

عمودی ترکیبی مشهور هستند. برای مطالعه دقیق و انتخاب اجزاء هندسی مناسب برای روتور محور عمودی ترکیبی و شناسایی شکاف موجود در میان پژوهش‌های پیشین، لازم است که دستاوردها و مطالعات گذشته که توسط محققین صورت گرفته است بررسی گردند. ابتدا، مطالعات انجام شده بر روی توربین بادی محور عمودی داریوس ارائه شده است، و در ادامه، برخی از مطالعات جدید در مورد توربین بادی ساونیوس مرور شده است.

آگاهی از روش‌ها و دستاوردهای محققان گذشته برای بهینه‌سازی توربین بادی محور عمودی یک کار ضروری و لازم است. در بسیاری از مطالعات، روش‌هایی برای بهبود عملکرد روتورهای داریوس معرفی شده است. در این رابطه، سبحانی و همکاران [۷] به صورت عددی تأثیر حفره با قطر متفاوت و شکل و مکان‌های مختلف بر روی پروفیل پره‌های توربین بادی داریوس را مطالعه کردند. آنها نشان دادند که حفره دایره‌ای با قطر معادل ۸ درصد طول وتر پره در موقعیتی نزدیک به لبه جلویی حالت بهینه را فراهم می‌کند. آریینو و همکاران [۸] روتور جدیدی برای توربین بادی داریوس را با استفاده از تیغه‌های کمکی داخلی با نسبت طول وتر ثابت ۰/۵۷ پیشنهاد کردند. نشان داده شد که روتور پیشنهادی ضریب توان و گشتاور بالاتری نسبت به روتور معمولی داریوس در سرعت باد پایین تولید می‌کند. بسیاری از محققین برای افزایش راندمان و بهبود عملکرد توربین بادی داریوس استفاده از منحرف کننده^۱ را پیشنهاد داده‌اند. در این زمینه، قاسمی و آزادانی [۹] تأثیر استفاده از انحراف ساز در توربین بادی داریوس را به صورت عددی و سه بعدی بررسی کردند. آنها به کمک الگوریتم تاگوچی، ابعاد بهینه برای انحراف ساز را مشخص کردند. تحلیل نتایج نشان داد که استفاده از انحراف ساز، راندمان توربین بادی را ۱۶/۴۲ درصد افزایش می‌دهد. جیانگ و همکاران [۱۰] دو توربین بادی داریوس با چرخش مخالف هم که در بین آنها از انحراف ساز استفاده شده معرفی کردند. آنها نشان دادند که استفاده از انحراف ساز بین توربین‌ها، عملکرد آنها را بهبود می‌بخشد. همچنین توربین‌های بادی، ۳۸/۶ درصد انرژی بادی بیشتری در مقایسه با سیستم بدون انحراف ساز دریافت می‌کنند.

علاوه بر این، انتخاب نوع و شکل ایرفویل برای پره‌های داریوس تأثیر زیادی بر عملکرد روتور دارد. در این زمینه، محمد [۱۱] عملکرد روتور داریوس را با تغییر شکل و نوع ایرفویل بررسی کرد. در پژوهش مذکور، عملکرد ۲۰ نوع ایرفویل (مقارن و غیر مقارن) را با استفاده از چندین شبیه‌سازی دو بعدی مقایسه گردید. نتایج نشان داد که در میان ایرفویل‌های مقارن، NACA 0018 با حداکثر ضریب توان ۲۹۶۴/۲۹۶۴ بهترین عملکرد را دارد. علاوه بر این، ایرفویل غیر مقارن S-1046 با حداکثر ضریب توان ۰/۴۰۵۱ بهترین عملکرد را در مقایسه با سایر ایرفویل‌های غیر مقارن دارد. سانگ و همکاران [۱۲] تأثیر پارامترهای آیرودینامیکی چهار نوع از ایرفویل مقارن بر عملکرد روتور داریوس را به صورت عددی بررسی کردند. نتایج نشان داد که در نسبت سرعت‌های نوک کمتر از ۱/۵، ایرفویل NACA 0018 و در نسبت سرعت‌های نوک بزرگتر از ۲، ایرفویل NACA 0015 عملکرد بهتری

نسبت به سایر ایرفویل‌ها دارند. محمد و همکاران [۱۳] تأثیر ۲۵ نوع ایرفویل بر عملکرد آیرودینامیکی روتور داریوس را با کمک دینامیک سیالات محاسباتی ارزیابی کردند. آنها نشان دادند که ضریب توان توربین با ایرفویل LS(1)-0413 نسبت به ایرفویل NACA 0021، ۱۶ درصد افزایش یافته است. همچنین نتایج نشان داد که ایرفویل NACA 0018 عملکرد بهتری نسبت به ایرفویل NACA 0021 دارد.

توربین بادی ساونیوس با توجه به شکل ساده پره‌ها و کم هزینه بودن ساخت روتور، نسبت به توربین بادی داریوس از محبوبیت بیشتری برخوردار است. برای انتخاب اجزاء بهینه از روتور ساونیوس و استفاده‌ی آن در توربین بادی ترکیبی، لازم است مطالعات انجام شده در گذشته مرور گردد. مطالعات زیادی نیز برای بهبود عملکرد توربین بادی محور عمودی ساونیوس انجام شده است. در ادامه برخی از این مطالعات مرور می‌شود. شکل پره‌های ساونیوس تأثیر زیادی بر عملکرد روتور ساونیوس دارد و مورد توجه محققین قرار گرفته است. برای مثال، چن و همکاران [۱۴] روی بهینه‌سازی شکل پره‌های ساونیوس تمرکز کردند. آنها پروفیل جدیدی برای پره‌ها معرفی کردند که با بهینه‌سازی این پروفیل‌ها، عملکرد روتور جدید را با حالت ساونیوس نیم دایره‌ای (متعارف) مقایسه کردند. نتایج نشان داد که عملکرد آیرودینامیکی روتور پیشنهادی نسبت به حالت نیم دایره‌ای بهتر شده است. به علاوه، ضریب قدرت روتور جدید در نسبت سرعت نوک ۰/۸، ۳۳ درصد نسبت به حالت روتور متعارف بهبود یافته است. لی و همکاران [۱۵] عملکرد و ویژگی‌های توربین بادی ساونیوس نوع مارپیچ را مورد مطالعه قرار دادند. آنها تأثیر زاویه پیچ و تاب پره‌های روتور بر تولید قدرت توربین بادی محور عمودی را ارزیابی کردند. نتایج بدست آمده نشان داد که زاویه چرخش ۴۵ درجه در مقایسه با سایر موارد بهترین عملکرد را دارد. روی و ساها [۱۶] برای پره‌های روتور ساونیوس شکل جدیدی را معرفی کردند. آنها عملکرد روتور پیشنهادی را با نوع نیم دایره‌ای، نوع بیضوی^۲، نوع بنیش^۳ و نوع باخ^۴ به صورت تجربی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که روتور جدید ۳۱/۶ درصد گشتاور بیشتری نسبت به حالت نیم دایره‌ای تولید می‌کند. آوم و ساها [۱۷] تأثیر پره‌های مختلف بر عملکرد آیرودینامیکی روتور ساونیوس را به صورت عددی و تجربی ارزیابی کردند. آنها ویژگی‌های تولید توان چهار نوع پروفیل (نیم دایره، بنیش، نوع باخ اصلاح شده و بیضوی) را با هم مقایسه کردند. آنها دریافته‌اند که پره‌های بیضوی بهترین عملکرد را دارند. حسن زاده و محمدنژاد [۱۸] تأثیر نسبت هم‌پوشانی روتور دو پره ساونیوس بر بازده توربین بادی را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها مقادیر مختلف مانند ۰، ۰/۱، ±۰/۲ و ±۰/۳ را برای انتخاب نسبت هم‌پوشانی مطلوب تست کردند. مشاهده گردید که توربین بادی ساونیوس با نسبت هم‌پوشانی ۰/۲ بیشترین قدرت را نسبت به حالت‌های دیگر تولید می‌کند. در پژوهش دیگر، حسن زاده و محمدنژاد [۱۹] تأثیر نسبت هم‌پوشانی بر عملکرد آیرودینامیکی روتور ساونیوس را بررسی کردند. آنها تأثیر نسبت هم‌پوشانی را در دو نوع روتور نیم دایره‌ای و نوع باخ ارزیابی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که

² Elliptic

³ Benesh

⁴ Bach

¹ deflector

نسبت هم‌پوشانی ۰/۲ و ۰/۱ به ترتیب برای روتور نیم دایره‌ای و نوع باخ بهینه است.

توربین بادی ترکیبی (داریوس- ساونیوس) نوع جدیدی از توربین بادی محور عمودی است. روتور چنین توربینی به طور کلی ترکیبی از روتورهای داریوس و ساونیوس است. روتور ساونیوس برای شروع به گشتاور کمتری نسبت به روتور داریوس نیاز دارد، اما روتور ساونیوس دارای کارایی کمتری نسبت به روتور داریوس است. ترکیب این دو روتور راهی برای بهبود ضریب توان و توانایی خود شروعی توربین‌های داریوس است [۲۰] که توسط محققان محدودی مورد توجه قرار گرفته است. برای مثال، گوپتا و همکاران [۲۱] تاثیر نسبت هم‌پوشانی روتور ساونیوس را بر عملکرد روتور ترکیبی به صورت تجربی بررسی کردند. در این مطالعه، روتور ساونیوس بالای روتور داریوس قرار گرفته است. آن‌ها نشان دادند که بیشینه ضریب قدرت در نسبت هم‌پوشانی صفر تولید می‌شود و برابر ۰/۵۱ است. حسینی و گودرزی [۲۲] نوع جدیدی از توربین بادی ترکیبی که از پره‌های نوع باخ به عنوان روتور داخلی تشکیل شده را به صورت عددی مطالعه کردند. آن‌ها گزارش دادند که استفاده از روتور باخ باعث می‌شود تا عملکرد روتور ترکیبی در نسبت سرعت‌های کمتر از ۱/۵ بهتر از روتور داریوس باشد. جاکوب و چترجی [۲۳] عملکرد روتور ساونیوس و روتور داریوس را به صورت جداگانه مطالعه کردند. سپس، با ترکیب پره‌های ساونیوس با روتور داریوس، تاثیر نسبت شعاع پره‌های روتور ساونیوس به روتور داریوس بر عملکرد توربین بادی ترکیبی را ارزیابی کردند، و یک مقدار بهینه برای نسبت شعاع معرفی کردند. ساینی و ساینی [۲۴] عملکرد روتور ترکیبی با توربین داریوس را در یک کانال آب با هم مقایسه کردند. نتایج نشان داد که راندمان روتور ترکیبی نسبت به توربین داریوس ۹/۹ درصد بهبود یافته است. همچنین ضریب گشتاور متوسط توربین ترکیبی ۱۵/۹ درصد بیشتر از روتور داریوس است. لیانگ و همکاران [۲۰] تاثیر پارامترهایی مانند زاویه اتصال و نسبت شعاع بر عملکرد توربین بادی ترکیبی که از روتور ساونیوس و روتور داریوس به عنوان پره‌های داخلی و خارجی تشکیل شده است بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که زاویه اتصال صفر درجه و نسبت شعاع ۰/۲۵ بهینه‌ترین حالت برای توربین ترکیبی است. لیو و همکاران [۲۵] برای بهبود عملکرد روتور ترکیبی در مقایسه با روتور داریوس، استفاده از ساونیوس سه پره اصلاح شده در داخل روتور داریوس را پیشنهاد دادند. آن‌ها با بررسی عددی نشان دادند که استفاده از روتور ترکیبی نوع جدید باعث سرکوب دینامیک استال روتور داریوس در نسبت سرعت‌های نوک بالا می‌شود. همچنین روتور ترکیبی در نسبت سرعت‌های نوک پایین، به خاطر روتور داخلی می‌تواند شتاب بگیرد.

با مرور مطالعات گذشته می‌توان متوجه شد که شکاف‌هایی در میان تحقیقات انجام شده بر روی توربین بادی ترکیبی وجود دارد که در زیر به آن‌ها اشاره شده است:

- نوع پره‌های داخلی و خارجی استفاده شده در مطالعات گذشته با تحقیق حاضر متفاوت است و برای اولین بار عملکرد این نوع از پره‌ها در مطالعه حاضر ارزیابی می‌گردد. همچنین محدوده عدد رینولدز (Re) و نسبت سرعت نوک در این مطالعه نسبت به کارهای گذشته متفاوت است.

- در بسیاری از مطالعات گذشته، روتور ساونیوس در بالای روتور

داریوس قرار گرفته که موقعیت قرار گیری روتور داخلی و خارجی در این پژوهش متفاوت است.

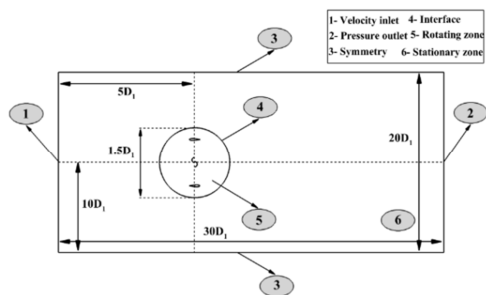
- ساختار هندسی کارهای گذشته در مورد توربین بادی ترکیبی اغلب دو پره ساونیوس و سه پره داریوس بوده است، ولی در این مطالعه رفتار آیرودینامیکی توربین بادی ترکیبی تشکیل شده از دو پره داریوس و دو پره ساونیوس برای اولین بار ارائه می‌شود.

با توجه به مطالعات گذشته، تحقیقات اندکی روی توربین‌های بادی محور عمودی ترکیبی انجام شده است. برای استفاده کردن از این نوع توربین‌ها در محیط‌های صنعتی نیاز به مطالعات و تحقیقات بیشتر است. در همین راستا، موضوع اصلی در پژوهش حاضر، ارزیابی عملکرد آیرودینامیکی روتور ترکیبی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی است. در این پژوهش، ابتدا، برای انتخاب اندازه بهینه‌ی اجزاء هندسی روتور ترکیبی، به کارهای گذشته در زمینه توربین بادی داریوس و ساونیوس مراجعه می‌شود، تا یک هندسه‌ی بهینه برای روتور داخلی و خارجی انتخاب گردد. در گام بعدی، تاثیر TSR و سرعت آزاد باد بر تولید توان توربین بادی ترکیبی بررسی می‌شود. این مطالعه در مقادیر مختلف TSR مانند ۳/۵، ۲/۵ و ۱/۵ و سرعت آزاد باد ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه انجام می‌گیرد و نتایج با جزئیات کامل ارائه می‌گردد.

۲- بیان مسئله و روش حل عددی استفاده شده

در مطالعه حاضر، عملکرد آیرودینامیکی یک توربین بادی ترکیبی تشکیل شده توسط روتور دو پره ساونیوس، به عنوان روتور داخلی و روتور دو پره داریوس، به عنوان روتور اصلی خارجی، مورد مطالعه قرار گرفته است. روتور داخلی ساونیوس با دو پره نیم دایره‌ای با نسبت هم پوشانی داخلی ۰/۲ در نظر گرفته شده که قبلاً توسط مرجع [۱۸] برای دو پره نیم دایره‌ای به عنوان مقدار بهینه گزارش شده است. علاوه بر آن، پره‌های روتور داریوس با ایرفویل مستقیم و متقارن NACA 0018 بررسی شده‌اند که از نظر دانشگاهی و صنعتی محبوب می‌باشد. همچنین، بهینه بودن این نوع از ایرفویل‌ها توسط مطالعات گذشته گزارش شده است. نسبت قطر روتور داخلی به روتور خارجی برابر ۰/۲ طراحی شده که در مطالعات گذشته به عنوان مقدار بهینه معرفی شده است [۲۴]. به منظور بررسی عملکرد توربین بادی ترکیبی، مقادیر مختلف TSR مانند ۳/۵، ۲/۵ و ۱/۵ برای روتور ترکیبی تست می‌شود. محاسبات برای دو سرعت آزاد باد ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه انجام می‌شود که عدد رینولدز مربوطه بر مبنای قطر خارجی روتور (D_i) و سرعت آزاد باد به ترتیب برابر ۳/۴۲۵×۱۰^۵ و ۶/۸۵×۱۰^۵ است.

شکل ۱ و جدول ۱ به ترتیب نمای کلی و اطلاعات تکمیلی در مورد روتور ترکیبی مورد بررسی را نشان می‌دهند. در شبیه‌سازی حاضر، توربین بادی ترکیبی پیشنهادی به صورت دو بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به شکل ۱ از شفت و میله‌های اتصال در شبیه‌سازی توربین بادی ترکیبی صرف نظر شده است.



شکل ۲- میدان محاسباتی و شرایط مرزی به کارگرفته شده در مطالعه حاضر

با توجه به مقدار عدد رینولدز و شرایط موجود، برای بررسی رفتار جریان و حل معادلات حاکم بر جریان آشفته از روش عددی متوسط گیری زمانی (RANS) استفاده می‌شود. با متوسط‌گیری از معادلات حاکم بر جریان، معادلات پیوستگی و مومنوم به صورت زیر بیان می‌گردد [۲۷]:

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

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \right] \quad (2)$$

عبارت آخر معادله مومنوم در سمت راست، معرف تنش رینولدز است. برای مدل‌سازی این عبارت از معادله، از مدل SST k- ω استفاده شده است. طبق مطالعات قبلی [۷، ۲۲، ۲۷]، برای مدل‌سازی تنش رینولدز، مدل SST k- ω قابل اعتماد است. مدل آشفته‌گی از SST k- ω دو معادله انتقال تشکیل شده است که به صورت زیر بیان می‌شوند [۲۷]:

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

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

در اینجا، معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود به صورت عددی توسط نرم افزار Ansys-Fluent نسخه ۱۷/۱ حل می‌شوند. برای این منظور، جملات وزشی^۲ و لزجی^۳ به ترتیب با استفاده از بالا دست مرتبه دوم^۴ و اسکیم تفاضل مرکزی^۴ گسسته‌سازی شده‌اند. از سوی دیگر، مشتقات زمان با استفاده از یک روش ضمنی مرتبه دوم^۵ گسسته می‌شوند. علاوه بر این، برای کوپل میدان‌های سرعت و فشار، از الگوریتم SIMPLE استفاده شده است. عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی ترکیبی را می‌توان توسط بعضی پارامترهای بی‌بعد که به پارامترهای عملکردی مشهور هستند بررسی کرد. پارامترهای عملکردی به صورت زیر بیان می‌شوند [۲۷]:

نسبت سرعت نوک (TSR):

$$TSR = \frac{\omega_o D_1}{2U_\infty} \quad (5)$$

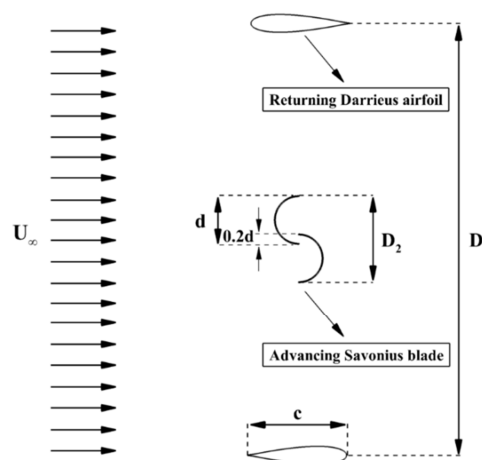
¹ Reynolds Averaged Navier-Stokes

² Advection

³ Second order upwind

⁴ Central differencing schemes

⁵ Second-order implicit



شکل ۱- تصویری از نمای بالای روتور ترکیبی مورد مطالعه که از دو پره ساوونیوس به عنوان روتور داخلی و دو پره داریوس به عنوان روتور خارجی تشکیل شده

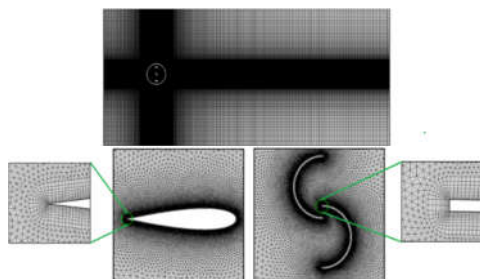
جدول ۱- جزئیات هندسی روتور ترکیبی

مقادیر	پارامترها
۱۰۰۰mm	قطر روتور خارجی (D ₁)
۰/۲۲	طول وتر پره‌های روتور داریوس (c/D ₁)
NACA 0018	نوع پره‌های روتور داریوس
پره‌های متقارن و مستقیم	نوع روتور داریوس
نوع متعارف (نیم‌دایره)	شکل پره‌های روتور ساوونیوس
۰/۲d	هم‌پوشانی پره‌های روتور داخلی
۰/۱۱۱	طول پره‌های روتور داخلی (d/D ₁)
۰/۱۰۰۶۳	ضخامت پره‌های روتور داخلی (t/D ₁)
۰/۲	نسبت قطر داخلی به قطر خارجی (D ₂ /D ₁)

در این بررسی، دامنه محاسبات به دو ناحیه دوار و ساکن تقسیم می‌شود. روتور ترکیبی متشکل از پره‌های ساوونیوس و داریوس در ناحیه دوار قرار گرفته که با سرعت زاویه‌ای مشخص به صورت پاد ساعتگرد دوران می‌کنند. ناحیه ساکن شامل پیرامون ناحیه دوار است که به صورت مستطیلی شکل می‌باشد. در شکل ۲ ابعاد ناحیه محاسباتی و شرایط مرزی اعمال شده به تصویر کشیده شده است. همانطور که در شکل ۲ آورده شده است، ابعاد ناحیه دوار و ساکن وابسته به قطر خارجی روتور ترکیبی (D₁) است به طوری که قطر ناحیه دوار ۱/۵D₁ انتخاب شده است. همچنان اندازه طول و عرض دامنه محاسباتی به ترتیب ۳۰D₁ و ۲۰D₁ اعمال شده است. با توجه به شکل ۲، مرکز روتور ترکیبی ۵D₁ از مرز ورودی و ۱۰D₁ از هر دو مرز بالا و پایین واقع شده است. در مورد شرایط مرزی مورد استفاده در مطالعه حاضر، برای مرزهای ورودی و خروجی، به ترتیب سرعت ورودی یکنواخت با شدت آشفته‌گی ثابت ۵٪ و فشار خروجی معادل با فشار اتمسفر مدل شده است. علاوه بر این، در مرزهای فوقانی و پایینی ناحیه ساکن، شرایط مرزی متقارن تعریف شده و شرایط مرزی بدون لغزش بر روی تمام سطوح پره‌ها اعمال شده است. بین ناحیه دوار و ساکن، مرز سطح مشترک تعریف شده است.

تقسیم شده است، برای هر یک از ناحیه‌ها، شبکه‌بندی مختلف اعمال می‌شود. در ناحیه ساکن، از شبکه‌بندی نوع چهار وجهی منظم استفاده شده است. به طوری که با دور شدن از ناحیه دوار اندازه سلول‌ها با نسبت رشد ثابت بزرگتر می‌شود. در ناحیه دوار، از شبکه‌بندی نوع مثلثی نامنظم استفاده شده، به طوری که با نزدیک شدن به سطح پره-ها، اندازه سلول‌ها با نسبت رشد ثابت کوچکتر می‌شود. همچنین روی سطوح پره‌ها شبکه‌بندی لایه مرزی اعمال شده تا میدان سرعت نزدیک پره‌ها به درستی شبیه‌سازی شود. اعتبار سنجی شبیه‌سازی صحیح میدان سرعت، نزدیک سطوح جامد، وابسته به مقدار تابع دیواره (y^+) است. در این رابطه، هر چه مقدار تابع دیواره کوچکتر باشد، کیفیت شبکه‌بندی بیشتر و گردابه‌ها نزدیک پره‌ها به درستی شبیه‌سازی می‌شوند. تابع دیواره به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y}{\mu} \quad (8)$$



شکل ۴- تصویری از شبکه‌بندی اعمال شده بر ناحیه محاسباتی و سطوح پره‌ها

همانطور که مشخص است، مقدار y^+ به ارتفاع اولین لایه از شبکه‌بندی نسبت به سطح پره‌ها وابسته است. در همین رابطه، ارتفاع اولین لایه از سطح پره‌های داریوس و ساونیس برابر 2×10^{-5} متر انتخاب شده است که یک اندازه کوچک و مناسبی می‌باشد. تصویر شبکه‌بندی اعمال شده بر ناحیه دوار، ساکن و سطوح پره‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. برای بررسی حساسیت نتایج نسبت به شبکه‌بندی از چهار اندازه مختلف برای اعمال شبکه استفاده می‌شود. مشخصات شبکه‌بندی تست شده در جدول ۲ آورده شده است. این حساسیت در شرایط $U_\infty = 10 \text{ m/s}$ و $TSR = 3/5$ مورد مطالعه قرار گرفته است. همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌گردد، مقدار y^+ روی پره‌های داریوس نزدیک به ۳ و روی پره‌های ساونیس نزدیک به ۱ است، که مقادیر قابل اعتمادی هستند.

جدول ۲- مقادیر حداکثر y^+ بر روی پره‌های داریوس (DB) و ساونیس (SB) برای اندازه‌های مختلف شبکه‌بندی برای روتور ترکیبی در $U_\infty = 10 \text{ m/s}$ و $TSR = 3/5$

شماره شبکه	تعداد سلول	y/D_1	J_{\max}^+	
			DB	SB
۲	۴۰۰,۹۶۰	۰/۰۰۰۰۲	۳/۵۵	۱/۰۱
۳	۴۵۹,۷۵۶	۰/۰۰۰۰۲	۳/۵۳	۱/۰۴
۴	۵۶۲,۸۲۲	۰/۰۰۰۰۲	۳/۵۰	۱/۰۰
			۳/۵۳	۰/۹۸

ضریب توان (C_p) و ضریب گشتاور (C_M) مطابق روابط بیان می‌شوند که تابع سرعت جریان (U_∞) و قطر خارجی (D_1) روتور ترکیبی هستند:

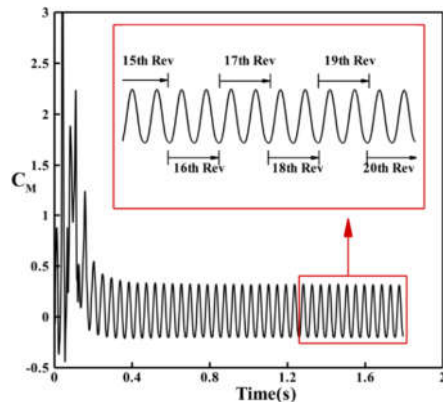
$$C_p = \frac{T \omega_o}{0.5 \rho D_1 U_\infty^3 H} = C_M \cdot TSR \quad (6)$$

$$C_M = \frac{T}{0.25 \rho U_\infty^2 D_1^2} \quad (7)$$

۳- صحت سنجی شبیه‌سازی توربین بادی

۳-۱- همگرایی زمانی نتایج نسبت به تعداد دوران روتور ترکیبی

با توجه به روش شبیه‌سازی مسئله که به صورت ناپایا صورت گرفته است، لازم است که همگرایی زمانی برای شبیه‌سازی مورد نظر بررسی شود. برای رسیدن به همگرایی زمانی، توربین بادی ترکیبی ۲۰ دور کامل را انجام داده است. این بررسی در شرایط $U_\infty = 10 \text{ m/s}$ و $TSR = 3/5$ مطالعه شده است. شکل ۳ تغییرات ضریب گشتاور لحظه‌ای نسبت به زمان برای ۲۰ دور کامل را نشان می‌دهد.

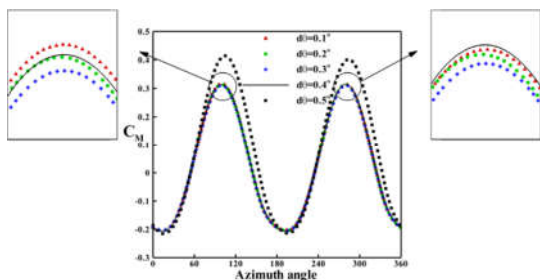


شکل ۳- همگرایی زمانی ضریب گشتاور روتور ترکیبی در شرایط $U_\infty = 10 \text{ m/s}$ و $TSR = 3/5$

مطابق شکل ۳، نوسانات و تغییرات با افزایش تعداد دور روتور ترکیبی کاهش یافته است. به طوری که از دور دهم به بعد تفاوتی در نتایج مشاهده نمی‌گردد. با بررسی کمی نتایج آورده شده در شکل فوق، می‌توان دریافت که بیشترین خطا بین مقادیر ضریب گشتاور متوسط دور دهم تا دور بیستم برابر ۲ درصد است، در حالی که با افزایش تعداد دوران، خطا از دور پانزدهم به بعد به زیر ۲ درصد می‌رسد. در نتیجه می‌توان برای کاهش زمان و هزینه محاسبات، همه‌ی شبیه‌سازی‌ها را تا دور پانزدهم انجام داد، اما برای اطمینان بیشتر، تمام مدل‌سازی‌ها برای بیست دور کامل انجام شده و در ادامه نتایج برای دور بیستم آورده شده است.

۳-۲- بررسی حساسیت نتایج به شبکه‌بندی

یکی از پارامترهایی که بر روی نتایج عددی اثر می‌گذارد، اندازه و کیفیت شبکه‌بندی اعمال شده روی هندسه است. به همین دلیل، در این بخش از تحقیق، بررسی استقلال نتایج از شبکه‌بندی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه ناحیه محاسباتی به دو قسمت مجزا



شکل ۶- تحلیل استقلال نتایج از گام زمانی در شرایط $U_{\infty} = 10 \text{ m/s}$ و $TSR = 3/5$

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، زمانی که مقدار $d\theta$ کمتر یا مساوی $0/4^\circ$ است، منحنی‌های تغییرات ضریب گشتاور تطابق و هم خوانی خوبی داشته و کمترین انحراف را نسبت به همدیگر دارند. همچنین ماکزیمم خطا که در قله‌های نمودار شکل ۶ اتفاق می‌افتد کمتر از ۱ درصد است. اما وقتی، $d\theta$ از $0/4^\circ$ به $0/5^\circ$ افزایش می‌یابد، خطای فاحش در نتایج قابل رویت و غیر قابل چشم پوشی است. در نتیجه برای کاهش هزینه و زمان محاسبات، مقدار $d\theta = 0/4^\circ$ برای ادامه‌ی شبیه‌سازی‌های عددی مناسب می‌باشد.

۳-۴- اعتبار سنجی نتایج عددی

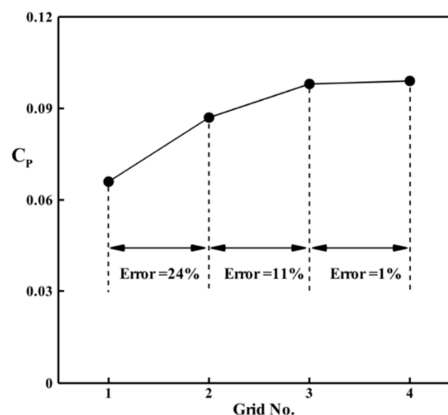
اعتبارسنجی نتایج عددی به منظور اطمینان از صحت شبیه‌سازی عددی توربین بادی ترکیبی صورت می‌گیرد. از طرفی، در مطالعات گذشته، هندسه‌ای شبیه به روتور ترکیبی مورد نظر بررسی نشده است. به همین خاطر، برای اعتماد به مدل و روش حل به کارگرفته شده در این شبیه‌سازی، نتایج به دست آمده روتور داریوس با داده‌های تجربی و عددی موجود اعتبارسنجی شده است.

ابعاد هندسی روتور داریوس مورد مطالعه برای اعتبارسنجی در این بخش، مطابق رضائیها و همکاران [۲۸] است. این بررسی در شرایط $U_{\infty} = 9/3 \text{ m/s}$ و $TSR = 4/5$ شده است که با توجه به اندازه قطر خارجی روتور داریوس، عدد رینولدز برابر $6/366 \times 10^5$ است. نتایج به دست آمده در جدول ۳ آورده شده و با داده‌های عددی رضائیها و همکاران [۲۸]، همچنین با نتایج تجربی تسیونی و همکاران [۳۰] مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ضریب توان متوسط به دست آمده با مقادیر تجربی و عددی هم‌خوانی خوبی دارد.

جدول ۳- نتایج مدل حل استفاده شده در برابر داده‌های موجود برای

روتور دو پره داریوس در $TSR = 4/5$ و $U_{\infty} = 9/3 \text{ m/s}$		
مطالعه‌ی حاضر	تسیونی و همکاران [۳۰]	رضائیها و همکاران [۲۸]
Re	$6/366 \times 10^5$	$6/366 \times 10^5$
Cp	۰/۳۹۰	۰/۴۱۰

برای انتخاب شبکه بهینه از نظر تعداد سلول، نمودار ضریب توان متوسط روتور ترکیبی در دور آخر برای شبکه‌های مختلف در شکل ۵ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، خطا بین نتایج با افزایش تعداد سلول کاهش می‌یابد. به طوری که خطا بین شبکه ۱ با شبکه ۲ و شبکه ۲ با شبکه ۳ به ترتیب برابر 24% و 11% است. در حالی که نتایج شبکه ۳ با شبکه ۴ مطابقت خوبی باهم دارند و مقادیر ضریب توان متوسط این دوشبکه نزدیک به هم می‌باشند. بنابراین، برای کاهش زمان و هزینه محاسبات، شبکه ۳ با $756,459$ سلول انتخاب شده و برای شبیه‌سازی روتور ترکیبی استفاده شده است.



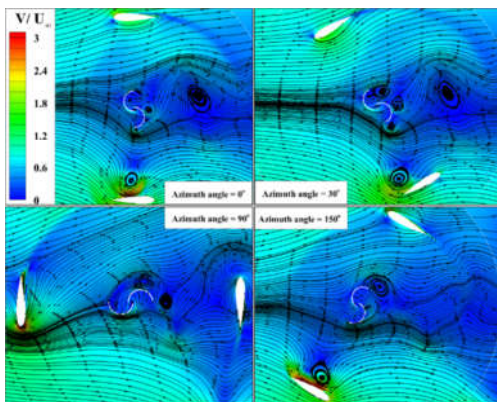
شکل ۵- ضریب توان متوسط روتور ترکیبی در دور آخر برای شبکه‌های مختلف در شرایط $U_{\infty} = 10 \text{ m/s}$ و $TSR = 3/5$

۳-۳- استقلال نتایج از گام زمانی

پارامتر دیگری که بر زمان و هزینه محاسبات، همچنین بر صحت بودن شبیه‌سازی عددی تاثیر می‌گذارد، پارامتر گام زمانی است. با توجه به مطالعه رضائیها و همکاران [۲۸] می‌توان دریافت که گام زمانی تابعی از تغییرات چرخش روتور ($d\theta$) است. به عبارتی، گام زمانی برابر است با مدت زمانی که طول می‌کشد تا روتور به مقدار مشخصی چرخش انجام دهد. رضائیها و همکاران [۲۸] و سپهریان و همکاران [۲۹] مقدار $d\theta = 0/5^\circ$ را برای تعیین گام زمانی و به منظور مدل‌سازی روتور داریوس در روش عددی انتخاب کرده‌اند. در این زمینه، اطلاعاتی در مورد مقدار $d\theta$ بهینه برای روتور ترکیبی در مطالعات گذشته دیده نمی‌شود. به همین خاطر در این تحقیق، $d\theta$ های مختلف برای روتور ترکیبی تست شده تا حالت بهینه انتخاب گردد. در همین رابطه، $0/5^\circ$ ، $0/4^\circ$ ، $0/3^\circ$ ، $0/2^\circ$ ، $0/1^\circ$ در شرایط $U_{\infty} = 10 \text{ m/s}$ و $TSR = 3/5$ برای روتور ترکیبی شبیه‌سازی شده و برای نشان دادن نتایج، نمودار تغییرات ضریب گشتاور نسبت به زاویه فضایی در دور آخر برای حالت‌های مختلف $d\theta$ در شکل ۶ آورده شده است.

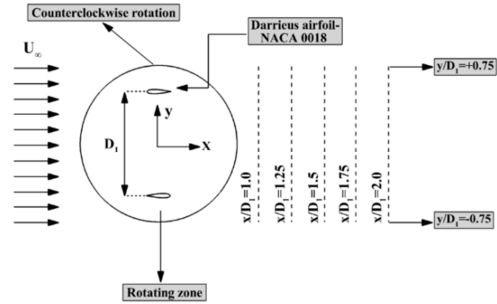
۴- بحث روی نتایج

در این بخش، نتایج به دست آمده از شبیه سازی عددی روتور ترکیبی مورد بحث قرار گرفته است. در گام اول، برای درک بهتر از تاثیر پره های ساونویوس بر روتور خارجی (داریوس) و همچنین برای فهم بهتر فیزیک و رفتار جریان، کانتورهای بی بعد شده در اطراف روتور ترکیبی رسم شده است. در ادامه، در گام دوم، نتایج به صورت نموداری در حالت های مختلف مقایسه شده و ارائه گردیده است. شکل ۱۰، خطوط جریان لحظه ای اطراف روتور ترکیبی در شرایط 5 m/s و $U_\infty = 1/5$ را نشان می دهد. پشت زمینه خطوط جریان در شکل ۱۰، نشان دهنده میدان سرعت بی بعد شده لحظه ای است. همان طور که مشاهده می شود، در زوایای فضایی مختلف، وجود پره های ساونویوس باعث به وجود آمدن گردابه هایی در پایین دست روتور می شود. در زاویه فضایی 0° ، گردابه هایی در حال تشکیل شدن هستند که با افزایش زاویه فضایی به 30° ، این گردابه ها، خصوصاً گردابه های متصل به پره های ساونویوس قوی تر می شوند. نکته قابل توجهی که می توان در شکل ۱۰ مشاهده کرد، گردابه های ایجاد شده بر روی قسمت محدب پره پیشرو ساونویوس است که در زاویه فضایی 90° به بزرگترین حالت خود رسیده است. این گردابه ها باعث ایجاد نیروی پسی منفی می شود که برای عملکرد روتور ترکیبی رخداد نامناسبی محسوب می شود. با افزایش زاویه فضایی از 90° تا 150° ، گردابه ی تشکیل شده روی پره پیشرو ساونویوس به سمت پایین دست روتور کشیده شده است که این اتفاق باعث از بین رفتن نیروی پسی منفی می شود. با توجه به میدان سرعت در شکل ۱۰، می توان دریافت که در تمام زوایای فضایی، وجود روتور داخلی باعث ایجاد میدان سرعت در داخل روتور ترکیبی شده است، به طوری که این اتفاق باعث ایجاد اندرکنش بین سیال و پره ها می شود. با افزایش زاویه فضایی، میدان سرعت نزدیک پره های ساونویوس و پایین دست روتور قوی تر می شود. این رخداد باعث ایجاد گشتاور مثبت برای روتور ترکیبی می شود که برای توربین بادی ترکیبی یک مزیت محسوب می شود

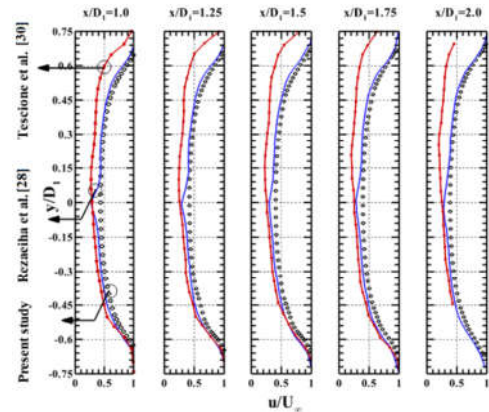


شکل ۱۰- خطوط جریان لحظه ای و میدان سرعت لحظه ای بی بعد شده اطراف روتور ترکیبی در شرایط $U_\infty = 5 \text{ m/s}$ و $TSR = 1/5$

شکل ۱۱، میدان سرعت بی بعد شده اطراف روتور ترکیبی در یک لحظه (برای زاویه فضایی 360°) برای $TSR = 1/5$ ، $2/5$ ، $3/5$ در سرعت آزاد باد ۵ متر بر ثانیه را نشان می دهد. همان طور که نشان داده می -

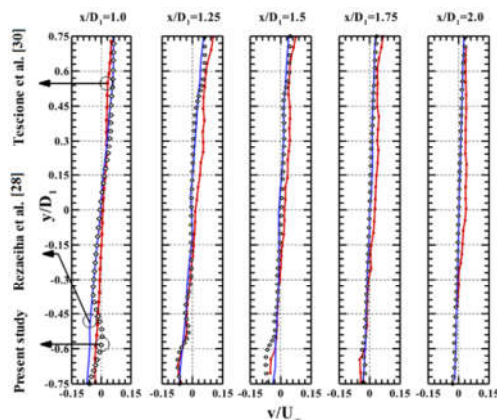


شکل ۷- موقعیت پروفیل های سرعت در پایین دست روتور

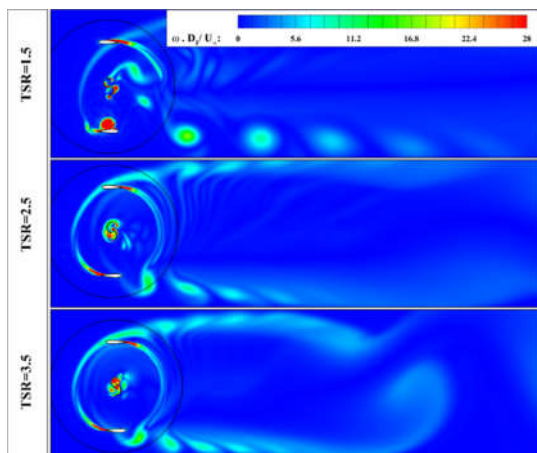


شکل ۸- پروفیل های سرعت متوسط بی بعد شده در جهت جریان در پایین دست روتور داریوس (نتایج عددی - تجربی)

متناظرًا، برای اطمینان بیشتر از مدل حل استفاده شده در شبیه سازی، پروفیل سرعت متوسط بی بعد شده در جهت جریان و عمود بر جریان در پایین دست روتور داریوس (موقعیت پروفیل های سرعت مطابق شکل ۷ به صورت $2, 1/75, 1/5, 1/25, 0$ است) به ترتیب در شکل ۸ و شکل ۹ رسم شده است. طبق شکل های ۸ و ۹، پروفیل های به دست آمده با داده های تجربی و عددی مقایسه شده اند و نتایج نشان می دهد که نتایج به دست آمده تطابقت خوبی با داده های عددی و تجربی دارد.



شکل ۹- پروفیل های سرعت متوسط عمودی بی بعد شده بر جریان در پایین دست روتور داریوس (نتایج عددی - تجربی)

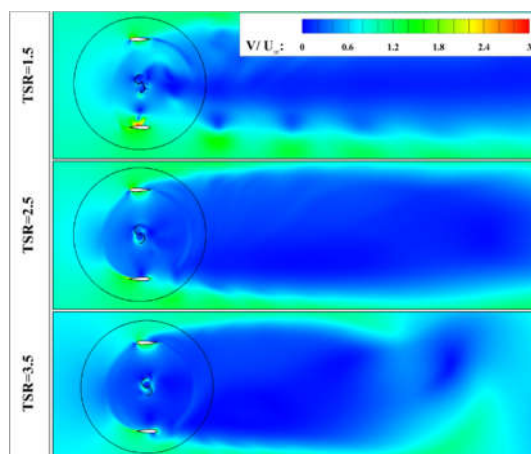


شکل ۱۲- میدان گردابه بی بعد شده اطراف روتور ترکیبی در یک لحظه (برای زاویه فضایی 360°) برای $U_\infty=5$ m/s در $TSR=1/5, 2/5, 3/5$

برای بررسی و مقایسه عملکرد آیرودینامیکی روتور ترکیبی در TSRهای مختلف، نمودار تغییرات ضریب گشتاور لحظه‌ای در دور آخر نسبت به زاویه فضایی برای تمام TSRها در سرعت آزاد باد ۵ متر بر ثانیه در شکل ۱۳ آورده شده است. مطابق شکل نشان داده شده، روتور ترکیبی در $TSR=1/5$ ، بیشترین گشتاور در اکثر زوایای فضایی نسبت به حالت‌های دیگر تولید می‌کند. ضعیف‌ترین عملکرد توربین بادی در $TSR=3/5$ اتفاق می‌افتد، به طوری که کمترین ضریب گشتاور در این نسبت سرعت نوک تولید می‌شود. به عبارتی دیگر، با افزایش مقدار TSR ، ضریب گشتاور تولیدی در تمام زوایای فضایی کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۱۳، بیشترین گشتاور در TSR -های $1/5$ ، $2/5$ ، $3/5$ در زاویه فضایی 96° تولید شده و مقدار ضریب گشتاور به ترتیب برابر 0.160 ، 0.140 و 0.129 است. یکی از مفاهیم مهمی که می‌توان در نمودار ضریب گشتاور به آن اشاره کرد و تاثیر بسزایی در عملکرد روتور ترکیبی دارد، مساحت ناحیه مرده (Dead Band) است. عملکرد توربین بادی وابسته به مساحت ناحیه مرده است، به طوری که با افزایش مساحت ناحیه مرده، عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی تضعیف می‌شود. ناحیه مرده همان جایی است که توربین بادی، گشتاور منفی تولید می‌کند، که در شکل ۱۳، این ناحیه منفی برای روتور ترکیبی مورد نظر نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، مساحت ناحیه مرده روتور ترکیبی در $TSR=1/5$ نسبت به حالت‌های $2/5$ و $3/5$ TSR کمترین گسترش را دارد. همچنین مساحت ناحیه مرده در $TSR=2/5$ نسبت به $TSR=3/5$ کمتر است. در نتیجه، روتور ترکیبی در $TSR=1/5$ عملکرد بهتری نسبت به حالت‌های دیگر دارد.

یکی از پارامترهایی که می‌توان با آن عملکرد آیرودینامیکی روتور ترکیبی را در شرایط مختلف ارزیابی کرد، ضریب توان متوسط است. در شکل ۱۴، ضریب توان متوسط روتور ترکیبی در TSR های $1/5$ ، $2/5$ و $3/5$ در سرعت آزاد باد ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه رسم شده است.

شود، در $TSR=1/5$ هوا به داخل روتور نفوذ کرده و با پره‌های روتور ساونیوس اندرکنش انجام می‌دهد که این امر باعث ایجاد نیروی پسا و گشتاور مثبت می‌شود. با افزایش TSR ، سرعت چرخش روتور ترکیبی افزایش می‌یابد و همان طور که مشاهده می‌گردد در نسبت سرعت نوک $2/5$ و $3/5$ ، هوای کمتری به داخل روتور نفوذ پیدا کرده است. به عبارتی در TSR بزرگتر از $1/5$ ، میدان سرعت در داخل روتور نسبت به حالت $TSR=1/5$ ضعیفتر شده است. به طوری که این وضعیت در $TSR=3/5$ به صورت کامل قابل رویت است، در این حالت، روتور ترکیبی مانند یک استوانه توپر عمل می‌کند که با سرعت زاویه‌ای مشخصی می‌چرخد. با توجه به شکل ۱۱، می‌توان پیش‌بینی کرد که روتور ترکیبی در $TSR=1/5$ نسبت به حالت‌های دیگر، عملکرد آیرودینامیکی بهتری دارد.



شکل ۱۱- میدان سرعت بی بعد شده اطراف روتور ترکیبی در یک لحظه (برای زاویه فضایی 360°) برای $U_\infty=5$ m/s در $TSR=1/5, 2/5, 3/5$

در شکل ۱۲، میدان گردابه بی بعد شده اطراف روتور ترکیبی در یک لحظه (برای زاویه فضایی 360°) برای $TSR=1/5, 2/5, 3/5$ در سرعت آزاد باد ۵ متر بر ثانیه رسم شده است. برای هر سه حالت، به دلیل جدا شدن جریان از لبه پره‌های روتور داخلی، می‌توان میدان گردابه قابل توجهی را گزارش کرد. همان طور که مشاهده می‌شود در $TSR=1/5$ گردابه‌های ایجاد شده توسط پره‌های ساونیوس ریزش کرده و به سمت پایین دست روتور حرکت می‌کند ولی در حالت‌های دیگر، گردابه‌ها به قسمت محدب و مقعر پره‌های داخلی چسبیده و ریزش پیدا نکرده‌اند. همچنین میدان گردابه با افزایش مقدار TSR بسیار قوی‌تر شده است، این اتفاق باعث ایجاد یک میدان پرفشار در داخل روتور ترکیبی می‌شود که یک رخداد منفی برای عملکرد توربین بادی ترکیبی است. در نتیجه، با در نظر گرفتن میدان گردابه در اطراف روتور ترکیبی برای TSR های مختلف، می‌توان نتیجه گرفت که روتور ترکیبی ضعیف‌ترین میدان گردابه خود را در حالت $TSR=1/5$ تجربه می‌کند. بنابراین، می‌توان ضریب گشتاور بیشتری را برای روتور ترکیبی در TSR پایین پیش‌بینی کرد.

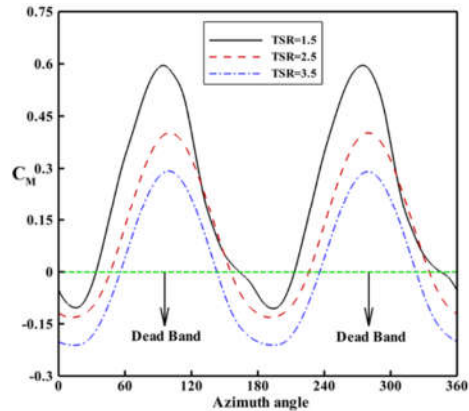
۵- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، عملکرد توربین بادی ترکیبی ساخته شده توسط روتور داریوس دو پره به عنوان روتور خارجی و روتور دو پره ساونیوس به عنوان روتور داخلی، با زاویه اتصال صفر درجه به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفت. قبل از ارزیابی تأثیر برخی پارامترها بر عملکرد آیرودینامیکی روتور مورد نظر، صحت سنجی شبیه‌سازی عددی بررسی شد. به طوری که، بررسی‌ها نشان داد که $d\theta = 0.4^\circ$ برای تعیین گام زمانی مناسب می‌باشد و اعتبارسنجی انجام شده، تطابقت خوبی با داده‌های عددی و تجربی داشت. در این مقاله، تأثیر TSR و U_∞ بر عملکرد توربین بادی ترکیبی مورد بررسی قرار گرفت. در همین راستا، رفتار روتور ترکیبی در شرایطی مختلف مانند $3/5$ و $2/5$ و $1/5$ TSR و 10 و 5 m/s U_∞ مدل‌سازی شد. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

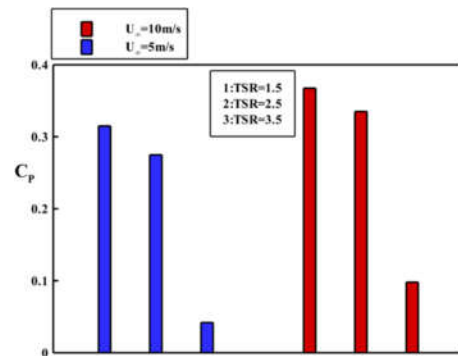
- با ترکیب روتور ساونیوس با روتور داریوس، یک نیروی اضافی به نام نیروی پسا در تولید گشتاور روتور داریوس ایجاد می‌شود که منجر به بهبود عملکرد روتور ترکیبی حاصل می‌گردد.
- با افزایش مقدار TSR، سرعت چرخش روتور افزایش یافته و مانع از نفوذ هوا به داخل شده، همچنین میدان ورتیسیت در داخل روتور قوی‌تر و میدان سرعت ضعیف‌تر شده است.
- با کاهش مقدار TSR، مساحت ناحیه مرده کاهش و مقدار بیشینه ضریب گشتاور لحظه‌ای افزایش یافته است.
- با افزایش سرعت آزاد باد مقدار توان تولیدی در تمام TSRها افزایش یافته است. به طوری که بیشترین تولید توان در 10 m/s U_∞ و $1/5$ TSR صورت گرفته و مقدار ضریب توان آن برابر 0.367 است.
- با مقایسه توان تولیدی در TSRهای مختلف در 10 و 5 m/s U_∞ مشخص شد که در $1/5$ TSR و 5 m/s U_∞ ، ضریب توان، 86% درصد بیشتر از حالت $3/5$ TSR است. همچنین، این مقدار در 10 m/s U_∞ برابر 76% درصد است.

۶- نمادها

c	طول وتر پره‌های داریوس (m)
C_M	ضریب گشتاور
C_P	ضریب توان
d	طول پره‌های روتور ساونیوس (m)
$d\theta$	تغییر زاویه چرخش روتور ($^\circ$)
DB	پره داریوس
D_1	قطر روتور داریوس (m)
D_2	قطر روتور ساونیوس (m)
G_k	تولید انرژی جنبشی آشفتگی توسط سرعت متوسط
G_ω	تولید انرژی جنبشی آشفتگی توسط ω
H	ارتفاع توربین (m)
k	انرژی جنبشی آشفتگی (J)
Re	عدد رینولدز
SB	پره ساونیوس
S_k	ترم چشمه ($kg.J/m^3.s$)
S_ω	ترم چشمه ($kg.J/m^3.s$)
t	زمان (s)



شکل ۱۳- تغییرات ضریب گشتاور لحظه‌ای در دور آخر نسبت به زاویه فضایی برای تمام TSRها در $U_\infty = 5$ m/s



شکل ۱۴- مقادیر ضریب توان متوسط برای روتور ترکیبی در $3/5$ و $1/5$ ، $2/5$ TSR برای 10 و 5 m/s U_∞

مفاهیم و نکات قابل توجهی را می‌توان از این شکل استنباط کرد که در ادامه بیان شده است. با افزایش مقدار TSR توان تولیدی در هر یک از سرعت‌های آزاد باد کاهش یافته است. دلیل این کاهش را می‌توان در کانتورهای میدان سرعت که در شکل ۱۱ استنباط کرد. به عبارتی، با افزایش مقدار TSR، سرعت چرخش روتور افزایش یافته و هوای کمتری به داخل روتور نفوذ می‌کند که این امر باعث کاهش توان تولیدی می‌شود. همچنین با توجه به شکل ۱۴، با افزایش مقدار سرعت آزاد باد، در تمام TSRها، توان تولیدی روتور ترکیبی افزایش یافته است. دلیل این افزایش، به خاطر نفوذ بیشتر جریان هوا به داخل روتور ترکیبی است که باعث افزایش اندرکنش بین جریان هوا و پره‌های داخلی می‌شود. با بررسی مقادیر ضریب توان متوسط به دست آمده می‌توان دریافت که بیشترین توان تولیدی بدون در نظر گرفتن سرعت آزاد باد در $1/5$ TSR اتفاق افتاده، به طوری که در 5 m/s U_∞ ، $14/5$ و 86% درصد توان بیشتری به ترتیب نسبت به TSRهای $2/5$ و $3/5$ تولید شده است. متناظرًا، این مقادیر در 10 m/s U_∞ به ترتیب برابر $9/5$ و 73% درصد است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روتور ترکیبی در TSRهای پایین عملکرد آیرودینامیکی بهتری نسبت به TSRهای بزرگتر دارد.

- [12] Song C, Wu G, Zhu W, Zhang X. Study on aerodynamic characteristics of darrieus vertical axis wind turbines with different airfoil maximum thicknesses through computational fluid dynamics. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2020;45:689-98.
- [13] Mohamed MH, Dessoky A, Alqurashi F. Blade shape effect on the behavior of the H-rotor Darrieus wind turbine: Performance investigation and force analysis. *Energy*. 2019;179:1217-34.
- [14] Chan CM, Bai HL, He DQ. Blade shape optimization of the Savonius wind turbine using a genetic algorithm. *Applied Energy*. 2018;213:148-57.
- [15] Lee J-H, Lee Y-T, Lim H-C. Effect of twist angle on the performance of Savonius wind turbine. *Renewable Energy*. 2016;89:231-44.
- [16] Roy S, Saha UK. Wind tunnel experiments of a newly developed two-bladed Savonius-style wind turbine. *Applied Energy*. 2015;137:117-256.
- [17] Alom N, Saha UK. Influence of blade profiles on Savonius rotor performance: Numerical simulation and experimental validation. *Energy Conversion and Management*. 2019;186:267-77.
- [18] Hassanzadeh R, Mohammadnejad M. Effects of inward and outward overlap ratios on the two-blade Savonius type of vertical axis wind turbine performance. *International Journal of Green Energy*. 2019;16:1485-96.
- [19] Hassanzadeh R, Mohammad NM. Effect of Overlapping Size on the Performance of the Savonius Wind Turbine, in Both Conventional and the Bach-Type Models. 2019.
- [20] Liang X, Fu S, Ou B, Wu C, Chao CYH, Pi K. A computational study of the effects of the radius ratio and attachment angle on the performance of a Darrieus-Savonius combined wind turbine. *Renewable energy*. 2017;113:329-34.
- [21] Gupta R, Biswas A, Sharma KK. Comparative study of a three-bucket Savonius rotor with a combined three-bucket Savonius–three-bladed Darrieus rotor. *Renewable Energy*. 2008;33:1974-81.
- [22] Hosseini A, Goudarzi N. Design and CFD study of a hybrid vertical-axis wind turbine by employing a combined Bach-type and H-Darrieus rotor systems. *Energy conversion and management*. 2019;189:49-59.
- [23] Jacob J, Chatterjee D. Design methodology of hybrid turbine towards better extraction of wind energy. *Renewable Energy*. 2019;131:625-43.
- [24] Saini G, Saini RP. Comparative investigations for performance and self-starting characteristics of hybrid and single Darrieus hydrokinetic turbine. *Energy Reports*. 2020;6:96-100.
- [25] Liu K, Yu M, Zhu W. Enhancing wind energy harvesting performance of vertical axis wind turbines with a new hybrid design: A fluid-structure interaction study. *Renewable Energy*. 2019;140:912-27.
- [26] Saini G, Saini RP. A numerical analysis to study the effect of radius ratio and attachment angle on hybrid hydrokinetic turbine performance. *Energy for Sustainable Development*. 2018;47:94-106.
- [27] Asadi M, Hassanzadeh R. Effects of internal rotor parameters on the performance of a two bladed Darrieus-two bladed Savonius hybrid wind turbine. *Energy Conversion and Management*. 2021;238:114109.
- [28] Rezaeiha A, Kalkman I, Blocken B. CFD simulation of a vertical axis wind turbine operating at a moderate tip speed ratio: Guidelines for minimum domain size and azimuthal increment. *Renewable energy*. 2017;107:373-85.
- [29] Sepehrianazar F, Hassanzadeh R, Mirzaee I. Turbulence and Energy Assessment of a Two Bladed H-Type Vertical Axis Wind Turbine Between Two High-Rise Buildings. *International Journal of Heat and Technology*. 2019; 948-57.
- [30] Tescione G, Ragni D, He C, Ferreira CJS, Van Bussel GJW. Near wake flow analysis of a vertical axis wind turbine by stereoscopic particle image velocimetry. *Renewable Energy*. 2014;70:47-61.
- T گشتاور (N.m)
- TSR نسبت سرعت نوک (m/s)
- \bar{u} سرعت متوسط (m/s)
- u' سرعت نوسانی (m/s)
- u_f سرعت اصطکاکی
- U_∞ سرعت آزاد باد (m/s)
- v سرعت در جهت عمود بر جریان (m/s)
- V مقدار سرعت (m/s)
- x_j مولفه مختصات
- y ارتفاع اولین لایه از شبکه بندی نسبت به سطوح پره ها (m)
- y^+ تابع بدون بعد دیواره
- علائم یونانی**
- ω_0 سرعت زاویه ای روتور (rad/s)
- μ لزجت دینامیکی (Pa.s)
- τ_w تنش دیواره (N/m^2)
- Γ_k پخش انرژی جنبشی (kg/m.s)
- Γ_ω پخش نرخ اتلاف (kg/m.s)
- ۷- مراجع**
- [1] Yadegari M, Bak Khoshnevis A. Investigation of entropy generation, efficiency, static and ideal pressure recovery coefficient in curved annular diffusers. *The European Physical Journal Plus*. 2021;136:1-9.
- [2] Yadegari M, Bak Khoshnevis A. Numerical study of the effects of adverse pressure gradient parameter, turning angle and curvature ratio on turbulent flow in 3D turning curved rectangular diffusers using entropy generation analysis. *The European Physical Journal Plus*. 2020;135(7):1-21.
- [3] Yadegari M, Khoshnevis AB. Entropy generation analysis of turbulent boundary layer flow in different curved diffusers in air-conditioning systems. *The European Physical Journal Plus*. 2020;135(6):534.
- [4] Yadegari M. An optimal design for S-shaped air intake diffusers using simultaneous entropy generation analysis and multi-objective genetic algorithm. *The European Physical Journal Plus*. 2021;136(10):1019.
- [5] Yadegari M, Bak Khoshnevis A. A numerical study over the effect of curvature and adverse pressure gradient on development of flow inside gas transmission pipelines. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2020;42:1-5.
- [6] Haghghatjoo H, Yadegari M, Bak Khoshnevis A. Optimization of single-obstacle location and distance between square obstacles in a curved channel. *The European Physical Journal Plus*. 2022;137(9):1042.
- [7] Sobhani E, Ghaffari M, Maghrebi MJ. Numerical investigation of dimple effects on darrieus vertical axis wind turbine. *Energy*. 2017;133:231-41.
- [8] Arpino F, Scungio M, Cortellessa G. Numerical performance assessment of an innovative Darrieus-style vertical axis wind turbine with auxiliary straight blades. *Energy Conversion and Management*. 2018;171:769-77.
- [9] Qasemi K, Azadani LN. Optimization of the power output of a vertical axis wind turbine augmented with a flat plate deflector. *Energy*. 2020;202:117745.
- [10] Jiang Y, Zhao P, Stoesser T, Wang K, Zou L. Experimental and numerical investigation of twin vertical axis wind turbines with a deflector. *Energy Conversion and Management*. 2020;209:112588.
- [11] Mohamed MH. Performance investigation of H-rotor Darrieus turbine with new airfoil shapes. *Energy*. 2012;47:522-30.