



Experimental Study of Porous Blade Effect on the Rotation of Darriues Vertical Axis Wind Turbine

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. Experimental Study of Porous Blade Effect on the Rotation of Darriues Vertical Axis Wind Turbine. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(1):181-191.

ABSTRACT

The important factor in turbine efficiency is turbine rotation. The higher the rotor time at different speeds, especially at low speeds, increases the turbine power. In this regard, first, the airfoil NACA0015 was selected and the K- ω SST turbulence method was used for numerical analysis. The validation was performed using experimental results. The wind turbine was designed and fabricated by CATIA software. The aluminum sheet used by a series alloy is used to make smooth, porous leaves from simple cards and diamond-shaped leaves, in a porous form with 0.3 mm thick. The instrument used in measurement, testing and fabrication have been calibrated to compute more precisely and to generate wind flow from the four-fan blower. The results show that the darriues vertical axis wind turbine with porous and flat blades has begun to rotation at the speed of 2.3 and 3.9 m/s. At the speed of 2.5 and 3 m/s, the rotation of wind turbine porous blade doubled and at the speed of 4 m/s, its rotation speed was 3 times higher than the speed of straight blade turbine. The rotation of wind turbine porous blade in speeds of 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5 and 7 m/s were 56.25 %, 20 %, 22 %, 15 %, 7.5 %, and 12% higher than the straight blade turbine and in speed of 8-10 m/s the rotation of the straight blade turbine and porous blade turbine is almost equal.

Keywords Wind Energy; Straight Blade; Porous Blade; Rotation; Wind Turbine

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

²Agro-Technology Department, Abouraihan College, University of Tehran, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Agro-Technology Department, Abouraihan College, University of Tehran, Tehran, Iran
Phone: +98 (21) 36040614
Fax: +98 (21) 36040614
skouravand@ut.ac.ir

Article History

Received: December 2, 2018
Accepted: May 7, 2019
ePublished: January 01, 2020

CITATION LINKS

[1] Numerical and experimental studies of a small vertical-axis wind turbine with variable-pitch straight blades [2] Three dimensional simulation of J-shaped Darriues vertical axis wind turbine [3] Performance enhancements on vertical axis wind turbines using flow augmentation systems: A review [4] Structural design of the sandia 34-meter vertical-axis wind turbine [5] A momentum theory for winglets on horizontal axis wind turbine rotors and some comparison with experiments [6] Discussion of momentum theory for windmills [7] Davis Engineering Ltd, Canada [8] Numerical investigation of dynamic stall vortex movement of different thickness airfoils [9] Self-starting capability of a Darriues turbine [10] Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine [11] Numerical investigations on dynamic stall of low Reynolds number flow around oscillating airfoils [12] Wind tunnel tests on a different phase three-stage Savonius rotor [13] Design and analysis of a small wind turbine with combined airfoil [14] Numerical investigation of dimple effects on darriues vertical axis wind turbine [15] Mathematics for computer graphics [16] Understanding aircraft structures [17] The variation with Reynolds number of pressure distribution over an airfoil section [18] Design analysis of a horizontal axis tidal turbine

مطالعه آزمایشگاهی تاثیر پره متخلخل بر دوران توربین بادی محور عمودی داریوس

حسین سیفی‌داوری MSc

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

شهریار کوراوند PhD

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

ایمان خامتی PhD

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

چکیده

عامل مهم تاثیرگذار در بازدهی توربین، دوران توربین است. هرچه دوران روتور در سرعت‌های مختلف به خصوص در سرعت‌های پایین، بیشتر باشد باعث افزایش توان می‌شود. در این راستا ابتدا ایرفویل NACA0015 انتخاب و برای تحلیل عددی از روش توربولانسی K- ω SST استفاده و با نتایج آزمایشگاهی صحت‌سنجی شد. سپس توربین بادی در نرم‌افزار CATIA طراحی و ساخته شد. ورق آلومینیومی استفاده شده از آلیاژ سری یک که برای ساخت پره‌های صاف و متخلخل از ورق ساده و امپاس لوزی شکل که به صورت خلل و فرج و به ضخامت $\frac{1}{3}$ میلی‌متر است. برای ایجاد جریان باد از دمنده چهار فن و برای محاسبه دقیق‌تر وسایل مورد استفاده در اندازه‌گیری، آزمون و ساخت کالیبره شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که توربین بادی محور عمودی داریوس پره متخلخل و صاف در سرعت $\frac{2}{3}$ و $\frac{3}{9}$ متر بر ثانیه شروع به دوران کرده است. در سرعت $\frac{2}{5}$ و $\frac{3}{5}$ متر بر ثانیه توربین بادی پره متخلخل دو برابر و در سرعت ۴ متر بر ثانیه سه برابر توربین بادی پره صاف دوران داشته است. در سرعت $\frac{4}{5}$ ، $\frac{5}{5}$ ، $\frac{6}{5}$ و $\frac{7}{5}$ متر بر ثانیه ثانیه دوران توربین بادی پره متخلخل نسبت به توربین بادی پره صاف $\frac{56}{25}$ ٪، $\frac{56}{25}$ ٪، $\frac{56}{25}$ ٪ و $\frac{56}{25}$ ٪ بیشتر و در سرعت ۸ تا ۱۰ متر بر ثانیه توربین بادی پره متخلخل و صاف دوران تقریباً برابری دارند.

کلیدواژه‌ها: انرژی بادی، پره صاف، پره متخلخل، دوران، توربین بادی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۹/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۱۷

*نویسنده مسئول: skouravand@ut.ac.ir

۱- مقدمه

با گسترش روزافزون جوامع انسانی و توسعه صنعتی در جوامع مختلف، نیاز به منابع انرژی در حال افزایش است. فراهم کردن انرژی ارزان‌قیمت، مناسب و کافی برای کاهش فقر، بهبود رفاه بشر و بالابردن استانداردهای زندگی در سراسر جهان امری ضروری است [1]. انرژی بادی در حال حاضر سریع‌ترین میزان نرخ رشد را در بین دیگر منابع تجدیدپذیر دارا است [2]. چراکه انرژی بادی فراوان، تجدیدپذیر و پاک در طبیعت وجود دارد و می‌توان با توجه به نیاز و امکانات از چند وات تا چند مگاوات برق تولید نمود و در مقایسه با انرژی سوخت‌های فسیلی میزان کمتری گاز گلخانه‌ای منتشر می‌کند. میزان انرژی قابل استحصال از منابع بادی زمین بسیار بیشتر از کل مصرفی جهان است، به طوری که یک برآورد کلی نشان می‌دهد که ۷۲ ترا وات انرژی باد روی زمین وجود دارد درحالی که میزان مصرف

انرژی جهانی ۱۵ ترا وات است [3].

دستگاهی که برای به دست آوردن انرژی از باد مورد استفاده قرار می‌گیرد، توربین بادی نام دارد. توربین بادی وسیله‌ای است که انرژی جنبشی جریان باد را به انرژی دورانی محور روتور تبدیل می‌کند [4]. برای پره توربین‌های بادی داریوس مدل‌های مختلفی وجود دارد که بیشتر به صورت پره مستقیم و مارپیچی است. تعداد پره‌های توربین بادی داریوس بسته به هزینه اقتصادی می‌تواند یک تا ۵ پره باشد. مزیت توربین بادی داریوس نسبت به سایر توربین‌های عمودمحور این است که بیشترین راندمان را دارند ولی مشکل اساسی آن، گشتاور پایین در لحظه استارت و شروع به گردش هست [1].

کشورهای صنعتی و در رأس آن آمریکا و کانادا سرمایه‌گذاری گسترده‌ای برای تولید انرژی برق از طریق توربین‌های بادی انجام دادند. پژوهشگاه ملی سندیا در آمریکا از شاخص‌ترین مراکز است که در دهه اخیر در زمینه توربین‌های بادی محور عمودی فعالیت داشته است که منجر به ساخت توربین بادی محور عمودی داریوس به قطر ۳۴ متر در سال ۱۹۷۸ میلادی شد. در طراحی این توربین از سه کد تحلیلی جهت بهینه‌سازی پارامترهای طراحی، تحلیل نیرویی و ارتعاشاتی المان محدود سازه توربین بادی محور عمودی استفاده شده بود [4]. پیش از این تحلیل جریان روی پره به صورت روش‌های تئوری به همراه نتایج آزمایشگاهی محدود می‌شود [5، 6].

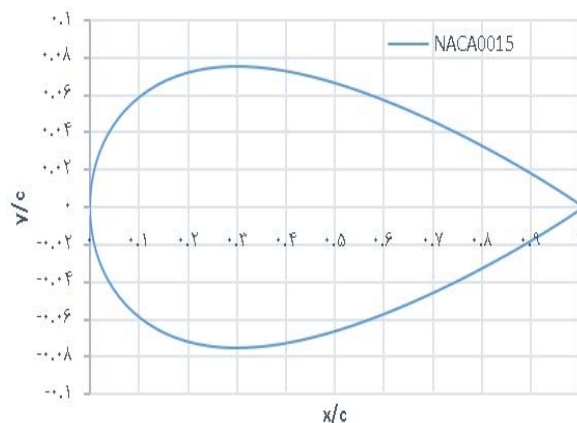
در دهه‌های گذشته پژوهش‌های متعددی جهت بهینه‌سازی پارامترهای مختلف مؤثر در عملکرد توربین‌های بادی محور عمودی داریوس با پره‌های مستقیم انجام شده است. در سال ۲۰۰۱، ایسلا م و همکاران جنس مناسب برای پره‌های صاف توربین بادی محور عمودی داریوس را مطالعه نمودند و در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند که فیبر پلیمری مناسب این نوع توربین‌ها هستند [7]. وانگ و همکاران [8] افزایش ضخامت ایرفویل را یک عامل در بهبود عملکرد توربین در سرعت نوک پایین معرفی کردند. دومینی و همکاران [9] اثبات کردند که توربین بادی محور عمودی نوع سه پره نسبت به دو پره، پتانسیل بهتری برای خودراه‌اندازی دارند زیرا راه‌اندازی خودکار در نوع دو پره وابستگی شدید به زاویه قرارگیری اولیه پره‌ها دارد. دورادز و همکاران [10] بررسی عددی و تجربی روی توربین‌های عمودمحور ابعاد کوچک را مطالعه نمودند و اثر زبری سطح پره را روی عملکرد این توربین‌ها مورد بررسی قرار دادند. وانگ و همکاران [11] عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی محور عمودی داریوس پره مستقیم را در سرعت‌های مختلف وزش باد مورد مطالعه قرار دادند. هایاشی و همکاران [12] نتایج آنالیز آیرودینامیکی توربین بادی ساوینیوس رایج یک طبقه را با توربین دو طبقه مقایسه کردند و نشان دادند که افزودن طبقه، نوسانات گشتاور را کاهش می‌دهد. ولی با اضافه شدن طبقه، اینرسی توربین زیاد شده و امکان بروز مشکلات سازه‌ای وجود دارد. کوراوند و همکاران [13] طراحی و تحلیل توربین بادی کوچک بادی را مطالعه کردند. برای این منظور منطقه مروسست در استان یزد را به عنوان نمونه انتخاب کرده و هدف‌شان بر

تانسور تنش رینولدز متناسب با نرخ تانسور کرنش بوده و با فرمول (۴) به دست می آید [14]:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (4)$$

۲-۲- طراحی آیرودینامیکی با استفاده از نرم افزار Q-blade

برای انجام روند شبیه سازی و انتخاب ایرفویل از نرم افزار Q-blade ۷0.9 استفاده شده است. از نرم افزار ذکر شده برای محاسبات توربین های بادی استفاده می شود که با استفاده از سرعت می توان ایرفویل مناسب را طراحی و عملکرد قطبی آن را در زوایای ۳۶۰ درجه بررسی کرد و در طراحی روتورهای توربین بادی و شبیه سازی آنها مورد استفاده قرار داد. این نرم افزار با استفاده از مدل های مومنتم و الگوریتم صحیح، شبیه سازی را انجام می دهد و پارامترهای مورد نیاز طراحی با مدل CMDMS تغییر می پذیرد که از یک مدل مومنتم دومرحله ای برای شبیه سازی آیرودینامیک توربین بادی محور عمودی استفاده می کند. جریان هوا به یک قسمت کلی و یک قسمت محلی تفکیک می شود. مدل قسمت محلی جریان هوا از نقشه برداری منسجم برای توصیف ایرفویل همانند یک دایره استفاده می کند. با این روش سریع تر شدن محاسبات با استفاده از تبدیل فوریه امکان پذیر می شود. برای برخی پروفیل های متقارن NACA به خاطر اعداد رینولدز کم خلأ داده تجربی در ناحیه پیش استال وجود دارد. برای مقایسه حداقل کیفیت مقاطع ایرفویل متفاوت و طرح های توربین، بهتر است از یک ابزار منحصربه فرد استفاده شود که این ابزار باید زمان پردازش کوتاهی داشته باد به همین دلیل در نرم افزار Q-blade ابزار X-Foil Direct Analysis انتخاب شده است [13]. در شکل ۱ هندسه شکل ایرفویل NACA0015 نشان داده شده است.



شکل ۱ هندسه شکل ایرفویل NACA0015

۳- شبیه سازی عددی

۳-۱- نحوه مش بندی

با ایجاد یک شبکه بندی مناسب می توان حل یک سیستم معادلات دیفرانسیل را تا حد زیادی تسریع و بالعکس انتخاب نامناسب محل نقاط شبکه می تواند باعث عدم همگرایی در محاسبات شود. روش متداول این است که در نزدیکی و اطراف ایرفویل برای افزایش دقت

این بود که با تلفیق ایرفویل روتورهای دارای گشتاور تولیدی بالا (ساونیوس) با ایرفویل روتورهای دارای راندمان بالاتر (داریوس)، تولید انرژی در سرعت های کمتر را افزایش دهند.

در این پژوهش به بررسی تأثیر پره متخلخل بر دوران توربین بادی محور عمودی داریوس و مقایسه دوران تولیدی آن با دوران تولیدی پره مستقیم پرداخته می شود. برای متخلخل کردن فضای پره از ورق امباس لوزی شکل و برای پره مستقیم، از ورق ساده آلومینیومی به ضخامت ۰/۳ میلی متر هم سایز با ورق امباس لوزی شکل استفاده می شود.

۲- تئوری حل و معادلات حاکم

۲-۱- معادلات حاکم بر جریان هوا در توربین های بادی محور عمودی

معادلات حاکم بر جریان هوا در توربین های محور عمودی داریوس همان معادلات بقای جرم یا پیوستگی و اندازه حرکت یا همان معادلات مومنتم هستند. جریان سیال در این مسئله تراکم ناپذیر هست. معادلات پیوستگی حاکم برای حالت ناپا به صورت فرمول ۱ تعریف می شود [14].

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

معادله بقای اندازه حرکت را هم می توان 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 می شود.

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

رفتار جریان را می توان بر حسب سرعت u ، فشار p بیان کرد که خواص سیال در بازه ای از زمان اتفاق می افتد که می توان با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی تغییرات را برای المان های کوچکی از سیال محاسبه کرد و با استفاده از قوانین پیوستگی خواص مورد نظر را به دست آورد. این تغییرات در مقیاس خیلی کوچک رخ می دهد و از لحاظ محاسباتی، محاسبه جریان توربولانسی در مقیاس خیلی کوچک بسیار مشکل است. به همین منظور استفاده از روش های جایگزین همچون روش میانگین پیشنهاد می شود. از روش میانگین برای شبیه سازی اثرات توربولانسی استفاده می شود. در مدل میانگین زمانی، به جای بررسی صریح رفتار توربولانسی به وسیله معادلات ناویر-استوکس در مقیاس های کوچک، ترم هایی برای شبیه سازی توربولانس میانگین بیان می شود و برای این کار معادلات انتقال برای بررسی و مدل سازی کل تغییرات توربولانسی جریان حل می شود. این معادلات که نیرو و زمان لازم برای مدل سازی مقیاس بزرگی از توربولانس را کاهش می دهد با نام *Reynolds Average Navier Stokes* شناخته می شوند. مدل های توربولانسی *RANS* دومعادله ای از فرضیه بوزینسک استفاده می کنند که انتقال مومنتم تولید شده را به وسیله گردابه های توربولانسی، می توان مدل سازی نمود. این تئوری بیان می کند که

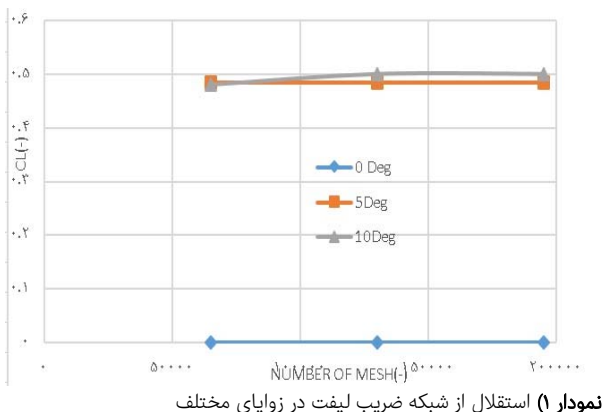
توربین بادی تراکم‌ناپذیر است، شرط مرزی ورودی سرعت به کار می‌رود. در خروجی جریان، شرط مرزی فشار خروجی مورد استفاده قرار گرفته است. در این شرط مرزی فشار استاتیک به صورت نسبی در مرز خروجی وارد می‌شود. برای سطح ایرفویل شرط مرزی دیوار به کار می‌رود و با توجه به اینکه لزجت داریم، شرط عدم لغزش به صورت پیش فرض در حرکت سیال از روی سطح ایرفویل اعمال می‌شود. مقدار دمای جریان آزاد ۳۰۰ کلوین و فشار یک اتمسفر در نظر گرفته شده است. قسمت خروجی شبکه مش‌بندی شده را outlet، قسمت بالا و پایین شبکه مش‌بندی شده را Wall و ایرفویل مورد نظر Airfoil نام‌گذاری می‌شود.

۳-۳- نحوه شبیه‌سازی در نرم‌افزار انسیس فلونت

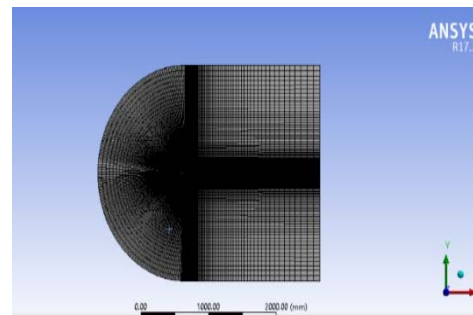
نرم‌افزار انسیس فلونت دارای مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی ایرفویل مورد نظر هست که با مطالعه کارهای انجام شده و امتحان چند مدل مختلف، در نهایت مدل $K\omega - SST$ برای این کار انتخاب شد. این مدل توربولانسی قادر به بررسی جریان حول ایرفویل‌های متحرک و همچنین قادر به بررسی گردابه ایجاد شده است. سپس از شرط سرعت ورودی و شرط مرز فشار خروجی در خروجی بهره گرفته شد. همچنین برای دیواره از شرط مرزی و از نوع No Slip استفاده شد. برای جداسازی معادلات مومنتم، از روش Second Order و برای جداسازی باقی معادلات از روش Second Order Upwind استفاده شده است. همچنین از الگوریتم پیزو برای کوپل سرعت و فشار و برای گسسته‌سازی از روش مرتبه دو استفاده شده است. مقدار گام زمانی در این تحقیق 10^{-4} است و هزینه محاسباتی با استفاده از ۶ هسته موازی برای هر سیکل حدود ۴۸ ساعت است.

۳-۴- استقلال از شبکه

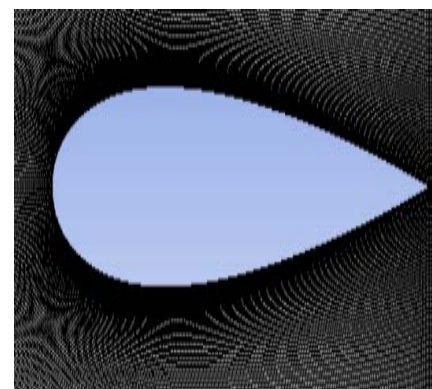
از آنجایی که نتایج حل عددی می‌تواند به شبکه ایجاد شده وابسته باشد، لذا برای به دست آوردن جواب دقیق، نتایج می‌بایست مستقل از شبکه ایجاد شده باشند. برای بررسی استقلال حل عددی و نتایج از شبکه محاسباتی، تحقیقی انجام شد که در آن سه نوع شبکه متفاوت در حالت پایا و در زاویه حمله صفر، ۵ و ۱۰ درجه و برای ایرفویل NACA0015، سه نوع شبکه‌بندی درشت با تعداد ۶۰۰۰۰، متوسط با تعداد ۱۳۰۰۰۰ و ریز به تعداد ۱۹۰۰۰۰ مورد ارزیابی قرار گرفتند که بررسی نتایج در نمودارهای ۱ و ۲ نشان داده شده است.



محاسبات از شبکه ریزتری در این نواحی استفاده شود. به علت پیچیدگی هندسه ایرفویل، جهت بهبود کیفیت شبکه‌بندی، دامنه محاسباتی به چند ناحیه تقسیم شد و هر ناحیه به صورت جداگانه شبکه‌بندی شد. این امر کیفیت شبکه‌بندی را به خصوص در نواحی نزدیک سطح ایرفویل افزایش داده است 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 فلونت ترسیم شده و سپس 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 ساختاریافته بوده و دامنه محاسباتی C شکل حول ایرفویل استفاده شده است. شعاع نیم‌دایره حول دامنه ۱۲ برابر وتر و فاصله مرز خروجی دامنه تا لبه فرار ۲۰ برابر وتر ایرفویل در نظر گرفته شد. برای راحتی، شکل مورد نظر به ۴ قسمت به وسیله Face Splitte تقسیم و سپس وارد ANSYS Meshing شده و برای تولید شبکه از شبکه‌بندی نوع C دوبعدی استفاده شده است. مش حول ایرفویل به صورت سازمان‌یافته است و سعی شده تا مقدار ضریب بی‌بعد γ^+ به اندازه‌ای باشد تا اولین گره در نزدیکی ایرفویل در زیرلایه لزج قرار گرفته باشد. دامنه محاسباتی و نمای نزدیک در شکل ۲ نشان داده شده است.



الف



ب

شکل ۲) نمایی از شبکه‌بندی کل دامنه حل (الف) و نمای نزدیک ایرفویل (ب)

۳-۲- شرایط مرزی

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

۴-۱- روند ساخت شاسی توربین

برای ساخت شاسی، ابتدا ۸ عدد پروفیل ۴×۴ سانتی‌متر به طول ۵۰ سانتی‌متر و ۴ عدد پروفیل ۴×۴ سانتی‌متر به طول ۸۰ سانتی‌متر با استفاده از دستگاه اره‌لنگ برش و با الکترو د E مدل ۶۱۳ جوش داده و سپس پایه یا شاسی توربین به ارتفاع ۸۸ سانتی‌متر شده تا توربین روی آن سوار شود.

برای تراز کردن شاسی از تراز دیجیتالی که به جای حباب تراز از سنسور محاسبه شیب جهت اندازه‌گیری شیب استفاده شده تا به کمک صفحه نمایش‌گر مقدار شیب سطوح را با دقت ۰/۱ درجه نمایش می‌دهد.

پایه توربین باید از لحاظ استقامتی محکم باشد و چون دارای ارتفاع و ابعاد نسبتاً بزرگ است، پایه یا شاسی دارای ارتفاع بزرگ و از همه مهم‌تر باید در مقابل تنش و استرس احتمالی مقاوم باشد و ارتعاشات کل دستگاه در حالت دینامیکی در محدوده قابل مجاز است و شاسی دستگاه موقع اندازه‌گیری در دو حالت پره صاف و متخلخل به ۴ وزنه ۲۵ کیلوگرمی کنسول شده تا ارتعاش و لرزشی موقع اندازه‌گیری در دو حالت پره صاف و متخلخل نداشته باشد.

۴-۲- یاتاقان‌های توپی

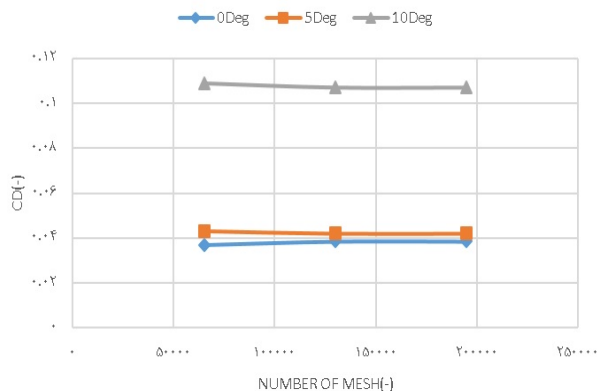
در توربین‌های بادی، یاتاقان‌های توپی نقش مهم و اساسی را ایفا می‌کنند که برای دوران شفت توربین از آن‌ها استفاده می‌شود. برای اتصال پایه به توربین بادی محور عمودی از یاتاقان توپی به قطر داخلی ۲۰ میلی‌متر استفاده که دارای ۴ سوراخ به قطر ۱۲ میلی‌متر است که با پیچ و مهره به پایه نصب می‌شود. یاتاقان توپی که در اتصال شفت به پایه یا بدنه توربین استفاده می‌شود باید به اندازه کافی روان باشد تا در مقابل حرکت توربین مقاومت ایجاد نکند. یاتاقان توپی استفاده شده در این کار از نوع ایتیکا به قطر داخلی ۲۰ میلی‌متر برای اتصال مورد استفاده قرار گرفته که دارای قابلیت روان کاری از طریق پین مخصوص روغن را دارد. برای محکم نگه داشتن شفت و همچنین جهت حفظ کنترل شفت از یک یاتاقان توپی دیگر استفاده می‌شود که به اندازه ۲۲ سانتی‌متر بالاتر از پایه یاتاقان توپی دیگر قرار دارد.

۴-۳- استفاده از ورق آلومینیوم برای ساخت پرها

آلومینیوم و آلیاژهای آن به‌طور 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 [15].

آلیاژهای آلومینیوم به‌طور کلی به ۸ گروه مختلف تقسیم‌بندی می‌شوند که از آلیاژهای آلومینیوم با عناصر دیگر از جمله مس، منیزیم، منگنز و غیره تولید می‌شوند. آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده در آزمایشگاه از سری یک بوده که از آلومینیوم با خلوص ۹۹/۹۹٪ یا بالاتر تشکیل شده است.

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 ۴-



نمودار ۲) استقلال از شبکه ضریب درگ در زوایای مختلف

با توجه به نمودارهای ۱ و ۲، مشاهده می‌شود که نتایج با افزایش سلول‌های شبکه از تعداد ۱۶ هزار تغییری نکرده است و اصطلاحاً گفته می‌شود که حل مستقل از شبکه شده است. با توجه به نتایج این بررسی، تعداد سلول شبکه محاسباتی ۱۳۰ هزار انتخاب شده است.

۴- طراحی و ساخت

شماتیک توربین بادی طراحی شده در نرم‌افزار کتیا ترسیم شد (شکل ۳- الف) و سپس در مقیاس ۱:۵ نمونه اصلی ساخته شد (شکل ۳- ب). ارتفاع پره برابر ۳۵ سانتی‌متر، شعاع پره ۱۸/۵ سانتی‌متر و طول ایرفویل برابر ۶/۴ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.



الف



ب

شکل ۳) شماتیک توربین بادی طراحی شده (الف) و توربین ساخته شده (ب)

۴-۴- ساخت بازوهای توربین

برای ساخت بازوی توربین ابتدا فولاد به قطر ۱۰ میلی‌متر و به طول ۱۸/۵ سانتی‌متر برش و سپس به فاصله ۱۰ میلی‌متر از یک طرف بازو، سوراخی به قطر ۵ میلی‌متر و پخی به اندازه ۸/۵ میلی‌متر ایجاد می‌شود. برای اینکه بازوها را بتوان راحت‌تر به شفت توربین وصل کرد و در صورت لزوم بتوان ارتفاع پرها را افزایش یا کاهش داد، قطعه‌ای به قطر داخلی و خارجی ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر طراحی و ساخته شد.

۴-۵- نیروی راه‌اندازی

یکی از مشکلات توربین‌های بادی 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 ۶، نحوه استفاده نیروسنج را برای ایجاد نیرو و گشتاور راه‌اندازی اولیه نشان می‌دهد. برای این کار ابتدا در سرعت بادی که توربین می‌تواند در آن شروع به کار کند، نیروسنج را به پره توربین متصل و سپس نیروی مورد نیاز برای اندازه‌گیری مشخص شده و لازم به ذکر است که ارتفاعات کل دستگاه در حالت دینامیکی محدوده مجاز بوده و برای اندازه‌گیری دقیق‌تر نیروسنج مورد استفاده در آزمایشگاه با دقت ۰/۲ کالیبره شده است.



الف



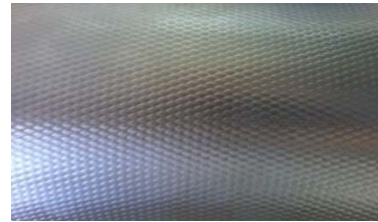
ب

شکل ۶ نیروسنج (الف) و نحوه نصب نیروسنج به توربین بادی محور عمودی داریوس (ب)

الف) به ضخامت ۳/۰ میلی‌متر به ابعاد ۲×۱ متر و برای ساخت پره متخلخل از ورق آلومینیوم امباس لوزی‌شکل (شکل ۴-ب) که به صورت خلل و فرج است، به ضخامت ۳۳/۰ میلی‌متر استفاده شد.



الف



ب

شکل ۴ ورق ساده آلومینیوم (الف) و امباس لوزی‌شکل (ب)

برای ساخت پرها از ایرفویل NACA0015 استفاده شده که در هر پیچ متری، ۴ ایرفویل به فاصله ۸/۷۵ سانتی‌متر به وسیله مهره در دو طرف ایرفویل قرار و در پیچ متری پیچیده می‌شود تا سفت شود و لقی نداشته باشد. جنس مورد استفاده برای روکش پره از جنس ورق آلومینیوم ساده برای پره صاف و برای پره متخلخل از روکش ورق امباس لوزی‌شکل که به صورت خلل و فرج است، استفاده شد که ورق‌های آلومینیوم با استفاده از پرچ و پیچ خودرو به هم وصل می‌شوند و با استفاده از ساعت اندیکاتور، لقی و فرورفتگی پره‌های صاف 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.

برای اینکه بتوان خود شروع‌شوندگی توربین بادی محور عمودی داریوس را افزایش داد، از ورق آلومینیوم امباس لوزی‌شکل به ضخامت ۳/۰ میلی‌متر استفاده شد که در شکل ۵-الف پره ساخته‌شده از ورق آلومینیوم امباس لوزی و در شکل ۵-ب پره وصل‌شده به توربین بادی قابل مشاهده است.



ب



الف

شکل ۵ پره صاف ساخته‌شده از ورق آلومینیوم (الف) و پره ساخته‌شده از ورق آلومینیوم امباس لوزی‌شکل (ب)



الف



ب

شکل ۸) تست توربین

۴-۸- انواع خطاها

در انجام آزمایش‌های تست باد باید سعی شود تا میزان خطا در حد امکان کاهش یابد و به صفر میل کند. اگر نتوان بعضی از خطاها را برطرف کرد باید با استفاده از فرمول‌های محاسباتی، داده‌های آزمایش را تصحیح کرد.

خطاها به دو دسته سینماتیک و تصادفی تقسیم می‌شود. خطاهای سینماتیک، خطای ذاتی دستگاه است که با مقایسه به مرجع مورد اطمینان به‌دست‌آمده و خطای تصادفی نیز از روی داده‌های زمانی هر کدام از لودسل‌ها که تابعی از انحراف معیار داده‌ها قبل از متوسط‌گیری است. در پژوهش حاضر، خطاهای موجود به‌صورت زیر است:

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

ب- خطای تنظیم موقعیت قرارگیری مدل در فاصله و زاویه مورد نظر: اگرچه با استفاده از ساعت اندیکاتور، شابلون و ترازسنج دیجیتال سعی شد که مدل دقیقاً در محل خود قرار گیرد. اما در طول آزمایش به‌دلیل خطای دید و میزان دقت فاصله تنظیم، همواره مقداری خطا در تنظیم فواصل مختلف به‌وجود می‌آید.

ج- خطای موجود در ساخت مدل: به‌دلیل خطای دستگاه‌های ساخت مدل، همواره در این مرحله مقداری خطا ایجاد می‌شود که بر نتایج تست تأثیر می‌گذارد. یکی از این خطاها در ساخت و نصب پره ایجاد شده است. اما بعد از مونتاژ نهایی دارای یک خطای زاویه‌ای حدود ۳/۰ درجه بود. البته در انجام تست‌ها زاویه فوق در پره لحاظ شده است.

د- خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری: اگرچه دستگاه به‌دقت 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 ۲٪ است.

۴-۶- وسایل مورد نیاز برای ساخت، تست و اندازه‌گیری

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 (شکل ۷). ساعت اندیکاتور یا ساعت اندازه‌گیری، جزء ابزارهای اندازه‌گیری متغیر است که با دقت ۰/۱ میلی‌متر جهت دورنمودن و تعیین اختلاف سطح قطعات به‌کار می‌رود که بعد از برش قطعات و تعیین اختلاف سطح پیچ متری و سایر قطعات مورد استفاده در ساخت توربین از ساعت اندیکاتور با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد. برای ایجاد جریان باد از یک دمنده که از ۴ فن با قابلیت هوادهی تشکیل شده و برای اندازه‌گیری سرعت باد در سرعت‌های مختلف از یک سرعت‌سنج لوترون مدل YK2004AH، استفاده شد. دوران روتور عامل تأثیرگذار در عملکرد توربین باد است به این صورت که هرچه دوران روتور بیشتر باشد، نشان‌دهنده بازدهی بالای توربین است. برای اندازه‌گیری دوران توربین از یک دورسنج لوترون مدل DT-2268 استفاده شده است (شکل ۷).



ب



الف



د



ج

شکل ۷) ابزارهای اندازه‌گیری: الف) ساعت اندیکاتور، ب) دمنده، ج) سرعت‌سنج، د) دورسنج

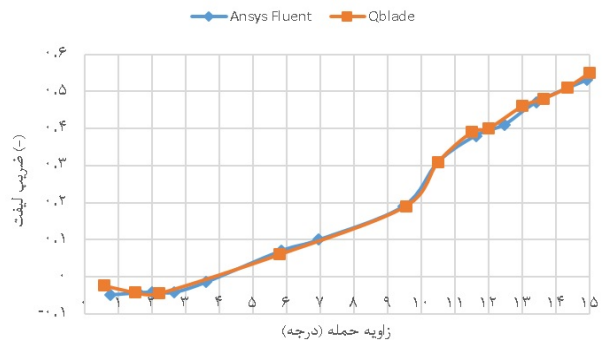
۴-۷- تست توربین

بعد از ساخت توربین بادی محور عمودی داریوس با پره‌های صاف و متخلخل شروع به تست کرده و آن‌ها را در جلوی دمنده مورد نظر قرار داده و در سرعت‌های مختلف، دوران توربین بادی در هر دو حالت پره صاف و متخلخل اندازه‌گیری شد که در شکل ۸ قرارگیری توربین بادی را در مقابل دمنده را نشان می‌دهد.

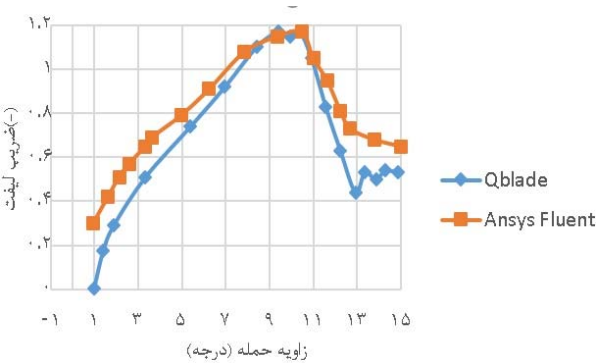
۵- نتایج

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

در نمودار ۳ مقایسه داده‌های ضریب برآ در سرعت ۵ متر بر ثانیه برحسب زاویه آلفا برای ایرفویل NACA0015 نشان داده شده است. با افزایش زاویه آلفا، ضریب برآ سیر صعودی به خود گرفته و افزایش یافته است که می‌توان در نتایج دو نرم‌افزار به این نتیجه رسید. در زمان افزایش زاویه حمله، ضریب نیروی برآ به صورت خطی در دو مدل ارائه شده به صورت خطی افزایش پیدا کرده است.



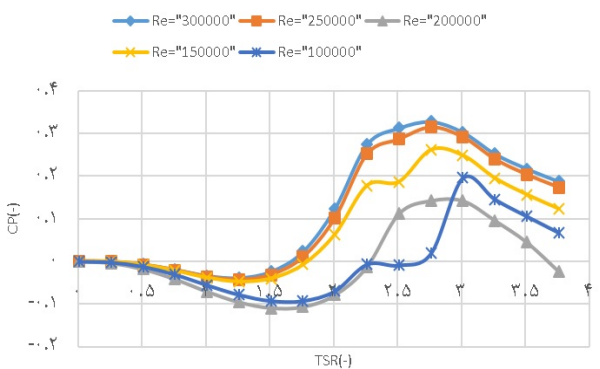
نمودار ۳) مقایسه داده‌های Q-blade و Fluent ضریب لیفت بر زاویه آلفا در سرعت ۵ متر بر ثانیه



نمودار ۵) مقایسه داده‌های Q-blade و Fluent ضریب لیفت بر زاویه آلفا در سرعت ۵ متر بر ثانیه

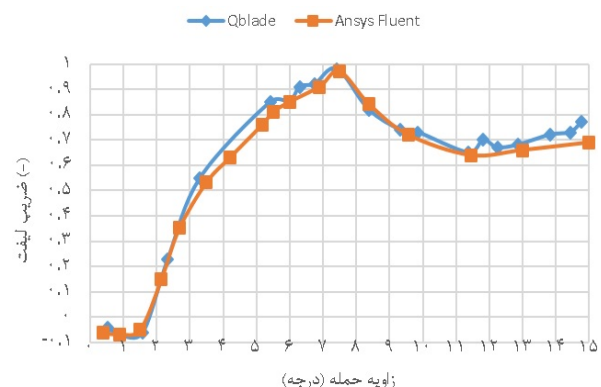
۳-۵- محاسبه ضریب عملکرد توربین در عدد رینولدزهای مختلف

در نمودار ۶، اعداد رینولدز مختلف ضریب عملکرد توربین طراحی شده محاسبه شده است. همان‌طور که در نمودار ۶ قابل مشاهده است، هرچه عدد رینولدز توربین بادی طراحی شده بیشتر باشد، ضریب عملکرد توربین بادی زیاده‌تر است و هرچه ضریب عملکرد توربین بیشتر باشد، کارایی و راندمان توربین بادی طراحی شده بیشتر است. بالاترین عدد رینولدز در این مدل‌سازی برابر ۳۰۰ هزار است و محدوده بالاترین عدد رینولدز در این محور عمودی داریوس بین ۱/۵ تا ۴ است و ماکزیمم عملکرد توربین برابر ۳۳٪ است.



نمودار ۶) ضریب عملکرد توربین بادی طراحی شده در اعداد رینولدز مختلف

در نمودار ۴ مقایسه داده‌های ضریب برآ در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه برحسب زاویه آلفا نشان داده شده است. با افزایش زاویه آلفا، ضریب برآ سیر صعودی به خود گرفته و افزایش یافته و در زاویه ۷ درجه به مقدار ماکزیمم خود یعنی ۰/۹۷۵ رسیده و در این زاویه، واماندگی برای ایرفویل NACA0015 رخ داده و با افزایش بیشتر زاویه آلفا نمودار سیر نزولی به خود گرفته است. نکته دیگری که از نتایج مشخص است، 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 Ansys Fluent به خوبی پیش‌بینی شده و هر دو مدل به خوبی مقدار بیشینه را با دقت مناسب پیش‌بینی کرده‌اند.



نمودار ۴) مقایسه داده‌های Q-blade و Fluent ضریب لیفت بر زاویه آلفا در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه

در نمودار ۵ مقایسه داده‌های ضریب برآ در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه برحسب زاویه آلفا نشان داده شده است. با افزایش زاویه آلفا، ضریب

۴-۵- اعتبارسنجی نتایج انسیس فلوئنت

برای اعتبارسنجی نتایج انسیس فلوئنت، با نتایج تجربی [17] مقایسه و نتیجه مقایسه در نمودار ۷ نشان داده شده که با نزدیک شدن به مرحله واماندگی و در زوایای حمله بالا، به‌خاطر مسائلی همچون جدایی جریان و لرزش مدل که به دمنده یا تونل نیز وارد می‌شود،

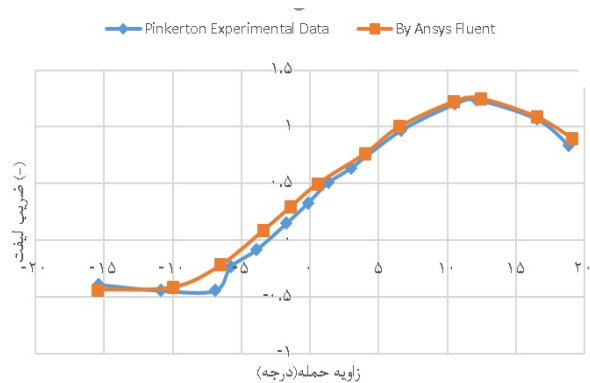
سرعت‌های پایین به دور مشخص برسد، باعث افزایش بازدهی توربین می‌شود. هرچه دوران روتور در سرعت مختلف به‌خصوص در سرعت‌های پایین، بیشتر باشد باعث افزایش سرعت دورانی و در نتیجه افزایش توان خواهد داشت. توربین بادی در وضعیت پره صاف در سرعت‌های پایین هیچ دورانی ندارد، به‌طوری که تا سرعت باد $3/9$ متر بر ثانیه، 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 نمودار ۹ می‌توان نتیجه گرفت که در سرعت‌های اولیه، دوران توربین در حالت پره متخلخل بهتر از توربین بادی پره صاف بوده است (نمودار ۹).

توربین بادی پره صاف تا سرعت 4 متر بر ثانیه هیچ دورانی نداشته و در سرعت 4 متر بر ثانیه شروع به دوران کرده و 3 دور بر دقیقه دوران داشته است. اما توربین بادی پره متخلخل در سرعت $2/5$ متر بر ثانیه دورانی برابر 2 دور بر دقیقه، در سرعت 3 متر بر ثانیه دورانی برابر 4 دور بر دقیقه، در سرعت $3/5$ متر بر ثانیه دورانی برابر 7 دور بر دقیقه و در سرعت 4 متر بر ثانیه، 9 دور بر دقیقه چرخش داشته که 3 برابر دوران تولیدشده نسبت به توربین بادی پره صاف در این سرعت است. تا سرعت $7/5$ متر بر ثانیه دوران توربین بادی پره متخلخل از توربین بادی پره صاف بیشتر بوده و تا سرعت 9 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 است (نمودار ۹).

لازم است تا برای راه‌اندازی توربین بادی محور عمودی داریوس، نیروی درگ در سرعت‌های پایین ایجاد شود. برای ایجاد نیروی درگ در سرعت‌های پایین باید روی پره، اصطکاک ایجاد شود تا توربین بادی محور عمودی داریوس بتواند شروع به دوران نماید. اصطکاک پره متخلخل نسبت به پره صاف زیادتر است 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 ایجادشده 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، به‌خاطر 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 می‌شود.

برای صحت‌سنجی داده‌های به‌دست‌آمده در نتایج آزمایشگاهی حاصل از دوران توربین بادی پره صاف و متخلخل در سرعت بادی مختلف، نتایج را در نرم‌افزار Q-blade تحلیل کرده که با افزایش

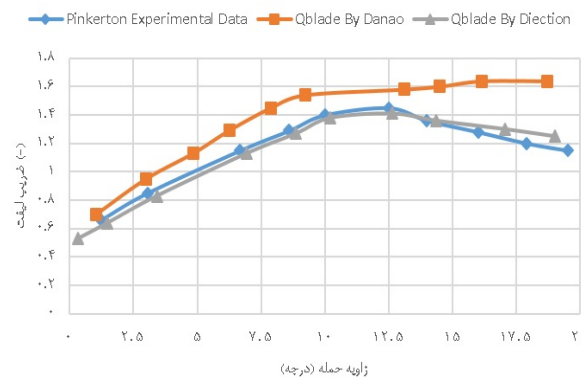
نتایج دارای اختلاف در واماندگی هستند و در زمان افزایش زاویه حمله تا قبل از واماندگی، ضریب نیروی برآ در مدل عددی به‌صورت خطی تغییر و افزایش پیدا کرده که این موضوع نیز توسط روش عددی به‌خوبی پیش‌بینی شده است.



نمودار ۷) مقایسه تحلیل عددی ضریب لیفت به زاویه حمله با نتایج تجربی

۵-۵- اعتبارسنجی داده‌های Q-blade

برای صحت کار انجام‌شده در مرحله اول، نتایج به‌دست‌آمده را با داده‌های عملی به‌دست‌آمده توسط پیپکرتون [17] و تحلیل دانائو [18] برای ایرفویل NACA4412 در عدد رینولدز 200000 و زوایای صفر تا 20 درجه مقایسه و اعتبارسنجی شد که نتایج به‌دست‌آمده مطابقت خوبی داشت (نمودار ۸). در زمان افزایش زاویه حمله تا قبل از زاویه واماندگی، ضریب نیروی برآ به‌صورت خطی افزایش یافته و در روش تحقیق حاضر، مدل انتخاب‌شده به‌صورت دقیق‌تر نسبت به مدل دانائو، نتایج را پیش‌بینی کرده است و با نزدیک‌شدن به مرحله واماندگی در زاویه حمله بالا، به‌خاطر مسائلی همچون جدایی جریان، نتایج دارای اختلاف در نزدیکی‌های زاویه واماندگی است و مقدار ماکزیمم ضریب برآی پیش‌بینی‌شده در تحقیق حاضر خیلی نزدیک‌تر نسبت به مدل حل‌شده دانائو برای مدل تجربی است.



نمودار ۸) اعتبارسنجی داده‌های Q-blade

۶-۵- 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

پره‌های توربین به‌دست آمده است. نتایج به‌دست‌آمده از این بررسی نشان‌دهنده بهبود ویژگی‌های آیرودینامیکی پره متخلخل نسبت به پره صاف است.

مطالعات تجربی و عددی به‌دست‌آمده از تحقیق حاضر به‌صورت موارد ذیل خلاصه می‌شوند:

۱- برای اطمینان از صحت مدل‌سازی بیزیر، نتایج آن را با ایرفویل NACA0015 به‌دست‌آمده از نرم‌افزار Q-Blade مقایسه کرده و مدل بیزیر ایرفویل برای مدل‌سازی شرایط قابل قبولی را داشت.

۲- ضریب لیفت و درگ ایرفویل NACA0015 در زوایای صفر تا ۱۵ درجه در سرعت‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ متر بر ثانیه در نرم‌افزارهای انسیس فلوئنت و Q-blade به‌دست آورده که این نتایج هم‌خوانی خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشت.

۳- با استفاده از نرم‌افزار Q-blade و تحلیل آیرودینامیکی توربین بادی محور عمودی داریوس این نتیجه حاصل شد که با افزایش عدد رینولدز، ضریب عملکرد توربین افزایش یافته و کارایی توربین بهتر می‌شود.

۴- نتایج تجربی و عددی نشان می‌دهد که با افزایش سرعت باد، دوران توربین بادی پره صاف و متخلخل در سرعت‌های زیر ۱۰ متر بر ثانیه افزایش پیدا می‌کند.

۵- نتایج تجربی نشان می‌دهد که توربین بادی محور عمودی داریوس پره متخلخل در سرعت ۲/۳ متر بر ثانیه و پره صاف در سرعت ۳/۹ متر بر ثانیه شروع به دوران کرده است.

۶- در سرعت‌های ۲/۵ و ۳ متر بر ثانیه، توربین بادی پره متخلخل ۲ برابر و در سرعت ۴ متر بر ثانیه ۳ برابر توربین بادی پره صاف و در سرعت‌های ۴/۵، ۵، ۶، ۵/۵، ۶ و ۷ متر بر ثانیه دوران توربین بادی پره متخلخل نسبت به توربین بادی پره صاف ۲۰، ۲۲، ۲۵، ۵۶/۲۵، ۷/۵ و ۱۲٪ بیشتر بوده است.

۷- در سرعت‌های ۹ و ۱۰ متر بر ثانیه دوران توربین بادی پره صاف ۱/۸ و ۶/۴٪ نسبت به توربین بادی پره متخلخل بهتر بوده است.

۸- مدل در مقیاس ۱:۵ نسبت به نمونه اصلی ساخته شده است که با بهبود و انتخاب مواد سبک‌تر برای بازوها، شفت و ساخت یک‌دست پره توربین با دستگاه‌های پیشرفته CNC یا قالب‌سازی و بستگی به اندازه و توان تولیدی در حد وات یا چند مگاوات، نتایج آزمایشگاهی قابل انتقال به نمونه اصلی است.

تشکر و قدردانی: موردی گزارش نشد.

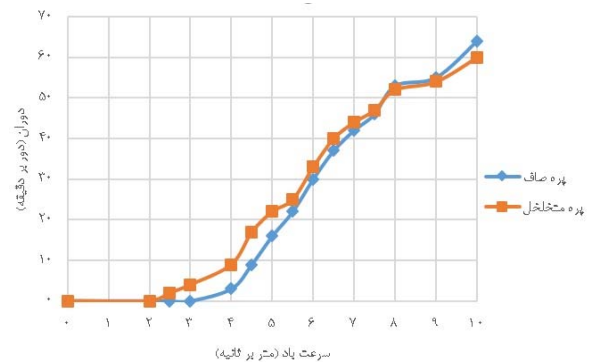
تاییدیه اخلاقی: موردی گزارش نشد.

تعارض منافع: موردی گزارش نشد.

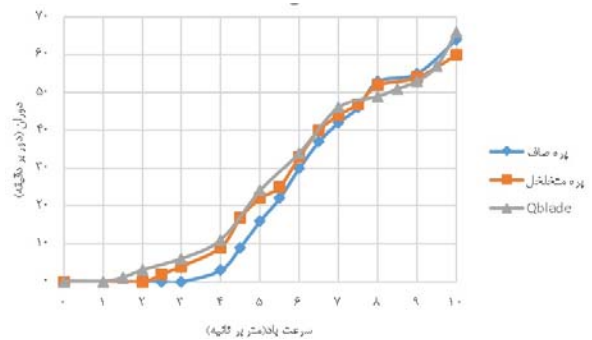
سهم نویسندگان: حسین سیفی‌داوری (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۷۵٪)؛ شهریار کوراوند (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۱۵٪)؛ ایمان خاتمی (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۱۰٪)

منابع مالی: توسط پدر مرحوم آقای حسین سیفی‌داوری تامین شده است.

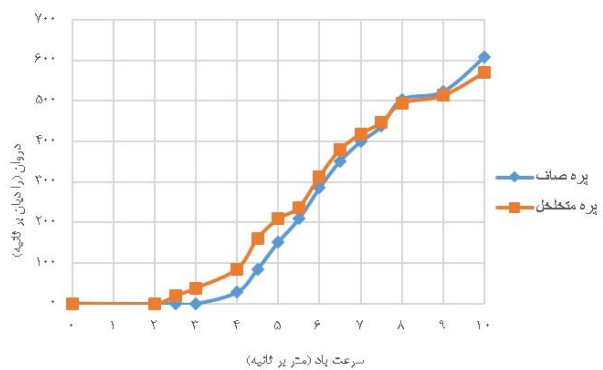
سرعت باد، دوران توربین بادی افزایش پیدا کرده و مدل عددی، نتایج آزمایشگاهی را به دقت پیش‌بینی کرده است. خطای نتایج تجربی شامل خطای دستگاه اندازه‌گیری یا سرعت دمنده، خطای ساخت مدل و تنظیم موقعیت قرارگیری است (نمودار ۱۰). در نمودار ۱۱ مقایسه دوران توربین بادی با پره صاف و متخلخل برحسب رادیان بر ثانیه نیز آورده شده است.



نمودار ۹) مقایسه دوران توربین بادی پره صاف و متخلخل برحسب دور بر دقیقه



نمودار ۱۰) صحت‌سنجی داده‌های به‌دست‌آمده با نرم‌افزار Q-blade



نمودار ۱۱) مقایسه دوران توربین بادی با پره صاف و متخلخل برحسب رادیان بر ثانیه

۶- نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش بررسی تأثیر پره متخلخل بر خودشروع‌شوندگی توربین بادی محور عمودی داریوس است. 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 ۴ 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

alternative materials for use in mid-size vertical axis wind turbine blades: Materials assessment. Ottawa: Echnology Branch, Energy, Mines and Resources; 1987.

8- Wang Y, Yan C, Zhou T. Numerical investigation of dynamic stall vortex movement of different thickness airfoils. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics. 2006;32(2):153-157.

9- 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.

10- Edwards J, Durrani N, Howell R, Qin N. Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine. 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2008 January 7-10, Reno, Nevada. Reston: AIAA; 2008. p. 1316.

11- Wang S, Ingham DB, Lin M, Pourkashanian M, Tao Z. Numerical investigations on dynamic stall of low Reynolds number flow around oscillating airfoils. Computers & Fluids. 2010;39(9):1529- 1541.

12- Hayashi T, Li Y, Hara Y. Wind tunnel tests on a different phase three-stage Savonius rotor. JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering. 2005;48(1):9-16.

13- Kouravand Sh, Moetakef Imani B, Mashaallah Kermani A. Design and analysis of a small wind turbine with combined airfoil. Journal of Renewable and New Energy. 2017;3(2):65-73. [Persian]

14- Sobhani E, Ghaffari M, Maghrebi MJ. Numerical investigation of dimple effects on darrieus vertical axis wind turbine. Energy. 2017;133:231-241.

15- Vince J. Mathematics for computer graphics. 3rd Edition. Berlin: Springer; 2017. pp: 17-37.

16- Cutler J, Liber J. Understanding aircraft structures. 4th Edition. Oxford: Blackwell Publishing; 2005. p. 340.

17- Pinkerton RM. The variation with Reynolds number of pressure distribution over an airfoil section [Report]. Washington, D.C.: National Advisory Committee for Aeronautics; 1938. Report No.: NACA-TR-613.

18- Danao LA, Abuan B, Howell R. Design analysis of a horizontal axis tidal turbine. 3rd Asian Wave and Tidal Conference, 2016 October 24-28, Singapore. Diliman: University of the Philippines; 2016.

فهرست علائم

فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)	P
تانسور تنش	T
لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)	μ
سرعت (m/s)	U
عدد رینولدز	Re
نیروهای حجمی (N)	F
نیروی گرانشی ($\frac{m}{s^2}$)	g
زاویه آلفا	α

منابع

1- Firdaus R, Kiwata T, Kono T, Nagao K. Numerical and experimental studies of a small vertical-axis wind turbine with variable-pitch straight blades. Journal of Fluid Science and Technology. 2015;10(1):JFST0001.

2- Zamani M, Nazari S, Moshizi SA, Maghrebi MJ. Three dimensional simulation of J-shaped Darrieus vertical axis wind turbine. Energy. 2016;116(Part 1):1243-1255.

3- Wong KH, Chong WT, Sukiman NL, Poh SC, Shiah YC, Wang CT. Performance enhancements on vertical axis wind turbines using flow augmentation systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017;73:904-921.

4- Berg DE. Structural design of the sandia 34-meter vertical-axis wind turbine [Report]. Albuquerque: Sandia National Laboratories; 1985 April. Report No.: SAND84-1287.

5- Van Bussel GJW. A momentum theory for winglets on horizontal axis wind turbine rotors and some comparison with experiments. 4th IEA Symposium on the Aerodynamics of Wind Turbines, 1990 November 19-20, Rome, Italy. Unknown Publisher: Unknown Publisher: 1990.

6- Stoddard FS. Discussion of momentum theory for windmills [Report]. Amherst: University of Massachusetts Amherst; 1976. Unknown Report No.

7- Coppens AJ, Jones S. Davis Engineering Ltd, Canada. Energy, Mines and Resources Canada. Investigation of