

مطالعه جریان اطراف روتور ساوونیوس به کمک حل عددی و آزمایش در تونل باد*

علی کیانی فر^(۱)

سید محمد جوادی^(۲)

چکیده در این پژوهش اثر منحنی پره بر ضریب توان روتور ساوونیوس، با استفاده از شبیه سازی عددی و آزمایش در تونل باد مورد مطالعه قرار گرفته است. ۶ روتور با ابعاد یکسان و منحنی پره مختلف ساخته شده و با قرار داده شدن در تونل، اثر منحنی پره و عدد رینولدز جریان (سرعت باد) بر ضریب توان آنها بررسی شده است. همچنین با شبیه سازی عددی جریان اطراف روتورهای ساکن (با ۵ منحنی نیم دایره یکسان با فاصله گپ مختلف) و محاسبه گشتاور اعمالی از طرف هوا (با استفاده از توزیع فشار روی سطح پره)، اثر سرعت باد و منحنی پره بر گشتاور مطالعه شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهند با توجه به اختلاف ضریب پسای پره های مختلف در برابر جریان باد، منحنی پره بر ضریب توان و گشتاور روتورها مؤثر می باشد. همچنین نتایج نشان می دهند روتورهای II و VI در یک دوران کامل روتور از ضریب توان و گشتاور بالاتری نسبت به سایر روتورها برخوردارند.

واژه های کلیدی روتور ساوونیوس، ضریب توان، نسبت سرعت نوک پره، منحنی پره.

Numerical and Experimental Study of Flow Fields in and around Savonius Rotors

A. Kianifar

M. Javadi

Abstract In this research work the effects of the rotor curvature on power coefficient of Savonius rotors were studied by testing various rotors in a wind tunnel and simulating the model using numerical calculations. Six rotors with different configurations but similar dimensions were constructed and tested in a wind tunnel in order to examine the effects of rotor curvature and Reynolds number on power coefficient. Numerical calculation of air flow around the stationary rotors and the exerted torque of air flow carried out using pressure distribution model on the rotor surface. Also, the effect of the wind velocity and the shape of rotor curvature on torque were analyzed. The results show a substantial difference between the drag of various rotors. Also the shape of rotor has a significant effect on the power coefficient and the rotor torque as well. The results indicate higher values of C_p and torque in the case of rotors number II and IV in comparison with other rotors.

Key Words Savonius rotor, Coefficient of Power, Rotor Curvature, Ratio of Tip Speed.

* نسخه اولیه مقاله در تاریخ ۸۳/۱۰/۱۷ و نسخه نهایی آن در تاریخ ۸۴/۸/۱۴ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) استادیار، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک

(۲) دانشجوی دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک

مقدمه

وظیفه توربین‌های بادی، تبدیل انرژی باد به کار مکانیکی (مانند آسیاب بادی و حرکت وزنه) و تولید الکتریسیته می‌باشد. این نوع توربین‌ها به دو دسته کلی محور افقی و محور عمودی تقسیم می‌شوند. توربین‌های محور افقی دارای ساختمان و نصب پیچیده بوده و نصب آنها فقط در مناطق با باد دائمی و سرعت‌های بالای آن ارزش اقتصادی دارد [۱]. در این توربین‌ها سرعت دوران روتور بسیار بالا بوده ولی گشتاور آن‌ها کم است و از آنها بیشتر برای تولید برق استفاده می‌شود. اما توربین‌های محور عمودی که می‌توان آنها را پدر آسیاب‌های بادی دانست، دارای ساختمان و نصب بسیار ساده‌ای بوده و در سرعت‌ها و جهت‌های مختلف باد قابل استفاده می‌باشند. این توربین‌ها، برخلاف توربین‌های محور افقی، دارای سرعت دورانی کم و گشتاور زیاد بوده و مستقل از جهت باد هستند. به دلیل سرعت کم و گشتاور زیاد، بعضی اشکال انتقال قدرت از جمله هوای فشرده و هیدرولیک برتری بیشتری نسبت به تولید مستقیم الکتریسیته در این روتورها دارند [۱، ۲]. همچنین مطالعات و اندازه‌گیری‌های انجام شده نشان می‌دهند از این دستگاه می‌توان به عنوان وسیله‌ای در مقیاس کوچک، برای تولید برق خانواده‌های روستایی مناطقی که تا چند دهه دیگر هم ممکن است از برق بهره‌مند نشوند، استفاده نمود. همچنین به دلیل ارزان بودن ساخت آن برای شرکت‌های بزرگ و دولت، این وسیله می‌تواند برای کاربردهایی از جمله آبکشی از زمین و پمپاژ آب در صنایع کشاورزی و صنعت مورد استفاده قرار گیرد.

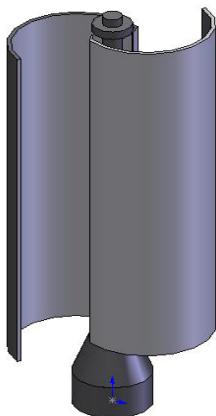
در توربین‌ها یا روتورهای محور عمودی، محور دوران بر راستای افق و جریان باد عمود است و به همین دلیل سطحی که توسط باد به حرکت در می‌آید پس از نیم دور چرخش مجبور است در جهت عکس جریان باد به حرکت خود ادامه دهد و این مشکل سبب پایین آمدن ضریب توان آنها می‌شود. به همین دلیل در

این روتورها منحنی پره از اهمیت خاصی برخوردار است [۱].

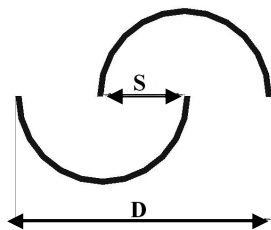
توربین‌های محور عمودی را می‌توان به شرح زیر دسته بندی کرد:

- توربین داریوس
- توربین سیلکوژیرو
- روتور ساونیوس

در پره‌های توربین‌های داریوس و سیلکوژیرو از منحنی ایرفویل استفاده شده است که در سرعت‌های بالای باد بازده خوبی دارد. ایرفویل‌های سیلکوژیرو صاف بوده و جهت و گام پره‌ها در حین گردش روتور تغییر می‌کنند تا نیروی باد به حداکثر ممکن برسد. در شکل‌های (۱ و ۲) این دو روتور نشان داده است. در این روتورها از نیروی لیفت یا برا برای ایجاد حرکت استفاده شده است. اما روتور ساونیوس دارای دو پره نیم استوانه با منحنی نیم دایره ساده بوده، شکل (۳)، و با استفاده از اصل اختلاف ضریب پسای داخل و خارج نیم دایره (اصل پسای تفاضلی) کار می‌کند. در شکل (۴) متغیرهای اساسی در طراحی منحنی پره ساونیوس نشان داده شده است. تاکنون مطالعات زیادی بر روی منحنی پره این روتورها با هدف کاهش ضریب پسای سطح در حال حرکت در جهت خلاف وزش باد و افزایش ضریب پسای سطح در حال حرکت در جهت وزش باد انجام شده است. پروفیل پیشنهادی توسط خود ساونیوس یک منحنی درجه ۴ می‌باشد (روتور VI) [۱]. آزمایش منحنی‌های پره مختلف در دانشگاه ایلینویز (Illinois) در سال ۱۹۷۸ توسط خان نشان داد که بیشترین راندمان این روتورها حدود ۳۵٪ می‌باشد [۳]. کاوامورا و همکارانش در سال ۲۰۰۱ به مطالعه جریان اطراف روتور ساونیوس با استفاده از روش Domain Decomposition Method (DDM) پرداختند. آنها ضریب گشتاور و ضریب توان روتور را در سرعت‌های مختلف جریان هوا برای پره‌های نیم دایره‌ای مورد بررسی قرار دادند [۴]. محققان کمیسیون انرژی کالیفرنیا زیر



شکل ۳ روتور ساوونیوس



شکل ۴ روتور ساوونیوس نیم دایره

محاسبه توان نیروی باد

انرژی جنبشی هوا از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

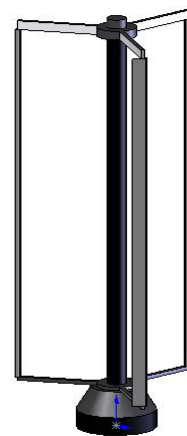
$$P_w = \frac{1}{2} m' v^2 \quad (1)$$

انرژی جنبشی هوا از رابطه زیر محاسبه می‌شود: m' (kg/s) جرم هوا و v (m/s) سرعت جریان هوا می‌باشد. با جایگذاری مقدار m' معادله انرژی را می‌توان به صورت توان در سطح جاروب شده توسط روتور توربین باد، نوشت [3]:

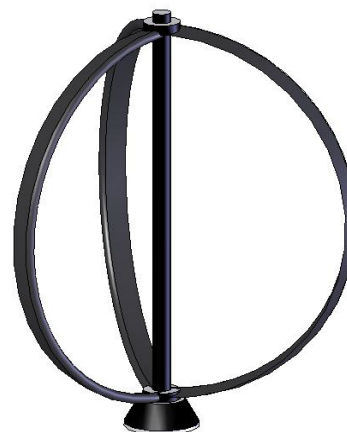
$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2)$$

P_w (watt) توان، ρ (kg/m³) چگالی هوا و A (m²) سطح جاروب شده می‌باشد. از طرفی برای محاسبه توان تولیدی توسط توربین می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود [3]:

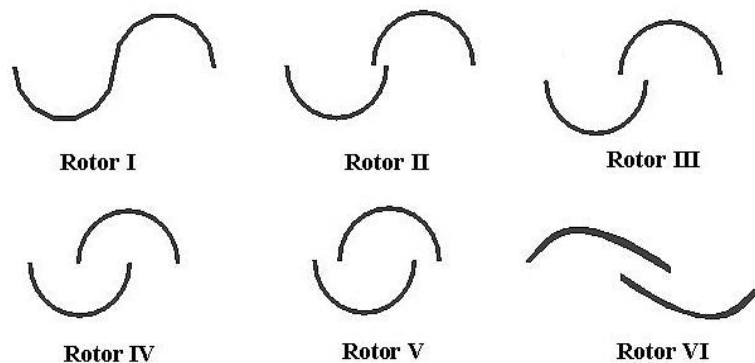
نظر حمید رهایی (سال ۲۰۰۵)، با استفاده از نرم افزار NASA INS2D و کدهای CFD مختلف به بهینه سازی منحنی پره این روتورها پرداختند. آنها دو نوع پره مختلف با بالک وبدون بالک در انتهای روتور را مورد مطالعه قرار داده و توانستند با بهینه سازی منحنی پره، ضریب گشتاور روتور را تا ۲۷٪ و ضریب توان ماکزیمم روتور را تا ۴۰٪ افزایش دهند [5]. در این پژوهش ضریب توان روتورها در اعداد رینولدز مختلف جریان و زوایای مختلف پره نسبت به جریان باد (در یک دوران کامل روتور) محاسبه شده و برای پره‌های مختلف با هم مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل نشان دهنده اثر منحنی پره بر ضریب توان روتور می‌باشد.



شکل ۱ روتور سیکلوژیرو



شکل ۲ روتور داریوس



شکل ۵ منحنی پره روتورهای مورد آزمایش

ابعاد کلی آن با روتور ۴ مشابه است. ارتفاع (h) همه مدل های ساخته شده حدود 30cm و ضخامت ورق آنها 1mm و از جنس آلومینیوم می باشد. نمای دو بعدی روتورها در شکل (۵) آورده شده است.

آزمایش انواع پره های ساونویوس در تونل باد

ضریب توان پره ها، با اندازه گیری مستقیم سرعت زاویه ای روتور حول محور خود و گشتاور خروجی که به وسیله دو نیروسنج خاص که به انتهای هر پره وصل شده است، محاسبه می گردد. کلیه آزمایش ها در شرایط یکسان و در سرعت باد ۸ تا ۱۴ متر بر ثانیه انجام شده است. در آزمایش اول سرعت زاویه ای و گشتاور هر روتور در یک دور کامل از دوران روتور اندازه گیری شده و برای روتورهای مختلف با هم مقایسه می شود. در مرحله بعد، همین آزمایش بر روی هر پره، در اعداد رینولدز مختلف جریان (سرعت های مختلف باد) انجام شده و اثر عدد رینولدز جریان (سرعت باد) بر ضریب توان روتورها مورد بررسی قرار گرفته است. این نتایج برای روتورهای I و IV آورده شده است. همچنین با استفاده از نتایج آزمایش قبل، می توان ضریب توان متوسط در یک دور چرخش روتور در سرعت باد مشخص را برای هر منحنی پره محاسبه و با هم مقایسه نمود. این مقایسه، می تواند معیار خوبی برای تعیین روتور با عملکرد بهینه باشد. در روی نمودارها،

$$P_t(\theta) = F(\theta) \cdot v(\theta) = M(\theta) \omega(\theta) \quad (3)$$

θ موقعیت زاویه ای توربین، M گشتاور نیروی عمودی F وارد بر سطح پره (نیروی فشار هوا)، v بردار سرعت در نقطه اثر نیروی F و ω سرعت دورانی پره می باشد. همچنین بازده کلی توربین به صورت زیر تعریف می شود [3]:

$$\eta = \frac{P_t}{P_w} \quad (4)$$

حاصلضرب نقطه ای در معادله (۳) نشان می دهد که فقط مؤلفه نیروی عمل کننده در راستای چرخش در تولید توان مؤثر می باشد و به همین دلیل منحنی پره در توربین های محور عمودی از اهمیت ویژه ای برخوردار است [3].

معرفی نمونه های ساخته شده

آزمایش روتور ساونویوس با ۶ منحنی پره متفاوت در تونل بادی با مقطع مربع، و به ابعاد $14 \times 0.4 \times 0.4$ متر انجام گرفته است. در روتورهای ۱ تا ۵ منحنی هر پره یک نیم دایره با قطر 16 cm و فاصله تداخل به ترتیب $S = 0, 3.2, 3.8, 6.4, 7.2$ cm می باشد. این فاصله تداخل سبب تغییر مقدار نیروی پسای وارد بر پشت و جلوی پره در زوایای مختلف نسبت به جریان باد می شود. منحنی پره روتور ۶، منحنی ساونویوس بوده که

که در معادلات بالا u_i ، سرعت جریان هوا در راستای مورد نظر F_i و برای بیان اثر نیروهای خارجی می‌باشد. در صورت مطالعه پره‌های توربین در یک جریان گذرا با در نظر گرفتن سرعت دورانی متغیر روتور، باید جمله شتاب که شامل ترم های زیر است، نیز در ترم چشمه معادله مومنتوم وارد شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_\tau) + \nabla \cdot (\rho v_\tau v_\tau) + 2\Omega \times v_\tau + \Omega \times \Omega \times r + \rho \frac{\partial \Omega}{\partial t} \times r \quad (11)$$

برای ساده شدن این جمله، در مطالعه عددی روتورهای ساونیوس، سرعت زاویه‌ای روتور ثابت گرفته می‌شود و میدان جریان اطراف روتور محاسبه می‌شود [4].

مدل اغتشاشات

در این پژوهش از مدل مشهور $k-\varepsilon$ برای مدلسازی ترم های تنش رینولدز در معادلات مومنتوم استفاده شده است. در این مدل، هر کدام از ترم های انرژی جنبشی اغتشاش و نرخ اتلاف آن، از حل یک معادله دیفرانسیل مجزا محاسبه می‌گردند. این معادلات عبارتند از:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (12)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (13)$$

که در آن G_k تولید انرژی اغتشاش وابسته به گرادیان سرعت متوسط، G_b تولید انرژی جنبشی اغتشاش مربوط به شناوری است که در اینجا به دلیل عدم وجود

متغیرهای نسبت سرعت نوک پره (λ)، ضریب توان (C_p) و عدد رینولدز (Re) به صورت زیر تعریف می‌شود [4,5]:

$$\lambda = \frac{u}{v} = \frac{\omega D}{2v} \quad (5)$$

$$C_p = \frac{2Fu}{\rho v^3 h D} \quad (6)$$

$$Re = \frac{vD}{\nu} \quad (7)$$

v سرعت باد، D قطر روتور، h ارتفاع روتور، ω سرعت نوک پره و ω سرعت زاویه‌ای روتور می‌باشد.

حل عددی

در شبیه سازی عددی جریان هوا در داخل پره‌ها، به بررسی اثر متغیر S/D بر فشار وارد بر پره توربین ثابت (بدون چرخش) از طرف جریان باد و محاسبه گشتاور اعمال شده به پره‌ها می‌پردازیم. برای این منظور با حل میدان جریان، توزیع فشار وارد بر سطوح پره را محاسبه می‌نماییم. با انتگرالگیری از حاصلضرب فشار در فاصله شعاعی جزء مورد نظر از محور دوران، گشتاور وارد بر پره محاسبه می‌شود. معادلات لازم برای حل میدان جریان هوا و محاسبه فشار و سرعت در نقاط مختلف توربین، معادله های بقای جرم و مقدار حرکت می‌باشند. این معادلات در سیستم مختصات غیر شتابدار برای حالت پایدار به صورت کلی زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (9)$$

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (10)$$

دیگر مانند طرح ترکیبی دارد، استفاده شده است [3]. در این روش مقدار متغیر ϕ روی صفحه مورد نظر از حل معادله یک بعدی زیر که بین شارهای جابه‌جایی و پخش نوشته شده است، به دست می‌آید [7]:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (17)$$

$$\frac{\phi(x) - \phi_0}{\phi_L - \phi_0} = \frac{\exp(\text{Pe} \frac{x}{L}) - 1}{\exp(\text{Pe}) - 1} \quad (18)$$

که در آن Pe عدد پکلت می‌باشد. حال معادلات انفصال مورد نیاز برای میدان جریان به کمک الگوریتم سیمپل مشخص و با استفاده از روش خط به خط که ترکیبی از دو روش گوس - سایدل و الگوریتم ماتریس سه قطری (T.D.M.A) است، حل می‌شوند [7].

نتایج

در شکل‌های (۶ و ۷) مقادیر ضریب توان روتورهای I تا VI در عدد رینولدز 1.5×10^5 بر حسب سرعت نوک پره (نتایج آزمایش اول) نشان داده شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد هر روتور ممکن است در بازه‌ای خاص نسبت به سایر روتورها نتیجه بهتری بدهد؛ به طور مثال روتورهای V و IV در مقادیر کوچک و بزرگ سرعت نوک پره، ضریب توان بزرگتری نسبت به روتور I دارند ولی در مقادیر متوسط روتور I ضریب توان بزرگتری دارد. برای مقایسه روتورها و تعیین بهترین منحنی روتور، می‌توان از ضریب توان متوسط یا ضریب توان کل روتور استفاده کرد. در شکل (۸) ضریب توان کلی روتورها نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روتور II بهترین عملکرد را در سرعت‌های مختلف نوک پره دارد. همچنین روتورهای VI و III نیز از عملکرد خوبی برخوردار هستند. همچنین از آنجا که تنها تفاوت روتورهای I تا V فقط

گردان دما، صفر در نظر گرفته می‌شود.

$$G_k = -\rho u'_i u'_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (14)$$

همچنین Y_M مربوط به جریان‌های قابل تراکم با عدد ماخ بالا بوده که در اینجا صفر منظور می‌شود.

نحوه حل معادلات حاکم بر جریان هوا

برای حل معادلات حاکم بر فاز گاز، باید ابتدا با استفاده از روش‌های موجود معادلات دیفرانسیل حاکم به معادلات جبری تبدیل شود. در این مطالعه از روش حجم‌های محدود برای نوشتن معادلات جبری و از الگوریتم سیمپل (Simple) برای حل دستگاه معادلات حاصل، استفاده شده است. جداسازی معادلات بقا در حالت پایدار برای متغیر ϕ از فرم انتگرالی معادلات که در زیر آورده شده است، به دست می‌آید [7]:

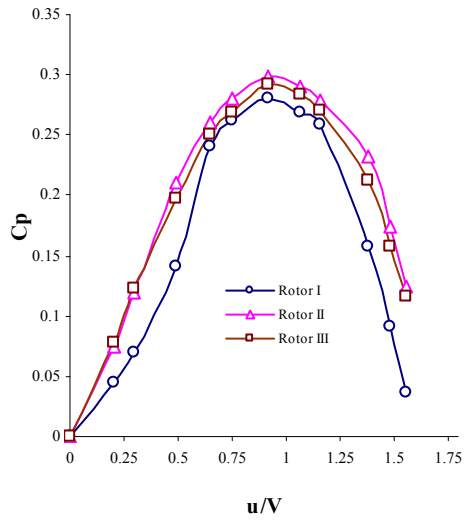
$$\oint \rho \phi v \cdot dA = \oint \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot dA + \int_V S_\phi dV \quad (15)$$

V حجم کنترل مورد نظر، v بردار سرعت، Γ_ϕ ترم پخش متغیر ϕ می‌باشد. این معادله برای هر حجم کنترل یا هر شبکه در ناحیه محاسباتی به کار برده می‌شود و برای یک شبکه دو بعدی به صورت زیر در می‌آید [7]:

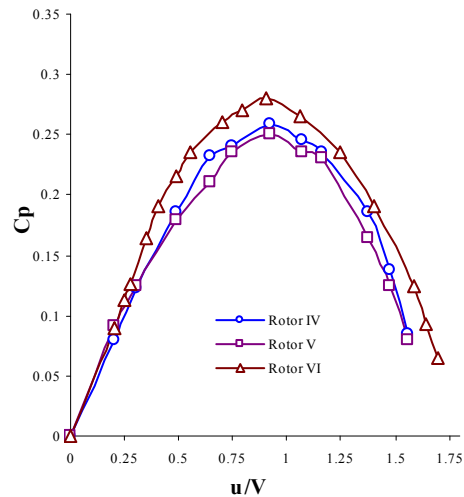
$$\sum_f^{N_{\text{faces}}} v_f \phi_f A_f = \sum_f^{N_{\text{faces}}} \Gamma_\phi (\nabla \phi)_n A_f + S_\phi V \quad (16)$$

که در آن v_f شار جرم در میان صفحه، ϕ_f مقدار متغیر روی صفحه مورد نظر، A_f مساحت صفحه مورد نظر و V حجم سلول می‌باشد. شارهای پخش و جابه‌جایی از وجوه معیار نیز باید به روش مناسبی در مرکز سلول مورد نظر محاسبه شود. در این مطالعه برای شارهای پخش و جابه‌جایی از وجوه حجم‌های معیار، از قاعده توانی که دقت بیشتری نسبت به روش‌های

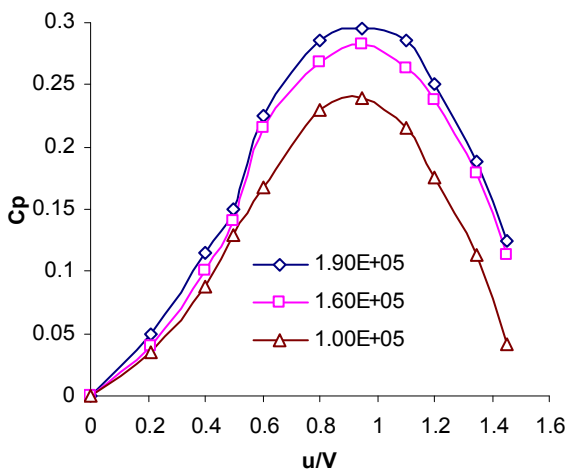
در فاصله گپ (S) بین پره‌ها می‌باشد، مقایسه ضریب توان این روتورها نشان می‌دهد که افزایش فاصله S در روتور II ($S=3.2\text{cm}$) نسبت به روتور I ($S=0$) سبب افزایش ناگهانی ضریب توان و کاهش شدید نیروی مقاوم در برابر حرکت روتور می‌شود. اما افزایش این فاصله در روتورهای III ($S=3.8\text{cm}$) تا V ($S=7.2\text{cm}$) سبب کاهش ضریب توان می‌شود. پس می‌توان نتیجه گرفت که بهترین فاصله گپ (S) در محدوده بین 0 تا 3.2 سانتیمتر می‌باشد. همچنین حداکثر ضریب توان وقتی ظاهر می‌شود که سرعت خطی لبه پره روتور نزدیک به سرعت باد باشد ($\lambda=1$). با رسم بردارهای سرعت اطراف این روتورها، می‌توان دلیل نقش مؤثر اندازه گپ (S) بر ضریب توان روتور را بررسی نمود [۳ و ۶] که در نتایج حاصل از شبیه سازی عددی آورده شده است. در شکل های (۹ و ۱۰) ضریب توان روتورهای I و IV در اعداد رینولدز مختلف جریان نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد رینولدز (سرعت باد) ضریب توان نیز افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش انرژی باد می‌باشد. این افزایش در ($\lambda=1$) بیشترین مقدار است و هر چه روی نمودار از این نقطه ماکزیمم دور شویم، اثر آن بر ضریب توان کاهش می‌یابد.



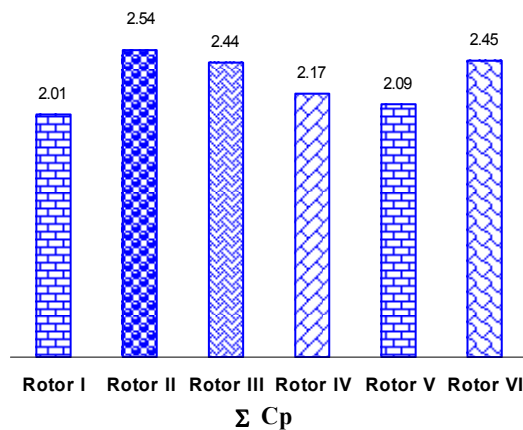
شکل ۶ مقایسه ضریب توان روتورهای I تا III



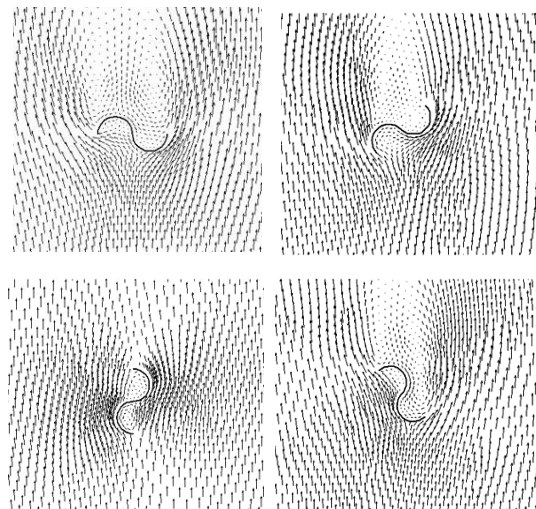
شکل ۷ مقایسه ضریب توان روتورهای IV تا VI



شکل ۹ ضریب توان روتور I در اعداد رینولدز مختلف



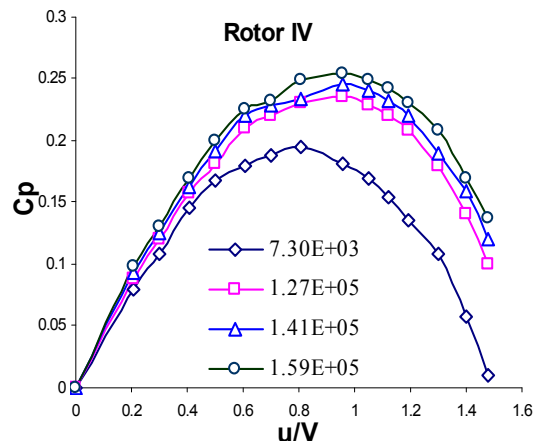
شکل ۸ مقایسه ضریب توان کل، در روتورهای I تا VI



شکل ۱۲ بردارهای سرعت اطراف روتور I

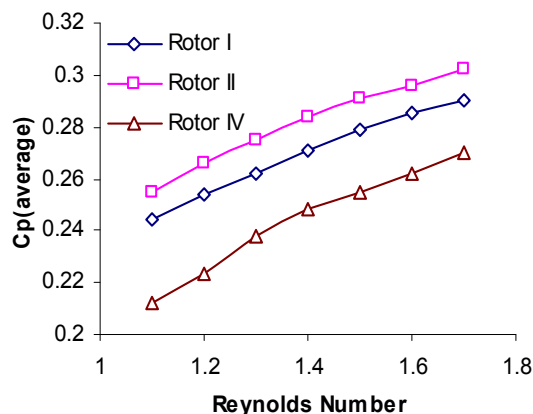
در شکل های (۱۴ تا ۱۷)، گشتاور وارد بر پره های توربین در سرعت های مختلف باد و زوایای مختلف پره نسبت به جریان باد که با استفاده از شبیه سازی عددی محاسبه گردیده آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش سرعت باد، مقدار گشتاور افزایش می یابد. همچنین، برای همه روتورهای مورد بررسی، بیشترین مقدار گشتاور در حدود زاویه ۶۰ درجه و کمترین مقدار آن در حدود زاویه ۱۲۰ می باشد. افزون بر این، در روتور I ناحیه گشتاور مینیمم، ناحیه وسیعی را به خود اختصاص داده در صورتی که در بقیه روتورها این ناحیه بسیار کوچک می باشد.

شکل (۱۸) نمودار گشتاور وارد بر پره های مختلف را در سرعت باد ۱۲ متر بر ثانیه نشان می دهد. مقایسه نمودارها نشان می دهد با وجود اینکه روتور I در زوایای ۰ تا ۶۰ درجه بیشترین گشتاور را نسبت به سایر روتورها دارد، ولی بعد از زاویه ۶۰ درجه گشتاور آن به طور شدیدی کاهش یافته به طوری که این کاهش تا زاویه ۱۶۰ درجه ادامه پیدا کرده است. در مجموع برای یک دور چرخش کامل روتورها مشاهده می شود روتور II نسبت به سایر روتورها، بهترین گشتاور خروجی را دارد.



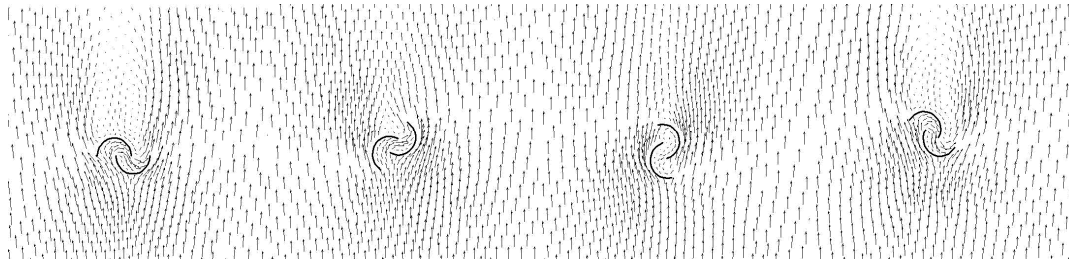
شکل ۱۰ ضریب توان روتور IV در اعداد رینولدز مختلف جریان

در شکل (۱۱) ضریب توان متوسط روتورهای I، II و IV با هم مقایسه شده است. مشاهده می شود با افزایش عدد رینولدز جریان (سرعت باد) ضریب توان متوسط روتور افزایش یافته ولی روند افزایش آن رو به کاهش است که دلیل آن می تواند تغییر ماهیت جریان و آشفتگی جریان اطراف پره ها باشد.

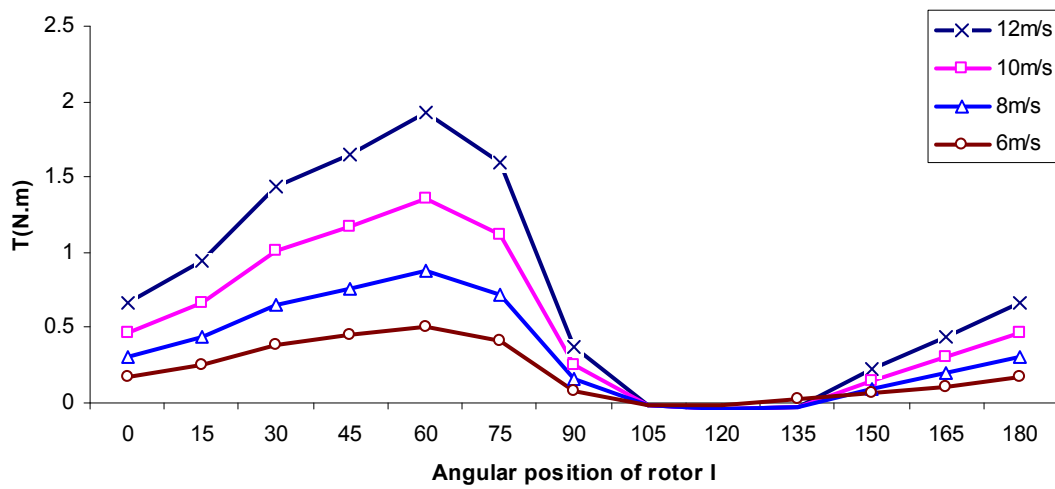


شکل ۱۱ مقایسه ضریب توان متوسط روتورهای مختلف بر حسب عدد رینولدز جریان

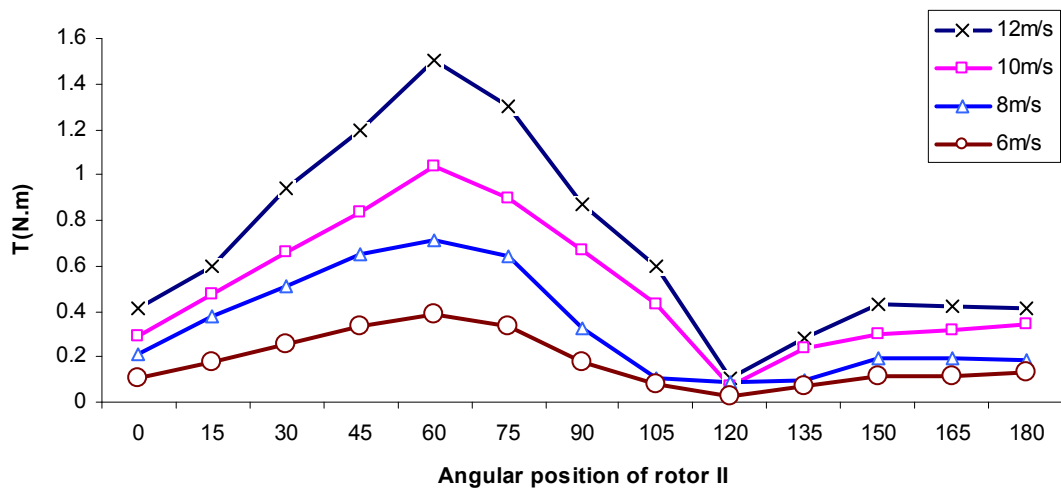
شکل های (۱۲ و ۱۳) بردارهای سرعت به دست آمده از شبیه سازی عددی جریان اطراف روتورهای I و V در زوایای مختلف روتور نسبت به جریان باد را نشان می دهد.



شکل ۱۳ بردارهای سرعت اطراف روتور V



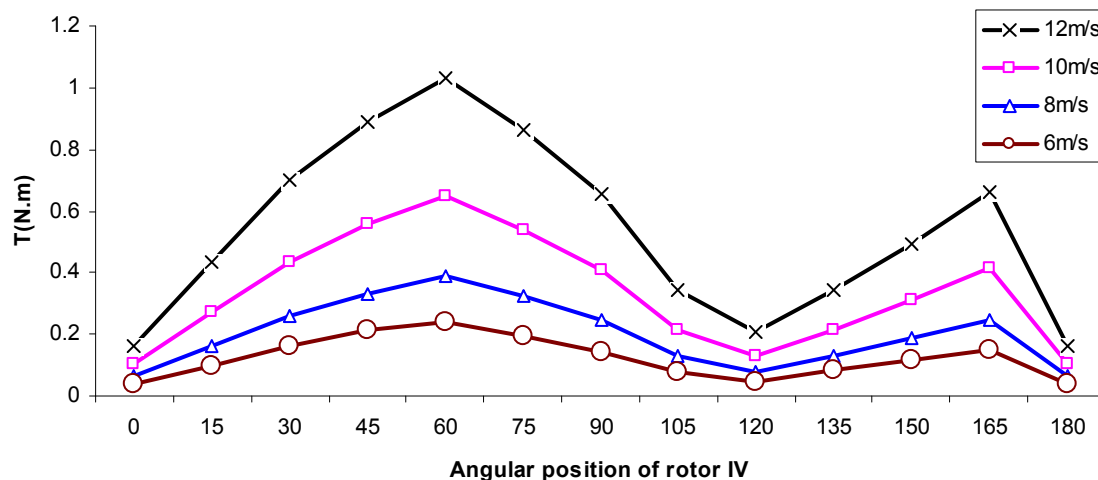
شکل ۱۴ گشتاور روتور ساوننیوس نوع I برای سرعت های مختلف باد



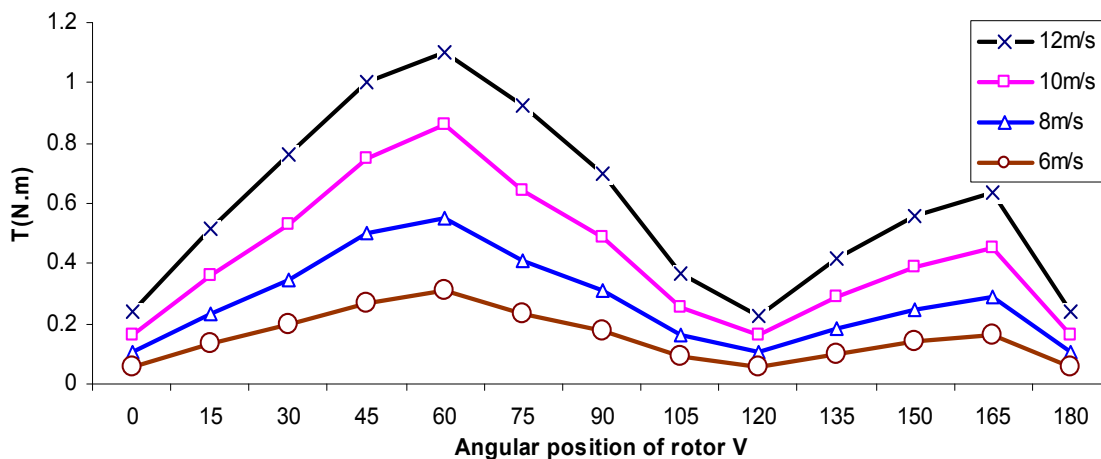
شکل ۱۵ گشتاور روتور ساوننیوس نوع II برای سرعت های مختلف باد

عددی توافق خوبی دارد. با توجه به تشابه این نمودار برای روتورهای مختلف، در شکل (۱۹) فقط نمودار روتور I آورده شده است.

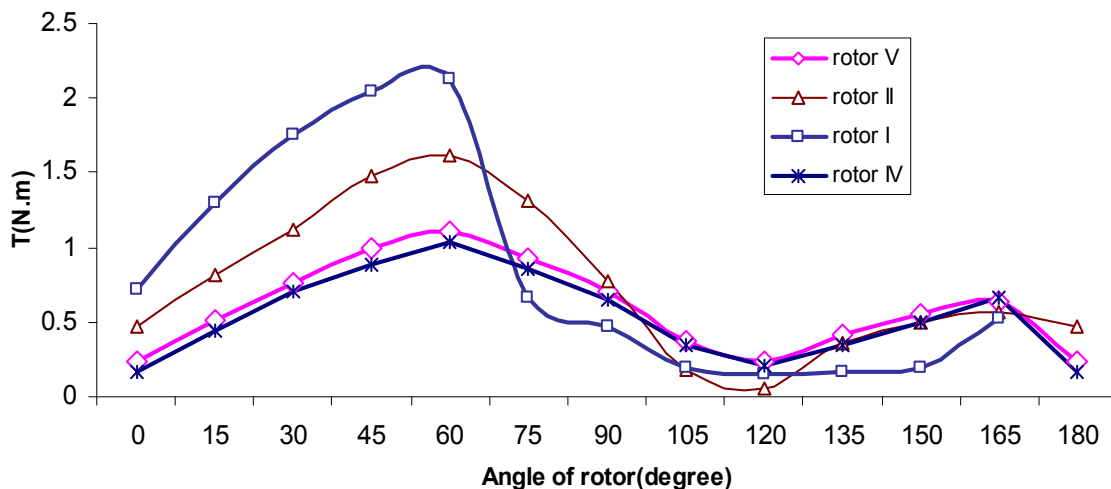
شکل (۱۹) نشان دهنده تناسب گشتاور خروجی روتور با مجذور سرعت باد (یا تناسب ضریب توان با توان سوم سرعت باد) است. معادله های (۲) و (۳) نیز نشان دهنده این تناسب سرعت می باشند که با نتایج حل



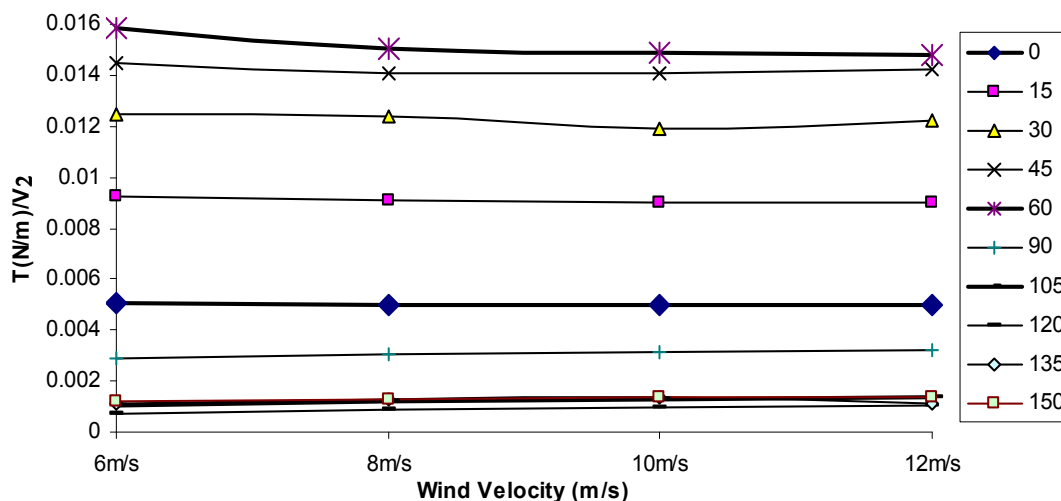
شکل ۱۶ گشتاور روتور ساوننیوس نوع IV برای سرعت های مختلف باد



شکل ۱۷ گشتاور روتور ساوننیوس نوع V برای سرعت های مختلف باد



شکل ۱۸ مقایسه گشتاور خروجی روتورهای مختلف در سرعت باد ۱۲ متر بر ثانیه



شکل ۱۹ مقایسه نسبت گشتاور به مجذور سرعت در روتور I

نتیجه گیری

همچنین، بر اساس نتایج به دست آمده از حل عددی و آزمایشگاهی بهترین منحنی پره، پره روتور II می باشد. سایر نتایج نشان می دهند که با افزایش سرعت باد (عدد رینولدز جریان) توان خروجی به مقدار زیادی (متناسب با توان سوم سرعت) افزایش نشان می دهد.

نتایج نشان می دهند که منحنی روتورهای II تا VI به دلیل وجود گپ بین پرها از ضریب توان بزرگتری نسبت به سایر روتورها برخوردارند. از طرفی افزایش زیاد اندازه گپ، خود سبب کاهش ضریب توان می شود که در این پژوهش بهترین مقدار آن $\frac{S}{D} = 0.2$ تعیین شده است.

مراجع

- ۱- کیانی فر، علی، محرم پور، جواد، "بهبود سازی انرژی باد و کاربرد آن در ساخت روتورهای ساوونیوس"، پایان نامه کارشناسی ارشد تبدیل انرژی - دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۸۰).
2. Gourieres D.le "Wind Power Plants ", Pergamon Press, Oxford, England, (1982).
3. Mozammel H.Khan, "Model And Prototype Performance Characteristics of Savonius Rotor Wind mill", Wind Engineering, Vol.2(2),PP 75-85, (1978).
4. Testuya Kawamura, Tsutomu and Hayashi, Kazuko Miyashita, "Application of the Domain Decomposition Method to Flow around the Savonius Rotor", 12th International Conference on Domain Decomposition Methods, Chiba, Japan, (1998).
5. Rahai H. R., and Hefazi H., " Development of optimum design configuration and performance for vertical axis wind turbine", Feasibility analysis and final EISG report, California Energy Commission, (2005).
6. Nobuyuki Fujisawa, "Velocity measurement and numerical calculations of flow field in around Savonius Rotor", Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 59, pp. 39-50, (1996).
7. Patankar, S.V., "Numerical heat transfer and fluid flow" , John Benjamins publishing, New York, (1980).