرکت در توربین باد پره صاف سه برابر پره متخلخل و در سرعت چهار و پنج متر بر ثانیه گشتاور راهانداز پره متخلخل ۰/۱۸۵ نیوتن متر و پره مستقیم ۰/۰۳۷ نیوتن متر است.

در سرعت هفت متر بر ثانیه برای راهاندازی توربین باد پره متخلخل ۰/۲۷۷۵ نیوتن متر و پره صاف ۰/۴۶۲۵ نیوتن متر و در سرعت ۷/۴۵ متر بر ثانیه گشتاور راهانداز توربین باد پره متخلخل ۰/۰۳۷ نیوتن متر و پره صاف ۰/۶۴۷۵ نیوتن متر و در سرعت ۸/۲۵ متر بر ثانیه گشتاور راهانداز توربین باد پره متخلخل ۰/۴۶۲۵ نیوتن متر و پره صاف ۰/۸۳۲۵ نیوتن متر است که تقریباً دو برابر توربین باد پره متخلخل گشتاور لازم است تا بتواند توربین باد پره صاف را بچرخاند. در سرعت ۸/۵ متر بر ثانیه گشتاور راهانداز توربین باد پره متخلخل ۰/۵۵ نیوتن متر و پره صاف ۱/۱۱ نیوتن متر است که دو برابر گشتاور مورد نیاز توربین باد پره متخلخل است. در سرعت ۹ متر بر ثانیه گشتاور راهانداز توربین باد پره متخلخل ۱/۳۸۷۵ نیوتن متر و پره مستقیم ۱/۲۹۵ نیوتن متر است. در سرعت ۹/۵ متر بر ثانیه گشتاور راهانداز توربین باد پره متخلخل ۱/۶۶۵ نیوتن متر و پره صاف ۱/۳۸۷۵ نیوتن متر و در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه گشتاور راهانداز توربین باد پره متخلخل

ثانیه برابر ۰/۳۵ وات بوده و پره مستقیم دورانی نداشته و توان راه‌اندازی آن صفر است. 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 عمودی داریوس پره متخلخل ۰/۳۵ وات است. در سرعت چهار متر بر ثانیه توان راه‌انداز توربین باد پره صاف ۱/۵۹ وات و متخلخل ۱/۰۶ وات است و در سرعت پنج متر بر ثانیه توان پره مستقیم ۳/۸۸ و متخلخل ۵/۶ وات است. در سرعت هفت متر بر ثانیه برای توربین باد پره متخلخل توان راه‌انداز ۱۱/۶۶ و پره مستقیم ۱۸/۵۶ وات لازم است تا توربین شروع به چرخش نماید.

در سرعت ۸ متر بر ثانیه توان لحظه‌ای راه‌انداز پره متخلخل ۲۴/۸ وات و پره مستقیم ۴۸/۰۸ وات است. در سرعت ذکر شده باید توان لحظه‌ای زیادتری به توربین بادی محور عمودی پره مستقیم اعمال گردد تا بتواند شروع به چرخش نماید. در سرعت‌های ۹ و ۱۰ متر بر ثانیه برعکس سرعت‌های قبل از ۹ متر بر ثانیه توربین باد پره متخلخل توان لحظه‌ای بیشتری نسبت به پره مستقیم برای راه‌اندازی دارد.

در پژوهش حاضر، خطاهای موجود به صورت زیر است:

الف- خطای اندازه‌گیری سرعت دمنده: سرعت در مقطع آزمون تست باد با استفاده از سرعت‌سنج و سنسور نصب شده بر روی دمنده تعیین می‌شود.

ب- خطای تنظیم موقعیت قرارگیری مدل در فاصله و زاویه مورد نظر: اگر چه 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. اما بعد از مونتاژ نهایی دارای یک خطای زاویه‌ای ۰/۳ درجه بود که در انجام تست‌ها زاویه فوق لحاظ شده است.

د- خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری: اگر چه دستگاه به دقت کالیبره شده است ولی وجود مقداری خطا در ثبت اطلاعات اجتناب‌ناپذیر است. خطاهای دستگاه می‌تواند مربوط به نیروسنج، دورسنج یا سرعت‌سنج باشد که دارای دقت ۰/۲ درصد است.

۶- نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش بررسی تاثیر پره متخلخل و مستقیم بر بهبود عملکرد راه‌اندازی توربین باد محور عمودی داریوس نوع اچ روتور است. جهت اجرای این طرح، توربین باد محور عمودی داریوس با

پره‌های مستقیم و متخلخل طراحی، ساخته و تست شده است. آزمایش‌های تجربی در یک دمنده چهار فن در سرعت‌های یک تا ۱۰ متر بر ثانیه انجام شده است. نتایج عددی نیز در نرم‌افزار فلوئنت و Q-Blade برای تحلیل ایرفویل و پره‌های توربین بدست آمده است. نتایج به دست آمده از این بررسی نشان‌دهنده بهبود ویژگی‌های آیرودینامیکی پره متخلخل نسبت به پره مستقیم است.

در سرعت ۵ متر بر ثانیه با افزایش زاویه حمله ضریب برآی هر سه ایرفویل افزایش و ایرفویل ناکا ۰۱۵ نسبت به دو ایرفویل دیگر ضریب برآی بیشتری داشته و در زاویه ۱۵ درجه ضریب برآی ماکزیمم ۰/۵۵ است و ایرفویل ناکا ۰۱۵ نسبت ضریب برآی به ضریب پسای بیشتری نسبت به دو ایرفویل دیگر در سرعت ۵ متر بر ثانیه داشته به طوری که بیشترین مقدار نسبت ضریب برآی به ضریب پسا در زاویه حمله ۱۳ درجه و برابر ۲/۵۸ بوده و در این سرعت ایرفویل ناکا ۰۱۵ نسبت به دو ایرفویل دیگر شرایط مناسب‌تری برای انتخاب دارد.

در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه ضریب برآی ایرفویل ناکا ۰۱۵ با افزایش زاویه حمله ابتدا سیر صعودی به خود گرفته و در زاویه حمله ۷/۵ درجه به ماکزیمم مقدار خود ۰/۷۲ و نسبت به دو ایرفویل دیگر دیرتر به ناحیه استال رسیده به طوری که ایرفویل ناکا ۰۱۸ در زاویه ۴ درجه و ایرفویل ناکا ۰۲۱ در زاویه ۳ درجه و ایرفویل ناکا ۰۱۵ در زاویه ۷/۵ درجه به ناحیه استال رسیده و ایرفویل ناکا ۰۱۵ نسبت ضریب برآی به ضریب پسای بیشتری نسبت به دو ایرفویل دیگر داشته به طوری که بیشترین مقدار نسبت ضریب برآی به ضریب پسا در زاویه حمله ۶/۵ درجه و برابر ۱۵/۳ بود و ایرفویل ناکا ۰۱۵ نسبت به دو ایرفویل دیگر شرایط مناسب‌تری برای انتخاب داشته و نسبت ضریب برآی به ضریب پسای بیشتری دارد.

لازم است برای راه‌اندازی توربین باد محور عمودی داریوس نیروی پسا در سرعت‌های پایین ایجاد گردد. برای ایجاد نیروی پسا بر روی پره باید بر روی پره اصطکاک ایجاد شود تا اختلاف فشار ایجاد شده بر روی پره اصطکاک ایجاد کرده تا توربین بتواند در سرعت‌های پایین با اعمال نیروی راه‌اندازی کمتر شروع به دوران نماید و زودتر شروع به دوران نماید. اما اصطکاک ایجاد شده بر روی پره متخلخل در سرعت‌های بالا باعث ایجاد نیروی درگ منفی شده و باعث کاهش سرعت زاویه‌ای در سرعت‌های بالا می‌شود و اصطکاک پره متخلخل نسبت به پره صاف زیادتر بوده و این عامل بسیار تعیین‌کننده‌ای است تا نیروی راه‌اندازی کمتری نسبت به پره صاف ایجاد شود و باعث بهبود عملکرد توربین باد پره متخلخل نسبت به توربین باد پره صاف شود.

مطالعات تجربی سرعت زاویه‌ای در سرعت ۲/۵ 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 ۴/۵، پنج، ۵/۵، شش، ۶/۵ و هفت متر بر ثانیه نسبت به پره مستقیم ۵۶/۲۵٪، ۲۰٪، ۲۲٪، متخلخل نسبت به توربین باد پره مستقیم

F نیروهای حجمی (N)
g نیروی گرانشی ($\frac{m}{s^2}$)
 α زاویه آلفا

منابع

- 1- Li Y, Wang S, Liu Q, Feng F, Tagawa K. Characteristics of ice accretions on blade of the straight-bladed vertical axis wind turbine rotating at low tip speed ratio. Cold Regions Science and Technology. 2018;145:1-13.
- 2- Lee Y, Lim H. Numerical study of the aerodynamic performance of a 500 W Darrieus-type vertical-axis wind turbine. Renewable Energy. 2015;83:407-415.
- 3- Sengupta A, Biswas A, Gupta R. 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. 2016;93:536-547.
- 4- Sabaeifard C, Razzaghi H, Forouzandeh A. Determination of vertical axis wind turbines optimal configuration through CFD simulations. International Conference on Future Environment and Energy [Volume 28]. Singapore: IACSIT Press; 2012. pp. 109-113.
- 5- Fuglsang P, Thomsen K. Cost optimization of wind turbines for large scale offshore wind farms [Technical Report]. Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory; 1998.
- 6- Benini E, Toffolo A. Optimal design of horizontal-axis wind turbines using blade element theory and evolutionary computation. Journal of Solar Energy Engineering. 2002;124(4):357-363.
- 7- Hu Y, Rao S. Robust design of horizontal axis wind turbines using Taguchi method. Journal of Mechanical Design. 2011; 133(11):111009.
- 8- Dominy R, Lunt P, Bickerdyke A, Dominy J. Self-starting capability of a Darrieus turbine. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. 2007;221(1):111-120.
- 9- Delafin PL, Nishino T, Wang L, Kolios A. Effect of the number of blades and solidity on the performance of a vertical axis wind turbine. Journal of Physics: Conference Series. 2016;753:022-033.
- 10- Pagnini L, Piccardo G, Repetto M. Full scale behavior of a small size vertical axis wind turbine. Renewable Energy. 2018;127:41-55.
- 11- Sobhani E, Ghaffari M, Maghrebi MJ. Numerical investigation of dimple effects on Darrieus vertical axis wind turbine. Energy. 2017;133:231-241.
- 12- Vince J. Mathematics for computer graphics (undergraduate topics in computer science). 3rd edition. Berlin, Germany: Springer; 2010. pp: 17-37.
- 13- Pinkerton RM. The variation with Reynolds number of pressure distribution over an airfoil section [Technical Report]. Cranfield, UK: NASA Press; 1938. No. 613,
- 14- Bernabe R. Design analysis of a horizontal axis tidal turbine [Project]. UK: Turbomachinery; 2016.

۱۵، ۷/۵ % و ۱۲% بیشتر بوده در سرعت ۹ و ۱۰ متر بر ثانیه دوران توربین بادی پره مستقیم ۱/۸ % و ۶/۴ % نسبت به توربین باد پره متخلخل بهتر بوده است.

برای راه‌اندازی توربین باد پره متخلخل در سرعت‌های یک و دو متر بر ثانیه ۵۰%، سرعت سه متر بر ثانیه ۳۳%، سرعت چهار و پنج متر بر ثانیه ۵۰%، سرعت هفت متر بر ثانیه ۶۰%، سرعت ۷/۴۵ متر بر ثانیه ۵۷%، سرعت ۸/۲۵ متر بر ثانیه ۵۵% و در سرعت ۸/۵ متر بر ثانیه ۵۰% گشتاور و نیروی توربین بادی پره مستقیم لازم است تا شروع به دوران نماید. برای راه‌اندازی توربین باد پره مستقیم در سرعت نه و ۱۰ متر بر ثانیه ۹۳% و ۸۶% 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 ۳۵% کمتر از توربین باد پره مستقیم بوده، در سرعت چهار متر بر ثانیه توان راه‌اندازی ۳۳%، در سرعت پنج متر بر ثانیه توان راه‌اندازی ۳۱%، در سرعت هفت متر بر ثانیه توان راه‌اندازی برابر با ۳۷% و در سرعت هشت متر بر ثانیه توان راه‌اندازی پره متخلخل ۴۸% کمتر از توربین باد پره مستقیم بوده ولی در سرعت نه و 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 ۲۲/۸% کمتر از توربین باد پره مستقیم است.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.
تأییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.
تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.
سهم نویسندگان: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.
منابع مالی: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

۷- فهرست علائم

P	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
T	تانسور تنش
μ	لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
U	سرعت (m/s)
Re	عدد رینولدز