

## تأثیر استفاده از یک مانع ایرفویل شکل بر افزایش کارایی یک توربین بادی محور عمودی ساوونیوس

کیهان لایقمنند<sup>۱</sup>

نیما غیائی طبری<sup>۲\*</sup>

[nima\\_ghiasi\\_te@yahoo.co.uk](mailto:nima_ghiasi_te@yahoo.co.uk)

مهران زرکش<sup>۲</sup>

تاریخ پذیرش: ۹۹/۹/۱۸

تاریخ دریافت: ۹۹/۷/۱۱

### چکیده

**زمینه و هدف:** افزایش روز افزون جمعیت نیاز به توسعه پایدار انرژی را روز به روز بیشتر می کند. همچنین افزایش سطح گازهای گلخانه ای و کاهش سطح ذخایر انرژی فسیلی، مراکز تحقیقاتی دنیا را به سمت انرژی های تجدیدپذیر معطوف کرده است. در میان انرژی های تجدیدپذیر، انرژی باد یکی از مطرح ترین گونه های انرژی های تجدیدپذیر می باشد. در این مطالعه با استفاده از مانع ایرفویل شکل راندمان توربین بادی ساوونیوس به طور قابل توجهی افزایش یافته است. این افزایش راندمان به صورت ارتقای قابلیت شروع بکار خودکار توربین بادی ساوونیوس و کاهش گشتاور منفی ایجاد شده توسط پره برگشتی انجام شده است.

**روش بررسی:** پیکربندی های مختلف سیستم منحرف کننده (مانع) پیشنهاد شده با استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به صورت عددی بررسی شده است. شبیه سازی سه بعدی ناپایا معادلات ناویر-استوکس متوسط گیری شده رینولدز (URANS) همراه با مدل توربولانسی SST k- $\omega$  انجام شده و با داده های تجربی موجود اعتبارسنجی گردیده است.

**یافته ها:** نتایج پیش بینی شده نشان می دهد که عملکرد روتور ساوونیوس بسیار به موقعیت و زاویه مانع بستگی دارد. بنابراین، مقادیر موقعیت و زاویه مناسب برای به دست آوردن بالاترین ضرایب گشتاور و توان وجود داشته است. استفاده از مانع مطلوب ایرفویل شکل، به طور قابل توجهی مقادیر ضریب گشتاور ایستاتیکی را در تمام محدوده زاویه ای خصوصاً در زاویه چرخش بین ۰ تا ۳۰ درجه و ۱۵۰ درجه تا ۱۸۰ درجه افزایش می دهد. با پوشش صحیح پره برگشتی با استفاده از مانع ایرفویل شکل، مقادیر ضریب گشتاور ایستاتیکی تا ۲ برابر بیشتر از مقدار تولید شده در حالت بدون مانع افزایش می یابد.

۱- دانشجوی دکتری، گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان، برازجان، ایران.

۲- استادیار، گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دشتستان، برازجان، ایران. \* (مسئول مکاتبات)

**بحث و نتیجه گیری :** توربین ساونیوس از راندمان پایینی برخوردار است. بنابراین، مطالعه حاضر با ارائه یک سیستم بهبود دهنده منحرف کننده (مانع) منجر به تولید توان و ضرایب گشتاور بالاتر می شود که در نهایت باعث ایجاد راندمان بالاتر و قابلیت شروع به کار خودکار بهتر می شود.

**واژه های کلیدی:** توربین بادی، مانع ایرفویل شکل، ساونیوس، دینامیک سیالات محاسباتی.

## **Effect of using an airfoil-shaped deflector on increasing the efficiency of a savonius vertical axis wind turbine**

**Keyhan Layeghmand**<sup>1</sup>

**Nima Ghiasi Tabari**<sup>2\*</sup>

[nima\\_ghiasi\\_te@yahoo.co.uk](mailto:nima_ghiasi_te@yahoo.co.uk)

**Mehran Zarkesh**<sup>2</sup>

Admission Date: December 8, 2020

Date Received: October 2, 2020

### **Abstract**

**Background and Objective:** With the increment of population, the need for sustainable energy development has been raised. By increasing greenhouse gas emissions and decreasing the fossil energy reserves have also shifted research centers around the world to renewable energy sources. Among renewable energies, wind energy is one of the most important types of renewable energy. In this study, the efficiency of the Savonius wind turbine is significantly increased by using an airfoil-shaped deflector. This increase in efficiency is carried out by upgrading the self-starting performance capability of the Savonius wind turbine and reducing the negative torque generated by the returning blade.

**Material and Methodology:** Different configurations of the proposed deflector system are considered numerically using the CFD solver. A three-dimensional incompressible unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes simulation in conjunction with the SST  $k-\omega$  turbulence model is done and validated with the available experimental data.

**Findings:** The predicted results indicated that the performance of the Savonius rotor is highly dependent on the position and angle of the deflector. Thus, there was an appropriate position and angle values to obtain the highest torque and power coefficients. It was concluded that using the favorable airfoil-shaped deflector significantly enhanced the static torque coefficient values in all angular ranges especially in the rotation angles between  $0^\circ$  to  $30^\circ$  and  $150^\circ$  to  $180^\circ$ . By properly covering the returning blade using the airfoil-shaped deflector, the static torque coefficient values increased up to 2 times higher than that generated by without deflector case.

**Discussion and Conclusion:** The Savonius turbine suffers from poor efficiency. Hence, the present work dealt with proposing an improved deflector system led to generate higher power and torque coefficients which resulted in capturing a higher efficiency and better self-starting capability.

**Keywords:** Wind turbine; Airfoil-shaped deflector; Savonius; Computational Fluid Dynamics (CFD).

---

1- PhD Student, Department of Mechanical Engineering, Dashtestan Branch, Islamic Azad University, Borazjan, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Dashtestan Branch, Islamic Azad University, Borazjan, Iran. \* (Corresponding Author)

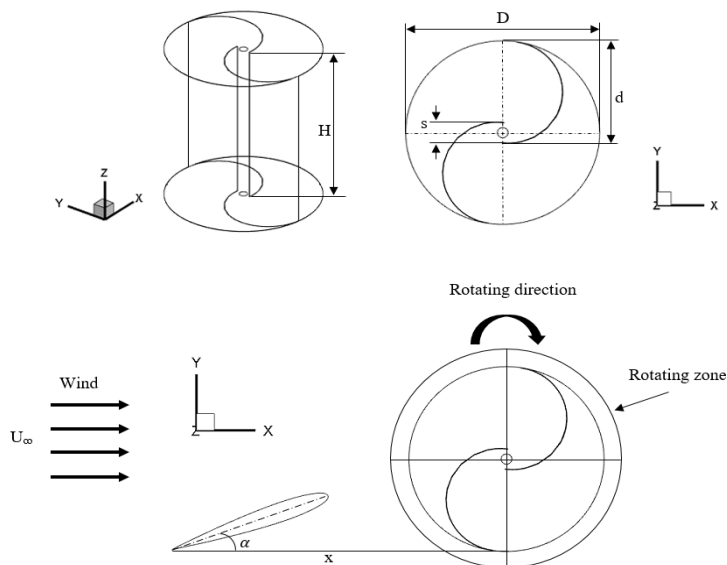
## مقدمه

(۱۵) در سال ۲۰۱۸ از یک مانع جهت افزایش راندمان یک توربین بادی محور قائم با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی پرداختند. آنها دریافتند که مانع یا دفلیکتور می تواند گشتاور منفی را کاهش دهد در حالی که به طور قابل توجهی موجب بهبود کارایی توربین بادی محور قائم می شود. شوکلا و همکاران (۱۶) در سال ۲۰۱۸، عملکرد توربین های بادی محور عمودی را با ایرفویل های مختلف مطالعه کردند. نتایج نشان می دهد که ضرایب گشتاور و ضرایب توان با افزایش نسبت سرعت نوک پره افزایش می یابند و ایرفویل NACA0025 دارای بهترین عملکرد را در نسبت سرعت نوک پره یکسان داشته است. ژانگ و همکارانش (۱۷) در سال ۲۰۲۰، از یک مدل عددی دو بعدی برای بررسی تأثیر کمبر و ضخامت پروفیل پره را بر ضریب توان و عملکرد یک توربین بادی محور قائم بررسی کردند. آنها دریافتند که ایرفویل متقارن عملکرد بهتری نسبت به ایرفویل نامتقارن با همان ضخامت و تحت همان شرایط کاری داشته است. در مطالعه نیمموری و همکاران (۱۸) در سال ۲۰۲۰، بر خلاف مطالعات گذشته از منحرف کننده جریان با فاصله، زاویه و سطح تخلخل مختلف به جای منحرف کننده های رایج استفاده کردند و با تأثیرگذاری بیشتر بر ناحیه ویک ایجاد شده حول پره توربین و کاهش گشتاور معکوس پره برگشتی، راندمان آن را افزایش دادند.

## مدل هندسی

شکل ۱ نمایی دقیق از یک توربین بادی دو پره چرخشی ساوننیوس مرسوم را نشان می دهد. همچنین، مشخصات هندسی توربین ساوننیوس در جدول ۱ آورده شده است. در این مطالعه، از پروفیل ناکا ۰۰۱۲ برای منحرف کننده استفاده شده است. دامنه محاسباتی و شرایط مرزی شبیه سازی عددی مطالعه حاضر در شکل ۲ نشان داده شده است. برای شبیه سازی توربین دوار، دامنه محاسباتی با استفاده از نرم افزار Ansys به دو ناحیه تقسیم شده است.

امروزه کشورهای مختلف جهان برای داشتن رشد اقتصاد پایدار، نیازمند منابع کافی برای تولید پیوسته انرژی هستند؛ اما با توجه به کاهش ناگهانی سوخت های فسیلی به عنوان منابع متعارف انرژی، افزایش قیمت و تأثیر مخرب آن بر محیط زیست، تقاضا برای منابع انرژی پایدار و مطمئن روزبه روز افزایش یافته است. از این رو تلاش برای توسعه منابع انرژی تجدید پذیر و پاک نظیر، انرژی خورشیدی، بادی و ... بسیار ضروری است. در بین تمام منابع تجدیدپذیر، فناوری مرتبط با انرژی بادی، توسعه بسیار یافته است و در حال حاضر، به عنوان یک منبع تولید الکتریسیته در مقیاس بزرگ محسوب میگردد. توربینهای بادی، وظیفه تبدیل انرژی جنبشی موجود در باد به انرژی مکانیکی و در نهایت به الکتریسیته را دارند. تاکنون مطالعات گسترده ای در زمینه تحلیل آیرودینامیک توربین های بادی محور عمودی به صورت عددی با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی و آزمایشگاهی انجام گرفته است (۱-۲). اکنون روش دینامیک سیالات محاسباتی جای خود را در میان روش های آزمایشگاهی و تحلیلی (۳-۶) برای تحلیل مسائل سیالات و انتقال حرارت باز کرده است (۷-۱۰) و استفاده از این روش ها برای انجام تحلیل های مهندسی امری عادی شده است. دینامیک سیالات محاسباتی به صورت گسترده در زمینه های مختلف صنعتی مرتبط با سیالات، انتقال حرارت و انتقال مواد به کمک سیال بکار گرفته می شود. از جمله این موارد می توان به صنایع خودروسازی، صنایع هوافضا، توربوماشین ها، صنایع نفت و گاز و انرژی، انرژی های تجدیدپذیر و بسیاری موارد گسترده صنعتی دیگر اشاره نمود که دانش دینامیک سیالات محاسباتی به عنوان گره گشای مسائل صنعتی مرتبط تبدیل شده است (۱۱-۱۳). گوپتا و همکارانش در سال ۲۰۱۱ با شبیه سازی جریان حول پره های توربین ساوننیوس سه پره با مدل جریان آشفته k-ε به بهترین نسبت هم پوشانی ۱۹/۴۷٪ دست یافتند (۱۴). جین و همکاران



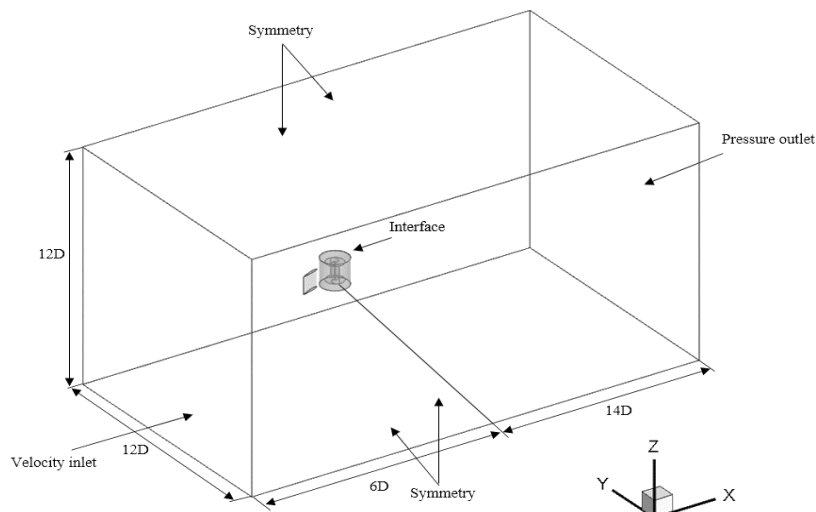
شکل ۱- شماتیک توربین بادی ساوینیوس با/بدون مانع ایرفویل شکل

Figure 1. Schematic of the Savonius wind turbine with/without airfoil-shaped deflector

جدول ۱- مشخصات هندسی توربین بادی ساوینیوس

Table 1. Geometric characteristics of the wind turbine

مقادیر	پارامترها
۰/۵ (متر)	قطر پره (d)
۰/۹۰۹ (متر)	قطر توربین (D)
۲	قطر ناحیه چرخشی ( $D_r/d$ )
۲	قطر شفت ( $D_s/d$ )
۰/۱	ارتفاع توربین ( $H/d$ )
۵۰-۷۰-۹۰ (درجه)	زاویه منحرف کننده ( $\alpha$ )
۰/۲	همپوشانی ( $s/d$ )
۲ ، ۱/۶ ، ۱/۲	فاصله منحرف کننده ( $x/d$ )



شکل ۲- ابعاد دامنه و شرایط مرزی

Figure 2. Domain dimensions and boundary conditions

### روش انجام تحقیق و روش حل عددی

در این مطالعه، از مدل مش لغزشی (SMM) با سرعت چرخشی معین با توجه به ضریب سرعت نوک پره (TSR) استفاده شده است. در این روش، حجم کنترل به دو بخش تقسیم می‌شود. برای این منظور، یک دامنه استوانه‌ای در اطراف توربین در نظر گرفته شده است، که واسط بین نواحی ثابت و چرخشی می‌باشد. هوا به عنوان سیال عامل با چگالی ثابت ( $1.225 \text{ kg/m}^3$ ) و ویسکوزیته ثابت ( $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$ ) در نظر گرفته شده است. مرز ورودی به عنوان ورودی سرعت ( $U_\infty = 7 \text{ m/s}$ ) تعیین گردیده است. همچنین میزان شدت توربولانس ۱٪ در ورودی سرعت در نظر گرفته شده است (۱۹). همچنین، مرز خروجی به عنوان خروجی فشار (فشار اتمسفر) در نظر گرفته شده است. تمام سطوح جانبی متقارن (۲۰) تعریف شده اند تا حل کننده بتواند مرز جانبی را به عنوان یک دیوار لغزشی برشی آزاد فرض کند تا اثرات واقعی دیواره را نشان دهد (۲۱)، در حالی که پره های روتور توربین بادی به عنوان دیوار بدون لغزش در نظر گرفته شده اند. عملکرد روتور ساونیوس توسط ضرایب توان و گشتاور مشخص می‌شود. سرعت چرخش روتور بر اساس ضریب سرعت نوک پره (TSR) تعریف شده که به شکل زیر بیان میگردد (۱۹):

$$\lambda = \frac{R\omega}{U_\infty} \quad (1)$$

که در آن  $R$  شعاع روتور،  $\omega$  سرعت زاویه ای روتور و  $U_\infty$  سرعت ورودی سیال عامل می باشد. ضریب گشتاور ( $C_m$ ) به صورت نسبت گشتاور تولید شده مؤثر به گشتاور موجود تعریف می‌شود. ضریب توان ( $C_p$ ) بیانگر کسری از توان استخراج شده از کل توان جریان هوا است که از طریق ناحیه پیش بینی شده توربین ها در جهت جریان، عبور می کند که مقادیر  $C_p$  و  $C_m$  بدین صورت تعریف می‌گردد:

$$C_m = \frac{M_t}{0.5\rho AU_\infty^2 R} \quad (2)$$

$$C_p = \frac{P_t}{0.5\rho AU_\infty^3} = \lambda C_m \quad (3)$$

که در آن  $\rho$  چگالی هوا و  $A$  ناحیه ای است که توسط توربین جاروب می‌شود. همچنین،  $M_t$  گشتاور و  $P_t$  توان را نشان می‌دهد (۱۹). معادلات ناویر-استوکس متوسط گیری شده رینولدز ناپایا (URANS) همراه با مدل آشفتگی  $k-\omega$  SST به منظور شبیه سازی توربولانس لایه مرزی برای حل میدان جریان هوا در اطراف پره های توربین استفاده شده است. مطالعات گذشته گزارش داده اند که مدل آشفتگی  $k-\omega$  SST مناسب ترین مدل برای شبیه سازی عملکرد توربین بادی به

دلیل داشتن هزینه محاسباتی منطقی بوده است (۲۴-۲۲). بنابراین، معادلات حاکم را می توان به شرح زیر نوشت:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i) = 0 \quad (۴)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} (u_i) + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_j u'_i}) + S_i \quad (۵)$$

همگرایی برای همه معادلات کمتر از  $10^{-6}$  در نظر گرفته شده است. گام زمانی توسط معادله زیر بیان شده است (۲۶):

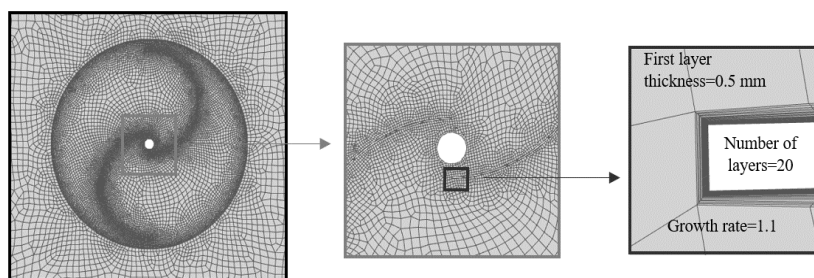
$$\Delta t|_{\theta^\circ} = \frac{\theta}{\omega \frac{180}{\pi}} \quad (۸)$$

که در آن  $\theta$ ، زاویه مرتبط با گام زمانی است.

### استقلال از شبکه

جهت تولید شبکه برای دامنه محاسباتی از نرم افزار Ansys Meshing هم برای ناحیه چرخشی داخلی و هم ناحیه ساکن بیرونی مورد استفاده قرار گرفته است. همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، شبکه ریزتر در ناحیه دوار در مقایسه با شبکه تولید شده در ناحیه ساکن ایجاد شده است. مقدار  $y^+$  در مطالعه حاضر برای محاسبه ارتفاع اولین لایه کمتر از یک انتخاب شده است. بنابراین، انتخاب بهترین اندازه شبکه جهت استخراج نتایج دقیق عددی مورد نیاز می باشد.

که در آن  $(-\rho \overline{u'_j u'_i})$ ، نشان دهنده ترم تنش رینولدز می باشد که توسط مدل آشفتگی SST k- $\omega$  مدل شده است.  $u_i$  نشان دهنده سرعت هوا است، P فشار و  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی هوا می باشد (۲۵). از نرم افزار فلونت برای حل معادلات حاکم بر اساس روش حجم محدود استفاده شده است. از روش بالادست مرتبه دوم جهت گسسته سازی معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی جنبشی توربولانس و اتلاف توربولانس استفاده شده است. همچنین، از الگوریتم سیمپل برای الگوی پیوند فشار-سرعت استفاده شده است و از روش بالادست مرتبه دوم برای بهبود پایداری راه حل ها و بدست آوردن نتایج دقیق استفاده شده است (۲۶). اندازه گام زمانی برای روتور بر اساس چرخش ۱ درجه/زمان ( $1^\circ/\text{step}$ ) از توربین با TSR بدست آمده است. شبیه سازی برای ۱۰ چرخش کامل روتور انجام شده و از ضرایب در چرخه آخر به منظور آنالیز استفاده شده است. برای هر گام زمانی، معیارهای

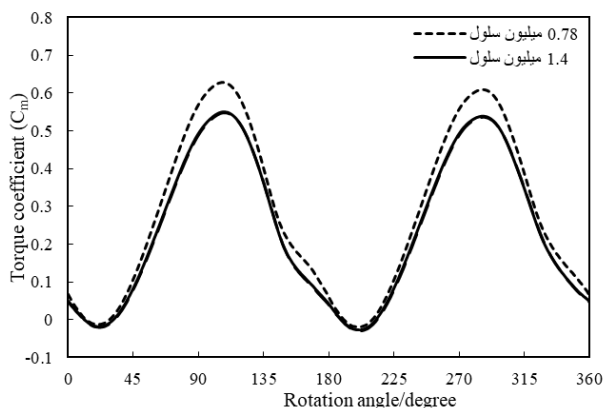


شکل ۳- وضوح شبکه حول پره توربین ساونیوس

Figure 3. Grid details for the computational domain

جزئیات بررسی استقلال از شبکه را ارائه می دهد. با بررسی ضریب توان توربین بادی در یک دور چرخش کامل (۳۶۰ درجه) برای هر قطر، این نتیجه حاصل شد که مقدار  $Dr/d=2$  برای این مطالعه مناسب می باشد.

برای محاسبه گشتاور نسبت به سرعت نوک پره، به ترتیب سه شبکه مختلف با تعداد سلول های ۰،۷۸، ۱/۴ و ۲/۱ میلیون تولید شده است. در نتیجه، شبکه ای با تعداد سلول ۱/۴ میلیون برای به دست آوردن نتایج نسبت به شبکه های دیگر به علت صرفه جویی در زمان محاسبه مناسب بوده است. شکل ۴



شکل ۴- استقلال از شبکه

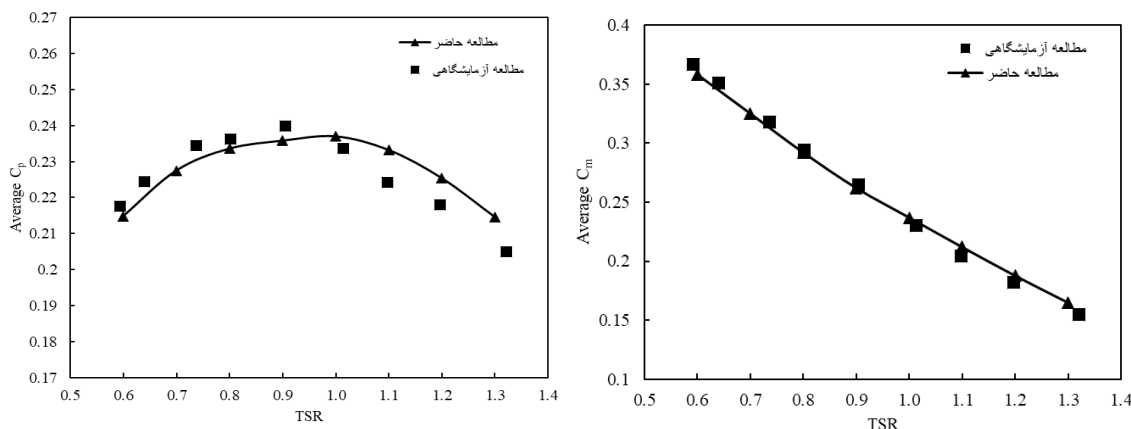
Figure 4. Grid independency study

## صحت سنجی

## نتایج

تجربی داشته و حداکثر خطای بین آنها حدود ۵٪ بوده است. بنابراین، فرایند حل عددی و مدل توربولانسی استفاده شده نتایج را با دقت قابل قبولی پیش بینی کرده است.

در شکل ۵، نتایج محاسباتی میانگین  $C_p$  و  $C_m$  بر حسب TSR حاصل از شبیه سازی CFD در  $Re=4.32 \times 10^5$  با نتایج تجربی موجود شلداهل و همکاران (۲۷) مقایسه شده است. مشاهده می شود که نتایج عددی مطابقت خوبی با نتایج

شکل ۵- نتایج محاسباتی میانگین  $C_p$  و  $C_m$  بر حسب TSR مطالعه حاضر با نتایج تجربی موجود شلداهل و همکاران (۲۷)Figure 5. Comparison of the average  $C_m$  and  $C_p$  in terms of TSR of the present study with the experimental results of Sheldahl et al. (27)

## بحث و نتایج

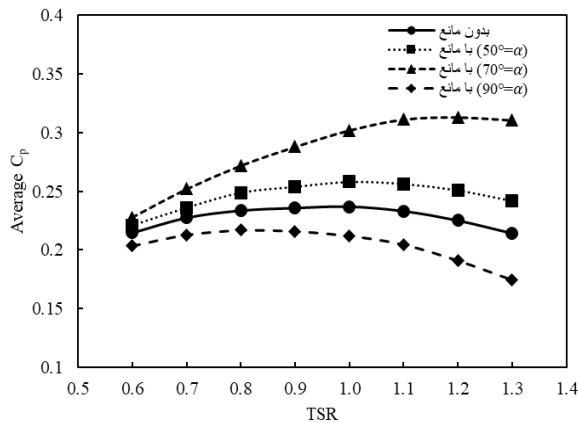
## تأثیر زاویه مانع

سیال به عنوان مانعی در برابر جریانی که به طرف تیغه برگشتی وارد می شود عمل می کند. این امر باعث کاهش گشتاور منفی تیغه برگشتی می شود. میانگین  $C_m$  با افزایش TSR به صورت خطی افزایش می یابد (۲۸). برای تمامی حالت ها، حداکثر مقادیر میانگین  $C_m$  در کمترین  $TSR=0.6$  به دست آمده است. این نتیجه حاصل شد که روتور ساونیوس با مانع

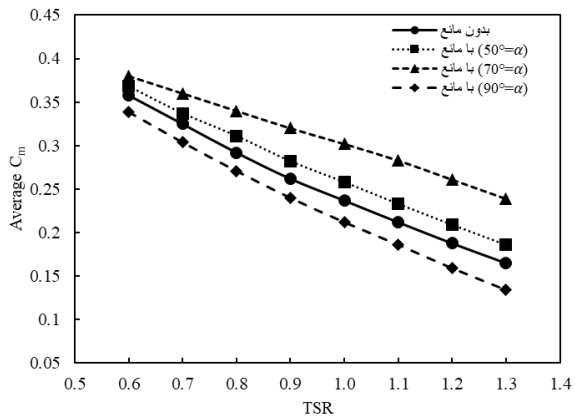
تأثیر زاویه مانع ایرفویل شکل بر روی ضرایب گشتاور و توان با توجه به مقادیر TSR در شکل ۶ نشان داده شده است. سه زاویه مختلف مانع با حالت بدون مانع مقایسه شده است. در این مقایسه، فاصله مانع بدون تغییر بوده ( $x/d=1.2$ ) و فقط زاویه مانع تغییر کرده است. مانع ایرفویل شکل در بالادست جریان



مربوطه به حداکثر  $C_p$  با استفاده از یک مانع مناسب ایرفویل شکل ( $\alpha=70^\circ$ ) به طور چشمگیری از ۱ به ۱/۲ افزایش یافته است. برای این مانع، افزایش مقدار  $C_p$  در TSR های بالاتر بهبود یافته است. حداکثر افزایش  $C_p$  حدود ۵۰٪ در  $TSR = 1.3$  به دست آمده است.



( $\alpha=70^\circ$ ) حداکثر مقادیر میانگین  $C_m$  را در تمامی محدوده  $TSR$  تولید می کند. با افزایش  $TSR$ ، این مقدار تقویت شده است. در حالی که زاویه مانع تا ۹۰ درجه افزایش می یابد، اثر بلوکه شدن به طور قابل توجهی افزایش می یابد که منجر به کاهش مقادیر میانگین  $C_m$  حتی کمتر از حالت بدون مانع می شود. نتایج پیش بینی شده همچنین نشان داد که  $TSR$



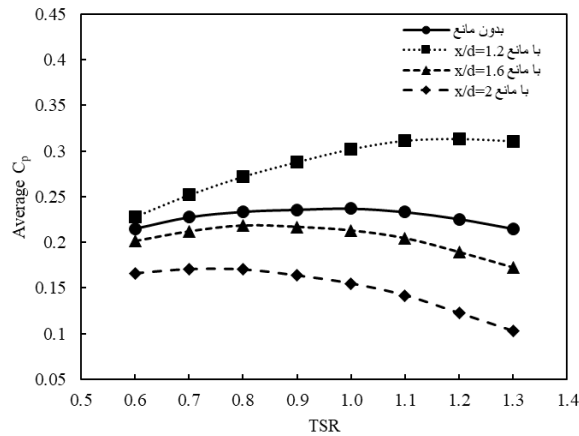
شکل ۶- تأثیر زاویه مانع ایرفویل شکل بر روی ضرایب گشتاور و توان با توجه به مقادیر  $TSR$

Figure 6. The effect of deflector angle on average  $C_m$  and  $C_p$  in terms of  $TSR$

#### تأثیر فاصله مانع

کاهش  $C_p$  می گردد. افزایش فاصله مانع به طور قابل توجهی باعث کاهش میانگین  $C_p$  و  $C_m$  می شود، در حالی که این کاهش با افزایش فاصله ( $x/d$ ) از ۱/۶ به ۲ آشکارتر می شود. بنابراین، مطالعه حاضر نشان می دهد که مشخصه های عملکردی روتور ساونیوس اصلاح شده می تواند به طور چشمگیری با قرار دادن صحیح مانع ایرفویل شکل در بالادست جریان، افزایش یابد.

سه فاصله مانع مختلف با زاویه ۷۰ درجه برای بررسی تأثیر فاصله مانع بر عملکرد توربین بادی ساونیوس در نظر گرفته شده است که در شکل ۷ نشان داده شده است. مانع ایرفویل شکل به عنوان منحرف کننده ای برای جریان ورودی به سمت پره برگشتی عمل می کند. در واقع، این امر موجب افزایش گشتاور خالص تولید شده توسط روتور در تمام  $TSR$  ها شده است. با افزایش فاصله، تأثیر ناحیه ویک تضعیف شده و منجر به



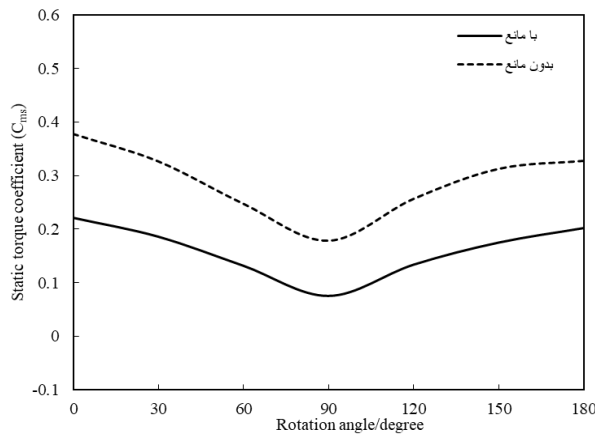
شکل ۷- تأثیر فاصله مانع ایرفویل شکل بر روی ضرایب گشتاور و توان با توجه به مقادیر TSR

Figure 7. The effect of deflector distance on average  $C_m$  and  $C_p$  in terms of TSR

### شروع خودکار توربین

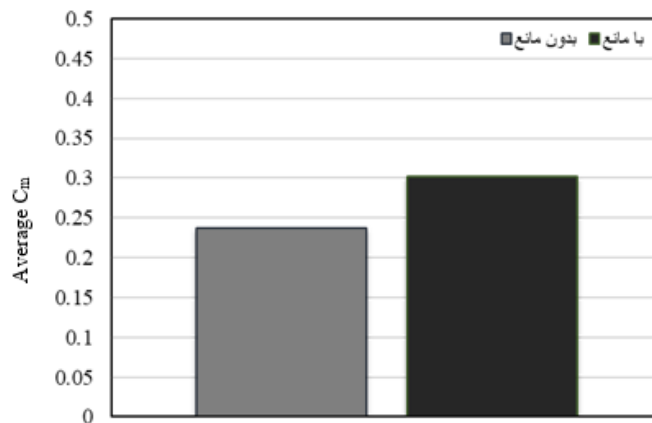
عملکرد توربین در یک چرخش کامل، یک مقایسه گرافیکی میانگین  $C_m$  برای حالت بهبود یافته و توربین استاندارد ساونیوس در  $TSR=1$  در شکل ۹ ارائه شده است. میانگین  $C_m$  توربین ساونیوس با استفاده از یک مانع مناسب ایرفویل شکل ( $\alpha=70^\circ$ ) و ( $x/d=1.2$ )، ۲۷٪ افزایش یافته است.

در شکل ۸ تغییرات ضریب گشتاور استاتیکی ( $C_{ms}$ ) برای حالت بهبود یافته و توربین استاندارد ساونیوس در زوایای چرخشی ثابت برای بررسی توانایی شروع به کار خودکار توربین مقایسه گردیده است. با پوشش صحیح تیغه برگشتی با استفاده از مانع ایرفویل شکل، مقادیر  $C_{ms}$  تا ۲ برابر بیشتر از مقدار تولید شده در حالت بدون مانع افزایش می یابد. پس از توصیف



شکل ۸- مقایسه ضریب گشتاور استاتیکی ( $C_{ms}$ ) برای حالت با و بدون مانع توربین ساونیوس

Figure 8. Comparison of the static torque coefficient ( $C_{ms}$ ) between the Savonius turbine with/without deflector at  $TSR=1$



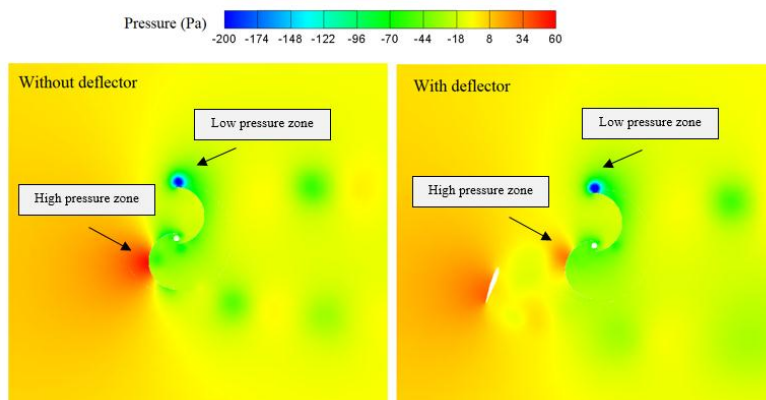
شکل ۹- مقایسه میانگین  $C_m$  برای حالت با و بدون مانع توربین ساونیوس در  $TSR=1$

Figure 9. Comparison of the average torque coefficient ( $C_m$ ) between the Savonius turbine with/without deflector at  $TSR=1$

#### بررسی میدان فشار

سوی دیگر، جریان ورودی هدایت شده به طرف محدب پره برگشتی برخورد نمی کند، که به طور قابل توجهی فشار در این منطقه را کاهش می دهد. در نتیجه، گشتاور منفی با استفاده از یک مانع مناسب ایرفویل شکل در مقایسه با حالت بدون مانع کاهش می یابد. این یک فاکتور مهم در افزایش مقادیر  $C_m$  از پیکربندی پیشنهادی برای توربین ساونیوس بوده است.

کانتورهای فشار اطراف توربین ساونیوس بدون مانع و با مانع ایرفویل شکل ( $\alpha=70^\circ$ ) و در شکل ۱۰ نشان داده شده است. توزیع فشار در اطراف توربین تحت تأثیر مانع قرار گرفته است. جریان ورودی به سمت پره پیشرو توسط مانع هدایت شده است. جریان با مومنتوم بالا در سمت مقعر پره پیشرو باعث افزایش فشار در این ناحیه شده است (۲۸). از



شکل ۱۰- کانتورهای فشار حول روتور ساونیوس با و بدون مانع در  $TSR=1$

Figure 10. Pressure contours around the Savonius rotor with/without deflector at  $TSR=1$

#### نتیجه گیری

شکل در جلوی روتور توربین استفاده گردید تا پره برگشتی را پوشش دهد. شبیه سازی سه بعدی جهت بررسی تأثیر یک مانع ایرفویل شکل بر عملکرد روتور ساونیوس با تغییر موقعیت و زاویه آن با استفاده از روش CFD انجام شده است. نتایج

در مطالعه حاضر با ارائه یک سیستم بهبود دهنده منحرف کننده (مانع) منجر به تولید توان و ضرایب گشتاور بالاتر می شود که در نهایت باعث ایجاد راندمان بالاتر و قابلیت شروع به کار خودکار بهتر می شود. برای این منظور، از یک مانع ایرفویل

حالی که راندمان توربین ساونیوس را به طور چشمگیری بهبود می بخشد. افزایش  $C_p$  در TSR های بالاتر بهبود یافته و حداکثر افزایش  $C_p$  حدود ۵۰٪ در  $TSR=1.3$  به دست آمده است.

عددی به دست آمده با داده های تجربی موجود صحت سنجی شده و تطابق خوبی حاصل گردیده است. به طور کلی می توان دریافت که روتور دارای مانع عملکرد بهتری نسبت به حالت بدون مانع دارد به طوری که وابستگی زیادی به موقعیت و زاویه مانع دارد. مانع می تواند گشتاورهای منفی را کاهش دهد در

#### فهرست علائم

$Re$	عدد رینولدز [-]	$\theta$	زاویه مربوط به گام زمانی [°]
$L$	فاصله دفلکتور [m]	$H$	ارتفاع توربین [m]
$y^+$	فاصله دیوار بدون بعد [-]	$P_r$	توان [W]
$P$	فشار [Pa]	$\rho$	چگالی هوا [kg/m <sup>3</sup> ]
$d$	قطر پره ها [m]	$\alpha$	زاویه دفلکتور [°]
$D$	قطر توربین [m]	$U_{\square}$	سرعت باد [m/s]
$\Delta t$	گام زمانی [s]	$\omega$	سرعت زاویه ای روتور [rad/s]
$M_r$	گشتاور [Nm]	$C_p$	ضریب توان [-]
$A$	مساحت جاروب شده بوسیله توربین [m <sup>2</sup> ]	$\lambda$	ضریب سرعت نوک پره [-]
$s$	هم پوشانی [s]	$C_m$	ضریب گشتاور [-]
$\mu$	ویسکوزیته دینامیکی هوا [kg/ms]	$C_{ms}$	ضریب گشتاور استاتیک [-]

- F, Behrouzi., M, Nakisa., A, Maimun., Y, Ahmed., A.S, Souf-Aljen., 2019. Performance investigation of self-adjusting blades turbine through experimental study. Energy Conversion and Management, vol. 181, pp. 178-188.
- S.B, Ahangar., V, Konduru., J.S, Allen., N, Miljkovic., S.H, Lee, C.K, Choi., 2020. Development of automated angle-scanning, high-speed surface plasmon resonance imaging and SPRi visualization for the study of dropwise condensation. Experiments in Fluids, vol. 61, pp. 12-20.
- S.B, Ahangar., C.H, Jeong., F, Long., J.S, Allen, S.H, Lee., C.K, Choi., 2020. The Effect of Adsorbed Volatile Organic Compounds on an Ultrathin

#### Reference

- L.B, Kothe., S.V, Möller., A.P, Petry., 2020. Numerical and experimental study of a helical Savonius wind turbine and a comparison with a two-stage Savonius turbine. Renewable Energy, vol. 148, pp. 627-638.
- A.S, Saad., I.I, El-Sharkawy., S, Ookawara, M, Ahmed., 2020. Performance enhancement of twisted-bladed Savonius vertical axis wind turbines. Energy Conversion and Management, vol. 209, pp. 112673.
- S.B, Ahangar., J.S, Allen., S.H, Lee., C.K, Choi., 2020. Surface Plasmon Resonance Imaging: A Technique to Reveal the Dropwise Condensation Mechanism. Journal of Heat Transfer, vol. 142, pp. 030903.

13. B.K, Sreejith., A, Sathyabhama., 2020. Experimental and numerical study of laminar separation bubble formation on low Reynolds number airfoil with leading-edge tubercles. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 42, pp. 1-15.
14. R, Gupta., K.K, Sharma., 2011. Flow physics of a three-bucket Savonius rotor using computational fluid dynamics (CFD). *International Journal of research in Mechanical engineering and technology*, vol. 1, pp. 46-51.
15. X, Jin., Y, Wang., W, Ju., J, He., S, Xie., 2018. Investigation into parameter influence of upstream deflector on vertical axis wind turbines output power via three-dimensional CFD simulation. *Renewable energy*, vol. 115, pp. 41-53.
16. D.L, Shukla., A.U, Mehta., K.V, Modi., 2020 Dynamic overset 2D CFD numerical simulation of a small vertical axis wind turbine. *International Journal of Ambient Energy*, vol. 41, pp. 1415-1422.
17. T, Zhang., Z, Wang., W, Huang., D, Ingham., L, Ma., M, Pourkashanian., 2020. A numerical study on choosing the best configuration of the blade for vertical axis wind turbines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 201, pp. 104162.
18. M.E, Nimvari, H, Fatahian., E, Fatahian., 2020. Performance improvement of a Savonius vertical axis wind turbine using a porous deflector. *Energy Conversion and Management*, vol. 220, pp. 113062.
19. M, Mosbahi., A, Ayadi., Y, Chouaibi., Z, Driss., T, Tucciarelli., 2019. Performance study of a Helical Water Film Measurement. *Applied Sciences*, vol. 10, pp. 5981.
7. R, Ricci., R, Romagnoli., S, Montelpare., D, Vitali., 2016. Experimental study on a Savonius wind rotor for street lighting systems. *Applied Energy*, vol.161, pp. 143-152.
8. S, Bayani., Y, Tabe., Y.T, Kang., S.H, Lee, C.K, Choi., 2018. Surface plasmon resonance imaging of drop coalescence at high-temporal resolution. *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, vol, 25, pp. 191-205.
9. M, Rahim-Esbo., S, Bayani, R, Mohammadyari., A.K, Asboei., S, Mohsenian., S.E, Mousavitileboni., 2014. <b> Analytical and Numerical investigation of natural convection in a heated cylinder using Homotopy Perturbation Method. *Acta Scientiarum. Technology*, vol. 36, pp. 669-677.
10. N.M, Nouri., S, Sekhavat., S, Bayani Ahangar., N, Faal Nazari., 2012. Effect of curing condition on superhydrophobic surface for 7075Al. *Journal of dispersion science and technology*, vol. 33, pp. 771-774.
11. G, Ferrari., D, Federici., P, Schito., F, Inzoli., R, Mereu., 2017. CFD study of Savonius wind turbine: 3D model validation and parametric analysis. *Renewable Energy*, vol, 105, pp. 722-734.
12. H, Ijaz., H, Raza., G.A, Gohar., S, Ullah., A, Akhtar., M, Imran., 2020. Effect of graphene oxide doped nano coolant on temperature drop across the tube length and effectiveness of car radiator–A CFD study. *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 20, pp. 100689.

24. H, Fatahian., H, Salarian., J, Khaleghinia., E, Fatahian., 2018. Improving the efficiency of a Savonius vertical axis wind turbine using an optimum parameter. *Computational Research Progress in Applied Science & Engineering (CRPASE)*, vol. 4, pp. 27-32.
25. F.R, Menter., 1994. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, vol. 32, pp. 1598-1605.
26. P.K, Talukdar., A, Sardar., V, Kulkarni., U.K, Saha., 2018. Parametric analysis of model Savonius hydrokinetic turbines through experimental and computational investigations. *Energy Conversion and Management*, vol. 158, pp. 36-49.
27. R.E, Sheldahl., B.F, Blackwell., L.V, Feltz., 1978. Wind tunnel performance data for two-and three-bucket Savonius rotors. *Journal of Energy*, vol. 2, pp. 160-164.
28. E, Kerikous., D. Thévenin., 2019. Optimal shape of thick blades for a hydraulic Savonius turbine. *Renewable Energy*, vol. 134, pp. 629-638.
- Savonius hydrokinetic turbine with a new deflector system design. *Energy Conversion and Management*, vol. 194, pp. 55-74.
20. M.S, Siddiqui., N, Durrani., I, Akhtar., 2015. Quantification of the effects of geometric approximations on the performance of a vertical axis wind turbine. *Renewable Energy*, vol. 74, pp. 661-670.
21. R, Lanzafame., S, Mauro., M, Messina., 2013. Wind turbine CFD modeling using a correlation-based transitional model. *Renewable Energy*, vol. 52, pp. 31-39.
22. I, Marinic-Kragic., D, Vucina, Z, Milas., 2020. Computational analysis of Savonius wind turbine modifications including novel scooplet-based design attained via smart numerical optimization. *Journal of Cleaner Production*, vol. 262, p. 121310.
23. P, Laws., J.S, Saini., A, Kumar., S, Mitra., 2020. Improvement in Savonius Wind Turbines Efficiency by Modification of Blade Designs—A Numerical Study. *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 142, p. 061303.