

بررسی عددی و تجربی تأثیر نسبت همپوشانی بر عملکرد توربین بادی خانگی

جابر حسینزاده گروی¹، مهران نصرت‌الهی²، مصطفی محمودی³

¹ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران

j.h.gervi@stu.nit.ac.ir

² استادیار مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

nosratolahy@mut.ac.ir

³ استادیار مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

mostafamahmoodi@engineer.com

چکیده: تولید انرژی الکتریسیته از منابع تجدیدپذیر، به‌خصوص انرژی باد در مناطق شهری، موضوع مورد بررسی بسیاری از محققان است. روتور ساوینوس (Savonius) قابلیت بالایی در تولید برق برای مناطق شهری و مصارف خانگی دارد. در مقاله حاضر، تأثیر نسبت همپوشانی بر عملکرد روتور ساوینوس مطالعه شده است. بدین منظور، بررسی عددی در پنج نسبت همپوشانی 0.10، 0.20، 0.30 و 0.40 درصد انجام شده است. ارتفاع روتور مورد نظر 1 متر و قطر روتور 0/7 متر است. شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار فلونت (Fluent) انجام شده و مدل RNG k-ε برای تحلیل آشفتگی انتخاب شده است. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که بهترین انتخاب نسبت همپوشانی 20 درصد است. بر این اساس مدل آزمایشگاهی با نسبت همپوشانی 20 درصد ساخته شده و نتایج آن با مدل عددی مقایسه شده است.

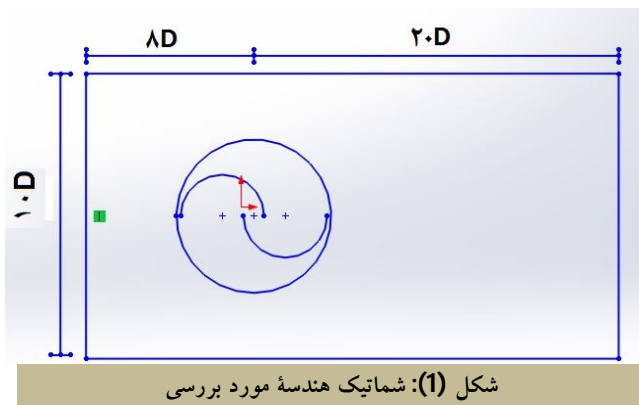
واژه‌های کلیدی: روتور ساوینوس، نسبت همپوشانی، CFD، توان خروجی.

1. مقدمه

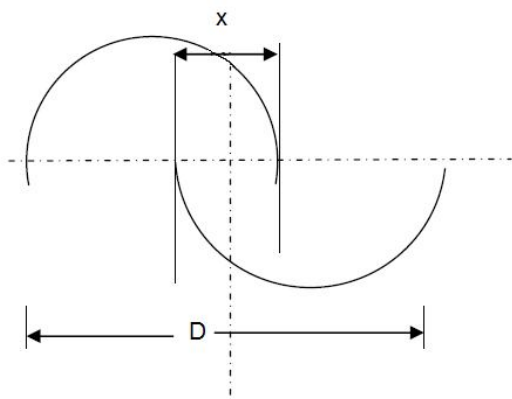
می‌شود [8]. در این پژوهش، یک روتور ساوینوس با نسبت همپوشانی بررسی شده است. بهترین نسبت همپوشانی با استفاده از روش عددی انتخاب شده و شکل نهایی به صورت آزمایشگاهی ساخته شده و مورد تست قرار گرفته است.

2. هندسه مورد بررسی

در این تحقیق، روتور مورد بررسی از نوع ساوینوس است. توربین‌های بادی ساوینوس برای کاربرد خانگی و تولید بخشی از انرژی لازم مناسب هستند. این توربین‌ها با نیروی درگی که به نیم استوانه رو به جریان وارد می‌شود، حرکت می‌کنند [9]. در شکل (1)، شماتیک روتور توربین مورد نظر نشان داده شده است. برای شبیه‌سازی از یک پره، یک نیم استوانه به قطر 39cm استفاده شده است. مشخصات پره از دیوار نیز در این شکل نشان داده شده است.



یکی از پارامترهایی که تأثیر زیادی بر عملکرد این نوع روتورها دارد، نسبت همپوشانی این روتورهاست. نسبت همپوشانی (X/D) ، عبارت است از نسبت قسمتی از پره‌ها که روی هم قرار می‌گیرد بر قطر پره. (شکل 2).

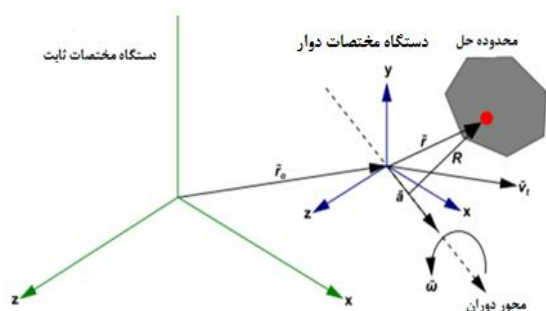


انرژی باد یکی از انرژی‌های تجدیدپذیری است که از آن برای تولید انرژی الکتریسیته در مناطق شهری و برای کاربرد خانگی استفاده می‌شود. این انرژی به دلیل عدم آلودگی و هزینه کم مورد توجه محققان قرار دارد. برای استحصال انرژی بادی در مناطق شهری، می‌بایست از توربین‌های بادی استفاده شود که قابلیت تولید برق در شرایط جوی شهری و جریان هوای دارای سرعت کم و تلاطم زیاد را داشته باشد.

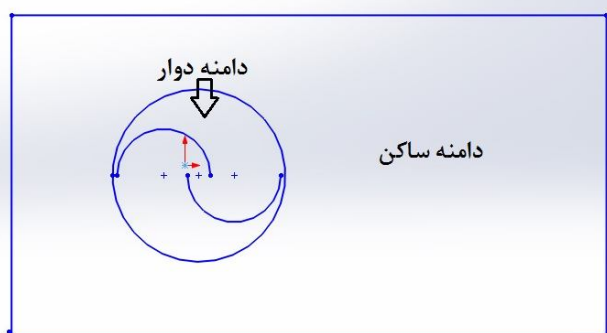
دو نوع توربین بادی وجود دارد: توربین بادی محور افقی و توربین بادی محور عمودی. توربین‌های بادی محور قائم برای استحصال انرژی در مناطق با باد کم مناسب‌تر است [1]. توربین بادی ساوینوس یکی از شناخته شده‌ترین مدل‌های توربین‌های بادی محور قائم است. این توربین اولین بار توسط یک مهندس فنلاندی به نام ساوینوس در سال 1929 معرفی شد [2]. از ویژگی‌های این نوع توربین‌ها حساسیت نداشتن به جهت وزش باد و حساسیت نداشتن به آشفته‌گی جریان و تولید گشتاور بالاست. این توربین‌ها قادرند حدود 20 درصد انرژی از باد استخراج کنند [3].

تاکنون در خصوص شبیه‌سازی عملکرد توربین‌های بادی ساوینوس، تحقیقات زیادی صورت گرفته است. هادی علی در سال 2013، به مطالعه آزمایشگاهی توربین بادی ساوینوس از نوع دوپره و سه‌پره پرداخت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که ضریب قدرت و گشتاور در توربین‌های بادی ساوینوس سه‌پره، بهتر از دوپره است [4]. پینکودبنات و همکاران در سال 2013، به بررسی توربین بادی ساوینوس با پره مارپیچ پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که بیشترین گشتاور در زاویه 60 درجه و کمترین گشتاور در زاویه 150 درجه اتفاق می‌افتد [5]. باجو دب و همکاران در سال 2012، یک توربین بادی دوپره را بررسی و مشاهده کردند بیشترین فشار استاتیکی در زوایای 90 و 270 درجه اتفاق می‌افتد [6]. یوکا یوشیدا و همکاران به بررسی تأثیر انحنای پره روتور بر روی ضریب قدرت پرداختند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که هرچه عمق پره بیشتر باشد، ضریب قدرت بهتر خواهد بود [7]. مکتاویش و همکاران در سال 2011، یک مدل پیشرفته از توربین بادی ساوینوس را ارائه کرده‌اند. در این مدل، دیواره‌های پره به گونه‌ای طراحی شده که با انقباض جریان وارد شده، یک گشتاور اضافی تولید

سرعت باد ورودی دارد. برای محاسبه میدان سرعت به همراه فشار از الگوریتم سیمپل⁶ استفاده شده است. در شکل (3)، شماتیک مدل مختصات مرجع چرخان نشان داده شده است.



شکل (3): شماتیک مدل مرجع مختصات چرخان [12]



شکل (4): نحوه تقسیم‌بندی محدوده محاسباتی [13]

4. معادلات حاکم

معادلات ریاضی می‌تواند به صورت ترکیبی از متغیرهای مستقل و وابسته و پارامترهای نسبی به صورت معادله دیفرانسیل تعریف شوند که بر پدیده‌های فیزیکی حاکم است. در زیر مجموعه‌های زیر شکل معادلات دیفرانسیل حاکم ارائه شده است.

1. معادله پیوستگی

از آنجاکه این مسئله به صورت مستقل از زمان و در واقع پایا بررسی می‌شود، پارامتر زمان از معادلات حذف می‌شود. بنابراین، برای معادله پیوستگی خواهیم داشت:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

2. معادله بقای ممتوم

برای جریان دوبعدی پایای تراکم‌پذیر معادلات ناویر-استوکس⁷ جهت بیان اندازه حرکت به صورت (2) خلاصه می‌شود:

در این مقاله، ابتدا با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت پنج نسبت همپوشانی 0، 10، 20، 30 و 40 درصد مورد بررسی قرار گرفته و بهترین نسبت همپوشانی انتخاب شده است. سپس مدل آزمایشگاهی روتور مورد نظر ساخته شده و نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی باهم مقایسه شده است. در این مسئله، چهار شرط مرزی وجود دارد که عبارت‌اند از:

- سرعت ورودی¹: با مشخص بودن سرعت ورودی می‌توان این شرط را برای مسئله اعمال کرد.
- فشار خروجی²: فشار در خروجی معلوم و برابر فشار اتمسفر است.
- شرط مرزی دیوار داخلی³: این شرط نواحی مختلف دامنه محاسباتی را از هم جدا می‌کند. با وجود این شرط، جریان هوا می‌تواند از سطح مشترک بین نواحی مختلف عبور کند.
- شرط مرزی دیوار⁴: شرط مرزی دیوار برای روتور توربین استفاده شده است.

شرایط مرزی در جدول (1) آمده است.

جدول (1): شرایط هندسه و جریان

چگالی هوا	1/22 Kg.m ⁻³
سرعت ورودی	3-6m.s ⁻¹
قطر روتور	0/7 m
تعداد پره	2
دور روتور	18-40Rad.s ⁻¹

3. روش عددی

نرم‌افزار تجاری فلوئنت (Fluent) برای شبیه‌سازی استفاده شده است. برای شبیه‌سازی دوبعدی چرخش روتور در حالت پایا از مدل مرجع مختصات چرخان⁵ استفاده شده است [11]. همان‌طور که در شکل (4) مشخص است، در این روش، حجم کنترل به دو زیرمجموعه تقسیم می‌شود. مجموعه اول شامل روتور و فضای اطراف آن است که سرعت چرخش ثابت و متناسب با سرعت باد ورودی و ضریب سرعت نوک پره دارد. مجموعه دوم بدون سرعت چرخش بوده و فقط

1. Velocity Inlet
2. Pressure Outlet
3. Interior
4. Wall
5. Moving Reference Frame

6. SIMPLE

7. Navier-Stokes Equations

به علاوه لزجت مؤثر به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \text{ و } \mu = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

که $C_\mu = 0/0845$ بوده و

$$\eta = (2s_{ij} \cdot s_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon} \text{ و } c_{1\varepsilon}^* = c_{1\varepsilon} - \frac{\eta \left[1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right]}{1 - \beta \eta^3}$$

$$c_{1\varepsilon} = 1.42 \text{ و } \beta = 0.012 \quad \eta_0 = 4.38$$

5. شبکه‌بندی مسئله

به دلیل اهمیت جریان در اطراف پره روتور سطح نزدیک به آن ریزتر زده شده تا جریان اطراف روتور که پیچیدگی بالایی دارد، با دقت بیشتری حل شود. باید به این نکته توجه کرد که در انتخاب مدل شبکه استفاده شده نیز باید دقت کرد تا بهترین مدل درخور هندسه و نوع مسئله انتخاب شود. در اینجا به دلیل پیچیدگی هندسه از شبکه‌های مثلثی² و به صورت غیر سازمان یافته³ استفاده شده است.

6. استقلال از شبکه

همانطور که در جدول (2) نشان داده شده است با افزایش تعداد سلول‌های محاسباتی جواب دقیق‌تری بدست می‌آید. نتایج بررسی نشان داد که با افزایش تعداد سلول‌ها از 50000 سلول به بعد، تاثیر چندانی در نتیجه حاصل نمی‌شود. با استناد بر نتایج این جدول، تعداد 50000 شبکه، به عنوان شبکه مناسب برای حل این مسئله انتخاب شده است.

جدول (2): استقلال از شبکه

تعداد شبکه	گشتاور خروجی (n-m)
25000	8.62
37000	9.41
50000	9.97
62000	10.02

7. اعتبارسنجی

با استفاده از مطالعه تجربی هادی علی و همکاران، اعتبارسنجی روش عددی استفاده شده در این پژوهش، انجام شده است [3]. آنها در

$$\frac{\partial \rho}{\partial x_i} (\overline{\rho u_i u_j}) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right] = 0 \quad (2)$$

که در آن، μ بیانگر لزجت مولکولی، \bar{P} فشار متوسط و $\overline{\rho u_i u_j}$ تنش رینولدز است. با در نظر گرفتن این امر که این مسئله به صورت جریان توربولانسی حل می‌شود و مدل توربولانسی k-ε برای حل این مسئله انتخاب شده است، تنش رینولدز برای بستن معادلات ممتوم مدل می‌شود. تنش رینولدز عبارت است از:

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left[\rho k + \mu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \right] \quad (3)$$

که در آن، k انرژی جنبشی توربولانسی و μ_t لزجت توربولانسی است. در واقع برای محاسبه لزجت توربولانسی برای مدل‌های توربولانسی مانند k-ε، دو معادله انتقال اضافه بر این معادلات باید حل شود. آن دو معادله در واقع نشان‌دهنده نحوه محاسبه انرژی جنبشی توربولانسی، k و نرخ اتلاف توربولانسی، ε هستند.

برای معرفی این دو معادله باید فیزیک مسئله را لحاظ کرد. از آنجاکه در این مسئله با یک فیزیک دوار برخورد می‌کنیم، در میان مدل‌های توربولانسی موجود در نرم‌افزار فلونت از مدل RNG استفاده شده است. در جریان توربولانسی، چرخش و گردش جریان اصلی در رفتار جریان بسیار تأثیرگذارند. مدل RNG بحث چرخش در جریان توربولانسی را به خوبی پوشش می‌دهد [14]. بنابراین طبق توضیحات بیان‌شده، معادلات انتقال برای پارامترهای توربولانسی عبارت‌اند از:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\alpha_k \mu_{eff}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\alpha_\varepsilon \mu_{eff}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{K} \quad (5)$$

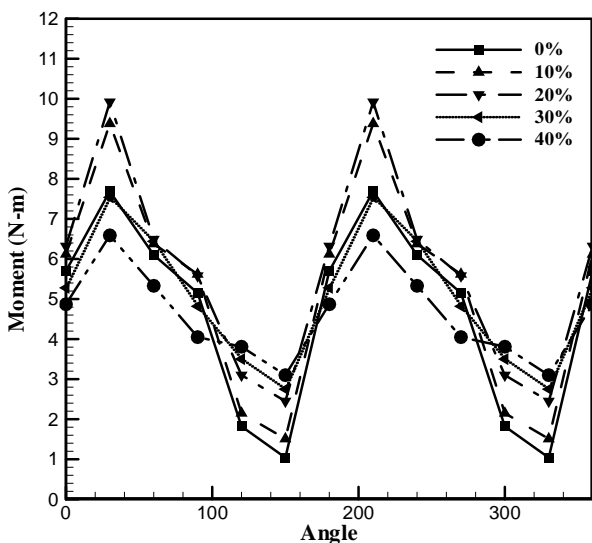
$\alpha_k = 1.393$ و $C_{2\varepsilon} = 1.68$ عبارت تولید در

معادله زیر به صورت $G_k = \mu_t S^2$ است و S مدول نرخ متوسط کرنش است:

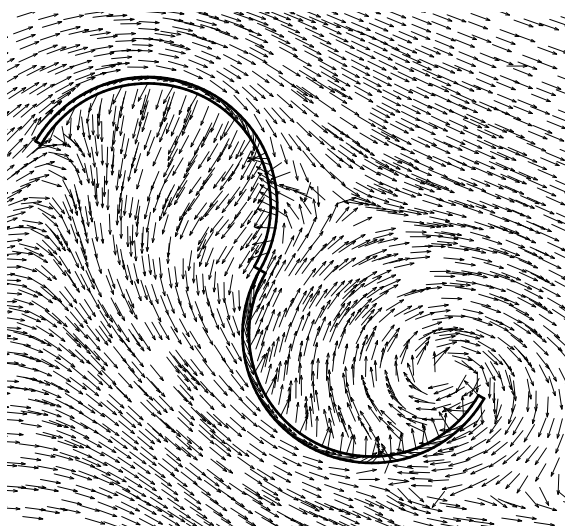
$$S = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] \quad (6)$$

اگر این نسبت همپوشانی از یک مقدار خاصی بیشتر باشد، جریان وارد شده به روتور به راحتی از بین پره‌ها عبور کرده و گشتاور خروجی روتور کاهش می‌یابد. براساس نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی انجام شده، متوسط گشتاور خروجی در نسبت همپوشانی 20 درصد 22 درصد نسبت به نسبت همپوشانی 0 درصد بیشتر است. همچنین میزان گشتاور خروجی در نسبت همپوشانی 20 درصد، نسبت به نسبت همپوشانی‌های 10، 30 و 40 درصد به ترتیب 8، 12 و 19 درصد بیشتر است.

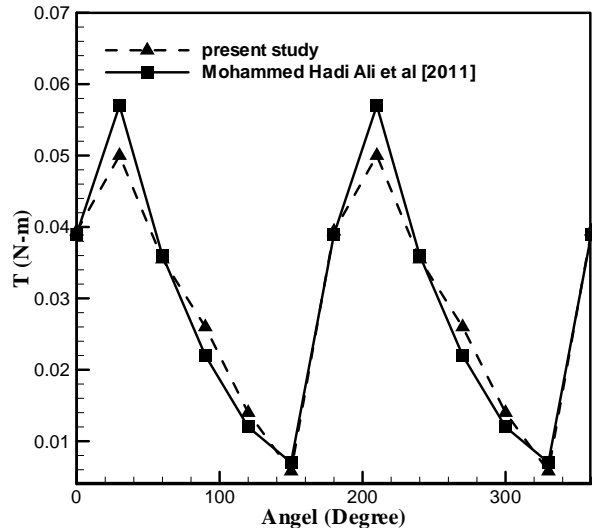


شکل (6): گشتاور خروجی برای نسبت همپوشانی‌های مختلف



(1-7)

مطالعه خود یک روتور دوپره با قطر 200mm در سرعت باد $5/3^1$ m.s⁻¹ در تونل باد را آزمایش کرده است. با شبیه‌سازی هندسه مذکور می‌توان توانایی روش عددی را با روش تجربی مقایسه کرد. شکل (5) اعتبارسنجی براساس گشتاور خروجی را با مدل فوق نشان می‌دهد.

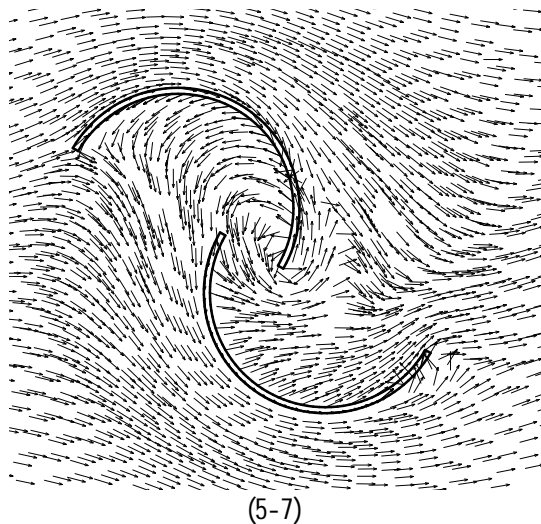


شکل (5): اعتبارسنجی گشتاور خروجی به دست آمده از روش عددی با روش آزمایشگاهی

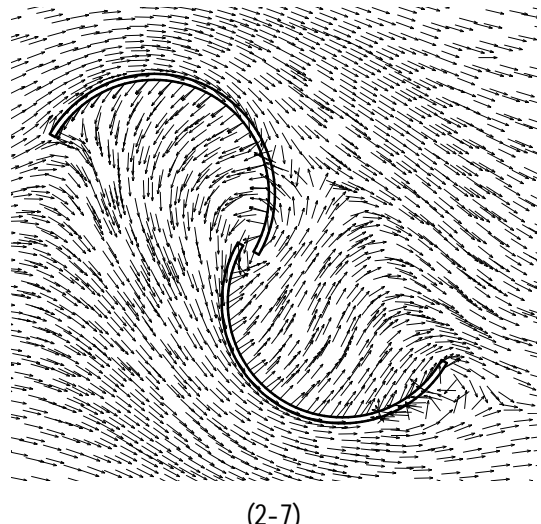
8. نتایج عددی

همان‌طور که قبلاً بیان شد، بررسی عددی بر روی پنج نسبت همپوشانی مختلف انجام شده است. ابتدا پره‌های روتور بدون نسبت همپوشانی مورد مطالعه قرار گرفت (با نسبت صفر درصد). سپس نسبت همپوشانی به 10، 20، 30 و 40 درصد شبیه‌سازی عددی انجام شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که متوسط گشتاور خروجی در نسبت همپوشانی 20 درصد، نسبت به حالت‌های دیگر بهتر است. شبیه‌سازی عددی در سرعت باد ورودی 6 متر بر ثانیه (6/21 کیلومتر بر ساعت) که سرعت باد کمی بوده و در محیط شهری وجود دارد، انجام شده است. شکل (6) نمودار گشتاور خروجی برای نسبت همپوشانی‌های مختلف را نشان می‌دهد.

از شکل (6) می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش نسبت همپوشانی از 0 تا 20 درصد گشتاور خروجی در تمامی زوایای دوران افزایش می‌یابد. در نسبت همپوشانی 30 و 40 درصد گشتاور خروجی در زوایای دوران 0، 30، 60 و 90 درجه کاهش می‌یابد، اما در زاویه 120 و 150 درجه همچنان افزایش گشتاور مشاهده می‌شود. از آنجایی که گردابه ایجاد شده برای روتور ساونوس، پدیده‌ای مضر است، وجود نسبت همپوشانی تا حد زیادی از ایجاد گردابه ایجاد شده جلوگیری می‌کند.



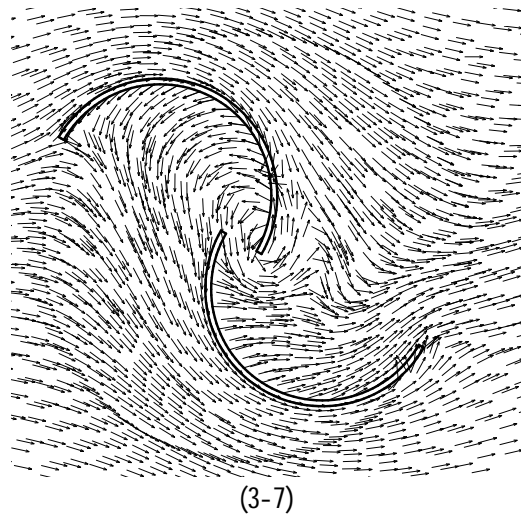
(5-7)



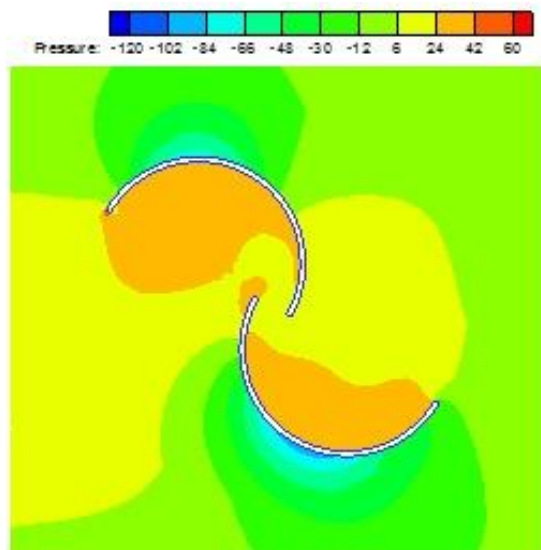
(2-7)

شکل (7): بردار سرعت به ترتیب نسبت همپوشانی 0، 10، 20، 30 و 40 در زاویه دوران 30 درجه

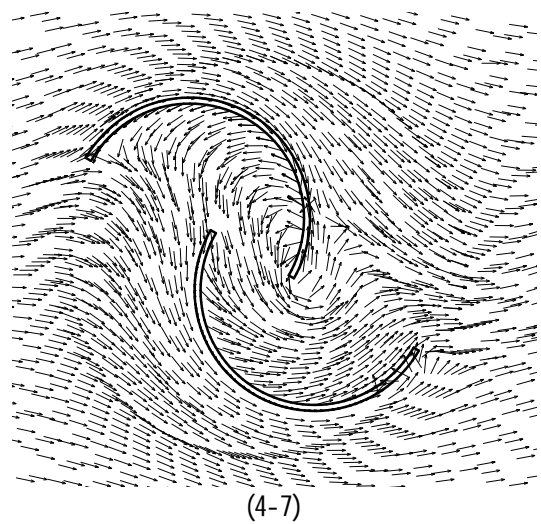
با توجه به شکل 7-1 در نسبت همپوشانی 0 درصد، گردابه‌ای در نوک پره به وجود آمده است. این گردابه برای روتور ساونیوس مضر است. بنابراین با ایجاد یک نسبت همپوشانی 10 درصد از گردابه‌های تولیدشده تا حدودی کاسته می‌شود (شکل 7-2). با افزایش نسبت همپوشانی به 20 درصد، گردابه‌های نوک پره عملاً از بین می‌رود (شکل 7-3). هر چقدر که نسبت همپوشانی افزایش می‌یابد، گردابه از نوک پره به مرکز روتور کشیده شده و گشتاور خروجی را کاهش می‌دهد. (شکل 7-4 و 7-5)



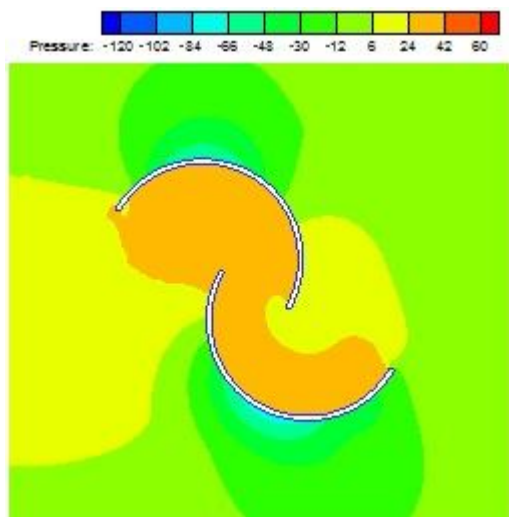
(3-7)



(1-8)



(4-7)



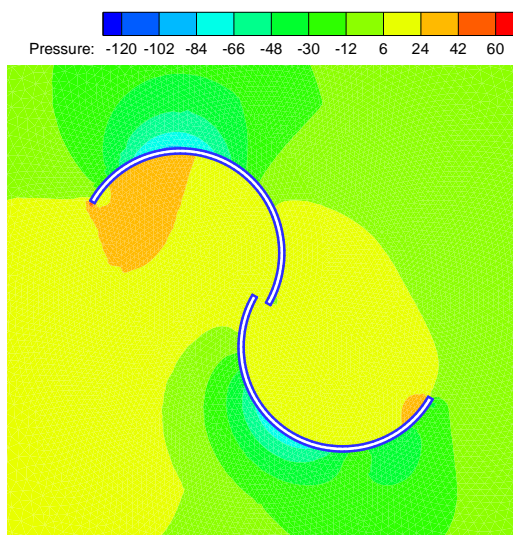
(5-8)

شکل (8): کانتور فشار به ترتیب نسبت همپوشانی 0، 10، 20، 30 و 40 در زاویه دوران 30 درجه

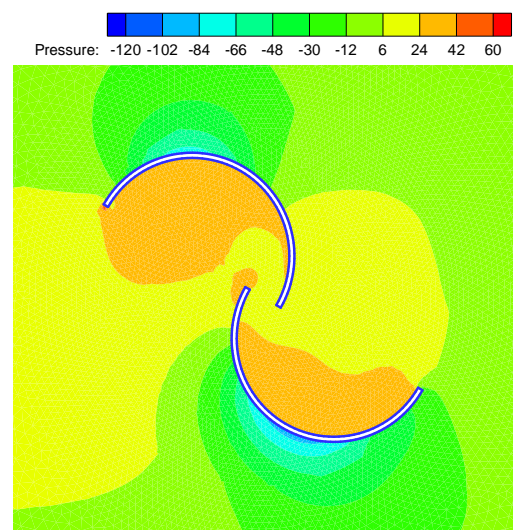
بر همین اساس، به این نتیجه می‌رسیم که با افزایش نسبت همپوشانی، افزایش گشتاور در زوایای دوران 120 و 150 درجه وجود دارد. در شکل (8)، کانتور فشار¹ برای زاویه دوران 30 درجه، برای تمام نسبت همپوشانی‌ها آمده است. با توجه به شکل (8)، وجود نسبت همپوشانی باعث می‌شود که جریان وارد شده به روتور، علاوه بر اینکه به قسمت محدب نیرو وارد کند، جریان از بین دو پره عبور کرده و وارد قسمت مقعر شده و به تولید گشتاور مثبت کمک می‌کند. با توجه به این شکل، در نسبت همپوشانی 20 درصد جریان وارد شده به‌طور متقارن بین پره‌ها تقسیم شده که به ایجاد گشتاور مثبت کمک می‌کند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از روش عددی، یک توربین بادی ساونیوس دو پره با نسبت همپوشانی درصد 20 ساخته شده و مورد تست قرار گرفته است.

9. مدل ساخته شده

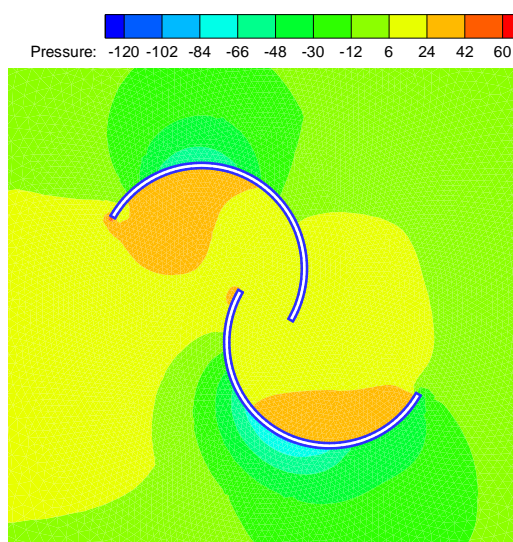
بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از روش عددی، بهترین نسبت همپوشانی برای روتور ساونیوس 20 درصد به‌دست آمده است. بر این اساس، یک روتور با ابعاد مورد نظر ساخته شده و مورد تست تجربی قرار گرفته است. روتور به‌صورت دو پره بوده و از دو نیم استوانه از جنس آلومینیم ساخته شده است. قطر هر کدام از پره‌ها 39 سانتی‌متر و ارتفاع آن 1 متر است. شکل (8) پره‌ها را نشان می‌دهد. قطر هر کدام از پره‌ها



(2-8)



(3-8)



(4-8)



شکل (11): نمونه توربین بادی ساخته شده

با توجه به نمودار شکل (12) توان به دست آمده از توربین ساخته شده، از توان به دست آمده از روش عددی کمتر است، زیرا در توربین ساخته شده به علت وجود یاتاقان‌ها و مجموعه انتقال قدرت، توان روتور به طور کامل به ژنراتور منتقل نمی‌شود [15]. همچنین ژنراتوری که روی این توربین نصب شده است، قادر نسبت در دور کم، توان نامی خود را بدهد. بنابراین می‌توان با انتخاب یک ژنراتور دور پایین، کل توان منتقل شده از روتور را به انرژی الکتریکی تبدیل کرد.

11. نتیجه گیری

در این پژوهش یک توربین بادی مقیاس کوچک به صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. روتور این توربین از نوع ساونیوس دو پره بوده و ارتفاع پره 1 متر و قطر هرکدام از پرها 0/7 متر است. نتایج زیر از این تحقیق به دست آمده است:

39 سانتی‌متر و ضخامت پره 0/8 میلی‌متر و ارتفاع آن 1 متر است.

شکل (8) پرها را نشان می‌دهد.



شکل (9): پره‌های ساخته شده

از آنجایی که روتور دارای نسبت همپوشانی 20 درصد است، قطر روتور برابر 72 سانتی‌متر است. با بررسی چرخ‌دنده، تسمه پولی و چرخ زنجیر برای انتقال قدرت، برای کاهش اصطکاک، از چرخ زنجیر استفاده شده است.

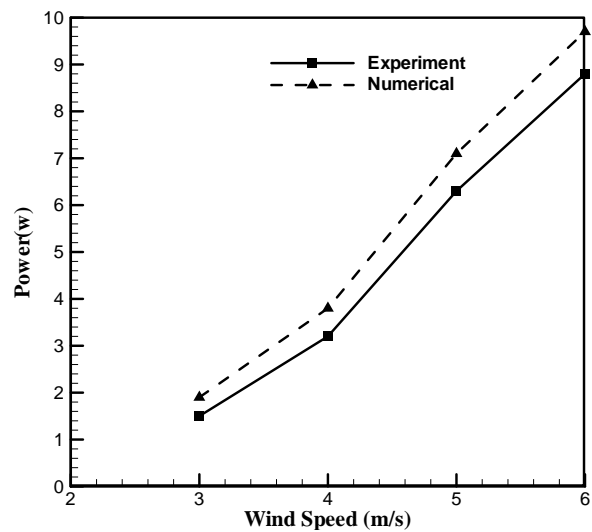


شکل (10): انتقال قدرت

10. نتایج

پس از ساخت توربین با نسبت همپوشانی مشخص شده، به مدت 10 روز، توربین ساخته شده در فضای آزاد تست شده و خروجی آن ثبت شده است. توان خروجی توربین در سرعت‌های 3، 4، 5 و 6 متر بر ثانیه اندازه‌گیری شده و با خروجی توان به دست آمده از روتور در همین سرعت‌ها که از روش عددی به دست آمده، مقایسه شده است. در نمودار شکل (11) مقایسه‌ای بین توان توربین در حالت عددی و آزمایشگاهی، در چهار سرعت انجام شده است.

- برای کاربرد کوچک، با توجه به سرعت باد کم و آشفتگی زیاد جریان، بهترین روتور، روتور ساوونیوس است.



شکل (12): توان خروجی از روتور در سرعت‌های مختلف

- برای پره‌های نیم استوانه بهترین نسبت همپوشانی 20 درصد است. متوسط گشتاور خروجی در نسبت همپوشانی 20 درصد نسبت به نسبت همپوشانی 0 درصد، 18 درصد، نسبت به نسبت همپوشانی 10 درصد، 8 درصد، نسبت به نسبت همپوشانی 30 درصد، 11 درصد و نسبت به نسبت همپوشانی 40 درصد، 19 درصد بیشتر است.

- برای توربین مورد نظر، بهترین سیستم انتقال قدرت چرخ زنجیر است. در سرعت 4 متر بر ثانیه توان خروجی با سیستم انتقال قدرت چرخ زنجیر نسبت به تسمه V شکل 53 درصد و نسبت به تسمه تخت 25 درصد بیشتر است.

- با مقایسه توان خروجی در حالت تجربی و عددی، نتایج نشان داد که اصطکاک ایجاد شده در سیستم انتقال قدرت و عدم توانایی ژنراتور در تولید توان در دور پایین، توان خروجی در حالت عددی بیشتر از حالت تجربی است.

مراجع

- [1] Roy, S., Ujjwal K, S., "Review on the numerical investigations into the design and development of Savonius wind rotors", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 24, pp. 73-83, 2013.
- [2] Savonius, S. J., "The S-rotor and its applications", J. Mech. Engg., Vol. 53, No. 5, 1931.
- [3] Niaz Morshed, K., Rahman, M., Molina, G., Ahmed, M., "Wind tunnel testing and numerical simulation on aerodynamic performance of a three-bladed Savonius wind turbine", International Journal of Energy and Environmental Engineering, Vol.4, No.2, 2013.
- [4] Hadi Ali, M., "experimental comparison study for Savonius wind turbine of two & three blades at low wind speed", International Journal of Modern Engineering Research Vol.3, pp.2978-2986, 2013.
- [5] Debnath, P., Gupta, R., "Flow physics analysis of three-bucket helical savonius rotor at 90° twist angle using CFD", International Journal of Modern Engineering Research, Vol. 3, pp. 739-746, 2013.
- [6] Deb, B., Gupta, R., "fluid flow analysis of savonius rotor at different rotor angle using CFD", Isesco Journal of Science and Technology, Vol. 8, pp. 35-42, 2012.
- [7] Yoshida, Y., Kawamura, T., "Numerical simulations of two-dimensional flows around a Savonius rotor with various curvature of the blade", Natural Science Report, Ochanomizu University, Vol. 63, pp.11-21, 2012.
- [8] McTavish, S., Feszty, D., Sankar, T., "Steady and rotating computational fluid dynamics simulations of a novel vertical axis wind turbine for small-scale power generation", Renewable Energy, Vol. 41, pp. 171-179, 2012.
- [9] Swirydczuk, J., Doerffer, P., Szymaniak, M., "Unsteady Flow through the Gap of Savonius Turbine Rotor", Task Quarterly, Vol. 15, pp. 59-70, 2011.
- [10] Rajat, G., Sankar, D. S., Rituraj, G., Ranjan, D., "CFD analysis of a two-bucket Savonius rotor for various overlap conditions", Isesco Journal of Science and Technology, Vol. 8, pp. 67-74, 2012.
- [11] خسروی حسین، جمیل مجید، صبایی فرد پیام، «بهینه‌سازی توربین بادی ساوونیوس از طریق محاسبه CFD تأثیرات شکل پره»، اولین کنفرانس سالانه انرژی پاک، مرکز بین‌المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، کرمان، 4 و 5 اسفند 1389.
- [12] Fluent Inc Products, FLUENT® Ver. 6.3.26.
- [13] Nasef, M. H., El-Askary, W. A., AbdEL-hamid, A. A., Gad. H. E., "Evaluation of savonius rotor performance: static and dynamic studies", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 123, pp. 1-11, 2013.

53 بررسی عددی و تجربی تأثیر نسبت همپوشانی بر عملکرد توربین بادی خانگی

- [14] یوسف وظیفه‌شناس، «بررسی تأثیر زاویه پره بر عملکرد پمپ»، برای اخذ درجه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، 40 صفحه، 1391.
- [15] Al-Bahadly, I., "*Building a wind turbine for rural home*", Energy for Sustainable Development, Vol.13, pp. 159-165, 2009.