

## Journal of Sustainable Energy Systems

Home Page: <https://ses.ut.ac.ir>

## Research Paper

**2-D Numerical Simulation of Vertical Axis Wind Turbine for Performance Enhancement****Ahmad Fadaei<sup>1</sup>, Younes Noorollahi<sup>2\*</sup>**<sup>1</sup> Master of Science, Department of Renewable Energy and Environment, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Iran<sup>2</sup> Associate Professor, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Iran**ARTICLE INFO****Article History:**

Received 01 January, 2022

Revised 16 February, 2022

Accepted 16 March, 2022

**Keywords:**

Distributed generation

High solidity vertical axis wind turbine

Computational fluid dynamics

2-D simulation

**ABSTRACT****Introduction**

Due to its availability, high efficiency, and low cost, wind energy plays a critical role in the transition from energy sources to renewable sources in order to achieve sustainable development. In many villages of Iran where the required electricity does not exceed a few kilowatts and relatively good wind potential exists in different seasons of the year, the application of micro wind turbines as an off-grid source for supplying electricity to these areas can be effective in reducing greenhouse gas emissions and diminish the usage of thermal power plants. numerical and computational methods are able to evaluate the performance of wind turbines while reducing the cost of fabrication and testing required and provide the opportunity for optimizing the geometry and design of turbine with higher efficiencies.. To this end, this study has utilized the computational fluid dynamics analysis to predict and improve the performance of a high-solidity vertical axis wind turbine.

**Materials and methods**

The present study proposes a numerical simulation in Ansys 18 (commercial software), based on Computational Fluid dynamics (CFD) to predict the performance of a high-solidity, 3-blade, low-speed vertical axis wind turbine. In this regard, a two-dimensional fluid domain was generated, and a detailed meshing and a comprehensive mesh study were carried out. Various turbulence models were investigated and among them the Transition SST turbulence model showed the most acceptable results. Subsequently, other items including the boundary conditions, solver type, and time step were selected and optimized. To achieve a reliable solution to the problem and reduce the errors in the results, simulations were performed for 5 turbine rotation cycles.

**Discussion and conclusions**

Based on the results, The minimum and maximum torque of the turbine per unit length for 4<sup>th</sup> and 5<sup>th</sup> revolutions are -15.03 Nm and 45.33 Nm and the

average is 10.80 N. The power coefficient and the output power of the turbine rises as the tip speed ratio (turbine rotational speed) increases, reaches its maximum value and then decreases. In order to validate the simulation results, respective curves based on simulation and experimental data are provided and the amount of deviations are investigated. Following the model's results, The maximum turbine power coefficient is 0.29 at a blade tip speed ratio of 1.62, while laboratory data reports these values as 0.253 and 1.58. therefore, there is a 23.40% difference between experimental and model results in the maximum power coefficient. Moreover, the peak turbine power of the model occurs at a speed of 80 rpm, which is equal to 333.1 watts. However, laboratory data shows maximum turbine power as 290.6 watts at 100 rpm, which is 23.40% lower than the simulation result. According to the results, the two-dimensional simulation approach tends to overestimate the values compared to the actual data. Among the contributing factors to this inaccuracy are using 2D simulation and ignoring the gradient of velocity and pressure in the Z-axis, not considering the turbine's

\* Corresponding Author Email: noorollahi@ut.ac.ir

axis and blade-axis connections in the fluid's domain, not considering the blades tip vortices and interaction of vortices with blades in the third dimension. Since Supplying the electricity to off-grid areas in form of distributed generation by using renewable resources have been considered to be one

of the main components of sustainable development in the field of energy, vertical axis wind turbines proposed in this study are viable alternatives to commonly used diesel generator for areas with appropriate wind potential.

## فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

مقاله پژوهشی

### شبیه‌سازی دوبعدی توربین بادی محور عمودی با صلبیت بالا با هدف ارتقای عملکرد

احمد فدایی<sup>۱</sup>، یونس نوراللهی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، گروه مهندسی انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه مهندسی انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

| اطلاعات مقاله                                                                                            | چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>تاریخ‌های مقاله:</b><br>تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۱۰/۱۱<br>تاریخ بازنگری ۱۴۰۰/۱۱/۲۵<br>تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۱۲/۲۵ | استفاده از توربین‌های بادی کوچک‌مقیاس به منظور تولید پراکنده برق برای مناطق دور از شبکه سراسری، ضمن کاستن از هزینه‌های احداث نیروگاه‌های متمرکز حرارتی و انتقال برق به این مناطق، از انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط این نیروگاه‌ها جلوگیری می‌کند و دسترسی به انرژی پایدار و پاک را برای ساکنان این مناطق فراهم می‌آورد. شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری اطلاعات جامعی را از عملکرد توربین‌های بادی پیش از ساخت و نصب آن‌ها در اختیار قرار می‌دهد و امکان بهینه‌سازی طراحی را فراهم می‌کند. به همین منظور و در پژوهش حاضر، ارائه روشی عددی و شبیه‌سازی مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی در نرم‌افزار انسیس فلونت ۱۸، به منظور پیش‌بینی عملکرد توربین بادی محور عمودی با صلبیت بالا و سه‌پره مستقیم و با هدف ارتقای عملکرد، مورد بررسی قرار گرفته است. از این‌رو، پس از ایجاد هندسه دوبعدی میدان جریان، بهینه‌سازی شبکه‌بندی، اعمال شرایط مرزی و تنظیمات حلگر نرم‌افزار، از مدل آشفتگی جریان گذار اس‌اس‌تی استفاده شد. بر اساس نتایج، بیشینه ضریب توان توربین معادل ۰/۲۹ در نسبت سرعت رأس پره ۱/۶۲ است. همچنین، حداکثر توان تولیدی توربین برابر با ۳۳۳/۱ وات است. میانگین و حداقل میزان انحراف نتایج شبیه‌سازی و تست تونل باد توربین، به ترتیب ۱۹/۲۲ و ۶/۲۵ درصد است که دقت قابل قبولی دارد. نتایج این پژوهش روش شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی دوبعدی را ابزاری قدرتمند و انعطاف‌پذیر در پیش‌بینی عملکرد و بهینه‌سازی طراحی توربین‌های محور عمودی در ابعاد مختلف معرفی می‌کند. |

#### مقدمه

استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در قانون برنامه پنج‌ساله ششم توسعه جمهوری اسلامی ایران مورد تأکید فراوان قرار گرفته [۱] و بهره‌گیری از انرژی بادی به عنوان راهبردی اثربخش برای ایجاد رشد اقتصادی در کشور و تخفیف اثرات زیست‌محیطی تولید برق مطرح شده است [۲]. انرژی بادی

به دلیل در دسترس بودن، عملکرد بالا و هزینه کم، نقش ویژه‌ای در زمینه گذار از منابع انرژی به منابع تجدیدپذیر به منظور دستیابی به توسعه پایدار بازی می‌کند [۳]. در بسیاری از روستاهای کشور که توان مورد نیاز از چند ده کیلووات تجاوز نمی‌کند و از وزش نسبتاً مناسب باد در فصول مختلف برخوردارند، استفاده از توربین‌های بادی میکرو می‌تواند ضمن تأمین برق این مناطق به صورت منفصل و یا متصل به شبکه، در زمینه بهبود وضعیت محیط

\* نویسنده مسئول

Email: noorollahi@ut.ac.ir

می‌شود، ولی با جدایش این گردابه‌ها، توان توربین به‌شدت کاهش می‌یابد (مشابه شرایط واماندگی استاتیکی). از طرف دیگر، برهم‌کنش گردابه‌های پره‌های بالادست با پره‌های متحرک در پایین‌دست جریان، تأثیر قابل توجهی بر عملکرد و توان خروجی توربین می‌گذارد و تحلیل ایرودینامیکی این دسته از توربین‌ها را پیچیده می‌سازد.

به‌کارگیری روش‌های عددی و محاسباتی در بررسی عملکرد این مبدل‌های بادی می‌تواند از هزینه‌های ساخت و تست این دسته از توربین‌ها بکاهد و امکان بهینه‌سازی هندسه و طراحی توربین‌هایی با بازده بالاتر را فراهم کند. دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۵</sup> روشی اسلوب‌مند برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های مبتنی بر سیالات است که از طریق تبدیل معادلات میدان پیوسته و دیفرانسیلی به معادلات گسسته و ماتریسی و با بهره‌گیری از روش‌های عددی، امکان تجزیه و تحلیل میدان‌های جریان را فراهم می‌سازد. از این‌رو، پژوهش حاضر از روش دینامیک سیالات محاسباتی به منظور پیش‌بینی و بهبود عملکرد توربین بادی محور عمودی با صلبیت بالا بهره برده است.



شکل ۱. توربین بادی محور عمودی نوع اچ، سه پره مستقیم [۶]

### پیشینه پژوهش

تحقیقات اخیر در زمینه توربین‌های محور عمودی رویکردهای گوناگونی را برای بهینه‌سازی و افزایش عملکرد این مبدل‌های بادی اتخاذ کرده‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به بهبود ساختار هندسه توربین بادی و مواد سازنده، شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای، ارائه پیکربندی‌های نوین و افزودن تجهیزات بهبوددهنده توان و یا ترکیبی از

زیست، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و برق مصرفی از نیروگاه‌های حرارتی اثرگذار باشد. توربین بادی داریوس، توربین محور عمودی بر پایه نیروی برای ایرودینامیکی است که توسط ژان ماری داریوس<sup>۱</sup> در سال ۱۲۳۱ اختراع شد [۴]. شیوه عملکرد این توربین به این صورت است که شکل ایرفویل یا مقطع عرضی پره سبب می‌شود که سرعت جریان هوا در قسمت بالای ایرفویل از قسمت پایین بیشتر باشد، بنابراین طبق قانون برنولی، فشار در سطح بالا کمتر از سطح پایین ایرفویل خواهد شد که سبب ایجاد نیروی برآ و چرخش روتور می‌شود [۴]. از مزایای توربین‌های محور عمودی امکان نصب آسان، تولید توان پراکنده و منفصل از شبکه، ارتعاش و صدای کم و عدم نیاز به سیستم‌های کنترلی پیچیده است [۵]. به‌رغم آنکه توربین‌های بادی محور عمودی با مقیاس‌های مگاواتی بیشتر در نیروگاه‌های بادی به کار می‌روند، توربین‌های محور عمودی با ارائه مزایای منحصربه‌فرد همچنان گزینه‌ای قابل توجه به‌خصوص برای مناطق شهری به حساب می‌آیند. تعداد قطعات مکانیکی کمتر و احتمال خرابی پایین‌تر، عدم نیاز به سازه نگاه دارنده مستحکم به دلیل قرارگیری جعبه دنده و ژنراتور در پایین برج، عملکرد در بادهای با زوایا و سرعت‌های مختلف و امکان ساخت در ظرفیت‌های کم و نصب در پشت بام ساختمان‌ها همگی از تفاوت‌ها و برتری‌های توربین‌های محور عمودی در مقایسه با محور افقی به حساب می‌آیند. دسته‌بندی‌های گوناگونی برای توربین‌های محور عمودی وجود دارد که از آن میان می‌توان به دسته‌بندی بر اساس نیروی گرداننده (توربین‌های مبتنی بر برآی ایرودینامیکی و توربین‌های مبتنی بر پسی ایرودینامیکی)، شکل روتور (توربین‌های نوع اچ<sup>۲</sup>، نوع وی<sup>۳</sup>، تروپوسکین<sup>۴</sup>)، شکل پره‌ها (پره‌های مستقیم یا مارپیچی)، تعداد پره‌ها و ضریب صلبیت توربین اشاره کرد. شکل ۱ توربین محور عمودی نوع اچ با سه پره مستقیم را نشان می‌دهد. در میان توربین‌های محور عمودی، توربین‌های با صلبیت بالا سطح مقطع مؤثر بیشتری در برابر باد دارند و سرعت چرخش آن‌ها کمتر است. در این توربین‌ها، تشکیل گردابه‌ها روی سطح پره به صورت موقت سبب افزایش نیروی برآ و توان توربین

1. Jean Marie Darrieus
2. H-type
3. V-type
4. Troposkien

5. Computational Fluid Dynamics (CFD)

سیالات محاسباتی یو آر ای ان اس<sup>۱</sup> دوبعدی پرداختند [۱۰]. نتایج این مطالعه با داده‌های تجربی مورد اعتبارسنجی قرار گرفت.

سابرامانیان و همکاران تأثیر هندسه سطح مقطع ایرفویل (۴ ایرفویل با ضخامت‌های مختلف) و صلبیت را بر عملکرد توربین مورد بررسی قرار دادند [۱۱]. به این منظور، نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار فلوئنت با داده‌های تجربی توربین مقایسه شد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد شبیه‌سازی دوبعدی نتایجی بزرگ‌تر از مقادیر آزمایشگاهی را در نسبت‌های سرعت بیشتر ایجاد می‌کند که ناشی از عدم توانایی مدل دوبعدی در شمول اثرات سه‌بعدی ناشی از برهم‌کنش پره‌ها و گردابه‌ها است.

در پژوهش چایزیریوج و همکاران، دستیابی به شرایط بهینه عملکردی توربین بادی محور عمودی از طریق مقایسه عملکرد توربین بادی نصب‌شده در تایلند با نتایج شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی در نرم‌افزار ایکس-فلو<sup>۲</sup> بررسی شده است [۱۲]. به‌رغم نزدیکی نتایج مدل به داده‌های واقعی، شرایط عملیاتی غیر قابل کنترل در واقعیت، مانند وجود ذرات معلق در هوا، سرعت متغیر باد و تغییرات آب‌وهوایی که در شبیه‌سازی لحاظ نشده است، سبب تفاوت نتایج نهایی می‌شود.

الساکا و همکاران روشی سریع و دقیق مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی را به منظور محاسبه زاویه حمله پره‌های توربین بادی محور عمودی طی عملکرد آن ارائه دادند که با در نظر گرفتن دو نقطه مرجع در بالادست و پایین‌دست توربین و از طریق داده‌های سرعت، قادر به تعیین دقیق زاویه حمله لحظه‌ای، ضریب پسا و برآ و ضریب توان توربین است. این روش برای بهینه‌سازی توربین‌هایی با زاویه گام متغیر مناسب است [۱۳].

افیف و همکاران یک توربین بادی محور عمودی با سه پره مارپیچی در نرم‌افزار انسیس فلوئنت را شبیه‌سازی کردند [۱۴]. به این منظور، از مدل سه‌بعدی توربین استفاده شده است که نتایج شامل کانتورهای فشار و سرعت در میدان جریان شود.

نوراللهی و همکاران تأثیر شکل و پارامترهای هندسی داکت را بر بهبود عملکرد یک توربین بادی مجهز به داکت

راهبردهای یادشده اشاره کرد. در زمینه تحلیل عملکرد توربین‌های محور عمودی به روش دینامیک سیالات محاسباتی و شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای، هر یک از پژوهش‌های صورت‌پذیرفته جنبه‌های خاصی از ارتقای عملکرد توربین‌های بادی محور عمودی را مورد توجه و تحلیل قرار داده‌اند که تعدادی از مهم‌ترین مطالعات اخیر در ذیل مرور شده است.

براوو و همکاران عملکرد یک توربین محور عمودی با صلبیت بالا را در تونل باد مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که توربین در سرعت ۱۴ متر بر ثانیه به توان نامی خود برابر با ۳/۵ کیلووات می‌رسد، همچنین بیشینه ضریب توان توربین در نسبت سرعت نوک پره ۱/۶ برابر ۰/۳ است [۷].

همچنین، دانا و همکاران به مقایسه عملکرد توربین بادی محور عمودی در شرایط باد پایا و غیر پایا به روش دینامیک سیالات محاسباتی پرداختند [۵ و ۸]. نتایج آن‌ها نشان داد در شرایط باد پایا، نتایج مدل به‌خوبی منحنی ضریب توان مرسوم را دنبال می‌کند. در شرایط غیرپایا اثراتی مانند واماندگی و باز الحاق جریان از عوامل اثرگذار بر توان توربین هستند. آن‌ها استدلال کردند که به‌کارگیری جریان غیرپایا در سه حالت سبب بهبود عملکرد در مقایسه با شرایط پایا خواهد شد: ۱- میانگین نسبت سرعت نوک پره در شرایط غیرپایا از نسبت سرعتی که بیشترین ضریب توان را در شرایط پایا ایجاد می‌کند، بزرگ‌تر باشد. ۲- دامنه نوسانات غیرپایا کوچک باشد (۱۰ درصد) ۳- فرکانس نوسانات بزرگ باشد ( $1\text{ Hz}$ ).

لانزافامه و همکاران مدلی مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی دوبعدی به منظور پیش‌بینی عملکرد توربین محور عمودی با صلبیت پایین ارائه دادند [۹]. پس از ایجاد مش دوبعدی با جزئیات بالا و بهینه‌سازی گام زمانی، مدل‌های مختلف آشفتگی جریان در نرم‌افزار فلوئنت مورد بررسی قرار گرفت. پژوهش آن‌ها شبیه‌سازی دو بعدی را روشی مناسب و کم‌هزینه برای بررسی و بهینه‌سازی عملکرد توربین‌های محور عمودی معرفی می‌کند.

رضایی‌ها و همکاران به بررسی جامع تأثیر سائز دامنه محاسباتی (طول و عرض میدان)، قطر ناحیه محاسباتی دوار و پارامترهای مش برای تحلیل عملکرد یک توربین بادی محور عمودی با صلبیت پایین به روش دینامیک

1. Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes (URANS)  
2. X-Flow

گونه‌ای که اثرات جدایش جریان از پره‌ها به‌درستی شبیه‌سازی شود. همچنین، مش ایجاد شده تا دستیابی به کیفیت مناسب و استقلال نتایج از شبکه‌بندی<sup>۵</sup>، به‌روزرسانی و بهینه‌سازی شده است.

- اعمال تنظیمات حلگر، شرایط مرزی و تعیین مدل آشفتگی مناسب

- مقایسه نتایج و اعتبار سنجی با داده‌های آزمایشگاهی، تحلیل نتایج

جدول ۱. مشخصات فیزیکی روتور

| عنوان                                        | میزان       | واحد/نوع |
|----------------------------------------------|-------------|----------|
| تعداد پره‌ها                                 | ۳           | مستقیم   |
| پروفایل ایرفویل                              | NACA-0015   | -        |
| طول پره‌ها (L)                               | ۳           | m        |
| طول وتر پره (C)                              | ۰/۴         | m        |
| شعاع روتور (R)                               | ۱/۲۵        | m        |
| نسبت سرعت نوک پره <sup>۶</sup> ( $\lambda$ ) | ۱/۱۶ - ۱/۸۵ | -        |
| صلبیت <sup>۷</sup> ( $\sigma$ )              | ۰/۴۹        | -        |

#### ۱- هندسه و دامنه محاسباتی<sup>۸</sup>

از یک میدان جریان دوبعدی برای شبیه‌سازی سیستم استفاده شده است. استفاده از میدان دوبعدی نسبت به سه‌بعدی بار محاسباتی به‌مراتب کمتری دارد. پس از چندین مرتبه تغییر ابعاد میدان و انجام شبیه‌سازی، ابعاد میدان به‌گونه‌ای انتخاب شده است که لبه‌های میدان تأثیری بر فشار داخل میدان و بارگذاری روی پره‌ها نداشته باشد. میدان دارای یک ناحیه ثابت<sup>۹</sup> برای جریان ورودی و خروجی، یک ناحیه ثابت مرکزی به شعاع ۱ متر و یک حلقه دورانی<sup>۱۰</sup> در اطراف پره‌ها است که چرخش توربین را شبیه‌سازی می‌کند [۹]. برای افزایش دقت شبیه‌سازی، پهنای ناحیه دورانی باید تا حد امکان کوچک باشد تا تنها اثرات چرخش پره‌ها را نمایش دهد. سه ایرفویل NACA-0015 با وتر ۴۰۰ میلی‌متر با فاصله ۱/۲۵ متر از محور دوران قرار گرفته‌اند. شکل‌های ۲ و ۳ هندسه میدان جریان را نشان می‌دهند.

به روش دینامیک سیالات محاسباتی را تحلیل کردند [۱۵]. نتایج پژوهش آن‌ها بیانگر آن است که شکل و هندسه داکت تأثیر قابل توجهی بر ضریب توان توربین می‌گذارد، به طوری که ضریب توان از مقدار ۰/۴۶ در حالت بدون داکت به مقدار ۰/۷۸ با قرار دادن داکت در ورودی توربین افزایش می‌یابد (۷۰ درصد افزایش توان).

روگوسکی و همکاران تأثیر دو پارامتر ضخامت و انحنا در ایرفویل‌های ۴ رقمی سری ناسا بر عملکرد ایرودینامیکی (ماکسیمم ضریب توان، بارهای ایرودینامیکی) یک توربین بادی محور عمودی با سه پره مستقیم نوع اچ را ارزیابی کردند [۱۶]. در پژوهش یادشده تکنیک‌های مختلف دینامیک سیالات عددی از جمله دینامیک سیالات محاسباتی (مدل کی اومگا اس‌اس‌تی<sup>۱</sup>)، مدل ایکس فویل<sup>۲</sup> و مدل گردابه به منظور شبیه‌سازی و مقایسه مورد استفاده قرار گرفته است.

#### مواد و روش‌ها

در این پژوهش، مدل‌سازی روتور توربین به روش دینامیک سیالات محاسباتی دوبعدی انجام شده است. مدل‌سازی دوبعدی در مقایسه با مدل‌سازی سه‌بعدی، تعداد سلول‌ها، گره‌ها و بار محاسباتی را به طرز قابل توجهی کاهش می‌دهد و به‌رغم ناتوانی در پیش‌بینی اثرات سه‌بعدی در جریان (توزیع فشار در سه بعد، مؤلفه بعد سوم سرعت)، در بسیاری از پژوهش‌های پیشین، به عنوان روش اصلی به کار برده شده و از دقت قابل قبولی برخوردار است [۹] و [۱۷]. از این‌رو، در این پژوهش نیز از هندسه دوبعدی میدان استفاده شده است. شبیه‌سازی در نرم‌افزار فلوئنت ۱۸ صورت گرفته و نتایج در محیط سی اف دی پست<sup>۳</sup> اخذ و تحلیل شده است. با توجه به اینکه به نتایج تست تونل باد روتور دسترسی داشتیم، برای اعتبارسنجی نتایج مدل از آن‌ها استفاده شده است [۷]. مشخصات فیزیکی روتور شبیه‌سازی شده مطابق جدول ۱ است.

مراحل انجام شبیه‌سازی و اخذ نتایج به ترتیب زیر است:

- ایجاد هندسه دوبعدی میدان جریان

- تولید مش<sup>۴</sup> با جزئیات بالا، اعمال مش لایه مرزی به

5. Mesh independence

6. Tip speed ratio

7. solidity

8. Computational domain

9. Stationary domain

10. Rotational domain

1. K-W SST

2. XFoil

3. CFD post

4. Meshing

المان ۰/۱ متر و تابع سایز از نوع یکنواخت استفاده شده است. در میدان محاسباتی، تعداد کل المان‌ها<sup>۷</sup> ۱۴۸۸۸۷ و تعداد گره‌ها<sup>۸</sup> برابر ۷۶۳۹۳ است. مقدار متوسط خوابیدگی شبکه<sup>۹</sup> برابر ۰/۰۵۳ و مقدار متوسط نسبت منطری شبکه بندی<sup>۱۰</sup> ۱/۳۶۲ است. جدول ۳ پارامترهای مهم کیفیت مش و شکل‌های ۴ و ۵ شبکه‌بندی میدان محاسباتی در این مدل‌سازی را نشان می‌دهد.

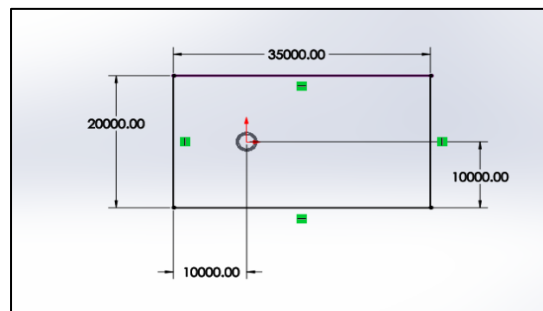
جدول ۲. پنجره تنظیمات پیشرفته تابع سایز مش - شبکه‌بندی میدان چرخان

| عنوان                        | اندازه         |
|------------------------------|----------------|
| تابع سایز مش                 | نزدیکی و انحنا |
| میزان رشد                    | ۱/۲            |
| کوچک‌ترین ابعاد محلی (متر)   | ۰/۰۰۹          |
| کوچک‌ترین ابعاد نزدیکی (متر) | ۰/۰۰۱          |

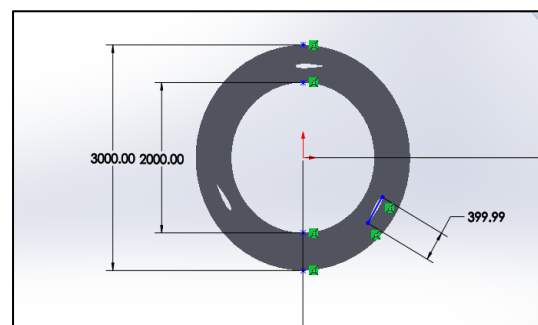
جدول ۳. پارامتر خوابیدگی و نسبت منطری برای میدان محاسباتی

| پارامترهای کیفیت شبکه | نسبت منطری | خوابیدگی                 |
|-----------------------|------------|--------------------------|
| کمینه                 | ۱/۰۰۰۲     | $4/7105 \times 10^{-10}$ |
| بیشینه                | ۸۷/۲۹۹     | ۰/۸۹۱۲۶                  |
| میانگین               | ۱/۳۶۲۱     | $5/3712 \times 10^{-10}$ |
| انحراف معیار          | ۲/۲۸۰۳     | $6/4198 \times 10^{-10}$ |

به منظور دستیابی به استقلال نتایج شبیه‌سازی از کیفیت مش، سه حالت شبکه‌بندی لحاظ شده است: ۱- ۱۴۸۸۸۷ المان (شرایط پایه)، ۲- کاهش ۳۰ درصد تعداد المان‌ها ناشی از کاهش سایز المان‌ها در میدان‌های ثابت و متحرک (حدود ۱۰۵ هزار المان) و ۳- افزایش ۳۰ درصد تعداد المان‌ها (حدود ۲۰۰ هزار المان). در هر حالت، مقدار گشتاور متوسط واحد طول توربین توسط نرم‌افزار محاسبه شده است (جدول ۴). با توجه به نتایج، با افزایش تعداد المان‌ها و تراکم شبکه از حالت ۲ به ۱، گشتاور متوسط توربین به میزان ۱۵/۵ درصد افزایش یافته است. در عین حال، با وجود افزایش ۳۰ درصد تعداد المان‌ها از حالت ۱ به ۳، تنها ۵ درصد بهبود نتایج مشاهده می‌شود. افزایش تعداد المان‌ها سبب افزایش قابل توجه زمان شبیه‌سازی می‌شود و نتایج مؤید این امر است که با افزایش تعداد



شکل ۲. هندسه میدان ثابت



شکل ۳. هندسه میدان چرخان

## ۲- شبکه‌بندی میدان محاسباتی

برای ایجاد شبکه، از مش‌بندی ترکیبی<sup>۱</sup> استفاده شده است. برای صرفه‌جویی در محاسبات و زمان، در نواحی دور از روتور که گردابه‌ها میرا می‌شوند، مش درشت‌تر و در نواحی اطراف پره‌ها مش ریزتر به کار برده شده است. در میدان ثابت مرکزی (دایره مرکزی) از مش نوع مثلثی غیر ساختار یافته<sup>۲</sup> با ابعاد المان ۰/۱ متر و تابع سایز<sup>۳</sup> از نوع یکنواخت<sup>۴</sup> و ضریب رشد ۱/۲ تا مرز مشترک ناحیه حلقوی استفاده شده است. همچنین، در ناحیه چرخشی، مش نوع مثلثی غیر ساختار یافته با ضریب رشد ۱/۱، سایز المان ۰/۱ متر و تابع سایز از نوع مجاورت و انحنا<sup>۵</sup> به کار گرفته شده است. در جدول ۲، تنظیمات بخش تابع سایز برای ناحیه حلقوی آورده شده است.

در اطراف پره‌ها، ۲۰ لایه مش لایه مرزی<sup>۶</sup> با ضریب رشد ۱/۱ و حداقل ضخامت برابر ۰/۱ متر به کار برده شده است. برای ناحیه ثابت اطراف پره‌ها تا لبه‌های میدان از مش مثلثی غیر ساختار یافته با ضریب رشد ۱/۱، سایز

1. Hybrid mesh
2. triangular unstructured
3. Size function
4. uniform
5. Proximity and curvature
6. Inflation quad

7. Element  
8. Nodes  
9. skewness  
10. Aspect ratio

پره‌ها، به‌خصوص پدیده واماندگی دینامیکی<sup>۷</sup> و برهم‌کنش پره‌ها با ناحیه اغتشاش<sup>۸</sup> ناشی از پره‌های دیگر و همچنین، ماهیت غیرپایای مسئله که نیل به شرایط پایا را دشوار می‌سازد، از حلگر گذرا و پردازش موازی استفاده شده است. حلگر از نوع مبتنی بر فشار<sup>۹</sup> و سرعت مطلق<sup>۱۰</sup> انتخاب شد. از میان مدل‌های سیمپل<sup>۱۱</sup>، پیزو<sup>۱۲</sup> و کوپل فشار-سرعت<sup>۱۳</sup>، نتایج بهتری از الگوریتم پیزو به دست می‌آید [۹].

در نظر گرفتن گام زمانی<sup>۱۴</sup> مناسب برای شبیه‌سازی صحیح حالت گذرا ضروری است. گام زمانی باید به گونه‌ای باشد که نوسانات آشفته در بازه‌های زمانی کوچک را در بر گیرد و پدیده‌های مرتبط با آن را نمایش دهد. گام زمانی بزرگ منتج به نتایج غیرفیزیکی می‌شود و گام زمانی بسیار کوچک هزینه محاسباتی سنگینی خواهد داشت. پس از چند مرتبه اجرای شبیه‌سازی، گام زمانی مناسب این مسئله برابر با زمان چرخش پره به اندازه یک درجه در نظر گرفته شد. اندازه گام زمانی برای سرعت چرخش ۸۰ دور بر دقیقه طبق معادله ۱ محاسبه می‌شود.

$$N = 80 \text{ RPM} = 8.38 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 480 \frac{\text{deg}}{\text{s}} = 0.002 \frac{\text{s}}{\text{deg}} \quad (1)$$

که در آن  $N$  سرعت چرخش توربین (دور بر دقیقه) است.

#### ۵- مدل آشفتگی جریان

یکی از موضوعات مهم در شبیه‌سازی جریان روی ایرفویل، پدیده واماندگی و جدایش جریان از روی ایرفویل به علت گردایان فشار معکوس<sup>۱۵</sup> است که مدل آر ای ان اس به درستی آن را شبیه‌سازی نمی‌کند. از سوی دیگر، در اعداد رینولدز پایین، بخش قابل توجهی از لایه مرزی آرام<sup>۱۶</sup> است و مدل کاملاً آشفته برای لایه مرزی نتایج قابل قبولی ارائه نمی‌دهد [۹]. با توجه به اعداد رینولدز پایین در شبیه‌سازی توربین بادی محور عمودی با صلبیت بالا و اهمیت پدیده واماندگی در شبیه‌سازی آن‌ها، مدل کامل‌تر و دقیق‌تری مورد نیاز است.

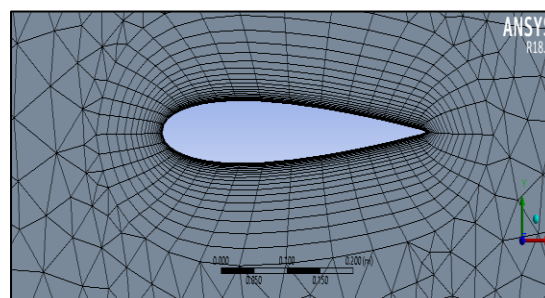
المان‌ها از حالت پایه، درصد بهبود نتایج قابل اغماض و مسئله به همگرایی نسبی رسیده است. بنابراین، حالت پایه به عنوان شبکه‌بندی بهینه در نظر گرفته شد.

جدول ۴. تأثیر شبکه‌بندی بر نتایج شبیه‌سازی

| تعداد المان | گشتاور متوسط توربین (N.m) | بهبود نتایج نسبت به حالت پایه (درصد) |
|-------------|---------------------------|--------------------------------------|
| ۱ ۱۴۸۸۸۷    | ۱۰/۸۰                     | -                                    |
| ۲ ۱۰۵۰۰۰    | ۹/۳۵                      | -۱۵/۵۱                               |
| ۳ ۱۹۸۲۰۰    | ۱۱/۳                      | ۴/۶۳                                 |

#### ۳- شرایط مرزی

لبه سمت چپ میدان دارای شرط سرعت ورودی<sup>۱</sup> با سرعت یکنواخت ۶/۳ متر بر ثانیه عمود بر دیواره سمت چپ است. شدت آشفتگی<sup>۲</sup> برابر ۰/۱ درصد و میزان لزجت آشفتگی<sup>۳</sup> برابر ۱۰ در لبه ورودی و خروجی است. عدد رینولدز پره‌ها تقریباً برابر ۱۷۰ هزار و دیواره‌های بالا و پایین میدان، شرایط مرزی تقارن را دارد. در دیواره سمت راست میدان، شرط فشار استاتیکی خروجی<sup>۴</sup> برابر ۱ بار اعمال شده است. سطح پره‌ها در شرایط عدم لغزش قرار دارد. مرز میان ناحیه‌های ثابت و دوار به عنوان شرط مرزی فصل مشترک<sup>۵</sup> در نظر گرفته شده است. ناحیه حلقوی از نوع مش لغزشی<sup>۶</sup> با سرعت دورانی ۲۰-۱۲۰ دور بر دقیقه به مرکز مبدأ مختصات کلی لحاظ شده است. شکل ۶ شرایط مرزی حاکم بر میدان مسئله را نشان می‌دهد.



شکل ۴. مش‌بندی اطراف پره

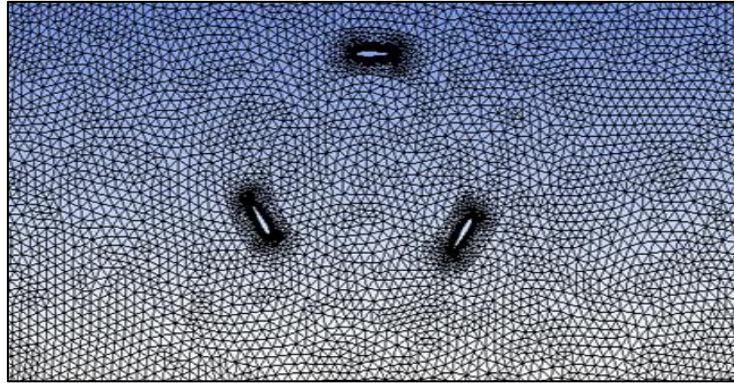
#### ۴- تنظیم حلگر

برای به حساب آوردن آثار غیر پایای حاکم در جریان اطراف

7. Dynamics Stall
8. wake
9. Pressure based
10. Absolut velocity
11. SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations)
12. PISO (Pressure-Implicit with Splitting of operators)
13. Pressure velocity coupling
14. Time step
15. Adverse pressure gradient
16. Laminar

1. Velocity inlet
2. Turbulent viscosity
3. Turbulent Viscosity Ratio
4. Pressure outlet
5. interface
6. Sliding mesh





شکل ۵. مش‌بندی میدان ثابت و متحرک

آرام به آشفته روی ایرفویل را نیز به‌خوبی نشان می‌دهد. با توجه به موارد یادشده، برای شبیه‌سازی توربین و بررسی عملکرد آن از مدل گذار اس اس تی بهره برده شده است.

#### ۶- روابط توربین‌های بادی

معادلات حاکم بر میدان جریان اطراف توربین بادی که توسط نرم‌افزار حل می‌شود، شامل معادلات بقای جرم<sup>۱</sup> و اندازه حرکت<sup>۲</sup> است.

برای جریان تراکم‌ناپذیر در شرایط گذرا، معادلات ۲ و ۳ برقرار است:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2)$$

$$\rho \left[ \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right] = -\nabla P + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (3)$$

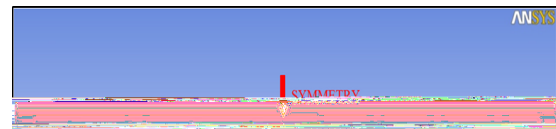
که در آن  $\vec{V}$  بردار سرعت مطلق در میدان جریان (m/s)،  $\rho$  چگالی هوا ( $\text{Kg/m}^3$ )،  $P$  فشار استاتیکی (Pa)،  $g$  شتاب جاذبه ( $\text{m/s}^2$ )،  $\mu$  لزجت مطلق (Pa.s) است.

۶-۱- نسبت سرعت رأس پره: این پارامتر نسبت سرعت خطی در نوک پره توربین به سرعت جریان آزاد باد است. رابطه ۴ این کمیت را بیان می‌کند.

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_w} \quad (4)$$

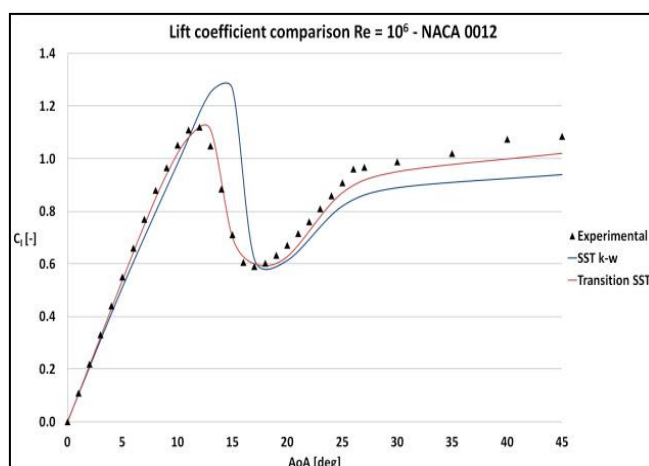
که در آن  $\lambda$  نسبت سرعت رأس پره (بدون بعد)،  $\omega$  سرعت زاویه‌ای توربین (rad/s)،  $R$  شعاع توربین (m) و  $V_w$  سرعت جریان آزاد (m/s) است.

در این پژوهش از مدل گذار اس اس تی استفاده شده است که نتایج بسیار مقایسه‌پذیر با نتایج آزمایشگاهی ارائه می‌دهد. برای نمایش برتری مدل برگزیده نسبت به سایر مدل‌های کاملاً آشفته، منحنی‌های ضرایب برآ و پسا، حاصل از شبیه‌سازی فلوئنت و نتایج آزمایشگاهی برای ایرفویل ثابت NACA-0012 مطابق شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است.

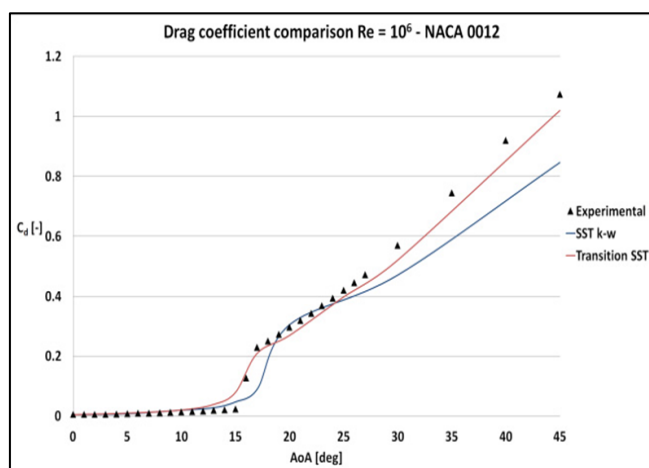


شکل ۶. شرایط مرزی حاکم بر میدان محاسباتی [۹]

همان‌طور که مشخص می‌شود، مدل کی اومگا اس اس تی، مقادیر ضریب برآی ایرودینامیکی را در نزدیکی زاویه استال بیش از مقدار حقیقی آن و مقادیر ضریب پسای ایرودینامیکی را کمتر از مقدار حقیقی آن پیش‌بینی می‌کند. همچنین، در این مدل زاویه واماندگی به مقدار قابل توجهی بزرگ‌تر از مقدار آن در نتایج آزمایشگاهی است. از سوی دیگر، مدل گذار اس اس تی در بازه‌ای وسیع مطابقت بالایی با نتایج آزمایشگاهی دارد و پدیده واماندگی را به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کند. این مدل گذار، لایه مرزی



شکل ۷. ضریب برآی ایرودینامیکی، مقایسه مدل‌های آشفته و نتایج تونل باد [۹]



شکل ۸. ضریب پسای ایرودینامیکی، مقایسه مدل‌های آشفته و نتایج تونل باد [۹]

در این رابطه  $C_p$  ضریب توان روتور،  $\rho$  چگالی هوا ( $\text{kg/m}^3$ )،  $T$  گشتاور واحد طول (N)،  $\omega$  سرعت دوران روتور ( $\text{rad/s}$ )،  $V_w$  سرعت جریان آزاد ( $\text{m/s}$ ) و  $A$  سطح مؤثر توربین ( $\text{m}^2$ ) است.

#### ۷- شرایط شبیه‌سازی

پس از انتخاب مدل آشفتگی مناسب و اعمال شرایط مرزی، شبیه‌سازی توربین در محیط نرم‌افزار فلوئنت صورت پذیرفت. از این‌رو، از پنل مانیتور برای مشاهده و ثبت مقادیر خطای باقی‌مانده متغیرها و مقادیر گشتاور توربین بر حسب زمان استفاده شد. سرعت جریان ورودی برابر مقدار ثابت  $6/3$  متر بر ثانیه است و سرعت چرخش توربین با گام  $20$  دور بر دقیقه افزایش می‌یابد. برای دستیابی به جواب پایای مسئله و کاهش خطای نتایج

۶- ۲. ضریب صلبیت توربین بادی: صلبیت توربین‌های محور عمودی برابر با نسبت سطح پره‌ها به کل سطح مؤثر توربین است و توسط رابطه ۵ بیان می‌شود.

$$\sigma = \frac{NC}{D} \quad (5)$$

که در آن  $\sigma$  ضریب صلبیت توربین (بی‌بعد)،  $N$  تعداد پره‌ها،  $C$  وتر پره ( $\text{mm}$ ) و  $D$  قطر روتور ( $\text{mm}$ ) است.

۶- ۳. ضریب توان توربین: این کمیت بیانگر نسبت توان تولیدی توربین به کل توان جنبشی باد است. در حقیقت، ضریب توان نشان‌دهنده بازده توربین‌های بادی است که رابطه ۶ آن را بیان می‌کند.

$$C_p = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho V_w^3 A} \quad (6)$$

شبیه‌سازی برای ۵ دور چرخش توربین انجام شد. جدول ۵ اطلاعات شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

جدول ۵. شرایط اجرای شبیه‌سازی

| عنوان                      | واحد            | اندازه |
|----------------------------|-----------------|--------|
| گام افزایش دور توربین      | دور بر دقیقه    | ۲۰     |
| اندازه گام زمانی شبیه‌سازی | چرخش توربین     | ۱°     |
| تعداد گام‌های زمانی        | دور چرخش توربین | ۵      |
| سرعت ابتدایی توربین        | دور بر دقیقه    | ۲۰     |

## نتایج و بحث

شکل ۹ منحنی گشتاور توربین (مجموع سه پره) بر حسب زاویه قرارگیری آن‌ها را برای سرعت چرخش ۸۰ دور بر دقیقه نشان می‌دهد. این منحنی از برآیند منحنی‌های گشتاور هر یک از سه پره بر حسب زمان و تبدیل آن به زاویه ترسیم شده است. جهت پاد ساعتگرد به عنوان جهت مثبت زاویه و گشتاور در نظر گرفته شده است. برای جلوگیری از تأثیر اثرات غیر پایایی حاکم در شروع چرخش توربین بر نتایج، شبیه‌سازی برای ۵ دور چرخش انجام شد و نتایج دو دور آخر (دورهای ۴ و ۵) گزارش شده است. با توجه به شکل ۹، کمترین مقدار گشتاور واحد طول توربین برای این دو دور برابر ۱۵/۰۳- نیوتون، بیشترین مقدار آن برابر ۴۵/۳۳ نیوتون و متوسط آن معادل ۱۰/۸۰ نیوتون است.

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب نتایج شبیه‌سازی ضریب توان توربین بر حسب نسبت سرعت نوک پره و توان توربین بر حسب سرعت چرخش و مقایسه آن‌ها با داده‌های آزمایشگاهی تونل باد را نشان می‌دهد. ضریب توان تولیدی توربین با افزایش نسبت سرعت رأس پره (سرعت چرخش توربین) افزایش می‌یابد و در مقدار معینی از نسبت سرعت به حداکثر مقدار خود می‌رسد، با افزایش نسبت سرعت، ضریب توان و توان تولیدی توربین کاهش می‌یابد. شبیه‌سازی برای بازه  $0.4 < \lambda < 2.43$  و  $20 < N < 120$  (دور بر دقیقه) صورت پذیرفته است. با توجه به شکل ۱۰، بیشینه ضریب توان توربین از نتایج شبیه‌سازی برابر ۰/۲۹ در نسبت سرعت رأس پره ۱/۶۲ است، در حالی که داده‌های آزمایشگاهی این مقدار را ۰/۲۵۳ و در نسبت سرعت رأس پره ۱/۵۸ گزارش می‌کند و نتایج شبیه‌سازی، اختلافی ۲۳/۴۰ درصدی با نتایج تجربی را در بیشینه ضریب توان نشان می‌دهد. علاوه بر این و با توجه به شکل ۱۱، بیشینه

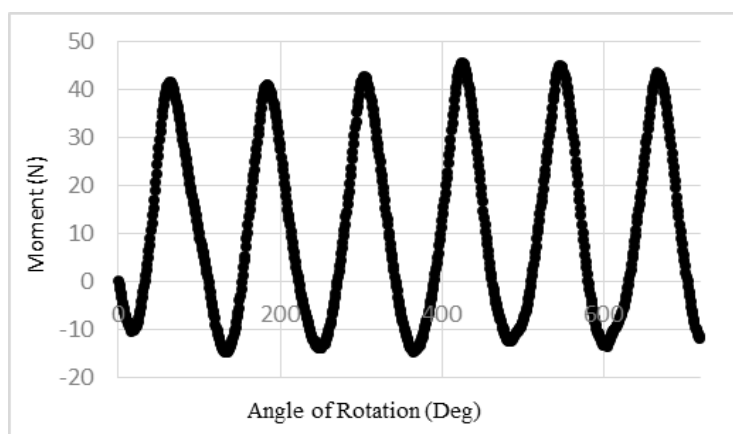
توان توربین بر اساس نتایج شبیه‌سازی در سرعت ۸۰ دور بر دقیقه رخ می‌دهد که مقدار آن برابر ۳۳۳/۱ وات است. با این وجود، داده‌های آزمایشگاهی بیشینه توان توربین را ۲۹۰/۶ وات و در سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه گزارش می‌کند که ۲۳/۴۰ درصد کمتر از نتیجه شبیه‌سازی است. بیشینه و کمینه اختلاف بین خروجی‌های مدل و داده‌های توربین باد برای ضریب توان و توان تولیدی توربین به ترتیب، ۳۴/۰۷ درصد و ۶/۲۵ درصد هستند.

نتایج بیانگر آن است که شبیه‌سازی دوبعدی توربین بادی محور عمودی، نتایج را بیش از مقادیر واقعی نشان می‌دهد. از دلایل اختلاف میان نتایج عددی و آزمایشگاهی، به کارگیری شبیه‌سازی ۲ بعدی و در نظر نگرفتن اثرات و مؤلفه‌های سه‌بعدی از جمله توزیع سرعت و فشار در راستای  $z$ ، عدم لحاظ هندسه محور توربین و میله‌های متصل‌کننده پره‌ها به محور در شبیه‌سازی، عدم شبیه‌سازی گردابه‌های نوک پره‌ها، برهم‌کنش گردابه‌ها و پره‌ها در بعد سوم و توزیع نامنظم سه‌بعدی فشار در میدان جریان است که بر مقادیر گشتاور و توان توربین اثر می‌گذارد.

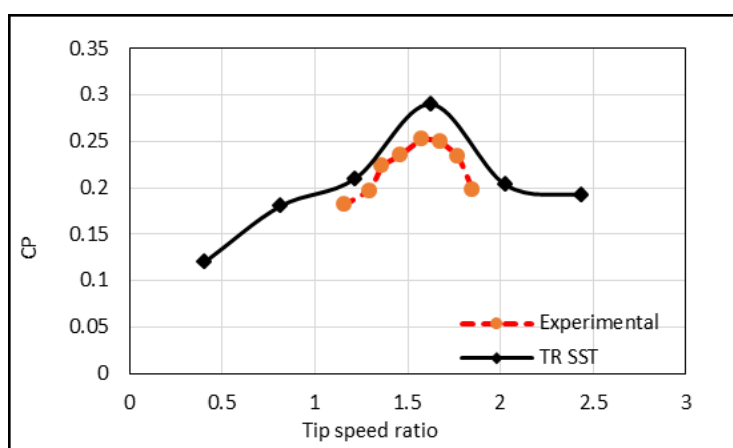
شکل‌های ۱۲ و ۱۳ تعدادی از نتایج گرافیکی اخذشده در محیط CFD-Post هستند. شکل ۱۲ پدیده جدایش جریان از سطح مکشی پره را نشان می‌دهد. بر اثر چرخش پره‌ها و تغییر دائمی زاویه حمله، پدیده واماندگی دینامیکی<sup>۱</sup> در توربین‌های با صلبیت بالا اتفاق می‌افتد که ناشی از جدایش لایه مرزی از سطح پره است. شکل ۱۳ گسترش ناحیه اغتشاش در میدان جریان و پایین‌دست توربین را نشان می‌دهد. قرارگیری پره‌ها در مقابل جریان، سبب ایجاد ناحیه کم سرعت و کاملاً آشفته در پشت آن‌ها می‌شود که ناحیه اغتشاش نام دارد.

برهم‌کنش پره‌های پایین‌دست با گردابه‌های ناشی از پره‌های بالادست تأثیر قابل توجهی بر گشتاور و توان توربین و ایجاد ارتعاش در پره‌ها می‌گذارد. همان‌طور که در شکل ۱۳ نیز مشخص است، اثرات اغتشاش در پایین‌دست توربین به تدریج میرا می‌شود.

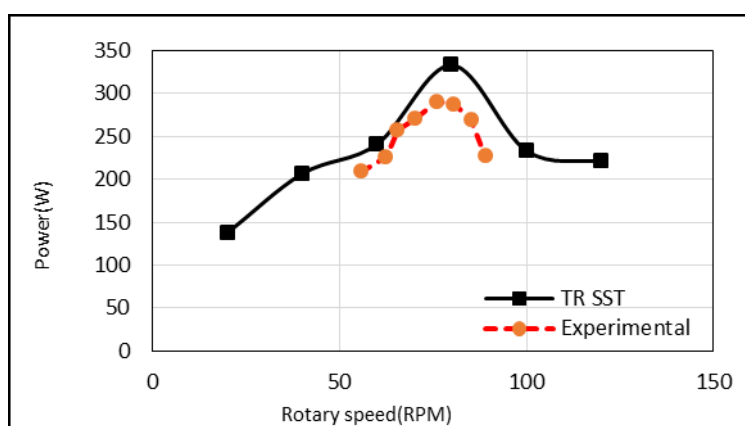
1. Dynamic stall



شکل ۹. گشتاور توربین بر حسب زاویه چرخش، دو دور چرخش توربین،  $N=80$  RPM

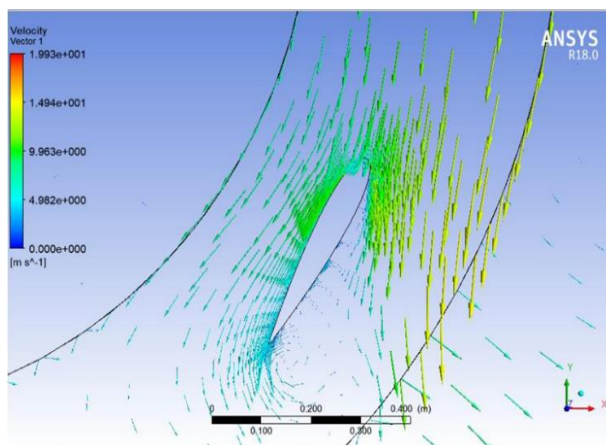


شکل ۱۰. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی، ضریب توان توربین بر حسب نسبت سرعت رأس پره

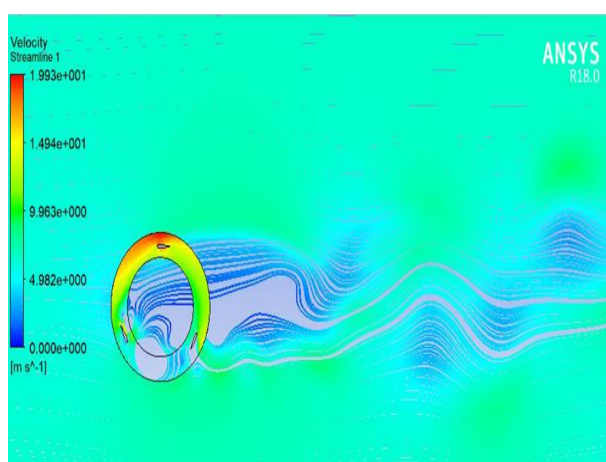


شکل ۱۱. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی، توان تولیدی توربین بر حسب سرعت چرخش توربین

فدائی و نوراللهی: شبیه‌سازی دوبعدی توربین بادی محور عمودی با صلبیت بالا با هدف ارتقای عملکرد



شکل ۱۲. بردارهای سرعت و جدایش جریان از روی پره، زاویه  $240^\circ$



شکل ۱۳. کانتور خطوط جریان و گسترش ناحیه اغتشاش در میدان ثابت و متحرک

موارد ذیل می‌تواند در پژوهش‌های آینده مد نظر قرار گیرد و بهبود داده شود:

- شبیه‌سازی هندسه سه‌بعدی میدان جریان و بررسی میزان بهبود نتایج در مقایسه با شبیه‌سازی دوبعدی
- بهبود مدل آشفتگی جریان از طریق استفاده از کدهای کامپیوتری توسعه داده شده توسط کاربر
- در نظر گرفتن توزیع احتمال سرعت باد ورودی به جای سرعت ثابت باد

با در نظر گرفتن هزینه اقتصادی بسیار کم و انعطاف‌پذیری روش شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی در برابر ساخت نمونه توربین و تست آن و همچنین، هزینه محاسباتی اندک و دقت قابل قبول نتایج حاصل از شبیه‌سازی دوبعدی، روش تبیین‌شده در این پژوهش می‌تواند به عنوان راهبرد اصلی در بررسی عملکرد توربین‌های محور عمودی مد نظر قرار گیرد. نظر به اینکه

## نتیجه‌گیری

استفاده از توربین بادی محور عمودی برای تأمین برق مناطق دور از شبکه، یکی از روش‌های تأمین برق با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر است که تأثیرات مثبت و فراوان اقتصادی و زیست‌محیطی را به همراه خواهد داشت. در همین راستا و در پژوهش حاضر، شبیه‌سازی دوبعدی میدان جریان غیر پایا در اطراف یک توربین محور عمودی با صلبیت بالا و سه پره مستقیم، به روش دینامیک سیالات محاسباتی و در نرم‌افزار آنسیس فلوئنت ۱۸ انجام شد. در پی آن و به منظور اعتبارسنجی مدل، نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تست تونل باد توربین مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی، بیشینه ضریب توان توربین را در نسبت سرعت رأس پره  $1/62$  و برابر با  $0/29$  گزارش می‌کند. میانگین و کمینه خطای نتایج به ترتیب  $19/22$  درصد و  $6/25$  درصد است. با توجه به نتایج اخذشده،

- [9]. Lanzafame R, Mauro S, Messina M. 2D CFD modeling of H-Darrieus wind turbines using a transition turbulence model. *Energy Procedia*. 2014; 45: 131-140.
- [10]. Rezaeiha A, Kalkman I, Blocken B. CFD simulation of a vertical axis wind turbine operating at a moderate tip speed ratio: guidelines for minimum domain size and azimuthal increment. *Renewable energy*. 2017; 107: 373-385.
- [11]. Subramanian A, Sivanandan H, Giri A, Madhavan V, Vivek M, Velamati R. Effect of airfoil and solidity on performance of small scale vertical axis wind turbine using three dimensional CFD model. *Energy*. 2017; 133: 79-190.
- [12]. Chaisirirot P, Tinnachote N, Usajantragul S, Leephakpreeda T. Experimental performance investigation of optimal vertical axis wind turbines under actual wind conditions in Thailand. *Energy Procedia*. 2017; 138: 651-656.
- [13]. Elsakka M, Ingham B, Ma L, Pourkashanian M. CFD analysis of the angle of attack for a vertical axis wind turbine blade. *Energy Conversion and Management*. 2019; 182: 54-165.
- [14]. Afif A, Wulandari P, Syahriar A. CFD analysis of vertical axis wind turbine using Ansys fluent. *Journal of Physics: Conference Series* 1517. 2020.
- [15]. Noorollahi Y, Ghanbari S, Tahani M. Numerical analysis of a small ducted wind turbine for performance improvement. *International Journal of Sustainable Energy*. 2019; 39: 290-307.
- [16]. Rogowski K, Hansen M.O.L, Bangga G. Performance Analysis of a H-Darrieus Wind Turbine for a Series of 4-Digit NACA Airfoils. *Energies*. 2020; 13(12): 3196.
- [17]. McLaren K, Tullis S, Ziada S. Computational fluid dynamics simulation of the aerodynamics of a high solidity, small-scale vertical axis wind turbine. *Wind Energy*. 2012; 15(3): 349-361.

گسترش تولید انرژی الکتریکی پراکنده در محل‌های مصرف با بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر، از مؤلفه‌های دستیابی به توسعه پایدار در حوزه انرژی است، بهره‌گیری از توربین‌های بادی کوچک‌مقیاس در مکان‌هایی با پتانسیل مناسب باد سالیانه و دور از شبکه، به عنوان جایگزینی مطلوب برای دیزل ژنراتورها و مولدهای فسیلی پیشنهاد می‌شود.

## منابع

- [1]. <https://rc.majlis.ir/fa/law>: Accessed January 15, 2022
- [2]. Noorollahi Y, Yousefi H, Mohammadi M. Multi-criteria decision support system for wind farm site selection using GIS. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2016; 13: 38-50.
- [3]. Østergaard P.A, Duic N, Noorollahi Y, Mikulcic H, Kalogirou S. Sustainable development using renewable energy technology. *Renewable energy*. 2020; 146: 2430-2437.
- [4]. Adibfar A. wind power plant. 1<sup>st</sup> ed. Tehran: Pendarpars; 2016 [Persian]
- [5]. Amini Sh, Golzarian M. Simulation of 3-blade darrieus vertical axis wind turbine. *National biomechanic congress*. 2017 [Persian].
- [6]. B.C. Cochran, Damiani R.R. Harvesting wind power from tall buildings. *CTBUH 8<sup>th</sup> world congress*. 2008.
- [7]. Bravo R, Tullis S, Ziada S. Performance testing of a small vertical-axis wind turbine. *Proceedings of the 21st Canadian Congress of Applied Mechanics*. 2007.
- [8]. Danao L.A, Edwards J, Eboibi O, Howell R. A numerical investigation into the influence of unsteady wind on the performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine. *Applied Energy*. 2014; 116: 111-124.