

## Numerical Simulation of Savonius Vertical Axis Wind Turbine and Evaluation of the Effect of Horizontal Overlap Parameter on its Performance

Mohammad Ebrahimpour<sup>1</sup>, Rouzbeh Shafaghat<sup>2</sup>, Rezvan Alamian<sup>3</sup> and Mostafa Safdari Shadloo<sup>4</sup>

1- Sea-Based Energy Research Group, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

2\*- Sea-Based Energy Research Group, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

3- Sea-Based Energy Research Group, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

4- CORIA Lab. / CNRS, University and INSA of Rouen, 76000 Rouen, France

<sup>1</sup>m.ebrahimpour.0123@gmail.com, <sup>2\*</sup>rshafaghat@nit.ac.ir, <sup>3</sup>ralamian@nit.ac.ir, and <sup>4</sup>msshadloo@coria.fr

Corresponding author address: Rouzbeh Shafaghat, Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, Post Code : 47148 – 71167.

**Abstract-** Savonius wind turbine is a vertical axis wind turbine type which its performance is not dependent on wind direction. In this paper, the effect of overlap ratios in the common semi-cylindrical Savonius wind turbine is investigated with a comprehensive attitude. In this regard, positive and negative overlap ratios are considered by maintaining the rotor diameter. Numerical modeling is conducted using Ansys-Fluent commercial software and sliding mesh method. Simulations are carried out by using RANS method and Realizable K- $\epsilon$  turbulence model. By examining the velocity contours around the blades in different overlap ratios, it is found that the perturbation is higher in the circumference of the blades with negative overlap ratios. This reduces the useful net momentum. Moreover, according to the torque and power coefficients, it is found that in general, geometry with an overlap ratio of + 0.15 could be more appropriate.

**Keywords-** Vertical axis wind turbine, Savonius, Overlap ratio, Torque coefficient, Power coefficient.

## شبیه‌سازی عددی توربین باد محور عمودی نوع ساوونیوس و ارزیابی تاثیر فاصله

### هم‌پوشانی افقی بر عملکرد توربین

محمد ابراهیم پور<sup>۱</sup>، روزبه شفقت<sup>۲\*</sup>، رضوان عالمیان<sup>۳</sup>، مصطفی صفدری شادلو<sup>۴</sup>

۱- گروه پژوهشی انرژی‌های دریایایه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

۲- گروه پژوهشی انرژی‌های دریایایه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

۳- گروه پژوهشی انرژی‌های دریایایه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

4- CORIA Lab. / CNRS, University and INSA of Rouen, 76000 Rouen, France

<sup>1</sup> m.ebrahimpour.0123@gmail.com, <sup>2\*</sup> rshafaghat@nit.ac.ir, <sup>3</sup> ralamian@nit.ac.ir, and <sup>4</sup> msshadloo@coria.fr

\* نشانی نویسنده مسئول: روزبه شفقت، بابل، خیابان شریعتی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی مکانیک، کدپستی: ۷۱۱۶۷-۴۷۱۴۸

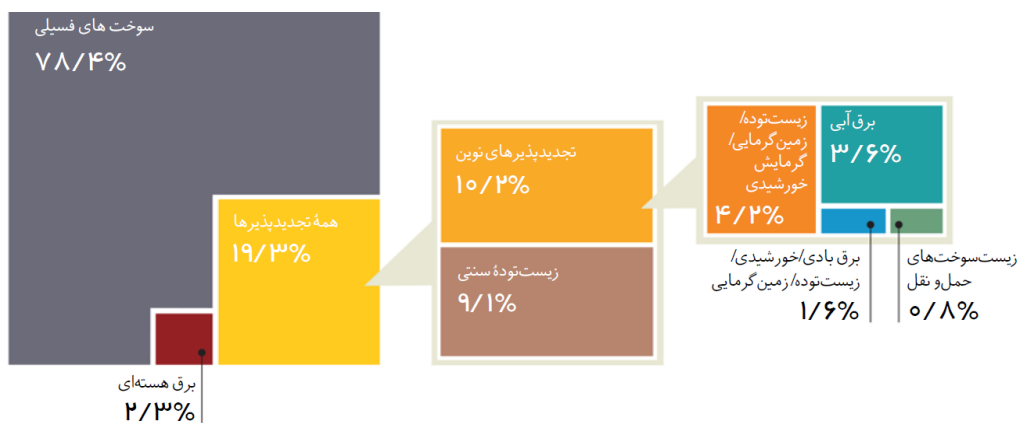
چکیده- توربین باد ساوونیوس از زیرمجموعه‌های توربین‌های باد محور عمودی بوده، به جهت وزش باد وابستگی ندارند. در این پژوهش به بررسی تأثیر نسبت‌های هم‌پوشانی در توربین باد ساوونیوس نیمه‌استوانه‌ای متداول با نگرشی جامع پرداخته شده است؛ در این راستا با ثابت نگه‌داشتن اندازه‌ی قطر خارجی روتور و با در نظر گرفتن دو حالت هم‌پوشانی مثبت و منفی، تأثیر فاصله‌ی هم‌پوشانی افقی مورد بررسی قرار گرفته است. جهت مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار تجاری انسیس - فلونت و روش مش لغزان بهره برده شد. همچنین شبیه‌سازی‌ها با استفاده از روش RANS و مدل توربولانس  $k-\epsilon$  Realizable انجام گردید. با بررسی کانتورهای سرعت در اطراف پره‌ها در هم‌پوشانی‌های مختلف، مشخص گردید که در اطراف پره‌های با هم‌پوشانی منفی میزان آشفتنگی بیشتر می‌باشد. این امر موجب کاهش مومنتم خالص مفید می‌شود. همچنین، با توجه به نمودارهای ضریب گشتاور و ضریب توان مشخص شد که در حالت کلی، هندسه با نسبت هم‌پوشانی ۰/۱۵+ می‌تواند از دیگر موارد مناسب‌تر باشد.

واژه‌های کلیدی: توربین بادی محور عمودی، ساوونیوس، نسبت هم‌پوشانی، ضریب گشتاور، ضریب توان.

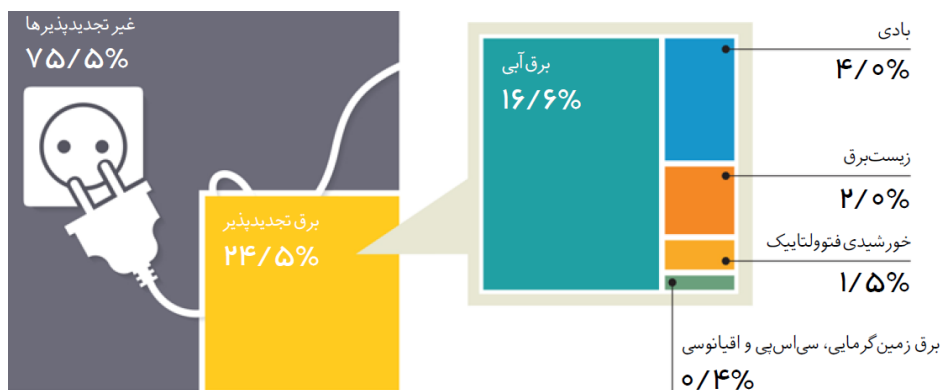
#### ۱- مقدمه

در میان انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد، به عنوان کم‌هزینه‌ترین منبع انرژی قابل دسترس به‌شمار می‌آید. با توجه به شکل ۱ این منبع سهم کمی از انرژی مصرفی کلی جهان را تأمین می‌کند؛ با این حال پتانسیل خوبی برای افزایش سهم انرژی باد در تأمین انرژی وجود دارد. در حوزه تولید برق جهان، منابع انرژی تجدیدپذیر، نقش پررنگ‌تری را نسبت به دیگر حوزه‌های کاری ایفا می‌کنند و در حدود ۲۵ درصد از انرژی الکتریکی جهان را تأمین می‌کنند (شکل ۲). سهم انرژی بادی در این بخش در حدود ۰/۴٪ است [۲]، که سهم پایینی می‌باشد و با توجه به پتانسیل انرژی باد در سرتاسر کره خاکی باید به مقادیر بالاتری در این زمینه دست یافت.

امروزه با افزایش جمعیت کشورها، نیاز روزافزون به انرژی و نیز کاهش منابع سوخت فسیلی از یک سو و قوانین سخت‌گیرانه در رابطه با محیط زیست و گرمایش جهانی، از سوی دیگر، زمینه را برای ادامه کار سوخت‌های فسیلی دشوار و نظرها را به سمت منابع تجدیدپذیر انرژی جلب کرده است [۱]. طبق گزارشات ارائه شده در وضعیت جهانی انرژی‌های تجدیدپذیر، تقسیم‌بندی مصرف انرژی جهان در سال ۲۰۱۵، براساس منابع انرژی فسیلی، هسته‌ای و تجدیدپذیر، به ترتیب ۷۸/۴، ۲/۳ و ۱۹/۳ درصد بوده است (شکل ۱) [۲].



شکل ۱: سهم تقریبی انرژی تجدیدپذیر از مصرف انرژی نهایی جهان، ۲۰۱۵ [۲].

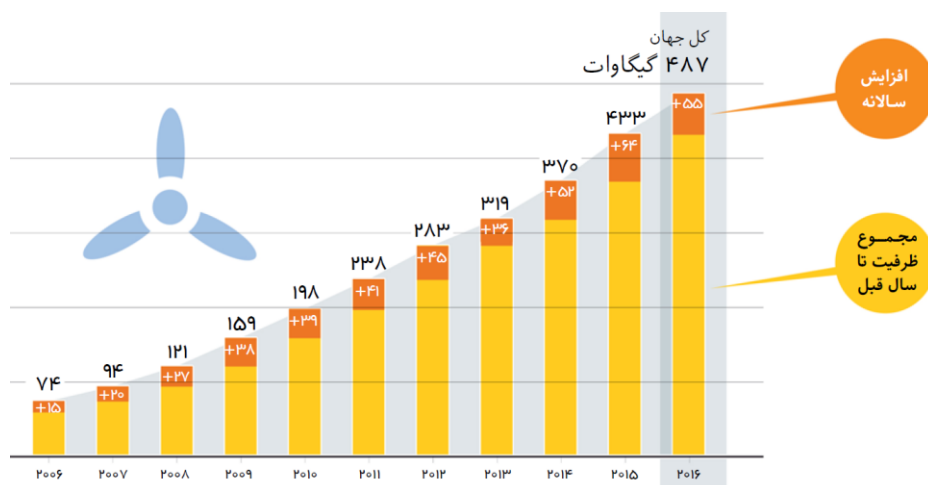


شکل ۲: سهم تقریبی انرژی تجدیدپذیر از تولید برق جهان، ۲۰۱۵ [۲].

ظرفیت کلی باد در پایان سال ۲۰۱۶ حدود ۴۸۷ گیگاوات است (شکل ۳). از پیشگامان در این مسیر، کشورهای چین، آمریکا و آلمان هستند. پیش‌بینی می‌شود، ظرفیت کلی باد در دنیا تا سال ۲۰۳۰ به مقدار ۲۰۰۰ گیگاوات برسد و بتواند پاسخ‌گوی ۱۷ تا ۱۹ درصد از تقاضای جهانی برق باشد [۳].

امروزه استفاده از توربین باد، متداول‌ترین روش بهره‌گیری از نیروی باد در جهان است. توربین‌های بادی انرژی جنبشی باد را به توان

با رشد سریع جمعیت جهانی، تقاضا برای انرژی نیز افزایش خواهد یافت؛ بنابراین، بسیاری از کشورها در سرتاسر جهان، استفاده از تکنولوژی‌های مرتبط با انرژی تجدیدپذیر را برای تولید انرژی پاک و بی‌پایان در برآورده ساختن تقاضای روزافزون برای برق مورد توجه قرار داده‌اند. از سال ۱۹۹۶ ظرفیت تولید انرژی از نیروی باد، به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر در حال رشد جهان امروز، به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است.

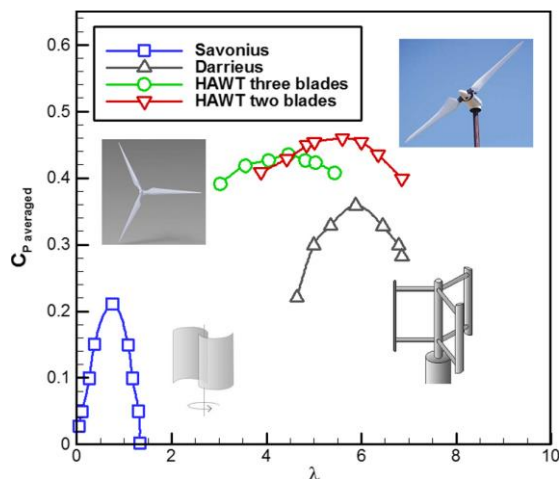


شکل ۳: ظرفیت برق بادی و افزایش سالانه آن، ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۶ [۲].

محیط‌های با باد تند و طوفانی و همچنین هر زمان که قابلیت اطمینان و هزینه از میزان بهره‌وری مهم‌تر باشد، این توربین بهترین گزینه است و برخلاف توربین داریوس نیاز به نیروی خارجی برای شروع به کار ندارد. در کار حاضر، هدف بررسی یک نوع خاص از توربین درگ‌محور است. مفهوم کلی توربین درگ‌محور بر پایه اصول توسعه یافته الگوی فلتنر<sup>۱</sup> بنا نهاده شد [۴]. در سال‌های اخیر تحقیقات مختلفی به منظور بهبود عملکرد این توربین‌ها انجام شده است. فردریکس و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۵، تأثیر تعداد پره بر کارایی توربین ساوینیوس را به‌طور تجربی و عددی، بررسی و بیان کردند که توربین با چهار پره برای نسبت سرعت نوک پایین موثر است و برای نسبت سرعت نوک بالا، توربین با سه پره کارایی بیشتری دارد. مارکادو و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۸ به بررسی تجربی و عددی نوع جدیدی از توربین‌های ساوینیوس پرداختند هدف از این کار طراحی توربینی از منظر زیباشناسی می‌باشد که برای این منظور، قطر میانی روتور نسبت به دو انتهای آن افزایش یافت و همچنین به بررسی حالت پیچشی آن با زاویای پیش مختلف پرداخته شده است، نتایج تجربی نشان از آن بوده که روتور جدید در رینولدز یکسان، با نسبت سرعت نوک کمتری نسبت به ساوینیوس نوع معمول می‌چرخد و برای سرعت‌های بالاتر کاربرد دارد. روی و ساها [۷] نیز در سال ۲۰۱۵ یک هندسه جدید به نام بیج<sup>۲</sup> اصلاح شده را به صورت تجربی بررسی کرده، افزایش راندمان را مدعی شدند. تهامی و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۷ پنج مدل روتور ساوینیوس ساده، ساوینیوس پیچشی، ساوینیوس ساده با صفحه برش متغیر، ساوینیوس پیچشی با صفحه برش متغیر و ساوینیوس با دو یا سه پره همراه با شفت مخروطی را به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی کرده و تأثیر پارامترهای مختلف همچون ارتفاع روتور و ضریب توان را بررسی کردند تا در نهایت حالت بهینه در این توربین‌ها را بیابند. لی و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۷ به بررسی ویژگی‌های عملکردی و شکل توربین ساوینیوس پیچشی، با زوایای مختلف پیچش پرداختند و ضرایب توان و گشتاور را در زوایای آزمون مختلف، به‌صورت عددی و تجربی محاسبه کردند. هم‌خوانی خوبی بین داده‌های آزمایش و نتایج شبیه‌سازی به‌دست آمد. همچنین بالاترین ضریب توان در زاویه پیچش ۴۵ درجه پره به‌دست آمد. این مقدار برابر ۰/۱۳ محاسبه شد. رمدان و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۸ به بررسی عددی و تجربی سه نوع توربین ساوینیوس ۲ و ۳ پره و مدل بهینه‌یافته پرداختند، مقادیر ضرایب توان برای سه پره، به ترتیب برابر با ۰/۱۷، ۰/۱۱ و ۰/۲۹ محاسبه شد که افزایش چشمگیر بازده توربین بهینه نسبت به دو مدل دیگر را نشان می‌دهد.

با نگاهی به کارهای گذشته می‌توان دریافت، تغییر هندسه تاثیر

مکانیکی و در نهایت به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. در صنعت انرژی باد، دو نوع اصلی از توربین‌های بادی وجود دارد: توربین بادی محور افقی و توربین بادی محور عمودی. به طور کلی، بازده توربین‌های محور افقی در استخراج انرژی باد نسبت به توربین‌های محور عمودی بهتر است همانطور که در شکل ۴ نمودار تغییرات ضریب توان متوسط نسبت به پارامتر نسبت سرعت نوک نشان داده شده است توربین‌های محور افقی بازده بالاتری نسبت به توربین‌های محور عمودی دارند. بنابراین، بیشتر توربین‌های بادی در بازار تجاری امروز، توربین‌های محور افقی می‌باشند.

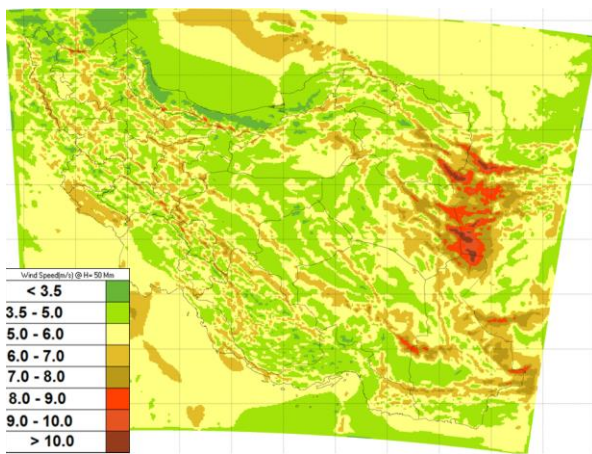


شکل ۴: منحنی تغییرات ضریب توان ماکزیمم توربین‌های بادی مختلف با تغییر نسبت سرعت نوک [۱].

با این حال، تمایلات جدید در استفاده از فناوری توربین‌های محور عمودی از سوی محققان و تولیدکنندگان و همچنین مزایای آن، تلاش‌ها را به سمت توسعه این دست از توربین‌های بادی آورده است. در بعضی موارد، این توربین‌ها دارای مزیت‌های بالاتری نسبت به نوع افقی است؛ از جمله آن‌ها می‌توان به عدم وابستگی به جهت وزش باد، نگهداری آسان‌تر، تاثیر بصری کمتر، تولید سر و صدای کمتر و عملکرد بهتر در شرایط جریان باد مایل، اشاره نمود. بادهای شهری به دلیل وجود موانع بسیار (به عنوان مثال ساختمان‌ها) شامل جریان‌های بی‌وقفه، غیرمستقیم و متقاطع است که به همین دلیل، توربین‌های محور عمودی در مقایسه با توربین‌های شایع و گسترده‌تر محور افقی، برای شرایط شهری مناسب‌تر است [۳]. توربین‌های بادی با محور عمودی به شکل‌های مختلفی ساخته می‌شوند. دو نوع عمده آنها، توربین‌های لیفت‌محور (داریوس) و درگ‌محور (ساوینیوس) هستند. توربین‌های لیفت‌محور برای سرعت‌های بالا و گشتاور کم طراحی شده‌اند و برای شروع به کار به یک نیروی خارجی و یا دستی نیازمندند. توربین‌های درگ‌محور برای سرعت‌های پایین و گشتاور بالا طراحی شده‌اند.

همپوشانی ۰ و ۰/۳۲، در زاویه تغییر فاز ۶۰ درجه و برای نسبت همپوشانی ۰/۱۶، در زاویه تغییر فاز ۳۰ درجه گزارش شد. ژمامو و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۷ در پژوهش مروری خود توربین ساوننیوس را بررسی کردند و نتایج آن‌ها در بخش همپوشانی نشان از آن داشت که حالت بهینه بین نسبت همپوشانی ۰/۱ تا ۰/۳ قرار خواهد داشت.

تفاوت مطالعه‌ی حاضر با کارهای پیشین، تعریف نسبت همپوشانی به صورت مقادیر مثبت و منفی نسبت به حالت پایه (با همپوشانی صفر) می‌باشد تا بیشترین راندمان قابل دسترسی در یک ناحیه با مساحت جاروب ثابت، برای ابعاد و موقعیت‌های مختلف پره مشخص شود. هنگامی که طول کورد پره از اندازه آن در حالت همپوشانی صفر، بزرگ‌تر باشد، مقدار نسبت همپوشانی، مثبت، و در صورتی که کوچک‌تر باشد، مقدار نسبت همپوشانی منفی تعریف می‌شود. مطابق با اطلس جغرافیایی (شکل ۶) مربوط به ارتفاع متوسط ۵۰ متر در سال ۱۳۹۵، سرعت باد مناسب و قابل دسترسی که می‌توان با استناد به آن شرایط شبیه‌سازی را بازسازی کرد، سرعت بین ۶ تا ۹ متر بر ثانیه می‌باشد. در کار حاضر حداکثر این مقدار یعنی ۹ متر بر ثانیه را معیار قرار داده و شبیه‌سازی‌ها با توجه به آن انجام شد [۱۴].



شکل ۶: اطلس باد میان مقیاس کشور برای ارتفاع ۵۰ متر [۱۴].

در ابتدا، نسبت‌های همپوشانی ۰، ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۴، ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۴-، ۰/۴-، بررسی شده و سپس با توجه به نتایج و مقادیر به دست آمده، نسبت‌های ۰/۵-، ۰/۱۵-، ۰/۵۰+، ۰/۱۵+ و ۰/۲+ بررسی گردیدند تا بهترین نسبت ممکن به دست آید (شکل ۷). منطقه جاروبی که در این کار تعریف شده، برابر ۰/۳۳ مترمربع می‌باشد و ضخامت پره با توجه به کاری که با آن اعتبارسنجی انجام شد، ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده و قطر شفت میانی ۱۵ میلی‌متر می‌باشد

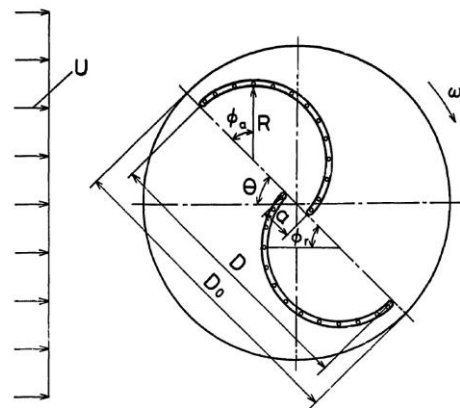
به‌سزایی در راندمان توربین باد دارد. در پژوهش حاضر، پارامتری که جهت بهینه نمودن عملکرد یک توربین باد محور عمودی نوع ساوننیوس به کار برده شد، فاصله همپوشانی افقی بین دو پره می‌باشد.

## ۲- تئوری مسئله

فاصله همپوشانی به فاصله بین دو پره در توربین ساوننیوس گفته می‌شود. این فاصله به منظور جبران اختلاف فشار در قسمت مقعر و محدب، در پره پیشرو می‌باشد. نسبت همپوشانی در مقالات مختلف گاه‌با گاه با کمی تفاوت تعریف شده است؛ اما در مجموع یک مفهوم مشترک را بیان می‌کنند که فوجیساوا [۱۱] در پژوهش خود آن را به صورت رابطه (۱) تعریف کرد:

$$Overlap Ratio = a/2R \quad (1)$$

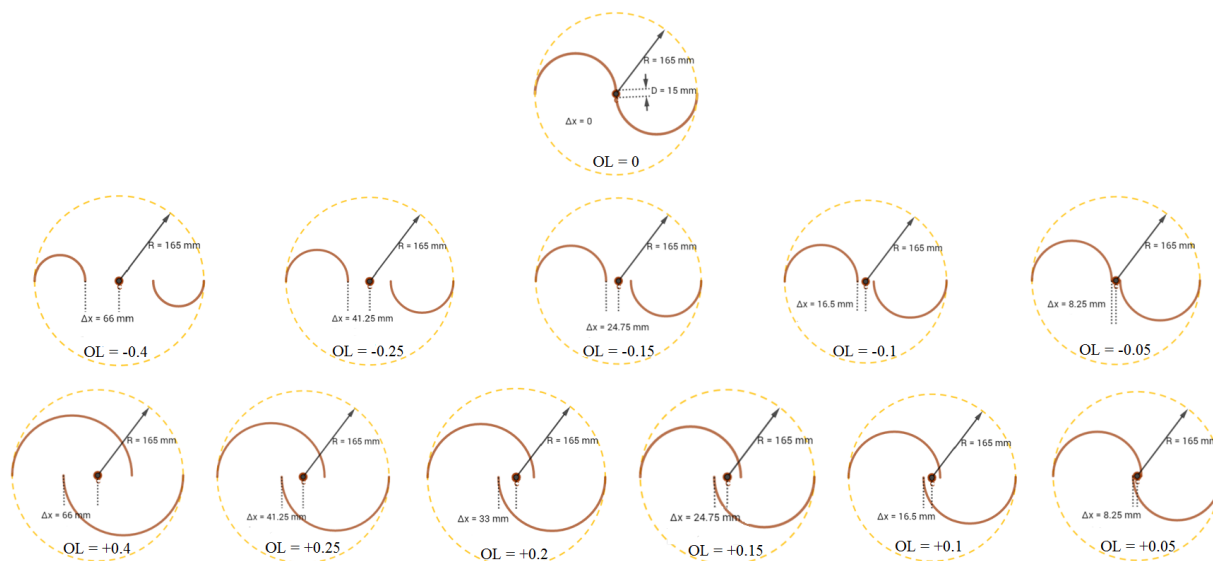
که R شعاع هر پره روتور و a فاصله همپوشانی است (شکل ۵).



شکل ۵: شماتیک دیاگرام نسبت همپوشانی [۱۱]

کارهای انجام شده در ارتباط با نسبت‌های همپوشانی نتایج مختلفی را بیان کردند. فوجیساوا [۱۱] در سال ۱۹۹۲، با اندازه‌گیری توزیع فشار در پره و مرئی‌سازی جریان سیال در داخل و اطراف روتور در حال چرخش و بدون چرخش، بررسی‌های خود را انجام داد. آزمایش‌ها بر روی چهار روتور با تیغه نیم‌دایره‌ای با نسبت‌های همپوشانی از صفر تا ۰/۵ انجام شد. افزایش نسبت همپوشانی به خصوص در حالت برگشت، بهبود گشتاور استاتیک را نشان داد و حداکثر گشتاور و توان روتور در نسبت همپوشانی ۰/۱۵ حاصل شد. کامبرناس و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۲، نسبت‌های همپوشانی ۰، ۰/۱۶ و ۰/۳۲ و تغییر زاویه فازهای ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه را بین دو طبقه در توربین ساوننیوس بررسی کردند. آزمایش‌ها در سرعت‌های مختلف باد انجام شد. بهترین ضریب توان‌ها برای نسبت

با استفاده از معادلات گذرای RANS و مدل توربولانسی



شکل ۷: شماتیک دوبعدی روتور در نسبت هم‌پوشانی‌های مورد بررسی.

Realizable K-ε به صورت سه‌بعدی، از طریق روش SIMPLE برای کوپل فشار - سرعت انجام شد. روی و ساها [۱۷] به منظور بررسی نسبت‌های هم‌پوشانی در توربین بادی ساونویوس معمول، شبیه‌سازی‌های دوبعدی را با استفاده از مدل K-ε، تحت تأثیر تابع دیواره و روش SIMPLE انجام داده، اذعان داشتند که در نسبت هم‌پوشانی ۰/۲ بازده بهتری خواهد داشت.

فراری و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۷ با استفاده از نرم‌افزار اوپن‌فوم به صورت دینامیک، توربین بادی ساونویوس معمول را به صورت دو و سه بعدی شبیه‌سازی کرده و در سرعت بادهای مختلف و در سرعت زاویه‌ای‌های مختلف بررسی کردند و مقادیر ضرایب لیف، درگ، توان و گشتاور را محاسبه و مقادیر خطا و اختلاف بین آن‌ها را مقایسه کرده‌اند. برای این کار سه مدل یک و دو معادله‌ای Spalart-Allmaras، Realizable k-ε و SST k-ω را ارزیابی کردند که حساسیت بیشتر SST k-ω مشخص شد و در نتیجه این روش را به کار گرفتند. محمد و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۱ به منظور بهینه‌سازی توربین‌های ساونویوس متداول، نتایج شبیه‌سازی دوبعدی را برای مدل‌های توربولانسی SST K-ω، RSM، Standard K-ε و Realizable K-ε با یکدیگر مقایسه کرده، دریافتند که مدل Realizable K-ε کمترین خطا را نسبت به حالت تجربی داشته است.

معادلات مدل توربولانسی Realizable K-ε به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۷]:

## ۲-۱- معادلات حاکم و روش حل عددی

اساساً میدان جریان حول یک روتور ساونویوس، ماهیت متلاطم دارد؛ از این رو باید توجه خاصی به انتخاب مدل توربولانسی شود. روش حل URANS برای آنالیز کار حاضر به کار گرفته شد که در این حالت معادلات حاکم بر جریان تراکم‌ناپذیر سیال نیوتنی، یعنی معادله پیوستگی (معادله شماره ۲) و مومنتم (معادله شماره ۳) به صورت زیر می‌باشد [۹]:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۲)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (۳)$$

که  $\bar{u}_i$  و  $u'_i$  به ترتیب مقادیر سرعت متوسط و نوسانات سرعت در جهت محور  $x_i$  می‌باشد. به علاوه  $\bar{p}$  فشار میانگین،  $\nu$  ویسکوزیته سینماتیک،  $\rho$  چگالی سیال و  $t$  زمان می‌باشد. تنش رینولدز  $\overline{u'_i u'_j}$  نیز به صورت ریاضی باید مدل شود.

وانگ و ژان [۱۶] سه مدل توربین ساونویوس پیچشی، نیمه استوانه‌ای و نیمه‌دایروی را با بررسی تأثیر ارتفاع روتور و زاویه پیچش، با توجه به پارامتر گشتاور دینامیک خروجی و همچنین بحث زیباشناختی شهری، مورد مقایسه قرار دادند. روش شبکه لغزان

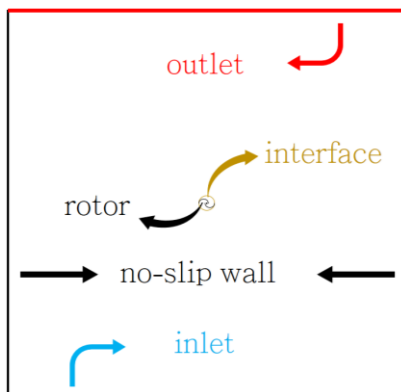
شعاع روتور،  $U$  سرعت جریان آزاد و  $P$  توان خروجی می‌باشد. پارامتر بی‌بعد دیگری که در تحلیل توربین‌های بادی کاربرد زیادی دارد، نسبت سرعت نوک<sup>۴</sup> (نسبت سرعت خطی نوک پره به سرعت جریان آزاد باد) می‌باشد که به شکل معادله (۱۱) تعریف می‌شود:

$$\lambda = \frac{\omega R}{U} \quad (11)$$

که  $\omega$  سرعت زاویه‌ای پره می‌باشد.

## ۲-۲- شبکه‌بندی و شرایط مرزی

مراحل رسم هندسه و مش در نرم‌افزار انسیس - فلوئنت انجام شد. به‌منظور از بین بردن اثرات دیواره و استقلال از دامنه حل، با توجه به پژوهش محمد و همکاران [۱۵] اندازه اضلاع ناحیه ثابت، ۲۵ برابر اندازه قطر روتور در نظر گرفته شد. همچنین قطر زیردامنه چرخان نیز ۱/۲۵ برابر قطر روتور توربین در نظر گرفته شده است تا اثرات را به خوبی نمایش دهد، که دیاگرام شماتیک آن در شکل شماره ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۸: دامنه ثابت محاسباتی با ابعاد ۲۵ برابر قطر

برای شبکه‌بندی ناحیه حل از روش مش لغزان<sup>۵</sup> استفاده شده است که شامل دو ناحیه ثابت و چرخان می‌باشد. هر دو ناحیه با مش مثلثی بی‌سازمان مش‌بندی گردید (شکل ۹). در اطراف روتور و شفت از مش لایه مرزی با ۱۵ تا ۲۰ لایه استفاده شده است تا اثرات دیواره مد نظر قرار گیرد.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k U_j) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k \\ + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon \\ + \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{U \varepsilon}} \\ + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (5)$$

که  $G_k$  مبین تولید انرژی جنبشی توربولانسی به‌واسطه گرادیان سرعت،  $G_b$  مبین تولید انرژی جنبشی توربولانسی به‌واسطه شناوری<sup>۶</sup>،  $\sigma_k$  عدد پراانتل توربولانسی برای  $k$  با مقدار ۱،  $\sigma_\varepsilon$  عدد پراانتل توربولانسی برای  $\varepsilon$  با مقدار ۱/۲ می‌باشد.  $C_{1\varepsilon}$  برابر با ۱/۴۴،  $C_2$  برابر با ۱/۹، ثابت‌ها هستند.  $S_\varepsilon$  و  $S_k$  پارامترهای منبع، فرض شده‌اند و  $Y_M$  که تأثیر تغییر انبساط حرارتی در توربولانس تراکم‌پذیر به نسبت کلی اتلافات است، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Y_M = 2\rho \varepsilon \frac{k}{\gamma RT} \quad (6)$$

$C_{3\varepsilon}$  و  $C_1$  به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta+5} \right] \quad (7)$$

$$C_{3\varepsilon} = \tanh \left| \frac{U}{u} \right| \quad (8)$$

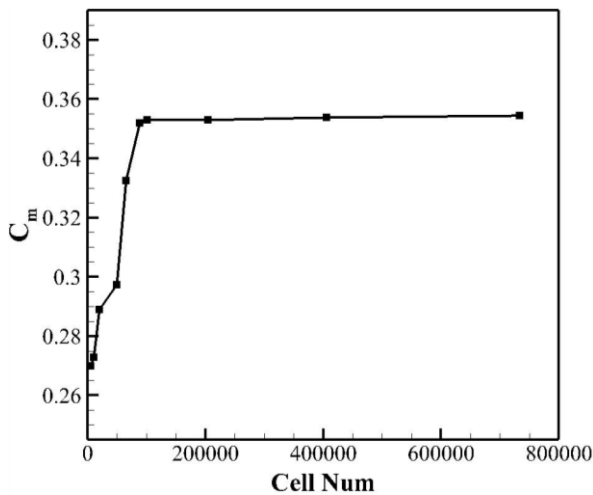
که در پژوهش حاضر نیز مدل توربولانسی Realizable K- $\varepsilon$  به کار گرفته شد.

در یک توربین بادی، مهم‌ترین پارامترهای مطرح در نمایش بازده خروجی سیستم، گشتاور و توان خروجی می‌باشد. در کار حاضر نیز با توجه به این دو پارامتر، نتایج با یکدیگر مقایسه و تحلیل می‌شود. نتایج بی‌بعد به صورت ضریب گشتاور و ضریب توان بیان می‌شوند. معادلات آن‌ها به ترتیب، به فرم زیر است:

$$C_m = T / \left[ \left( \frac{1}{2} \right) \rho A R U^2 \right] \quad (9)$$

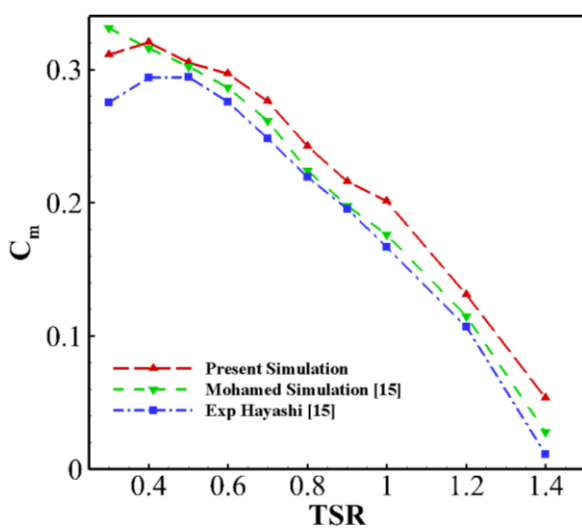
$$C_p = P / \left[ \left( \frac{1}{2} \right) \rho A U^3 \right] \quad (10)$$

$T$  گشتاور تولیدی،  $A$  ناحیه جاروب شده در مقابل جریان باد،  $R$

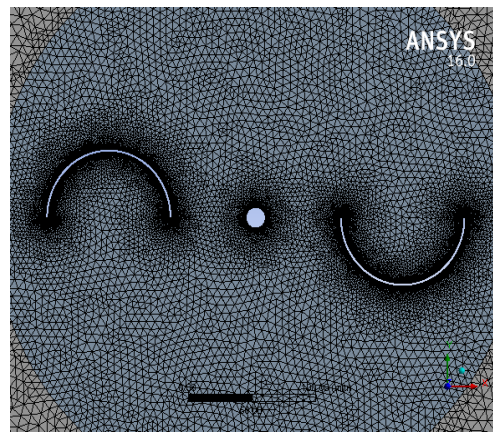


شکل ۱۰: استقلال از شبکه با تغییر تعداد شبکه‌ها از ۵۴۰۰ تا ۷۳۰۰۰۰

اعتبارسنجی با توجه به پژوهش محمد و همکاران [۱۵] در سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه انجام شد که نمودار اعتبارسنجی مربوط به ضریب گشتاور تجربی، شبیه‌سازی مرجع مورد نظر و شبیه‌سازی کار حاضر با هم مقایسه و با خطای کمی اعتبارسنجی انجام شده است. از دلایل اختلاف در نتایج، میتوان به نوع شبکه‌بندی، مشخص نبودن ضرایب ثابت موجود در مدل توربولانسی و شرایط محیطی مجهولی که در روش عددی به صورت تقریبی، در نظر گرفته شده، دانست. خطای متوسط در حدود ۱۳٪ محاسبه شد که بیشترین مقدار آن در نقطه با نسبت سرعت نوک ۱ مشاهده شد (شکل ۱۱). بعد از بررسی نسبت‌های هم‌پوشانی مختلف، ضرایب گشتاور و توان برای نسبت‌های سرعت نوک و هم‌پوشانی‌های مختلف مطابق شکل‌های ۱۲ و ۱۳ به دست آمد.



شکل ۱۱: اعتبارسنجی روش حل با حل تجربی و عددی پیشین



شکل ۹: شبکه‌بندی مثالی بدون ساختار برای روتور با نسبت هم‌پوشانی ۰/۴

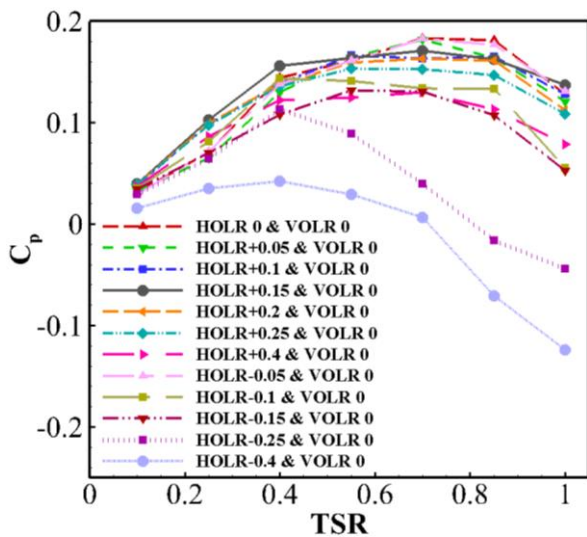
به منظور حل عددی در نرم‌افزار فلونت، بعد از بررسی کارهای پیشین مشابه، یک جمع‌بندی در رابطه با شرایط مرزی در این دست مسائل حاصل شد. در کار حاضر شروط حاکم به شرح زیر است که در شکل ۸ به صورت شماتیک آورده شده است:

- ❖ ورودی: سرعت ورودی
- ❖ خروجی: فشار خروجی
- ❖ جناحین: دیواره بدون لغزش
- ❖ پره و شفت: دیواره بدون لغزش

### ۳- نتایج و بحث

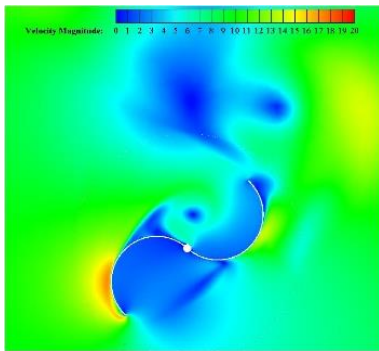
به‌منظور بررسی استقلال از مش، یک حالت هم‌پوشانی را معیار قرار داده، با توجه به آن، شرط استقلال از مش ارضا شد. برای این منظور با تغییر اندازه المان‌ها بر روی پره‌ها و خط رابط دو ناحیه، تعداد شبکه‌ها، از ۵۴۰۰ تا ۷۳۰۰۰۰ تغییر داده شد (شکل ۱۰) و مشخص شد با تعداد مش بین ۷۰۰۰۰ تا ۹۰۰۰۰ جواب قابل قبولی به دست خواهد آمد. البته نتایج حاکی از آن است که در تعداد شبکه‌های کمتر نیز، خطا نسبتاً کم بوده اما برای افزایش حداکثری دقت، بازه مورد نظر انتخاب شده است. قابل ذکر است که بیان یک بازه برای شبکه‌بندی، به این دلیل بوده است که برای هندسه‌های مختلف، تعداد مش‌ها کمی متفاوت بوده، بیشترین مش نیز برای حالت هم‌پوشانی صفر با تعداد ۸۸۴۴۲ بوده است و هرچه به سمت هم‌پوشانی‌های منفی با اندازه بزرگ‌تر می‌رود، تعداد مش‌ها کاهش می‌یابد.



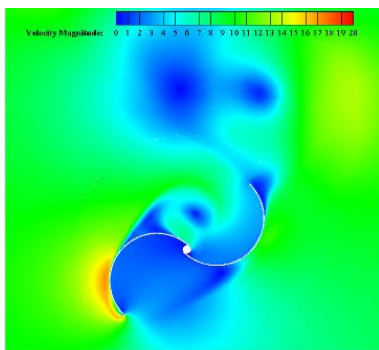


شکل ۱۳: ضریب‌های توان حاصل از روتور تحت هم‌پوشانی‌های مختلف

با توجه به تشابه روند تغییرات کانتورهای سرعت در نسبت‌های هم‌پوشانی مختلف، نسبت به پارامتر نسبت سرعت نوک و همچنین تعداد زیاد کانتورها جهت نمایش، تنها نسبت سرعت نوک پره ۰/۴ جهت مشاهده روند تغییرات انتخاب شده است (شکل ۱۴ - ۲۵). مهم‌ترین عامل مشهود در این کانتورها، تأثیر هم‌پوشانی‌های مثبت می‌باشد که با هدایت جریان برگشتی، باعث کاهش اختلاف فشار ناشی از جریان کواندای پشت پره پیشرو شده و در نتیجه افزایش راندمان توربین را در پی دارد.

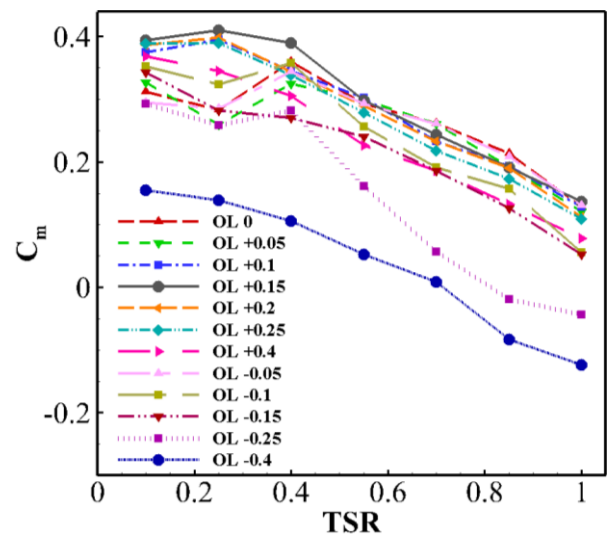


شکل ۱۴: کانتور سرعت روتور با هم‌پوشانی صفر

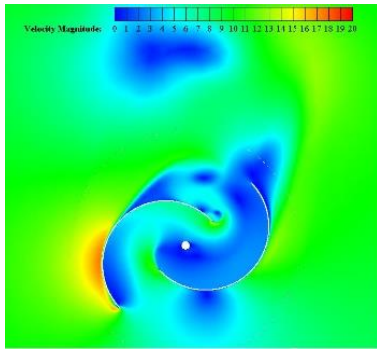


شکل ۱۵: کانتور سرعت روتور با هم‌پوشانی ۰/۰۵

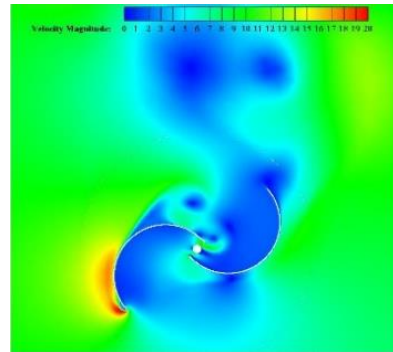
با توجه به نتایج حاصل از نمودارهای ضریب گشتاور و ضریب توان (شکل‌های ۱۱ و ۱۲)، مشاهده می‌شود که میزان فاصله هم‌پوشانی در عملکرد روتور تأثیر به‌سزایی داشته و باعث تغییراتی در نتایج، نسبت به کارهای پیشین شده است. ضریب‌های گشتاور، برای نسبت سرعت نوک‌های پایین، در هم‌پوشانی‌های مثبت عملکرد خوبی داشته، در نسبت هم‌پوشانی ۰/۱۵ + بیشترین ضریب گشتاور به‌دست می‌آید؛ این مقدار برابر با ۰/۴ بوده، در نسبت سرعت نوک ۰/۲۵ حاصل می‌شود. با افزایش نسبت سرعت نوک، هم‌پوشانی‌های نزدیک به صفر، با اختلاف کمی، گشتاور بیشتری تولید می‌کنند که در مقدارهای بالاتر از نسبت سرعت نوک حدود ۰/۹ بار دیگر در نسبت هم‌پوشانی ۰/۱۵ +، ضریب گشتاور بیشتری تولید می‌شود. بیشترین ضریب توان تولیدی با مقدار تقریبی ۰/۱۸، مربوط به هم‌پوشانی صفر در نسبت سرعت نوک ۰/۷ می‌باشد؛ اما مشکل این پیکربندی‌های با هم‌پوشانی ناچیز، افت سریع‌تر نسبت به هم‌پوشانی‌های مثبت، با افزایش پارامتر بی‌بعد نسبت سرعت نوک می‌باشد؛ اتفاقی که در هم‌پوشانی مثبت با سرعت کمتری رخ می‌دهد. دلیل این امر را می‌توان وجود فاصله هم‌پوشانی و هدایت جریان برگشتی از قسمت مقعر پره پسرو به قسمت مقعر پره پیشرو دانست که موجب کاهش فشار منفی تولیدی در اثر جریان کوآندا در بخش مقعر پره پیشرو می‌شود. در نسبت هم‌پوشانی‌های منفی به دلیل عدم جبران فشار منفی در پشت پره پیشرو، ضریب گشتاور و ضریب توان، مقدارهای کمتری را نشان می‌دهند. با توجه به مطالب ذکر شده، هم‌پوشانی ۰/۱۵ + به دلیل کارایی بالاتر در بازه نسبت سرعت نوک بزرگ‌تر و اختلاف کم با بزرگ‌ترین مقادیر در دیگر نسبت‌های سرعت نوک پیشنهاد می‌شود.



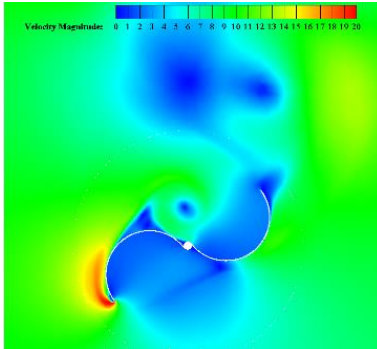
شکل ۱۶: ضریب‌های گشتاور حاصل از روتور تحت هم‌پوشانی‌های مختلف



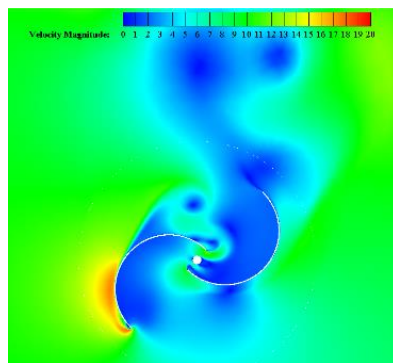
شکل ۲۰: کانتور سرعت روتور با هم‌پوشانی  $+0/4$



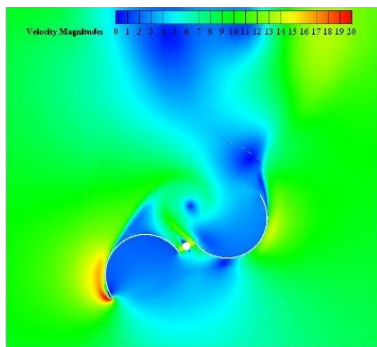
شکل ۱۶: کانتور سرعت روتور با هم‌پوشانی  $+0/1$



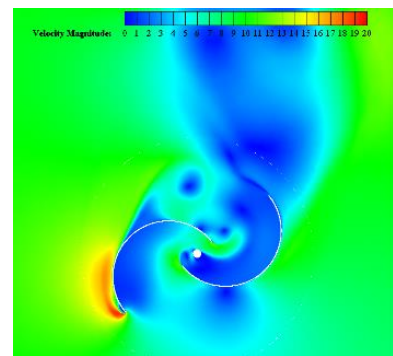
شکل ۲۱: کانتور سرعت روتور با هم‌پوشانی  $-0/0.5$



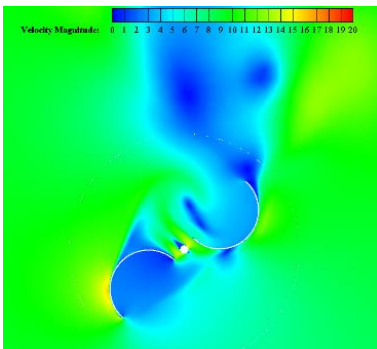
شکل ۱۷: کانتور سرعت روتور با هم‌پوشانی  $+0/1.5$



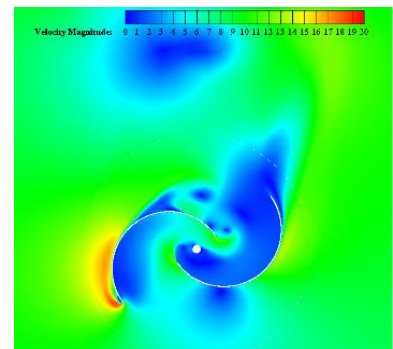
شکل ۲۲: کانتور سرعت روتور با هم‌پوشانی  $-0/1$



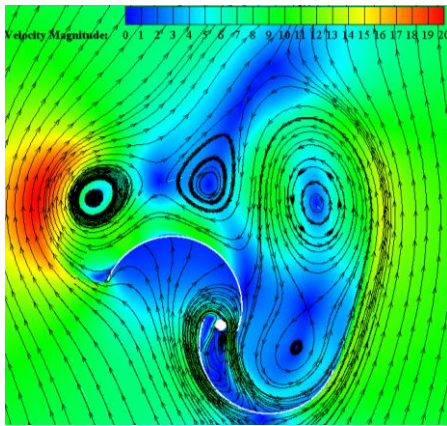
شکل ۱۸: کانتور سرعت روتور با هم‌پوشانی  $+0/2.0$



شکل ۲۳: کانتور سرعت روتور با هم‌پوشانی  $-0/1.5$



شکل ۱۹: کانتور سرعت روتور با هم‌پوشانی  $+0/2.5$

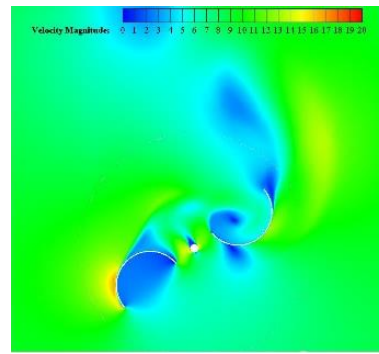


شکل ۲۶: خط جریان روتور با نسبت هم‌پوشانی ۰/۱۵

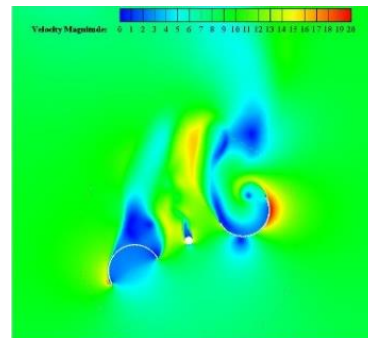
در مجموع با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف می‌توان نتیجه گرفت، روتور با هم‌پوشانی ۰/۱۵+ گزینه مناسبی می‌باشد و تنها در صورتی که بازه کاری روتور محدود به نسبت سرعت نوک از حدود ۰/۶ تا ۰/۸ شود، می‌توان روتور بدون هم‌پوشانی را با اختلاف بسیار کمی کارآمدتر دانست. البته باید در نظر داشت که روتورهای ساونیوس اغلب در نسبت‌های سرعت نوک پایین کار می‌کنند که این امر نیز مبین کارایی بیشتر روتور با هم‌پوشانی ۰/۱۵+ است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک توربین ساونیوس معمول با حفظ اندازه قطر روتور و با تغییر نسبت هم‌پوشانی با نگرشی جامع مورد بررسی قرار گرفت. در این کار روش حل URANS و مدل توربولانسی Realizable K-ε به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که در نسبت‌های هم‌پوشانی نزدیک به صفر و مثبت، بازده نسبتاً بالاتری نسبت به دیگر حالات به دست می‌آید. در واقع، برای نسبت‌های سرعت نوک پایین، روتور با نسبت هم‌پوشانی ۰/۱۵+، ضریب گشتاور بالاتری نسبت به روتورهای با نسبت هم‌پوشانی نزدیک به صفر تولید می‌کند و برعکس برای نسبت‌های سرعت نوک کمی بالاتر، روتورهای با نسبت هم‌پوشانی نزدیک به صفر و به‌طور خاص، در نسبت هم‌پوشانی صفر دارای ضریب گشتاور بالاتری است؛ اما اگر نسبت سرعت باز هم بالاتر رود، دوباره توربین با نسبت هم‌پوشانی ۰/۱۵+ ضریب توان و گشتاور بیشتری را تولید می‌کند. در نتیجه، روتور با نسبت هم‌پوشانی ۰/۱۵+ در بازه گسترده‌تری از نسبت سرعت نوک، کارآمد می‌باشد. با توجه به مطالب ذکر شده، هندسه با نسبت هم‌پوشانی ۰/۱۵+ در مجموع بهتر ارزیابی می‌شود.



شکل ۲۴: کانتور سرعت روتور با هم‌پوشانی ۰/۲۵-



شکل ۲۵: کانتور سرعت روتور با هم‌پوشانی ۰/۴-

کانتورهای سرعت، در نسبت هم‌پوشانی‌های بزرگ‌تر و در نزدیکی مقطع هم‌پوشانی مثبت، رشد ناحیه گردابه‌ای را مستقل از نسبت سرعت نوک نشان می‌دهد که بیان‌کننده‌ی رو به زوال رفتن کارایی آیرودینامیکی در نسبت‌های سرعت نوک بالا است؛ زیرا به دلیل افزایش فاصله بین دو پره، جریان برگشتی پراکنده شده، برخورد مناسبی به سطح پره محرک پیدا نمی‌کند. با توجه به مقادیر عددی کانتور سرعت، سرعت جریان هوا در کنار روتور با هم‌پوشانی ۰/۱+ بیشترین مقدار خود را دارد که برابر با مقدار تقریبی ۲۱ متر بر ثانیه می‌باشد. همچنین نمودارهای تغییرات ضریب گشتاور در حالت هم‌پوشانی منفی، آشفتگی به نسبت شدیدتری را نشان می‌دهد؛ در واقع سیستم نمی‌تواند به روندی با دوره تناوب ثابت برسد که می‌تواند یکی از نقاط ضعف این هندسه‌ها باشد.

با توجه به شکل ۲۶ خط جریان در درون ناحیه هم‌پوشانی با برخورد به شفت، آشفته شده و مانع از برخورد کامل جریان هدایت شده به پره پیشرو می‌شود و در نتیجه بازده را تا حدی کاهش می‌دهد. با افزایش زاویه هم‌پوشانی، تأثیر شفت کاهش یافته، در نتیجه بازده سیستم بالا می‌رود؛ ولی از طرفی افزایش فاصله هم‌پوشانی خود باعث کاهش کارایی می‌شود که برای دسترسی به حالت بهینه، برآیند این دو پارامتر را باید در نظر گرفت.

#### مراجع

- [1] M. Ghasemian, Z.N. Ashrafi, A. Sedaghat, A review on computational fluid dynamic simulation techniques for Darrieus

- turbine with discharge flow directing capability, *Energy*, 130 (2017) 327-338.
- [9] J.-H. Lee, Y.-T. Lee, H.-C. Lim, Effect of twist angle on the performance of Savonius wind turbine, *Renewable Energy*, 89 (2016) 231-244.
- [10] A. Ramadan, K. Yousef, M. Said, M. Mohamed, Shape optimization and experimental validation of a drag vertical axis wind turbine, *Energy*, 151 (2018) 839-853.
- [11] N. Fujisawa, On the torque mechanism of Savonius rotors, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 40 (1992) 277-292.
- [12] J. Kumbertuss, J. Chen, H. Yang, L. Lu, Investigation into the relationship of the overlap ratio and shift angle of double stage three bladed vertical axis wind turbine (VAWT), *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 107 (2012) 57-75.
- [13] M. Zemamou, M. Aggour, A. Toumi, Review of savonius wind turbine design and performance, *Energy Procedia*, 141 (2017) 383-388.
- [14] Iranian wind atlas, in, Available from: <http://www.satba.gov.ir/fa/regions/windatlas> [accessed 17.06.18].
- [15] M. Mohamed, G. Janiga, E. Pap, D. Thévenin, Optimal blade shape of a modified Savonius turbine using an obstacle shielding the returning blade, *Energy Conversion and Management*, 52 (2011) 236-242.
- [16] Y.-F. Wang, M.-S. Zhan, 3-Dimensional CFD simulation and analysis on performance of a micro-wind turbine resembling lotus in shape, *Energy and Buildings*, 65 (2013) 66-74.
- [17] S. Roy, U.K. Saha, Computational study to assess the influence of overlap ratio on static torque characteristics of a vertical axis wind turbine, *Procedia Engineering*, 51 (2013) 694-702.
- [18] G. Ferrari, D. Federici, P. Schito, F. Inzoli, R. Mereu, CFD study of Savonius wind turbine: 3D model validation and parametric analysis, *Renewable energy*, 105 (2017) 722-734.
- vertical axis wind turbines, *Energy Conversion and Management*, 149 (2017) 87-100. M.B.A. Haghghat, "Biometrics for Cybersecurity and Unconstrained Environments", Ph.D. Thesis, University of Miami, USA, 2016.
- [2] J.L. Sawin, E. Martinot, V. Sonntag-O'Brien, A. McCrone, J. Roussel, D. Barnes, C. Flavin, L. Mastny, D. Kraft, S. Wang, *Renewables 2010-Global status report*, (2013). M. A. Naji and A. Aghagolzadeh, "Multi-focus image fusion in DCT domain based on correlation coefficient". In 2nd International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI), pp. 632-639, 2015.
- [3] W.-T. Chong, W.K. Muzammil, K.-H. Wong, C.-T. Wang, M. Gwani, Y.-J. Chu, S.-C. Poh, Cross axis wind turbine: Pushing the limit of wind turbine technology with complementary design, *Applied Energy*, 207 (2017) 78-95.
- [4] Shikha, T. Bhatti, D. Kothari, Early development of modern vertical and horizontal axis wind turbines: a review, *Wind Engineering*, 29 (2005) 287-299.
- [5] F. Wenehenubun, A. Saputra, H. Sutanto, An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades, *Energy Procedia*, 68 (2015) 297-304.
- [6] J.M. Mercado-Colmenero, M.A. Rubio-Paramio, F. Guerrero-Villar, C. Martín-Doñate, A numerical and experimental study of a new Savonius wind rotor adaptation based on product design requirements, *Energy Conversion and Management*, 158 (2018) 210-234.
- [7] S. Roy, U.K. Saha, Wind tunnel experiments of a newly developed two-bladed Savonius-style wind turbine, *Applied Energy*, 137 (2015) 117-125.
- [8] M. Tahani, A. Rabbani, A. Kasaiean, M. Mehrpooya, M. Mirhosseini, Design and numerical investigation of Savonius wind

زیر نویس ها:

<sup>1</sup> Flettner

<sup>2</sup> Bach

<sup>3</sup> buoyancy

<sup>4</sup> TSR

<sup>5</sup> Sliding mesh method