

مطالعه عددی اثر صفحات منحرف کننده روی عملکرد توربین بادی داریوس سه پره

احمد رضا تابان

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران،
ahmadreza_taban@yahoo.com

رحیم حسن زاده*

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران، r.hassanzadeh@uut.ac.ir

چکیده

در این مطالعه، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، اثر استفاده از صفحات منحرف کننده در بهبود مشخصه‌های توانی توربین داریوس سه پره با پره‌های مستقیم بررسی شده است. به این منظور، از ۱۰ منحرف کننده صاف با نسبت قطر داخلی به قطر روتور ۱/۶ و نسبت قطر خارجی به قطر روتور ۸/۸ حول توربین مورد نظر استفاده شده است. محاسبات در سرعت باد ۶ متر بر ثانیه و نسبت‌های سرعت نوک ۰/۵ و ۱/۵ و ۲/۵ انجام گرفته است. کد عددی استفاده شده برای توربین داریوس بدون وجود منحرف کننده‌ها با نتایج موجود عددی و آزمایشگاهی اعتبار سنجی شده و توافق منطقی بدست آمده است. نتایج نشان از تاثیر قابل توجه صفحات منحرف کننده روی مشخصه‌های توانی توربین داریوس سه پره دارد. در اثر استفاده از صفحات منحرف کننده حول توربین بادی داریوس سه پره، جریان تزریق شده به داخل روتور افزایش یافته که منجر به بهبود میدان سرعت درون روتور می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که وجود منحرف کننده در نسبت‌های سرعت نوک ۰/۵ و ۱/۵ و ۲/۵ به ترتیب ۳۲۶/۳٪، ۷۰/۲٪ و ۲۰/۱٪ ضریب توان متوسط روتور داریوس را افزایش می‌دهد. **واژه‌های کلیدی:** توربین بادی محور عمودی، روتور داریوس، صفحات منحرف کننده، ضریب توان، سرعت نوک بی بعد، ناحیه مرده.

Numerical study of the influence of deflector plates on the performance of a three-bladed Darrieus wind turbines

A. R. Taban
R. Hassanzadeh

Department of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran
Department of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

Abstract

In the present study, using computational fluid dynamics, the effects of the use of deflector plates on the power characteristics of a three-bladed Darrieus turbine with straight blades are investigated. To this, 10 flat deflectors with inner and outer diameter ratios of 1.6 and 8.8 around the considered turbine are used. Computations have been carried out at a wind speed of 6 m/s and tip speed ratios (TSR) of 0.5, 1.5, and 2.5. The applied code for the Darrieus turbine is validated against the available numerical and experimental data for the case without deflectors and reasonable agreement has been achieved. The obtained results reveal that the deflector plates have considerable impacts on the power characteristics of a three-bladed Darrieus turbine. Application of deflector plates around the wind turbine increases the injected flow into the rotor and hence, the velocity field inside the rotor improves. The obtained results demonstrate that the existence of deflectors enhances the mean power coefficient by 326.3%, 70.2%, and 201% at TSR=0.5, 1.5, and 2.5, respectively.

Keywords: Vertical axis wind turbine, Darrieus rotor, Deflector plates, Power coefficient, Tip speed ratio, Dead band.

۱- مقدمه

توربین‌های بادی محور عمودی با وجود جایگاهی که امروزه در صنعت تجاری دارند، در گذشته نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده‌اند. اولین توربین بادی محور عمودی در ایران حدود ۲۰۰ سال قبل از میلاد مسیح پیدا شده است. البته کاربرد آن‌ها در آن زمان برای آسیاب کردن دانه‌های گیاهی بوده است [۱]. اهمیت انرژی در دنیای کنونی باعث شده تا کشورهای مختلف دنیا به دنبال جایگزین سوخت‌های فسیلی که اتمام‌پذیر و آلوده کننده محیط زیست هستند، باشند. (به طوری که میزان تولید دی اکسید کربن در سال ۲۰۲۰ در حدود ۳۰ گیگاتن تخمین زده شده است). بحران انرژی یکی از موضوعات مهم در پژوهش‌های مرتبط با وضعیت جهان آینده است. استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در مقایسه با سوخت‌های فسیلی هرچند در گذشته از لحاظ اقتصادی به صرفه نبوده‌اند، اما امروزه شرایط سرمایه گذاری در این مورد بهتر شده است و امید هست که در آینده به تعادل مناسب و یا حتی شرایط بهتر از سوخت‌های فسیلی برسد [۲]. یکی از ابزارهای استخراج الکتریسیته استفاده از توربین‌های بادی است. توربین بادی

براساس محور دوران به دو دسته محور عمودی^۱ و محور افقی^۲ تقسیم‌بندی شده‌اند. توربین‌های باد محور عمودی انواع مختلفی دارند که برای رفع نقص طراحی‌های قبلی روز بروز جدیدتر و هوشمندانه‌تر شده‌اند. توربین‌های محور افقی رایج ترین توربین‌های مورد استفاده در دنیا هستند. چرا که نسبت به هزینه صورت گرفته برای ساخت یک مزرعه‌ی بادی انرژی مقرون بصره‌ای را تولید می‌کنند. عدم وجود مشکل خود شروعی، دسترسی به بادهای قویتر بدلیل قرارگیری در ارتفاعات بالاتر و توجیه اقتصادی را می توان از مزایای عمده توربین های بادی محور افقی دانست. در مقابل، حساسیت زیاد به جهت وزش باد، هزینه ساخت، انتقال، نگهداری و تعمیرات بیشتر را می توان از معایب چنین توربین هایی دانست. در مورد توربین های بادی محور عمودی می توان مزایایی همچون عدم حساسیت به جهت وزش باد و شدت آشفتگی آن، هزینه نگهداری کمتر به دلیل قرارگیری در

¹ Vertical axis wind turbine

² Horizontal axis wind turbine

ارتفاعات کم و امکان بکارگیری آنها در مناطق شهری را بر شمرد. با اینحال، راندمان کمتر در مقایسه با نوع افقی و مشکل خود شروعی در نوع داریوس^۱ از معایب چنین توربین هایی می باشد [۳-۶].

در گذشته مطالعاتی در خصوص قرار دادن صفحاتی به همراه توربین داریوس برای بهبود عملکرد آن انجام شده است. وانگ و همکاران [۷]، تاثیر وجود منحرف کننده^۲ بر عملکرد توربین باد محور عمودی با پره NACA0021 و پارامترهای موثر در این شبیه سازی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد ۴۷/۱ درصد ضریب گشتاور در توربین باد با منحرف کننده افزایش یافته است. لی و همکاران [۸]، مشخصات آیرودینامیکی توربین باد محور عمودی با پره مستقیم و یک جمع کننده باد منحنی شکل را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که ضریب گشتاور شروع به کار حدود ۱۴/۸ درصد نسبت به حالت معمول افزایش داشته است. جیانگ و همکاران [۹]، یک منحرف کننده جریان را بین دو توربین با ابعاد مختلف قرار دادند و توانستند با روش افزایش سرعت محلی حول توربین با استفاده از انحراف دهنده توان خروجی از توربین را ۳۸/۱ درصد نسبت به حالت بدون انحراف دهنده بیشتر کنند. جین و همکاران [۱۰]، تأثیر پارامترهای منحرف کننده بالادست جریان بر توان خروجی توربین های باد محور عمودی را مورد بررسی قرار دادند. این پژوهش نشان داد که عملکرد توربین باد محور عمودی را می توان با انتخاب صحیح پارامترهای منحرف کننده بسیار بهبود بخشید. چانگ و همکاران [۱۱]، در مطالعه خود بر روی آنالیز عملکرد توربین بادی منحرف کننده محور متقاطع پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بطور کلی استفاده از منحرف کننده جریان سبب بهبود عملکرد توربین شده است. تاکائو و همکاران [۱۲]، یک توربین بادی محور مستقیم (S-VAWT) با یک ردیف پره راهنما را پیشنهاد داده اند. نتایج آن ها نشان داد وجود پره های راهنما در تمام حالات بیشتر از حالت بدون پره راهنما کارایی دارد. همچنین هنگامی که زاویه قرارگیری پره راهنما ۴۵ درجه است بیشترین ضریب توان و گشتاور توسط توربین ایجاد شده است. قاسمی و آزادانی [۱۳]، عملکرد یک توربین بادی محور عمودی پره مستقیم اصلاح شده با یک منحرف کننده صفحه تخت را مورد مطالعه قرار دادند. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که استفاده از منحرف کننده با پارامترهای بهینه کارایی توربین بادی را در مقایسه با توربین بدون انحراف دهنده جریان به میزان ۱۶/۴۲ درصد افزایش داده است.

کیم و قریب [۱۴]، تأثیر یک منحرف کننده بالادست بر توان خروجی یک جفت توربین پاد چرخش با پره مستقیم و یک توربین تکی را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج آن ها نشان داد که اگر توربین به درستی در پشت منحرف کننده قرار گیرد، توان خروجی توربین به میزان قابل توجهی افزایش خواهد یافت. شاهی زارع و همکاران [۱۵]، اثرات زاویه های مختلف پره راهنما همه جهته بر عملکرد توربین بادی محور عمودی بررسی نموده اند. مطالعه آنها نشان داد که توان خروجی با پره راهنما، به ترتیب برای چهار نسبت سرعت نوک ۰/۷۴۵، ۱/۰۹۱، ۱/۹۰۱ و ۲/۵۳ به میزان ۴۰/۹٪، ۳۶/۵٪، ۳۵/۳٪ و ۳۳/۲٪ افزایش یافته است. جیانگ و همکاران [۱۶]، عملکرد توربین

بادی محور عمودی دوقلو^۳ با منحرف کننده را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاکی از آن است که وجود منحرف کننده بطور کلی در زاویه حمله مورد مطالعه سبب بهبود عملکرد توربین شده است. نوبیل و همکاران [۱۷]، توربین بادی محور عمودی تقویت شده را شبیه سازی نمودند. در تجزیه و تحلیل داده ها مشخص نمودند که ضرایب توان و گشتاور در مقایسه با حالت استاندارد حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد افزایش یافته است. چن و چن [۱۸]، مجموعه صفحات منحرف کننده را برای بهبود عملکرد روتور در اطراف توربین بادی محور عمودی بررسی نمودند. نتایج نشان داد که در مجموعه استاتور بهینه سرعت چرخش آزاد به میزان ۳۱۸ درصد، گشتاور خروجی ۲۰۰ درصد و حداکثر توان خروجی ۹۱۰ درصد افزایش یافته است. غفوریان و همکاران [۱۹]، با نصب جدا ره برای افزایش عملکرد آیرودینامیکی و قابلیت خود راه اندازی به بررسی عملکرد آیرودینامیکی روتور ترکیبی داریوس-ساونیوس پرداختند. نتایج افزایش قابل توجهی در ضریب توان را به میزان ۶۴ درصد نشان داد. الیویرا و همکاران [۲۰]، دریافتند استفاده از دیفیوزرها در توربین هایی بادی محور عمودی امکان بهبود تولید انرژی تا ۴/۲۸٪ را فراهم می آورد و ثابت می کند به هندسه دیفیوزر و رژیم باد وابسته است. همچنین نشان دادند یک فرآیند بهینه سازی خاص برای عملکرد دیفیوزر می تواند منجر به بهبود تولید انرژی تا ۳۲/۶٪ شود. زیدان و همکاران [۲۱]، هدف از مطالعه خود را بهبود عملکرد توربین بادی محور عمودی پره مستقیم داریوس از طریق معرفی منحرف کننده های بالادست بیان نمودند. نتایج آن ها نشان داد که وجود یک انحراف دهنده، بیشینه مقدار ضریب گشتاور را در پیکربندی با یک صفحه منحرف کننده تا ۲۴٪ بیشتر از روتور تنها افزایش می دهد، از طرف دیگر مقادیر گشتاور منفی را نیز افزایش می دهد، در حالی که در پیکربندی با دو منحرف کننده مقدار بیشینه تا ۲۲٪ مقدار میانگین کلی ضریب گشتاور در محدوده بهینه نسبت سرعت نوک افزایش می یابد. رحمتیان و همکاران [۲۲]، یک مجرای واگرا همگرا (شامل سه جزء نازل، دیفیوزر و فلنج) به همراه توربین بادی داریوس استفاده نمودند و در مرحله اول این مطالعه، زوایای و طول تمامی اجزای مجرا و عرض گلوگاه (در پیکربندی سه بعدی) بهینه شده است. نتایج نشان دهنده بهبود قابل توجهی در راندمان آیرودینامیکی (ضریب توان تا ۲/۵ برابر افزایش یافته است) با افزودن مجرای بهینه است.

در مطالعه حاضر جهت بهبود مشخصه های توانی توربین داریوس، صفحات منحرف کننده جریان در اطراف روتور داریوس قرار داده شده است. تا کنون مطالعاتی در خصوص تاثیر این صفحات منحرف کننده که از همه جهتها با زاویه ای برابر به صورت دایره ای در اطراف توربین قرار گرفته اند بر عملکرد توربین داریوس-پره مستقیم انجام نشده است. بنابراین انجام پژوهش حاضر برای بررسی عملکرد روتور داریوس به همراه صفحات منحرف کننده امری ضروری به نظر می رسد. از طرفی بدلیل بالا بودن هزینه ساخت و آزمایش تجربی این پژوهش، مطالعه حاضر به صورت عددی با استفاده از نرم افزار Ansys Fluent 2021 R2 به صورت دو بعدی شبیه سازی شده است. در این مطالعه ابتدا استقلال نتایج از شبکه محاسباتی بررسی شده سپس اعتبارسنجی انجام شده

¹ Darrieus

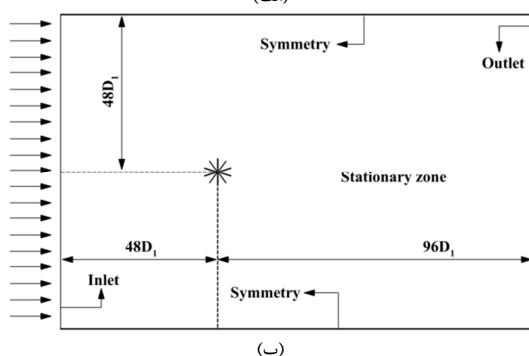
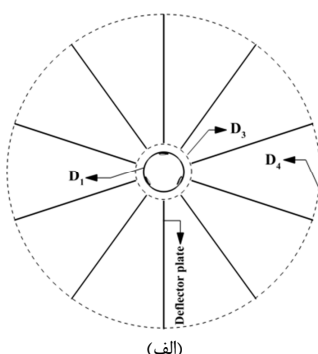
² Deflector

³ Twin-turbine

در شبکه‌بندی دامنه محاسباتی برای افزایش کیفیت شبکه در ناحیه دوار بدلیل ایجاد بیشترین نوسانات فشار و سرعت و افزایش چگالی مش در اطراف پره از شبکه بی سازمان مثلثی استفاده شده است. همچنین برای افزایش دقت محاسبات و باتوجه به مدل آشفتگی، مش لایه مرزی بر روی دیواره‌ها ایجاد شده است. از طرفی ارتفاع اولین سلول از دیواره به گونه‌ای اعمال شده که بیشترین مقدار y^+ همواره کمتر از ۱ باشد. برای ایجاد دوران در ناحیه دوار از روش مش لغزان بهره برده شده است. در ناحیه ساکن بدلیل کاسته شدن از شدت نوسانات و کاهش هزینه محاسباتی، شبکه از نوع سازمان یافته چهار ضلعی ساختار بندی شده است. شکل ۲ توزیع شبکه بندی درون ناحیه محاسباتی را با جزییات نشان می‌دهد.

۲-۲- معادلات

معادلاتی که در مکانیک سیالات برای بررسی رفتار آیرودینامیکی جریان استفاده می‌شود معادلات ناپایای ناویر-استوکس (URANS)^۴ است. با فرض جریان غیرقابل تراکم، متوسط زمانی معادلات پیوستگی و مومنوم به صورت زیر بیان می‌شوند [۲۴]:



شکل ۱- (الف) طرحواره توربین بادی در حضور صفحات منحرف کننده و (ب) دامنه محاسباتی مطالعه حاضر

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

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

^۴ Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes

است. برای بررسی نتایج از مقایسه توربین داریوس در دو حالت با صفحه‌های منحرف کننده و بدون صفحه‌های منحرف کننده در شرایط شبیه‌سازی یکسان استفاده شده است.

۲- مفاهیم و معادلات

۲-۱- مدل فیزیکی

مشخصات توربین داریوس شبیه‌سازی شده در این مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است. توربین داریوس دارای سه پره با مقطع ایرفویل NACA0018 انتخاب شده که محبوبیت بالایی از منظر دانشگاهی و صنعتی دارد. طول وتر ایرفویل (c) ۰/۲ متر در نظر گرفته شده و قطر توربین (D_1) برابر ۰/۸ متر مطابق با توربین‌های بادی داریوس تجاری است. در مطالعه حاضر، مطابق شکل ۱ (الف)، از یک مجموعه ۱۰ عددی صفحه صاف که به اصطلاح منحرف کننده گفته می‌شود در اطراف روتور داریوس استفاده شده است. قطر داخلی بی‌بعد صفحات برابر $D_3/D_1 = 1/6$ و قطر خارجی بی‌بعد این صفحات برابر $D_4/D_1 = 8/8$ در نظر گرفته شده است. سرعت جریان آزاد باد (U_∞) برابر ۶ متر بر ثانیه لحاظ شده است. برای شبیه‌سازی توربین بادی مورد نظر با و بدون منحرف کننده از یک دامنه محاسباتی مستطیلی شکل مطابق شکل ۱ (ب) استفاده شده است. در انتخاب ابعاد دامنه محاسباتی دو بعدی در این پژوهش، ضمن مطالعه دقیق پژوهش‌های پیشین [۱۵، ۱۷، ۲۰، ۲۱]، طوری انتخاب شده است تا اثرات مرزها روی مشخصه‌های توانی توربین مورد نظر قابل اغماض باشد. به این منظور، از یک دامنه محاسباتی با اندازه $96D_1 \times 48D_1$ که دارای دو ناحیه مجزای دوار (حول روتور) و ساکن (دور از روتور) می‌باشد، استفاده شده است.

جدول ۱- پارامترهای طراحی روتور داریوس

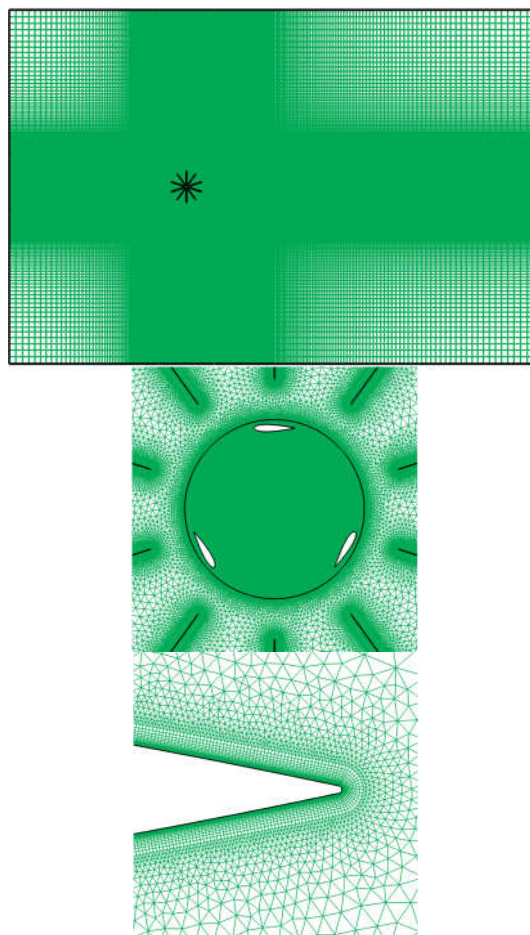
پارامتر	مقدار	منابع
تعداد پره‌های روتور	۳	[23]
قطر روتور (D_1) m	۰/۸	[23]
طول وتر هر پره ($\frac{c}{D_1}$)	۰/۲۵	[23]
نوع پره	NACA0018	[23]
نوع روتور	پره مستقیم	[23]
نوع منحرف کننده	صفحه تخت	
تعداد منحرف کننده‌ها	۱۰	
قطر داخلی صفحات ($\frac{D_3}{D_1}$)	۱/۶	
قطر خارجی صفحات ($\frac{D_4}{D_1}$)	۸/۸	
ضخامت صفحات منحرف کننده m (t)	۰/۰۰۲	[18]

برای اجتناب از اثرات این مرزها روی میدان سرعت حول روتور و برای مرز خروجی از شرط مرزی فشار خروجی^۱ منطبق بر فشار نسبی صفر استفاده شده است. همچنین، روی پره‌ها و صفحات منحرف کننده از شرط عدم لغزش^۲ و در مرز بین ناحیه ساکن و ناحیه دوار، شرط مرز مشترک^۳ اعمال شده است.

^۱ Pressure outlet

^۲ No-slip condition

^۳ Interface



شکل ۲- شبکه بندی مورد استفاده در این مطالعه

عبارت $\rho \bar{u}_i \bar{u}_j$ را اصطلاحاً تنش آشفتگی یا تنش رینولدز گویند [۲۵] که برای شبیه‌سازی آن از مدل‌های آشفتگی استفاده می‌شود. در این مطالعه، برای شبیه‌سازی جریان آشفتنه از مدل آشفتگی $k-\omega$ SST استفاده شده است که بسیاری از تحقیقات پیشین [۲۶-۲۸] بهینه بودن این مدل را در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی تایید کرده‌اند.

مدل آشفتگی $k-\omega$ SST با دو معادله انتقالی بصورت زیر بیان می‌شود [۲۹،۳۰]:

معادله انتقالی k :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \quad (3)$$

معادله انتقالی ω :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (4)$$

در این مطالعه، برای حل معادلات حاکم بر مساله بصورت عددی، از روش حجم محدود^۱ استفاده شده است. برای گسسته سازی مشتقات

موجود در معادلات حاکم، روش بالادست مرتبه دوم^۲ و روش تفاضل مرکزی^۳ به ترتیب برای عبارات وزش و نفوذ استفاده شده است. بعلاوه، از فرمول ضمنی درجه دوم^۴ برای گسسته‌سازی زمانی و از الگوریتم SIMPLE برای اتصال میادین سرعت و فشار، استفاده شده است. شاخص همگرایی در این شبیه‌سازی برای کلیه معادلات برابر با 10^{-8} در نظر گرفته شده است. در شبیه سازی جریان حول روتور مجموعاً ۲۰ دور کامل برای چرخش روتور مورد نظر لحاظ شده است که بعد از دور ششم شرایط شبه پایا برای کلیه روتورها حاصل شده است. با اینحال، برای دقت بیشتر، کلیه داده ها در دور بیستم روتور استخراج شده است. برای بررسی مشخصه‌های توانی توربین از ضریب گشتاور در رابطه (۵) و ضریب توان در رابطه (۶) در یک چرخه استفاده می‌شود. همچنین سرعت در نوک پره توربین از رابطه (۷) محاسبه شده است:

$$C_M = \frac{T}{0.5 \rho U_\infty^2 D_1 R} \quad (5)$$

$$C_p = C_M \cdot TSR \quad (6)$$

$$TSR = \frac{R \omega_0}{U_\infty} \quad (7)$$

۲-۳- فرآیند استقلال از شبکه

برای بررسی استقلال نتایج از شبکه‌بندی و همچنین بهینه‌سازی شبکه‌بندی جهت کاهش حجم و زمان محاسبات، سه شبکه مختلف برای حالت با منحرف کننده و سه شبکه‌بندی متفاوت برای حالت بدون منحرف کننده مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده برای ضریب گشتاور در دور آخر و ضریب توان متوسط به ترتیب در شکل ۳ و جدول ۲ ارائه شده است. بررسی نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در هر حالت با منحرف کننده و بدون منحرف کننده، با شبکه‌بندی دوم به ترتیب با 1036000 و 424000 سلول تغییرات ضریب گشتاور با شبکه بندی سوم انطباق دارد. از سوی دیگر، میزان خطاها در ضریب توان متوسط نسبت به شبکه بندی سوم به ترتیب 1.50% و 0.99% می‌باشد که نشان از دقت قابل قبول نتایج در شبکه‌بندی دوم دارد. لذا از شبکه بندی دوم در شبیه‌سازی استفاده شده است.

پارامتر تاثیرگذار دیگر بر نتایج بدست آمده گام زمانی می‌باشد. در شبیه‌سازی توربین‌های بادی معمولاً گام زمانی معادل با چرخش زاویه‌ای توربین مطابق رابطه (۸) در نظر گرفته می‌شود [۲۷]. با توجه به اهمیت این پارامتر بر داده‌های حاصل و همچنین زمان و هزینه محاسبات، استقلال نتایج از گام زمانی معادل با 0.2 ، 0.4 و 1 درجه از دوران روتور (dθ) در دو حالت با و بدون منحرف کننده بطور مجزا مورد بررسی قرار گرفته است.

$$\Delta t = \frac{d\theta}{\omega_0 \cdot \frac{180}{\pi}} \quad (8)$$

نتایج بدست آمده برای تغییرات ضریب گشتاور در یک دور کامل در شکل ۴ برای هر دو حالت ارائه شده‌اند. با بررسی نتایج بدست آمده برای هر دو حالت، مشخص می‌شود که انتخاب گام زمانی معادل با 1 درجه دوران روتور خطای قابل توجهی را نشان می‌دهد. از سوی دیگر،

² Second-order upwind

³ Central differencing

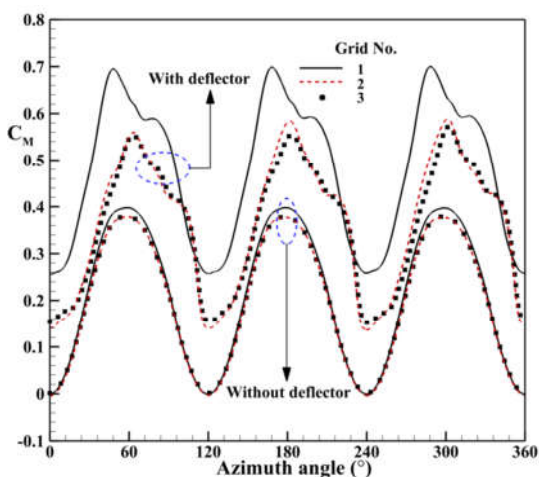
⁴ Second-order implicit

¹ Finite volume method

جدول ۳- میزان اختلاف بین مطالعه حاضر و مطالعه آزمایشگاهی و عددی مرجع [۱۹] در TSRهای مختلف

TSR	۰/۵	۰/۸	۱	۱/۳	۱/۵
مطالعه حاضر	۰/۰۲۹	۰/۱۰۳	۰/۱۸۲	۰/۲۱۱	۰/۲۰۵
الخوری و همکاران [۱۹]- تجربی	۰/۰۴۵	۰/۱۰۰	۰/۱۶۱	۰/۲۱۲	۰/۱۸۹
الخوری و همکاران [۱۹]- عددی	۰/۰۴۹	۰/۱۰۳	۰/۱۶۸	۰/۲۰۲	۰/۱۸۸
درصد اختلاف با داده‌های تجربی	۳۵/۵	۳	۱۳	۰/۴۷	۸/۴۸
درصد اختلاف با داده‌های عددی	۴۰/۸	۰	۸/۳۳	۴/۴۵	۹/۰۴

این امر به دلیل تزریق ممنوع بیشتر بوسیله صفحات منحرف کننده به درون روتور می باشد. در زاویه فضایی صفر درجه، جریان بازایی ایجاد شده توسط صفحات منحرف کننده بالادست منجر به بهبود قابل ملاحظه سرعت هوا در مسیر پره‌های ۱ و ۲ شده است. این جریان بازایی منجر به افزایش اختلاف سرعت و فشار در قسمت‌های دورنی و بیرونی پره‌های ذکر شده گردیده و افزایش نیروی برا و گشتاور تولیدی توسط این دو پره را به همراه خواهد داشت. با افزایش زاویه فضایی به ۹۰ درجه، در مقایسه با حالت بدون منحرف کننده، هر سه پره به طور کلی و پره ۳ بطور اخص در مسیر جریان بازایی پر سرعت ایجاد شده توسط صفحات منحرف کننده قرار می‌گیرند که این رخداد در تولید گشتاور امری مثبت تلقی می‌گردد.



شکل ۳- بررسی اختلاف ضریب گشتاور در شبکه‌های مختلف در دور آخر و نسبت سرعت نوک ۱/۵

در زاویه فضایی ۱۸۰ درجه، همانگونه که مشاهده می‌شود، در حالت با منحرف کننده، پره ۳ بیشترین اختلاف فشار را بین دو سطح خود تجربه می‌کند. در مقابل، پره ۱ نسبت به حالت بدون منحرف کننده گشتاور کمتری تولید می‌کند. در زاویه فضایی ۲۷۰ درجه، پره ۲ که سهم اصلی در گشتاور تولیدی روتور را بر عهده دارد، در حالت با منحرف کننده نسبت به حالت بدون منحرف کننده در مسیر میدان

بین گام های زمانی معادل با ۰/۴ و ۰/۲ درجه خطاها به حداقل مقدار ممکن رسیده و توزیع گشتاور در این دو گام زمانی بخوبی بر هم منطبق شده

جدول ۲- استقلال نتایج از شبکه محاسباتی

بدون منحرف کننده			با منحرف کننده		
C _p	تعداد سلول	شماره شبکه	C _p	تعداد سلول	شماره شبکه
۰/۳۱۹	۳۳۲۰۰۰	۱	۰/۶۹۸	۹۰۰۰۰۰	۱
۰/۳۰۱	۴۲۴۰۰۰	۲	۰/۵۳۰	۱۰۳۶۰۰۰	۲
۰/۳۰۴	۵۸۶۰۰۰	۳	۰/۵۲۲	۱۲۵۰۰۰۰	۳

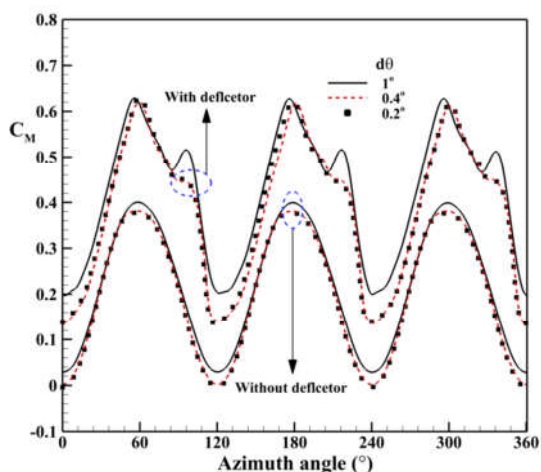
است. لذا برای کاهش زمان محاسبات و افزایش دقت در استخراج داده‌ها از گام زمانی معادل با ۰/۴ درجه از دوران روتور استفاده شده است.

۲-۴- اعتبار سنجی

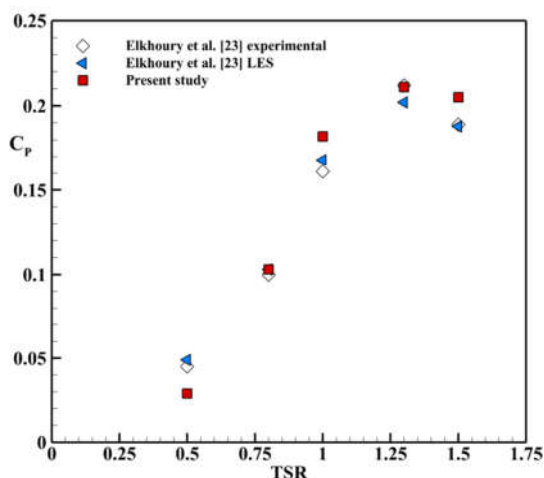
به منظور اعتبارسنجی کد عددی استفاده شده در این پژوهش، نتایج مطالعه حاضر با داده های مطالعه الخوری و همکاران [۲۳] که توربین سه پره‌ای را بصورت تجربی و عددی در شرایط مشخص مورد آزمایش قرار داده‌اند، مطابقت داده شد. همانطور که در شکل ۵ و جدول ۳ مشخص است نتایج حاصل از تغییرات ضریب توان متوسط با سرعت نوک بی‌بعد تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی و عددی دارد.

۳- نتایج

در این پژوهش، عملکرد توربین بادی داریوس در حضور صفحات منحرف کننده با حالت بدون منحرف کننده در سه سرعت نوک بی‌بعد مختلف همچون ۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵ مقایسه شده است. بدین منظور، میدان بی‌بعد شده سرعت و گردابه لحظه‌ای برای درک بهتر عملکرد توربین بادی داریوس در حضور صفحات منحرف کننده ارائه شده‌اند. اضافه بر آن، توزیع گشتاور در یک دور کامل نسبت به زاویه فضایی نیز ارائه شده است. شکل ۶ میدان سرعت لحظه‌ای بی‌بعد شده در سرعت نوک بی‌بعد ۱/۵ را در زوایای فضایی منتخب همچون ۰، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه را برای دو حالت با و بدون صفحات منحرف کننده مقایسه می‌کند. ذکر این نکته لازم است که مقادیر سرعت لحظه‌ای با استفاده از سرعت جریان آزاد بی‌بعد شده‌اند. هدف اصلی از بکارگیری صفحات منحرف کننده با هر شکلی، تمرکز جریان هوای نزدیک شونده بیشتری روی روتور می‌باشد. این نکته مهم در مناطق با پتانسیل باد ضعیف عمدتاً برای حل مشکل خود شروعی توربین‌های بادی داریوس که یکی از مشکلات چنین روتورهایی می‌باشد، می‌تواند کارآمد باشد. در مناطق با پتانسیل باد کافی، استفاده از صفحات منحرف کننده عمدتاً بهبود مشخصه‌های توانی را به همراه خواهد داشت. در کلیه زوایای فضایی، در مقایسه با حالت بدون منحرف کننده، وجود صفحات منحرف کننده حول روتور منجر به بهبود قابل توجه میدان سرعت درون روتور شده است.



شکل ۴- بررسی استقلال نتایج از گام زمانی در زاویه‌های دوران مختلف در دور آخر و $TSR=1.5$

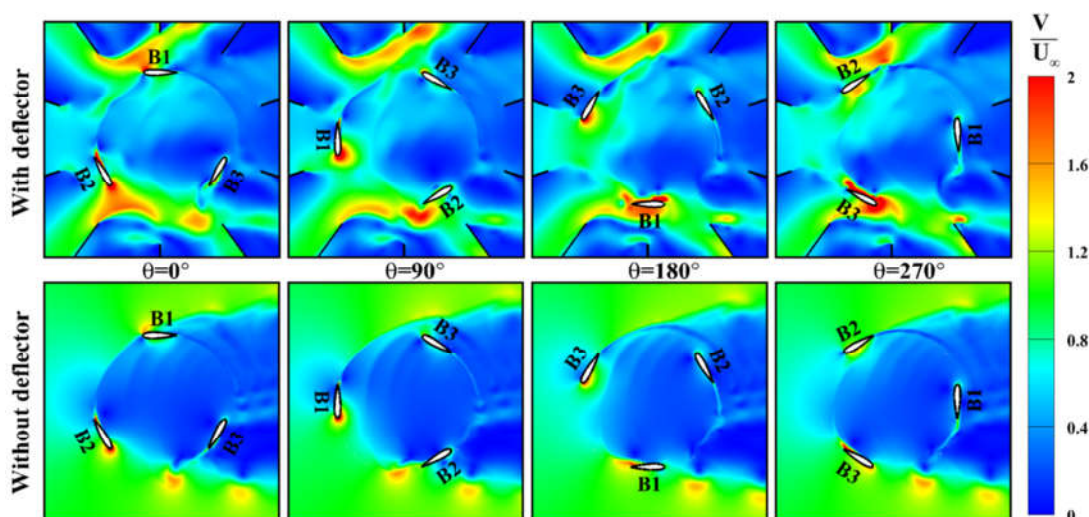


شکل ۵- اعتبار سنجی مطالعه حاضر با مطالعه آزمایشگاهی و عددی الخوری و همکاران [۲۳]

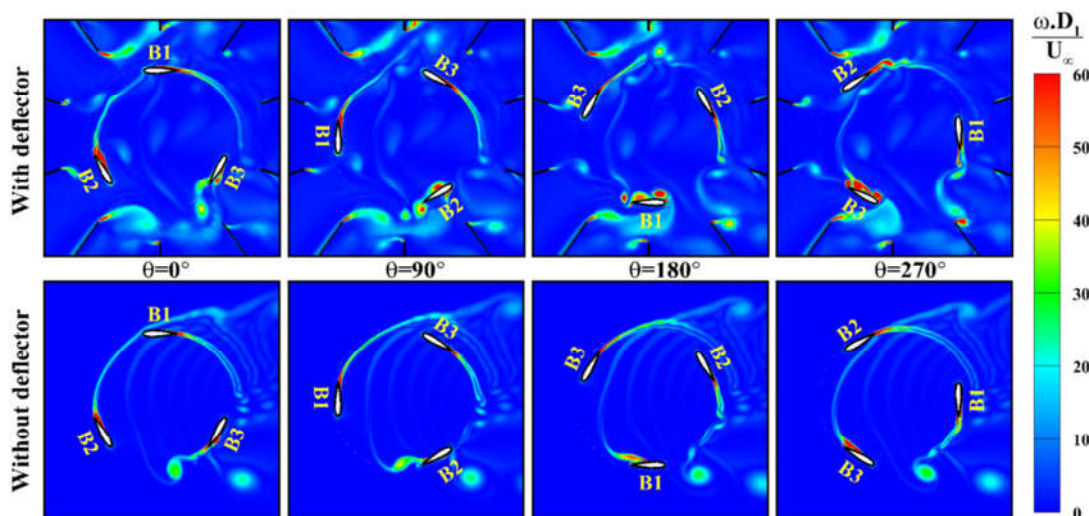
صفحات منحرف کننده را به وضوح نشان می‌دهد. از سوی دیگر، نوسانات گشتاور بدلیل تقلیل جریان تزریق شده به داخل روتور بطور قابل ملاحظه‌ای برای هر دو روتور تقلیل پیدا کرده است که نشان از عملکرد مناسب هر دو روتور دارد. با این وجود، سهم روتور با منحرف کننده در تولید گشتاور به میزان قابل توجهی بیشتر از آن برای روتور بدون منحرف کننده می‌باشد. در سرعت نوک حداکثر، مطابق شکل ۱۰، نوسات گشتاور به دلیل تزریق هوای حداقلی به درون روتور تقلیل بیشتری می‌یابد. با وجود تقلیل نوسانات روتور در دو حالت با و بدون منحرف کننده، هر دو روتور در برخی از زوایای فضایی وارد ناحیه مرده شده‌اند. گشتاور تولید شده برای هر دو روتور با و بدون منحرف کننده نسبت به سرعت نوک بی‌بعد بهینه ۱٫۵ تقلیل می‌یابد.

سرعت تقویت شده قرار گرفته و لذا بیشترین اختلاف فشار را بین سطوح تحتانی و فوقانی خود تجربه می‌کند. برای تحلیل دقیقتر، میدان گردابه بی‌بعد شده در سرعت نوک بی‌بعد ۱٫۵ در زوایای فضایی منتخب همچون ۰، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه برای دو حالت با و بدون صفحات منحرف کننده در شکل ۷ ارائه شده است. با مقایسه میداین گردابه برای دو حالت با و بدون منحرف کننده می‌توان دریافت که، بدون در نظر گرفتن زاویه فضایی، بطور کلی استفاده از صفحات منحرف کننده حول روتور داریوس منجر به تضعیف میدان گردابه درون روتور و تضعیف دنباله توسط هر پره بدلیل تزریق جریان هوای بیشتر شده است. با تضعیف دنباله ایجاد شده توسط هر پره، نیروی پسای اعمال شده روی پره‌های بعدی کمتر شده و راندمان روتور افزایش خواهد یافت. این رخداد مثبت در مورد پره‌های عبوری از نزدیکی صفحات منحرف کننده بالادست بیشتر نمود پیدا می‌کند. با اینحال، در زوایای فضایی ۰، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه میدان گردابه به ترتیب حول پره‌های سوم، دوم، اول و سوم اندکی در حالت با منحرف کننده نسبت به حالت بدون منحرف کننده افزایش یافته است که می‌تواند در تولید گشتاور مثبت توسط این پره‌ها تاثیر منفی داشته باشد. سایر پره‌ها در مقایسه با حالت بدون منحرف کننده دارای میدان گردابه ضعیف‌تری می‌باشند.

شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ نمودار ضریب گشتاور لحظه‌ای را به ترتیب برای سرعت نوک بی‌بعد ۰٫۵، ۱٫۵ و ۲٫۵ با و بدون منحرف کننده در یک دور کامل بر حسب زاویه فضایی نشان می‌دهند. برای تحلیل دقیق‌تر وضعیت عملکرد توربین در زوایای فضایی مختلف، ناحیه مرده به عنوان ناحیه‌ای که در آن توربین بادی گشتاور منفی تولید کرده و با مشکل خود شروعی روبرو است، با رنگ خاکستری مشخص شده است. همانطوری که مشاهده می‌شود، در تمام زوایای فضایی و سرعت نوک بی‌بعد، روتور قرار گرفته درون صفحات منحرف کننده به میزان قابل توجهی گشتاور بیشتری از حالت بدون منحرف کننده تولید می‌کند. بررسی دقیق‌تر نتایج بدست آمده گویای این است که در سرعت نوک بی‌بعد کوچک همچون ۰٫۵، در هر دو حالت با و بدون منحرف کننده، نوسانات گشتاور بطور قابل ملاحظه‌ای نسبت به سرعت نوک بی‌بعد متوسط و زیاد، بیشتر است. وجود چنین نوسانات قابل توجهی در گشتاور تولید شده توسط توربین بدلیل تزریق جریان بیشتر به درون روتور در سرعت‌های نوک بی‌بعد کوچک می‌باشد که منجر به افزایش اندرکنش بین جریان تزریق شده و پره‌های توربین و در نتیجه افزایش ارتعاشات روتور و کاهش عمر آن می‌شود. این پدیده هم در حالت با منحرف کننده و هم در حالت بدون آن قابل مشاهده است. لیکن وجود صفحات منحرف کننده گشتاور تولیدی را در این سرعت نوک بی‌بعد افزایش داده و گسترش ناحیه مرده را تقلیل می‌دهد. با افزایش سرعت نوک بی‌بعد به ۱٫۵، مطابق شکل ۹ میزان گشتاور تولید شده در دو حالت بطور قابل توجهی افزایش پیدا کرده است. اگرچه گشتاور روتور در غیاب صفحات منحرف کننده در برخی از زوایای فضایی در مرز ناحیه مرده (گشتاور صفر) قرار گرفته است، با قرارگیری صفحات منحرف کننده حول روتور مورد نظر عملکرد روتور به میزان قابل توجهی از ناحیه مرده فاصله گرفته است که اهمیت استفاده از این



شکل ۶- کانتور سرعت لحظه‌ای در $TSR=1/5$ و زوایای فضایی $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ و 270° برای دو حالت با و بدون منحرف کننده در جریان باد 6 m/s

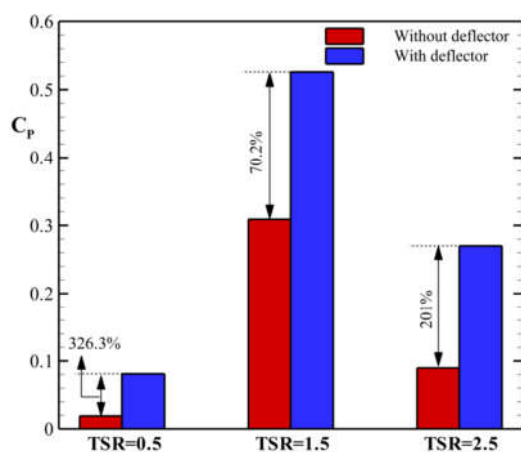


شکل ۷- کانتور گردابه لحظه‌ای در $TSR=1/5$ و زوایای فضایی $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ و 270° برای دو حالت با و بدون منحرف کننده در جریان باد 6 m/s

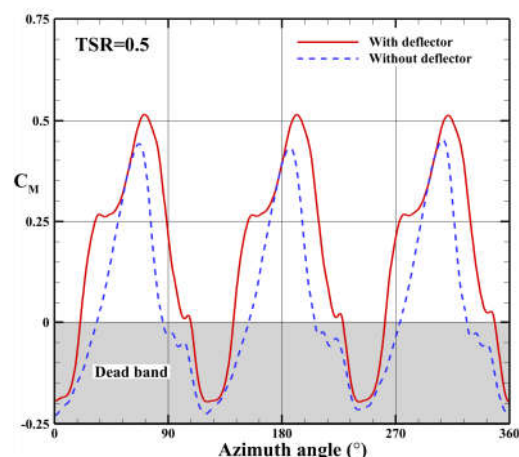
توجهی در ضریب توان متوسط شده است. در سرعت نوک بی‌بعد 0.5 وجود صفحات منحرف کننده منجر به ضریب توان متوسط 0.081 می‌شود که در مقایسه با حالت بدون منحرف کننده که دارای ضریب توان 0.19 می‌باشد افزایشی برابر با 32.3% درصد را نشان می‌دهد که مقدار قابل توجهی در بهبود عملکرد روتور می‌باشد. در سرعت نوک بی‌بعد 1.5 که دو روتور دارای حداکثر توان تولیدی می‌باشند، ضریب توان متوسط برابر با 0.526 و 0.309 به ترتیب برای حالت با و بدون منحرف کننده بدست آمده است که افزایشی معادل با 70.2% درصد را نشان می‌دهد. نهایتاً، در سرعت نوک بی‌بعد 2.5 ، مقادیر ضریب توان متوسط برابر با 0.270 و 0.0897 به ترتیب برای حالت با و بدون منحرف کننده حاصل شده است که منجر به افزایشی برابر با 20.1% درصد در توان تولید شده برای حالت با منحرف کننده نسبت به حالت بدون منحرف کننده شده است.

با اینحال، در این سرعت نوک بی‌بعد نیز سهم روتور با منحرف کننده در تولید گشتاور به میزان قابل توجهی نسبت به حالت بدون منحرف کننده بیشتر بوده و توسعه ناحیه مرده با وجود صفحات منحرف کننده تقلیل یافته است.

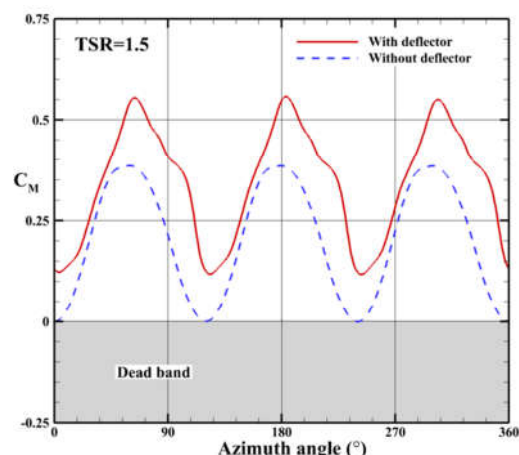
شکل ۱۱ تغییرات ضریب توان متوسط را برای روتور با و بدون منحرف کننده در سرعت‌های نوک بی‌بعد 0.5 و 1.5 نشان می‌دهد. در حالت کلی، مطالعات پیشین در مورد توربین‌های بادی داریوس نشان می‌دهند که بیشترین ضریب توان این نوع از توربین‌ها در حالت بدون منحرف کننده در سرعت نوک بی‌بعد 1.5 روی می‌دهد. کاهش یا افزایش سرعت نوک بی‌بعد در چنین توربین‌هایی منجر به تقلیل ضریب توان و گشتاور آنها می‌شود. نتایج بدست آمده در این پژوهش نیز یافته‌های قبلی را تایید می‌کند. ضریب توان متوسط را می‌توان بعنوان معیاری برای مقایسه بهینه بین حالت‌های مختلف در نظر گرفت. همانطوری که مشاهده می‌شود، بدون در نظر گرفتن مقدار سرعت نوک بی‌بعد، استفاده از صفحات منحرف کننده منجر به افزایش قابل



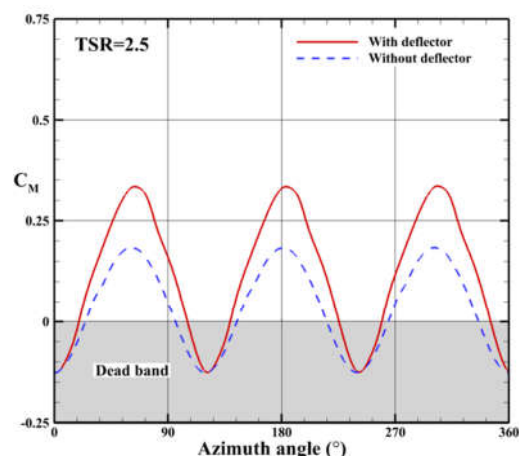
شکل ۱۱- ضریب توان متوسط در $TSR=2.5, 1.5, 0.5$ و جریان باد 6 m/s



شکل ۸- ضریب گشتاور لحظه‌ای در دور آخر برای $TSR=0.5$ و جریان باد 6 m/s



شکل ۹- نمودار ضریب گشتاور لحظه‌ای در دور آخر برای $TSR=1.5$ و جریان باد 6 m/s



شکل ۱۰- نمودار ضریب گشتاور لحظه‌ای در دور آخر برای $TSR=2.5$ و جریان باد 6 m/s

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه، از دینامیک سیالات محاسباتی برای مقایسه عملکرد روتور داریوس سه پره در دو حالت با منحرف کننده و بدون - منحرف کننده در نسبت‌های سرعت نوک مختلف استفاده گردید. تعداد منحرف کننده‌ها در این مطالعه ۱۰ عدد در نظر گرفته شد که به صورت دایره‌ای در اطراف روتور داریوس قرار داده شده بودند. پس از ارائه برخی تحلیل‌های حساسیت سنجی مفید، نتایج بدست آمده برای حالت بدون منحرف کننده با داده‌های آزمایشگاهی و عددی موجود در ادبیات فن مورد مقایسه قرار گرفته و توافق خوبی بین آنها مشاهده گردید. شبیه‌سازی در سرعت جریان باد 6 m/s بر ثانیه در سه نسبت سرعت نوک $0.5, 1.5$ و 2.5 انجام شده است. نتایج بدست آمده نشان داد که استفاده از منحرف کننده منجر به ایجاد جریان بازیابی در درون روتور شده که منجر به تزریق جریان بیشتر به درون روتور شده و افزایش گشتاور روتور و تقلیل ناحیه مرده را در حالت با منحرف کننده نسبت به حالت بدون منحرف کننده به همراه داشته است. نهایتاً، با قرارگیری صفحات منحرف کننده پیشنهادی در این پژوهش، ضریب توان متوسط روتور داریوس به میزان 3.326% ، 70.2% و 201% درصد به ترتیب در سرعت‌های نوک بی‌بعد $0.5, 1.5$ و 2.5 نسبت به حالت بدون منحرف کننده افزایش پیدا کرد.

- [5] Saha UK, Thotla S, Maity D. Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 2008;96:1359-75.
- [6] Debnath B, Biswas A, Gupta R. Computational fluid dynamics analysis of a combined three-bucket Savonius and three-bladed Darrieus rotor at various overlap. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 2009;1.
- [7] Wong KH, Chong WT, Poh SC, Shiah Y-C, Sukiman NL, Wang C-T. 3D CFD simulation and parametric study of a flat plate deflector for vertical axis wind turbine. *Renew Energy* 2018;129:32-55.
- [8] Li Y, Zhao S, Qu C, Tong G, Feng F, Zhao B, et al. Aerodynamic characteristics of Straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine with a curved-outline wind gathering device. *Energy Convers Manag* 2020;203:112249.
- [9] Jiang Y, Zhao P, Stoesser T, Wang K, Zou L. Experimental and numerical investigation of twin vertical axis wind turbines with a deflector. *Energy Convers Manag* 2020;209:112588.
- [10] Jin X, Wang Y, Ju W, He J, Xie S. Investigation into parameter influence of upstream deflector on vertical axis wind turbines output power via three-dimensional CFD simulation. *Renew Energy* 2018;115:41-53.
- [11] Chong W-T, Muzammil WK, Ong H-C, Sopian K, Gwani M, Fazlizan A, et al. Performance analysis of the deflector integrated cross axis wind turbine. *Renew Energy* 2019;138:675-90.
- [12] Takao M, Kuma H, Maeda T, Kamada Y, Oki M, Minoda A. A straight-bladed vertical axis wind turbine with a directed guide vane row — Effect of guide vane geometry on the performance —. *Journal of Thermal Science* 2009;18:54-7.
- [13] 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.
- [14] Kim D, Gharib M. Efficiency improvement of straight-bladed vertical-axis wind turbines with an upstream deflector. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 2013;115:48-52.
- [15] Shahizare B, Nik-Ghazali N, Chong WT, Tabatabaeikia S, Izadyar N, Esmacilzadeh A. Novel investigation of the different Omni-direction-guide-vane angles effects on the urban vertical axis wind turbine output power via three-dimensional numerical simulation. *Energy Convers Manag* 2016;117:206-17.
- [16] Jiang Y, Zhao P, Zou L, Zong Z, Wang K. Two-Dimensional Computational Fluid Dynamics Study on the Performance of Twin Vertical Axis Wind Turbine With Deflector. *J Energy Resour Technol* 2020;142.
- [17] Nobile R, Vahdati M, Barlow JF, Mewburn-Crook A. Unsteady flow simulation of a vertical axis augmented wind turbine: A two-dimensional study. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 2014;125:168-79.
- [18] Chen T-Y, Chen Y-Y. Developing a Vortical Stator Assembly to Improve the Performance of Drag-Type Vertical-Axis Wind Turbines. *Journal of Mechanics* 2015;31:693-9.
- [19] Ghafoorian F, Mirmotahari SR, Eydzadeh M, Mehrpooya M. A systematic investigation on the hybrid Darrieus-Savonius vertical axis wind turbine aerodynamic performance and self-starting capability improvement by installing a curtain. *Next Energy* 2025;6:100203.
- [20] Oliveira TD, Tofaneli LA, Santos AÁB. Aerodynamic optimization of small diffuser Augmented Wind Turbines: A differential evolution approach. *Energy Conversion and Management: X* 2025;100891.
- [21] Zidane IF, Ali HM, Swadener G, Eldrainy YA, Shehata AI. Effect of upstream deflector utilization on H-Darrieus wind turbine performance: An optimization study. *Alexandria Engineering Journal* 2023;63:175-89.

۶- نمادها

c	طول وتر پره (m)
D ₁	قطر روتور داریوس (m)
D ₂	قطر ناحیه دوار (m)
D ₃	قطر داخلی منحرف کننده‌ها (m)
D ₄	قطر خارجی منحرف کننده‌ها (m)
Δs	فاصله اولین سلول از سطح پره (m)
Δt	گام زمانی (s)
dθ	گام زاویه فضایی (درجه)
R	شعاع روتور (m)
U _∞	سرعت جریان آزاد باد (m/s)
T	گشتاور (N.m)
C _M	ضریب گشتاور
C _P	ضریب توان
TSR	نسبت سرعت نوک
G _k	تولید انرژی جنبشی آشفته‌گی توسط سرعت متوسط
G _ω	تولید انرژی جنبشی آشفته‌گی توسط ω
k	انرژی جنبشی آشفته‌گی (J)
S _k	جمله چشمه (kg.J/m ³ .s)
S _ω	جمله چشمه (kg.J/m ³ .s)
$\bar{u}$	متوسط زمانی سرعت (m/s)
u'	سرعت نوسانی (m/s)
V	مقدار سرعت (m/s)
x _j	مولفه مختصات
y ⁺	تابع بدون بعد دیواره

علایم یونانی

ω ₀	سرعت دورانی روتور (rad/s)
ρ	چگالی (kg/m ³)
μ	لزجت دینامیکی (Pa.s)
t _ω	تنش دیوار (Pa)
Γ _ω	پخش انرژی جنبشی (kg/m.s)
Γ _k	پخش نرخ اتلاف (kg/m.s)

۷- مراجع

- [1] Whittlesey R. Chapter 10 - Vertical Axis Wind Turbines: Farm and Turbine Design. In: Letcher TM, editor. *Wind Energy Engineering*, Academic Press; 2017, p. 185-202.
- [2] B. Looney. *Energy Outlook: 2020 edition*. London: 2020.
- [3] Boulouiha HM, Allali A, Denai M. Chapter Nine - Grid Integration of Wind Energy Systems: Control Design, Stability, and Power Quality Issues. In: Rasul MG, Azad A kalam, Sharma SC, editors. *Clean Energy for Sustainable Development*, Academic Press; 2017, p. 239-335.
- [4] Alaimo A, Esposito A, Messineo A, Orlando C, Tumino D. 3D CFD Analysis of a Vertical Axis Wind Turbine. *Energies (Basel)* 2015;8:3013-33.

- [22] Rahmatian MA, Khaksar S, Tari PH, Karbasian HR. Optimizing duct geometry for micro-scale VAWTs: Exploring aerodynamics and aeroacoustics with URANS and DDES models. *Energy* 2024;313:134043.
- [23] Elkhoury M, Kiwata T, Aoun E. Experimental and numerical investigation of a three-dimensional vertical-axis wind turbine with variable-pitch. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 2015;139:111–23.
- [24] Rohatgi J, Barbezier G. Wind turbulence and atmospheric stability — Their effect on wind turbine output. *Renew Energy* 1999;16:908–11.
- [25] Wang Y, Sun X, Dong X, Zhu B, Huang D, Zheng Z. Numerical investigation on aerodynamic performance of a novel vertical axis wind turbine with adaptive blades. *Energy Convers Manag* 2016;108:275–86.
- [26] Asadi M, Hassanzadeh R. Assessment of Bach-type internal rotor on the performance of a hybrid wind turbine: effects of attachment angle, tip speed ratio, and free-wind speed. *Int J Green Energy* 2023;1–19. <https://doi.org/10.1080/15435075.2023.2220372>.
- [27] Patel VK, Patel RS. Optimization of an angle between the deflector plates and its orientation to enhance the energy efficiency of Savonius hydrokinetic turbine for dual rotor configuration. *Int J Green Energy* 2022;19:476–89.
- [28] Eltayesh A, Castellani F, Natili F, Burlando M, Khedr A. Aerodynamic upgrades of a Darrieus vertical axis small wind turbine. *Energy for Sustainable Development* 2023;73:126–43.
- [29] Mosbahi M, Ayadi A, Chouaibi Y, Driss Z, Tucciarelli T. Performance study of a Helical Savonius hydrokinetic turbine with a new deflector system design. *Energy Convers Manag* 2019;194:55–74.
- [30] 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. *Renew Energy* 2017;107:373–85.