

# محاسبه زاویه قوس پره و نسبت ضخامت به وتر بهینه پره‌های توربین بادی ساونیوس با استفاده از رهیافت یادگیری ماشین

کارشناسی ارشد، دانشکده‌گان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران،  
 amirabbas.eslami@ut.ac.ir

امیرعباس اسلامی

دانشیار، دانشکده‌گان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران،  
 vakilipour@ut.ac.ir

شیدوش وکیلی‌پور\*

## چکیده

هدف از این پژوهش، شناسایی پارامترهای بهینه برای حداکترسازی ضریب توان و بازده توربین است. شبیه‌سازی‌های عددی (CFD) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs) برای تحلیل رفتار جریان و تأثیر متغیرهای هندسی استفاده می‌شوند. در ابتدا، مدل‌های هندسی توربین با تغییرات در زاویه قوس پره و نسبت ضخامت به وتر تولید شدند و سپس ضرایب آیرودینامیکی با استفاده از OpenFOAM v2312 محاسبه شدند. شبکه‌های عصبی مصنوعی، که با داده‌های شبیه‌سازی آموزش داده شدند، زمان بهینه‌سازی و هزینه‌های محاسباتی را به طور قابل توجهی کاهش دادند ANN مقادیر بهینه  $165^\circ$  برای زاویه قوس پره و  $0.19$  برای نسبت ضخامت به وتر را شناسایی کرد. علاوه بر این، تحلیل نسبت هم‌پوشانی نشان داد که مقادیر بین  $0.05$  و  $0.1$  گشتاور و توان خروجی را در نسبت‌های سرعت نوک (TSR) مختلف بهبود می‌بخشد. هندسه بهینه شده، قابلیت خودراه‌اندازی را بهبود بخشید و ضریب توان را  $13.7\%$  در مقایسه با پره‌های معمولی و  $5.2\%$  نسبت به طراحی اولیه پره‌های ایرفویل شکل افزایش داد.

**واژه‌های کلیدی:** توربین بادی ساونیوس، پره ایرفویل شکل، زاویه قوس پره، نسبت ضخامت به وتر، دینامیک سیالات محاسباتی، شبکه عصبی مصنوعی.

## Calculation of Optimal Blade Arc Angle and Thickness-to-Chord Ratio of Savonius Wind Turbine Blades using Machine Learning Approach

**A. Eslami**

Collage of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran

**S. Vakilipour**

Collage of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran

### Abstract

The present study focuses on optimizing the performance of Savonius wind turbines with airfoil-shaped blades, emphasizing blade arc angle and thickness-to-chord ratio. The goal is to identify the optimal parameters to maximize the power coefficient and turbine efficiency. Computational fluid dynamics (CFD) simulations and artificial neural networks (ANNs) are used to analyze flow behavior and the impact of geometric variables. Initially, geometric models of the turbine with variations in blade arc angle and thickness-to-chord ratio were generated, and then aerodynamic coefficients were calculated using OpenFOAM v2312. ANNs, trained with simulation data, significantly reduced optimization time and computational costs. The ANN identified optimal values of  $165^\circ$  for the blade arc angle and  $0.19$  for the thickness-to-chord ratio. Additionally, overlap ratio analysis revealed that values between  $0.05$  and  $0.1$  improved torque and power output at various tip speed ratios. The optimized geometry enhanced self-starting capability and increased the power coefficient by  $13.7\%$  compared to conventional blades and by  $5.2\%$  over the initial airfoil-shaped blade design.

**Keywords:** Savonius wind turbine, Airfoil-shaped blades, Blade arc angle, Thickness-to-chord ratio, Computational fluid dynamics, Artificial neural network.

مساعد ساخته می‌شوند. با توجه به تلاش‌های جهانی برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و مبارزه با تغییرات آب و هوایی، انتظار می‌رود استفاده از انرژی بادی در سال‌های آینده به طور مداوم افزایش یابد. استفاده از توربین‌های بادی ساونیوس<sup>۱</sup> در تولید برق میکرو در این زمینه قرار دارد، اما هنوز به طور گسترده‌ای رایج نشده است.

توربین بادی ساونیوس نوعی توربین بادی محور عمودی است که به دلیل طراحی ساده، سهولت ساخت و توانایی عملکرد موثر در سرعت‌های باد پایین شناخته می‌شود. ساختار آن معمولاً از دو یا چند

### ۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، نگرانی جهانی در مورد پیامدهای بهره‌برداری بی‌رویه از منابع انرژی تجدیدناپذیر افزایش یافته است. آلودگی، گرمایش جهانی و کاهش قابلیت حیات سیاسی و اقتصادی در استفاده از منابع انرژی تجدیدناپذیر، برخی از پیامدهای این بهره‌برداری هستند. استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و تولید برق غیرمتمرکز، جایگزین‌هایی برای کاهش بهره‌برداری از منابع انرژی متعارف و اثرات آن‌ها هستند که به توسعه پایدار جوامع کمک می‌کنند. امروزه، انرژی بادی یکی از منابع اصلی برق تجدیدپذیر در سراسر جهان است. مزارع بادی، متشکل از توربین‌های بادی متعدد، در مناطقی با شرایط باد

<sup>1</sup> Savonius

<sup>2</sup> Vertical axis wind turbine

پره نیمه استوانه‌ای تشکیل شده است که روی یک شفت عمودی مرکزی نصب می‌شوند. پره‌ها به گونه‌ای جابجا می‌شوند که پیکربندی قاشق‌مانندی ایجاد کنند و به توربین اجازه می‌دهند باد را از هر جهتی جذب کند. توربین‌های بادی ساونیوس، با ساختار ساده و توانایی بهره‌برداری از انرژی باد در شرایط سرعت پایین و متلاطم، توجه قابل توجهی را در سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر کوچک مقیاس و غیرمتمرکز به خود جلب کرده‌اند. با این حال، راندمان نسبتاً پایین آن‌ها در مقایسه با سایر طرح‌های توربین بادی، یک چالش کلیدی باقی می‌ماند که نیاز به تحقیق و بهینه‌سازی مداوم برای بهبود عملکرد آیرودینامیکی آن‌ها دارد [۱]. در میان عوامل مختلف موثر بر راندمان توربین‌های بادی ساونیوس، زاویه قوس پره و نسبت ضخامت به وتر نقش‌های محوری در تعیین ویژگی‌های پسا و بر آن‌ها ایفا می‌کنند که مستقیماً بر نرخ تبدیل انرژی تأثیر می‌گذارند.

عبدالغفار و همکاران [۲] کاربرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی را برای بهبود عملکرد روتورهای ساونیوس بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی می‌توانند به طور قابل توجهی عملکرد روتورهای ساونیوس را بهبود بخشند. محققان یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی مبتنی بر ژنتیک ایجاد کردند که قادر به بهینه‌سازی شکل و اندازه پره‌های روتور است. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که طرح‌های پره الهام گرفته از شکل ماهی می‌توانند عملکرد روتورهای ساونیوس را تا ۳۰٪ بهبود بخشند. عبدالعزیز و همکاران [۳] یک شبیه‌سازی عددی برای ارزیابی عملکرد روتور ساونیوس با تغییراتی در پروفیل‌های پره، به ویژه اشکال سینوسی و مخروطی، انجام دادند. مطالعه آن‌ها نشان داد که استفاده از پره‌های سینوسی و مخروطی به طور قابل توجهی عملکرد روتور را بهبود می‌بخشد. نتایج نشان داد که پره‌های سینوسی منجر به افزایش ضریب توان و راندمان روتور می‌شوند. علاوه بر این، پره‌های مخروطی نیز تأثیر مثبتی بر عملکرد روتور دارند و ضریب توان و راندمان را افزایش می‌دهند. در نهایت، یافته‌های آن‌ها نشان داد که استفاده از پره‌هایی با پروفیل‌های سینوسی و مخروطی می‌تواند رویکردی موثر برای بهبود عملکرد روتورهای ساونیوس برای تولید انرژی پایدار باشد. لی و همکاران [۴] یک طراحی روتور نوآورانه را پیشنهاد کردند که پره‌های ایرفویل شکل مشتق شده از ایرفویل FX74-CL5-140 با سرعت پایین و لیفت بالا را برای بهبود عملکرد توربین‌های بادی ساونیوس برای کاربردهای شهری در خود جای داده است. یافته‌های آن‌ها نشان داد که روتور اصلاح شده به ضریب توان پیک می‌رسد که تا ۱۶٪ بالاتر از طراحی اصلی در نسبت سرعت نوک ۱/۱ بود. علاوه بر این، محدوده عملکرد توربین بهبود یافت و به طور موثر در مقادیر TSR بالاتر از ۰/۷ در مقایسه با آستانه گزارش شده قبلی عمل کرد. طراحی پره ایرفویل انرژی تکانه را در اطراف روتور تقویت می‌کند، توزیع فشار را بر روی سطح مقعر تغییر می‌دهد و مبدا نیروی فشار را جابجا می‌کند. این تغییرات به طور جمعی بازوی گشتاور را افزایش می‌دهند و در نتیجه گشتاور بیشتری در مقادیر TSR بالاتر تولید می‌شود.

زاویه قوس پره در یک توربین بادی ساونیوس یک پارامتر حیاتی است که به طور قابل توجهی بر عملکرد آن تأثیر می‌گذارد. به طور کلی، زاویه قوس پره بزرگتر منجر به گشتاور و توان خروجی بالاتر به دلیل افزایش شتاب جریان و اختلاف فشار بین دو فنجان می‌شود. با

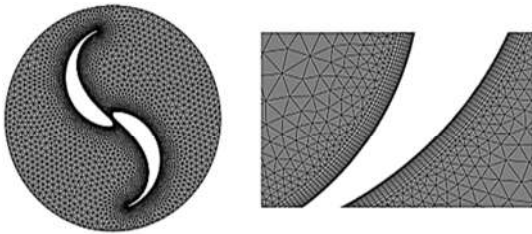
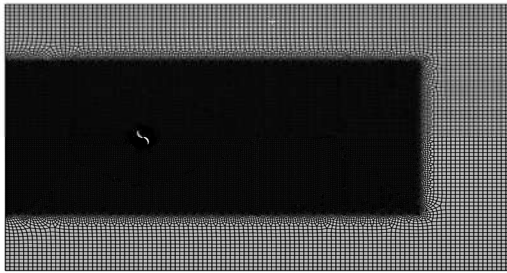
این حال، زاویه قوس پره بیش از حد بزرگ می‌تواند منجر به تلفات اضافی ناشی از افزایش نیروی پسا و جدایش جریان شود. این به نوبه خود ممکن است منجر به کاهش راندمان کلی شود. بنابراین، بهینه‌سازی زاویه قوس پره برای دستیابی به بهترین عملکرد ممکن توربین بادی ساونیوس ضروری است. مانو و تیان [۵] بررسی کردند که چگونه زاویه قوس پره بر عملکرد توربین بادی ساونیوس اثر می‌گذارد. طبق یافته‌های آن‌ها، زاویه قوس پره ۱۶۰° به بالاترین ضریب توان یعنی ۰/۲۸۳۶ دست یافت که نشان دهنده بهبود ۸/۳۷٪ نسبت به عملکرد توربین ساونیوس با پره سنتی است. شبکه‌های عصبی مصنوعی مدل‌های محاسباتی الهام گرفته از شبکه‌های عصبی بیولوژیکی موجود در مغز انسان هستند. این شبکه‌ها از گره‌ها یا نورون‌های به هم پیوسته تشکیل شده‌اند که اطلاعات را پردازش و منتقل می‌کنند. آن‌ها با موفقیت در طیف گسترده‌ای از وظایف، از جمله تشخیص تصویر، پردازش زبان طبیعی و مدل‌سازی پیش‌بینی‌کننده، به کار گرفته شده‌اند. در زمینه بهینه‌سازی توربین‌های بادی ساونیوس، شبکه‌های عصبی می‌توانند برای پیش‌بینی عملکرد توربین بر اساس پارامترهای طراحی و شرایط عملیاتی مورد استفاده قرار گیرند. با آموزش یک شبکه عصبی بر روی یک مجموعه داده بزرگ از داده‌های عملکرد توربین، می‌توان مدلی را توسعه داد تا توان خروجی، گشتاور و راندمان توربین را در شرایط مختلف به طور دقیق پیش‌بینی کند. رنگما و سوبارائو [۶] زاویه قوس پره بهینه را برای یک توربین آبی ساونیوس با پره‌های معمولی در TSRهای مختلف با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی شناسایی کردند. آن‌ها نشان دادند که این رویکرد در مقایسه با روش‌های دیگر، مانند دینامیک سیالات محاسباتی، هزینه‌های محاسباتی را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد و در عین حال سطح دقت مطلوب را حفظ می‌کند.

همانطور که به‌طور خلاصه در پیشینه تحقیق ذکر شد، مطالعات انجام شده بر روی توربین‌های ساونیوس اغلب فاقد تحقیقات پارامتری جامعی هستند که به طور همزمان عوامل متعدد مرتبط با هم که بر عملکرد توربین تأثیر می‌گذارند را در نظر بگیرند. این مطالعه قصد دارد با استفاده از شبیه‌سازی‌های CFD، تحقیقات پارامتری کاملی را انجام دهد تا درک عمیق‌تری از چگونگی تأثیر زاویه قوس پره، نسبت ضخامت به وتر، نسبت هم‌پوشانی و شکل پره بر نتایج عملکرد ارائه دهد. به عبارت دیگر، هدف اصلی این مطالعه بررسی زاویه پره بهینه یک توربین بادی ساونیوس با پره‌های ایرفویل شکل برای تعیین پیکربندی پره‌ای است که توان خروجی را به حداکثر می‌رساند. با استفاده از شبیه‌سازی‌های CFD برای تجزیه و تحلیل رفتار جریان و به کارگیری مدل‌های ANN برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی معیارهای عملکرد توربین می‌باشد.

## ۲- روش‌شناسی

### ۲-۱- تولید هندسه و شبکه محاسباتی

اولین گام در شبیه‌سازی‌های CFD، ایجاد مدل هندسی توربین بادی ساونیوس است. هندسه مورد مطالعه در این تحقیق بر اساس طرح معرفی شده توسط لی و همکاران [۴] است که از پره ایرفویل شکل FX74-CL5-140 استفاده کرده است. سمت محدب ایرفویل با



شکل ۲- شبکه محاسباتی حول روتور و نزدیک پره

پس از ایجاد مدل هندسی، گام بعدی تولید یک شبکه با کیفیت بالا است. کیفیت این شبکه‌ها حیاتی است، زیرا مستقیماً بر دقت نتایج شبیه‌سازی تأثیر می‌گذارد. برای شبیه‌سازی موثر جریان سیال در اطراف توربین بادی، یک شبکه ریز در مناطقی ایجاد می‌شود که تغییرات قابل توجهی در جریان سیال رخ می‌دهد. این مناطق حیاتی شامل ناحیه چرخان، که روتور و قطعات متحرک مرتبط را در بر می‌گیرد، دنباله پشت روتور، و مرزهایی که این مناطق با هم تعامل دارند می‌شود. یک شبکه ریز همانند شکل ۲، در این نقاط به دلیل الگوهای پیچیده جریان و نوسانات قابل توجه در سرعت، فشار و آشفتگی حیاتی است. علاوه بر این، روش شبکه لغزنده برای شبیه‌سازی دینامیک روتور ضروری است، زیرا نمایش دقیق‌تری از حرکت روتور ارائه می‌دهد و خطاهای ناشی از حرکت نسبی بین روتور و سیال اطراف را کاهش می‌دهد.

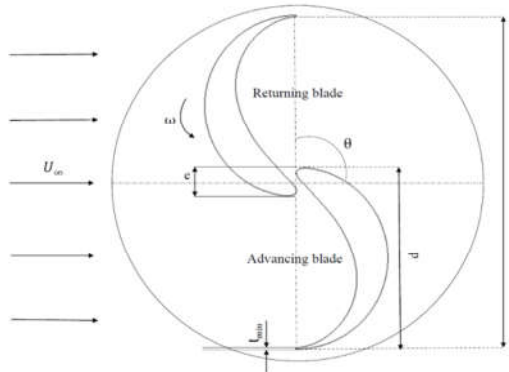
همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، اولین لایه شبکه نزدیک سطح پره توربین بادی به گونه‌ای طراحی شده است که ضخامت بسیار کمی برابر با  $10^{-5} \times 1$  متر داشته باشد. علاوه بر این، در مجموع ۲۰ لایه رشد یافته شبکه با انتقال هموار در نظر گرفته شده است. این لایه اول بسیار ریز به دلیل تغییرات بسیار سریع در سرعت و فشار سیال در داخل لایه مرزی است، که نیاز به یک شبکه بسیار ریز نزدیک سطح پره برای مدل‌سازی دقیق دارد. با این ضخامت لایه اول، بیشترین مقدار  $y^+$  در سطح محدب پره داده و بطور متوسط برابر با ۰/۷۱ است یعنی کمتر از ۱ (معادله ۱)، که امکان یک حل جریان دقیق در داخل لایه مرزی را فراهم می‌کند.

$$y^+ = (\rho u_\tau y / \mu) \quad (1)$$

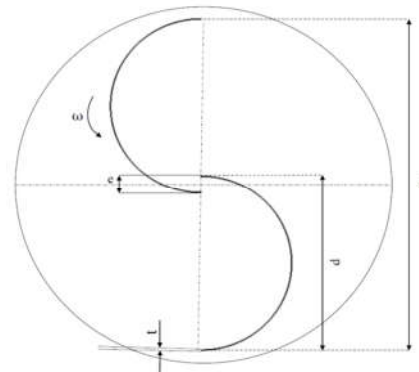
که در آن،  $u_\tau$  نشان دهنده سرعت مشخصه در لایه مرزی نزدیک دیوار است که اثرات اصطکاکی بین سیال و دیوار را توصیف می‌کند  $y$  فاصله از مرکز اولین سلول شبکه تا نزدیکترین دیوار است. شرایط شبکه لایه مرزی در جدول ۱ ارائه شده است.

استفاده از یک خط نیم دایره از پره اصلی به عنوان خط پایه برای طراحی پره ایرفویل شکل طراحی شده است. در این پیکربندی، سمت فشار ایرفویل در امتداد این خط منحنی می‌شود، در حالی که سمت مقعر پره اصلی با سمت مکش ایرفویل جایگزین می‌شود. لبه حمله ایرفویل در نوک پره نزدیک مرکز روتور قرار می‌گیرد. در نتیجه، ضخامت پره روتور از مرکز روتور تا نوک آن متغیر است که نشان دهنده ضخامت واقعی ایرفویل است. شکل ۱ تفاوت بین یک پره معمولی و یک پره ایرفویل شکل را نشان می‌دهد. نسبت هم‌پوشانی (e/d) این توربین ۰/۱ در نظر گرفته شده است.

(الف)



(ب)



شکل ۱- (الف) روتور با پره ایرفویل شکل (ب) روتور با پره متعارف

این ایرفویل معمولاً برای عملکرد در رژیم جریان عدد رینولدز پایین (بین سیصد تا پانصد هزار) طراحی شده است، که مشابه عدد رینولدز پره‌های توربین بادی محور عمودی است. به گونه‌ای طراحی شده است که در زوایای حمله بالا، به تدریج وارد واماندگی می‌شود، این ویژگی بسیار مهم است زیرا در توربین‌های بادی، پره‌ها دائماً زاویه خود را نسبت به باد تغییر می‌دهند و ممکن است گاهی اوقات با زوایای حمله بسیار بالا مواجه شوند.

جدول ۱- جزئیات ابعاد دو روتور

پارامتر	روتور متعارف	روتور ایرفویلی
D [m]	۰/۹۵	۰/۹۵
d [m]	۰/۵	۰/۵
t [m]	۰/۰۰۴	$t_{min} = ۰/۰۰۴$

جدول ۲- شرایط شبکه لایه رشد یافته شبکه

لایه رشد یافته		
نرخ رشد	تعداد لایه‌ها	ضخامت اولین لایه [m]
۱٫۲	۲۰	$1 \times 10^{-5}$

## ۲-۲- معادلات حاکم

- گشتاور و توان

ضریب گشتاور و ضریب توان دو شاخص کلیدی هستند که برای ارزیابی کارایی و توان خروجی یک توربین بادی استفاده می‌شوند:

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho V^2 A C} \quad (2)$$

$$C_p = \frac{M \omega}{\frac{1}{2} \rho V^3 A} = \frac{M \omega}{\frac{1}{2} \rho V^2 d} \cdot \frac{d \omega}{V^2} = \lambda C_m \quad (3)$$

که در رابطه بالا  $\omega$  سرعت زاویه‌ای توربین بر حسب رادیان بر ثانیه،  $C$  طول وتر،  $d$  قطر پره و  $\lambda$  نسبت سرعت نوک پره توربین می‌باشد.

- پیوستگی و اندازه حرکت

اولین معادله حاکم، معادله پیوستگی است که نشان‌دهنده بقای جرم است. این معادله ضروری است تا اطمینان حاصل شود که جرم کل سیال در طول جریان ثابت باقی می‌ماند.

معادله پیوستگی برای جریان تراکم‌ناپذیر:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (4)$$

دومین معادله اساسی، معادله حرکت است که معمولاً به عنوان معادلات ناویه-استوکس شناخته می‌شود. این معادله نیروهای مختلفی را که بر یک سیال وارد می‌شوند، مانند فشار، لزجت و نیروهای خارجی مانند گرانش، در نظر می‌گیرد.

معادله پیوستگی برای جریان تراکم‌ناپذیر:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 \vec{u} \quad (5)$$

مدل آشفتگی  $k-\omega$  SST می‌تواند لایه‌های مرزی را تحت گرادین‌های فشار معکوس قوی پیش‌بینی کند و با نتایج خوبی در کاربردهای توربین بادی اعتبارسنجی شده است [۷] و [۸].

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (6)$$

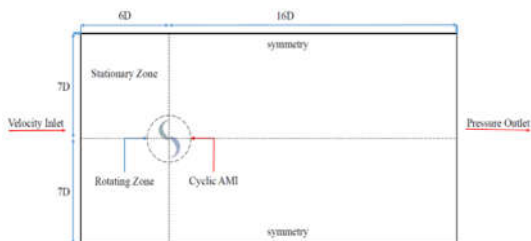
$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = -\frac{\gamma}{v_t} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_\omega \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (7)$$

## ۲-۳- شرایط مرزی

طبق شکل ۳، جریان ورودی از چپ به راست وارد دامنه

محاسباتی می‌شود. ابعاد دامنه، از طریق بررسی عددی و توصیه مطالعات پیشین [۴، ۲۲، ۲۴ و ۲۵] تعیین شده‌است. شرایط مرزی برای دامنه محاسباتی به شرح زیر تعریف می‌شوند:

- مرز ورودی: سرعت باد ورودی برابر با سرعت جریان آزاد (۷ m/s) است. پارامترهای شدت آشفتگی و مقیاس طول آشفتگی به ترتیب ۳٪ و ۰٫۲ متر در نظر گرفته شده‌اند.
- مرز خروجی: فشار خروجی داده شده برابر با فشار استاندارد محیط است (۱۰۱۳۲۵ Pa).
- شرایط مرزی دیوار چرخان بدون لغزش در امتداد سطوح پره‌ها استفاده می‌شود.
- بین شبکه‌های متحرک و ثابت شرط مرزی شبکه لغزشی اعمال گشته است.
- شرط مرزی تقارن در نواحی دور دست میدان اعمال شده است.



شکل ۳- طرحواره دامنه محاسباتی

انتخاب حلگری مناسب برای شبیه‌سازی عددی یک توربین بادی برای به‌دست آوردن نتایج دقیق و قابل اعتماد بسیار مهم است. حلگرهای مختلف از روش‌ها و الگوریتم‌های عددی متنوعی استفاده می‌کنند که هر کدام مزایا و محدودیت‌های خود را دارند. هنگام انتخاب یک حلگر، باید چندین عامل مانند پیچیدگی هندسه توربین، رژیم جریان، وجود جریان چند فاز و سطح جزئیات مورد نیاز در حل را در نظر گرفت. حلگر انتخاب شده در این شبیه‌سازی، حلگر pimpleFoam است که مبتنی بر الگوریتم PIMPLE بوده و مناسب شبیه‌سازی‌های گذرا می‌باشد.

## ۲-۴- شبکه‌های عصبی مصنوعی

ابزار CFD همراه با الگوریتم‌های بهینه‌سازی، رویکردی قدرتمند برای بهینه‌سازی هندسه پره‌های توربین بادی ساوونیوس با پره‌های ایرفویل شکل ارائه می‌دهد. با توجه به مجموعه داده‌های محدود ۳۶ شبیه‌سازی CFD موجود برای آموزش، رویکرد ANN به‌عنوان مناسب‌ترین و کارآمدترین استراتژی بهینه‌سازی برای این مطالعه در نظر گرفته می‌شود. مجموعه داده‌های محدود، روشی را می‌طلبد که قادر به استخراج الگوهای مفید از مقدار نسبتاً کمی داده باشد، که شبکه‌های عصبی مصنوعی را به گزینه‌ای جذاب تبدیل می‌کند. الگوریتم شبکه‌های عصبی پیش‌خور به‌عنوان ابزار بهینه‌سازی برای این مطالعه انتخاب می‌شود، که امکان بررسی کامل پارامترهای طراحی یعنی زاویه قوس پره و نسبت ضخامت به وتر را در حین کار در محدودیت‌های محاسباتی و داده‌های موجود فراهم می‌کند. این انتخاب

زمانی قابل مشاهده است، شبکه متوسط اختلاف کمتری نسبت به شبکه ریز در مقایسه با شبکه درشت دارد. همچنین گام زمانی  $10^{-4} \times 1,292$  ثانیه تنها  $0.17\%$  با گام زمانی  $10^{-5} \times 6,46$  ثانیه اختلاف داشته که نشان می‌دهد دارای دقت کافی و از نظر هزینه محاسباتی مقرون به صرفه بوده لذا به منظور ادامه حل انتخاب می‌گردند. نتایج برای شبکه مکانی ریزتر (۴۱۹۶۸۷ المان) و گام زمانی کوچکتر ( $10^{-5} \times 3,23$  ثانیه) نیز مشابه بود.

### ۳-۲- اعتبار سنجی نتایج حل عددی

جهت اطمینان از دقت حل دینامیک سیالات محاسباتی و همچنین اعتبارسنجی و صحت‌سنجی نتایج به دست آمده در این مطالعه، مدل توربین با پره‌های معمولی و نسبت  $Overlap = 0.1$  در برابر نتایج مطالعه تجربی معیار انجام شده توسط آزمایشگاه‌های سندیا [۹] و مطالعات عددی [۱۰ و ۱۱] تأیید شد. معیار جریان و ابعاد توربین دقیقاً مشابه داده‌های تحقیقات تجربی آزمایشگاه سندیا در نظر گرفته شده است. رینولدز (Re) جریان برابر با  $4.3 \times 10^5$  می‌باشد.

شکل ۴، نشان می‌دهد که ضریب گشتاور روتور رفتار نوسانی داشته و بین مقادیر مثبت و منفی نوسان می‌کند. این رفتار نوسانی ویژگی ذاتی توربین‌های ساوننیوس است که به دلیل طراحی متقارن پره‌های آنها، گشتاور دو جهته تولید می‌کنند. دو فاز مجزا در شکل مشخص است. فاز گذرا (زمانی که توربین در حال شتاب گرفتن است و شرایط جریان هنوز به حالت پایدار نرسیده است) و فاز همگرا (زمانی که شرایط جریان به حالت پایدار رسیده و ضریب گشتاور به صورت تناوبی نوسان می‌کند). در فاز گذرا، ضریب گشتاور نوسانات سریعی را تجربه می‌کند زیرا توربین از حالت سکون شتاب می‌گیرد و میدان جریان اطراف پره‌ها شکل می‌گیرد. با گذشت زمان، سیستم به یک حالت پایدار می‌رسد و ضریب گشتاور پایدار می‌شود و وارد فاز همگرا می‌شود. جواب همگرا نشان دهنده رفتار تناوبی بلندمدت توربین در شرایط عملیاتی داده شده است. لذا متوسط‌گیری به منظور محاسبه ضرایب آیرودینامیکی در این فاز صورت می‌گیرد.

شکل ۵، نتایج اعتبارسنجی و تأیید ضریب توربین بادی ساوننیوس با پره‌های متعارف را نشان می‌دهد که در آن نتایج شبیه‌سازی‌های دوبعدی CFD مطالعه حاضر با داده‌های تجربی و سایر شبیه‌سازی‌های عددی دوبعدی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که همخوانی و دقت مناسبی بین مطالعه حاضر و داده‌های تجربی به‌ویژه در محدوده پایین‌تر نسبت سرعت نوک پره وجود دارد. نتایج شبیه‌سازی حاضر در محدوده TSR پایین، تطابق بسیار خوبی با اختلاف به طور متوسط  $2\%$  با داده‌های تجربی سندیا دارد. با این حال، در مقادیر بالاتر سرعت نوک پره این اختلاف به  $5\%$  می‌رسد، که به علت محدودیت‌های ذاتی شبیه‌سازی‌های دوبعدی در درک پدیده‌های جریان سه بعدی پیچیده مانند آنچه در توربین‌های ساوننیوس (اثرات نوک پره) شاهد هستیم می‌باشد. علاوه بر این، مقایسه با سایر شبیه‌سازی‌های عددی دوبعدی، روندهای مشابهی از  $C_p$  را نشان می‌دهد که نشان دهنده قابلیت اطمینان کلی روش CFD به کار رفته است.

تعدالی بین دقت و امکان‌پذیری محاسباتی ایجاد کرد و روشی قوی برای شناسایی هندسه‌های پره بهینه برای توربین‌های بادی ساوننیوس با پره‌های ایرفویل شکل ارائه داد.

شبکه‌های عصبی پیشخور<sup>۱</sup> از چندین لایه نوروں به هم پیوسته تشکیل شده‌اند، جایی که اطلاعات در یک جهت واحد، از ورودی به خروجی، بدون حلقه‌های بازخورد جریان می‌یابد. لایه ورودی نشان‌دهنده پارامترهای طراحی، به طور خاص زاویه قوس پره و نسبت ضخامت به وتر، بود. لایه‌های پنهان این اطلاعات را از طریق اتصالات وزن‌دار پردازش می‌کردند و به شبکه امکان می‌دادند الگوها و روابط پیچیده را در داده‌ها شناسایی کنند. سپس لایه خروجی می‌توانست ضریب توان را بر اساس مدل آموزش دیده پیش‌بینی کند. الگوریتم پس انتشار لونیبرگ - مارکوارد<sup>۲</sup> برای آموزش استفاده شد و تابع فعال‌سازی به کار رفته یک تابع Log-Sigmoid پیوسته، مشتق‌پذیر و غیرخطی است.

### ۳- صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی

#### ۳-۱- استقلال حل عددی از شبکه مکانی و زمانی

برای ارزیابی تأثیر شبکه مکانی بر عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی ساوننیوس، سه تراکم مش مختلف به ترتیب شبکه با مش درشت، شبکه با مش متوسط و شبکه با مش ریز در نظر گرفته شد. نتایج این بررسی مطابق جدول زیر است:

شبکه	المان‌ها	$C_p$
پره متعارف		
شبکه درشت	۹۸۴۴۱	۰.۲۰۳۹ (-۰.۳۳۸)
شبکه متوسط	۱۵۲۶۱۲	۰.۲۱۱۴ (-۰.۱۴۹)
شبکه ریز	۲۱۰۸۰۰	۰.۲۱۰۸
پره ایرفویل شکل		
شبکه درشت	۱۱۲۵۹۴	۰.۲۲۷۱ (-۰.۲)
شبکه متوسط	۱۸۳۸۶۹	۰.۲۳۲۷ (-۰.۰۵)
شبکه ریز	۲۴۶۳۳۵	۰.۲۳۱۵

به‌منظور بررسی دقیق تر استقلال زمانی و یافتن گام زمانی ایی که پایداری شبیه‌سازی را تأیید کند، گام‌های زاویه‌ای ( $d\theta$ ) برابر با  $0.24$ ،  $0.12$  و  $0.06$  اعمال شده و ضرایب توان متناظر با آن‌ها در جدول زیر نشان داده شده است.

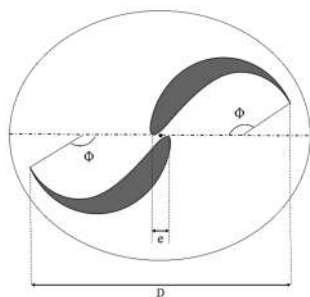
گام زاویه‌ای $d\theta$	$0.12^\circ$	$0.06^\circ$
گام زمانی (s)	$1.292 \times 10^{-4}$	$6.46 \times 10^{-5}$
ضریب توان $C_p$	۰.۲۳۳۱	۰.۲۳۲۸

همانطور که از مطالعات حساسیت‌سنجی نسبت به شبکه مکانی و

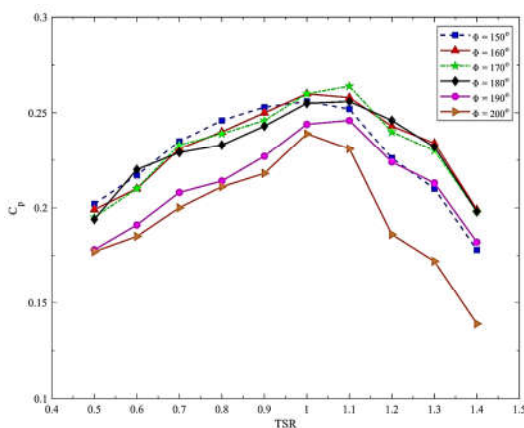
<sup>۱</sup> Feedforward Neural Networks

<sup>۲</sup> Marquardt Levenberg backpropagation

پس از رسیدن به این زاویه بهینه، با افزایش بیشتر زاویه قوس پره، ضریب توان کاهش می‌یابد که علت آن افزایش نیروی پسا و کاهش راندمان آیرودینامیکی است.



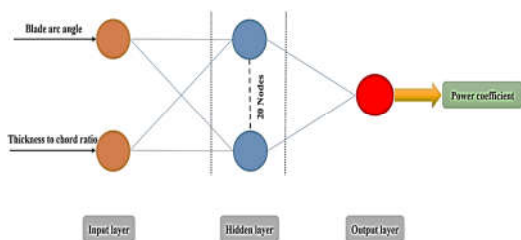
شکل ۶- پره‌های ایرفویل شکل با زاویه قوس پره  $\Phi$



شکل ۷- تغییرات  $C_p$  به ازای مقادیر مختلف  $\Phi$  و  $T/C = 0.21$

#### ۲-۴- ارزیابی عملکرد شبکه عصبی

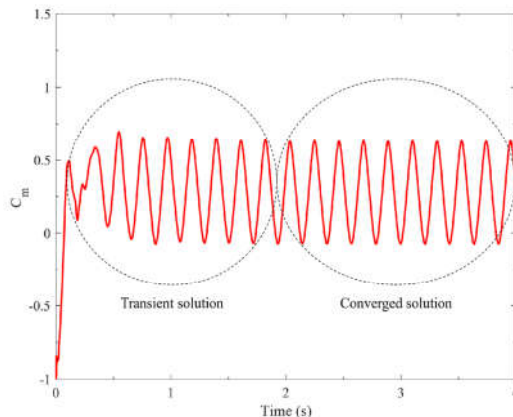
شکل ۸ ساختار شبکه عصبی به کار رفته در این مطالعه را نشان می‌دهد.



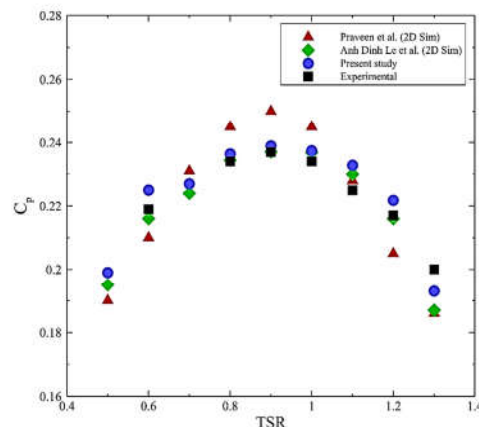
شکل ۸- ساختار شبکه عصبی بکار رفته در این پژوهش

عملکرد یک شبکه عصبی آموزش‌دیده با استفاده از معیارهای مختلف ارزیابی می‌شود که در میان آن‌ها، ضریب رگرسیون  $(R)$ <sup>۱</sup> یک شاخص حیاتی است. مقدار  $R$  نزدیک یا مساوی ۱ نشان‌دهنده یک

<sup>۱</sup> Regression Factor



شکل ۴- نمودار زمانی ضریب گشتاور برای روتور با پره ایرفویل شکل در  $TSR = 1$



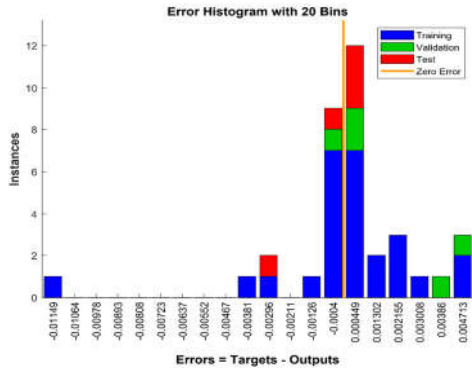
شکل ۵- ضریب توان توربین با پره متعارف در این پژوهش و مطالعات تجربی و عددی پیشین

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- تأثیر زاویه قوس پره

به‌منظور بررسی اثر پارامتر زاویه قوس پره ( $\Phi$ ) بر عملکرد توربین بادی ساونیس با پره‌های ایرفویل شکل، شبیه‌سازی‌های عددی با زوایای قوس پره و نسبت‌های سرعت نوک پره مختلف انجام شد. با تغییر این زاویه در این بازه، می‌توان به طور قابل توجهی بر خروجی توان و عملکرد کلی توربین تأثیر گذاشت. دلیل این امر آن است که زاویه قوس پره به طور مستقیم بر میزان انرژی بادی که می‌تواند جذب شده و به انرژی چرخشی تبدیل شود، تأثیر می‌گذارد. در شکل ۶ مراد از زاویه قوس پره برای توربین مدنظر نشان داده شده است.

همان‌طور که در نمودار ۷ مشاهده می‌شود، زاویه قوس پره در محدوده  $150^\circ$  تا  $200^\circ$  و نسبت سرعت نوک پره در محدوده  $0.5$  تا  $1.4$  تغییر کرده است. به طور کلی با افزایش زاویه قوس پره برای یک نسبت سرعت نوک مشخص، ضریب توان نیز افزایش می‌یابد. این روند قابل انتظار است، زیرا با افزایش زاویه قوس پره، توربین می‌تواند انرژی بیشتری از باد جذب کند. با این حال، نمودار همچنین نشان می‌دهد که برای هر نسبت سرعت نوک، یک زاویه قوس پره بهینه وجود دارد.

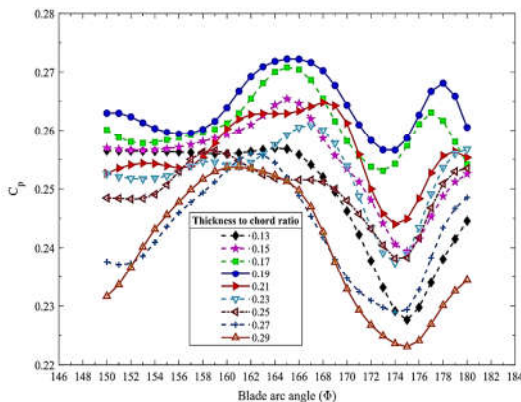


شکل ۱۰- نمودار توزیع خطای شبکه عصبی

با تمرکز بر TSR بهینه و تغییر زاویه قوس پره و نسبت ضخامت به وتر، مجموعه‌ای از ۳۶ نقطه داده تولید می‌شود. مجموعه داده تولید شده برای آموزش یک شبکه عصبی با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی استفاده می‌شود. مقادیر پارامترهای بررسی شده در شبیه‌سازی‌های عددی در جدول ۴ ارائه شده است. شکل ۱۱ ضریب توان پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی را به عنوان تابعی از زاویه قوس پره و نسبت ضخامت به وتر نشان می‌دهد.

جدول ۶- پارامترهای مورد بررسی در شبیه‌سازی‌های عددی

نسبت ضخامت به وتر	زاویه قوس پره ( $\Phi$ )
۰٫۱۳، ۰٫۱۵، ۰٫۱۷، ۰٫۱۹، ۰٫۲۱،	۱۵۰°، ۱۶۰°، ۱۷۰°، ۱۸۰°
۰٫۲۳، ۰٫۲۵، ۰٫۲۷، ۰٫۲۹	



شکل ۱۱- ضریب توان پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی به‌عنوان تابعی از  $\Phi$  و  $T/C$

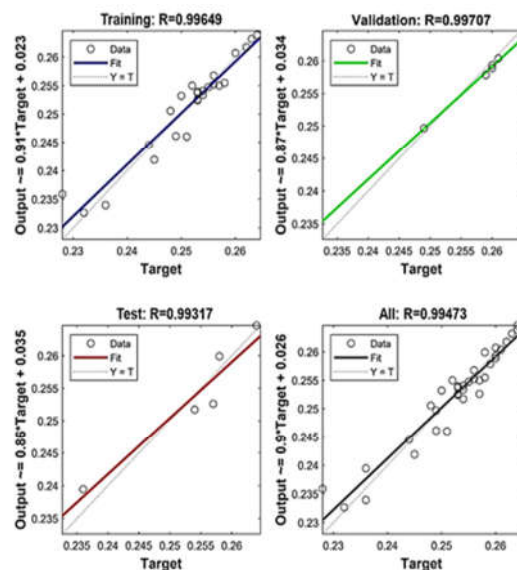
با افزایش مقدار  $\Phi$ ، ضریب توان ابتدا افزایش می‌یابد، به بالاترین نقطه خود می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد. این شکل نشان می‌دهد که نسبت  $T/C$  ایده‌آل به زاویه قوس پره بستگی دارد. نسبت  $T/C$  کمی بالاتر تمایل دارد عملکرد را برای زوایای قوس پره کوچکتر بهبود بخشد. از طرف دیگر، برای زوایای قوس پره بزرگتر، نسبت  $T/C$  پایین‌تر ممکن است موثرتر باشد. مدل شبکه عصبی تخمین می‌زند که ضریب توان پیک در  $\Phi = 165^\circ$  و  $T/C = 0.19$  رخ می‌دهد. شبیه‌سازی عددی

همبستگی مثبت قوی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و واقعی است. در این مطالعه، مقادیر  $R$  برای مجموعه‌های داده آموزش، اعتبارسنجی و آزمایش به ترتیب  $0.99649$ ،  $0.99707$  و  $0.99317$  بود، که مطابق شکل ۹، نشان‌دهنده یک شبکه عصبی بسیار آموزش‌دیده و قادر به پیش‌بینی‌های دقیق است. با تجزیه و تحلیل مقادیر  $R$ ، محققان و مهندسان می‌توانند از دقت و قابلیت اطمینان پیش‌بینی‌های مدل اطمینان حاصل کنند. یافته‌ها نشان می‌دهد که این شبکه عصبی آموزش‌دیده می‌تواند به عنوان یک ابزار ارزشمند برای بهینه‌سازی طراحی و عملکرد توربینهای بادی ساونیوس عمل کند.

جدول ۵- ابرمتغیرهای شبکه عصبی مصنوعی بکار رفته

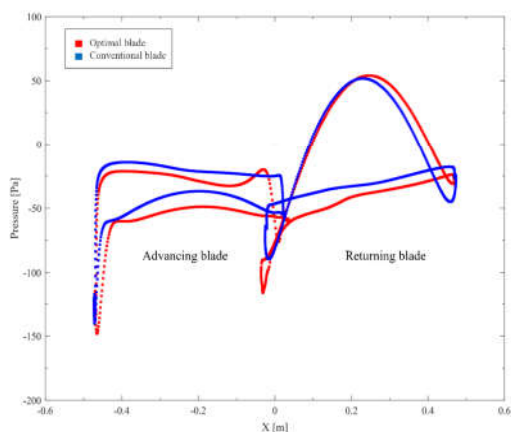
مشخصات	متغیرها
۲	ورودی
۱	خروجی
۱	لایه پنهان شبکه عصبی
۲۰	تعداد نورون‌ها
۲۰ / ۱۰ / ۷۰	درصد آموزش / صحت‌سنجی / آزمایش
لونبرگ - مارکوارد	الگوریتم پس‌انتشار
۴-۱۰	میانگین مربعات خطا
۴-۱۰	حد عملکرد
لاگ سیگموئید	تابع فعال‌سازی لایه پنهان
purelin	تابع فعال‌سازی لایه خروجی

شکل ۱۰، هیستوگرام خطا که توزیع خطاهای شبکه آموزش دیده می‌باشد، هیستوگرام خطای یک توزیع نرمال با اکثر خطاهای متمرکز در نزدیکی صفر (در حدود  $0.005$ ) را نشان می‌دهد که گویای دقت بالای شبکه حتی برای نقاط داده ندیده در محدوده تعریف شده است.



شکل ۹- نمودار ضریب رگرسیون

تفاوت فشار بین لبه‌های پیشرو و برگشتی پره‌ها به عنوان مکانیسم اصلی تأثیرگذار بر توزیع فشار عمل می‌کند، که مسئول تولید گشتاور مورد نیاز برای چرخش است. برای تجزیه و تحلیل دقیق‌تر، از خطوط سرعت و فشار استفاده شد. کانتور فشار، میدان فشار اطراف روتور را نشان می‌دهد و به وضوح منطقه فشار بالا در بالادست پره برگشتی و منطقه فشار پایین در پایین دست آن را برجسته می‌کند. این بینش برای کسب درک عمیق‌تر از مکانیسم تولید گشتاور توسط روتور بسیار مهم است.



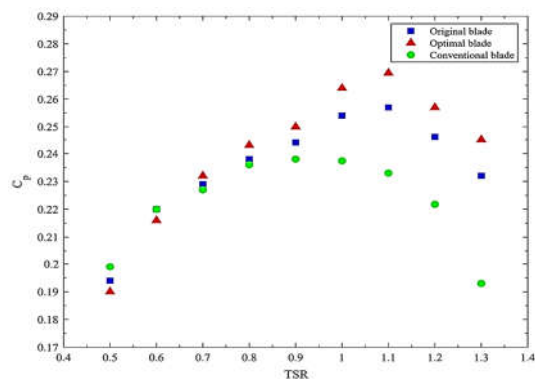
شکل ۱۵- توزیع فشار بر روی پره‌های متعارف و ایرفویل شکل

در لبه پیشرو پره (نقطه رکود)، فشار ابتدا افزایش می‌یابد و سپس با شتاب گرفتن جریان بر روی سطح محدب پره کاهش می‌یابد. خطوط سرعت و فشار نشان می‌دهند که طراحی پره بهینه شده کاهش فشار تدریجی‌تری را تجربه می‌کند. این رفتار نشان می‌دهد که پره بهینه شده فشار بالاتری را در سطح وسیع‌تری از سطح خود حفظ می‌کند و نیرویی که پره را به جلو می‌راند افزایش می‌دهد. قابل توجه است که مهم‌ترین جنبه در منطقه همپوشانی، به ویژه در سمت مکش پره برگشتی، ظاهر می‌شود. خطوط فشار یک منطقه فشار پایین متمایز را بلافاصله در پایین دست پره برگشتی نشان می‌دهد. این امر مستقیماً با کاهش فشار شدید (پیک مکش) مشاهده شده در شکل ۱۵ برای پیکربندی بهینه شده مطابقت دارد.

#### ۴-۳- قابلیت خودراه‌اندازی توربین با پره‌های بهینه

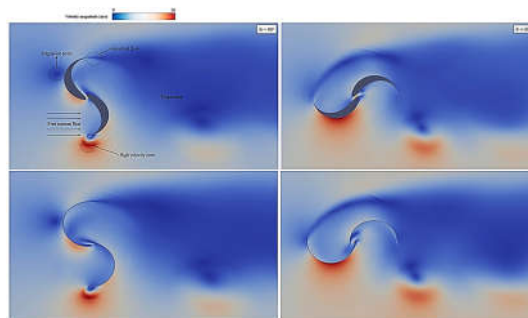
توربین بادی ساوننیوس به دلیل قابلیت خودراه‌اندازی برجسته‌اش که ناشی از طراحی آن است که از نیروی پسا برای چرخش استفاده می‌کند، شناخته شده است. برخلاف توربین‌های مبتنی بر برآ که برای شروع به سرعت باد خاصی نیاز دارند، روتور S شکل توربین ساوننیوس باد را در پره‌های مقعر خود جذب می‌کند و یک اختلاف فشار ایجاد می‌کند که گشتاور تولید می‌کند و امکان چرخش حتی در سرعت‌های باد پایین را فراهم می‌کند. این قابلیت خودراه‌اندازی، توربین‌های ساوننیوس را برای محیط‌های بادی متلاطم یا متغیر ایده‌آل می‌کند، زیرا به گشتاور خارجی یا سیستم‌های کنترل پیچیده نیاز ندارند. این سوال مطرح می‌شود که آیا پره‌های بهینه‌شده مورد مطالعه در اینجا ویژگی‌های خودراه‌اندازی مشابه پره‌های معمولی را حفظ می‌کنند یا

هندسه بهینه شده را در نسبت سرعت نوک ۱/۱ و ضریب توان ۰/۲۷ نشان می‌دهد. این مقدار به طور نزدیک با پیش‌بینی ۰/۲۷۲ شبکه عصبی همخوانی دارد و منجر به اختلاف کمتر از ۱ درصد می‌شود. این همخوانی، دقت بالای شبکه عصبی در پیش‌بینی عملکرد هندسه بهینه شده را برجسته می‌کند. شکل ۱۲ ضرایب توان یک توربین را با ضرایب توان یک پره معمولی، یک پره ایرفویل شکل اولیه و یک پره ایرفویل شکل بهینه شده مقایسه می‌کند. در نسبت سرعت نوک ۱/۱، ضریب توان پره ایرفویل شکل بهینه شده ۵/۲٪ بالاتر از پره ایرفویل شکل اولیه و ۱۳/۷٪ بیشتر از پره معمولی است.

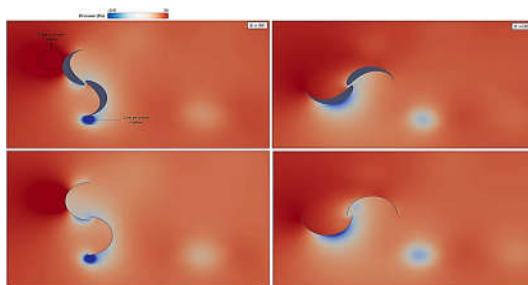


شکل ۱۲- ضریب توان توربین با شکل‌های متفاوت پره

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ کانتورهای سرعت و فشار روتور با پره‌های معمولی و بهینه شده را در  $TSR = 1/1$  و زوایای سمت به ترتیب  $90^\circ$  و  $180^\circ$  نشان می‌دهند.



شکل ۱۳- کانتور سرعت برای روتور با پره‌های ایرفویل شکل و متعارف در زوایای سمت  $90^\circ$  و  $180^\circ$



شکل ۱۴- کانتور فشار برای روتور با پره‌های ایرفویل شکل و متعارف در زوایای سمت  $90^\circ$  و  $180^\circ$

## ۵- نتیجه‌گیری

هدف این مطالعه، تجزیه و تحلیل سیستماتیک عملکرد توربین‌های بادی ساونیوس با پره‌های ایرفویل شکل، با تمرکز بر تأثیر پارامترهای هندسی کلیدی مانند زاویه قوس پره و نسبت ضخامت به وتر بود. همچنین استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در بهینه‌سازی طراحی توربین و پیش‌بینی عملکرد را بررسی کرد. شبیه‌سازی‌های عددی نشان داد که زاویه قوس پره به‌طور قابل توجهی بر عملکرد توربین تأثیر می‌گذارد. با افزایش این زاویه، ضریب توان توربین به دلیل شکل منحنی پره که جذب انرژی باد را افزایش می‌دهد، بالا می‌رود. با این حال، فراتر از یک زاویه بهینه حدود  $16.5^\circ$ ، افزایش بیشتر منجر به کاهش ضریب توان می‌شود. نتایج نشان داد که افزایش نسبت ضخامت به وتر در ابتدا ضریب توان توربین را افزایش می‌دهد، اما فراتر از مقدار بهینه  $0.19$ ، ضخیم‌سازی بیشتر منجر به کاهش عملکرد می‌شود. این نشان‌دهنده تعادل بین استحکام ساختاری پرها و راندمان آیرودینامیکی در این نقطه بهینه است.

شبکه‌های عصبی مصنوعی، ابزارهای بهینه‌سازی قدرتمند و ماهر در یادگیری روابط غیرخطی و پیچیده، در این مطالعه حیاتی بودند. پس از آموزش شبکه بر روی داده‌های شبیه‌سازی CFD، مشخص شد که ANNs می‌توانند عملکرد توربین را به طور دقیق پیش‌بینی کنند. آن‌ها به طور موثر زوایای قوس پره و نسبت‌های ضخامت به وتر بهینه را برای حداکثر کردن ضریب توان توربین شناسایی می‌کنند. این نشان می‌دهد که شبکه‌های عصبی می‌توانند زمان و هزینه‌های محاسباتی را در طراحی توربین بادی به طور قابل توجهی کاهش دهند.

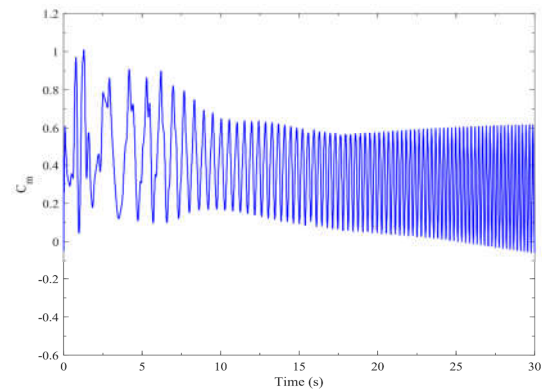
توربین‌های بادی ساونیوس به دلیل قابلیت خودراه‌اندازی خود قابل توجه هستند. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که پره‌های بهینه شده این ویژگی را حفظ می‌کنند و در سرعت‌های باد پایین عملکرد خوبی دارند. این امر پتانسیل این توربین‌ها را برای کاربردهای مختلف، به ویژه در محیط‌های شهری با شرایط باد متغیر، برجسته می‌کند. پره‌های بهینه شده منجر به افزایش  $13.7\%$  در ضریب توان توربین در مقایسه با پره‌های معمولی و افزایش  $5.2\%$  در مقایسه با طراحی اولیه پره‌های ایرفویل شکل شد. اجرای شبیه‌سازی‌های سه بعدی با مدل‌های آشفتگی دقیق‌تر به منظور رفع کاستی‌های شبیه‌سازی‌های دو بعدی که بیشتر اشاره شد و بررسی تأثیر سرعت‌های مختلف باد بر عملکرد هندسه بهینه در تحقیقات آتی مدنظر قرار خواهد گرفت.

## ۶- نمادها

A	مساحت ( $m^2$ )
C	طول وتر پره ساونیوس (m)
$C_m$	ضریب گشتاور توربین
$C_p$	ضریب توان توربین
D	قطر روتور (m)
d	قطر پره (m)
$d\theta$	گام زاویه‌ای ( $^\circ$ )
c	نسبت هم‌پوشانی
$u_T$	سرعت اصطکاکی (m/s)

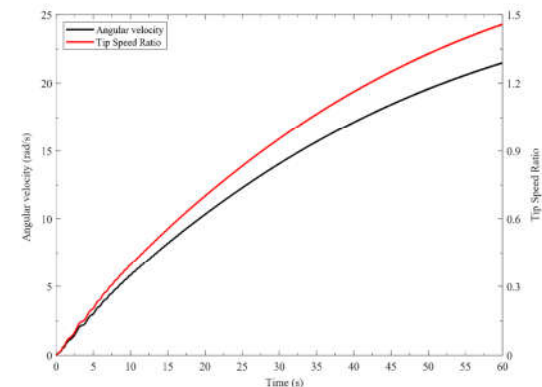
خیر. برای بررسی این موضوع، عملکرد خودراه‌اندازی پره‌های بهینه‌شده را در سرعت باد ۷ متر بر ثانیه بررسی خواهیم کرد. توربین با آلیاژ آلومینیوم T6-2014 با ارتفاع ۱ متر در نظر گرفته که منجر به جرم ۸/۱ کیلوگرم می‌شود.

شکل ۱۶ ماهیت نوسانی گشتاور تولید شده توسط توربین را نشان می‌دهد. در دوره اولیه (از ۰ تا ۵ ثانیه)، نوسانات قابل توجهی در ضریب گشتاور ( $C_m$ ) قابل مشاهده است که مربوط به مرحله راه‌اندازی توربین می‌باشد که از حالت سکون سرعت می‌گیرد. این نوسانات به تدریج با تثبیت توربین در یک حالت عملیاتی ثابت‌تر، که با نوسانات کوچکتر و منظم‌تر در اطراف یک مقدار متوسط مشخص می‌شود، کاهش می‌یابد.



شکل ۱۵- تغییرات ضریب گشتاور لحظه‌ای

شکل ۱۷ داده‌های  $C_m$  را با ارائه سرعت چرخش توربین نسبت به سرعت باد در طول زمان تکمیل می‌کند. افزایش ثابتی را نشان می‌دهد که نشان دهنده شتاب توربین است. همچنین افزایش شدید  $C_m$  در طول راه‌اندازی مشاهده می‌شود، که قابلیت خودراه‌اندازی موثر توربین، یک مزیت قابل توجه طراحی ساونیوس را برجسته می‌کند. با نزدیک شدن توربین به سرعت حالت پایدار خود، نرخ افزایش  $C_m$  کاهش یافته، که نشان دهنده تغییر از شتاب سریع ناشی از گشتاور اولیه بالا به یک رژیم پایدارتر است که در آن پسای آیرودینامیکی و سایر تلفات غالب‌تر می‌شوند.



شکل ۱۶- رفتار توربین با پره بهینه در هنگام راه‌اندازی

[13] Mohammad FUR, Alam MJ, Akhlaq A, Mahrukh M. Comparative analysis of high-lift airfoils for motorsports applications. In: 2nd International Conference on Advances in Fluid Mechanics; 2018; Ljubljana, Slovenia. انرژی جنبشی آشفته‌گی (J) k

[14] Ahtane M, Tarfaoui M, Moumen AE, Saifaoui D, Benyahia H. Design and hydrodynamic performance of a horizontal axis hydrokinetic turbine. *Int J Automot Mech Eng.* 2019;16(2):6453-69. نسبت سرعت نوک پره TSR

[15] Ayadi A, Mosbahi M, Nasraoui H, Driss Z. Investigation of a helical Savonius turbine with a deflector system. *Ocean Eng.* سرعت جریان آزاد (m/s)  $U_{\infty}$

[16] Hesami A, Nikseresht AH. Towards development and optimization of the Savonius wind turbine incorporated with a wind-lens. *Energy.* گشتاور توربین (N.m) M

[17] Bouzaher MT. Effect of flexible blades on the Savonius wind turbine performance. *J Braz Soc Mech Sci Eng.* 2022;44(2):65. فشار (Pa) p

[18] Mu Z, Tong G, Xiao Z, Deng Q, Feng F, Li Y, et al. Study on Aerodynamic Characteristics of a Savonius Wind Turbine with a Modified Blade. *Energies.* 2022;15(18):6669. مجموع سرعت‌های متوسط و نوسانی (m/s) u

[19] Xu W, Li CC, Huang SX, Wang Y. Aerodynamic performance improvement analysis of Savonius Vertical Axis Wind Turbine utilizing plasma excitation flow control. *Energy.* تابع بدون بعد دیواره  $y^+$

### علایم یونانی

[20] Masdari M, Tahani M, Naderi MH, Babayan N. Optimization of airfoil Based Savonius wind turbine using coupled discrete vortex method and salp swarm algorithm. *J Clean Prod.* لزجت دینامیکی (Pa.s)  $\mu$

[21] Akwa JV, Junio GAS, Petry AP. Discussion on the verification of the overlap ratio influence on performance coefficients of a Savonius wind rotor using computational fluid dynamics. *Renew Energy.* 2012;38(1):141-9. لزجت سینماتیکی (m<sup>2</sup>/s) v

[22] Samadi M, Hassanabad MG, Mozafari SB. Performance enhancement of low speed current Savonius tidal turbines through adding semi-cylindrical deflectors. *Ocean Eng.* سرعت زاویه‌ای توربین (rad/s)  $\omega$

[23] Seyednia M, Masdari M, Vakiliipour S. The influence of oscillating trailing-edge flap on the dynamic stall control of a pitching wind turbine airfoil. *J Braz Soc Mech Sci Eng.* 2019;41(4):185. زاویه قوس پره (°)  $\phi$

[24] Tian W, Mao Z, Zhang B, Li Y. Shape optimization of a Savonius wind rotor with different convex and concave sides. *Renew Energy.* چگالی (kg/m<sup>3</sup>)  $\rho$

### ۷- مراجع

- [1] Kozak PA. Effects of Unsteady Aerodynamics on Vertical-Axis Wind Turbine Performance. [Thesis/Report]. 2014.
- [2] Abdelghafar I, Kerikous E, Hoerner S, Thévenin D. Evolutionary optimization of a Savonius rotor with sandeel-inspired blades. *Ocean Eng.* 2023;279:114561.
- [3] Abdelaziz KR, Nawar MAA, Ramadan A, Attai YA, Mohamed MH. Performance assessment of a modified Savonius rotor: Impact of sine and conical blade profiles. *Energy.*
- [4] Dinh Le A, Nguyen Thi Thu P, Ha Doan V, The Tran H, Duc Banh M, Truong VT. Enhancement of aerodynamic performance of Savonius wind turbine with airfoil-shaped blade for the urban application. *Energy Convers Manag.*
- [5] Mao Z, Tian W. Effect of the blade arc angle on the performance of a Savonius wind turbine. *Adv Mech Eng.* 2015;7(5):1-10.
- [6] Rengma TS, Subbarao PMV. Optimization of semicircular blade profile of Savonius hydrokinetic turbine using artificial neural network. *Renew Energy.*
- [7] Aftab S, Mohd Rafie A, Razak N, Ahmad K. Turbulence model selection for low reynolds number flows. *PLoS One.*
- [8] Argyropoulos CD, Markatos N. Recent advances on the numerical modelling of turbulent flows. *Appl Math Model.* 2015;39(2):693-732.
- [9] Fatahian E, Ismail F, Ishak MHH, Chang WS. The role of wake splitter deflector on performance enhancement of Savonius wind turbine. *Phys Fluids.* 2022;34(9):095117.
- [10] Anh DL, Minh BD, Tam HV, Hung TT. Modified Savonius wind turbine for wind energy harvesting in urban environments. *J Fluids Eng.* 2022;144(8):081203.
- [11] Bre F, Gimenez JM, Fachinotti VD. Prediction of wind pressure coefficients on building surfaces using artificial neural networks. *Energy Build.*
- [12] Li F, Yao J, Eskilsson C, Pan Y, Chen J, Ji R. Investigations on the wave performance of Savonius turbine operating under initial phase-locked strategy. *Phys Fluids.* 2023;35(9):097138.