



Effect of Overlapping Size on the Performance of the Savonius Wind Turbine, in Both Conventional and the Bach-Type Models

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Hassanzadeh R.^{*1} PhD,
Mohammad Nejad M.¹ MSc

How to cite this article

Hassanzadeh R, Mohammad Nejad M. Effect of Overlapping Size on the Performance of the Savonius Wind Turbine, in Both Conventional and the Bach-Type Models. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(11):2599-2606.

ABSTRACT

In the present research, the effects of the internal overlap ratio on the performance of a two-blade vertical axis Savonius wind turbine is investigated using numerical simulation. Considerations are performed on both conventional and Bach-type rotors. For this purpose, the power characteristics of the wind turbine are examined under tip speed ratios ranging from 0.2 to 1.2 and wind speeds of 3, 5, and 7 m/s. In order to capture the turbulence characteristics, SST k- ω model is used and the obtained results are validated against the available data in the open literature. The instantaneous behavior of flow and the time-averaged data are presented for both conventional and Bach-type rotors. The obtained results of the research reveal that for all tip speed ratios and wind speeds, the optimum overlap ratio for conventional and Bach types rotors, respectively. On the other hand, regardless of the wind speed and overlap ratio, the maximum power coefficients are obtained in tip speed ratios of 0.8 and 0.7 for conventional and Bach-type rotors, respectively. Finally, it is found that in all tip speed and overlap ratios, in both rotors, the power coefficient increases with increasing the wind speed.

Keywords Savonius Wind Turbine; Conventional and Bach-Type Models; Internal Overlap; Torque Coefficient; Power Coefficient

¹Mechanical Engineering Faculty, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, Urmia University of Technology, Band Avenue, Urmia, Iran-
Phone: +98 (44) 33980238
Fax: +98 (44) 31980251
r.hassanzadeh@uut.ac.ir

Article History

Received: September 15, 2018

Accepted: May 21, 2019

ePublished: November 2, 2019

CITATION LINKS

[1] The S-rotor and its application [2] Optimization of the helical Savonius rotor through wind tunnel experiments [3] An innovative configuration for new marine current turbine [4] CFD study of Savonius wind turbine: 3D model validation and parametric analysis [5] Numerical investigation of conventional and modified Savonius wind turbines [6] Numerical and experimental investigation on effects of the primary and secondary overlaps on the performance of Savonius wind turbine [7] Parametric numerical study of Savonius wind turbine interaction in a linear array [8] Comparative critique on the design parameters and their effect on the performance of S-rotor [9] Unsteady analysis on the instantaneous forces and moment arms acting on a novel Savonius-style wind turbine [10] Effects of end plates with various shapes and sizes on helical Savonius wind turbines [11] Performance improvement of Savonius rotor using multiple quarter blades – A CFD investigation [12] A novel wake energy reuse method to optimize the layout for Savonius-type vertical axis wind turbines [13] Development of efficient vertical axis wind turbine clustered farms [14] An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades [15] Experimental comparison study for Savonius wind turbine of two & three blades at low wind speed [16] Flow physics analysis of three-bucket helical Savonius rotor at 90° twist angle using CFD [17] Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments [18] Wind tunnel experiments of a newly developed two-bladed Savonius-style wind turbine [19] Effect of twist angle on the performance of Savonius wind turbine [20] Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [21] Performance study of ducted nozzle Savonius water turbine, comparison with conventional Savonius turbine [22] Wind tunnel performance data for two- and three-bucket Savonius rotors

تاثیر اندازه هم‌پوشانی بر عملکرد توربین بادی محور عمودی ساونیوس در دو مدل متعارف و باخ

رحیم حسن‌زاده* PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

میلاد محمدنژاد MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

در این پژوهش، با استفاده از شبیه‌سازی عددی، به بررسی تاثیر هم‌پوشانی داخلی بر عملکرد توربین بادی محور عمودی دوپره ساونیوس پرداخته می‌شود. روتور دنظرگرفته‌شده در دو نوع متعارف و باخ است. به این منظور مشخصه‌های توان توربین بادی در محدوده نسبت سرعت نوک پره از ۰/۲ تا ۱/۲ و سرعت باد ۳، ۵ و ۷ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی مشخصه‌های آشفستگی، مدل SST k- ω مورد استفاده قرار گرفته است و نتایج به‌دست آمده با داده‌های موجود در ادبیات فن اعتبارسنجی شده‌اند. رفتار لحظه‌ای جریان و داده‌های متوسط زمانی برای دو روتور مورد نظر یعنی نوع متعارف و نوع باخ ارائه شده‌اند. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که به ازای کلیه مقادیر سرعت نوک پره و سرعت باد، مقدار بهینه هم‌پوشانی به ترتیب برای روتورهای نوع متعارف و نوع باخ برابر ۰/۲ و ۰/۱ است. از طرفی، حداکثر ضریب توان روتور متعارف و باخ، بدون توجه به مقدار سرعت باد و نسبت هم‌پوشانی، به ترتیب در نسبت سرعت نوک پره ۰/۸ و ۰/۷ حاصل می‌شود. نهایتاً، مشخص شد که به ازای هر مقدار نسبت سرعت نوک پره و نسبت هم‌پوشانی در هر دونوع روتور، مقدار ضریب توان با افزایش سرعت باد افزایش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: توربین بادی ساونیوس، مدل متعارف و باخ، هم‌پوشانی داخلی، ضریب گشتاور، ضریب توان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۶/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۳۱

*نویسنده مسئول: r.hassanzadeh@uut.ac.ir

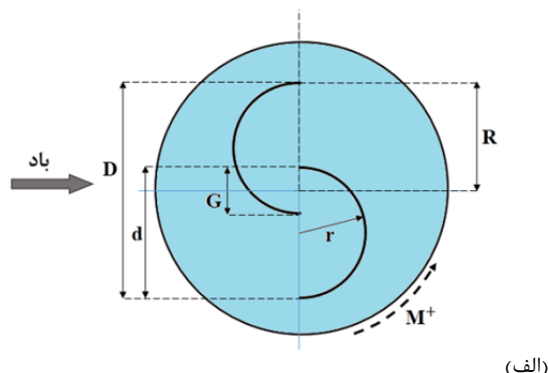
۱- مقدمه

انرژی باد از جمله منابع انرژی تجدیدپذیری است که از آن برای تولید انرژی الکتریسیته در مناطق شهری و برای کاربرد خانگی استفاده می‌شود. این انرژی به دلیل عدم آلودگی و هزینه کم همواره مورد توجه بوده است. برای استحصال هرچه بیشتر انرژی، مطالعات فراوانی روی توربین‌ها در اشکال مختلف انجام گرفته است. برای استفاده از انرژی باد، می‌بایست از توربین‌های بادی در شرایط جوی مختلف استفاده شود که از جمله آن می‌توان به شرایط جوی حاکم بر شهرها که سرعت جریان هوا کم بوده و جریان متلاطم می‌باشد، اشاره کرد.

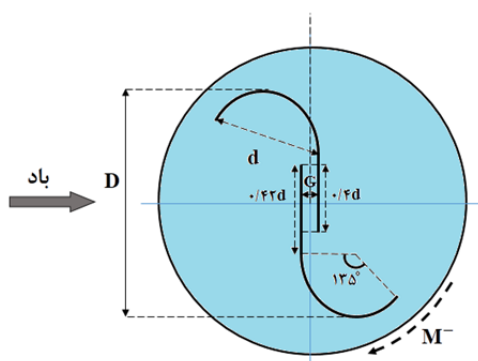
توربین‌های بادی را می‌توان به دو نوع توربین بادی محور افقی و توربین بادی محور عمودی تقسیم نمود. توربین بادی محور عمودی خود به دو نوع ساونیوس و داریوس تقسیم می‌شود. تفاوت میان دو توربین در نحوه عملکرد آن نسبت به نیروی وارد شده از سوی جریان باد بر پره‌های آنها می‌باشد. عملکرد توربین بادی ساونیوس به نیروی پسا و توربین بادی داریوس به نیروی برآ ناشی از جریان باد وابسته می‌باشد. توربین بادی ساونیوس اولین بار توسط یک مهندس فنلاندی به نام ساونیوس در سال ۱۹۲۹ معرفی شد^[۱]. از ویژگی‌های این نوع توربین‌ها حساسیت‌نداشتن به جهت وزش باد، آشفستگی جریان و تولید گشتاور می‌باشد. در خصوص عملکرد توربین بادی ساونیوس مطالعات متعددی صورت گرفته است. تاثیر آیرودینامیک و تعداد پره‌های استفاده‌شده بر عملکرد توربین بادی ساونیوس، بررسی عملکرد این نوع توربین در سرعت‌های باد متفاوت و غیره از جمله زمینه‌های مطالعاتی محققین می‌باشد که

در ادامه به چند مورد از این مطالعات اشاره خواهد شد. داماک و همکاران^[۲] توربین بادی ساونیوس نوع حلزونی، نوع باخ و ترکیبی از این دو را به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی نمودند. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از عملکرد بالای توربین ترکیبی نسبت به دو نوع دیگر بود. ماکزیمم ضریب توان در نوع ترکیبی ۰/۲ گزارش شد. در مطالعه‌ای دیگر، حسن‌زاده و همکاران^[۳] با ایجاد تغییراتی در شکل آیرودینامیک پره‌های توربین بادی ساونیوس، بازده توربین را به مقدار ۵۲٪ بهبود دادند. مطالعه آنها به صورت عددی و آزمایشگاهی انجام شد و مطالعه عددی صورت‌گرفته، به صورت دوبعدی انجام گردید. نتایج به‌دست‌آمده از طراحی جدید پره‌های توربین را با مدل متعارف مقایسه نمودند. شکل جدید پره‌ها، ضریب توانی برابر با ۰/۳۲۱ را تولید می‌کند در حالی که ضریب توان توربین از نوع متعارف برابر با ۰/۲۱ گزارش شد. فراری و همکاران^[۴] آیرودینامیک پره‌های توربین بادی ساونیوس را به صورت دو و سه‌بعدی و در رینولدز 4×10^5 مورد مطالعه عددی قرار دادند. سپس، نتایج به‌دست‌آمده را با نتایج آزمایشگاهی ارائه‌شده توسط بلکول مقایسه کرده و تطابق بسیار خوبی را مشاهده نمودند. آنها گزارش دادند که ماکزیمم ضریب توان حاصل از عملکرد توربین بادی ساونیوس مورد بررسی در نسبت سرعت نوک پره ۰/۸ و برابر با ۰/۲۰۲ رخ می‌دهد. در مطالعه‌ای دیگر، کاسپرژاک و همکاران^[۵] چندین نوع توربین بادی ساونیوس متفاوت را به صورت دوبعدی در رینولدزهای متفاوت شبیه‌سازی نمودند و نتایج مطالعه صورت‌گرفته را در حالت جریان آشفته و جریان گذرا ارائه نمودند. امیری و همکاران^[۶] تاثیر هم‌پوشانی اولیه و ثانویه بر عملکرد توربین بادی ساونیوس را به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بیشترین ضریب توان در مقدار هم‌پوشانی اولیه برابر با ۰/۲ روی می‌دهد و همچنین، نسبت هم‌پوشانی ثانویه داخلی و خارجی، تاثیری منفی بر عملکرد توربین بادی ساونیوس دارد. مریو و همکاران^[۷] مزرعه‌ای بادی را با استفاده از توربین بادی ساونیوس ایجاد نمودند. شبیه‌سازی آنها به صورت عددی در سه حالت دوبعدی، سه‌بعدی و آزمایشگاهی صورت پذیرفت. نتایج بیانگر این بود که افزایش فاصله میان توربین‌های به کار گرفته‌شده، عملکرد توربین‌ها را کاهش می‌دهد و افزایش تعداد پره‌ها در هر توربین تاثیری مثبت بر عملکرد کل دارد. الکاییم و همکاران^[۸] از شبیه‌سازی عددی برای بهبود عملکرد توربین بادی ساونیوس نوع اس-روتور، استفاده نمودند. آنها نفوذ باد، تغییر پروفیل روی پره و تنظیم غلظت جریان بر عملکرد آن را مورد بررسی قرار دادند. آنها توانستند مقدار متوسط ضریب توان را از ۰/۳۷ به ۰/۳۷ رسانند که مقداری قابل توجه می‌باشد. روی و داکوین^[۹] توربین بادی ساونیوس با پره‌هایی با شکل آیرودینامیکی جدید را به صورت عددی شبیه‌سازی کرده و با مدل متعارف مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که عملکرد توربین با شکل آیرودینامیکی جدید دارای عملکرد بالاتری نسبت به نوع متعارف می‌باشد. جنون و همکاران^[۱۰] در آزمایشگاه، تاثیر استفاده از انسدادکننده‌های مختلف در بالا و پایین پره‌های توربین بادی حلزونی را مورد بررسی قرار دادند. استفاده از انسدادکننده در بهترین حالت، ضریب توان را نسبت به حالتی که هیچ انسدادکننده‌ای وجود نداشت، ۳۶٪ بهبود بخشید. شارما و کومارشارما^[۱۱] روتور توربین بادی محور عمودی ساونیوس نوع متعارف و چندتکه را به صورت عددی شبیه‌سازی نموده و نتایج حاصل را با یکدیگر مقایسه نمودند. نتایج نشان داد عملکرد توربین بادی ساونیوس چندتکه ۱۳/۶۹٪ بیشتر از نوع دیگر می‌باشد. ژانگ و همکاران^[۱۲] با

است. در شکل ۱ قسمت الف، نمایی کلی از توربین بادی ساونیوس مدل متعارف و شکل ۱ قسمت ب، نیز توربین بادی ساونیوس از مدل باخ نشان داده شده است. ابعاد هندسی روتور مورد نظر مطابق با مقاله آزمایشگاهی روی و ساها^[18] می‌باشد و جزئیات آن در جدول ۱ آورده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱) شماتیک توربین بادی ساونیوس الف) مدل متعارف، ب) مدل باخ

جدول ۱) ابعاد هندسی توربین بادی ساونیوس

ابعاد	نمادها	پارامترها
قطر پره (m)	d	
همپوشانی داخلی	$\frac{G}{d}$	
سرعت ورودی (m/s)	U	
ضخامت پره (m)	s	

با برخورد جریان باد بر پره‌های توربین بادی ساونیوس نیروهای متعددی در پره‌ها ایجاد می‌گردد. نخست با برخورد جریان باد بر سطوح ۱ و ۲، دو نیروی F_1 و F_2 را ایجاد می‌کند که در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به بیشتر بودن نیروی F_1 از نیروی F_2 گشتاوری در خلاف عقربه‌های ساعت ایجاد شده و باعث چرخش روتور حول محورش می‌گردد. علاوه بر دو نیروی ذکر شده، دو نیروی دیگر نیز در سطوح توربین ایجاد می‌گردد که در شکل ۲ با نام‌های F_3 و F_4 نشان داده شده است. نیروی F_3 به دلیل همپوشانی در نظر گرفته شده در میان دو پره، بخشی از جریان هوا از سطح پره‌ای که تقعر آن رو به جریان هوا قرار دارد به سطح پره دیگر منحرف کرده و ایجاد یک نیروی مثبت در جهت چرخش روتور می‌کند. شکل آیرودینامیکی توربین و به‌خصوص شکل و اندازه همپوشانی توربین می‌تواند باعث افزایش یا کاهش مقدار نیروی F_3 وارد بر پره شود. علاوه بر این، نیروی F_4 در اثر مقاومت هوای ساکن در پشت پره‌ای که سطح تقعر آن رو به جریان قرار دارد و گشتاوری در خلاف جهت چرخش توربین بادی ایجاد می‌کند.

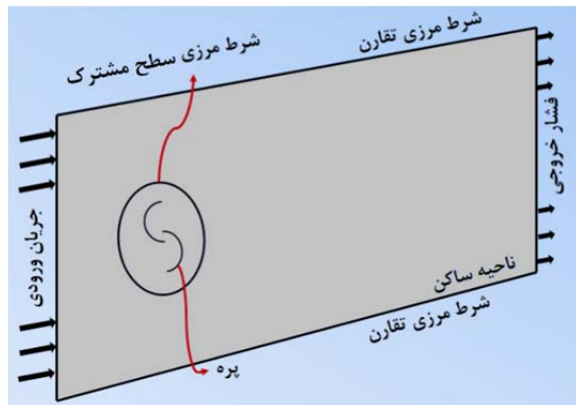
الگوگیری از پرواز پرندگان که به دو شکل V و I به پرواز در می‌آیند، تعدادی توربین بادی ساونیوس را به دو شکل بیان شده در کنار یکدیگر قرار دادند. با استفاده از ناحیه ویک ایجاد شده در پشت توربین‌ها، پره‌ای را که قسمت مقعر آن پشت به جریان ورودی قرار دارد را در قسمت ویک قرار دادند. با استفاده از این روش ضریب توان کل را از ۰/۲۴۷۷ به ۰/۳۰۴۴ افزایش دادند. شاهین و عبدالله^[13] توربین بادی محور عمودی ساونیوس را به صورت تکی و خوشه‌های دو و سه تایی با هدف بهبود عملکرد این نوع توربین‌ها شبیه‌سازی نمودند. در نهایت توانستند در خوشه سه تایی عملکرد توربین‌ها را تا ۳۴٪ افزایش دهند. ونهوبونا و همکاران^[14] با مطالعه عددی، تأثیر تعداد پره بر عملکرد توربین بادی ساونیوس را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که توربین بادی ساونیوس سه‌پره در نسبت سرعت نوک پره برابر با ۵/۵۵۵ و سرعت ورودی ۷ متر بر ثانیه، ماکزیمم ضریب توان را از خود نشان می‌دهد. همچنین، علی^[15] توربین بادی ساونیوس دو و سه‌پره را با یکدیگر به صورت آزمایشگاهی مقایسه نمودند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که عملکرد توربین بادی سه‌پره، عملکرد بالاتری نسبت به دوپره دارد. دنبات^[16] با استفاده از شبیه‌سازی عددی به بررسی توربین بادی محور عمودی ساونیوس با پره مارپیچ پرداخت. نتایج نشان داد که بیشترین گشتاور در زاویه ۶۰ درجه و کمترین گشتاور در زاویه ۱۵۰ درجه اتفاق می‌افتد. ساها و همکاران^[17] پره‌های مارپیچ ساونیوس را به صورت آزمایشگاهی در یک تونل باد با سرعت پایین مورد مطالعه قرار دادند. آنها مشاهده کردند که این نوع توربین، دارای بازده و قابلیت خودراه‌اندازی بالاتری نسبت به توربین متداول است.

در مقاله حاضر با استفاده از شبیه‌سازی عددی و به صورت دوبعدی به بررسی تأثیر نسبت همپوشانی داخلی بر عملکرد توربین بادی ساونیوس نوع متعارف و باخ پرداخته شده است. ابعاد پره‌ها و شرایط حل برای تمامی توربین‌های شبیه‌سازی شده یکسان بوده و تمامی نسبت همپوشانی‌های بیان شده در سه سرعت ورودی ۳، ۵ و ۷ متر بر ثانیه و نسبت سرعت نوک پره از ۰/۲ تا ۱/۲ با گام ۰/۲ مورد مطالعه قرار گرفته است. برای سازندگان توربین‌های بادی نوع ساونیوس همواره مقدار همپوشانی پره‌ها به دلیل تأثیر قابل توجه در توان خروجی آنها، یک مسأله چالش‌برانگیز بوده است. بحث میزان همپوشانی پره‌ها در کارهای قبلی به ندرت مورد توجه قرار گرفته است و پژوهشگران قبلی اغلب با یک همپوشانی از پیش تعیین شده به بیان نتایج کارهای خود پرداخته‌اند. این تحقیق، دقیقاً روی میزان همپوشانی در توربین‌های محور عمودی دوپره ساونیوس متمرکز شده است و سعی کرده تا مقدار بهینه همپوشانی را نسبت به پارامترهایی همچون نسبت سرعت نوک پره و سرعت باد مختلف بررسی نماید. همچنین نتایج برای دو نوع روتور مدل متعارف و مدل باخ ارائه شده اند.

۲- هندسه مسئله و تحلیل نیروهای موثر

برای شبیه‌سازی دوبعدی توربین بادی، محدوده حل به دو ناحیه ساکن و دوار تقسیم می‌شود که ناحیه دوار در داخل ناحیه ساکن قرار گرفته است. ناحیه دوار شامل روتور و فضای اطراف آن می‌باشد. ابعاد ناحیه ساکن و دوار با توجه به ابعاد مورد استفاده در مطالعه صورت‌گرفته توسط روی و داکوین^[9] انتخاب شده است. ابعاد ناحیه ساکن و دوار به ترتیب دارای مقادیر $6D \times 14D$ و $2D$ می‌باشد. فاصله ناحیه دوار از مرز ورودی و دو مرز بالا و پایین ناحیه ساکن برابر با $2D$ و از مرز خروجی $10D$ در نظر گرفته شده

شرط مرزی در این مسئله استفاده شده است. شرط مرزی سرعت ورودی به دلیل یکنواخت بودن سرعت از این شرط مرزی استفاده شده است و در مرز خروجی نیز به دلیل صفر بودن تنش برشی و گرادیان فشار و برابری فشار خروجی و فشار اتمسفر، شرط مرزی فشار خروجی به کار گرفته شده است. در مرز میان دو ناحیه ساکن و دوار از شرط مرزی سطح مشترک استفاده شده است، چرا که جریان بدون هیچ گونه تغییری در شرایط آن، از ناحیه ساکن، وارد ناحیه دوار می شود. شرط مرزی دیوار بر پره های روتور توربین بادی ساوننیوس اعمال گردید. در ادامه بر دو مرز بالا و پایین از ناحیه محاسباتی در ناحیه ساکن شرط تقارن در نظر گرفته می شود تا سیال در راستای این دو مرز ایده آل فرض شود تا هیچ گونه تلفات خاصی بین سیال و مرزها ایجاد نشود. در شکل ۳ شرایط مرزی بیان شده، نشان داده شده است.



شکل ۳ شرایط مرزی ناحیه محاسباتی

۵- پارامترهای عملکرد توربین بادی

با روابط گوناگونی می توان کارکرد توربین بادی محور عمودی ساوننیوس را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. روابط موجود برای تحلیل عملکرد توربین بادی ساوننیوس به صورت زیر می باشد:

$$TSR = \frac{R\lambda}{U} \quad (5)$$

ضریب توان [6]:

$$C_P = \frac{P}{0.5 \rho R H U^3} \quad (6)$$

مساحت جاروب شده توسط توربین بادی ساوننیوس:

$$A = D \times H \quad (7)$$

ضریب گشتاور از رابطه زیر به دست می آید [6]:

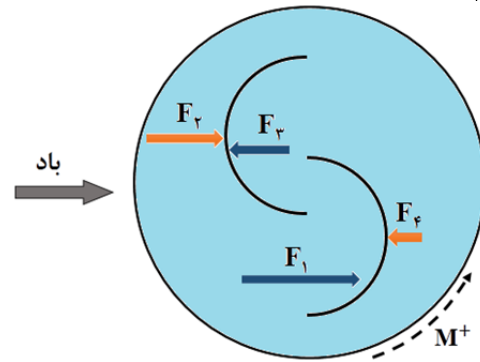
$$C_M = \frac{M}{0.5 \rho R H U^2} \quad (8)$$

رابطه میان ضریب گشتاور و ضریب توان از رابطه زیر به دست می آید [6]:

$$C_M = \frac{C_P}{TSR} \quad (9)$$

۶- شبکه بندی و نتایج استقلال از شبکه

دقت در انتخاب نوع و اندازه شبکه بندی تاثیر زیادی بر نتایج مطالعه عددی دارد. در پژوهش حاضر با توجه به مطلب بیان شده، شبکه بندی در دو ناحیه ساکن و دوار دارای تفاوت هایی عمده می باشد. نوع شبکه بندی مورد استفاده در ناحیه ساکن از نوع شبکه بندی سازمان یافته و نوع شبکه بندی در ناحیه دورانی برای پوشش بهتر ناحیه دورانی از نوع شبکه بندی غیر سازمان یافته



شکل ۲ نیروهای وارد بر پره های توربین بادی ساوننیوس

۳- معادلات حاکم

معادلات مورد نیاز برای بررسی جریان در اطراف روتور توربین، معادلات ناویر- استوکس می باشند که در حالت ناپایا به صورت زیر بیان می شوند [19]:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \bar{u}_i' \bar{u}_j' \right) \quad (2)$$

برای شبیه سازی مشخصه های آشفتگی، از مدل SST k-omega در این پژوهش استفاده شده است. مدل SST k-omega، جزء مدل های دو معادله ای می باشد که ترکیبی از دو معادله k-omega و مدل k-epsilon استاندارد می باشد. مدل k-omega در نزدیکی دیواره و مدل k-epsilon خواص آشفتگی جریان ورودی را به خوبی مدل سازی می کند. مدل SST k-omega از دو خاصیت رابطه بهره برده و آشفتگی در نزدیک دیواره پره ها و گردابه ها در دور دست را مدل سازی می کند. در این مدل دو معادله انتقال که یکی از این معادلات برای حل انرژی جنبشی آشفتگی (k) و دیگری برای حل تلفات انرژی (omega) استفاده می شود. این مدل، قابل اعتمادترین مدل موجود برای مدل سازی جریان ها با کلاس های متفاوت است [9, 20]. به عنوان نمونه می توان جریان روی ایرفویل ها، امواج ناشی از شوک، جریان چرخشی و غیره را نام برد. معادله مدل آشفتگی بیان شده به صورت زیر می باشد [21]:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} (k \bar{u}_i) = G_k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - Y_k \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} (\omega \bar{u}_i) = G_\omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) - D_\omega - Y_\omega \quad (4)$$

که در آن G_k و G_ω به ترتیب تولید انرژی جنبشی آشفتگی و تولید نرخ اتلاف، Γ_k و Γ_ω به ترتیب معرف پخش انرژی جنبشی و پخش نرخ اتلاف، Y_k و Y_ω ترم اتلاف k و omega به دلیل آشفتگی می باشند. لازم به ذکر است که برای محاسبه میدان سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل برای تمامی نواحی استفاده شده است.

۴- شرایط مرزی

انتخاب شرط مرزی و روش حل صحیح در شبیه سازی عددی از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین باید نهایت دقت در انتخاب این دو عامل اعمال شود. در این مطالعه، شرایط مرزی متعددی در قسمت های مختلف از مسئله به کار گرفته شده است که در ادامه ابتدا به شرایط مرزی انتخابی و سپس به انتخاب روش حل مسئله اشاره خواهد شد. همان طور که در شکل ۳ مشخص است از پنج

در حالت ناپایا برای شبیه‌سازی ناحیه دوار از روش قالب مرجع متحرک استفاده شده است. برای استقلال ناحیه محاسباتی از شبکه‌بندی، سه نوع شبکه‌بندی درشت، متوسط و ریز برای حصول بهترین نوع شبکه‌بندی مورد استفاده قرار گرفت. این شبیه‌سازی برای توربین بادی ساونپوس نوع متعارف در نسبت همپوشانی ۰/۱، نسبت سرعت نوک پره ۰/۴ و سرعت ورودی ۷ متر بر ثانیه انجام گردیده است (جدول ۲). با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، مشاهده می‌گردد که پس از شبکه‌بندی متوسط، تغییر عمده‌ای در نتایج مشاهده نمی‌شود و شبکه‌بندی ریز تأثیر عمده‌ای بر نتایج ندارد.

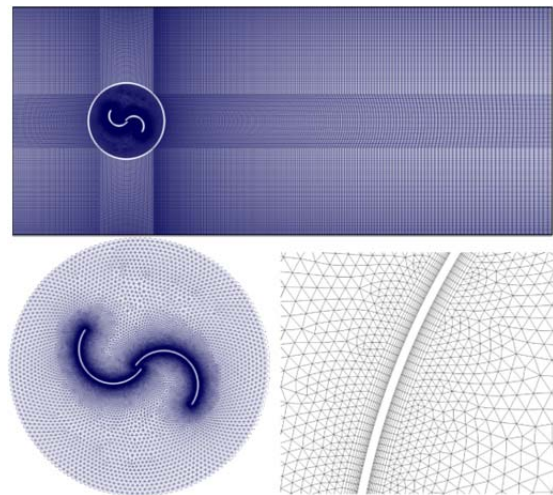
جدول ۲ استقلال از اندازه شبکه برای توربین بادی ساونپوس نوع متعارف در سرعت ۷ متر بر ثانیه، نسبت همپوشانی ۰/۱ و نسبت سرعت نوک ۰/۴

شماره شبکه	تعداد شبکه‌ها	$\bar{C}_p$	y_{max}^+
۱	۵۹۱۳۱	۰/۱۵۵	۰/۸۱۲
۲	۷۴۰۷۶	۰/۱۶۴	۰/۷۸۷
۳	۱۰۱۸۶۰	۰/۱۶۵	۰/۷۶۱

۷- اعتبارسنجی

برای اطمینان از صحت نحوه شبیه‌سازی، ابتدا باید نتایج به‌دست‌آمده از حل عددی با نتایج ارائه‌شده توسط سایر محققین مقایسه گردد. بنابراین برای اطمینان از دقت نتایج حاصل، پژوهش حاضر با دو مطالعه انجام‌گرفته توسط روی و داکوین^[۹] و بکول و همکاران^[۲۲] مقایسه گردید. نتایج حاصل برای توربین بادی ساونپوس نوع متعارف در سرعت ۷ متر بر ثانیه و نسبت همپوشانی ۰/۱ در جدول ۳ ارائه شده است.

استفاده شده است. همچنین، اندازه شبکه‌بندی در ناحیه دوار به دلیل تأثیرات چرخش روتور و ایجاد گرادیان شدید سرعت و فشار ریزتر از ناحیه ثابت در نظر گرفته شده است. با توجه به اهمیت لایه مرزی در نزدیکی پره‌های روتور، جدایش جریان و ایجاد گردابه در نزدیکی پره‌ها و آشفتگی جریان بحث لایه مرزی را از اهمیت بالایی برخوردار می‌کند. برای پوشش کامل تمامی زیرلایه‌های لایه مرزی آشسته در تمامی سرعت‌های ورودی مقدار $y^+ < ۱$ می‌باشد. به همین منظور، فاصله اولین لایه از سطح پره مقدار $۰/۰۰۰۵$ متر در نظر گرفته شده است. در شکل ۴ جزئیات کامل شبکه‌بندی مورد استفاده در ناحیه ساکن، ناحیه دوار و جزئیات شبکه‌بندی در نزدیکی روتور و لایه مرزی ارائه شده است.



شکل ۴ شبکه‌بندی به کار رفته برای ناحیه محاسباتی

جدول ۳ اعتبارسنجی برای توربین بادی ساونپوس نوع متعارف در سرعت ۷ متر بر ثانیه و نسبت همپوشانی ۰/۱ در نسبت‌های سرعت نوک ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱/۲

مطالعات	نوع حل	$\bar{C}_p$ TSR=۰/۴	درصد خطا	$\bar{C}_p$ TSR=۰/۶	درصد خطا	$\bar{C}_p$ TSR=۰/۸	درصد خطا	$\bar{C}_p$ TSR=۱	درصد خطا	$\bar{C}_p$ TSR=۱/۲	درصد خطا
مطالعه حاضر	عددی و دوبعدی	۰/۱۶۴۰	-	۰/۲۱۰۴	-	۰/۲۲۱۴	-	۰/۲۱۲۰	-	۰/۱۱۶۸	-
روی و داکوین ^[۹]	عددی و سه‌بعدی	۰/۱۶۹۱	۳٪	۰/۲۲۷۱	۳٪	۰/۲۳۰۱	۷٪	۰/۲۲۳۴	۱٪	۰/۱۲۰۲	۸٪
بکول و همکاران ^[۲۲]	آزمایشگاهی	۰/۱۶۴۱	۱٪	۰/۱۹۹۸	۵٪	۰/۲۱۱۶	۶٪	۰/۲۰۵۵	۳٪	-	-

مربوط به توربین بادی ساونپوس مدل باخ می‌باشد. با مشاهده شکل به اطلاعات بسیار جالبی می‌توان دست یافت. همان‌طور که مشخص است تشکیل نقطه سکون در قسمت محدب پره بازگشتی روتور متعارف، تشکیل ناحیه‌ای با فشار بالا داده است که از ایجاد گشتاور مثبت به طور قابل ملاحظه‌ای جلوگیری می‌کند. در مقابل، روتور باخ به دلیل شکل خاص پره‌های خود فاقد چنین عملکرد بازدارنده‌ای است. عامل دیگری که عملکرد هر دو نوع روتور را تحت تأثیر قرار داده و نقش همپوشانی را نمایان‌تر می‌کند تشکیل جت همپوشانی است که بخشی از سیال برخوردکننده به قسمت مقعر پره پیشرو را به داخل پره بازگشتی منتقل می‌کند. انتقال ممنوم توسط این جت همپوشانی به درون پره بازگشتی می‌تواند منجر به شکل‌گیری گشتاور مثبت مضاعفی گردد. زیرا جرم تزریق‌شده دقیقاً به قسمت مقعر پره بازگشتی برخورد می‌کند. بررسی دقیق‌تر میدان سرعت حول دو نوع روتور در حالت کلی و درون قسمت مقعر پره بازگشتی به طور خاص نشان می‌دهد که نقش این جت همپوشانی در روتور باخ به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از آن در روتور متعارف بوده به طوری که در قسمت مقعر پره بازگشتی در روتور باخ سرعت جریان بسیار بیشتری نسبت به آن در روتور متعارف مشاهده می‌شود.

همان‌طور که از نتایج مشخص است، نتایج ضریب توان متوسط در نسبت سرعت نوک پره مختلف تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی سه‌بعدی را نشان می‌دهد. علت اختلاف ناچیز نیز می‌تواند به عوامل گوناگونی همچون، نادیده‌گرفتن برخی از اجزای توربین در حل دوبعدی نسبت به مدل آزمایشگاهی آن مانند میله نگهدارنده پره‌ها یا نادیده‌گرفتن اثرات گردابه‌های نوک پره‌ها در توربین واقعی دانست. با این وجود، نتایج، تطابق خوبی با یکدیگر دارند.

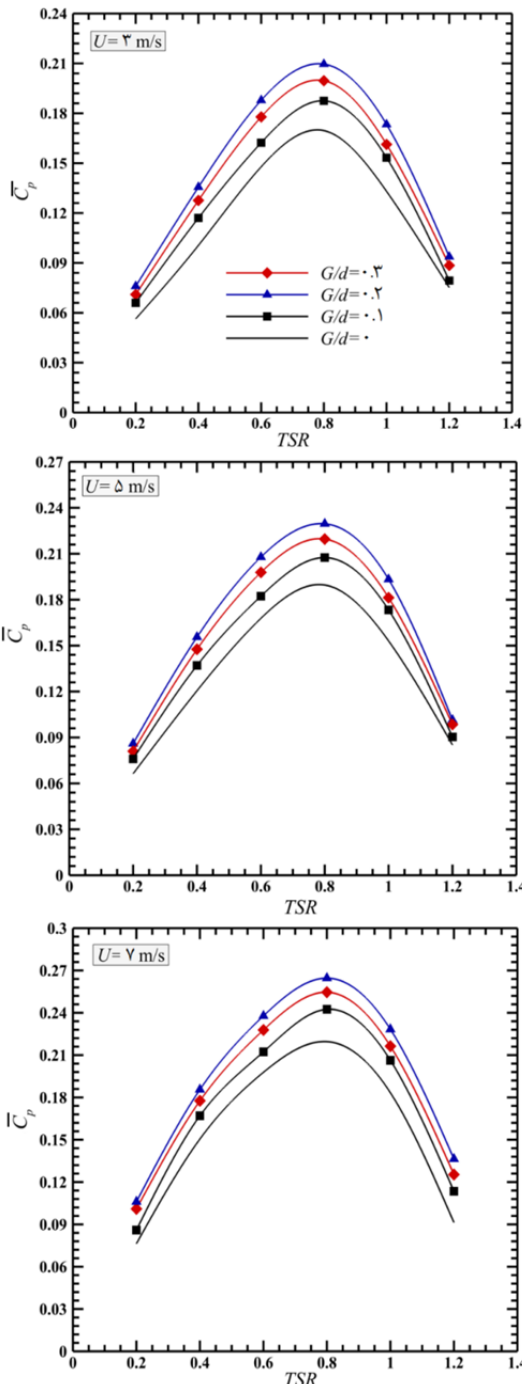
۸- نتایج

در این بخش جریان لحظه‌ای اطراف روتور توربین بادی به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته و سپس، تأثیر اندازه همپوشانی بر عملکرد توربین بادی محور عمودی ساونپوس مدل متعارف و باخ در سه سرعت جریان باد و نسبت سرعت نوک پره متفاوت تشریح خواهد شد.

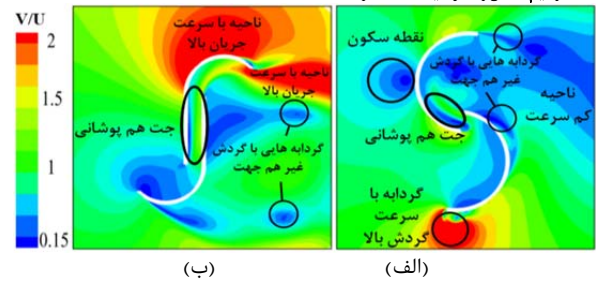
۸-۱- جریان لحظه‌ای اطراف روتور توربین بادی

در شکل ۵ جزئیات جریان در اطراف روتور هر دو نوع توربین در سرعت ورودی ۷ متر بر ثانیه، نسبت سرعت نوک پره برابر با ۰/۸ و نسبت همپوشانی ۰/۲ ارائه شده است. شکل ۵ قسمت الف مربوط به توربین بادی ساونپوس مدل متعارف و شکل ۵ قسمت ب

توربین نوع باخ می‌توان به دو دلیل عمده اشاره نمود. تشکیل گردابه در قسمت هم‌پوشانی توربین بادی ساوینیوس مدل متعارف باعث کاهش سرعت جریان خروجی و در نهایت کاهش نیروی جت هم‌پوشانی می‌شود، اما در قسمت هم‌پوشانی مدل باخ گردابه‌ای تشکیل نشده و جریان خروجی، نیروی بیشتری را هم‌راستا با جهت چرخش روتور بر پره وارد می‌کند. از عوامل دیگر تاثیرگذار بر تفاوت عملکرد دو توربین، تشکیل گردابه‌های بزرگتر در پشت پره پیشرو در توربین نوع باخ نسبت به نوع متعارف می‌باشد. وجود گردابه‌های بزرگتر باعث ایجاد ناحیه کم‌فشار بزرگتر در پشت پره پیشرو در توربین نوع باخ شده در نتیجه این عامل باعث افزایش گشتاور روتور و بهبود عملکرد توربین می‌شود.

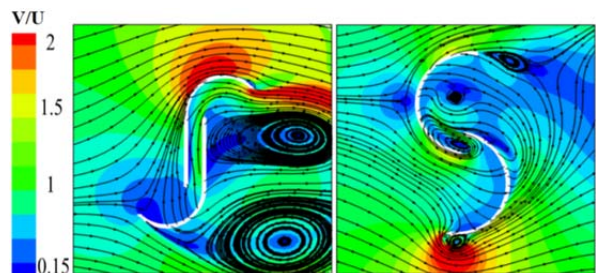


نمودار ۱) نسبت ضریب توان دینامیکی متوسط به نسبت سرعت نوک پره در توربین بادی ساوینیوس مدل متعارف در سرعت‌های مختلف



شکل ۵) میدان سرعت لحظه‌ای بی‌بعد در اطراف روتور توربین ساوینیوس در سرعت ۷ متر بر ثانیه، نسبت سرعت نوک پره برابر با ۰/۸ و در نسبت هم‌پوشانی ۰/۲

با توجه به شکل ۶ خطوط جریان در اطراف روتور توربین ساوینیوس برای هر دو نوع توربین در سرعت ۷ متر بر ثانیه، نسبت سرعت نوک پره برابر با ۰/۸ و نسبت هم‌پوشانی ۰/۲ ارائه شده است. مشاهده می‌گردد که در داخل جت هم‌پوشانی توربین نوع متعارف گردابه‌ای ایجاد می‌گردد که باعث اتلاف فشار جریان عبوری از جت هم‌پوشانی شده و در نتیجه کاهش نیروی جت هم‌پوشانی را در پی دارد. در مقابل، در داخل سطح هم‌پوشانی توربین بادی نوع باخ، هیچ‌گونه گردابه‌ای رخ نداده و با توجه به کاهش سطح ورودی در بخش هم‌پوشانی افزایش سرعت و در پی آن افزایش نیروی جت هم‌پوشانی و بازده را به دنبال دارد. علاوه بر این، وجود گردابه در پشت پره پیشرو در روتور باخ، ناحیه‌ای کم‌فشار را در پشت پره پیشرو ایجاد می‌کند که عامل اصلی تولید گشتاور بیشتر در این روتور نسبت به روتور متعارف می‌باشد.



شکل ۶) میدان لحظه‌ای بی‌بعد در اطراف روتور توربین ساوینیوس در سرعت ۷ متر بر ثانیه، نسبت سرعت نوک پره برابر با ۰/۸ و در نسبت هم‌پوشانی ۰/۲

۲-۸- ضریب توان دینامیکی متوسط

در نمودارهای ۱ و ۲ به ترتیب نسبت ضریب توان دینامیکی متوسط نسبت به سرعت نوک پره در توربین بادی ساوینیوس مدل متعارف و باخ ارائه شده است. با توجه به نمودارهای ارائه شده می‌توان نتایج متعددی از آنها گرفت. در درجه اول بحث رابطه دو توربین با سرعت ورودی پیش می‌آید که با توجه به نمودارهای ارائه شده برای هر دو توربین می‌توان نتیجه گرفت که سرعت ورودی با عملکرد هر دو نوع توربین رابطه مستقیم دارد و با افزایش سرعت ورودی، عملکرد هر دو نوع با هر اندازه‌ای از نسبت هم‌پوشانی بهبود می‌یابد. در توربین بادی مدل متعارف و باخ در هر سه سرعت ذکر شده، بالاترین ضریب توان دینامیکی متوسط به ترتیب مربوط به نسبت هم‌پوشانی ۰/۲ و ۰/۱ می‌باشد و افزایش یا کاهش این مقدار، تاثیر منفی بر عملکرد توربین دارد. همچنین، توربین ساوینیوس مدل متعارف و باخ به ترتیب در نسبت سرعت نوک پره برابر با ۰/۸ و ۰/۷ به ترتیب دارای ماکزیمم مقدار ضریب توان دینامیکی متوسط می‌باشند. در حالت کلی توربین بادی نوع باخ عملکرد بهتری را نسبت به نوع متعارف از خود نشان می‌دهد. از دلایل عملکرد بهتر

نهایت کاهش نیروی جت هم‌پوشانی می‌شود اما در قسمت هم‌پوشانی مدل باخ گردابه‌ای تشکیل نمی‌شود. بنابراین، هم‌پوشانی در نظر گرفته شده برای مدل باخ موثرتر و کارآمدتر از نوع متعارف می‌باشد.

- با توجه به بزرگ‌تر بودن گردابه‌ها و ایجاد شدن ناحیه کم‌فشار در پشت پره پیشرو در توربین بادی ساونیوس نوع باخ نسبت به نوع متداول، گشتاور حاصل در توربین نوع باخ بیشتر از نوع متداول می‌باشد.
- ماکزیمم مقدار ضریب توان دینامیکی متوسط در دو توربین ساونیوس مدل متعارف و باخ به ترتیب در مقدار نسبت هم‌پوشانی برابر با ۰/۲ و ۰/۱ رخ می‌دهد و با کاهش یا افزایش این نسبت‌ها، عملکرد توربین کاهش می‌یابد.
- حداکثر ضریب توان دینامیکی متوسط مربوط به توربین بادی ساونیوس مدل متعارف و باخ در تمامی سرعت‌های ورودی و نسبت‌های هم‌پوشانی به ترتیب در نسبت سرعت نوک پره برابر با ۰/۸ و ۰/۷ رخ می‌دهد.
- عملکرد هر دو نوع متعارف و باخ با افزایش سرعت جریان ورودی (جریان باد) در تمامی نسبت سرعت‌های نوک پره بهبود می‌یابد.
- در حالت کلی، با مقادیر هم‌پوشانی بهینه، توربین بادی ساونیوس مدل باخ در شرایط یکسان دارای عملکرد بهتری نسبت به مدل متعارف می‌باشد.

تشکر و قدردانی: موردی بیان نشد.

تأییدیه اخلاقی: موردی بیان نشد.

تعارض منافع: موردی بیان نشد.

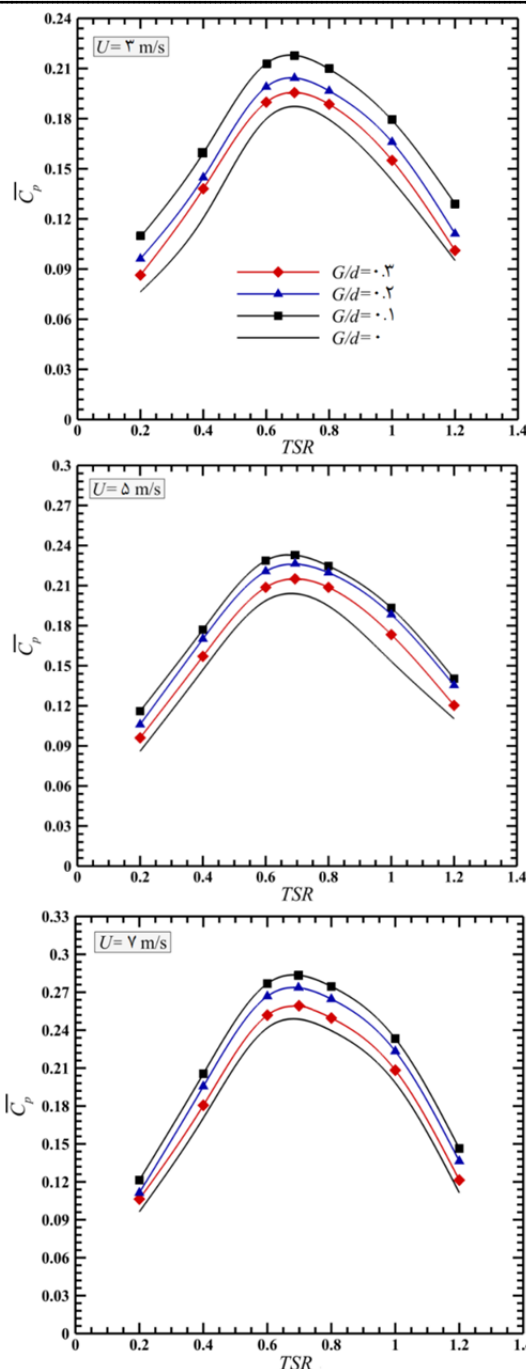
سهم نویسندگان: رحیم حسن‌زاده (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۶۰٪)؛ میلاد محمدنژاد (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی (۴۰٪)

منابع مالی: موردی بیان نشد.

۱۰- فهرست علائم

A	مساحت جاروب توربین (m^2)
D	قطر روتور (m)
d	قطر پره (m)
D_{ω}	پخش متقابل
F	نیروی وارده بر سطوح پره (N)
G_k	تولید انرژی جنبشی آشفستگی
G_{ω}	تولید ω
H	ارتفاع روتور (m)
k	انرژی جنبشی آشفستگی
M	گشتاور (Nm)
p	فشار (Pa)
P	توان (W)
R	شعاع روتور (m)
r	شعاع پره (m)
s	ضخامت پره (m)
t	زمان (s)
U	سرعت ورودی (ms^{-1})
λ	سرعت دورانی ($rads^{-1}$)
ω	اتلاف آشفستگی
Y_k	اتلاف k
Y_{ω}	اتلاف ω
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ϑ	لزجت سینماتیکی (m^2s^{-1})
ρ	چگالی (kgm^{-3})

علائم یونانی



نمودار ۲ نسبت ضریب توان دینامیکی متوسط به نسبت سرعت نوک پره در توربین بادی ساونیوس مدل باخ در سرعت‌های مختلف

۹- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، تأثیر هم‌پوشانی داخلی بر عملکرد توربین بادی محور عمودی ساونیوس با شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از حل عددی را می‌توان به صورت خلاصه این چنین بیان کرد:

- با افزایش مقدار نسبت هم‌پوشانی داخلی، یک نیروی اضافی به نام نیروی ناشی از جت هم‌پوشانی در جهت چرخش روتور توربین ایجاد شده و باعث ایجاد گشتاور مثبت در روتور می‌شود. در نتیجه این عامل باعث افزایش گشتاور روتور و بهبود عملکرد توربین می‌شود.
- تشکیل گردابه در قسمت هم‌پوشانی توربین بادی ساونیوس مدل متعارف باعث کاهش سرعت جریان خروجی و در

- 10- Jeon KS, Jeong JI, Pan JK, Ryu KW. Effects of end plates with various shapes and sizes on helical Savonius wind turbines. *Renewable Energy*. 2015;79:167-176.
- 11- Sharma S, Kumar Sharma R. Performance improvement of Savonius rotor using multiple quarter blades – A CFD investigation. *Energy Conversion and Management*. 2016;127:43-54.
- 12- Zhang B, Song B, Mao Zh, Tian W. A novel wake energy reuse method to optimize the layout for Savonius-type vertical axis wind turbines. *Energy*. 2017;121:341-355.
- 13- Shaheen M, Abdallah Sh. Development of efficient vertical axis wind turbine clustered farms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;63:237-244.
- 14- Wenehenubuna F, Saputraa A, Sutanto H. An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades. *Energy Procedia*. 2015;68:297-304.
- 15- Ali MH. Experimental comparison study for Savonius wind turbine of two & three blades at low wind speed. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*. 2013;3(5):2978-2986.
- 16- Debnath P. Flow physics analysis of three-bucket helical Savonius rotor at 90° twist angle using CFD. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*. 2013;3(2):739-746.
- 17- Saha UK, Thotla S, Maity D. Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2008;96(8-9):1359-1375.
- 18- Roy S, Saha UK. Wind tunnel experiments of a newly developed two-bladed Savonius-style wind turbine. *Applied Energy*. 2015;137:117-125.
- 19- Lee JH, Lee YT, Lim HC. Effect of twist angle on the performance of Savonius wind turbine. *Renewable Energy*. 2016;89:231-244.
- 20- Menter FR. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *The American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*. 1994;32(8):1598-1605.
- 21- Elbatran AH, Ahmed YM, Shehata AS. Performance study of ducted nozzle Savonius water turbine, comparison with conventional Savonius turbine. *Energy*. 2017;134:566-584.
- 22- Blackwell BF, Sheldahl RE, Feltz LV. Wind tunnel performance data for two- and three-bucket Savonius rotors. Technical Report. Albuquerque: Sandia Labs; 1977. Report No: SAND-76-0131.

پخش انرژی جنبشی	Γ_k
پخش نرخ اتلاف	Γ_ω
اعداد بی‌بعد	
ضریب گشتاور	C_M
ضریب توان	C_P
نسبت اندازه هم‌پوشانی بر قطر پره (هم‌پوشانی بی‌بعد)	$\frac{G}{d}$
عدد رینولدز	Re
نسبت سرعت نوک پره بر سرعت ورودی	TSR
تابع دیواره	y^+

منابع

- 1- Savonius SJ. The S-rotor and its application. *Mechanical Engineering*. 1931;53:333-338.
- 2- Damak A, Driss Z, Abid MS. Optimization of the helical Savonius rotor through wind tunnel experiments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2018;174:80-93.
- 3- Hassanzadeh R, Yaakob O, Taheri MM, Hosseinzadehe M, Ahmed YM. An innovative configuration for new marine current turbine. *Renewable Energy*. 2018;120:413-422.
- 4- Ferrari G, Federici D, Schito P, Inzoli F, Mereu R. CFD study of Savonius wind turbine: 3D model validation and parametric analysis. *Renewable Energy*. 2017;105:722-734.
- 5- Kacprzak K, Liskiewicz G, Sobczak K. Numerical investigation of conventional and modified Savonius wind turbines. *Renewable Energy*. 2013;60:578-585.
- 6- Amiri M, Kahrom M, Kianifar A. Numerical and experimental investigation on effects of the primary and secondary overlaps on the performance of Savonius wind turbine. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(6):123-131. [Persian]
- 7- Mereu R, Federici D, Ferrari G, Schito P, Inzoli F. Parametric numerical study of Savonius wind turbine interaction in a linear array. *Renewable Energy*. 2017;113:1320-1332.
- 8- Al-Kayiem HH, Bhayo BA, Assadi M. Comparative critique on the design parameters and their effect on the performance of S-rotor. *Renewable Energy*. 2016;99:1306-1317.
- 9- Roy S, Ducoin A. Unsteady analysis on the instantaneous forces and moment arms acting on a novel Savonius-style wind turbine. *Energy Conversion and Management*. 2016;121:281-296.