

دسی مکانیک مدر س

mme.modares.ac.ir

کا انہندی اندسی میں درسی مکانیک مسارس سوہ اندرس



بررسی عددی و تجربی اثر میزان هم پوشانی اولیه و ثانویه بر عملکرد توربین بادی ساونیوس

مريم اميرى¹، محسن كهرم²، على كيانىفر³

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

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

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

* مشهد، صندوق پستى a-kiani@um.ac.ir ،9177948944

چکیدہ	اطلاعات مقاله
توریبنهای بادی ساونیوس بدلیل طراحی و ساخت ساده، عدم وابستگی به جهت باد و خود راه انداز بودن، مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفتهاند. در مقاله حاضر با استفاده از شبیهسازی عددی و نتایج آزمایشگاهی به بررسی اثر میزان همپوشانی اولیه و ثانویه بر عملکرد توربین بادی ساونیوس پرداخته شده است. هشت روتور مختلف مورد بررسی قرار گرفتهاند که سه روتور بصورت آزمایشگاهی و هر هشت روتور بصورت	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 01 اسفند 1393 پذیرش: 14 اسقند 1393 ارائه در سایت: 01 اردیبهشت 1394
عددی تحلیل شدهاند. اثر پارامترهای همپوشانی اولیه، همپوشانی ثانویه، عدد رینولدز و تعداد پره بر ضریب توان و ضریب گشتاور پره مورد بررسی قرار گرفتهاند. نتایج نشان میدهند حداکثر ضریب توان برای تمامی روتورهای بررسی شده در نسبت سرعتهای نوک 8/0 تا 1/0 (سرعت نوک پره نزدیک به سرعت باد) اتفاق میافتد. ضریب توان حداکثر در مقدار همپوشانی اولیه (بیبعد شده نسبت به قطر پره) 2/0 اتفاق میافتد، اما کم یا زیاد کردن همپوشانی ثانویه باعث کاهش ضریب توان حداکثر میشود. با افزایش عدد رینولدز ضریب توان حداکثر و متوسط افزایش مییابد. همچنین گرچه افزودن پره به روتور ساونیوس باعث ایجاد گشتاور تولیدی یکنواخت ری می گردد، اما ضریب توان حداکثر روتور	کلید واژگان: روتور ساونیوس همپوشانی اولیه ضریب توان

Numerical and experimental investigation on effects of the primary and secondary overlaps on the performance of Savonius wind turbine

Maryam Amiri, Mohsen Kahrom, Ali Kianifar*

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran * P.O.B. 9177948944, Mashhad, Iran, a-kiani@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Abstract

Original Research Paper Received 20 February 2015 Accepted 05 March 2015 Available Online 21 April 2015

Keywords: Savonius rotor Primary overlap Secondary overlap Power coefficient Due to simplicity of design and manufacture, self-starting characteristics and operating independently of wind direction, Savonius wind rotors have been considered by many scientists. In the present study, the effects of the primary and secondary overlap ratios on the performance of Savonius wind rotors have been investigated by means of numerical simulation and wind tunnel tests. Eight different rotor structures were analyzed numerically; three of them were also studied by experimental methods. The effects of the primary and secondary overlap ratios, Reynolds number and the number of the blades on the power and torque coefficients were examined. For all investigated rotors, the maximum value of the power coefficient occurred at a tip speed ratio between 0.8 – 1.0 (blade tip speeds close to the wind speed). Additionally, the maximum power coefficient was found at a dimensionless primary overlap ratio of 0.2; however, increasing or decreasing the secondary overlap ratio caused a reduction in the maximum value of the power coefficient. Also, it was shown that an increase in Reynolds number resulted in increase

of the maximum and average values of power coefficient. Moreover, although adding more blades could produce a more uniform torque, it causes the maximum value of the power coefficient to decrease. By increasing the positive secondary overlap ratio, torque coefficient was increased while the negative overlap ratio reduced the torque coefficient.

باشند [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-
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

توربینهای بادی عمدتاً به دو دسته کلی بر اساس جهت محور چرخش تقسیم بندی میشوند: توربین باد محور افقی و محور عمودی. در نوع محور افقی، محور توربین به موازات جهت وزش باد قرار دارد. این دسته از توربین-ها، در جریان پایا و یکنواخت و برای کارکرد طولانی مدت مناسب می-

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

M. Amiri, M. Kahrom, A. Kianifar, Numerical and experimental investigation on effects of the primary and secondary overlaps on the performance of Savonius wind turbine, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 123-131, 2015 (In Persian)

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 [2]. 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 درجهت عمود بر جریان و نیمی از آن در جهت جریان در حال حرکت است. عامل اصلی تولید گشتاور در این توربینها اختلاف بین ضریب پسای این دو نیمه است و به همین دلیل طراحی بهینه شکل پره روتور آنها از اهمیت ویژه ای برخوردار است [1].

یکی از طراحیهای بسیار رایج از توربینهای محور قائم روتورهای ساونیوس ¹هستند که از دو پره نیمه استوانهای با مقطع نیم دایره تشکیل شدهاند. شکل **1** نمایی از یک روتور ساونیوس را نشان میدهد.

واضح است که عامل حرکت در روتورهای ساونیوس بیشتر بودن ضریب پسای نیمه مقعر نسبت به نیمه محدب است. ابعاد اصلی مشخص کننده منحنی یک روتور ساونیوس با مقطع نیم دایره در شکل 2 نشان داده شده است، لازم بذکر است که هم پوشانی ثانویه مثبت (فرو رفتن پرهها داخل یکدیگر) و هم پوشانی ثانویه منفی (فاصله گرفتن پرهها از یکدیگر) می باشد، شکل 2 نمونه ای از هم پوشانی ثانویه منفی می باشد.

تاکنون مطالعات فراوانی بر روی منحنی روتورهای ساونیوس به منظور کم کردن ضریب پسا هنگامیکه در مقابل جهت باد حرکت میکند و افزایش ضریب پسا هنگامیکه در جهت باد حرکت میکند، انجام شده است. از آن جمله میتوان بکار بنش اشاره کرد که یک منحنی درجه 4 برای روتور پیشنهاد کرده است [3]. همچنین تلاشهای زیادی برای افزایش راندمان این توربینها انجام شده و ایدههای جدیدی نیز ارائه شده است. بورسین و مهمت [5،4] از یک پوشش محافظ 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 تيغه محافظ را بررسی كرده و طول بهينه تيغه محافظ كه میتواند سبب افزایش گشتاور ایستایی روتور شود را بدست آوردند. ایرابو و روی [6] با استفاده از تونل باد روشی را برای حفظ کردن روتورهای ساونیوس از آسیب دیدن در سرعتهای مختلف باد ارائه کردند. آنها نشان دادند که استفاده از جعبه راهنما² در توربینهای سه پرهای، ضریب توان را 1/5 برابر و در توربین-های دو پرهای 1/23 برابر افزایش میدهد (نسبت به توربین بدون جعبه راهنما). ساها و راجکومار [7] پرههای پیچی شکل³ در یک سیستم توربین سه بره را با برههای رایج بدون پیچش با مقطع نیم دایره مقایسه کردند. آنها آزمایشات خود را در یک تونل باد سرعت پائین انجام دادند و نشان دادند که پرههای پیچی شکل راندمان بالاتر و قابلیت خود راهاندازی بهتری نسبت به پرهای بدون پیچش دارند. کاموجیا و همکارانش [8] به منظور کم کردن نوسانات ضریب گشتاور ایستایی که در روتورهای ساونیوس بدون پیچش سنتی وجود دارد، آزمایشاتی را بر روی روتورهای ساونیوس با پیچش 90 درجه انجام دادند و نشان دادند که ضریب گشتاور ایستایی در تمام زوایای روتور با پیچش 90 درجه مثبت میباشد، اما واضح است که هزینه ساخت این پرههای دارای پیچش بسیار بیشتر از نمونههای ساده بدون پیچش و با مقطع

⁴ نیم دایره میباشد. ساها و همکارانش [9] نشان دادند استفاده از دریچه⁴ منجر به افزایش ضریب توان میانگین میشود، درصورتیکه این دریچهها فقط هنگامی باز شوند که جریان هوا را از سطح محدب پره به سطح مقعر عبور دهند. بلکول و همکارانش [10] تأثیر 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 تأخیر جدایش روی سطح محدب پرهها میشود. پارامتر دیگر تأثیرگذار بر عملکرد توربین ساونیوس، شدت توربولانسی جریان میباشد که به نوعی کیفیت جریان هوای اطراف توربین را مشخص میکند. آکوا [11] نشان داد که کیفیت پایین جریان هوا یا جریان مغشوش، ضریب توان میانگین را کاهش میدهد.

در مقاله حاضر با استفاده از شبیه سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی به بررسی اثر همزمان میزان هم پوشانی اولیه و ثانویه (مشخص شده در شکل 2) بر عملکرد یک توربین بادی ساونیوس پرداخته شده است که تاکنون کار مشابهی در این زمینه انجام نشده است. نتایج آزمایشگاهی از تستهای انجام شده در تونل باد برای سه روتور مختلف با هم پوشانی های مختلف بدست آمده است. تمامی مدل های تست شده دارای ابعاد یکسان هستند و تنها تفاوت آنها با هم، در اندازه هم پوشانی آنها است. بعلاوه، اثر عدد رینولدز و تعداد پره نیز به منظور یافتن تعداد بهینه پره روتور مورد بررسی قرار گرفته است. گرفته اند.

2- روش انجام آزمایش

اطلاعات هندسی روتورهای مورد بررسی در جدول شماره 1 ارائه شده است. در این مقاله، هشت روتور مورد بررسی قرار گرفتهاند که سه مورد از آنها بصورت آزمایشگاهی (روتورهای 1 تا 3 از جدول 1) و تمامی هشت مورد بصورت عددی مطالعه شدهاند. همگی روتورها دارای مقطع نیم دایره با قطر پره 16 سانتیمتر میباشند. ارتفاع روتور h در تمامی مدلها 30 سانتیمتر بوده و ضخامت تیغه روتورها 1 میلیمتر است. تصاویر روتورهای مورد استفاده در آزمایشها در شکل 3 نشان داده شده است.

آزمایشها در یک تونل باد با ابعاد $0/5 \times 0/5$ متر و طول پنج متر انجام شده است. نمونهها در فاصله 2/4 متر از ابتدای تونل قرار گرفتهاند تا از یکنواخت بودن جریان هوا اطمینان حاصل شود. شماتیکی از تونل باد در شکل 4 نشان داده شده است.



شکل 1 نمای شماتیک از روتور محور قائم ساونیوس

4- Valve

1- Savonius rotors
 2- Guide-box
 3- Twisted blades

مهندسی مکانیک مدرس، شهریور 1394، دورہ 15، شمارہ 6



مقطع تست تونل باد **شکل 4** شماتیک تونل باد

هوا با استفاده از یک بادسنج تستو² 435 با بازه اندازه گیری 0/6 تا 40 متر بر ثانیه و دقت اندازه گیری 2/2± متر بر ثانیه اندازه گیری شده است. همچنین اندازه گیری سرعت دورانی روتور با استفاده از دورسنج نوری تستو 465 با بازه اندازه گیری 1 تا 99999 دور بر دقیقه و دقت اندازه گیری 2/2± متر بر ثانیه اندازه گیری 1 تا و 99999 دور بر دقیقه و دقت اندازه گیری 2/2± متر بر ثانیه اندازه گیری آنها استفاده شده و دقت هر کدام ارائه شده است. عدم قطعیت ناشی از دقت ابزار با استفاده از رابطه $\frac{a}{\sqrt{3}} = u$ (با فرض توزیع یکنواخت) [12] تعیین شده است، که در آن **a** نصف دقت وسیله اندازه گیری می باشد.

تمامی تستها در شرایط یکسان و با سرعت هوا در بازه 8 تا 14 متر بر ثانیه انجام شده است. با تغییر اندازه هم پوشانی، قطر روتور نیز تغییر خواهد کرد، ولی بدلیل اینکه تستها بر مبنای عدد رینولدز ثابت انجام شده است، بدیهی است که با تغییر اندازه هم پوشانی و قطر روتور سرعت جریان ورودی تغییر خواهد کرد که این مورد در محاسبات لحاظ شده است. پارامترهای نسبت سرعت نوک پره، ضریب توان، عدد رینولدز و ضریب گشتاور بترتیب با استفاده از روابط (1) تا (4) تعریف شدهاند [13]:

$\lambda = \frac{u}{V} = \frac{\omega D}{2V}$	(1)
$C_P = \frac{2T\omega}{\omega}$	(2)

$$\mathbf{R}\mathbf{e} = \frac{VD}{v}$$
(3)

$$C_M = \frac{C_P}{\lambda} \tag{4}$$

که در آنها V سرعت هوا، D قطر روتور، h ارتفاع روتور، u سرعت نوک پره، T گشتاور اندازه گیری شده و w سرعت دورانی روتور میباشد.

روتورهای 1 تا 3 با استفاده از شبیه سازی عددی نیز مورد بررسی قرار گرفته اند و پس از اعتبار سنجی نتایج با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، مابقی روتورها توسط روش عددی شبیه سازی شده اند. همچنین به منظور بررسی اثر تعداد پره، روتور شماره 8 که شامل سه پره می باشد (شکل 5) نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.



شکل 2 ابعاد اصلی روتور ساونیوس (*D* قطر روتور، *C* قطر پره، *O* همپوشانی اولیه و *S* همپوشانی ثانویه)- همپوشانی ثانویه مثبت (فرو رفتن پرهها داخل یکدیگر) و هم-پوشانی ثانویه منفی (فاصله گرفتن پرهها از یکدیگر) **جدول 1** اطلاعات هندسی روتورها

تعداد	قطر	قطر پرہ	همپوشانى	هم پوشانی	شماره
پره	روتور (D)	(<i>C</i>)	ثانويه(S)	اوليه(0)	روتور
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	
2	32	16	0	0	1
2	28/8	16	0	3/2	2
2	25/6	16	0	6/4	3
2	28/8	16	3/2	3/2	4
2	28/8	16	-1/25	3/2	5
2	28/8	16	1/25	3/2	6
2	28/8	16	1	3/2	7
3	32	16	0	0	8



روتور شماره 1



روتور شماره 2



روتور شماره 3

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.6.21.7]



شکل 3 روتورهای مورد بررسی

گشتاور روتور و سرعت هوا به ترتیب با استفاده از یک سنسور اندازه گیری گشتاور و یک بادسنج چند منظوره اندازه گیری شده است. سنسور گشتاور از نوع ایمادا ابا بازه اندازه گیری گشتاور بین صفر تا 10 نیوتن - متر بوده و دقت اندازه گیری آن %0/5± میباشد. در تمامی آزمایش های انجام شده، اندازه-گیریها چهار مرتبه تکرار شدهاند و تکراریذیری نتایج 95% بوده است. سرعت

2- TESTO

1- IMADA HGT-10

125

مهندسی مکانیک مدرس، شهریور 1394، دوره 15، شماره 6

عدم قطعيت	دقت	ابزار اندازه گیری	كميت
0/001	±0/5% نيوتن - متر	سنسور اندازهگیری گشتاور(ایمادا)	گشتاور روتور
0/057	±0/2 متر بر ثانيه	بادسنج تستو 435	سرعت هوا
0/057	±0/2 متر بر ثانيه	دورسنج نوری تستو 465	سرعت دورانی روتور

جدول 2 عدم قطعيت ابزار

$$\sum_{f}^{N_{\text{faces}}} \nu_f \phi_f A_f = \sum_{f}^{N_{\text{faces}}} \Gamma_{\phi} (\nabla_{\phi})_n A_f + S_{\phi} V$$
(10)

 $A_f \ end{tabular} f$ مصلح، $f_f \phi$ مقدار کمیت ϕ انتقال یافته از سطح f و V_f مسلخت سطح f می باید در مرکز هر مساخت سطح f می باید در موادی شارهای جایجایی و پخش باید در مرکز هر المان محاسبه شود، که توسط روش توانی⁴ انجام می شود [16]. در این روش مقادیر متغیر ϕ بوسیله حل دقیق معادله یک بعدی جابجایی – پخش (11) و (12) بدست می آید [17]:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u\phi) = \frac{\partial}{\partial x}\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x}$$
(11)

$$\frac{\phi(x) - \phi_0}{\phi_L - \phi_0} = \frac{\exp\left(\operatorname{Pe}(x/L)\right) - 1}{\exp(\operatorname{Pe}) - 1}$$
(12)

Pe عدد پكلت مىباشد. گىسىتەسازى جملات توسط الگوريتم مرتبه دوم بالادست⁵ تعيين و بوسيله يک روش خطى (روش گاوس سايدل⁶ بعلاوه الگوريتم ماتريس سه قطرى⁷) حل مىشوند [18].

در مقاله حاضر معادلات حاکم با استفاده از نرم افزار انسیس فلوئنت⁸ حل شدهاند. مدل دو بعدی از هریک از پرهها در نرمافزار گمبیت ایجاد شده و با استفاده از سلولهای مثلثی شبکه بندی شده است. در شکل **6** شبکه ایجاد شده برای یک نمونه از پرهها نشان داده شده است.

مدل آشفتگی کی امگا اس اس تی در نرمافزار انسیس فلوئنت بطور پیش فرض از توابع دیواره بهبود یافته⁹ استفاده می کند و به همین دلیل حساسیت بسیار کمتری نسبت به مدلهای آشفتگی کی اپسیلون و کی امگا استاندارد به مقدار فاصله متوسط بدون بعد اولین گره از دیواره (+y) دارد [14]. مقدار ⁺y در این مدل باید با استفاده از مطالعه استقلال از شبکه بدست آید. همانطور که مشاهده می شود شبکه در نزدیکی پره به دلیل مهم بودن گرادیانهای سرعت در این ناحیه ریز شده است و مقدار ⁺y برای شبکه مورد استفاده در شبیه سازیها در عدد رینولدز ⁵01×15</sup> برابر با 7/7 میباشد. استفلال نتایج از شبکه با مقایسه ضریب توان روتور شماره 2 در نسبت مشاهده می شود شبکه در آن حوزه محاسباتی به 20 میباشد. شرعت نوک 5/0 مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در جدول مشاهده می شود شبکه دوم که در آن حوزه محاسباتی به 33164 تعداد سلول تقسیم بندی شده است از لحاظ دقت نتایج و هزینه محاسباتی بهترین شبکه می باشد. شرط مرزی ورودی، سرعت یکنواخت¹⁰ و در خروجی شرط فشار مشخص¹¹ صفر اعمال شده است. همچنین شرط مرزی دیوارهها شرط

3- معادلات حاكم

معادلات اصلی برای بدست آوردن حوزه سرعت و فشار در نواحی اطراف روتور معادلات پیوستگی و مومنتوم هستند (معادلات (5) و (6)) [14].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = \mathbf{0}$$
(5)

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{u}) + \rho \vec{g} + \vec{F}$$
(6)

در شبیه سازی رو تورهای ساونیوس اغلب فرض می شود که سرعت دورانی رو تورها ثابت است [16،15]. برای مدلسازی آشفتگی از مدل کی امگا اس اس 1 استفاده شده است. مدل کی امگا اس اس 1 می جزء مدلهای دو معادله ای می باشد که در حقیقت ترکیبی از دو مدل کی امگا استاندارد² و معادله ای می بسیلون³ می باشد. مدل کی امگا اس اس تی بطور موثری از قدرت و مدل کی اپسیلون³ می باشد. مدل کی امگا اس اس تی بطور موثری از قدرت و مدل کی ایسیلون³ می باشد. مدل کی امگا اس اس تی بطور موثری از قدرت و مدل کی ایسیلون³ می باشد. مدل کی امگا اس اس تی بطور موثری از قدرت و استقلال مدل کی ایسیلون از خواص آشفتگی جریان ورودی در دوردست بهره می برد. مدل کی امگا استاندارد کی ایسیلون استقلال مدل کی ایسیلون از خواص آشفتگی مریان ورودی در دوردست بهره رفتار می کند و به همین علت از مشکل مدل کی امگا استاندارد که به شدت می به خواص آشفتگی جریان ورودی حساس است رهایی پیدا کرده است. به خواص آشفتگی جریان ورودی حساس است رهایی پیدا کرده است. به مین دلیل مدل کی امگا اس اس تی نسبت به هر دو مدل کی امگا استاندارد و کی ایسیلون ای تقال یکی برای انرژی جنبشی آشفتگی (k) و دیگری برای نرخ اتلاف و معادله می استاندارد که به شدت می نقال یکی برای انرژی جنبشی آشفتگی (k) و دیگری برای نرخ اتلاف و معادله و معادله و کی ایسیلون از عملکرد بهتری برخوردار است (k) و دیگری برای نرخ اتلاف و معادله مخصوص (w) حل می شود [16]:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = G_k + \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} \right] - Y_k$$
(7)

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\omega u_i)}{\partial x_i} = G_\omega + \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \Gamma_\omega \frac{\partial\omega}{\partial x_j} \right\} \right] - Y_\omega + D_\omega$$
(8)

که در آن G_k و G_ω به ترتیب تولید انرژی جنبشی آشفتگی و تولید نرخ اتلاف، F_k و Γ_k معرف پخش انرژی جنبشی و پخش نرخ اتلاف، Y_k و W_k ترم اتلاف k و ω بدلیل آشفتگی میباشد.

4- روش حل عددی

روش حجم محدود برای تبدیل معادلات حاکم به فرم جبری به کار گرفته شده است. سپس معادلات جبری توسط روشهای عددی حل میشوند. گسسته سازی معادلات حاکم با توجه به معادله بقاء نایایا برای کمیت اسکالر

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.6.21.7]

4- Power law
5- Upwind
6- Gauss - Seidel
7- Three Diameter Matrix Algorithm
8- Ansys Fluent
9- Enhanced wall functions
10- Velocity inlet
11- Pressure outlet

مهندسی مکانیک مدرس، شهریور 1394، دوره 15، شماره 6

که به فرم انتگرالی (9) نوشته شده است، انجام می شود [17]: ϕ $\oint \rho \phi_{\nu} dA = \oint \Gamma_{\phi} \nabla_{\phi} dA + \int S_{\phi} dV$ (9) ین این φ میباشند. این V حجم کنترل، v بردار سرعت، Γ_{ϕ} ضریب پخش برای ϕ میباشند. این Vمعادله برای هر حجم کنترل یا سلول محاسباتی در میدان حل بکار برده می-شود. برای یک المان دو بعدی این معادله به شکل (10) نوشته میشود:

SST K-ω Model
 Standard K-ω Model
 K-ε Model





شکل 6 شبکه ایجاد شده و شرایط مرزی

	ز شبکه	لتايج ا	جدول 3 بررسی استقلال ن	
.)	. 1. 7		تمداد البلنيث كه	15

ضریب توان (روتور 2) در	تعداد المان شبكه	شماره شبكه
$\lambda = 0.5$		
0/189	25107	1
0/211	33164	2
0/214	45078	3

پس از حل معادلات توسط نرمافزار و مشخص شدن توزیع سرعت و فشار، گشتاور حاصله با استفاده از حاصلضرب انتگرال فشار روی پره در فاصله شعاعی از محور دوران پره محاسبه گردیده است. در مقاله حاضر برای شبیه-سازی نواحی متحرک و دورانی از روش قاب متحرک¹ 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 شدهاند. مرز بین نواحی ساکن و متحرک بصورت فصل مشترک تعریف شده است.

5- نتايج

نتایج آزمایشگاهی ضریب توان بر حسب نسبت سرعت نوک در عدد رینولدز $10^5 \times 10^5$ برای روتورهای مختلف در شکل 7 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود هر یک از پرهها در یک نسبت سرعت نوک خاص دارای بیشته بن ضرب توان است. با افزایش مقدار همیوشانی اولیه $(\frac{o}{2})$ ، ندخ حیان

باد، منجر به کاهش ضریب توان ماکزیمم شده است. برخلاف مقدار ضریب توان ماکزیمم، در نسبتهای سرعت نوک کوچک و بزرگ، ضریب توان روتور شماره 3 مقادیر بیشتری نسبت به روتور شماره 1 با همپوشانی اولیه صفر دارد (ضریب توان ماکزیمم روتور شماره 1 بیشتر از ضریب توان ماکزیمم روتور شماره 3 است). بطورکلی میتوان بیان کرد که روتور شماره 2 در مجموع، بهترین عملکرد را دارد. همچنین به منظور اعتبارسنجی، نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی روتور شماره 2 مقایسه شده است (شکل8). همانطور که مشاهده میشود تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی برقرار است.

شکل 9 نتایج عددی ضریب توان را در نسبتهای سرعت نوک مختلف برای سه روتور با همپوشانی اولیه یکسان ($\mathbf{c} = \mathbf{0}$) و همپوشانیهای ثانویه مختلف $\frac{s}{c}$ (صفر، 7008 و 70/00-) ارائه می کند. همانطور که مشاهده می-شود ایجاد همپوشانی ثانویه مثبت (فرو رفتن پرهها داخل یکدیگر) و هم-شود ایجاد همپوشانی ثانویه مثبت (فرو رفتن پرهها داخل یکدیگر) و هم-پوشانی ثانویه منفی (فاصله گرفتن پرهها از یکدیگر)، هر دو منجر به کاهش ضریب توان ماکزیمم 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. البته در نسبتهای سرعت نوک کوچک روتور شماره 6 با همپوشانی ثانویه مثبت، نسبت به روتور شماره 2 با همپوشانی ثانویه صفر ضریب توان



شکل 7 نتایج آزمایشگاهی ضریب توان برحسب نسبت سرعت نوک برای روتورهای مختلف





$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \sum_{i$
عبوری از سطح مقعر پره روبروی باد به سطح مقعر پره پشت به باد افزایش
مییابد که این پدیده موجب کاهش عرض پهنای گردابههای روتور و افزایش
سهم سطح مقعر پره پشت به باد از جریان ورودی و در نتیجه بهبود عملکرد
ضریب توان و گشتاور روتور میشود. همانطور که در شکل 7 مشاهده میشود
با افزایش مقدار هم پوشانی اولیه از صفر در روتور شماره 1 به 0/2 در روتور
شماره 2، ضریب توان ماکزیمم افزایش پیدا کرده است، ولی افزایش بیشتر
هم پوشانی اولیه بدلیل کاهش قابل توجه سهم جریان سطح مقعر پره روبروی

1- Moving Reference Frame

مهندسی مکانیک مدرس، شهریور 1394، دوره 15، شماره 6

بیشتری دارد. همچنین در تمام محدوده نسبتهای سرعت نوک، ایجاد هم-پوشانی مثبت نسبت به همپوشانی منفی منجر به تولید ضریب توان بیشتری می شود.

شکل 10 نتایج عددی ضریب توان را در نسبتهای سرعت نوک مختلف برای چهار روتور با هم پوشانی اولیه یکسان (**2.0** = $\frac{0}{c}$) و هم پوشانیهای ثانویه مختلف ($\frac{s}{c}$) به ترتیب 2/0، 8/0/078 و صفر ارائه می کند. همانطور که مشاهده می شود با افزایش هم پوشانی ثانویه (مثبت) از 20/00 تا 2/0، ضریب توان ماکزیمم افزایش پیدا کرده است، ولی نسبت به روتور شماره 2 با هم-پوشانی ثانویه صفر مقادیر کمتری دارند. در نسبتهای سرعت نوک کوچک، افزایش هم پوشانی تأثیر مثبتی بر ضریب توان دارد. در شکلهای 11 تا 14 کانتورهای فشار و خطوط جریان برای روتورهای 2 و 4 در نسبت سرعت نوک پره 1 ارائه شده است.



شکل 9 مقادیر ضریب توان برحسب نسبت سرعت نوک بهازای مقادیر هم پوشانی

ثانويه مختلف



شکل 10 مقادیر ضریب توان برحسب نسبت سرعت نوک بهازای مقادیر هم پوشانی

ثانويه مثبت مختلف





شکل 12 کانتور فشار روتور شماره 4 در نسبت سرعت نوک پره 1



شكل 13 خطوط جريان روتور شماره 2



شكل 14 خطوط جريان روتور شماره 4

در شکلهای 15 و 16 بردارهای سرعت از (دیدگاه ناظر متحرک) برای روتورهای 2 و4 ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود، یک جریان چرخشی در ناحیه بین دو پره ایجاد می گردد که در مورد روتور شماره 4 به علت وجود هم پوشانی ثانویه چرخش جریان بیشتر می باشد و به همین علت

شکل 11 کانتور فشار روتور شماره 2 در نسبت سرعت نوک پره 1

جدایش جریان روی قسمت مقعر پره رو به باد در این روتور زودتر اتفاق می-افتد.

در شکل 17 تأثیر تعداد پره بر ضریب توان در نسبتهای سرعت نوک مختلف بررسی شده است. همانطور که مشاهده می شود، افزایش تعداد پرهها موجب کاهش ضریب توان ماکزیمم می شود زیرا پره پیش رونده، جریان هوایی که باید بر روی پره بعدی تمرکز کند را منحرف می کند و موجب می شود که مقدار کمتری از انرژی جریان هوای متحرک به انرژی مکانیکی تبدیل شود. در نسبتهای سرعت نوک بزرگ نیز به همین صورت ضریب توان کاهش

مہندسی مکانیک مدرس، شہریور 1394، دورہ 15، شمارہ 6

128

یافته ولی در نسبتهای سرعت نوک کوچک اختلاف بین مقادیر ضریب توان در روتورهایی با دو و سه پره ناچیز است. البته باید به این نکته توجه داشت که تعداد بیشتر پره به تولید گشتاور یکنواخت کمک میکند ولی علاوه بر کاهش بازدهی روتور، هزینه ساخت آن را نیز افزایش میدهد.

شکل های 18 و 19 ضریب توان روتورهای 1 و 3 را در اعداد رینولدز مختلف که از دادههای آزمایشگاهی بدست آمدهاند نشان می دهند. همانطور که مشاهده می شود افزایش عدد رینولدز باعث افزایش ضریب راندمان روتور می شود. حداکثر ضریب توان در اعداد نسبت سرعت نوک 8/0 تا 1 اتفاق افتاده است، یعنی زمانیکه سرعت نوک پره تقریبا با سرعت هوای ورودی برابر است که با نتایج محققین قبلی تطابق دارد [20،19].



2 شکل 15 بردارهای سرعت از دید ناظر متحرک مربوط به روتور شماره 2



شکل 16 بردارهای سرعت از دید ناظر متحرک مربوط به روتور شماره 4





مریم امیری و همکاران

شکل 18 ضریب توان تجربی روتور 1 برحسب نسبت سرعت نوک در اعداد رینولدز مختلف



شکل 20 و 21 نتایج تجربی و عددی ضریب گشتاور را بر حسب نسبت سرعت نوک روتور نشان میدهند. همانطور که مشاهده میشود در شکل 20 ضریب گشتاور تجربی روتورهای 2 و3 پس از یک مقدار خاص با افزایش نسبت سرعت نوک کاهش یافته، بدلیل آنکه با افزایش نرخ دوران، سرعت مماسی نوک پرهها از سرعت جریان بیشتر شده و سپس مومنتوم از توربین به جریان هوا منتقل میشود و در نتیجه گشتاور روتور کاهش مییابد، نتایج عددی نیز این مطلب را تأیید میکنند. با افزایش نسبت همپوشانی اولیه از 20 به 2/0 به 2/0 ضریب گشتاور راهاندازی کاهش یافته است. با توجه با بالا بودن گشتاور راهاندازی روتورهای ساونیوس، استفاده از این روتورها در مناطق شهری که دارای سرعت باد کمتری نسبت به مزرعههای بادی هستند،

مناسب به نظر میرسد. البته این توربینها بهتر است در مناطز	
مقیاسهای کوچک مورد استفاده قرار گیرند، زیرا که با بزرگ	
توربین، ارتعاشات سازهای و سروصدای توربین میتواند مزاحمت	
همچنین با افزایش نسبت همپوشانی ثانویه مثبت ضریب گشتاور	
کرده است (شکل 21) و همپوشانی منفی ضریب گشتاور را کاه	
ین روند برای ضریب گشتاور راهاندازی نیز صادق است، یعنے	
سبت ه _م پوشانی ثانویه مثبت، ضریب گشتاور راهاندازی به ه	
فزایش و همپوشانی ثانویه منفی، موجب کاهش ضریب گشتا	
مىشود.	

مهندسی مکانیک مدرس، شهریور 1394، دورہ 15، شمارہ 6



شکل 20 ضریب گشتاور تجربی روتورهای 2 و 3 برحسب نسبت سرعت نوک



شکل 21 نتایج عددی ضریب گشتاور روتورهای مختلف برحسب نسبت سرعت نوک

6- نتيجه گيرى

در این مقاله عملکرد روتورهای مختلف ساونیوس با استفاده از آزمایش تونل باد و همچنین شبیه سازی عددی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج بدست آمده از حل عددی و نمونههای آزمایشگاهی را میتوان بطور خلاصه این چنین بیان کرد:

1- با افزایش مقدار همپوشانی اولیه $\binom{O}{c}$ ، نرخ جریان عبوری از سطح مقعر پره پشت به باد افزایش می-مقعر پره روبروی باد به سطح مقعر پره پشت به باد افزایش می-یابد که این پدیده موجب کاهش عرض پهنای گردابههای روتور و افزایش سهم سطح مقعر پره پشت به باد از جریان ورودی و در

- 2- با توجه به موارد بیان شده در بالا، روتور شماره 2 در مجموع، بهترین عملکرد را دارد و به عنوان بهترین روتور پیشنهادی
 انتخاب می شود.
- 8- هم پوشانی ثانویه مثبت (فرو رفتن پرهها داخل یکدیگر) و هم-پوشانی ثانویه منفی (فاصله گرفتن پرهها از یکدیگر)، هر دو منجر به کاهش ضریب توان ماکزیمم می شود (نسبت به هم پوشانی ثانویه صفر) که این کاهش در هم پوشانی ثانویه منفی بسیار قابل توجه می باشد.
- 4 با افزایش هم پوشانی ثانویه ^s/_c (مثبت) از 0/062 تا 0/2 ضریب توان ماکزیمم افزایش پیدا کرده است، ولی نسبت به روتور شماره
 2 با هم پوشانی ثانویه صفر مقادیر کمتری دارند.
- 5- با افزایش تعداد پره از دو به سه پره ضریب توان ماکزیمم به مقدار قابل توجهای کاهش مییابد.
- 6- با افزایش سرعت هوا که متناظر با افزایش عدد رینولدز است،
 ضریب توان به مقدار قابل توجهی افزایش پیدا می کند.
- 7- حداکثر ضریب توان در نسبت سرعتهای نوک 0/8 تا 1/0
 (سرعت نوک پره نزدیک به سرعت باد) اتفاق میافتد.
- ۳۶- ضریب گشتاور پس از یک مقدار خاص با افزایش نسبت سرعت نوک کاهش مییابد. همچنین با افزایش نسبت همپوشانی ثانویه مثبت، ضریب گشتاور افزایش مییابد و همپوشانی منفی ضریب گشتاور راهاندازی قشتاور را کاهش میدهد. این روند برای ضریب گشتاور راهاندازی نیز صادق میباشد.

7- فهرست علائم

0

 \overline{C}

ضريب گشتاور	C _M
ضريب توان	C_p
قطر پرہ (cm)	С
قطر روتور (cm)	D
ارتفاع روتور (cm)	h
انرژی جنبشی آشفتگی (m ²/s²)	k
همپوشانی اولیه (cm)	0
عدد پکلت	Ре
عدد رينولدز	Re
همپوشانی ثانویه (cm)	S
گشتاور (N.m)	Т
سرعت نوک پرہ (m/s)	u
سرعت باد (m/s)	V

هم پوشانی اولیه بی بعد شده به قطر پره

۵	$\frac{S}{C}$	نتیجه بهبود عملکرد ضریب توان و گشتاور روتور میشود، ولی
م يونانى	علاي	افزايش بيشتر همپوشانى اوليه بدليل كاهش قابل توجه سهم
	$\Gamma_{oldsymbol{\phi}}$	جریان سطح مقعر پره روبروی باد، منجر به کاهش ضریب توان
i	λ	ماکزیمم شده است. بنابراین با افزایش مقدار هم پوشانی اولیه $\left(rac{o}{c} ight)$
-	ρ	از صفر به 0/2 ، ضریب توان ماکزیمم افزایش پیدا کرده است،
5	ϕ	ولی افزایش بیشتر همپوشانی اولیه منجر به کاهش ضریب توان
ى	ω	ماکزیمم شده است.

مهندسی مکانیک مدرس، شهریور 1394، دوره 15، شما*ر*ه 6

پرہ

مریم امیری و همکاران

بررسی عددی و تجربی اثر میزان همپوشانی اولیه و ثانویه بر عملکرد توربین بادی ساونیوس

- [11] J. V. Akwa, *Savonius win turbine aerodynamics analysis using computational fluid dynamics*, MSc dissertation, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil, 2010.
- [12] Evaluation of measurement data, Guide to the expression of uncertainty in measurement, 1995.
- [13] 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, pp. 3054-3064, 2012.
- [14] Ansys Fluent 12.0, Theory Guide, 2009.
- [15] B. C. Cochran, D. Banks, S. J. Taylor, A three-tiered approach for designing and evaluating performance characteristics of novel WECS, *in Proceedings of the 23rd ASME Wind Engineering Symposium*, AIAA, Reno, Nevada, pp. 1362, 2004.
- [16] T. Kawamura, T. Hayashi, K. Miyasha, Application of the domain decomposition method to flow around the Savonius rotor, *12th International Conference on Domain Decomposition Methods*, 1998.
- [17] J. A. Kozlowski, Savonius rotor construction vertical axis wind machines from oil drums, VITA, Inc., USA, 1997.
- [18] S. V. Patankar, *Numerical heat transfer and fluid flow*, John Benjamins publishing, 1980.
- [19] T. Hayashi, Y. Li, Y. Hara, K. Suzuki, Wind tunnel tests on a three-stage out-phase Savonius rotor, *JSME International Journal*, Vol. 48, No. 1, pp. 9-16. 2005.
- [20] J. Menet, N. Bourabaa, Increase in the Savonius rotors efficiency via a parametric investigation, *European Wind Energy conference & exhibition*, London, UK, 2004.

- [1] H. M. Manzoor, S. M. Nawazish, P. R. Ram, CFD analysis of low speed vertical axis wind turbine with twisted blades, Int. *J Applied Engineering Research*, Vol 3, No. 1, pp. 149-159, 2008.
- [2] J. Moharrampour, *Optimization of wind energy and its applications in construction of Savonius rotors*, MS thesis, Ferdowsi university of Mashhad, Mashhad, Iran. 2001.
- [3] A. H. Benesh, *Wind turbine with Savonius-type rotor*, United States Patent 4,784,654, November 1988.
- [4] A. Burcin Deda, A. Mehmet, The use of a curtain design to increase the performance level of a Savonius wind rotors, *Renewable Energy*, Vol. 35, pp. 821-829.2009.
- [5] A. Burcin Deda ,A. Mehmet, Z. Aydogan, An experimental study on improvement of a Savonius rotor performance with curtaining, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32, pp. 1673–1678, 2008.
- [6] K. Irabu, J. Nath Roy, Characteristics of wind power on Savonius rotor using a guide-box tunnel, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32, pp. 580–586, 2007.
- [7] U. K. Saha, M. Jaya Rajkumar, On the performance analysis of Savonius rotor with twisted blades, *Renewable Energy*, Vol. 31, pp. 1776–1788, 2006.
- [8] M. A. Kamoji, S. B. Kedare, S. V. Prabhu, Performance tests on helical Savonius rotors, *Renewable Energy*, Vol. 34, pp. 521–529, 2009.
- [9] U. K. Saha S. Thotla D. Maity, Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments, *J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, pp. 1359–1375, 2008.
- [10] B. F. Blackwell, R. E. Sheldahl, L. V. Feltz, Wind tunnel performance data for two and three bucketsavonius rotors, *Sandia Laboratories*, USA. Sand 76-0131, pp. 789, 1978.

8- مراجع

131

مهندسی مکانیک مدرس، شهریور 1394، دورہ 15، شمارہ 6