



بررسی آزمایشگاهی و عددی عملکرد آیرودینامیکی یک نوع توربین بادی محور عمودی با پره‌های لولایی

مریم امیری¹، محسن کهرم²، علیرضا تیمورتاش^{2*}

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

* مشهد، صندوق پستی 9177948944، teymourtash@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 27 دی 1395

پذیرش: 17 اسفند 1395

ارائه در سایت: 09 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:

توربین بادی محور عمودی

عملکرد آیرودینامیکی

قاب متحرک

صفحات انتهایی

چکیده

یکی از بزرگترین معایب توربین‌های بادی محور عمودی عمل کننده براساس نیروی پسا، عملکرد آیرودینامیکی ضعیف این توربین‌هاست که عمدتاً به دلیل گشتاور معکوس پره پشت به باد است. اخیراً طرح جدیدی با استفاده از پره‌های جمع و باز شونده به منظور حذف گشتاور منفی پره‌های بازگشتی ارائه شده است. در مقاله حاضر عملکرد آیرودینامیکی توربین پیشنهاد شده به روش آزمایشگاهی و عددی مطالعه شده است. آزمایشات در یک تونل باد زیر صوتی و شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار آنسیس فلونت و روش قاب متحرک انجام شده است. اثرات تعداد پره (3، 4 و 6) و شدت آشفتگی و صفحات انتهایی بر ضریب گشتاور و ضریب توان در اعداد رینولدز مختلف بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد، روتور جدید در یک دوره چرخش کامل، گشتاور منفی ندارد و روتور 3 پره با مقدار ضریب توان بیشینه 0.21 در نسبت سرعت نوک 0.5، بهترین عملکرد آیرودینامیکی را داراست. اگرچه با افزایش تعداد پره، نوسانات گشتاور خروجی کاهش می‌یابد لیکن ضریب توان روتور نیز کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که عدد رینولدز در بازه مورد مطالعه $7.7 \times 10^4 \leq Re \leq 1.2 \times 10^5$ تاثیر چندانی بر عملکرد روتور ندارد.

Experimental and Numerical Investigations on the Aerodynamic Performance of a Hinged Bladed Vertical Axis Wind Turbine

Maryam Amiri, Mohsen Kahrom, Alireza Teymourtash*

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

* P.O.B. 9177948944, Mashhad, Iran, teymourtash@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 16 January 2017
Accepted 07 March 2017
Available Online 29 April 2017

Keywords:

Vertical axis wind turbine
Aerodynamic Performance
Multiple Reference Frame
End plates

ABSTRACT

One of the disadvantages of drag driven vertical axis wind turbines, is low aerodynamic performance of the turbine which is mainly due to adverse torque of the returning blade. A recently introduced design suggests using opening/closing blades for the rotor to eliminate the negative torque of the returning blade. In this study, the aerodynamic performance of the newly proposed turbine has been investigated experimentally and numerically. The experimental measurements are performed in a subsonic open-jet type wind tunnel facility. However, the numerical simulations are performed using the Ansys-Fluent commercial software, and the Multiple Reference Frame model (MRF). The effects of the number of blades (3, 4 and 6-bladed), end plates and turbulence intensity on the torque and power coefficients are examined in detail in several Reynolds numbers. Results show that the new rotor has no negative torque in one complete revolution and the 3-bladed rotor has the best aerodynamic performance in such a way that it reaches a maximum power coefficient of 0.21 at TSR=0.5. Although increasing the number of blades decreases the output torque oscillations, it also decreases the average power coefficient of the rotor. Results also show that, Reynolds number does not have significant effects on the average power coefficients of the rotors in the studied range of Reynolds numbers, $7.7 \times 10^4 \leq Re \leq 1.2 \times 10^5$.

1- مقدمه

شود، ولی به همان نسبت نیروی بیشتری برای مقاومت در برابر نیروی گریز از مرکز نیاز است. همچنین اندازه و وزن بزرگ پره‌ها، تنش بسیار زیادی در سازه ایجاد خواهد کرد. همه این عوامل زمینه را برای تحقیق و بررسی گسترده‌تر راجع به توربین‌های بادی محور عمودی فراهم می‌کند. در نوع محور عمودی، محور توربین عمود بر جهت وزش باد قرار دارد و برخلاف توربین‌های محور افقی، گشتاور بالا و سرعت دورانی کم دارند. مزیت دیگر توربین‌های محور عمودی نسبت به توربین‌های محور افقی، عدم حساسیت به جهت وزش باد است. در این توربین‌ها همواره نیمی از پره توربین در خلاف

توربین‌های بادی به طور عمده به دو دسته کلی براساس جهت محور چرخش تقسیم‌بندی می‌شوند: توربین باد محور افقی و محور عمودی. در نوع محور افقی، محور توربین به موازات جهت وزش باد قرار دارد. این دسته از توربین‌ها، در جریان پایا و یکنواخت و برای کارکرد طولانی مدت مناسب می‌باشند [1]. مشخصه دیگر این توربین‌ها، گشتاور پایین و سرعت دورانی زیاد می‌باشد. توان خروجی این توربین‌ها با سطح جاروب شده توسط پره‌ها متناسب است. هرچه طول پره‌ها بیشتر شود توان بیشتری از باد گرفته می‌

Please cite this article using:

M. Amiri, M. Kahrom, A. Teymourtash, Experimental and Numerical Investigations on the Aerodynamic Performance of a Hinged Bladed Vertical Axis Wind Turbine, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 21-30, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

ساونیوس رایج، محل وقوع ضریب فشار حداکثر در مرکز هر پره می‌باشد، ولی در پره‌های پیچی شکل این محل به سمت نوک هر پره متمایل می‌شود، بنابراین بازوی گشتاور بزرگتر می‌شود و در نتیجه مقدار گشتاور و ضریب توان نیز افزایش می‌یابد. آن‌ها آزمایش‌های خود را در یک تونل باد سرعت پائین انجام دادند و به حداکثر ضریب توان 31% دست پیدا کردند. کاموجی و همکاران [9] به منظور کم کردن نوسانات ضریب گشتاور ایستایی که در روتورهای ساونوس بدون پیچش سنتی وجود دارد، آزمایشاتی را بر روی روتورهای ساونوس با پیچش 90 درجه انجام دادند و نشان دادند که پره‌های مارپیچی⁵ گشتاور منفی را کاهش می‌دهند. اما واضح است که هزینه ساخت این پره‌های دارای پیچش بسیار بیشتر از نمونه‌های ساده بدون پیچش و با مقطع نیم‌دایره می‌باشد.

سها و همکاران [8] نشان دادند استفاده از دریچه⁶ منجر به کاهش گشتاور منفی و در نتیجه افزایش ضریب توان میانگین می‌شود، در صورتیکه این دریچه‌ها فقط هنگامی باز شوند که جریان هوا را از سطح محدب پره به سطح مقعر عبور دهند. حداکثر ضریب توان در آزمایشات آن‌ها 32% (حداکثر ضریب توان روتور ساونوس رایج 16% است) می‌باشد. آکوا و همکاران [10] تاثیر افزایش عدد رینولدز بر جدایش لایه مرزی بر روی پره‌های روتور را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که افزایش عدد رینولدز منجر به تاخیر جدایش روی سطح محدب پره‌ها و کاهش پسی فشاری روی پره بازگشتی⁷ و در نتیجه افزایش گشتاور ایستایی می‌شود.

امیری و همکاران [11] به بررسی اثر همزمان هم‌پوشانی اولیه و ثانویه بر ضریب توان توربین ساونوس پرداخته‌اند. ایجاد هم‌پوشانی ثانویه مثبت (فرو رفتن پره‌ها داخل یکدیگر) و هم‌پوشانی ثانویه منفی (فاصله گرفتن پره‌ها از یکدیگر)، هر دو منجر به کاهش ضریب توان حداکثر می‌شود که این کاهش در هم‌پوشانی ثانویه منفی بسیار قابل توجه می‌باشد. به عبارت دیگر در هم‌پوشانی ثانویه منفی امکان فرار جریان از سطح مقعر پره ایجاد می‌شود و این خود باعث افت کارایی روتور می‌شود.

کانگ و همکاران [12] به بررسی اثر افزودن صفحات انتهایی⁸ بر عملکرد روتور ساونوس پرداخته‌اند. صفحات انتهایی از فرار جریان هوا از سطح پره مقعر به طور موثری جلوگیری و اختلاف فشار بین دو سطح پره را در سطح بالاتری حفظ می‌کنند. در آزمایشات آن‌ها، قطر بهینه صفحات انتهایی 1.1 برابر قطر روتور در نظر گرفته شده است. الکساندر و همکاران [13] به بررسی اثر نسبت منظری⁹ بر عملکرد روتور ساونوس پرداخته‌اند. با افزایش نسبت منظری، به دلیل اثرات نوک پره‌ها تلفات کمتر می‌شود. افزایش نسبت منظری اثری مشابه افزودن صفحات انتهایی دارد. منت و همکاران [14] تاثیر اضافه شدن محور¹⁰ بر عملکرد روتور ساونوس را مورد بررسی قرار دادند. وجود محور در توربین صلبیت آن را افزایش می‌دهد و از لحاظ سازه‌ای تاثیر مثبت دارد، ولی در توربین‌هایی با هم‌پوشانی مخالف صفر، محور از جریان یافتن هوا ممانعت می‌کند. بنابراین باید لقی بین پره‌ها بیشتر شود.

چن و همکاران [15] توربین سه پره ساونوس با قوس 180 درجه و محور مرکزی در نسبت‌های فاصله¹¹ مختلف برای سرعت‌های باد متفاوت را مورد تحلیل قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که سرعت باد اثر کمی بر ضریب

جهت جریان باد و نیمی از آن در جهت جریان در حال حرکت است. عامل اصلی تولید گشتاور در این توربین‌ها اختلاف بین ضریب پسی این دو نیمه است و به همین دلیل طراحی بهینه شکل پره روتور آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [2,1]. جهانمیری و همکاران [3] به بررسی ضخامت ایرفویل بر عملکرد توربین بادی محور عمودی با پره مستقیم پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیدند که ایرفویل NACA 0012 بهترین ضریب عملکرد را در محدوده نسبت سرعت نوک بیشتر از 4 را دارد.

علی‌رغم کمتر بودن ضریب توان روتور ساونوس نسبت به توربین‌های محور افقی و توربین داریوس، مزایای زیادی برای روتور ساونوس وجود دارد که در ذیل به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است: طراحی و ساخت ساده، قیمت ارزان، گشتاور راه‌اندازی بالا، عدم وابستگی به جهت باد، قابلیت استفاده در مناطق صحرایی و دور از شهر و در مقیاس‌های کوچک مانند شارژ باتری و هر نوع استفاده از ولتاژ DC، نصب ژنراتور در نزدیکی زمین، مشکلات سیستم انتقال قدرت کمتر، تعمیر و نگهداری آسانتر.

یکی از طراحی‌های بسیار رایج از توربین‌های محور قائم عمل‌کننده بر اساس نیروی پسا، روتورهای ساونوس¹ هستند که از دو پره نیمه استوان‌های با مقطع نیم دایره تشکیل شده‌اند. تاکنون مطالعات فراوانی بر روی منحنی روتورهای ساونوس به منظور کم کردن ضریب پسا هنگامی که در مقابل جهت باد حرکت می‌کند و افزایش ضریب پسا هنگامی که در جهت باد حرکت می‌کند، انجام شده است. از آن جمله می‌توان به کار بنش اشاره کرد که یک منحنی درجه 4 برای روتور پیشنهاد کرده است [4]. همچنین تلاش - های زیادی برای افزایش راندمان این توربین‌ها انجام شده و ایده‌های جدیدی نیز ارائه گردیده است. کیانی‌فر و همکاران [2] به بررسی اثر شکل پره بر عملکرد توربین ساونوس به صورت عددی و آزمایشگاهی پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیدند که در مجموع، پره‌های ساونوس متداول (نیمه استوان‌های با مقطع نیم دایره) با میزان هم‌پوشانی بدون بعد 0.2 (بدون بعد شده نسبت به وتر پره) بهترین راندمان را دارند. بورسین و همکاران [6,5] از یک تیغه محافظ² در مقابل روتور برای کاهش گشتاوری که بر روی قسمت محدب روتور که در حال دوران در جهت مخالف باد است، استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و نیز شبیه‌سازی عددی اثر وجود تیغه محافظ را بررسی کرده و طول بهینه تیغه محافظ را که می‌تواند سبب افزایش گشتاور ایستایی روتور شود بدست آوردند. آن‌ها نشان دادند که اگر پارامترهای تیغه درست انتخاب شوند، ضریب توان حداکثر از 16% به مقدار 38% افزایش می‌یابد.

ایرابو و همکاران [7] برای حفظ کردن روتورهای ساونوس از آسیب دیدن در سرعت‌های مختلف باد از جعبه راهنما³ استفاده کردند. این جعبه راهنما همچنین موجب افزایش سرعت دورانی و قدرت خروجی در سرعت های پایین باد می‌شود. امکان بسته شدن دیواره متحرک در صورت وقوع بادهای قوی به منظور جلوگیری از آسیب رسیدن به روتور وجود دارد. آن‌ها نشان دادند اگر ابعاد دیوار 1.4 برابر قطر روتور باشد و مساحت ورودی جعبه 0.43 برابر مساحت خروجی جعبه باشد، ضریب توان حداکثر به 1.23 برابر ضریب توان حداکثر روتور بدون جعبه راهنما افزایش می‌یابد.

سها و همکاران [8] پره‌های پیچی شکل⁴ در یک سیستم توربین سه پره را با پره‌های رایج بدون پیچش با مقطع نیم دایره مقایسه کردند. در طرح

⁵ Helical

⁶ Valve

⁷ Returning Blade

⁸ End Plates

⁹ Aspect Ratio

¹⁰ Shaft

¹¹ Gap ratio

¹ Savonius Rotors

² Curtain Plate

³ Guide Box

⁴ Twisted Blades

شده است.

2- معرفی توربین

پارامترهای مهم روتور 6 پره در "شکل 2" معرفی شده است. D قطر استوانه، R_c فاصله محور استوانه تا مرکز وتر پره کاملاً باز، R_t فاصله محور استوانه تا نوک پره کاملاً باز و θ زاویه چرخش می‌باشد. هر پره در هر دوره چرخش کامل، دو فرایند باز و بسته شدن را طی می‌کند. یانگ و لان [20] با استفاده از آنالیز تصاویر ضبط شده به کمک دوربین سرعت بالا در آزمایشگاه در سرعت‌های زاویه‌ای مختلف، مشخص کردند که فرایند باز شدن پره‌ها از 90 درجه شروع و در 120 درجه خاتمه می‌یابد و فرایند بسته شدن از زاویه 180 شروع و در زاویه 360 درجه به اتمام می‌رسد. زاویه بین مماس بر پره و استوانه در حالت کاملاً باز 120 درجه است. همچنین مشخص شد که فرایندهای باز و بسته شدن تقریباً مستقل از نسبت سرعت نوک پره می‌باشند. براساس این یافته‌ها موقعیت هر پره در یک سیکل برای روتورهای 6، 4 و 3 پره در "شکل‌های 3 تا 5" آورده شده است. یک سیکل چرخش برای روتور 6 پره 60 درجه و برای روتورهای 3 و 4 پره به ترتیب 120 و 90 درجه است.

3- روش انجام آزمایش

آزمایش‌ها در یک تونل باد به ابعاد 0.6×0.6 متر در آزمایشگاه سیالات دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است. "شکل 6" نمایی از این تونل باد به همراه مجموعه توربین را نشان می‌دهد. این تونل باد، سرعت باد تا 25 متر بر ثانیه را فراهم می‌کند. مجموعه توربین در فاصله 300 میلی‌متری از انتهای تونل باد و در خارج آن قرار گرفته است. دلیل قرار دادن توربین در خارج تونل رهایی

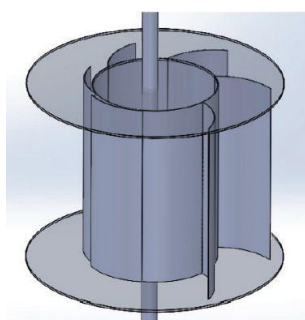


Fig. 1 A schematic of the rotor with 6 blades

شکل 1 تصویر شماتیک از روتور شش پره

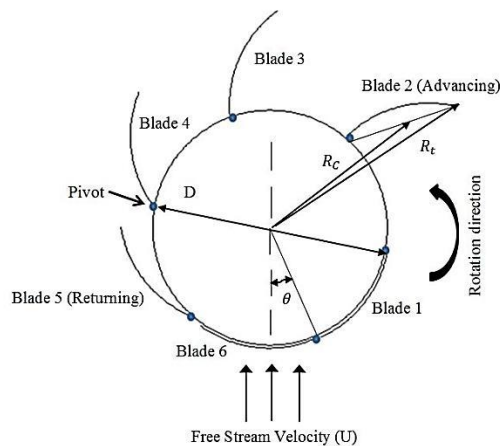


Fig. 2 Rotor parameters

شکل 2 پارامترهای روتور

گشتاور استاتیکی دارد. با این حال بازه زاویه سمتی¹ منفی کمتر می‌شود و با افزایش نسبت فاصله این بازه نیز افزایش می‌یابد. از این رو روتور سه پره ساونیوس، ضریب گشتاور استاتیکی منفی را حذف نمی‌کند ولی نمودارهای گشتاور نسبت به روتور دو پره هموارتر می‌شود.

هایاشی و همکاران [16] نتایج آنالیز آیرودینامیکی توربین ساونیوس رایج یک طبقه² 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. سوپر و همکاران [17] طرحی از توربین محور عمودی با حفره³ را برای کاربرد در مناطق شهری مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند با افزایش مساحت رو به روی باد، ضریب پسا افزایش می‌یابد. شاهیزار و همکاران [18] به بررسی اثر زاویه تیغه‌های راهنمای⁴ مستقل از جهت وزش باد بر عملکرد توربین‌های بادی محور عمودی پرداخته‌اند و با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی زوایای مناسب تیغه راهنما را محاسبه کردند و نشان دادند در نسبت سرعت نوک 0.745، توان خروجی 40.9% افزایش می‌یابد.

ریچی و همکاران [19] عملکرد آیرودینامیکی یک توربین بادی محور عمودی ساونیوس را به عنوان کاربرد در مناطق شهری و روشنایی معابر در اعداد رینولدز مختلف مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند وجود صفحات انتهایی و هم‌پوشانی، ضریب توان را افزایش در حالیکه وجود شبکه‌های خارجی و پست‌ها، اثرات منفی بر عملکرد روتور دارد. بهترین نتایج برای روتوری با زاویه پیچش 105 درجه و با در نظر گرفتن هم‌پوشانی و صفحات انتهایی بدست آمده است.

همانطور که اشاره شده علی‌رغم ضریب توان کم توربین ساونیوس، پژوهش‌های زیادی در این زمینه در طی سال‌ها انجام شده است. یکی از بزرگترین معایب توربین ساونیوس گشتاور منفی پره پشت به باد می‌باشد. به منظور رفع این مشکل و بهبود عملکرد آیرودینامیکی آن، طرح جدیدی به نام توربین آبی هانتز در سال 2011 توسط یانگ و لان [20] ارائه شده است. در این توربین از قابلیت جمع و باز شدن پره‌ها استفاده شده است. بدین صورت که پره‌های رو به باد به وسیله جریان باد باز می‌شوند و پره‌ها در سمت مخالف بوسیله جریان بسته می‌شوند و اجازه عبور جریان با کمترین مقاومت نسبت به استوانه را فراهم می‌کند. پره‌ها در محل استوانه لولا شده‌اند و گشتاور منفی پره بازگشتی به کمک همین قابلیت جمع و باز شدن پره‌ها حذف می‌شود.

عدم بررسی کامل پارامترهای هندسی و جریان بر روی این نوع توربین، زمینه پژوهش بیشتر در این حوزه را فراهم آورده است. در مقاله حاضر اثرات تعداد پره، عدد رینولدز و شدت آشفتگی و صفحات انتهایی بر عملکرد آیرودینامیکی این طرح جدید، به صورت آزمایشگاهی و عددی مطالعه شده است. آزمایشات در یک تونل باد زیر صوتی و شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت 12 و روش قاب متحرک در یک حوزه حل دو بعدی انجام شده است. در نظر گرفتن فرض دو بعدی توسط محققین مختلف از جمله الساندرو [21] بررسی شده است. آن‌ها نشان دادند که استفاده از صفحات انتهایی، رفتار سه بعدی جریان را محدود می‌کند، بنابراین می‌توان نتایج آزمایشگاهی را با نتایج عددی دو بعدی با دقت مناسبی مقایسه کرد [22-25]. در "شکل 1" شماتیک از این نوع توربین جدید نشان داده

¹ azimuth angle

² Stage

³ Cavity

⁴ Guide Vane

بین مقادیر نشان داده شده توسط نیروسنج‌ها. از حاصلضرب این نیرو در شعاع قرقره، مقدار گشتاور محاسبه می‌شود (دقت نیروسنج‌ها ± 1 نیوتن). شماتیکی از تجهیزات مورد استفاده در تعیین گشتاور در "شکل 7" ارائه شده است. سرعت باد با استفاده از یک بادسنج لوترون² با بازه اندازه‌گیری 0.8 تا 30 متر بر ثانیه و دقت اندازه‌گیری ± 0.1 متر بر ثانیه اندازه‌گیری شده است. همچنین اندازه‌گیری سرعت دورانی روتور با استفاده از دورسنج نوری کامپکت³ با بازه اندازه‌گیری 3 تا 99999 دور بر دقیقه و دقت اندازه‌گیری 0.05% انجام شده است. جنس توربین‌ها آهن گالوانیزه با ضخامت 0.4 میلی‌متر می‌باشد. روتورهای مورد آزمایش با تعداد پره 3، 4 و 6 در "شکل 8" نشان داده شده است و مشخصات هندسی روتورها در جدول 1 ارائه شده است.

تحلیل و بررسی عدم قطعیت‌ها برای تمام آزمایشات براساس تکنیک اغتشاشات متوالی⁴ [31,30] ارائه شده است. حداکثر مقادیر عدم قطعیت‌ها برای پارامترهای اصلی در جدول 2 آمده است.

جدول 1 پارامترهای هندسی توربین‌های تست شده

Table 1 Geometrical parameters of the tested turbines

D(mm)	H(mm)	Rt(mm)	نوع روتور
160	320	211	3 پره
160	320	193	4 پره
160	320	160	6 پره



Fig. 6 Experimental setup at Ferdowsi University of Mashhad

شکل 6 بستر آزمایشگاهی در دانشگاهی فردوسی مشهد

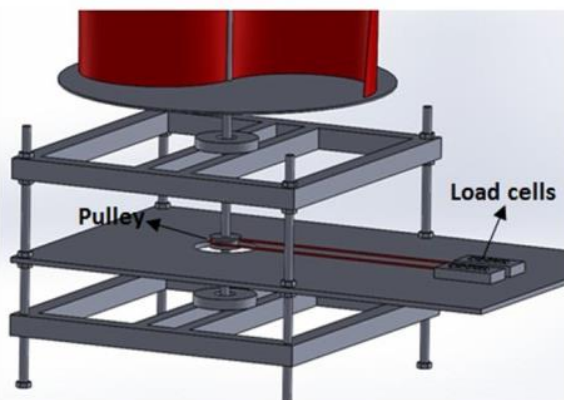


Fig. 7 A schematic of the pulley and load cells arrangement [29]

شکل 7 شماتیکی از تجهیزات نیروسنج و قرقره مورد استفاده

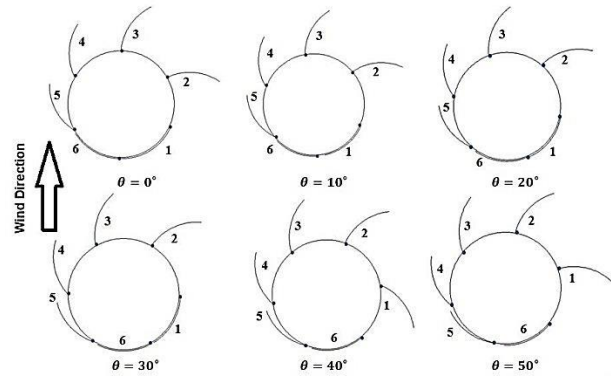


Fig. 3 Blade positions in a cycle of rotation for the 6-blade rotor

شکل 3 موقعیت پره‌ها در یک سیکل چرخش برای روتور شش پره

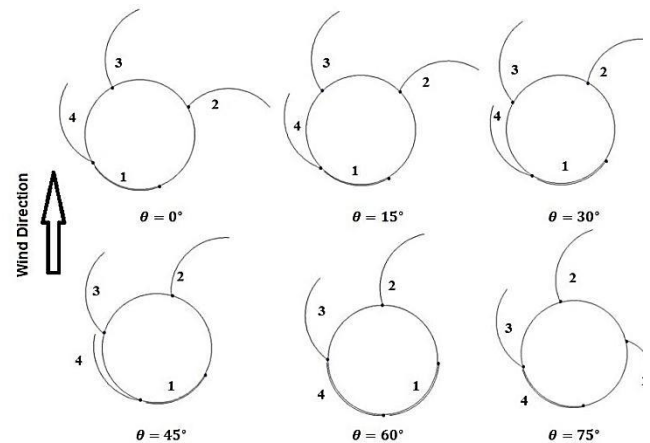


Fig. 4 Blade positions in a cycle of rotation for the 4-blade rotor.

شکل 4 موقعیت پره‌ها در یک سیکل چرخش برای روتور چهار پره

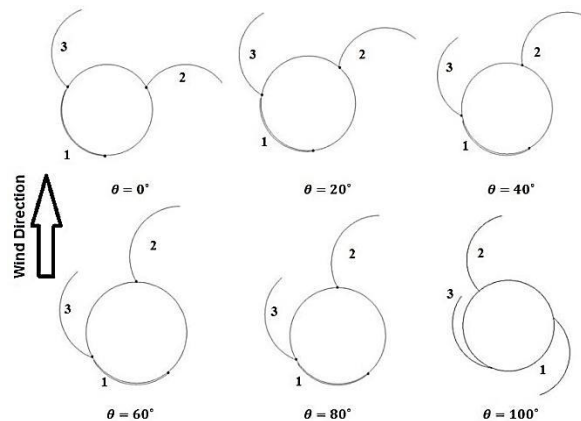


Fig. 5 Blade positions in a cycle of rotation for the 3-blade rotor

شکل 5 موقعیت پره‌ها در یک سیکل چرخش برای روتور سه پره

یافتن از مشکل نسبت گرفتگی¹ می‌باشد که صحت استفاده از این روش توسط محققین متعددی بررسی شده است [28-26].

گشتاور روتور با اعمال گشتاور ثابت و به کمک دو نیروسنج که به انتهای ریسمانی که به قرقره متصل است اندازه‌گیری می‌شود. محور و قرقره همزمان می‌چرخند در حالی که ریسمان ثابت است، در نتیجه یک نیروی اصطکاکی بین ریسمان و قرقره به وجود می‌آید. نیروی اصطکاکی برابر است با اختلاف

² Lutron AM-4200

³ Compact Instruments CT6/LSR

⁴ Sequential Perturbation Technique

¹ Blockage Ratio

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}_r \vec{v}) + \rho(\vec{\omega} \times \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{g} \quad (6)$$

$$\vec{v}_r = \vec{v} - \vec{u}_r \quad (7)$$

$$\vec{u}_r = \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (8)$$

$$\vec{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (9)$$

که در این معادلات v_r سرعت نسبی، v سرعت مطلق و u_r سرعت قاب متحرک می‌باشد.

در این مقاله برای مدلسازی آشفتگی از مدل کی امگا اس اس تی¹ استفاده شده است. مدل کی امگا اس اس تی، جزء مدل‌های دو معادله‌ای می‌باشد که در حقیقت ترکیبی از دو مدل کی امگا استاندارد² و مدل کی اپسیلون³ می‌باشد. مدل کی امگا اس اس تی به طور موثری از قدرت و دقت فرمولاسیون مدل کی امگا استاندارد در نزدیکی دیواره‌ها و همچنین از استقلال مدل کی اپسیلون از خواص آشفتگی جریان ورودی در دوردست بهره می‌برد. مدل کی امگا اس اس تی در دوردست مشابه با مدل کی اپسیلون رفتار می‌کند و به همین علت از مشکل مدل کی امگا استاندارد که به شدت به خواص آشفتگی جریان ورودی حساس است، رهایی پیدا کرده است. به همین دلیل مدل کی امگا اس اس تی نسبت به هر دو مدل کی امگا استاندارد و کی اپسیلون از عملکرد بهتری برخوردار است. توانمندی روش قاب متحرک به همراه مدل آشفتگی کی امگا اس اس تی در شبیه‌سازی توربین‌های محور عمودی توسط محققین مختلف بررسی شده است. مقایسه نتایج عددی آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی در شرایط مختلف نشان دهنده قابلیت این مدل در شبیه‌سازی توربین‌های بادی محور عمودی است [32-34]. شرایط مرزی برای معادله آشفتگی، شدت آشفتگی 1% و مقیاس طولی آشفتگی 0.6 متر در نظر گرفته شده است.

مدل دو بعدی از هریک از توربین‌ها در نرم‌افزار گمبیت ایجاد شده و با استفاده از سلول‌های مثلثی شبکه‌بندی شده است. استقلال نتایج از شبکه با مقایسه ضریب توان میانگین روتور 3 پره در نسبت سرعت نوک 0.5 مورد بررسی قرار گرفته است و بهترین شبکه از نظر دقت عددی و هزینه محاسباتی با 223000 سلول انتخاب شده است (جدول 3). فاصله متوسط بدون بعد اولین گره از دیواره (y^+) بستگی به نسبت سرعت نوک، موقعیت زاویه‌ای و تعداد پره‌های توربین دارد. برای تمام شبیه‌سازی‌های انجام شده در این مقاله مقدار y^+ از 1.47 تجاوز نمی‌کند. در "شکل 10" شبکه ایجاد شده برای یک نمونه از روتورها نشان داده شده است.

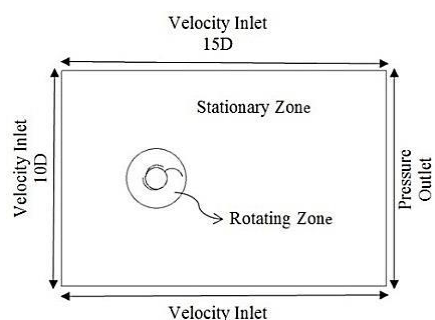


Fig. 9 The computational domain and the boundary conditions

شکل 9 دامنه حل محاسباتی و شرایط مرزی



Fig. 8 The rotors used for the experimental measurements of the current study

شکل 8 روتورهای مورد استفاده در اندازه‌گیری آزمایشگاهی در مقاله حاضر

جدول 2 عدم قطعیت پارامترهای اصلی

عدم قطعیت پارامتر (%)	عدم قطعیت پارامتر
1.18	سرعت باد
2.1	سرعت دورانی
0.18	قطر
2.8	نسبت سرعت نوک
4.6	ضریب گشتاور
5.1	ضریب توان

Table 2 Uncertainties in various basic parameters

4- روش حل عددی و معادلات حاکم

برای حل معادلات حاکم از نرم‌افزار تجاری انسیس فلونت 12 استفاده شده است [32]. پس از حل معادلات و مشخص شدن حوزه سرعت و فشار، گشتاور حاصله با استفاده از حاصلضرب انتگرال فشار روی پره در فاصله شعاعی از محور دوران پره محاسبه خواهد شد. در مقاله حاضر برای شبیه‌سازی نواحی متحرک و دورانی از روش قاب متحرک استفاده شده است که ناحیه روتور متحرک و نواحی بالادست و پایین‌دست آن ساکن بوده‌اند. معادلات حاکم بر جریان سیال در دو ناحیه چرخشی روتور و نواحی ساکن جداگانه حل می‌شوند [32]. اندازه محیط حل و شرایط مرزی در "شکل 9" ارائه شده است. شعاع ناحیه چرخشی روتور $1.05 R_t$ در نظر گرفته شده است. در محاسبات مربوط به توربین، پارامترهای اصلی نسبت سرعت نوک پره، ضریب توان، عدد رینولدز و ضریب گشتاور به ترتیب با استفاده از روابط زیر تعریف شده‌اند [20]:

$$TSR = \frac{\omega R_c}{U} \quad (1)$$

$$C_p = \frac{2T\omega}{\rho U^3 \left(R_t + \frac{D}{2} \right) H} \quad (2)$$

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (3)$$

$$C_M = \frac{2T}{\rho U^2 \left(R_t + \frac{D}{2} \right) H R_c} \quad (4)$$

که در آن‌ها U سرعت جریان، H ارتفاع توربین، T گشتاور اندازه‌گیری شده، ω سرعت دورانی روتور، TSR نسبت سرعت نوک، C_p ضریب توان و C_M ضریب گشتاور می‌باشد. معادلات حاکم دو بعدی برای به‌دست آوردن حوزه سرعت و فشار در نواحی اطراف روتور با توجه به روش قاب متحرک، معادلات پیوستگی و مومنوم هستند [32,23]:

$$\nabla \cdot \rho \vec{v}_r = 0 \quad (5)$$

¹ SST K- ω Model

² Standard K- ω Model

³ K- ϵ Model

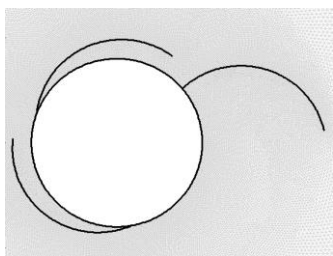


Fig. 10 The computational grid near the turbine blades

شکل 10 شبکه محاسباتی در نزدیکی پره‌های توربین

جدول 3 بررسی استقلال نتایج از شبکه

Table 3 Mesh independence study

شماره شبکه	تعداد المان شبکه	ضریب توان میانگین (روتور 3 پره) در TSR=0.5
1	105065	0.2405
2	223000	0.2255
3	357000	0.2215

نسبت سرعت نوک کاهش یافته، بدلیل آنکه با افزایش نرخ دوران، سرعت مماسی نوک پره‌ها از سرعت جریان بیشتر شده و سپس ممنوم از توربین به جریان هوا منتقل می‌شود و در نتیجه گشتاور روتور کاهش می‌یابد. همچنین افزایش تعداد پره، منجر به کاهش ضریب گشتاور می‌شود. دلیل این رفتار اینست که با افزایش تعداد پره، هر پره جریان هوایی را که بر روی پره بعدی تمرکز می‌کند را منحرف می‌کند. همانطور که مشخص است تطابق خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی برقرار است که می‌تواند تایید کننده صحت و دقت روش عددی بکارگرفته باشد. در "شکل 16" تغییرات ضریب توان میانگین روتورهای 3، 4 و 6 پره به صورت آزمایشگاهی و عددی ارائه شده است. با افزایش تعداد پره، سطح پره کوچکتر (در صورت استفاده از قطر استوانه برابر) و در نتیجه جذب انرژی باد کمتر صورت می‌گیرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش تعداد پره، ضریب توان بیشینه و نسبت سرعت نوک متناظر با آن، افزایش می‌یابد. همچنین بازه کاری توربین 3 پره در مقایسه با 4 و 6 پره بزرگتر می‌شود. مقایسه بین نتایج حاکی از تطابق قابل قبول بین نتایج عددی و آزمایشگاهی می‌باشد. یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر عملکرد توربین‌های بادی، شدت آشفته‌گی جریان می‌باشد که به نوعی کیفیت جریان هوای اطراف

5- نتایج

"شکل های 11 تا 13" کانتورهای فشار را برای روتورهای 6، 4 و 3 پره در شرایط ضریب توان حداکثر و سرعت باد 9 متر بر ثانیه و عدد رینولدز 9.9×10^4 نشان می‌دهند. یک سیکل چرخش برای روتور 6 پره 60 درجه است. در $\theta = 0^\circ$ (روتور 6 پره) پره‌های 1 و 6 بسته می‌باشند بنابراین هیچ نقشی در ایجاد گشتاور کلی بازی نمی‌کنند. پره‌های 4 و 5 در حال بسته شدن می‌باشند و نقش کمی در ایجاد گشتاور کلی ایفا می‌کنند. پره 2 و 3 کاملاً باز می‌باشد بنابراین نقش مهمی در تولید گشتاور کلی دارد، به نحوی که حدوداً 90% گشتاور کلی توسط این پره‌ها فراهم می‌شود. هنگامی که توربین 20 درجه می‌چرخد، پره‌های 1 و 6 همچنان بسته و پره‌های 3، 4 و 5 در حال بسته شدن می‌باشند. پره شماره 2 کاملاً باز می‌باشد با این تفاوت که در این موقعیت، عمود به جهت باد نیست، بنابراین سطح روبروی باد کاهش پیدا کرده و در نتیجه عملکرد آن تا حدودی تحت تاثیر قرار می‌گیرد. به همین منوال هنگامی که که توربین 40 درجه می‌چرخد، پره 1 کمی باز می‌شود و جریان روی پره 2 را تحت تاثیر قرار می‌دهد و گشتاور پره 2 کاهش می‌یابد. بنابراین اگرچه پره 2 در موقعیت کاملاً باز نگه داشته شده است ولی از میزان مشارکت آن در تولید گشتاور کلی کاسته می‌شود. در مورد روتورهای 4 و 3 پره نیز عملکرد مشابه در پره‌ها رخ می‌دهد. یک سیکل چرخش برای روتورهای 4 و 3 پره به ترتیب 90 و 120 درجه است. اگرچه با کاهش تعداد پره (با فرض قطر دارم یکسان)، تعداد پره‌های کاملاً باز در یک دوره چرخش کاهش می‌یابد ولی سطح پره به نیم دایره نزدیک می‌شود که مقادیر بیشتری از ضریب پسا را دارا می‌باشد [10]. "شکل 14" تغییرات ضریب گشتاور کل را در یک دوره چرخش کامل برای روتورهای 3، 4 و 6 پره برحسب موقعیت زاویه‌ای نشان می‌دهد. همانطور که مشخص می‌باشد با افزایش تعداد پره، علی‌رغم کاهش ضریب توان، دامنه نوسانات گشتاور کاهش می‌یابد. با توجه به "شکل 14" مشخص می‌شود که در هیچ یک از موقعیت‌های زاویه‌ای ضریب گشتاور کلی منفی نمی‌شود و این یکی از مهمترین مزیت‌های توربین مورد مطالعه می‌باشد.

در "شکل 15" نتایج آزمایشگاهی و عددی تغییرات ضریب گشتاور میانگین روتورهای 3، 4 و 6 پره ارائه شده است. ضریب گشتاور با افزایش

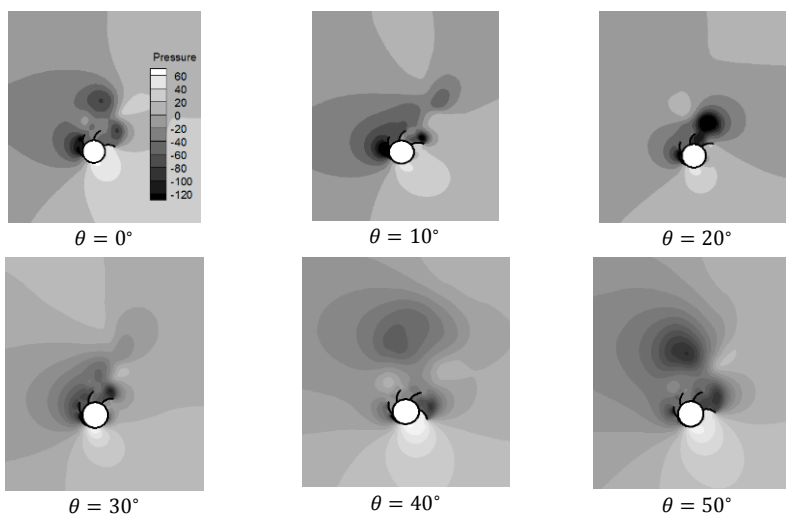


Fig. 11 Pressure contours (Pascal) for the 6-blade rotor at TSR=0.4, for various rotor angular position

شکل 11 کانتورهای فشار (پاسکال) برای روتور 6 پره در نسبت سرعت نوک 0.4 برای موقعیت‌های زاویه‌ای مختلف

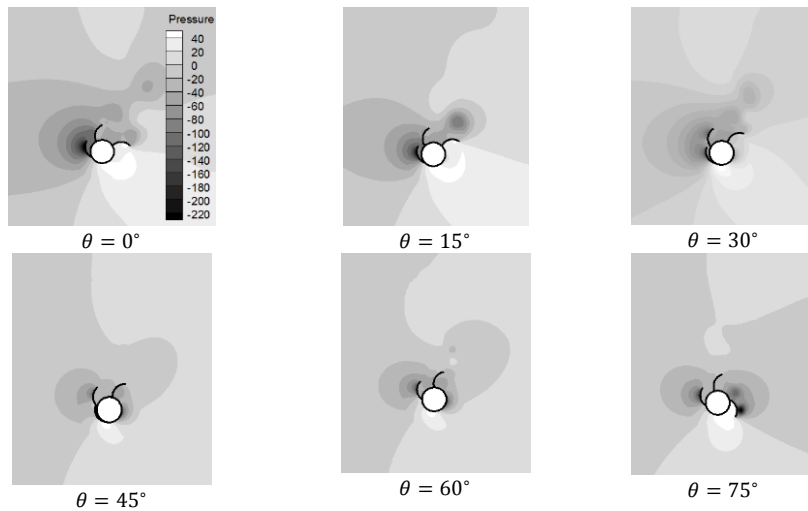


Fig. 12 Pressure contours (Pascal) for the 4-blade rotor at TSR=0.5, for various rotor angular position
 شکل 12 کانتورهای فشار (پاسکال) برای روتور 4 پره در نسبت سرعت نوک 0.5 برای موقعیت‌های زاویه‌ای مختلف

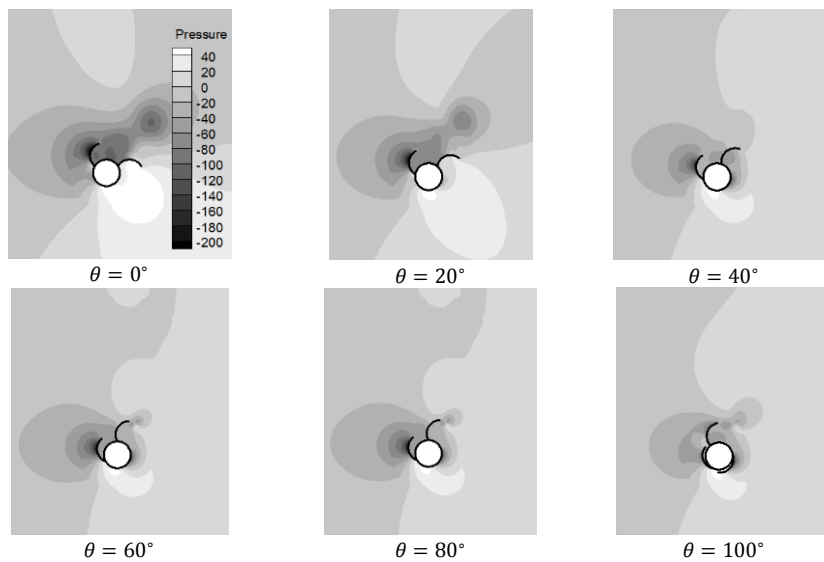


Fig. 13 Pressure contours (Pascal) for the 3-blade rotor at TSR=0.5, for various rotor angular position
 شکل 13 کانتورهای فشار (پاسکال) برای روتور 3 پره در نسبت سرعت نوک 0.5 برای موقعیت‌های زاویه‌ای مختلف

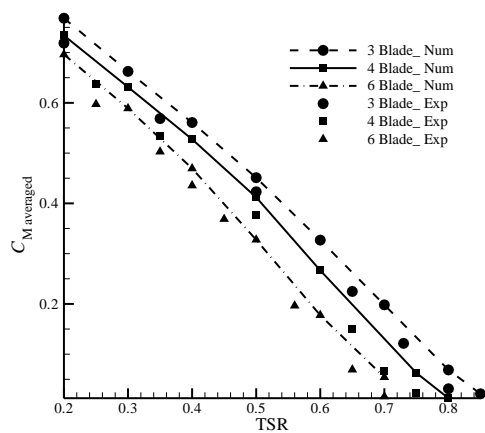


Fig.15 Numerical averaged torque coefficients, $C_{M \text{ averaged}}$, as a function of TSR, in comparison with the experimental data for the rotors with different number of blades

شکل 15 مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی ضریب گشتاور میانگین به عنوان تابعی از نسبت سرعت نوک برای روتورهایی با تعداد پره مختلف

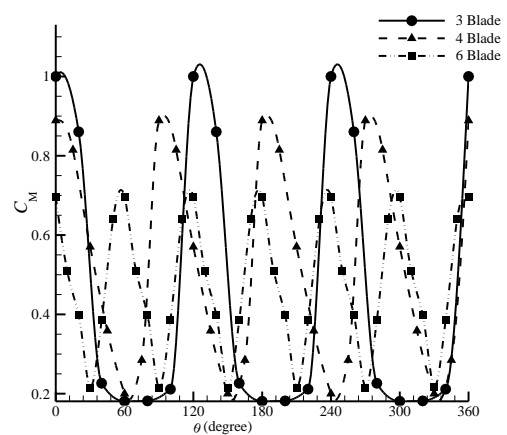


Fig. 14 The variations of the numerical total torque coefficients, for the rotors with various number of blades, in one complete rotor revolution at TSR=0.4

شکل 14 تغییرات عددی ضریب گشتاور کل برای روتورهایی با تعداد پره مختلف در یک دوره چرخش کامل در نسبت سرعت نوک 0.4

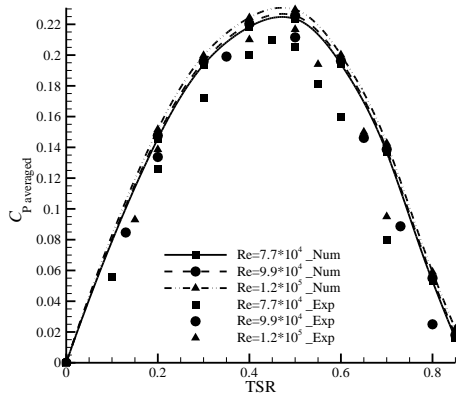


Fig. 18 Comparison of the numerical averaged power coefficients, $C_{P_{averaged}}$, with the experimental data, for the 3-bladed rotor at various Reynolds numbers

شکل 18 مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی ضریب توان میانگین برای روتور 3 پره در اعداد رینولدز مختلف

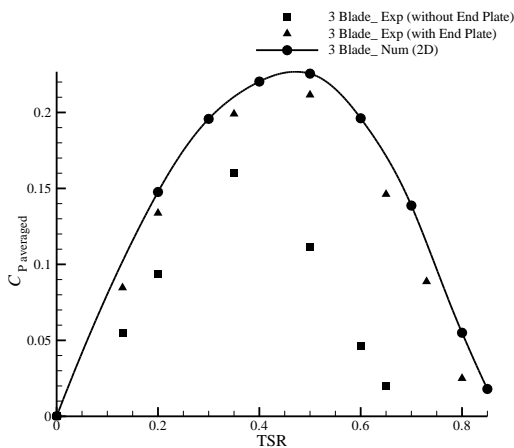


Fig. 19 Influence of End Plates on the averaged power coefficients, $C_{P_{averaged}}$, for the 3-bladed rotor

شکل 19 تاثیر صفحات انتهایی بر ضریب توان میانگین برای روتور 3 پره

و باز شونده ارائه شده است. در مقاله حاضر عملکرد آپرودینامیکی توربین مذکور با نتایج تست آزمایشگاهی مقایسه شده است. آزمایش‌ها در یک تونل باد زیرصوت در آزمایشگاه سیالات دانشگاه فردوسی مشهد و شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت 12 و با استفاده از روش قاب متحرک انجام شده است. نتایج عددی هم‌خوانی قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی با خطایی کمتر از 12% دارند. در مقاله حاضر اثرات تعداد پره، عدد رینولدز، شدت آشفتگی و صفحات انتهایی بررسی شده است و نتایج حاصله به‌طور خلاصه در این بخش ارائه شده است:

- ✓ این طرح جدید در یک دوره کامل چرخش، گشتاور منفی ندارد و توربین سه پره بهترین عملکرد آپرودینامیکی را با بیشینه ضریب توان 0.21 در نسبت سرعت نوک 0.5 دارد.
- ✓ اگرچه با افزایش تعداد پره، نوسانات گشتاور کاهش می‌یابد ولی ضریب توان میانگین نیز کاهش می‌یابد.
- ✓ محدوده کاری توربین (نسبت سرعت نوک) برای توربین سه پره بزرگتر است از این محدوده برای توربین‌های 4 و 6 پره.
- ✓ در محدوده عدد رینولدز مورد مطالعه در این مقاله، عدد رینولدز اثر مهمی بر ضریب توان میانگین ندارد.

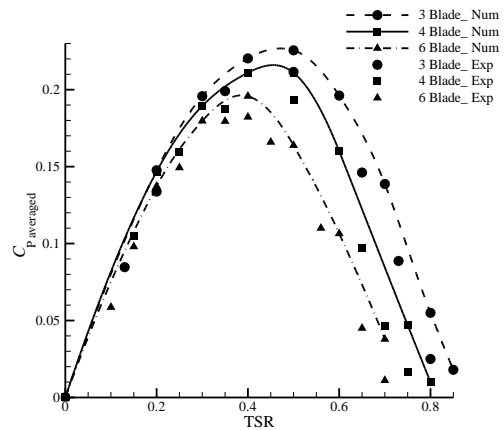


Fig. 16 Comparison of the numerical averaged power coefficients, $C_{P_{averaged}}$, with the experimental data, for the rotors with different number of blades

شکل 16 مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی ضریب توان میانگین به عنوان تابعی از نسبت سرعت نوک برای روتورهایی با تعداد پره مختلف

توربین را مشخص می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که کیفیت پایین جریان هوا یا جریان آشفته، ضریب توان میانگین را کاهش می‌دهد (شکل 17). تاثیر عدد رینولدز بر عملکرد آپرودینامیکی روتور 3 پره، به صورت عددی و آزمایشگاهی در "شکل 18" نشان داده شده است. افزایش عدد رینولدز در بازه تغییرات مورد بررسی 7.7×10^4 تا 1.2×10^5 تاثیر چندانی بر عملکرد روتور ندارد و فقط ضریب توان را به میزان خیلی کم افزایش می‌دهد. تغییر عدد رینولدز با تغییر سرعت جریان آزاد در آزمایشگاه انجام شده است. تطابق نتایج عددی و آزمایشگاهی درستی این مطلب را تایید می‌کند. در "شکل 19" اثر وجود صفحات انتهایی بر ضریب توان بررسی شده است. اضافه شدن صفحات انتهایی از فرار جریان هوا از سطح پره مقعر جلوگیری کرده و اختلاف فشار بین دو سطح پره را افزایش می‌دهد و در نتیجه منجر به بهبود عملکرد توربین می‌شود. نتایج شبیه‌سازی دو بعدی تطابق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی با وجود صفحات انتهایی دارد.

6- نتیجه‌گیری

به منظور حذف گشتاور منفی پره‌های پشت به باد در توربین‌های محور عمودی عمل‌کننده براساس نیروی پسا، طرح جدیدی با قابلیت پره‌های جمع

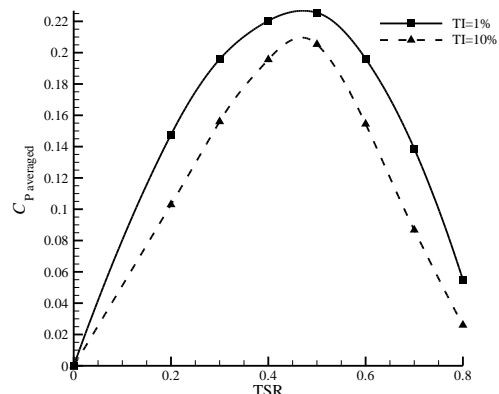


Fig. 17 Influence of Turbulence Intensity on the averaged power coefficient for rotor with 3 blades

شکل 17 تاثیر شدت آشفتگی بر ضریب توان میانگین روتور 3 پره

- Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 96, No. 8-9, pp. 1359-1375, 8, 2008.
- [9] M. A. Kamoji, S. B. Kedare, S. V. Prabhu, Performance tests on helical Savonius rotors, *Renewable Energy*, Vol. 34, No. 3, pp. 521-529, 3, 2009.
- [10] J. V. Akwa, H. A. Vielmo, A. P. Petry, A review on the performance of Savonius wind turbines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 5, pp. 3054-3064, 6, 2012.
- [11] M. Amiri, M. Kahrom, A. Kianifar, Numerical and experimental investigation on effects of the rotor structure on the performance of Savonius vertical axis wind turbine, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 123-131, 2015 (in persian فارسی).
- [12] C. Kang, H. Liu, X. Yang, Review of fluid dynamics aspects of Savonius-rotor-based vertical-axis wind rotors, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 33, No. 0, pp. 499-508, 5, 2014.
- [13] A. J. Alexander, B. P. Holownia, Wind tunnel tests on a savonius rotor, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 3, No. 4, pp. 343-351, 1978.
- [14] J. L. Menet, N. Bourabaa, increase in the savonius rotors efficiency via a parametric investigation, Sandia Laboratories, Albuquerque, New Mexico, 1977. http://educyclopedia.karadimov.info/library/23_1400_jeanlucmenet_01.pdf.
- [15] L. Chen, J. Chen, H. Xu, H. Yang, C. Ye, D. Liu, Wind tunnel investigation on the two- and three-blade Savonius rotor with central shaft at different gap ratio, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 8, No. 1, pp. 013303, 2016.
- [16] T. Hayashi, Y. Li, Y. Hara, K. Suzuki, Wind Tunnel Tests on a Different Phase Three-Stage Savonius Rotor, *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, Vol. 48, pp. 9-16, 2005.
- [17] K. Suffer, R. Usubamatov, G. Quadir, K. Ismail, Modeling and numerical simulation of a vertical axis wind turbine having cavity vanes, *Fifth International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation*, USA, 27-29 Jan, 2014.
- [18] B. Shahizare, N. Nik-Ghazali, W. T. Chong, S. Tabatabaeikia, N. Izadyar, A. Esmailzadeh, Novel investigation of the different Omni-direction-guide-vane angle effects on the urban vertical axis wind turbine output power via three-dimensional numerical simulation, *Energy Conversion and Management*, Vol. 117, pp. 206-217, 2016.
- [19] R. Ricci, R. Romagnoli, S. Montelpare, D. Vitali, Experimental study on a Savonius wind rotor for street lighting systems, *Applied Energy*, Vol. 161, pp. 143-152, 2016.
- [20] B. Yang, C. Lawn, Fluid dynamic performance of a vertical axis turbine for tidal currents, *Renewable Energy*, Vol. 36, No. 12, pp. 3355-3366, 12, 2011.
- [21] V. D'Alessandro, S. Montelpare, R. Ricci, A. Secchiaroli, Unsteady Aerodynamics of a Savonius wind rotor: a new computational approach for the simulation of energy performance, *Energy*, Vol. 35, No. 8, pp. 3349-3363, 8, 2010.
- [22] M. H. Nasef, W. A. El-Askary, A. A. AbdEl-hamid, H. E. Gad, Evaluation of Savonius rotor performance: Static and dynamic studies, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 123, Part A, No. 0, pp. 1-11, 12, 2013.
- [23] W. A. El-Askary, M. H. Nasef, A. A. AbdEl-hamid, H. E. Gad, Harvesting wind energy for improving performance of Savonius rotor, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 139, No. 0, pp. 8-15, 4, 2015.
- [24] B. Emmanuel, W. Jun, Numerical Study of a Six-Bladed Savonius Wind Turbine, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 133, No. 4, pp. 044503-044503, 2011.
- [25] M. Torresi, B. Fortunato, G. Pascazio, S. M. Camporeale, CFD Analysis of a Savonius Rotor in a Confined Test Section and in Open Field, Vol. 1, *Aircraft Engine; Ceramics; Coal, Biomass and Alternative Fuels; Wind Turbine Technology*, Vancouver, British Columbia, Canada, June 6-10, 2011.
- [26] S. Roy, U. K. Saha, Wind tunnel experiments of a newly developed two-bladed Savonius-style wind turbine, *Applied Energy*, Vol. 137, No. 0, pp. 117-125, 2015.
- [27] N. H. Mahmoud, A. A. El-Haroun, E. Wahba, M. H. Nasef, An experimental study on improvement of Savonius rotor performance, *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 51, No. 1, pp. 19-25, 3, 2012.
- ✓ کیفیت پایین جریان هوا یا جریان آشفته، ضریب توان میانگین را کاهش می‌دهد.
- ✓ افزودن صفحات انتهایی از فرار جریان هوا از سطح پره مقعر جلوگیری کرده و در نتیجه منجر به بهبود عملکرد توربین می‌شود.

7- فهرست علائم

C_M	ضریب گشتاور
C_P	ضریب توان
D	قطر استوانه (mm)
g	شتاب گرانش (ms^{-2})
H	ارتفاع روتور (mm)
I	تانسور یکه
ρ	فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)
R_c	فاصله محور استوانه تا مرکز وتر پره کاملاً باز (mm)
R_t	فاصله محور استوانه تا نوک پره کاملاً باز (mm)
Re	عدد رینولدز
T	گشتاور (Nm)
TSR	نسبت سرعت نوک
U	سرعت جریان (ms^{-1})
u_r	سرعت قاب متحرک (ms^{-1})
v	سرعت مطلق (ms^{-1})
v_r	سرعت نسبی (ms^{-1})
y^+	فاصله متوسط بدون بعد اولین گره از دیواره
θ	زاویه چرخش (degree)
μ	لزجت دینامیکی (Pas)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
$\bar{\tau}$	تانسور تنش ($kgm^{-1}s^{-2}$)
ω	سرعت دورانی ($rad s^{-1}$)

8 - مراجع

- [1] T. Zhipeng, Y. Yingxue, Z. Liang, Y. Bowen, A review on the new structure of Savonius wind turbines, *Advanced Materials Research*, Vol. 608, pp. 467-478, 2013.
- [2] A. Kianifar, M. Anbarsooz, Blade curve influences on the performance of Savonius rotors: Experimental and numerical, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, Vol. 225, pp. 343-350, 2011.
- [3] M. Jahanmiri, A. Shoostaryrezvany, M. Nirooei, A computational study of the effect of blade thickness on performance of vertical axis wind turbine, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, Vol. 13, No. 5, pp. 57-65, 2016.
- [4] F. Wenhenubun, A. Saputra, H. Sutanto, An experimental study on the performance of savonius wind turbines related with the number of blades, *Energy Procedia*, Vol. 68, pp. 297-304, 4, 2015.
- [5] B. D. Altan, M. Atilgan, An experimental and numerical study on the improvement of the performance of Savonius wind rotor, *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, No. 12, pp. 3425-3432, 12, 2008.
- [6] B. D. Altan, M. Atilgan, The use of a curtain design to increase the performance level of a Savonius wind rotors, *Renewable Energy*, Vol. 35, No. 4, pp. 821-829, 4, 2010.
- [7] K. Irabu, J. N. Roy, Characteristics of wind power on Savonius rotor using a guide-box tunnel, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32, No. 2, pp. 580-586, 11, 2007.
- [8] U. K. Saha, S. Thotla, D. Maity, Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments, *Journal of Wind*

- [31] R. J. Moffat, Describing the uncertainties in experimental results, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 1, No. 1, pp. 3-17, 1, 1988.
- [32] A. Inc., ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide: ANSYS, Inc., 2009; <http://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent>.
- [33] K. Pope, V. Rodrigues, R. Doyle, A. Tsopelas, R. Gravelins, G. F. Naterer, E. Tsang, Effects of stator vanes on power coefficients of a zephyr vertical axis wind turbine, *Renewable Energy*, Vol. 35, No. 5, pp. 1043-1051, 5, 2010.
- [34] R. Lanzafame, S. Mauro, M. Messina, 2D CFD Modeling of H-Darrieus Wind Turbines Using a Transition Turbulence Model, *Energy Procedia*, Vol. 45, pp. 131-140, 2014.
- [28] S. Roy, U. K. Saha, An adapted blockage factor correlation approach in wind tunnel experiments of a Savonius-style wind turbine, *Energy Conversion and Management*, Vol. 86, No. 0, pp. 418-427, 10, 2014.
- [29] M. Anbarsooz, Aerodynamic performance of helical Savonius wind rotors with 30° and 45° twist angles: Experimental and numerical studies, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: *Journal of Power and Energy*, May 10, 2016, 2016.
- [30] R. J. Moffat, Contributions to the Theory of Single-Sample Uncertainty Analysis, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 104, No. 2, pp. 250-258, 1982.