



## بررسی عددی نقش میله مجهز به پره مورب جداکننده جریان بر عملکرد توربین ساوونیوس

سید رسول حسینی<sup>۱</sup>، محمد جواد مغربی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

\* مشهد، ۹۱۷۷۵-۱۱۱۱، [mjmaghrebi@um.ac.ir](mailto:mjmaghrebi@um.ac.ir)

### چکیده

یکی از مهم‌ترین منابع انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد می‌باشد. به کمک توربین‌های بادی می‌توان از انرژی جنبشی باد بهره برد. از مشکلات اساسی توربین بادی ساوونیوس، بازدهی پایین آن به دلیل برخورد مستقیم باد به پره بازگشتی توربین و اعمال گشتاور منفی به آن می‌باشد. یکی از روش‌های جدید و ارزان جهت افزایش راندمان این توربین‌ها، استفاده از مانع منحرف‌کننده در بالادست جریان جهت جلوگیری از برخورد باد به پره بازگشتی توربین و تولید گشتاور منفی است. به دلیل نوع هندسه مانع استوانه‌ای شکل، توانایی هدایت جریان تحت زاویه دلخواه وجود ندارد. همچنین ناحیه گردابه‌ای نسبتاً بزرگی در پایین دست مانع و در نزدیکی توربین تشکیل خواهد شد که موجب اثرات نامطلوب بر عملکرد توربین می‌شود. با نصب پره‌های جداکننده جریان می‌توان این گردابه‌ها را کنترل کرد. در این تحقیق با استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی، در یک شبیه‌سازی دوبعدی به کمک نرم‌افزار انسیس فلوئنت، ابتدا مانع استوانه‌ای شکل بدون صفحات جداکننده جریان طراحی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی آن با نتایج تجربی پژوهش‌های پیشین اعتبارسنجی گردید. سپس به‌عنوان نوآوری، صفحه جداکننده تحت یک زاویه مطلوب نصب و جریان به سمت پره پیش‌رونده توربین هدایت شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از مانع منحرف‌کننده با پره‌های جداکننده جریان تحت زاویه ۵ درجه، موجب افزایش ۲۳.۴ درصدی ضریب توان توربین نسبت به حالت بدون مانع آن در نسبت سرعت نوک ۰.۶ می‌شود.

**کلیدواژه‌گان:** توربین بادی، منحرف‌کننده، توربین ساوونیوس، انرژی باد، ضریب توان

## Numerical investigation on role of a circular deflector with diagonal splitter blades on performance of savonius turbine

Seyed Rasoul Hosseini<sup>1</sup>, Mohammad Javad Maghrebi<sup>2\*</sup>

1-MSc student, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2-Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

\* P.O.B. 91775-1111, Mashhad, Iran, [mjmaghrebi@um.ac.ir](mailto:mjmaghrebi@um.ac.ir)

Received: 10 June 2023 Accepted: 19 August 2024

### Abstract

One of the most important sources of renewable energy is wind energy. We can harness the kinetic energy of the wind by using wind turbines. One of the fundamental problems with Savonius wind turbines is their low efficiency due to direct wind impact on the returning blade and applying negative torque to it. One new and cost-effective method to increase the efficiency of these turbines is to use a deflector upstream of the flow to prevent wind from hitting the returning blade and producing negative torque. Due to the cylindrical geometry of the deflector, it cannot guide the flow at an arbitrary angle. Additionally, a relatively large vortex region will form downstream of the deflector and near the turbine, which will have undesirable effects on turbine performance. These vortices can be controlled by installing flow splitter blades on the deflector. This study used computational fluid dynamics techniques in a two-dimensional simulation with Ansys Fluent software. Initially, a cylindrical deflector without flow splitter blades was designed and its simulation results were validated with previous experimental research. Then, as an innovation, a splitter blade was installed at a desired angle and directed flow towards the advancing blade of the turbine. The simulation results show that using a deflector with splitter blades at an angle of 5 degrees increases the turbine power coefficient by 23.4% compared to its state without a deflector at a tip speed ratio of 0.6.

**Keywords:** Wind turbine, Deflector, Savonius wind turbine, Wind energy, Power coefficient



## ۱- مقدمه

التان و همکارانش [۱۵] یک منحرف کننده جدید جهت قرارگیری بین دو توربین ساونبوس طراحی کردند. این شبیه سازی که در سال ۲۰۲۲ صورت گرفت، نشان داد ضریب توان توربین به میزان ۳۰ درصد می تواند افزایش یابد. فاتحیان و همکاران [۱۶] یک مانع استوانه ای به همراه صفحه جداکننده جریان طراحی کردند. شبیه سازی آنها در سال ۲۰۲۲ نشان داد این مانع توانایی کنترل گردابه های تشکیل شده در پشت توربین را دارد و ضریب توان توربین را به میزان ۱۵ درصد در نسبت سرعت ۰.۶ افزایش می دهد.

جدول ۱ بررسی پژوهش های پیشین

نویسندگان	شیوه پژوهش	تأثیر افزودن مانع بر ضریب توان
محمد و همکاران [۹]	عددی	۲۷ درصد افزایش با نصب صفحه
ستیوان و همکاران [۱۰]	عددی	۳۱.۱۷ درصد افزایش با نصب میله
نیموری و همکاران [۱۱]	عددی	۱۰ درصد افزایش با نصب صفحه
لایقمند و همکاران [۱۲]	عددی	بهبود به کمک مانع ایرفویل شکل
یوانو و همکاران [۱۳]	تجربی	۱۲.۲ درصد افزایش با نصب میله
تیان و همکاران [۱۴]	عددی	۲۵ درصد افزایش با نصب صفحه
التان و همکاران [۱۵]	عددی	۳۰ درصد افزایش با نصب مانع جدید
فاتحیان و همکاران [۱۶]	عددی	بهبود به کمک میله مجهز به پره

باتوجه به مطالعات فوق، اثر افزودن مانع بر عملکرد توربین ساونبوس مثبت ارزیابی می شود. یکی از موانع رایج جهت قرار دهی مقابل توربین ساونبوس، مانع استوانه ای شکل است. مانع استوانه ای شکل (میله) به علت نوع هندسه آن توانایی هدایت جریان را در جهت دلخواه ندارد. همچنین وجود این مانع سبب تشکیل ناحیه گردابه ای نسبتاً بزرگی در نزدیکی توربین می شود که موجب اثرات نامطلوبی بر عملکرد توربین خواهد شد. در این تحقیق با استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی، طی یک شبیه سازی دوبعدی در نرم افزار انسیس فلونت<sup>۴</sup>، ابتدا مانعی به همراه پره های جداکننده افقی طراحی و گردابه های تشکیل شده در نزدیکی توربین کنترل گردید. سپس به عنوان نوآوری، با تعیین ضخامت و یک زاویه مناسب جهت نصب پره جداکننده جریان، اثر افزودن مانع را بر عملکرد توربین تاحدامکان توسعه<sup>۵</sup> یافت.

## ۲- مروری بر روابط و معادلات حاکم

در این قسمت به بررسی روابط حاکم بر جریان تراکم ناپذیر نیوتنی، به عنوان روابط حاکم بر شبیه سازی پرداخته خواهد شد. باتوجه به فرضیات این تحقیق (تراکم ناپذیر بودن جریان، جریان دوبعدی و لزج) می توان ساده سازی هایی را بر روی این روابط اعمال کرد.

## ۲-۱- معادله پیوستگی

این رابطه که به معادله بقای جرم نیز معروف است مطابق معادله (۱) معرفی می گردد:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

با توجه به افزایش آلودگی های محیط زیستی، افزایش تقاضا برای انرژی و از طرفی معضلات سوخت های فسیلی، استخراج انرژی از منابع تجدیدپذیر را امری ضروری می سازد [۱]. شیوع ویروس کرونا و قرنطینه های ناشی از آن، سبب کاهش مصرف جهانی انرژی و البته به تعویق افتادن بسیاری از پروژه های تجدیدپذیر جدید گردید [۲]. به کمک توربین های بادی می توان از انرژی جنبشی باد بهره برد. این توربین ها بر اساس وضعیت محور دوران با سطح زمین به دو دسته توربین محور عمودی و محور افقی تقسیم می شوند و هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند [۳]. برای نخستین بار در سال ۱۸۸۷ یک مهندس اسکاتلندی به نام جیمز بلایت<sup>۱</sup> موفق به تولید الکتروسیسته از باد گردید [۴]. امروزه توربین های بادی محور عمودی به دلایل مختلفی همچون سادگی طراحی، هزینه ساخت پایین و مهم تر از همه عدم وابستگی به جهت جریان باد، مورد توجه قرار گرفته اند. این ویژگی ها سبب شده بتوان از توربین های محور عمودی در بالای پشت بام منازل، بزرگراه ها [۵] و سایر مناطق استفاده کرد. در یکی از انواع این توربین ها، توربین بادی ساونبوس می باشد. این توربین از دو پره نیمه استوانه ای (یا بیضوی) تشکیل شده است که علاوه بر مزیت های توربین بادی های محور عمود، توانایی شروع به کار در سرعت های پایین باد را نیز داراست [۶]. همین قابلیت خودراه اندازی توربین ساونبوس سبب ترکیب آن با سایر نمونه های توربین محور عمود گردیده است [۷].

یکی از مشکلات اساسی توربین ساونبوس، بازدهی پایین آن می باشد که یکی از علل آن، برخورد جریان باد به پره برگشتی توربین و تولید گشتاور منفی می باشد. از روش های جدید جهت افزایش بازدهی توربین ساونبوس، استفاده از مانع منحرف کننده در بالادست جریان می باشد که از برخورد مستقیم جریان باد به پره برگشتی توربین و ایجاد گشتاور منفی جلوگیری می نماید [۸].

## ۱-۱- بررسی پژوهش های پیشین

محمد و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۰ طی یک شبیه سازی به صورت عددی، با نصب صفحه ای در مقابل توربین ساونبوس، توانستند ضریب توان توربین را بیش از ۲۷ درصد افزایش دهند. ستیوان و همکاران [۱۰] طی یک شبیه سازی عددی در سال ۲۰۱۹، ضریب توان توربین ساونبوس را با نصب یک میله منحرف کننده در سمت بالادست جریان، به میزان ۳۱.۱۷ درصد بهبود بخشیدند. نیموری و همکارانش [۱۱] در سال ۲۰۲۰، اثر قرار دادن یک صفحه متخلخل در مقابل پره برگشتی توربین ساونبوس را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد در نسبت سرعت نوک (TSR<sup>۲</sup>) برابر با ۱، ضریب توان توربین ۱۰ درصد بهبود پیدا کرده است. در سال ۲۰۲۰، لایقمند و همکارانش [۱۲] از یک مانع ایرفویل<sup>۳</sup> شکل جهت منحرف سازی جریان باد استفاده کرده و حدود ۵۰ درصد ضریب توان توربین ساونبوس را در TSR برابر با ۱.۳ افزایش دادند. یوانو و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۲۰، طی یک مطالعه تجربی در آزمایشگاه به بررسی اثر قرارگیری میله منحرف کننده جریان در مقابل توربین ساونبوس پرداختند و توانستند بازدهی توربین را به میزان ۱۲.۲ درصد افزایش دهند. تیان و همکارانش [۱۴] در سال ۲۰۲۲، به کمک شبیه سازی عددی توانستند از طریق قراردادی یک صفحه منحرف کننده با فاصله مناسب در مسیر برخورد جریان به پره برگشتی توربین، ۲۵ درصد بازدهی آن را افزایش دهند.

1. James Blyth  
2. Tip Speed Ratio  
3. Airfoil

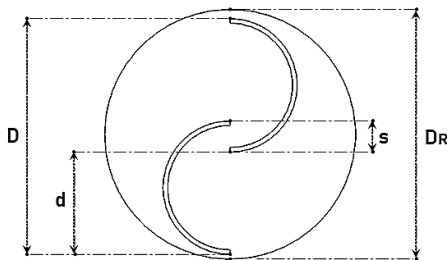
این پژوهش با استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی، در یک شبیه‌سازی دوبعدی به کمک نرم‌افزار انسیس فلونت و به‌صورت ناپایا انجام خواهد شد. در تمامی شبیه‌سازی‌ها به علت عدد ماخ<sup>۲</sup> کمتر از ۰.۳، از اثرات تراکم پذیری صرف نظر گردیده و توربین به صورت یک جسم صلب در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است از روش مش لغزشی برای شبیه‌سازی روتور توربین و ناحیه غیردوار استفاده خواهد شد که به کاربر امکان شبیه‌سازی دو ناحیه با حرکت نسبت به یکدیگر را می‌دهد و نتایج حاصل از آن نیز دارای دقت مناسبی می‌باشد. در این روش دامنه محاسباتی به دو قسمت چرخان و غیرچرخان تبدیل می‌شود که از نظر هندسی از هم جدا شده‌اند اما از نظر عددی با هم ارتباط دارند (شرط مرزی رابط<sup>۲</sup>) و در هر مرحله زمانی، گره‌های شبکه ناحیه چرخان جابه‌جا می‌شود تا هندسه و تغییرات مکان را در خود جای دهد. قسمت چرخان با سرعت زاویه‌ای بدست آمده از معادله (۸) دوران می‌کند که مقدار آن در هر  $\lambda$  قابل محاسبه است.

از الگوریتم سیمپل<sup>۴</sup> جهت پیوند بین ترم‌های فشار و سرعت استفاده گردید. جهت افزایش دقت حل از روش بالادست مرتبه دوم برای گسسته‌سازی معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی جنبشی آشفتگی و اتلاف آشفتگی استفاده شده است. لازم به ذکر است معیار همگرایی در هر گام زمانی نیز برای تمام معادلات، کمتر از  $10^{-6}$  در نظر گرفته شده است. جهت استخراج میزان ضریب توان توربین پس از اتمام شبیه‌سازی، میانگین ضریب گشتاور توربین در دور آخر دوران آن توسط نرم‌افزار محاسبه شده و در هر  $\lambda$ ، میزان ضریب توان از طریق معادله (۶) مشخص خواهد شد.

### ۳-۱- مشخصات هندسی توربین و دامنه محاسباتی

در جدول ۲ مشخصات هندسی توربین ساونوس مورد استفاده در شبیه‌سازی درج شده است. این مقادیر در تمامی شبیه‌سازی‌ها تا انتها ثابت باقی خواهند ماند و تغییرات تنها بر روی منحرف‌کننده صورت خواهد پذیرفت.

پارامترها	مقادیر
قطر پره (d)	۰.۵ متر
قطر توربین (D)	۰.۹۰۹ متر
ارتفاع توربین (h)	۱ متر
قطر ناحیه دوار (D <sub>R</sub> /D)	۱.۱
هم‌پوشانی (s/D)	۰.۱
ضخامت پره‌ها (t/D)	۰.۰۱۱



از طرفین معادله فوق متوسط زمانی گرفته و با توجه به فرض تراکم‌ناپذیری جریان به فرم معادله (۲) تبدیل گردید [۱۷]:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

### ۲-۲- معادله مومنتوم

معادله مومنتوم حاکم بر جریان سیال لزج نیوتونی که به معادلات ناویر-استوکس معروف است، با توجه به ثابت بودن لزجت سیال و تراکم‌ناپذیری بودن جریان، به معادله (۳) تبدیل خواهد شد:

$$\rho \frac{DV_i}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i + \mu \nabla^2 V_i \quad (3)$$

که  $\mu$  لزجت سیال،  $\rho$  چگالی سیال،  $P$  بیانگر ترم فشار،  $g$  بردار شتاب گرانش و  $V$  نشان‌دهنده بردار سرعت است. این معادله قابل بسط‌دادن در سه جهت  $x$ ،  $y$  و  $z$  می‌باشد. مطابق روشی که در معادله پیوستگی استفاده شد، در این قسمت از معادله (۳) متوسط زمانی گرفته می‌شود و با ساده‌سازی، معادله مومنتوم به صورت معادله (۴) به دست می‌آید:

$$\rho \left[ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \bar{\rho} \bar{g}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho \bar{u}_i \bar{u}_j} \right] \quad (4)$$

که  $\bar{u}$  نشان‌دهنده سرعت نوسانی،  $\bar{t}$  سرعت متوسط و ترم لحظه‌ای  $\overline{\rho \bar{u}_i \bar{u}_j}$  بیانگر تنش آشفتگی یا تنش رینولدز می‌باشد [۱۸]. معادله (۲) و معادله (۴)، معادلات میانگین‌گیری‌شده رینولدز (RANS<sup>۱</sup>) نامیده می‌شود.

جهت انجام این شبیه‌سازی از مدل آشفتگی K- $\omega$  SST به علت اهمیت بالای نواحی نزدیک دیواره و لایه مرزی استفاده گردید. از این مدل آشفتگی در شبیه‌سازی‌هایی نظیر توربین‌های بادی و آبی، شبیه‌سازی جریان اطراف ایرفویل‌ها و ... استفاده می‌گردد. ضریب توان یک پارامتر اساسی در عملکرد توربین بادی شمرده می‌شود که بیانگر نسبت توان تولید شده توسط توربین به کل توان باد عبوری از توربین بادی می‌باشد و مطابق معادله (۵) معرفی می‌گردد [۱۹]:

$$C_P = \frac{P}{\left(\frac{1}{2}\right) \rho A V^3} \quad (5)$$

$$C_m = \frac{C_P}{\lambda} \quad (6)$$

$C_P$  بیانگر ضریب توان و  $C_m$  ضریب گشتاور توربین بادی می‌باشد که پارامتر مهم دیگری در عملکرد توربین بادی است.  $P$  توان خروجی توربین،  $\rho$  چگالی سیال،  $A$  مساحت جاروب شده توسط توربین و  $\lambda$  نسبت سرعت نوک پره است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

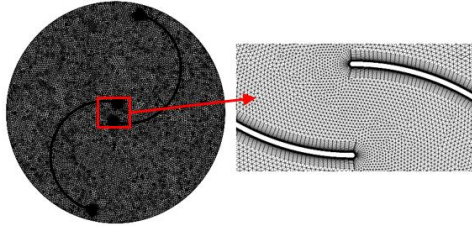
$$A = H \times D \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{R \times \omega}{V_\infty} \quad (8)$$

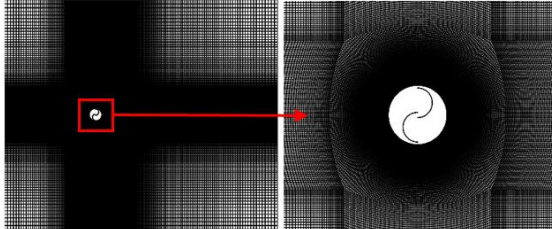
که  $\omega$  سرعت زاویه‌ای روتور و  $R$  شعاع آن می‌باشد.  $H$  بیانگر ارتفاع پره و  $D$  قطر روتور توربین است. همچنین  $V_\infty$  نشان‌دهنده سرعت آزاد سیال می‌باشد.

### ۳- نحوه شبیه‌سازی عددی با نرم افزار

شکل ۱ مشخصات هندسی توربین



شکل ۹ نحوه شبکه بندی ناحیه دوار



شکل ۱۰ نحوه شبکه بندی ناحیه غیر چرخان

### ۳-۲- استقلال از شبکه، گام زمانی و اعتبارسنجی

جهت بررسی عدم وابستگی نتایج به شبکه، در نسبت سرعت ۱ مقادیر ضریب گشتاور در سه نمونه مختلف شبکه بندی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در جدول ۲ پارامترهای مختلف هر کدام از شبکه بندی ها مشخص می باشد.

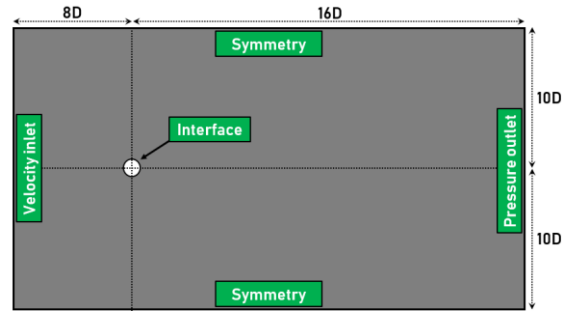
جدول ۳ بررسی استقلال از شبکه

پارامترها	شبکه درشت	شبکه متوسط	شبکه ریز
تعداد سلول ناحیه دوار	۴۲۲۲۱	۶۰۲۴۰	۸۸۷۳۸
تعداد سلول ناحیه غیر دوار	۲۵۱۶۰۰	۵۰۳۰۰۰	۸۵۹۶۵۰
تعداد ردیف های لایه مرزی	۱۰	۲۰	۲۵
نرخ رشد لایه مرزی	۱.۱	۱.۰۷۵	۱.۰۷۵
ارتفاع اولین لایه مرزی	۰.۰۰۰۰۴ متر	۰.۰۰۰۰۱ متر	۰.۰۰۰۰۰۵ متر
مقدار کمیت $y^+$	۴.۱	۰.۸۹	۰.۶۱

در شکل ۱۱، مقدار ضریب گشتاور توربین در ۱۰ دور دوران آن مشخص شده است. نتایج نشان می دهد از دور پنجم دوران توربین به بعد، حل همگرا شده است و تغییرات ضریب گشتاور هر دور نسبت به دور قبل آن ناچیز می باشد. جهت اطمینان بیشتر و دقت بالاتر، از نتایج دور دهم دوران توربین جهت محاسبه ضریب گشتاور متوسط و ضریب توان استفاده می گردد. پس از بررسی همگرایی حل، نمودار ضریب گشتاور در دور دهم توربین را برای هر نمونه شبکه استخراج و به کمک آن استقلال از شبکه بررسی می شود. باتوجه به شکل ۱۲، نمودار ضریب گشتاور توربین در شبکه بندی ریز و شبکه متوسط با دقت مناسبی بر هم منطبق است؛ لذا جهت کاهش هزینه محاسباتی و افزایش سرعت شبیه سازی، شبکه بندی با اندازه سلول متوسط انتخاب می گردد.

پس از بررسی استقلال از شبکه، استقلال از گام زمانی بررسی شد. در  $\theta$  (گام زمانی متناسب با چرخش توربین) ۰.۵، ۱ و ۲ درجه، نمودار ضریب گشتاور توربین برای نسبت سرعت نوک پره ۱، در دور دهم چرخش استخراج گردید. مطابق با شکل ۱۳، در  $\theta$  برابر با ۰.۵ و ۱ درجه نتایج با دقت مناسبی

دامنه محاسباتی مطابق شکل ۸ در اطراف توربین طراحی شده است. ابعاد دامنه به گونه ای در نظر گرفته شده است که مرزها تاثیری بر روی نتایج پژوهش نداشته باشد. در ورودی از شرط مرزی سرعت، در خروجی از شرط مرزی فشار که برابر با فشار اتمسفر می باشد قرار داده شده است. در سمت بالا و پایین دامنه از شرط مرزی متقارن استفاده شد. هم چنین در مرز بین ناحیه چرخان و غیر چرخان از شرط مرزی رابط استفاده گردید.



شکل ۸ ابعاد دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

سرعت هوای ورودی برابر با ۷ متر بر ثانیه معادل با رینولدز  $4.32 \times 10^5$  در نظر گرفته شده است. چگالی هوا برابر با  $1.225 \frac{kg}{m^3}$  و لزجت آن برابر با  $1.8 \times 10^{-4} \frac{kg}{m \cdot s}$  در  $1.7894 \times 10^5$  در نظر گرفته شده است. اندازه گام زمانی (TSS) و تعداد آن (NTS) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$TSS = \frac{\theta}{\frac{180}{\pi} \times \omega} \quad (9)$$

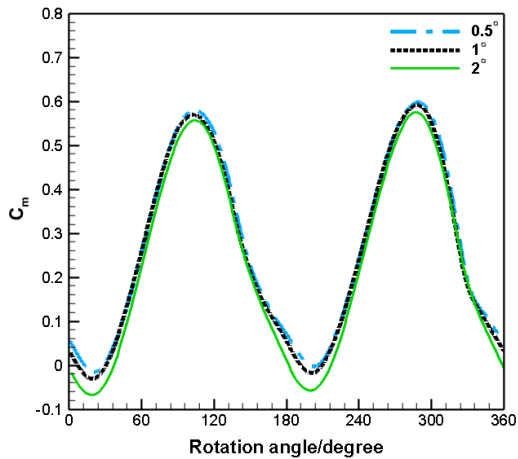
$$NTS = N \times \frac{360}{\theta} \quad (10)$$

که  $\omega$  سرعت زاویه ای روتور،  $\theta$  زاویه پیشروی (گام زمانی متناسب با چرخش توربین) و  $N$  تعداد دور چرخش توربین می باشد. تعداد تکرار در هر گام زمانی برابر با ۲۰ در نظر گرفته شده است.

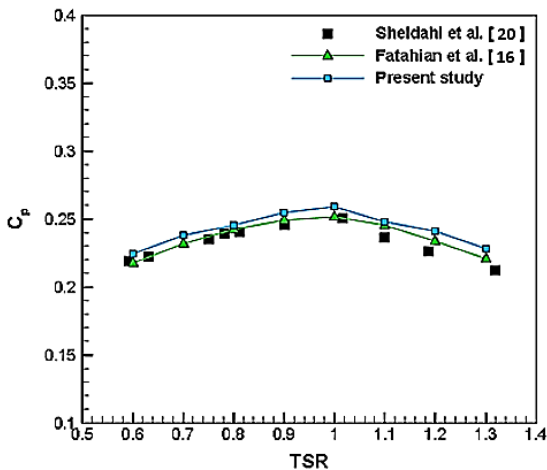
### ۳-۲- نحوه شبکه بندی

در این شبیه سازی دو ناحیه چرخان و غیر چرخان وجود دارد. همان طور که قبلاً گفته شد، از روش مش لغزشی جهت شبیه سازی ناحیه چرخان استفاده خواهد شد. شبکه بندی در نرم افزار شبکه بندی انسیس صورت گرفته است. یک معیار مناسب جهت بررسی کیفیت شبکه در نواحی بسیار نزدیک به پرها و در زیر لایه لزج، کمیت بی بعد  $y^+$  است. باتوجه به انتخاب مدل آشفتگی SST  $k-\omega$ ، میزان  $y^+$  بایستی کوچک تر از ۱ باشد.

نحوه شبکه بندی ناحیه چرخان در شکل ۹ و ناحیه غیر چرخان در شکل ۱۰ مشخص است. در ناحیه چرخان از شبکه بی سازمان و در ناحیه غیر چرخان از شبکه سازمان یافته استفاده شده است. در مرز بین دو ناحیه، اندازه المان های مجاور دو ناحیه، نزدیک به یکدیگر در نظر گرفته شده است تا شبیه سازی با دقت مناسب صورت گیرد.



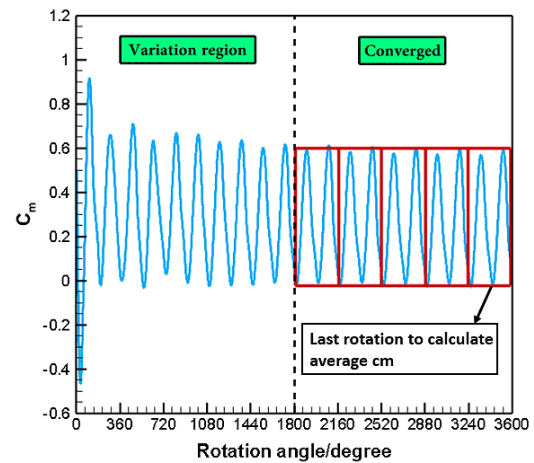
شکل ۱۰ نمودار ضریب گشتاور در هر زاویه چرخش برای گام‌های زمانی مختلف جهت بررسی معتبر بودن شبیه‌سازی، نتایج آن را با نتایج تجربی شلدال و همکاران [۲۰] و هم چنین نتایج عددی فتاحیان و همکاران [۱۶] طبق شکل ۱۴ مقایسه شد. میزان اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی فعلی و نتایج تجربی حداکثر ۵ درصد است که در نسبت سرعت نوک ۱.۲ رخ داده و در سایر سرعت‌ها کمتر از این مقدار حاصل گردید.



شکل ۱۱ نمودار ضریب گشتاور در هر زاویه چرخش آن

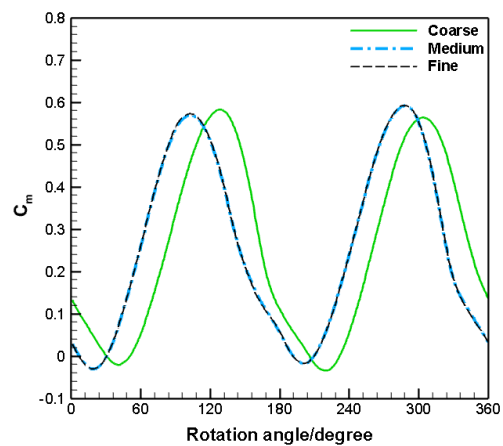
شکل ۱۲ نمودار ضریب گشتاور در دور دهم دوران برای شبکه‌بندی‌های مختلف

بر هم منطبق‌اند. از این رو جهت افزایش سرعت حل و کاهش فشار بر روی سیستم محاسباتی،  $\Theta$  برابر با ۱ جهت انجام شبیه‌سازی انتخاب گردید.



شکل ۱۲ نمودار ضریب گشتاور در دور دهم دوران برای شبکه‌بندی‌های مختلف

شکل ۱۳ اعتبارسنجی ضریب توان مقاله فعلی با نتایج فتاحیان [۷] و شلدال [۸]



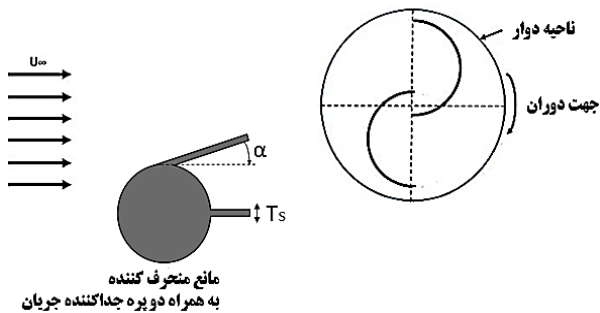
جدول ۴ مشخصات هندسی مانع طراحی شده

مقادیر	پارامترها
۰.۷۵	قطر مانع ( $d_c/D$ )
۱.۴	فاصله افقی از مرکز توربین ( $L_x/D$ )
۰.۵	فاصله عمودی از مرکز توربین ( $L_y/D$ )

در نهایت با اطمینان از صحت نتایج شبیه‌سازی فعلی، در ادامه بحث اهداف این مقاله بررسی می‌شود.

#### ۴- نتایج و نوآوری

در این قسمت به طراحی مانع جدید با صفحه جداکننده مورب پرداخته شد. در شکل ۱۸ مانع مورب طراحی شده مشخص می‌باشد. طی این پژوهش مقدار مناسبی برای زاویه پره مورب ( $\alpha$ ) و ضخامت پره‌ها ( $T_s$ ) شناسایی خواهد شد.



شکل ۱۸ نحوه قرارگیری مانع با دو پره جداکننده جریان در مقابل توربین

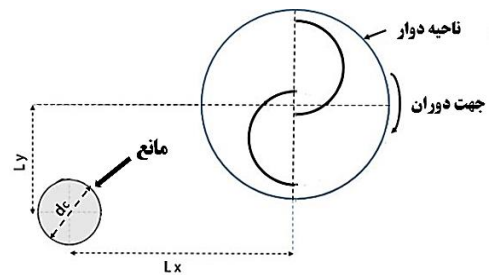
ابتدا ضخامت صفحات جداکننده بررسی می‌شود. ضخامت این صفحات و فاصله بین آنها می‌تواند بر کنترل گردابه‌های پشت مانع مؤثر باشد. جهت بررسی ضخامت، در ۵ اندازه مختلف شبیه‌سازی انجام شد. نتایج این شبیه‌سازی‌ها در جدول ۵ قابل مشاهده می‌باشد. طبق نتایج در ضخامت  $T_s/D$  برابر با ۰.۰۲۵ بیشترین میزان ضریب گشتاور و ضریب توان حاصل شده است. با افزایش ضخامت و کاهش فاصله بین پره‌ها، تاثیر صفحات جداکننده بر کنترل گردابه‌ها و بهبود ضریب توان توربین کاهش پیدا کرده است. این شبیه‌سازی‌ها در TSR برابر با ۰.۶ انجام و ضریب گشتاور متوسط و ضریب توان توربین در دور دهم دوران استخراج شده است.

جدول ۵ بررسی ضخامت بهینه پره جداکننده

$T_s/D$	ضریب گشتاور متوسط	ضریب توان
۰.۰۶۲۵	۰.۴۳۰۴	۰.۲۵۸۳
۰.۱۲۵	۰.۴۳۰۷	۰.۲۵۸۴
۰.۲۵	۰.۴۴۷۰	۰.۲۶۸۲
۰.۰۵	۰.۴۲۲۹	۰.۲۵۳۸
۰.۱	۰.۴۱۰۱	۰.۲۴۶۱

حال پس از به‌دست‌آوردن ضخامت مناسب جهت طراحی پره‌های جداکننده جریان، نوبت به تعیین زاویه نصب پره مورب می‌رسد. در زوایای مختلف پره و سرعت‌های متفاوت، اثر زاویه بر روی توربین بررسی می‌شود.

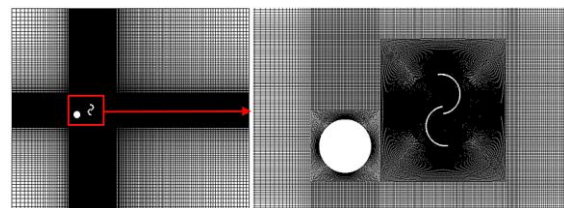
شکل ۱۹ ضریب گشتاور متوسط توربین در سرعت‌ها و زوایای مختلف را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد در تمامی شبیه‌سازی‌ها، زاویه ۵ درجه بهترین عملکرد را نشان داده است و با افزایش زاویه پره مورب، راندمان توربین دچار افت شده است. علت فیزیکی این امر این است که در زوایای بالاتر از ۱۰



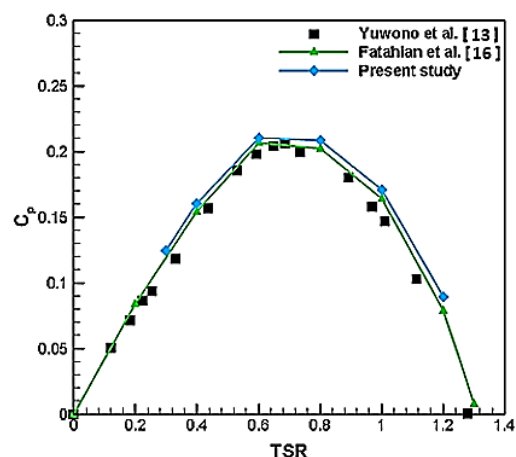
شکل ۱۵ نحوه قرارگیری مانع در مقابل توربین

پس از مدل‌سازی توربین به همراه مانع، شبکه‌بندی بر روی آنها اعمال شده است. نحوه شبکه‌بندی توربین به همراه مانع در شکل ۱۶ مشخص می‌باشد. نواحی نزدیک به توربین و مانع از شبکه‌بندی ریزتری نسبت به سایر ناحیه‌ها برخوردار است. شبکه‌بندی قسمت روتور توربین بدون تغییر نسبت به شبیه‌سازی حالت بدون مانع، باقی ماند و تنها تغییرات در بخش غیر چرخان توربین اعمال شده است.

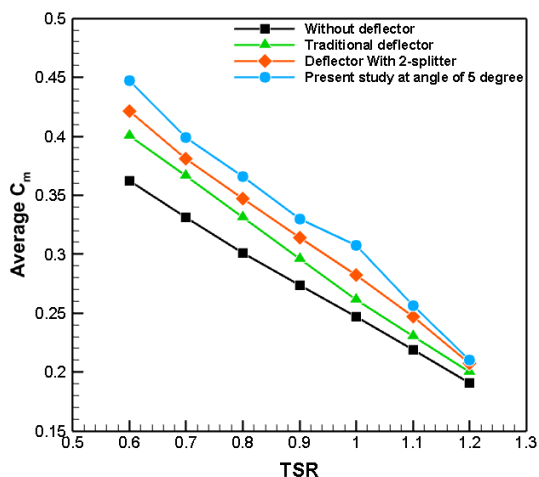
پس از اعمال شبکه‌بندی جدید، جهت اطمینان از صحت نتایج، در ۶ نسبت سرعت نوک مختلف، اعتبار آنها از طریق پژوهش‌های پیشین بررسی شد. از پژوهش آزمایشگاهی یوانو و همکاران [۱۳] و نتایج عددی فتاحیان و همکاران [۱۶] جهت اعتبارسنجی نتایج توربین به همراه مانع استفاده شده است. در شکل ۱۷ مقایسه‌ای میان ضریب توان توربین در نسبت سرعت‌های مختلف، میان نتایج فعلی و نتایج دو پژوهش دیگر صورت پذیرفته است. مشاهده می‌شود نتایج پژوهش فعلی با دقت مناسبی بر نتایج عددی و آزمایشگاهی منطبق است و شبکه‌بندی از دقت و کیفیت مناسبی برخوردار می‌باشد.



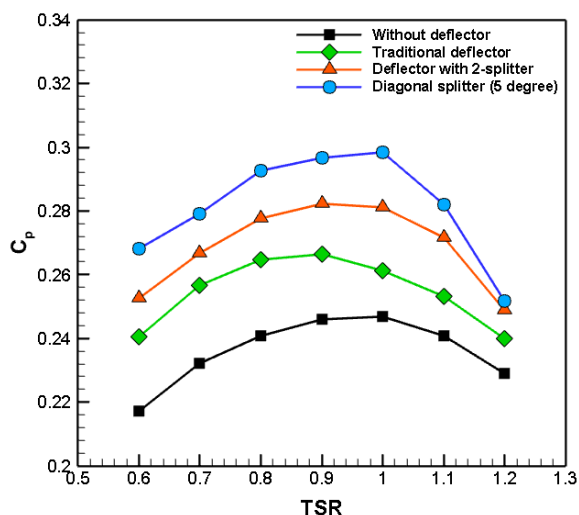
شکل ۱۶ نحوه شبکه‌بندی توربین به همراه مانع



شکل ۱۷ مقایسه ضریب توان شبیه‌سازی فعلی و نتایج مقالات دیگر



شکل ۲۰ مقایسه ضریب گشتاور متوسط توربین در حالت بدون مانع، مانع رایج بدون جداکننده، مانع به همراه پره جداکننده افقی و مانع با پره مورب



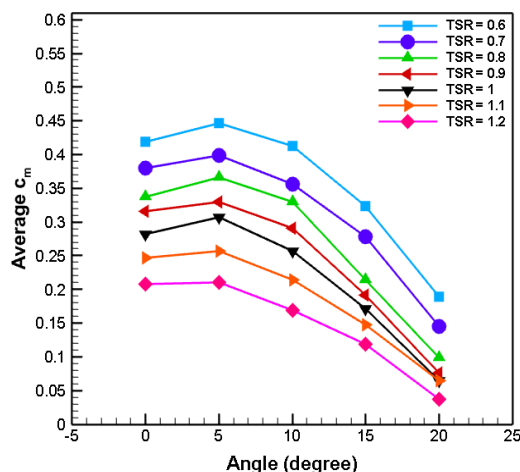
شکل ۲۱ مقایسه ضریب توان توربین در حالت بدون مانع، مانع رایج بدون جداکننده، مانع به همراه پره‌های جداکننده افقی و مانع با پره مورب

در جدول ۶، میزان افزایش ضریب توان توربین در حالت‌های مختلف طراحی و شبیه‌سازی مشخص شده است. بیشترین میزان افزایش ضریب توان مربوط به نسبت سرعت نوک ۰.۶ می‌باشد. در این سرعت ضریب توان توربین نسبت به حالت بدون مانع ۲۳.۴ درصد افزایش پیدا کرده است. این نتایج تأثیر مثبت پره مورب جداکننده جریان در کنترل ناحیه گردابه‌ای بزرگ در نزدیکی توربین و هدایت جریان باد به سمت پره پیش‌رونده جهت افزایش راندمان توربین ساوننیوس را نشان می‌دهد.

جدول ۶ میزان افزایش ضریب توان توربین مجهز به پره جداکننده مورب نسبت به سایر شبیه‌سازی‌ها

TSR	بدون مانع	مانع بدون پره جداکننده	مانع با پره جداکننده افقی
-----	-----------	------------------------	---------------------------

درجه، پره جداکننده جریان مانع از برخورد مستقیم باد به پره پیش‌رونده توربین می‌شود. همچنین به طور متوسط از زاویه ۰ تا ۷ درجه در تمامی سرعت‌ها، راندمان توربین افزایش داشته است. با توجه به شکل ۱۹ مشخص است مانع اثر مطلوب‌تری در نسبت سرعت‌های پایین در مقایسه با نسبت سرعت‌های بالاتر از ۱ داشته است.



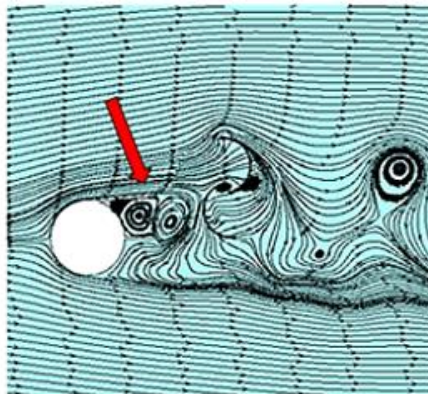
شکل ۱۹ ضریب گشتاور متوسط توربین در سرعت‌ها و زوایای مختلف

شکل ۲۰، نشان‌دهنده مقایسه‌ای بین ضریب گشتاور متوسط توربین طی شبیه‌سازی‌های مختلف در یک سرعت خاص است. نتایج نشان‌دهنده بهبود ضریب توان در شبیه‌سازی فعلی نسبت به پژوهش‌های پیشین است. در  $\lambda$  برابر با ۰.۶، میزان ضریب گشتاور توربین به کمک مانع با پره جداکننده مورب تحت زاویه ۵ درجه، حدود ۸ درصد نسبت به حالت پره افقی، حدود ۱۲ درصد نسبت به حالت مانع رایج بدون پره جداکننده و حدود ۲۴ درصد نسبت به حالت بدون مانع افزایش داشته است.

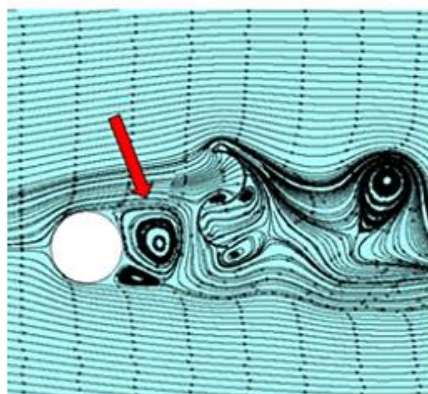
در شکل ۲۱، مقایسه‌ای میان نتایج شبیه‌سازی در حالت پره مورب با زاویه ۵ درجه، مانع به همراه پره جداکننده افقی، مانع بدون پره جداکننده جریان و توربین بدون مانع صورت‌گرفته است. مشاهده می‌شود در تمامی سرعت‌ها، ضریب توان توربین به کمک مانع جدید، افزایش پیدا کرده است. بیشترین میزان افزایش ضریب توان نیز مربوط به نسبت سرعت ۰.۶ می‌باشد. در نسبت سرعت‌های پایین‌تر از ۱، مانع به شکل مؤثرتری موجب افزایش راندمان توربین و افزایش ضریب توان آن گشته است.

استفاده از مانع به همراه پره جداکننده جریان را بر کنترل ناحیه متلاطم نزدیک توربین نشان می‌دهد. افزودن پره جداکننده سبب جلوگیری از تشکیل ناحیه گردابه‌ای نسبتاً وسیع در نواحی پایین دست مانع می‌شود. شکل ۲۶ شدت توربولانسی ناحیه اطراف توربین در دو حالت بدون مانع و مانع مجهز به پره جداکننده مورب، در نسبت سرعت ۰.۶ و زاویه ۳۰° درجه توربین را نمایش داده است که بیشینه مقدار آن در توربین مجهز به مانع با پره جداکننده نسبت به حالت بدون مانع، به علت کنترل ناحیه گردابه‌ای کاهش یافته است.

۰.۶	۲۳.۴٪	۱۱.۶٪	۶.۳٪
۰.۷	۲۰.۲٪	۸.۸٪	۴.۷٪
۰.۸	۲۱.۴٪	۱۰.۵٪	۵.۴٪
۰.۹	۲۰.۴٪	۱۱.۴٪	۵٪
۱	۲۰.۹٪	۱۴.۲٪	۶.۱٪
۱.۱	۱۷.۱٪	۱۱.۴٪	۳.۸٪
۱.۲	۱۰٪	۴.۹٪	۱.۳٪



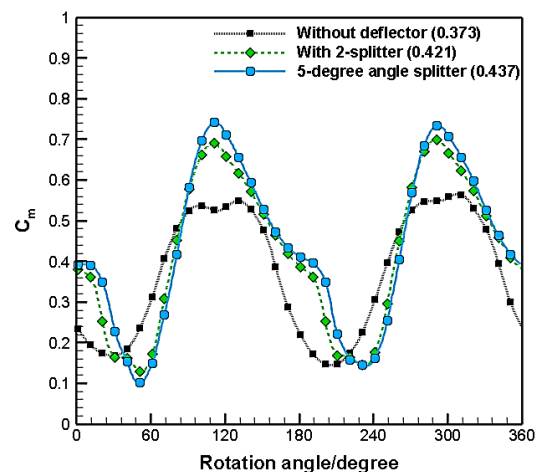
الف



ب

شکل ۲۲ میدان جریان اطراف توربین به همراه مانع با پره جداکننده مورب (شکل الف) و مانع بدون پره جداکننده جریان (شکل ب)

در شکل ۲۲، نمودار ضریب گشتاور دور آخر توربین (دور دهم) در سه حالت بدون مانع، مانع بدون پره جداکننده جریان و مانع به همراه پره جداکننده مورب، در نسبت سرعت نوک ۰.۶ ترسیم شده است. ضریب گشتاور متوسط توربین در حالت بدون مانع ۰.۳۷۳، در حالت مانع بدون جداکننده ۰.۴۲۱ و در حالت مانع با پره جداکننده افقی ۰.۴۳۷ حاصل شده است. همانطور که پیش از این گفته شد، مانع به همراه پره جداکننده مورب عملکرد بهتری نسبت به سایر نتایج دارد و ضریب گشتاور توربین مقادیر بالاتری را در زوایای مختلف ثبت کرده است.

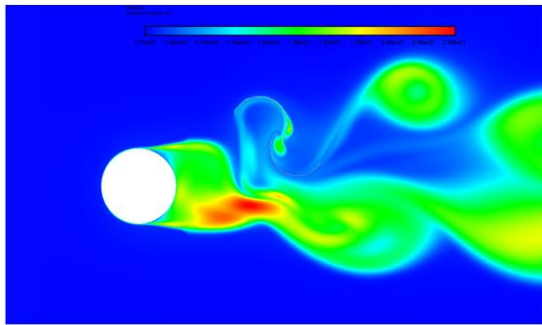


شکل ۲۲ مقایسه ضریب گشتاور دور آخر توربین در حالت‌های مختلف

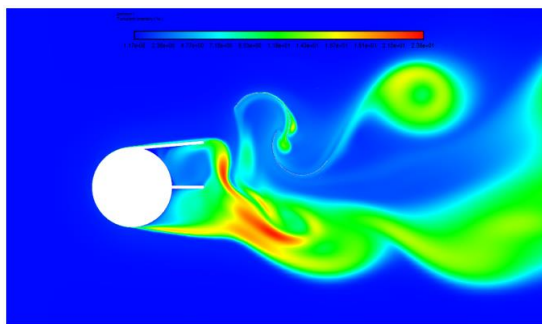
در نهایت در شکل ۲۳، میدان جریان اطراف توربین ساونیس در زاویه ۰ درجه توربین و در نسبت سرعت ۰.۶ نمایش داده شده است. در این شکل، تاثیر افزودن مانع به همراه صفحات جداکننده در جلوگیری از تشکیل ناحیه گردابه‌ای نسبتاً بزرگ در نزدیکی توربین مشخص می‌شود. به طور فیزیکی، نصب مانع جدید علاوه بر جلوگیری از برخورد مستقیم باد به پره برگشتی توربین و کنترل ناحیه گردابه‌ای نزدیک به آن، موجب هدایت جریان به سمت پره پیش‌رونده توربین و افزایش راندمان می‌شود.

در شکل ۲۴ و شکل ۲۵، خطوط جریان و میدان سرعت اطراف توربین به همراه میله مجهز به پره جداکننده مورب، در نسبت سرعت ۰.۶ و در دو زاویه مختلف ۰ و ۳۰° درجه نمایش داده شده است. این دو شکل به خوبی تاثیر

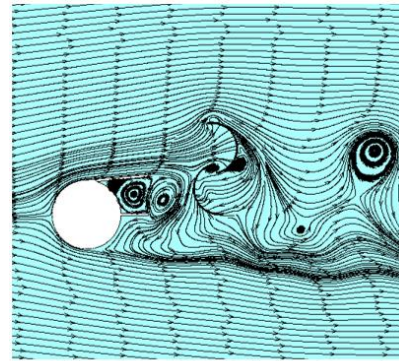
شکل ۲۵ میدان سرعت اطراف توربین به همراه مانع با پره جداکننده مورب در زاویه ۰ درجه (شکل الف) و در زاویه ۳۰۰ درجه (شکل ب)



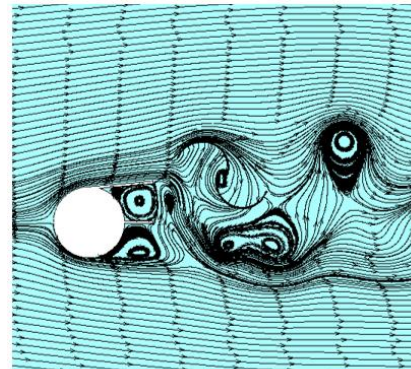
الف



ب



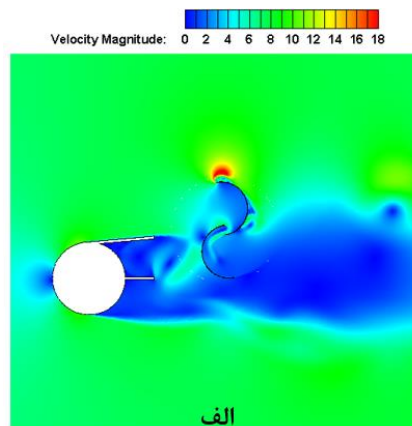
الف



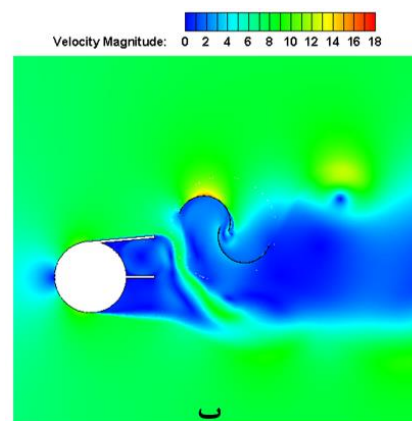
ب

شکل ۲۴ میدان جریان اطراف توربین به همراه مانع با پره جداکننده مورب در زاویه ۰ درجه (شکل الف) و در زاویه ۳۰۰ درجه (شکل ب)

شکل ۲۶ شدت توربولانسی ناحیه اطراف توربین با مانع بدون پره جداکننده (شکل الف) و مانع با نصب پره مورب جداکننده (شکل ب)



الف



ب

### ۵- جمع بندی پژوهش

توربین ساوننیوس دارای مزایای مختلفی از جمله هزینه و مدت زمان ساخت پایین و قابلیت خود راه اندازی می باشد. یکی از مشکلات مهم توربین ساوننیوس بازدهی پایین است که یکی از علل آن، برخورد مستقیم باد به پره برگشتی توربین و تولید گشتاور منفی است. طی این شبیه سازی، یک مانع مجهز به پره مورب جداکننده جریان با زاویه بهینه، در مقابل توربین ساوننیوس نصب شد که نتایج آن به صورت زیر خلاصه می گردد:

- ۱- ضخامت مناسب جهت طراحی پره جداکننده جریان، ۰.۰۲۵ برابر قطر توربین حاصل گردید. افزایش بیش از اندازه ضخامت پرها موجب کاهش فاصله بین آنها و عدم کنترل ناحیه گردابه ای نزدیک توربین می شود.
- ۲- مطابق شبیه سازی های صورت گرفته در سرعت های مختلف، زاویه ۵ درجه مناسب ترین حالت پره مورب جهت نصب بر روی مانع و هدایت جریان می باشد. در زوایای بالاتر به علت قرارگیری پره جداکننده در مقابل برخورد جریان مستقیم باد به پره پیش رونده، توربین دچار افت راندمان شد.
- ۳- بیشترین مقدار افزایش ضریب توان مربوط به نسبت سرعت نوک ۰.۶ می باشد که در این حالت ضریب توان نسبت به حالت توربین بدون مانع ۲۳.۴ درصد، نسبت به حالت مانع بدون پره جداکننده ۱۱.۶ درصد و نسبت به حالت مانع با پره جداکننده افقی ۶.۲ درصد افزایش پیدا کرده است.

### ۶- فهرست علائم

of a circular cylinder upstream of returning turbine blade, *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 59, No. 6, pp. 4923-4932, 2020.

- [14] W. Tian, J. Bian, G. Yang, X. Ni and Z. Mao, Influence of a passive upstream deflector on the performance of the Savonius wind turbine, *Energy Reports*, Vol. 8, pp. 7488-7499, 2022.
- [15] B. D. Altan and A. Gungor, Examination of the Effect of Triangular Plate on the Performances of Reverse Rotating Dual Savonius Wind Turbines, *Processes*, Vol. 10, No. 11, pp. 2278, 2022.
- [16] E. Fatahian, F. Ismail, M. H. H. Ishak and W. S. Chang, The role of wake splitter deflector on performance enhancement of Savonius wind turbine, *Physics of Fluids*, Vol. 34, No. 9, pp. 095111, 2022.
- [17] W. Xu, C.-c. Li, S.-x. Huang and Y. Wang, Aerodynamic performance improvement analysis of Savonius vertical axis wind turbine utilizing plasma excitation flow control, *Energy*, Vol. 239, pp. 122133, 2022.
- [18] I. Marinić-Kragić, D. Vučina and Z. Milas, Robust optimization of Savonius-type wind turbine deflector blades considering wind direction sensitivity and production material decrease, *Renewable Energy*, Vol. 192, pp. 150-163, 2022.
- [19] H. Aboujaoude, F. Beaumont, S. Murer, G. Polidori and F. Bogard, Aerodynamic performance enhancement of a Savonius wind turbine using an axisymmetric deflector, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 220, pp. 104882, 2022.
- [20] R. E. Sheldahl, B. F. Blackwell and L. V. Feltz, Wind tunnel performance data for two-and three-bucket Savonius rotors, *Journal of Energy*, Vol. 2, No. 3, pp. 160-164, 1978.

$\rho$  فشار ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$ )

$u$  سرعت ( $\text{ms}^{-1}$ )

$\theta$  گام زمانی متناسب با چرخش توربین (deg)

$C_m$  ضریب گشتاور توربین

$C_p$  ضریب توان توربین

$Re$  عدد رینولدز

علایم یونانی

$\rho$  چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )

$\mu$  لزجت دینامیکی ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )

$\lambda$  نسبت سرعت نوک

## ۷- تقدیر و تشکر

با تشکر و قدردانی فراوان از جناب آقای دکتر محمدجواد مغربی که بنده را تا اتمام این پژوهش یاری رساندند. همچنین از مرکز محاسبات سنگین دانشگاه فردوسی مشهد که سیستم محاسباتی موردنیاز جهت انجام این پژوهش را در اختیار بنده قرار دادند، قدردانی و تشکر می‌شود.

## ۸- مراجع

- [1] N. L. Panwar, S. C. Kaushik and S. Kothari, Role of renewable energy sources in environmental protection: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 3, pp. 1513-1524, 2011.
- [2] S. E. Hosseini, An outlook on the global development of renewable and sustainable energy at the time of COVID-19, *Energy Research & Social Science*, Vol. 68, pp. 101633, 2020.
- [3] Q. A. Alabdali, A. M. Bajawi, A. M. Fatani and A. M. Nahhas, Review of Recent Advances of Wind Energy, *Energy*, Vol. 8, No. 1, pp. 12-19, 2020.
- [4] P. Gipe and E. Möllerström, An overview of the history of wind turbine development: Part I—The early wind turbines until the 1960s, *Wind Engineering*, Vol. 46, No. 6, pp. 1973-2004, 2022.
- [5] S. Toudarbari, M. J. Maghrebi and A. Hashemzadeh, Evaluation of Darrieus wind turbine for different highway settings using CFD simulation, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 45, pp. 101077, 2021.
- [6] M. H. Mohamed, F. Alqurashi and D. Thévenin, Performance enhancement of a Savonius turbine under effect of frontal guiding plates, *Energy Reports*, Vol. 7, pp. 6069-6076, 2021.
- [7] A. Roshan, A. Sagharichi and M. J. Maghrebi, Nondimensional parameters' effects on hybrid Darrieus-Savonius wind turbine performance, *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 142, No. 1, 2020.
- [8] N. R. Maldar, C. Y. Ng and E. Oguz, A review of the optimization studies for Savonius turbine considering hydrokinetic applications, *Energy Conversion and Management*, Vol. 226, pp. 113495, 2020.
- [9] M. Mohamed, G. Janiga, E. Pap and D. Thévenin, Optimization of Savonius turbines using an obstacle shielding the returning blade, *Renewable Energy*, Vol. 35, No. 11, pp. 2618-2626, 2010.
- [10] P. A. Setiawan, T. Yuwono, W. A. Widodo, E. Julianto and M. Santoso, Numerical study of a circular cylinder effect on the vertical axis Savonius water turbine performance at the side of the advancing blade with horizontal distance variations, *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol. 9, No. 2, pp. 978-985, 2019.
- [11] E. Nimvari, H. Fatahian and E. Fatahian, Performance improvement of a Savonius vertical axis wind turbine using a porous deflector, *Energy Conversion and Management*, Vol. 220, pp. 113062, 2020.
- [12] K. Layeghmand, N. Ghiasi Tabari and M. Zarkesh, Improving efficiency of Savonius wind turbine by means of an airfoil-shaped deflector, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 42, No. 10, pp. 528, 2020.
- [13] T. Yuwono, G. Sakti, F. Nur Aulia and A. Chandra Wijaya, Improving the performance of Savonius wind turbine by installation