

Numerical investigation of the behavior of hybrid wind turbine consisting of Bach type blades as internal rotor

M. Asadi*¹ R. Hassanzadeh² 

Urmia University of Technology, Urmia, Iran

(Received: 2024/05/07, Revised: 2024/06/18, Accepted: 2024/07/06, Published: 2024/07/22)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1402.12.2.7.8>

ABSTRACT

In this article, a new type of hybrid vertical axis wind turbines is introduced and its aerodynamic behavior is evaluated with the help of Computational Fluid Dynamics. In the investigated rotor structure, Bach-type blades are used as the inner rotor. The flow in the computational domain is incompressible, unsteady and turbulent. Beyond that, SST k- ω turbulence method is used to model the Reynolds stress. The purpose of this research is to provide suitable performance conditions for the studied rotor. In this regard, the performance of the rotor and the power coefficient of the hybrid wind turbine in tip speed ratio (TSR) of 3.5, 2.5, and 1.5 and free wind speed (U_∞) of 5 and 10 m/s and attachment angles (ϕ) of 0° , 45° and 90° are investigated. The obtained results showed that with increasing TSR value, the velocity and vorticity field inside the rotor became weaker and stronger respectively and the area of the dead band expanded. In addition, the value of ϕ has a direct relationship with the power coefficient, in such a way that with the increasing of the value of ϕ , the power coefficient of the rotor has increased. On the other hand, the maximum power is produced in the conditions of $TSR = 1.5$, $\phi = 90^\circ$ and $U_\infty = 10$ m/s and its value is 0.39.

Keywords: Vertical Axis Wind Turbine, Savonius, Darrieus, Dead Band, Power Coefficient

بررسی عددی رفتار توربین بادی ترکیبی متشکل از پره‌های نوع باخ به‌عنوان روتور داخلی

رحیم حسن‌زاده^۲ محمد اسدی^{۱*} 

دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۸، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۲۹، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۶، انتشار: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱)

چکیده

در این مقاله، نوع جدیدی از توربین‌های بادی محور عمودی ترکیبی معرفی شده و رفتار آیرودینامیکی آن با کمک دینامیک سیالات محاسباتی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ساختار روتور مورد بررسی، از پره‌های نوع باخ به‌عنوان روتور داخلی استفاده شده است. جریان در میدان محاسباتی به‌صورت تراکم‌ناپذیر، ناپایا و آشفته است. علاوه بر آن، برای مدل‌سازی تنش رینولدز از روش آشفتگی SST k- ω استفاده شده است. هدف از این تحقیق، ارائه شرایط عملکردی مناسب برای روتور مورد مطالعه می‌باشد. در این راستا، عملکرد روتور و ضریب توان توربین بادی ترکیبی در نسبت سرعت نوک (TSR) ۳/۵، ۲/۵، ۱/۵ و سرعت آزاد باد (U_∞) ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه و زوایای اتصال (ϕ) 0° ، 45° و 90° مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند که با افزایش مقدار TSR میدان سرعت و ورتیسیته داخل روتور به ترتیب ضعیف‌تر و قوی‌تر شده و مساحت ناحیه مرده گسترش یافته است. همچنین، مقدار ϕ با ضریب توان رابطه مستقیم داشته، به‌گونه‌ای که با افزایش مقدار ϕ ، ضریب توان روتور افزایش یافته است. از سوی دیگر، بیشترین توان در شرایط $TSR = 1/5$ ، $\phi = 90^\circ$ و $U_\infty = 10$ m/s تولید شده و مقدار آن برابر ۰/۳۹ است.

واژه‌های کلیدی: توربین بادی محور عمودی، ساوونیوس، داریوس، ناحیه مرده، ضریب توان

۱- دکتری: mohammad1371.asadi@yahoo.com

۲- دکتری (نویسنده پاسخگو): m.hassanzadeh@uut.ac.ir

فهرست علائم و اختصارات

۱- مقدمه

امروزه انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان یکی از منابع اصلی برای تولید الکتریسیته محسوب می‌شوند. در میان این نوع انرژی‌ها، باد یکی از منابع تجدیدپذیر به‌شمار می‌رود که با استفاده از توربین‌های بادی می‌توان انرژی باد را به انرژی الکتریسیته تبدیل کرد. محور چرخش توربین‌ها به دو حالت افقی و عمودی می‌باشد که هر کدام از آن‌ها معایب و مزایایی دارند. به‌طور مثال، عملکرد توربین‌های محور عمودی وابسته به جهت باد نبوده؛ ولی عملکرد توربین‌های محور افقی وابسته به جهت باد هستند که به این منظور، از سیستم یاو در روتورهای محور افقی استفاده می‌شود تا پره‌های روتور در جهت باد قرار گیرند. این سیستم باعث هزینه‌بر بودن توربین‌های محور افقی نسبت به محور عمودی می‌شود. از طرفی دیگر، باتوجه‌به عملکرد بهتر روتورهای محور عمودی در سرعت‌های باد پایین، استفاده از این توربین‌های بادی در مناطق شهری نسبت به روتورهای محور افقی در الویت قرار دارند. روتورهای داریوس^۱ و ساوونیوس^۲ از انواع توربین‌های محور عمودی هستند که عملکرد هر کدام به ترتیب بر اساس نیروی لیفت و پسا است. توربین‌های بادی داریوس و ساوونیوس هر کدام در شرایط متفاوت بیشترین توان را تولید می‌کنند. به همین دلیل، بسیاری از محققین بر این باورند که با ترکیب این دو روتور، می‌توان یک ساختار بهینه برای توربین بادی محور عمودی در همه شرایط طراحی کرد. در تحقیق پیشرو، عملکرد آیرودینامیکی نوع جدیدی از توربین بادی محور عمودی ترکیبی مورد مطالعه قرار گرفته است. توربین بادی محور عمودی ترکیبی، از روتور ساوونیوس و روتور داریوس تشکیل شده است. به‌طور معمول، پره‌های ساوونیوس به‌عنوان روتور داخلی و پره‌های داریوس به‌عنوان روتور خارجی در توربین بادی ترکیبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مطالعات اندکی در مورد این نوع از توربین‌ها صورت گرفته است که سعی شده است در ادامه، همه مطالعات سال‌های اخیر در زمینه روتورهای ترکیبی آورده شود.

قوش و همکاران [۱] یک روتور ترکیبی که از سه پره داریوس از نوع تخم‌مرغی و سه پره ساوونیوس تشکیل شده

c	طول وتر پره‌های داریوس
C_M	ضریب گشتاور
C_P	ضریب توان
d	طول پره‌های روتور ساوونیوس
$d\theta$	تغییر زاویه چرخش روتور
DB	پره داریوس
D_1	قطر روتور داریوس
D_2	قطر روتور ساوونیوس
G_k	تولید انرژی سینتیک آشفته‌گی توسط سرعت متوسط
G_{ω}	تولید انرژی سینتیک آشفته‌گی توسط ω
H	ارتفاع توربین
k	انرژی سینتیک آشفته‌گی
Re	عدد رینولدز
SB	پره ساوونیوس
S_k	ترم چشمه
S_{ω}	ترم چشمه
t	زمان
T	گشتاور
TSR	نسبت سرعت نوک
\bar{u}	سرعت متوسط
u'	سرعت نوسانی
u_{τ}	سرعت اصطکاکی
U_{∞}	سرعت آزاد باد
v	سرعت در جهت عمود بر جریان
V	سرعت (velocity magnitude)
x_j	مؤلفه مختصات
y	ارتفاع اولین لایه از شبکه‌بندی نسبت به سطوح پره‌ها
y^+	تابع بدون بعد دیواره
φ	زاویه اتصال پره‌های روتور داخلی با روتور خارجی
علائم یونانی:	
ω_0	سرعت زاویه‌ای روتور
μ	لزجت دینامیکی
τ_w	تنش دیواره
Γ_k	پخش انرژی جنبشی
Γ_{ω}	پخش نرخ اتلاف

¹ Darrieus

² Savonius

داریوس مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که روتور ترکیبی توان بیشتری نسبت به روتور داریوس در نسبت سرعت‌های نوک کمتر از $1/5$ تولید می‌کند. با این حال، در نسبت سرعت‌های نوک^۱ (TSR) بزرگتر، روتور ترکیبی در مقایسه با روتور داریوس عملکرد ضعیفی داشت. لیو و همکاران [۷] یک توربین بادی محور عمودی ترکیبی داریوس و ساوننیوس اصلاح شده جدیدی طراحی کردند. آنها نشان دادند که روتور ترکیبی در نسبت سرعت‌های نوک پایین‌تر توانایی خود شروعی بهتری را نسبت به روتور داریوس ایجاد می‌کند. علاوه بر این، با افزایش اندازه قطر روتور داخلی، میزان توان خروجی و توانایی خود شروعی روتور ترکیبی بهتر از روتور داریوس در نسبت سرعت‌های نوک بزرگتر است. ساینی و ساینی [۸] 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 $9/9$ درصد بهبود یافته است. همچنین ضریب گشتاور متوسط توربین ترکیبی $15/9$ درصد بیشتر از روتور داریوس است

نسبت هم‌پوشانی پره‌های ساوننیوس در روتور ترکیبی تأثیر بسزایی در تولید توان توربین بادی دارد. بسیاری از محققین این موضوع را مورد بررسی قرار دادند. برای مثال، بویان و بیروز [۹] روتور سه پره داریوس با پره‌های نامتقارن را به‌صورت تجربی بررسی کردند. سپس، برای بهبود خود شروعی و تولید توان روتور داریوس، از روتور ساوننیوس با پره‌های متعارف به‌عنوان روتور داخلی استفاده کردند. آن‌ها تأثیر نسبت هم‌پوشانی پره‌های ساوننیوس را بر عملکرد روتور داریوس را مطالعه کرده و نشان دادند که نسبت هم‌پوشانی $0/15$ بهترین عملکرد را دارد. گوپتا و همکاران [۱۰] تأثیر نسبت هم‌پوشانی روتور ساوننیوس را بر عملکرد روتور ترکیبی به‌صورت تجربی ارزیابی کردند. در این بررسی روتور ساوننیوس بالای روتور داریوس قرار گرفته است. آن‌ها متوجه شدند که ماکزیمم ضریب قدرت در نسبت هم‌پوشانی صفر تولید می‌شود و برابر $0/51$ است.

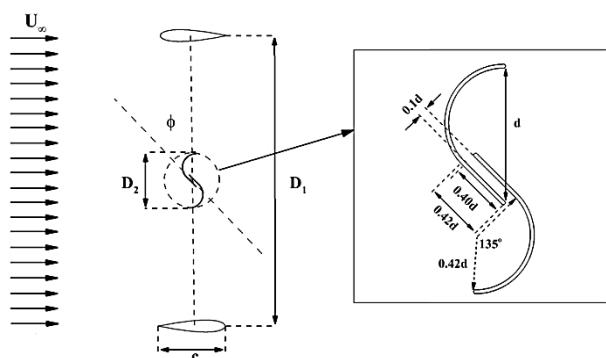
با مرور مطالعات قبلی در مورد توربین‌های بادی محور عمودی ترکیبی، مشخص می‌شود که این نوع توربین بادی در نسبت سرعت‌های نوک پایین‌تر عملکرد بهتری نسبت به

است به‌صورت عددی مطالعه کردند. آن‌ها با بررسی رفتار جریان اطراف توربین بادی ترکیبی و سمت پایین دست روتور، به این نتیجه رسیدند که روتور داریوس در بالای روتور ساوننیوس به تولید بیشتر توان توربین ترکیبی کمک می‌کند. محمد [۲] برای بهبود توانایی خود شروعی روتور داریوس، تأثیر استفاده از روتور ساوننیوس و افزایش صلبیت را بررسی کرد. نتایج به دست آمده نشان داد که اتصال روتور ساوننیوس به‌عنوان روتور داخلی به توربین بادی داریوس و افزایش صلبیت، توانایی خود شروعی روتور داریوس را بهبود می‌بخشد. بوهاال و همکاران [۳] تأثیر جهت چرخش روتور خارجی و داخلی توربین بادی محور عمودی که از چهار پره داریوس به‌عنوان روتور خارجی تشکیل شده است بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که وقتی روتور ساوننیوس و روتور داریوس به یک جهت یکسان بچرخند، عملکرد روتور ترکیبی بهبود می‌یابد.

یکی از پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد آیرودینامیکی روتور ترکیبی زاویه اتصال بین روتور داخلی با روتور خارجی است که در این رابطه مطالعاتی انجام شده است. به‌طور مثال، لیناگ و همکاران [۴] تأثیر زاویه اتصال و نسبت شعاع بر راندمان و توانایی خود شروعی روتور ترکیبی را مورد بررسی قرار دادند. روتور ساوننیوس استفاده شده از نوع متعارف (نیم دایره‌ای) بوده و نتیجه گرفته شد که روتور ترکیبی با نسبت شعاع $0/25$ و زاویه اتصال صفر درجه بیشترین توان را تولید می‌کند و قابلیت خود شروعی بهتری دارد. ساینی و ساینی [۵] یک توربین آبی محور عمودی که از دو پره متعارف ساوننیوس و دو پره داریوس تشکیل شده است به‌صورت عددی مطالعه کردند. آن‌ها تأثیر زاویه اتصال و نسبت شعاع روتور ساوننیوس به روتور داریوس بر عملکرد روتور ترکیبی را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که ماکزیمم ضریب توان در زاویه اتصال 30 درجه و نسبت شعاع $0/2$ اتفاق می‌افتد. علاوه بر آن، در زاویه اتصال 90 درجه کمترین نوسانات در تولید توان مشاهده می‌شود.

در بسیاری از ادبیات گذشته عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی ترکیبی با توربین بادی داریوس مقایسه شده است. در این رابطه، حسینی و گودرزی [۶] روتور ترکیبی با هندسه جدید معرفی کردند. روتور ترکیبی در نظر گرفته شده یک روتور دو پره ساوننیوس و یک روتور سه پره داریوس بود. آن‌ها عملکرد روتور پیشنهادی را با روتور

¹ Tip speed ratio



شکل (۱): تصویری از نمای بالای روتور ترکیبی مورد مطالعه که از دو پره ساونیوس به عنوان روتور داخلی و دو پره داریوس به عنوان روتور خارجی تشکیل شده

جدول (۱): جزئیات هندسی روتور ترکیبی

مقادیر	عواملها
۱۰۰۰mm	قطر روتور خارجی (D_1)
۰/۲۲	طول وتر پره‌های روتور داریوس (c/D_1)
NACA 0018	نوع مقطع روتور داریوس
متقارن و مستقیم	نوع روتور داریوس
نوع باخ	نوع پره‌های روتور ساونیوس
۰/۱d	هم‌پوشانی پره‌های روتور داخلی
۰/۱۱۱	طول پره‌های روتور داخلی (d/D_1)
۰/۰۰۰۶۳	ضخامت پره‌های روتور داخلی (t/D_1)
۰/۲	نسبت قطر داخلی به قطر خارجی (D_2/D_1)
$90^\circ, 45^\circ, 0^\circ$	زاویه اتصال پره‌ها (ϕ)

به منظور بررسی عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی ترکیبی، مقادیر مختلف نسبت سرعت نوک مانند $1/5$ ، $2/5$ و $3/5$ و زاویای اتصال 0° ، 45° و 90° برای روتور ترکیبی در نظر گرفته شده است. محاسبات برای دو سرعت آزاد باد (U_∞) ۵ و ۱۰ m/s انجام می‌شود که عدد رینولدز مربوطه طبق قطر خارجی روتور (D_1) به ترتیب برابر $10^5 \times 3/425$ و $10^5 \times 6/85$ است. با توجه به رابطه نسبت سرعت نوک، این پارامتر با سرعت آزاد باد، قطر خارجی روتور و سرعت چرخش روتور (ω_0) رابطه دارد. با این حال، در مطالعه عددی حاضر، تغییرات مقدار نسبت سرعت نوک در سرعت آزاد باد مشخص با توجه به ثابت بودن قطر روتور، در سرعت چرخش توربین بادی اعمال می‌گردد.

روتور داریوس و ساونیوس دارد. در این مطالعه، در ادامه مطالعات ارزشمند قبلی، روتور ساونیوس نوع باخ به عنوان روتور داخلی در مرکز روتور داریوس دو پره پیاده سازی شده و عملکرد روتور ترکیبی حاصل به صورت عددی بررسی شده است. در بسیاری از مطالعات گذشته در مورد توربین بادی ساونیوس نشان داده شده است که روتور نوع باخ عملکرد آیرودینامیکی بهتری نسبت به حالت پره‌های نوع متعارف دارد [۱۱-۱۳]. در این مقاله، تأثیر نسبت سرعت نوک، زاویه اتصال و سرعت آزاد باد بر عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی ترکیبی متشکل از روتور داخلی نوع باخ به صورت عددی مطالعه شده و نتایج عددی با جزئیات کامل در ادامه ارائه شده است.

۲- بیان فیزیک و حل مسئله

در این مقاله، ویژگی‌های تولید توان یک توربین بادی ترکیبی ساخته شده از روتور دو پره ساونیوس به عنوان روتور داخلی و روتور داریوس دو پره به عنوان روتور خارجی با استفاده از روش حجم محدود به صورت عددی بررسی شده است. از پره‌های نوع باخ به عنوان روتور داخلی استفاده شده که در مطالعاتی مانند [۱۱-۱۳] بهینه بودن آن‌ها نسبت به پره‌های نوع متعارف اثبات شده است. پروفیل باخ، معرف نوعی پره روتور ساونیوس بوده و معرف شکل خاصی از پروفیل پره می‌باشد که علاوه بر بخش هلالی شکل دارای یک بخش مستقیم نیز می‌باشد. برای ابعاد روتور داخلی از مطالعات [۱۳] استفاده شده است. از سوی دیگر، ایرفویل-های متقارن NACA 0018 برای روتور خارجی داریوس در نظر گرفته شده است. عملکرد بهینه ایرفویل‌های NACA 0018 در مقایسه با ایرفویل‌های متقارن دیگر در مطالعات [۱۴-۱۶] گزارش شده است. نسبت قطر بهینه (D_2/D_1)، با توجه به گزارش مطالعه گذشته [۵] که در آن D_1 و D_2 به ترتیب قطر روتورهای خارجی و داخلی هستند، مقدار ثابتی برابر $0/2$ به دست آمده است. جدول ۱ و شکل ۱ به ترتیب داده‌های ابعادی لازم و شماتیکی از روتور ترکیبی در نظر گرفته شده را نشان می‌دهد. در اینجا، ابعاد روتور داخلی بر اساس نتایج ارائه شده توسط روی و ساها [۱۳] انتخاب شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، پره‌های روتور نوع باخ دارای نسبت هم‌پوشانی ثابت $0/1d$ در این تحقیق هستند.

در تحقیق حاضر، میدان محاسباتی به دو قسمت دوار و ساکن تقسیم می‌شود. برای شبیه‌سازی جریان در این دو قسمت از روش قاب مرجع چندگانه^۲ استفاده شده است. در این روش معادلات ناوراستوکس برای قسمت دوار و ساکن به‌صورت جداگانه در هر گام زمانی حل می‌شوند و در سطح مشترک با هم کوپل می‌گردند. باتوجه به مقدار عدد رینولدز و شرایط موجود، برای بررسی رفتار جریان و حل معادلات حاکم بر جریان آشفته از روش عددی متوسط‌گیری زمانی^۳ (RANS) استفاده می‌شود. با متوسط‌گیری از معادلات حاکم بر جریان، معادلات پیوستگی و مومنوم به‌صورت زیر بیان می‌گردد [۱۷]:

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

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

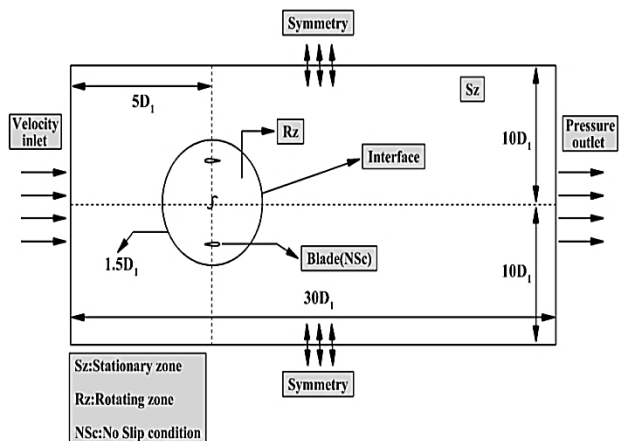
ترم آخر معادله مومنوم در سمت راست، معرف تنش رینولدز است. برای شبیه‌سازی این ترم از معادله، از مدل SST k- ω استفاده می‌گردد. طبق مطالعات متعددی مانند [۶، ۱۸، ۱۹، ۲۰] برای شبیه‌سازی تنش رینولدز، مدل SST k- ω قابل اعتماد است. مدل آشفته‌گی SST k- ω از دو معادله انتقال تشکیل شده است که به‌صورت زیر بیان می‌شوند [۱۸]:

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

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

در اینجا، معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود به‌صورت عددی توسط نرم‌افزار انسیس فلونت نسخه ۱۷/۱ حل می‌شوند. برای این منظور، ترم‌های جابه‌جایی و ویسکوز به ترتیب با استفاده از بالا دست مرتبه دوم و تقریب تفاضل مرکزی گسسته‌سازی شده‌اند [۱۸]. از سوی دیگر، مشتقات زمان با استفاده از یک روش ضمنی مرتبه دوم گسسته می‌شوند. علاوه بر این، برای کوپل میدان‌های سرعت و فشار، از الگوریتم سیمپل استفاده شده است.

در این بررسی، دامنه محاسبات به دو ناحیه دوار و ساکن تقسیم می‌شود. روتور ترکیبی متشکل از پره‌های ساوننیوس نوع باخ و داریوس در ناحیه دوار قرار گرفته که با سرعت زاویه‌ای مشخص در جهت پادساعت‌گرد دوران می‌کنند. ناحیه ساکن شامل پیرامون ناحیه دوار و روتور ترکیبی است که به‌صورت 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 (D_1) است. قطر ناحیه دوار $1/5 D_1$ انتخاب شده و اندازه طول و عرض ناحیه ساکن به ترتیب $30 D_1$ و $20 D_1$ اعمال شده است. باتوجه به شکل ۲، مرکز روتور ترکیبی $5 D_1$ از طرف ورودی و $10 D_1$ 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 یک 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، شرط مرزی سطح مشترک استفاده شده است. شرایط مرزی سطح مشترک با مدل مش لغزشی^۱ استفاده شده است. مدل مش لغزشی را زمانی می‌توان استفاده کرد که شبکه‌بندی نزدیک سطح مشترک تغییر شکل ندهند [۱۷، ۱۸].

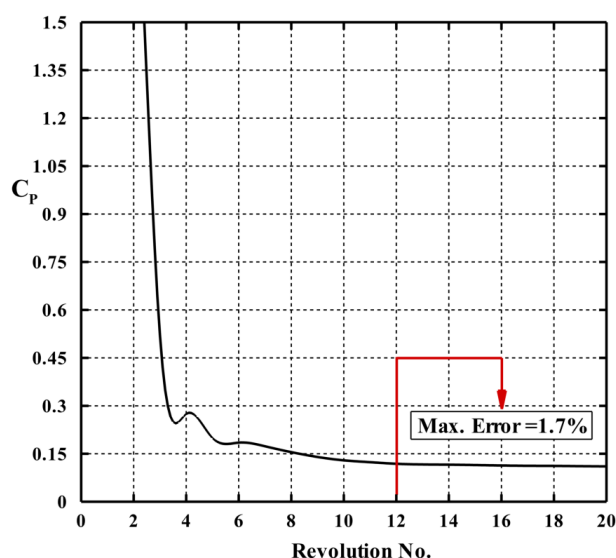


شکل (۲): میدان محاسباتی و شرایط مرزی به کارگرفته شده در مطالعه حاضر

^۲ Multiple Reference Frames

^۳ Reynolds Averaged Navier-Stokes

^۱ Sliding mesh model



شکل (۳): همگرایی زمانی ضریب توان روتور ترکیبی در

شرایط $U_{\infty} = 10 \text{ m/s}$ و $\varphi = 0^\circ$ ، $TSR = 3/5$

۳-۲- بررسی حساسیت نتایج به شبکه بندی

کیفیت شبکه بندی بر نتایج به دست آمده تأثیر بسزایی دارد. از این رو، به منظور افزایش کیفیت شبکه بندی، دامنه های محاسباتی دوار و ساکن به دو شکل مختلف شبکه بندی می شوند. الف) در ناحیه ساکن، از شبکه بندی چهارضلعی سازمان یافته استفاده می شود. علاوه بر این، اندازه شبکه ها نزدیک ناحیه دوار ریز هستند و با دور شدن از ناحیه دوار، اندازه شبکه ها به تدریج افزایش می یابند، ب) در ناحیه دوار، باتوجه به وجود پروفیل هایی با مقاطع مختلف و به منظور افزایش کیفیت شبکه بندی در نزدیکی پره ها، اعمال شبکه بندی سازمان یافته برای این ناحیه کار ناممکنی می باشد و بهترین روش شبکه بندی برای پوشش تمام نقاط پره ها و ناحیه محاسباتی دوار، شبکه بندی غیر سازمان یافته مثلثی است. از سوی دیگر، برای شبیه سازی دقیق جریان آشفته در نزدیک پره ها، شبکه های لایه مرزی بر روی پره ها اعمال می شود. برای ارزیابی کیفیت شبکه های لایه مرزی و اطمینان از اینکه گردابه های نزدیک سطوح به درستی شبیه سازی شده اند، لازم است مقدار تابع دیواره (y^+) کنترل شود. شکل ۴ توزیع شبکه بندی در نواحی ساکن و دوار و شبکه بندی لایه مرزی در اطراف پره های روتورهای خارجی و داخلی را نشان می دهد. مشخص است که مقدار y^+ مستقیماً به ارتفاع اولین لایه شبکه نسبت به سطح پره ها بستگی دارد. به عبارت دیگر، با انتخاب ارتفاع کمتر، مقدار y^+ کوچک تر می شود که کیفیت شبکه بندی را افزایش می دهد.

عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی ترکیبی را می توان توسط بعضی پارامترهای بی بعد که به پارامترهای عملکردی مشهور هستند بررسی کرد. پارامترهای عملکردی به صورت زیر هستند [۲۱، ۱۸]:

نسبت سرعت نوک (TSR):

$$TSR = \frac{\omega_0 D_1}{2U_{\infty}} \quad (5)$$

ضریب توان (C_P) و ضریب گشتاور (C_M) با روابط زیر بیان می شوند که تابع سرعت جریان (U_{∞}) و قطر خارجی روتور ترکیبی هستند:

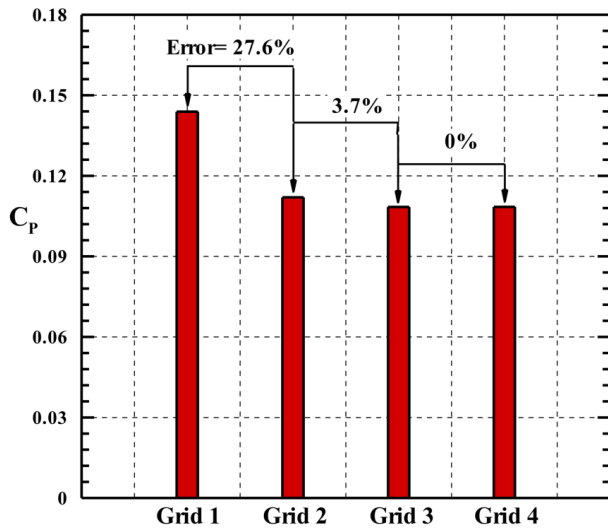
$$C_P = \frac{T\omega_0}{0.5\rho D_1 U_{\infty}^3 H} = C_M \cdot TSR \quad (6)$$

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

۳- صحت سنجی شبیه سازی توربین بادی

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

باتوجه به روش شبیه سازی مسئله که به صورت ناپایا صورت گرفته است، لازم است که همگرایی زمانی برای شبیه سازی مورد نظر بررسی شود. برای رسیدن به همگرایی زمانی، توربین بادی ترکیبی ۲۰ دور کامل را انجام داده است. این موضوع در شرایط $U_{\infty} = 10 \text{ m/s}$ و $\varphi = 0^\circ$ ، $TSR = 3/5$ انجام شده است. شکل ۳ تغییرات ضریب توان برای ۲۰ دور کامل را نشان می دهد. مطابق شکل ۳، نوسانات و تغییرات به دلیل اثرات گردابه های منتشر شده در شروع دوران روتور بیشتر بوده و با افزایش تعداد دور روتور ترکیبی این نوسانات کاهش یافته است. با بررسی کمی نتایج آورده شده، می توان دریافت که اثرات گردابه ها باعث شده است که بیشترین انحراف در مقدار C_P از دور دوازدهم تا دور بیستم برابر ۱/۷ درصد باشد، در حالی که با افزایش تعداد دور، این اثرات کاهش یافته و متناظراً، انحراف در ضریب توان متوسط از دور پانزدهم به بعد به زیر ۱/۷ درصد می رسد. در نتیجه می توان برای کاهش زمان و هزینه محاسبات، همه ی شبیه سازی ها را تا دور پانزدهم انجام داد، اما برای اطمینان بیشتر، تمام مدل سازی ها برای بیست دور کامل انجام شده و در ادامه، نتایج برای دور بیستم آورده شده است.



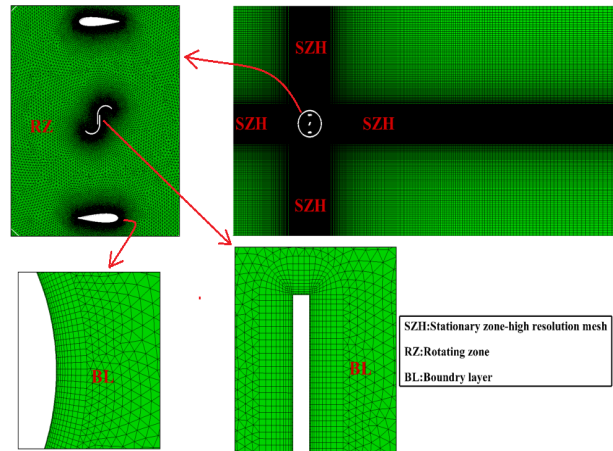
شکل (۵): ضریب توان متوسط روتور ترکیبی در دور آخر برای شبکه‌های مختلف در شرایط $TSR = 3/5$ ، $\phi = 0^\circ$ و $U_\infty = 10$ m/s

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، شبکه ۳ و شبکه ۴ به خوبی با یکدیگر تطبیق داده شده‌اند. حداکثر خطای رخ داده در یک دور کامل، بین شبکه ۳ و شبکه ۴ نزدیک به صفر است، در حالی که خطاهای بین شبکه ۳ و شبکه ۲ و بین شبکه ۲ و شبکه ۱ به ترتیب $3/7$ و $27/6$ درصد است. بنابراین، برای کاهش زمان و هزینه محاسبات، شبکه ۳ با $447,064$ سلول مناسب تشخیص داده شده و مشخصه‌های شبکه‌بندی مربوطه برای سایر موارد و شبیه‌سازی‌های بعدی اعمال می‌شود.

۳-۳- استقلال نتایج از گام زمانی

پارامتر دیگری که بر زمان و هزینه محاسبات، همچنین بر صحیح بودن شبیه‌سازی عددی تأثیر می‌گذارد، پارامتر گام زمانی است. با توجه به مطالعه رضائی‌ها و همکاران [۱۷] 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 [۱۷] مقدار $d\theta = 0/5^\circ$ را برای تعیین گام زمانی و به‌منظور شبیه‌سازی عددی روتور داریوس توسط CFD انتخاب کرده‌اند. در این زمینه، اطلاعاتی در مورد مقدار $d\theta$ بهینه برای توربین بادی ترکیبی با روتور داخلی نوع باخ در مطالعات گذشته دیده نمی‌شود. به همین خاطر در این تحقیق، $d\theta$ های مختلف برای روتور ترکیبی بررسی شده تا حالت بهینه انتخاب گردد. در همین رابطه، $d\theta = 0/6^\circ$ ، $0/5^\circ$ ، $0/4^\circ$ ، $0/3^\circ$ ، $0/2^\circ$ ، $0/1^\circ$ در شرایط

برای همه شبیه‌سازی‌ها، ارتفاع بی‌بعدی (y/D_1) برای اولین لایه از شبکه‌بندی $0/00002$ تعریف می‌شود.



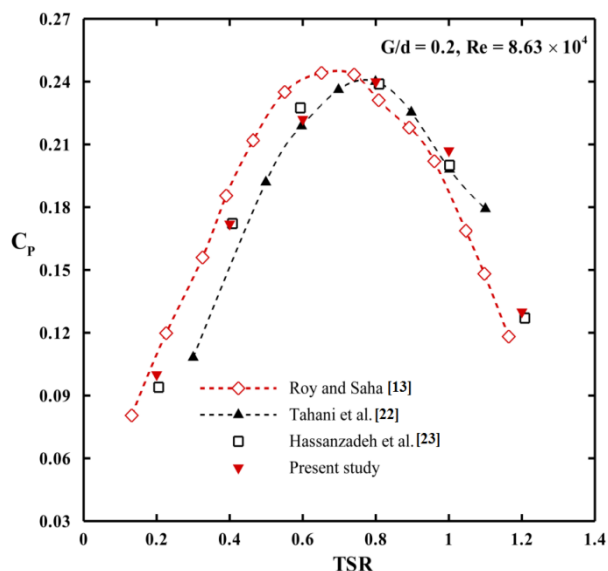
شکل (۴): تصویری از شبکه‌بندی اعمال شده بر ناحیه محاسباتی و سطوح پره‌ها

جدول (۲): مقادیر حداکثر y^+ بر روی پره‌های داریوس (DB) و ساونیسوس (SB) برای اندازه‌های مختلف شبکه بندی برای روتور ترکیبی در $TSR = 3/5$ ، $\phi = 0^\circ$ و $U_\infty = 10$ m/s

شماره شبکه	تعداد سلول	y/D_1	y_{max}^+	
			DB	SB
۱	۲۴۵,۵۰۴	۰/۰۰۰۰۲	۳/۴۵	۰/۸۶
۲	۳۸۹,۴۱۸	۰/۰۰۰۰۲	۳/۴۳	۰/۸۵
۳	۴۴۷,۰۶۴	۰/۰۰۰۰۲	۳/۴۰	۰/۸۲
۴	۵۰۹,۷۴۲	۰/۰۰۰۰۲	۳/۴۳	۰/۸۲

برای ارزیابی استقلال نتایج از شبکه‌بندی، چهار نوع شبکه با ابعاد مختلف تست شده‌اند. حساسیت شبکه برای $U_\infty = 10$ m/s، $\phi = 0^\circ$ ، $TSR = 3/5$ بررسی شده است. شرایط انتخاب شده برای این بررسی به‌گونه‌ای است که عدد رینولدز در میدان محاسباتی و سرعت چرخش روتور بیشترین مقدار می‌باشند. جدول ۲ تعداد سلول و مقدار y^+ اعمال شده در تحلیل حساسیت شبکه را نشان می‌دهد. حداکثر مقدار y^+ برای همه موارد در پره‌های ساونیسوس نوع باخ نزدیک به $0/8$ و در پره‌های داریوس نزدیک به 3 است. از سوی دیگر، برای انتخاب شبکه‌بندی بهینه، مقادیر ضریب توان متوسط در آخرین دور روتور ترکیبی برای هر چهار شبکه در شکل ۵ نشان داده شده است.

همکاران [۲۲] و داده‌های عددی حسن‌زاده و همکاران [۲۳] مقایسه شده است. همه مقایسه‌ها برای $U_\infty = 6 \text{ m/s}$ با عدد رینولدز $8/63 \times 10^4$ بر اساس سرعت آزاد باد و قطر روتور ارائه شده‌اند. شکل ۷ این مقایسه‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که نشان داده شد، نتایج به دست آمده به خوبی با داده‌های عددی و تجربی گذشته مطابقت دارد.

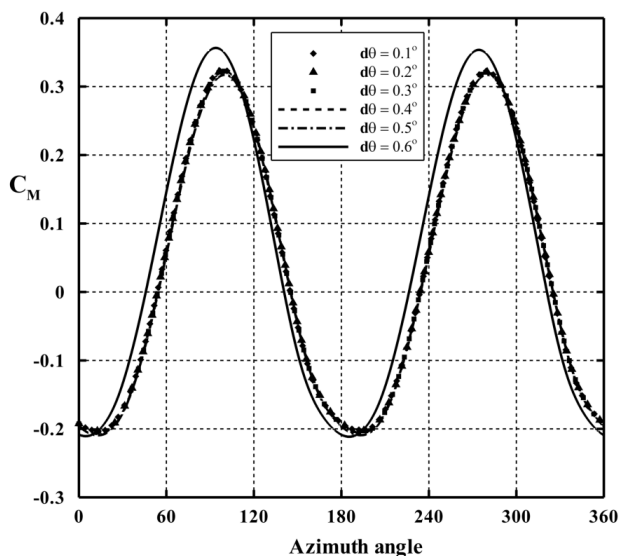


شکل (۷): اعتبارسنجی ضریب توان متوسط برای روتور ساونوس با داده‌های موجود

۴- بحث بر روی نتایج

در این قسمت از مقاله، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی روتور ترکیبی مورد بحث قرار گرفته است. در گام اول، برای درک بهتر از تأثیر پره‌های نوع باخ بر روتور خارجی (داریوس) و همچنین برای فهم بهتر فیزیک و رفتار جریان، کانتورهای بی بعد شده در اطراف روتور ترکیبی به تصویر کشیده شده است. در ادامه، در گام دوم، نتایج به صورت نموداری در حالت‌های مختلف مقایسه شده و ارائه گردیده است. شکل ۸، خطوط جریان لحظه‌ای اطراف روتور ترکیبی در شرایط $U_\infty = 5 \text{ m/s}$ و $\varphi = 0^\circ$ و $\text{TSR} = 1/5$ را نشان می‌دهد. همان‌طور که نشان داده شده است، در زاویه فضایی صفر درجه، وجود یک روتور از نوع باخ در داخل روتور داریوس، گردابه‌هایی در مقیاس بزرگ در پایین دست روتور داخلی ایجاد می‌کند. این گردابه‌ها به دلیل جداسدن جریان از لبه‌های بیرونی پره‌های داخلی ایجاد می‌شوند. توسعه گردابه‌ها در پایین دست روتور داخلی باعث ایجاد میدان سرعت ضعیف در آن قسمت می‌شود، جایی که از آن

برای روتور ترکیبی $\text{TSR} = 3/5$ و $\varphi = 0^\circ$ ، $U_\infty = 10 \text{ m/s}$ 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. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج در $d\theta$ های کوچک تطابق خوبی به اهم دارند. اما، با افزایش $d\theta$ از $0/4^\circ$ به $0/5^\circ$ ، منحنی ضریب گشتاور به مقدار ناچیزی انحراف پیدا می‌کند. به طوری که، بیشترین خطا بین این دو حالت در قله-های نمودار رخ داده و مقدار آن برابر ۳ درصد است. همچنین، با افزایش $d\theta$ از $0/5^\circ$ به $0/6^\circ$ ، منحنی تغییرات ضریب گشتاور بیشترین انحراف را نسبت به حالت‌های دیگر دارد به گونه‌ای که بیشترین خطا بین حالت $d\theta = 0/5^\circ$ و $d\theta = 0/6^\circ$ برابر ۱۱ درصد است؛ بنابراین، برای کاهش خطای شبیه‌سازی و مدل‌سازی درست گردابه‌های جریان، $d\theta = 0/4^\circ$ برای انتخاب گام زمانی، مناسب می‌باشد و برای ادامه محاسبات از آن استفاده می‌گردد.

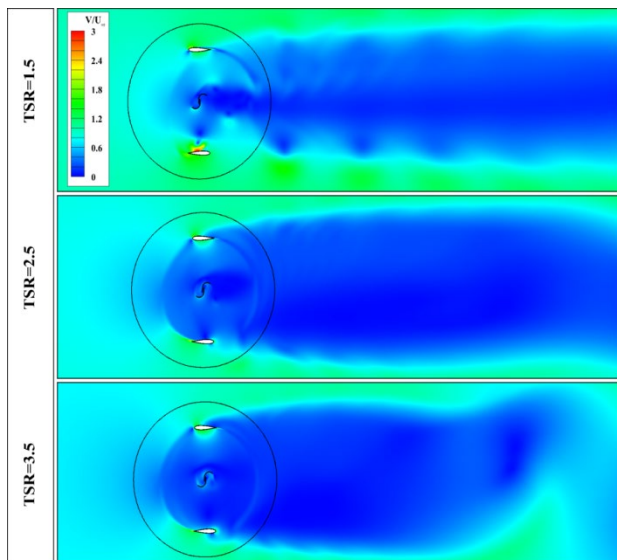


شکل (۶): تحلیل استقلال نتایج از گام زمانی در شرایط $\text{TSR} = 3/5$ و $\varphi = 0^\circ$ ، $U_\infty = 10 \text{ m/s}$

۴-۳- اعتبار سنجی نتایج عددی

برای بررسی صحت کدهای کامپیوتری، لازم است نتایج به دست آمده با داده‌های عددی و تجربی موجود مقایسه شود. برای نشان دادن دقت کدهای کامپیوتری استفاده شده، یک مطالعه اعتبارسنجی برای روتور ساونوس انجام شده است. تغییرات ضریب توان متوسط با TSR برای روتور ساونوس با دو پره متعارف با نسبت هم‌پوشانی $0/2$ با داده‌های تجربی روی و ساها [۱۳]، داده‌های عددی سه‌بعدی طاهانی و

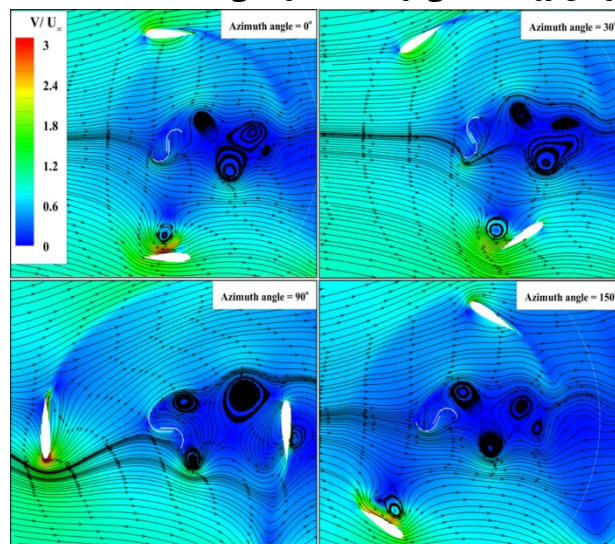
طوری که در این حالت نفوذ هوا به داخل روتور کمترین مقدار را داراست و رفتار توربین بادی ترکیبی شبیه به یک استوانه صلب می‌باشد. بنابراین، باتوجه به شکل ۹، می‌توان پیش بینی کرد که توربین بادی ترکیبی در $TSR = 1/5$ بهترین عملکرد را نسبت به دیگر حالت‌ها دارد.



شکل (۹): میدان سرعت بی بعد شده اطراف روتور ترکیبی در یک لحظه (برای زاویه فضایی 36°) برای $2/5$ ، $3/5$ ، $1/5$ ، $U_\infty = 5 \text{ m/s}$ و $\phi = 0^\circ$ ،

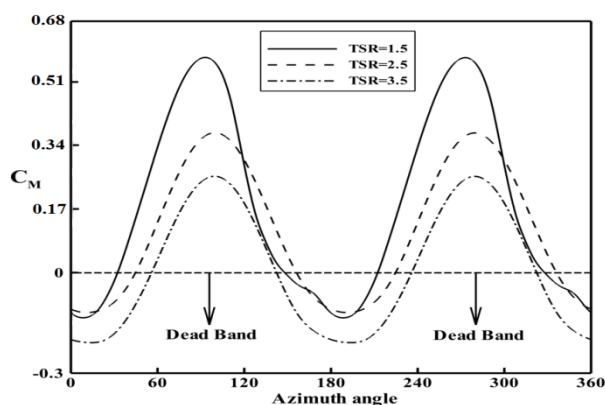
شکل ۱۰، میدان ورتیسیتیته بی بعد شده اطراف روتور ترکیبی در یک لحظه (برای زاویه فضایی 36°) برای $2/5$ ، $3/5$ ، $1/5$ ، در سرعت آزاد باد 5 m/s و زاویه اتصال صفر درجه را به تصویر کشیده است. برای هر سه حالت، به دلیل جدا شدن جریان از لبه پره‌های روتور داخلی، می‌توان میدان ورتیسیتیته قابل توجهی را گزارش کرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در $TSR = 1/5$ ورتیسیتیته‌های ایجاد شده توسط پره‌های باخ ریزش کرده و به سمت پایین دست روتور حرکت می‌کند، ولی در حالت‌های دیگر، ورتیسیتیته‌ها به قسمت مقعر پره‌های داخلی چسبیده و ریزش پیدا نکرده‌اند. همچنین میدان ورتیسیتیته با افزایش مقدار TSR بسیار قوی‌تر شده است، این اتفاق باعث ایجاد یک میدان پرفشار در داخل روتور ترکیبی می‌شود که یک رخ داد بدی برای عملکرد توربین بادی ترکیبی است. در نتیجه، با در نظر گرفتن میدان ورتیسیتیته در اطراف روتور ترکیبی برای TSR های مختلف، می‌توان نتیجه گرفت که روتور ترکیبی ضعیف‌ترین میدان ورتیسیتیته‌ی خود را در حالت $TSR = 1/5$

پره پیشرو روتور خارجی عبور می‌کند که این اتفاق وضعیت بدی است. گردابه‌های توسعه‌یافته به تدریج به سمت پایین دست روتور در زاویه فضایی 30° حرکت می‌کنند. همان‌طور که انتظار می‌رود، پره پیشرو روتور خارجی از یک میدان کم سرعت با برهم‌کنش قابل توجهی با گردابه‌های توسعه‌یافته توسط پره‌های روتور داخلی در زاویه فضایی 90° عبور می‌کند. این اتفاق سهم روتور خارجی در ضریب گشتاور کل را کاهش می‌دهد. در نهایت، در زاویه فضایی 150° ، یک میدان کم سرعت در سراسر ناحیه جاروب شده روتور، غالب است و روتور ترکیبی موقعیت ارزشمند خود را در بین زوایای فضایی ارائه شده تجربه می‌کند.



شکل (۸): خطوط جریان لحظه‌ای و میدان سرعت لحظه‌ای بی بعد شده اطراف روتور ترکیبی در شرایط $U_\infty = 5 \text{ m/s}$ و $\phi = 0^\circ$ ، $TSR = 1/5$ ،

شکل ۹، میدان سرعت بی بعد شده اطراف روتور ترکیبی در یک لحظه (برای زاویه فضایی 36°) برای $2/5$ ، $3/5$ ، $1/5$ ، در سرعت آزاد باد 5 m/s و زاویه اتصال صفر درجه را نشان می‌دهد. همان‌طور که نشان داده شده است، میدان سرعت داخل روتور ترکیبی وابسته به مقدار TSR است. با افزایش مقدار TSR ، میدان سرعت داخل روتور ضعیف‌تر شده است. به عبارتی دیگر، در $TSR = 1/5$ ، سرعت چرخش روتور نسبت به حالت‌های $2/5$ و $3/5$ کمتر بوده و نفوذ هوا به داخل روتور بیشتر است. این امر باعث افزایش اندرکنش بین پره‌های نوع باخ با هوا شده که در همین راستا، ضریب گشتاور افزایش می‌یابد. در $3/5$ ، $TSR =$ سرعت چرخش به بیشترین مقدار خود می‌رسد. به

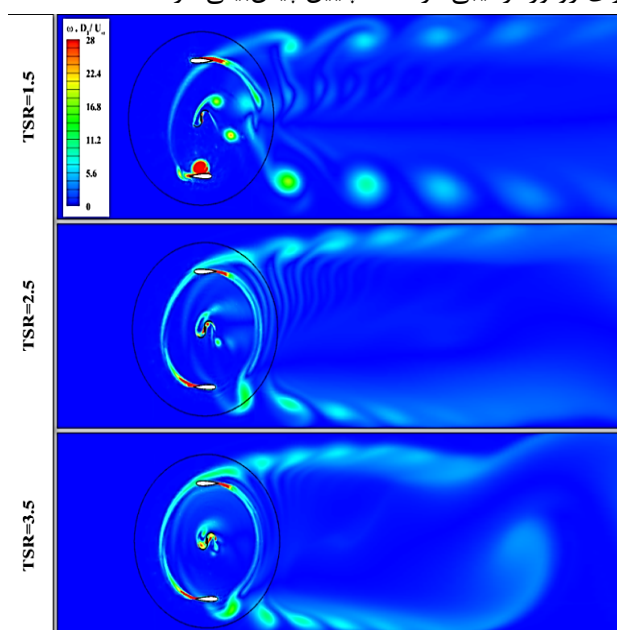


شکل (۱۱): تغییرات ضریب گشتاور لحظه‌ای در دور آخر نسبت به زاویه فضایی برای تمام TSRها در $U_\infty = 5 \text{ m/s}$ و $\varphi = 0^\circ$

مفهوم دیگری که می‌توان در شکل ۱۱ مورد بحث قرار داد، مساحت ناحیه مرده می‌باشد. اصطلاحاً ناحیه مرده به قسمتی از نمودار تغییرات ضریب گشتاور گفته می‌شود که مقدار گشتاور تولیدی منفی باشد. هر چقدر مساحت ناحیه مرده بیشتر باشد عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی ضعیف‌تر است. با توجه به شکل ۱۱ می‌توان به این موضوع پی برد که با افزایش مقدار TSR، مساحت ناحیه مرده گسترش یافته است. به طوری که، بیشترین و کمترین مساحت ناحیه مرده به ترتیب در شرایط $TSR = 3/5$ و $TSR = 1/5$ دیده می‌شود. بنابراین، توربین بادی ترکیبی در $TSR = 1/5$ عملکرد آیرودینامیکی بهتری نسبت به حالت‌های دیگر دارد.

به منظور، بررسی تأثیر زاویه اتصال بر مساحت ناحیه مرده و گشتاور تولید شده توسط روتور ترکیبی، تغییرات ضریب گشتاور روتور مورد نظر نسبت به زاویه فضایی در یک دور کامل در شکل ۱۲، برای شرایط $U_\infty = 5 \text{ m/s}$ ، $TSR = 1/5$ و 0° و 90° ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد با افزایش مقدار φ ، مساحت ناحیه مرده کاهش یافته است. به طوری که، بیشترین و کمترین مساحت ناحیه مرده به ترتیب توسط $\varphi = 0^\circ$ و $\varphi = 90^\circ$ گزارش شده است. علاوه بر آن، با افزایش زاویه اتصال، ضریب گشتاور لحظه‌ای در تمام زوایای فضایی افزایش پیدا کرده است. به عبارتی دیگر، بیشترین گشتاور لحظه‌ای تولید شده توسط روتور ترکیبی در حالت $\varphi = 90^\circ$ ثبت شده است.

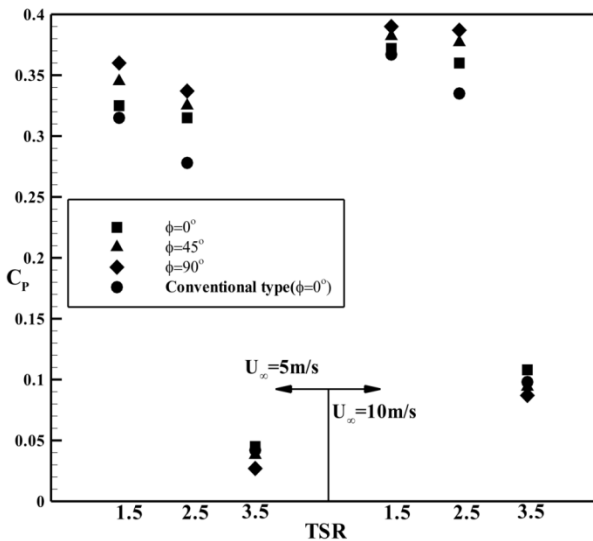
تجربه می‌کند. بنابراین، می‌توان ضریب گشتاور بیشتری را برای روتور ترکیبی در TSR پایین پیش‌بینی کرد.



شکل (۱۰): میدان ورتیسیتی بی بعد شده اطراف روتور ترکیبی در یک لحظه (برای زاویه فضایی 360°) برای $3/5$ و $2/5$ ، $1/5$ ، $TSR = 1/5$ و $\varphi = 0^\circ$ در $U_\infty = 5 \text{ m/s}$

به منظور مقایسه عملکرد آیرودینامیکی روتور ترکیبی مورد نظر در مقادیر مختلف TSR، تغییرات ضریب گشتاور روتور ترکیبی با توجه به زاویه فضایی در یک دور کامل در شکل ۱۱ برای $U_\infty = 5 \text{ m/s}$ در زاویه اتصال صفر درجه ارائه شده است. همان‌طور که نشان داده شده است، دو مقدار حداکثر و دو مقدار حداقل در تغییرات ضریب گشتاور برای روتور ترکیبی بدون توجه به مقدار TSR مشاهده می‌شود. بررسی بیشتر ضرایب گشتاور تولیدی نشان می‌دهد که در تمام زوایای فضایی، گشتاور تولید شده توسط روتور ترکیبی در $TSR = 1/5$ بیشتر از حالت‌های دیگر است. به گونه‌ای که بیشترین ضریب گشتاور لحظه‌ای تولیدی در زاویه فضایی 93° اتفاق می‌افتد و مقدار آن برابر 0.164 است. متناظراً، کمترین گشتاور در حالت $TSR = 3/5$ تولید شده و مقدار آن 0.120 - است. به طور کلی می‌توان متوجه شد، که گشتاور تولیدی توربین بادی ترکیبی مورد بررسی با مقدار TSR رابطه عکس دارد. به عبارتی دیگر، با کاهش مقدار TSR، بیشترین ضریب گشتاور لحظه‌ای افزایش یافته است.

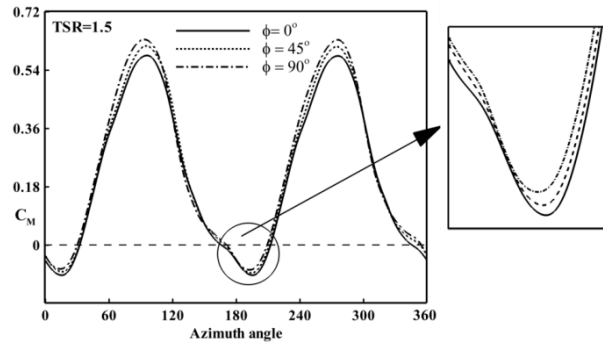
ترتیب برابر ۵، ۲/۵ و ۶/۵ درصد است. همچنین با افزایش مقدار TSR تولید توان توسط روتورهای ترکیبی کاهش یافته است. ۴- مشاهده می‌گردد که روتور ترکیبی نوع باخ با $\phi=45^\circ$ در مقایسه با $\phi=0^\circ$ ، در اغلب شرایط، توان بیشتر یا یکسانی تولید کرده است. ۵- در TSR های کمتر از ۳/۵، ضریب توان متوسط تولید شده توسط روتور ترکیبی با روتور داخلی نوع باخ با زوایای اتصال 0° ، 45° و 90° صرف‌نظر از سرعت آزاد باد نسبت به روتور ترکیبی با روتور داخلی نوع متعارف بیشتر است.



شکل (۱۳): مقادیر ضریب توان متوسط برای روتور ترکیبی با روتور داخلی ساونیوس نوع باخ با $\phi=0^\circ$ ، 45° و 90° و روتور داخلی نوع متعارف با زاویه اتصال صفر درجه در $U_\infty = 5$ و 10 m/s تحت $TSR =$

۵- نتیجه گیری

در تحقیق موردنظر، باتوجه‌به عملکرد روتور ساونیوس و روتور داریوس، ترکیبی از این دو روتور با نام توربین بادی ترکیبی به‌صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفت. پره‌های روتور ساونیوس از نوع باخ انتخاب شد. قبل از ارزیابی تأثیر برخی پارامترها بر عملکرد آیرودینامیکی روتور موردنظر، صحت سنجی شبیه‌سازی عددی بررسی شد. به‌طوری‌که، بررسی‌ها نشان داد که $d\theta = 0/4^\circ$ برای تعیین گام زمانی مناسب می‌باشد و اعتبارسنجی انجام شده، هم‌خوانی خوبی با داده‌های عددی و تجربی داشت. در این مقاله، تأثیر TSR ، ϕ و U_∞ بر عملکرد توربین بادی ترکیبی مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، $TSR = 1/5$ ، $2/5$ و $3/5$ و $\phi = 0^\circ$ ، 45° ،



شکل (۱۲): تغییرات ضریب گشتاور لحظه‌ای در دور آخر نسبت به زاویه فضایی برای شرایط $U_\infty = 5$ m/s، $TSR = 1/5$ و $\phi = 0^\circ$ ، 45° ، 90°

یکی از پارامترهایی که می‌توان با آن عملکرد آیرودینامیکی روتور ترکیبی را در شرایط مختلف ارزیابی کرد، ضریب توان متوسط است. شکل ۱۳، ضریب توان متوسط روتور ترکیبی با روتور داخلی ساونیوس نوع متعارف و نوع باخ در TSR های ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ و زوایای اتصال 0° ، 45° و 90° در سرعت آزاد باد ۵ m/s و ۱۰ m/s را به تصویر کشیده است. قابل ذکر است که عملکرد روتور ترکیبی با ساونیوس نوع متعارف در مطالعه [۱۸] در گذشته با شرایط مرزی یکسان بررسی گردیده است و نتایج مربوطه در شکل ۱۳ اضافه شده است. مفاهیم و نکات قابل توجهی را می‌توان از این شکل استنباط کرد که در ادامه بیان شده است: ۱- 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 ۹ آورده شده است، دریافت. 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. ۲- با افزایش مقدار سرعت آزاد باد، در تمام TSR ها و زوایای اتصال، توان تولیدی روتور ترکیبی افزایش یافته است. دلیل این افزایش، به‌خاطر نفوذ بیشتر جریان هوا به داخل روتور ترکیبی است که باعث افزایش اندرکنش بین جریان هوا و پره‌های داخلی می‌شود. افزایش اندرکنش بین جریان هوا و پره‌ها، دلیلی بر افزایش توان تولیدی است. ۳- بیشترین توان تولیدی بدون در نظر گرفتن سرعت آزاد باد در $TSR = 1/5$ و $\phi = 90^\circ$ اتفاق افتاده، به‌طوری‌که در این TSR و زاویه اتصال و در $U_\infty = 5$ m/s، 10 ، $4/5$ و $14/5$ درصد توان بیشتری به ترتیب نسبت به $\phi = 0^\circ$ ، $\phi = 90^\circ$ و حالت متعارف تولید شده است. متناظر، این مقادیر در $U_\infty = 10$ m/s به

- Renew. Energy., Vol. 113, pp. 329-34, 2017. Doi: 10.1016/j.renene.2017.04.071.
- [5] Saini, G. and Saini, R.P. "A numerical analysis to study the effect of radius ratio and attachment angle on hybrid hydrokinetic turbine performance". Energy Sustain. Dev., Vol. 47, pp. 94-106, 2018. Doi: 10.1016/j.esd.2018.09.005.
- [6] Hosseini, A. and 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 Convers. Manag., Vol. 189, pp. 49-59, 2019. Doi: 10.1016/j.enconman.2019.03.068.
- [7] Liu, K., Yu, M., and Zhu, W. "Enhancing wind energy harvesting performance of vertical axis wind turbines with a new hybrid design: A fluid-structure interaction study". Renew. Energy., Vol. 140, pp. 912-27, 2019. Doi: 10.1016/j.renene.2019.03.120.
- [8] Saini, G. and Saini, R. P. "Comparative investigations for performance and self-starting characteristics of hybrid and single Darrieus hydrokinetic turbine". Energy Rep., Vol. 6, pp. 96-100. 2020. Doi: 10.1016/j.egy.2019.11.047.
- [9] Bhuyan, S. and Biswas, A. "Investigations on self-starting and performance characteristics of simple H and hybrid H-Savonius vertical axis wind rotors". Energy Convers. Manag., Vol. 87, pp. 859-67, 2014. Doi: 10.1016/j.enconman.2014.07.056.
- [10] Gupta, R., Biswas, A., and Sharma, K. K. "Comparative study of a three-bucket Savonius rotor with a combined three-bucket Savonius–three-bladed Darrieus rotor". Renew. Energy., Vol. 33(9), pp. 1974-81, 2008. Doi:10.1016/j.renene.2007.12.008.
- [11] Alom, N. and Saha, U. K. "Influence of blade profiles on Savonius rotor performance: Numerical simulation and experimental validation". Energy Convers. Manag., Vol. 186, pp. 267-77, 2019. Doi: 10.1016/j.enconman.2019.02.058.
- [12] Kumar, R. S., Premkumar, T. M., Seralathan, S., Xavier, D. D., Elumalai, E. S., and Hariram, V. "Simulation studies on influence of shape and number of blades on the performance of vertical axis wind turbine". Mater. Today: Proc., Vol. 33, pp. 3616-20, 2020. Doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.665.
- [13] Roy, S. and Saha, U. K. "Wind tunnel experiments of a newly developed two-bladed Savonius-style wind turbine". Appl. Energy., Vol. 137, pp. 117-25, 2015. Doi: 10.1016/j.apenergy.2014.10.022.
- [14] Mohamed, M. H. "Performance investigation of H-rotor Darrieus turbine with new airfoil shapes". Energy, Vol. 47(1), pp. 522-30, 2012. Doi: 10.1016/j.energy.2012.08.044.
- [15] Mohamed, M. H., Dessoky, A., and Alqurashi, F. "Blade shape effect on the behavior of the H-rotor Darrieus wind turbine: Performance investigation and force analysis". Energy, Vol. 179, pp. 1217-34, 2019. Doi: 10.1016/j.energy.2019.05.069.
- [16] Song, C., Wu, G., Zhu, W., and Zhang, X. "Study on aerodynamic characteristics of Darrieus vertical axis wind turbines with different airfoil maximum
- $U_{\infty} = 10$ و 5 m/s در $\phi = 90^\circ$ تست شدند. نتایج به دست آمده را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:
- با ترکیب روتور ساونیوس با روتور داریوس، یک نیروی اضافی به نام نیروی پسا در تولید گشتاور روتور حاصل و موثر می باشد.
 - با افزایش مقدار TSR، سرعت چرخش روتور افزایش یافته و مانع از نفوذ هوا به داخل شده، همچنین میدان ورتیسیتیه در داخل روتور قوی تر و میدان سرعت ضعیف تر شده است.
 - با کاهش مقدار TSR، مساحت ناحیه مرده کاهش و مقدار بیشترین ضریب گشتاور لحظه ای افزایش یافته است.
 - مساحت ناحیه مرده و مقدار بیشترین ضریب گشتاور لحظه ای با افزایش زاویه اتصال از 0° تا 90° به ترتیب کاهش و افزایش یافته است.
 - با افزایش زاویه اتصال، بدون در نظر گرفتن سرعت آزاد باد، مساحت ناحیه مرده و ضریب توان به ترتیب کاهش و افزایش می یابد.
 - با افزایش سرعت آزاد باد مقدار توان تولیدی در تمام TSR ها و زوایای اتصال، افزایش یافته است. به طوری که بیشترین تولید توان در $U_{\infty} = 10$ m/s، $\phi = 90^\circ$ و $1/5 =$ TSR صورت گرفته و مقدار ضریب توان آن برابر 0.39 است.
 - عملکرد روتور ترکیبی با پره های نوع باخ در مقایسه با پره های نوع متعارف در تمام شرایط به غیر از $TSR = 3/5$ بهتر است.
- ### ۵- مراجع
- [1] Ghosh A., Biswas, A., Sharma, K. K., and Gupta, R. "Computational analysis of flow physics of a combined three bladed Darrieus Savonius wind rotor". J. Energy Inst., Vol. 88(4), pp.425-37, 2015. Doi: 10.1016/j.joei.2014.11.001.
- [2] Mohamed, M. H. "Impacts of solidity and hybrid system in small wind turbines performance". Energy., Vol. 57, pp. 495-504, 2013. Doi: 10.1016/j.energy.2013.06.004.
- [3] Bouhal, T., Rajad, O., Kousksou, T., Arid, A., El Rhafiki, T., and Jamil, A. "CFD performance enhancement of a low cut-in speed current Vertical Tidal Turbine through the nested hybridization of Savonius and Darrieus". Energy Convers. Manag., Vol. 169, pp. 266-78, 2018. Doi: 10.1016/j.enconman.2018.05.027.
- [4] Liang, X., Fu, S., Ou, B., Wu, C., Chao, C. Y. H., and 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".

- [21] Sagharichi, A., Maghrebi, M. J., and ArabGolarcheh, A. "Numerical Investigation of the Effect of Fixed and Variable Pitch Angle Blade on Dynamic Stall of Flow Field Around Darrieus Wind Turbine Blade". *Fluid Mechanics and Aerodynamics.*, Vol. 5 (1), pp. 29-46, 2017. (In Persian). DOR: 20.1001.1.23223278.1395.5.2.1.3
- [22] Tahani, M., Rabbani, A., Kasaeian, A., Mehrpooya, M., and Mirhosseini, M. "Design and numerical investigation of Savonius wind turbine with discharge flow directing capability". *Energy.*, Vol. 130, pp. 327-38, 2017. Doi: 10.1016/j.energy.2017.04.125.
- [23] Hassanzadeh, R. and Mohammad, N. M. "Effect of Overlapping Size on the Performance of the Savonius Wind Turbine, in Both Conventional and the Bach-Type Models". *Modares Mechanical Engineering.*, Vol. 85, pp. 2599-2606, 2019. (In Persian).
- thicknesses through computational fluid dynamics". *Arab. J. Sci. Eng.*, Vol. 45(2), pp. 689-98, 2020. Doi: 10.1007/s 13369-019-04127-8.
- [17] Rezaeiha, A., Kalkman, I., and 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". *Renew. Energy.*, Vol. 107, pp. 373-85, 2017. Doi: 10.1016/j.renene.2017.02.006.
- [18] Asadi, M. and Hassanzadeh, R. "Effects of internal rotor parameters on the performance of a two bladed Darrieus-two bladed Savonius hybrid wind turbine". *Energy Convers. Manag.*, Vol. 238, pp. 114-109, 2021. Doi:10.1016/j.enconman.2021.114109.
- [19] Sobhani, E., Ghaffari, M., and Maghrebi, M. J. "Numerical investigation of dimple effects on darrieus vertical axis wind turbine". *Energy.*, Vol. 133, pp. 231-41, 2017. Doi: 10.1016/j.energy.2017.05.105.
- [20] Saeedi, M. and Aghaei Tough, R. "Investigation of the Delay in Flow Separation on the Wind Turbine Blade by Combining the Slat and Longitudinal Slot Effects". *Fluid Mechanics and Aerodynamics.*, Vol. 9 (2), pp. 39-52, 2021. (In Persian).DOR: 20.1001.1.23223278.1399.9.2.4.4