



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

مریم امیری¹، محسن کهرم²، علی کیانی‌فر^{3*}

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 پستی 9177948944، a-kiani@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 01 اسفند 1393

پذیرش: 14 اسفند 1393

ارائه در سایت: 01 اردیبهشت 1394

کلید واژگان:

روتور ساوونیوس

هم‌پوشانی اولیه

هم‌پوشانی ثانویه

ضریب توان

چکیده

توربین‌های بادی ساوونیوس 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 ساوینیوس پرداخته شده است. هشت روتور مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند که سه روتور بصورت آزمایشگاهی و هر هشت روتور بصورت 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 0/8 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) 0/2 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 ساوینیوس باعث ایجاد گشتاور تولیدی یکنواخت‌تری می‌گردد، اما ضریب توان حداکثر روتور را کاهش می‌دهد. با افزایش نسبت هم‌پوشانی ثانویه مثبت، ضریب گشتاور افزایش می‌یابد و هم‌پوشانی منفی ضریب گشتاور را کاهش می‌دهد.

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

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

ABSTRACT

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.

1- مقدمه

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 توربین‌ها، در جریان پایا و یکنواخت و برای کارکرد طولانی مدت مناسب می‌-

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 می‌شود 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

Please cite this article using:

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

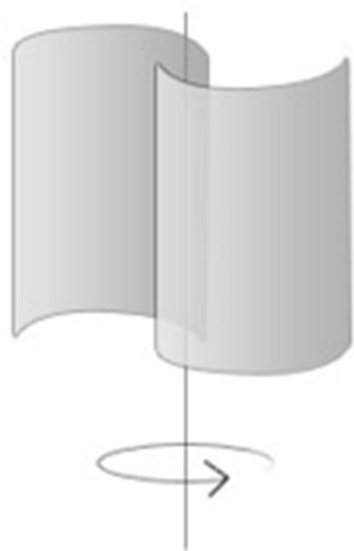
نیم دایره می‌باشد. ساها و همکارانش [9] نشان دادند استفاده از دریچه⁴ منجر به افزایش ضریب توان میانگین می‌شود، در صورتیکه این دریچه‌ها فقط هنگامی باز شوند که جریان هوا را از سطح محدب پره به سطح مقعر عبور دهند. بلک‌ول و همکارانش [10] تأثیر افزایش عدد رینولدز بر جدایش لایه مرزی بر روی پره‌های روتور را مورد 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 ساوینیوس، 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 شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی به بررسی اثر همزمان میزان هم‌پوشانی اولیه و ثانویه (مشخص شده در شکل 2) بر عملکرد یک توربین بادی ساوینیوس 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 هم‌پوشانی‌های مختلف بدست آمده است. تمامی مدل‌های تست شده دارای ابعاد یکسان هستند و تنها تفاوت آن‌ها با هم، در اندازه هم‌پوشانی آن‌ها است. بعلاوه، اثر عدد رینولدز و تعداد پره نیز به منظور یافتن تعداد بهینه پره روتور مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تمامی روتورها با استفاده از شبیه‌سازی عددی نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

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 ساوینیوس

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 در جهت 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 ویژه‌ای برخوردار است [1].

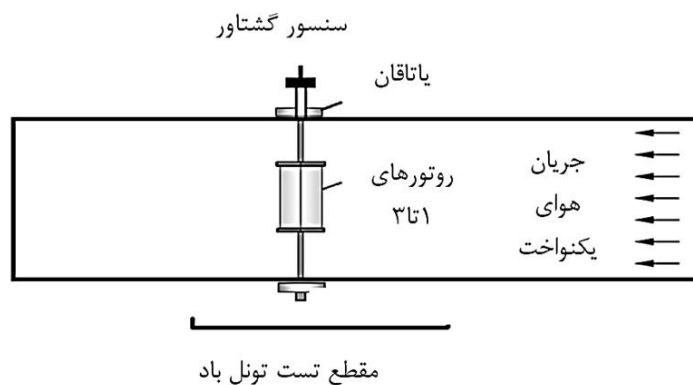
یکی از طراحی‌های بسیار رایج از توربین‌های محور قائم روتورهای ساوینیوس¹ هستند که از دو پره نیمه استوانه‌ای با مقطع نیم دایره تشکیل شده‌اند. شکل 1 نمایی از یک روتور ساوینیوس را نشان می‌دهد.

واضح است که عامل حرکت در روتورهای ساوینیوس بیشتر بودن ضریب پسای نیمه مقعر نسبت به نیمه محدب است. ابعاد اصلی مشخص‌کننده منحنی یک روتور ساوینیوس با مقطع نیم دایره در شکل 2 نشان داده شده است، لازم بذکر است که هم‌پوشانی ثانویه مثبت (فرو رفتن پره‌ها داخل یکدیگر) و هم‌پوشانی ثانویه منفی (فاصله گرفتن پره‌ها از یکدیگر) می‌باشد، شکل 2 نمونه‌ای از هم‌پوشانی ثانویه منفی می‌باشد.

تاکنون مطالعات فراوانی بر روی منحنی روتورهای ساوینیوس 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 [4,5] 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 تیغه محافظ را بررسی کرده و طول بهینه تیغه محافظ که 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 ساوینیوس 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 توربین‌های 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 پره را با پره‌های 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 پره‌های بدون پیچش دارند. کاموجیا و همکارانش [8] به منظور کم کردن نوسانات ضریب گشتاور ایستایی که در روتورهای ساوینیوس بدون پیچش سنتی وجود دارد، آزمایشاتی را بر روی روتورهای ساوینیوس 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

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

4- Valve



شکل 4 شماتیک تونل باد

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

تمامی تست‌ها در شرایط یکسان و با سرعت هوا در بازه 8 تا 14 متر بر ثانیه انجام شده است. با تغییر اندازه هم‌پوشانی، قطر روتور نیز تغییر خواهد کرد، ولی بدلیل اینکه تست‌ها بر مبنای عدد رینولدز ثابت انجام شده است، بدیهی است که با تغییر اندازه هم‌پوشانی 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]:

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

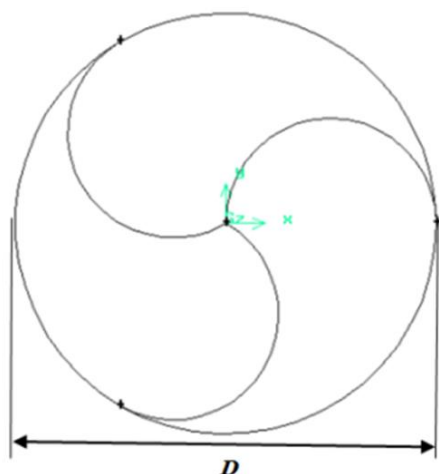
$$C_P = \frac{2T\omega}{\rho V^3 h D} \quad (2)$$

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} \quad (3)$$

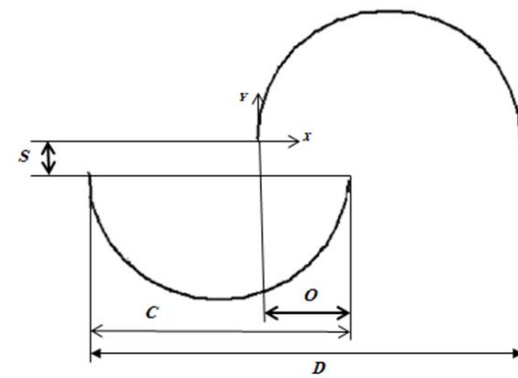
$$C_M = \frac{C_P}{\lambda} \quad (4)$$

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

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



شکل 5 روتور سه پره (شماره 8)



شکل 2 ابعاد اصلی روتور ساوینیوس (D قطر روتور، C قطر پره، O هم‌پوشانی اولیه و S هم‌پوشانی ثانویه) - هم‌پوشانی ثانویه مثبت (فرو رفتن پره‌ها داخل یکدیگر) و هم‌پوشانی ثانویه منفی (فاصله گرفتن پره‌ها از یکدیگر)

جدول 1 اطلاعات هندسی روتورها

شماره روتور	هم‌پوشانی اولیه (O) (cm)	هم‌پوشانی ثانویه (S) (cm)	قطر پره (C) (cm)	قطر روتور (D) (cm)	تعداد پره
1	0	0	16	32	2
2	3/2	0	16	28/8	2
3	6/4	0	16	25/6	2
4	3/2	3/2	16	28/8	2
5	3/2	-1/25	16	28/8	2
6	3/2	1/25	16	28/8	2
7	3/2	1	16	28/8	2
8	0	0	16	32	3



روتور شماره 1



روتور شماره 2



روتور شماره 3

شکل 3 روتورهای مورد بررسی

گشتاور روتور و سرعت هوا به ترتیب با استفاده از یک سنسور اندازه‌گیری گشتاور و یک بادسنج چند منظوره اندازه‌گیری شده است. سنسور گشتاور از نوع ایمادا¹ با بازه اندازه‌گیری گشتاور بین صفر تا 10 نیوتن - متر بوده و دقت اندازه‌گیری آن 0/5 \pm می‌باشد. در تمامی آزمایش‌های انجام شده، اندازه‌گیری‌ها چهار مرتبه تکرار شده‌اند و تکرارپذیری نتایج 95% بوده است. سرعت

جدول 2 عدم قطعیت ابزار

کمیت	ابزار اندازه‌گیری	دقت	عدم قطعیت
گشتاور روتور	سنسور اندازه‌گیری گشتاور (ایمادا)	$\pm 0.5\%$ نیوتن - متر	0/001
سرعت هوا	بادسنج تستو 435	± 0.2 متر بر ثانیه	0/057
سرعت دورانی روتور	دورسنج نوری تستو 465	± 0.2 متر بر ثانیه	0/057

3- معادلات حاکم

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

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

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

در شبیه‌سازی روتورهای ساوینوس اغلب فرض می‌شود که سرعت دورانی روتورها ثابت است [15، 16]. برای مدلسازی آشفستگی 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 بطور موثری از قدرت و دقت فرمولاسیون مدل کی امگا استاندارد در نزدیکی دیواره‌ها و همچنین از استقلال مدل کی اپسیلون از خواص آشفستگی 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 آشفستگی 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 [14]. در این مدل دو معادله انتقال یکی برای انرژی جنبشی آشفستگی (k) و دیگری برای نرخ اتلاف مخصوص (ω) حل می‌شود [16]:

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

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

که در آن G_k و G_ω به ترتیب تولید انرژی جنبشی آشفستگی و تولید نرخ اتلاف، Γ_k و Γ_ω معرف پخش انرژی جنبشی و پخش نرخ اتلاف، Y_k و Y_ω ترم اتلاف k و ω بدلیل آشفستگی 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. گسسته‌سازی معادلات حاکم با توجه به معادله بقاء ناپایا برای کمیت اسکالر ϕ که به فرم انتگرالی (9) نوشته شده است، انجام می‌شود [17]:

$$\oint \rho \phi_v dA = \oint \Gamma_\phi \nabla \phi dA + \int S_\phi dV \quad (9)$$

V حجم کنترل، v بردار سرعت، Γ_ϕ ضریب پخش برای ϕ می‌باشند. این معادله برای هر حجم کنترل یا سلول محاسباتی در میدان حل بکار برده می‌شود. برای یک المان دو بعدی این معادله به شکل (10) نوشته می‌شود:

$$\sum_f^{N_{\text{faces}}} v_f \phi_f A_f = \sum_f^{N_{\text{faces}}} \Gamma_\phi (\nabla \phi)_n A_f + S_\phi V \quad (10)$$

v_f شار جرمی از سطح، ϕ_f مقدار کمیت ϕ انتقال یافته از سطح f و A_f مساحت سطح f می‌باشد. مقادیر شارهای جابجایی و پخش باید در مرکز هر المان محاسبه شود، که توسط روش توانی⁴ انجام می‌شود [16]. در این روش مقادیر متغیر ϕ بوسیله حل دقیق معادله یک بعدی جابجایی-پخش (11) و (12) بدست می‌آید [17]:

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

$$\frac{\phi(x) - \phi_0}{\phi_L - \phi_0} = \frac{\exp(\text{Pe}(x/L)) - 1}{\exp(\text{Pe}) - 1} \quad (12)$$

Pe عدد پکلت می‌باشد. گسسته‌سازی جملات توسط الگوریتم مرتبه دوم بالادست⁵ تعیین و بوسیله یک روش خطی (روش گاوس سایدل⁶ بعلاوه الگوریتم ماتریس سه قطری⁷) حل می‌شوند [18].

در مقاله حاضر معادلات حاکم با استفاده از نرم افزار انسیس فلونت⁸ حل شده‌اند. مدل دو بعدی از هریک از پره‌ها در نرم‌افزار گمیت 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 آشفستگی کی امگا اس اس تی در نرم‌افزار انسیس فلونت بطور پیش فرض از توابع دیواره بهبود یافته⁹ استفاده می‌کند و به همین دلیل حساسیت بسیار کمتری نسبت به مدل‌های آشفستگی 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 می‌شود شبکه در نزدیکی پره به دلیل مهم بودن گرادیان‌های سرعت در این ناحیه ریز شده است و مقدار y^+ برای شبکه مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها در عدد رینولدز $1/5 \times 10^5$ برابر با 0/7 می‌باشد. استقلال نتایج از شبکه با مقایسه ضریب توان روتور شماره 2 در نسبت سرعت نوک 0/5 مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در جدول 3 مشاهده می‌شود شبکه دوم که در آن حوزه محاسباتی به 33164 تعداد سلول تقسیم بندی شده است از لحاظ دقت نتایج و هزینه محاسباتی بهترین شبکه می‌باشد. شرط مرزی ورودی، سرعت یکنواخت¹⁰ و در خروجی شرط فشار مشخص¹¹ صفر اعمال شده است. همچنین شرط مرزی دیواره‌ها شرط مرزی عدم لغزش می‌باشد.

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

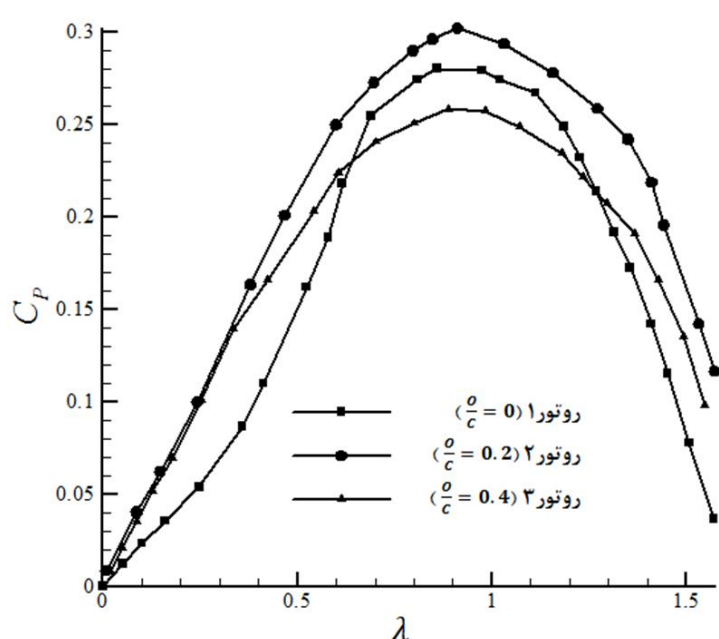
1- SST K- ω Model

2- Standard K- ω Model

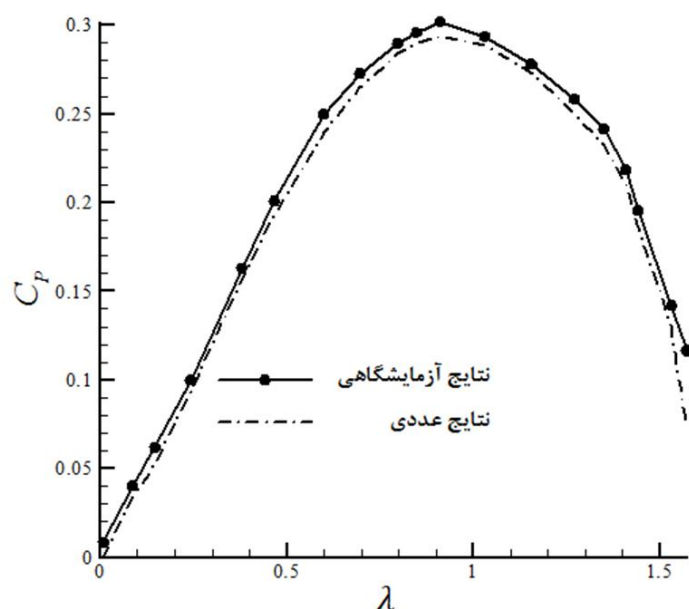
3- K- ϵ Model

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). بطور کلی 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 (شکل 8). 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 ($\frac{0}{c} = 0.2$) و هم‌پوشانی‌های ثانویه مختلف $\frac{s}{c}$ (صفر، 0/078 و -0/078) ارائه می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود 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 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

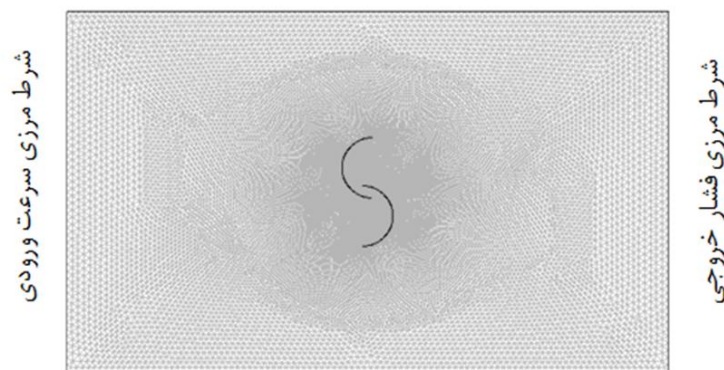


شکل 7 نتایج آزمایشگاهی ضریب توان بر حسب نسبت سرعت نوک برای روتورهای مختلف

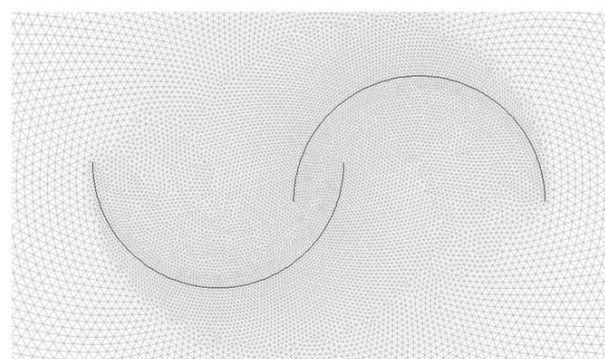


شکل 8 اعتبارسنجی حل عددی (مربوط به روتور شماره 2)

شرط مرزی دیوار



شرط مرزی دیوار



شکل 6 شبکه ایجاد شده و شرایط مرزی

جدول 3 بررسی استقلال نتایج از شبکه

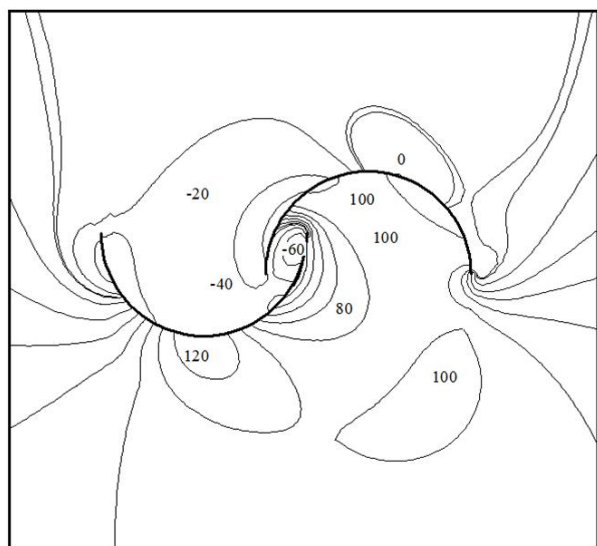
شماره شبکه	تعداد المان شبکه	ضریب توان (روتور 2) در $\lambda = 0.5$
1	25107	0/189
2	33164	0/211
3	45078	0/214

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 شبیه‌سازی 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.

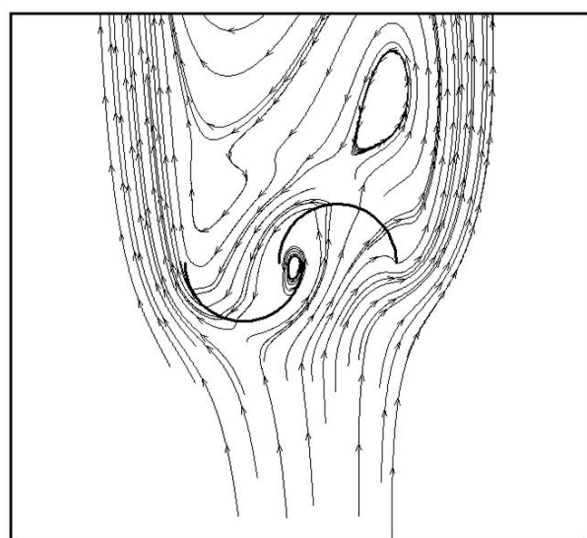
5- نتایج

نتایج آزمایشگاهی ضریب توان بر حسب نسبت سرعت نوک در عدد رینولدز $1/5 \times 10^5$ برای روتورهای مختلف در شکل 7 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود هر یک از پره‌ها در یک نسبت سرعت نوک خاص دارای بیشترین ضریب توان است. با افزایش مقدار هم‌پوشانی اولیه ($\frac{0}{c}$)، نرخ جریان 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 هم‌پوشانی اولیه از صفر در روتور شماره 1 به 0/2 در روتور شماره 2، ضریب توان ماکزیمم افزایش پیدا کرده است، ولی افزایش بیشتر هم‌پوشانی اولیه بدلیل کاهش قابل توجه سهم جریان سطح مقعر پره روبروی

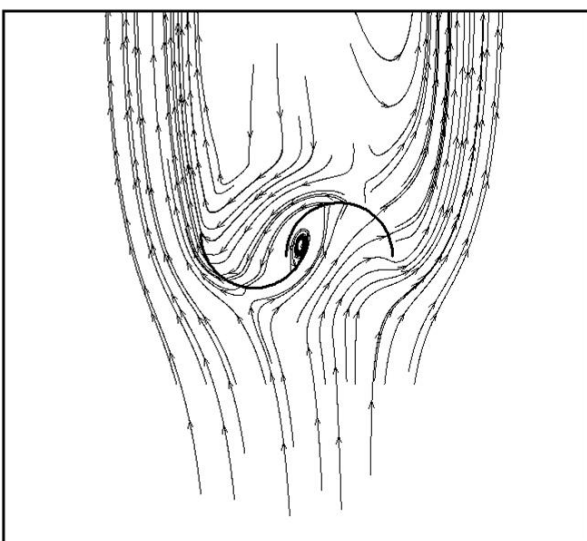
1- Moving Reference Frame



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



شکل 13 خطوط جریان روتور شماره 2



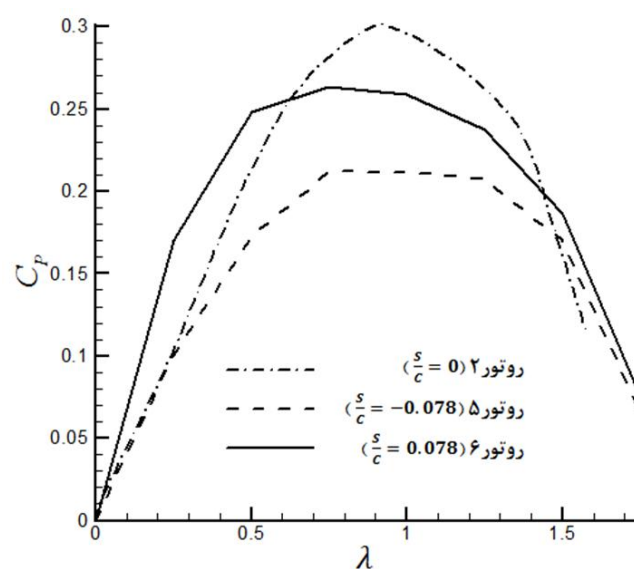
شکل 14 خطوط جریان روتور شماره 4

در شکل‌های 15 و 16 بردارهای سرعت از (دیدگاه ناظر متحرک) برای روتورهای 2 و 4 ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، یک جریان چرخشی در ناحیه بین دو پره ایجاد می‌گردد که در مورد روتور شماره 4 به علت وجود هم‌پوشانی ثانویه چرخش جریان بیشتر می‌باشد و به همین علت جدایش جریان روی قسمت مقعر پره رو به باد در این روتور زودتر اتفاق می‌افتد.

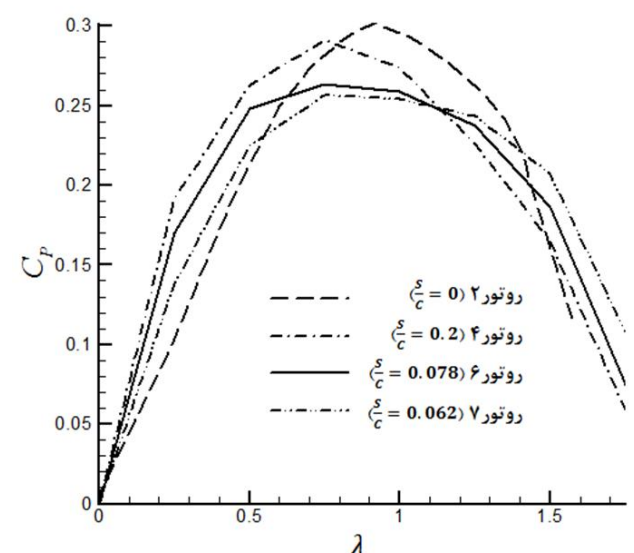
در شکل 17 تأثیر تعداد پره بر ضریب توان در نسبت‌های سرعت نوک مختلف بررسی شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش تعداد پره‌ها موجب کاهش ضریب توان ماکزیمم می‌شود زیرا پره پیش‌رونده، جریان هوایی که باید بر روی پره بعدی تمرکز کند را منحرف می‌کند و موجب می‌شود که مقدار کمتری از انرژی جریان هوای متحرک به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

بیشتری دارد. همچنین در تمام محدوده نسبت‌های سرعت نوک، ایجاد هم‌پوشانی مثبت نسبت به هم‌پوشانی منفی منجر به تولید ضریب توان بیشتری می‌شود.

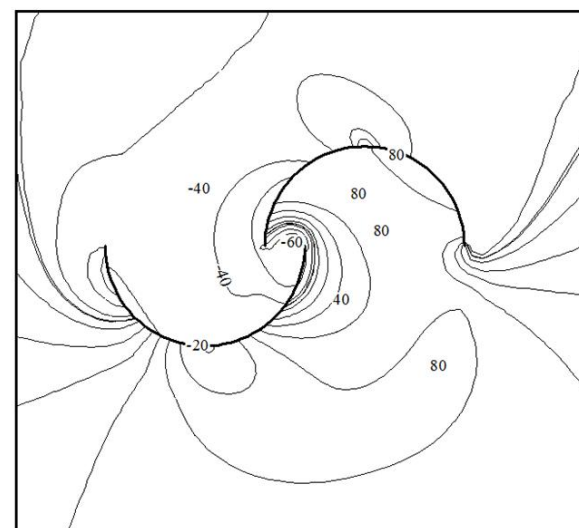
شکل 10 نتایج عددی ضریب توان را در نسبت‌های سرعت نوک مختلف برای چهار روتور با هم‌پوشانی اولیه یکسان ($\frac{\theta}{c} = 0.2$) و هم‌پوشانی‌های ثانویه مختلف ($\frac{\xi}{c}$) به ترتیب 0/2، 0/078، 0/062 و صفر ارائه می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش هم‌پوشانی ثانویه (مثبت) از 0/062 تا 0/2، ضریب توان ماکزیمم افزایش پیدا کرده است، ولی نسبت به روتور شماره 2 با هم‌پوشانی ثانویه صفر مقادیر کمتری دارند. در نسبت‌های سرعت نوک کوچک، افزایش هم‌پوشانی 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.



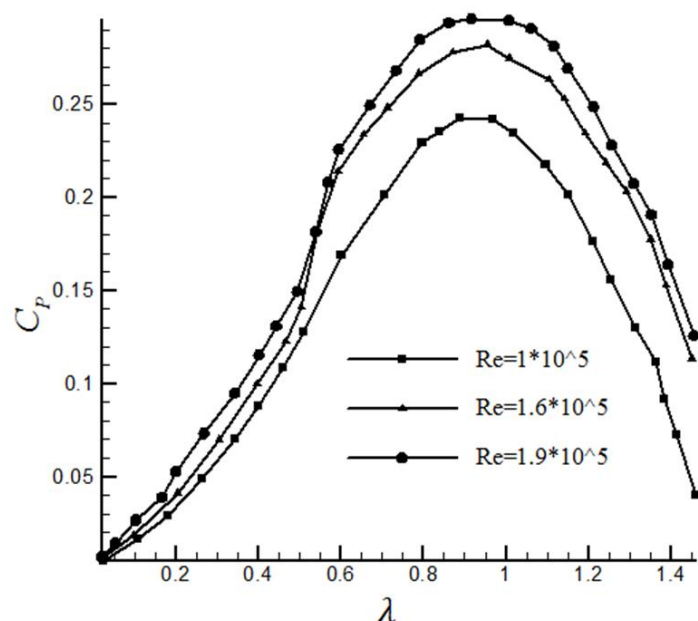
شکل 9 مقادیر ضریب توان برحسب نسبت سرعت نوک به‌ازای مقادیر هم‌پوشانی ثانویه مختلف



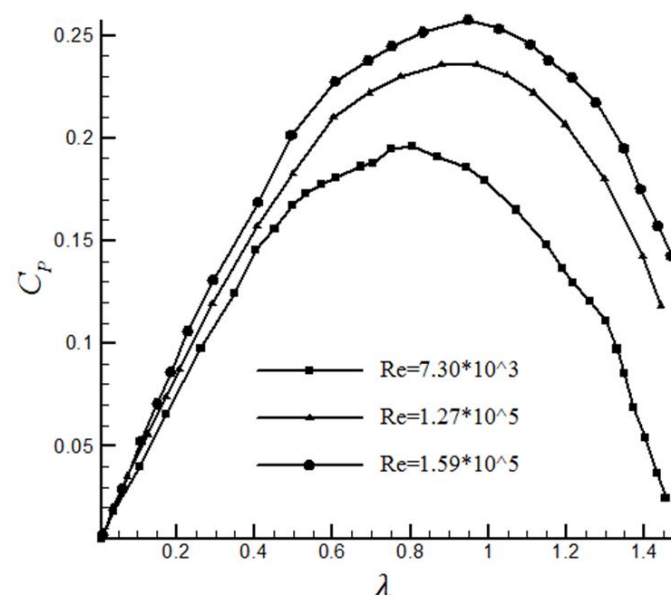
شکل 10 مقادیر ضریب توان برحسب نسبت سرعت نوک به‌ازای مقادیر هم‌پوشانی ثانویه مثبت مختلف



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



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

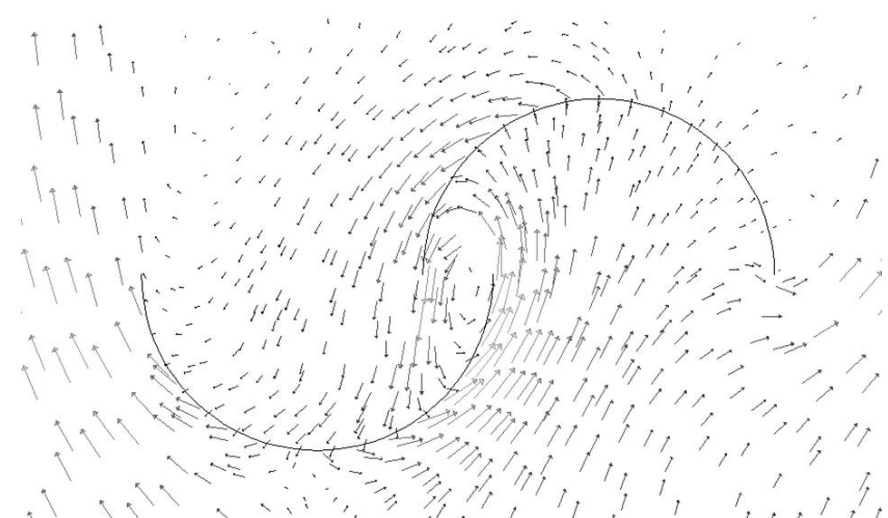


شکل 19 ضریب توان تجربی روتور 3 بر حسب نسبت سرعت نوک در اعداد رینولدز مختلف

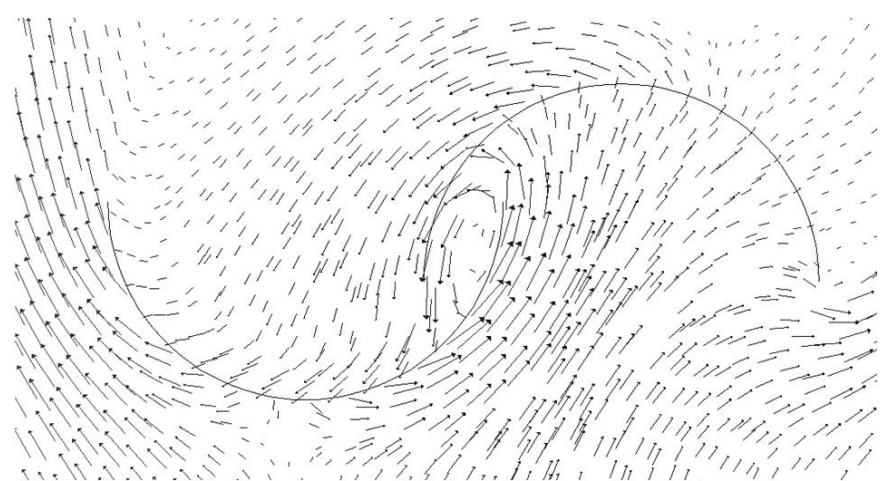
شکل 20 و 21 نتایج تجربی و عددی ضریب گشتاور را بر حسب نسبت سرعت نوک روتور نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود در شکل 20 ضریب گشتاور تجربی روتورهای 2 و 3 پس از یک مقدار خاص با افزایش نسبت سرعت نوک کاهش یافته، بدلیل آنکه با افزایش نرخ دوران، سرعت مماسی نوک پره‌ها از سرعت جریان بیشتر شده و سپس مومنوم 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 0/2 به 0/4 ضریب گشتاور راه‌اندازی کاهش یافته است. با توجه به بالا بودن گشتاور راه‌اندازی روتورهای ساوینوس، 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 مناطق شهری در مقیاس‌های کوچک مورد استفاده قرار گیرند، زیرا که با بزرگ شدن ابعاد توربین، ارتعاشات سازه‌ای و سروصدای توربین می‌تواند مزاحمت ایجاد کند. همچنین با افزایش نسبت هم‌پوشانی ثانویه مثبت ضریب گشتاور افزایش پیدا کرده است (شکل 21) و هم‌پوشانی منفی ضریب گشتاور را کاهش می‌دهد. این روند برای ضریب گشتاور راه‌اندازی نیز صادق است، یعنی با افزایش نسبت هم‌پوشانی ثانویه مثبت، ضریب گشتاور راه‌اندازی به میزان زیادی افزایش و هم‌پوشانی ثانویه منفی، موجب کاهش ضریب گشتاور راه‌اندازی می‌شود.

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.

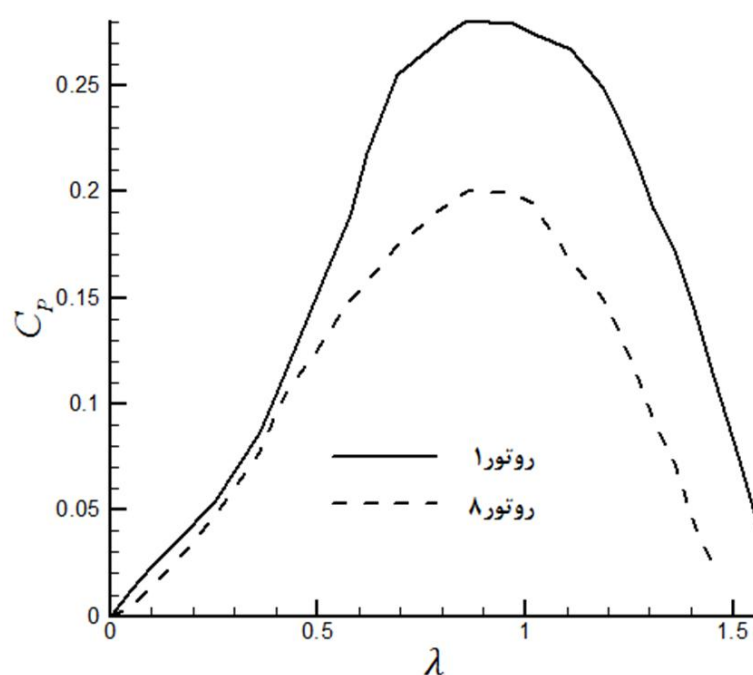
شکل های 18 و 19 ضریب توان روتورهای 1 و 3 را در اعداد رینولدز مختلف که از داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده‌اند نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود افزایش عدد رینولدز باعث افزایش ضریب راندمان روتور می‌شود. حداکثر ضریب توان در اعداد نسبت سرعت نوک 0/8 تا 1 اتفاق افتاده است، یعنی زمانی که سرعت نوک پره تقریباً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



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



شکل 17 تأثیر تعداد پره بر ضریب توان

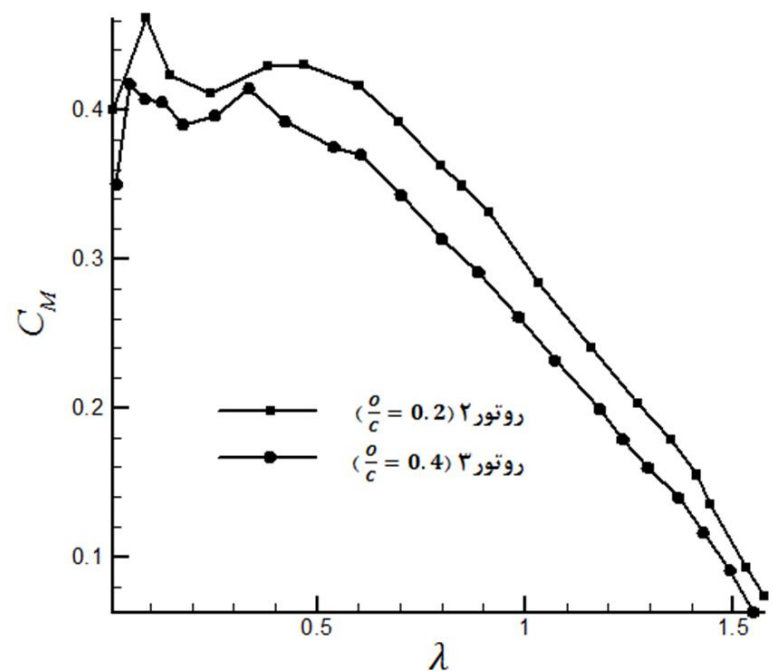
- 2- با توجه به موارد بیان شده در بالا، روتور شماره 2 در مجموع، بهترین عملکرد را دارد و به عنوان بهترین روتور پیشنهادی انتخاب می شود.
- 3- هم پوشانی ثانویه مثبت (فرو رفتن پره ها داخل یکدیگر) و هم پوشانی ثانویه منفی (فاصله گرفتن پره ها از یکدیگر)، هر دو منجر به کاهش ضریب توان ماکزیمم می شود (نسبت به هم پوشانی ثانویه صفر) که این کاهش در هم پوشانی ثانویه منفی بسیار قابل توجه می باشد.
- 4- با افزایش هم پوشانی ثانویه $\frac{S}{C}$ (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 توجهی کاهش می یابد.
- 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 سرعت های نوک 0/8 تا 1/0 (سرعت نوک پره نزدیک به سرعت باد) اتفاق می افتد.
- 8- ضریب گشتاور پس از یک مقدار خاص با افزایش نسبت سرعت نوک کاهش می یابد. همچنین با افزایش نسبت هم پوشانی ثانویه مثبت، ضریب گشتاور افزایش می یابد و هم پوشانی منفی ضریب گشتاور را کاهش می دهد. این روند برای ضریب گشتاور راه اندازی نیز صادق می باشد.

7- فهرست علائم

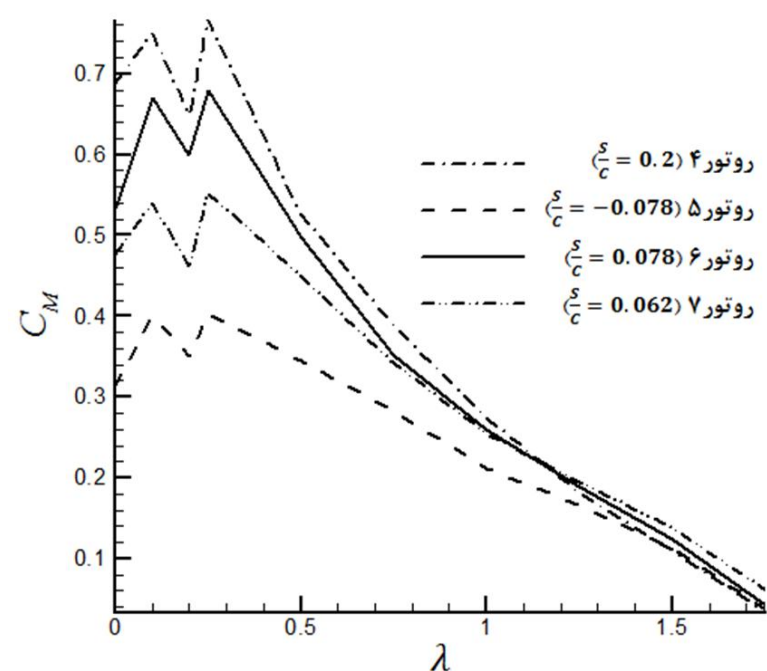
C_M	ضریب گشتاور
C_P	ضریب توان
C	قطر پره (cm)
D	قطر روتور (cm)
h	ارتفاع روتور (cm)
k	انرژی جنبشی آشفتگی (m^2/s^2)
O	هم پوشانی اولیه (cm)
Pe	عدد پکلت
Re	عدد رینولدز
S	هم پوشانی ثانویه (cm)
T	گشتاور (N.m)
u	سرعت نوک پره (m/s)
V	سرعت باد (m/s)
$\frac{O}{C}$	هم پوشانی اولیه بی بعد شده به قطر پره
$\frac{S}{C}$	هم پوشانی ثانویه بی بعد شده به قطر پره

علائم یونانی

Γ_ϕ	ضریب پخش ϕ
λ	نسبت سرعت نوک پره
ρ	چگالی (kg/m^3)
ϕ	کمیت اسکالر
ω	سرعت دورانی (rad/s)



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- نتیجه گیری

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

- 1- با افزایش مقدار هم پوشانی اولیه ($\frac{O}{C}$)، نرخ جریان عبوری از سطح مقعر پره روبروی باد به سطح مقعر پره پشت به باد افزایش می یابد که این پدیده موجب کاهش عرض پهنای گردابه های روتور و افزایش سهم سطح مقعر پره پشت به باد از جریان ورودی و در نتیجه بهبود عملکرد ضریب توان و گشتاور روتور می شود، ولی افزایش بیشتر هم پوشانی اولیه بدلیل کاهش قابل توجه سهم جریان سطح مقعر پره روبروی باد، منجر به کاهش ضریب توان ماکزیمم شده است. بنابراین با افزایش مقدار هم پوشانی اولیه ($\frac{O}{C}$) از صفر به 0/2، ضریب توان ماکزیمم افزایش پیدا کرده است، ولی افزایش بیشتر هم پوشانی اولیه منجر به کاهش ضریب توان ماکزیمم شده است.

8- مراجع

- [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.