



## بررسی عملکرد توربین بادی ساونیوس در مجاورت یک ساختمان با مقطع دایروی

محسن درویش یادگاری، رحیم حسن زاده<sup>\*</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۶  
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۲۹  
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۹  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۳/۰۵

### کلمات کلیدی:

توربین بادی ساونیوس  
زاویه نصب  
چرخش رو به داخل و رو به خارج  
ضریب توان  
سرعت نوک بی‌بعد

**خلاصه:** شهرهای بزرگ امروزی مملو از ساختمان‌های بلند با ارتفاع مختلف هستند که تقاضای انرژی زیادی دارند. از طرفی، تولید برق پراکنده بخش جدایی ناپذیر از این شهرها در کشورهای پیشرفته بشمار می‌آید. برای استفاده از توربین‌های بادی با مقیاس کوچک و تولید برق پراکنده، عملکرد این نوع از توربین‌های بادی بایستی در مجاورت ساختمان‌های مختلف در مناطق شهری مورد بررسی قرار گیرد. در این پژوهش، مشخصه‌های توانی یک توربین بادی ساونیوس رایج در مجاورت یک ساختمان بزرگ با مقطع دایروی در سرعت جریان باد ۶ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور، از توربین‌های بادی ساونیوس در فاصله بی‌بعد برابر با ۲ نسبت به جداره ساختمان مورد نظر و در موقعیت‌های زاویه‌ای برابر با ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه استفاده شده است. همچنین، برای درک اثر جهت چرخش توربین در مجاورت ساختمان مورد نظر، دو جهت چرخش ممکن یعنی چرخش رو به داخل و چرخش رو به خارج مورد بررسی قرار گرفته است. محاسبات برای سرعت نوک بی‌بعد  $0.4/0.8$  و  $1/2$  انجام گرفته است. داده‌های بدست آمده حکایت از تأثیر قابل توجه موقعیت زاویه‌ای و جهت چرخش روتور دارد. بررسی نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که، بسته به مقدار سرعت نوک بی‌بعد، با چرخش روتور رو به داخل و قرارگیری آن در موقعیت‌های زاویه‌ای ۶۰ و ۹۰ درجه بیشترین بهبود در ضریب توان در محدوده  $20.8/72$  تا  $43.9/95$  درصد نسبت به توربین نصب شده در جریان باد آزاد بدست می‌آید.

### ۱- مقدمه

مزایا و معایبی هستند. بعنوان مثال، توربین‌های بادی محور افقی برخلاف نوع عمودی فاقد محدودیت ساخت در توان خروجی بوده و راندمان بالاتری دارند. از سوی دیگر، توربین‌های بادی محور عمودی برعکس نوع افقی فاقد حساسیت به جهت باد و شدت آشفته‌گی آن بوده و لذا برای استحصال برق در محیط‌های شهری ارجحیت دارند. توربین‌های بادی محور عمودی در دو نوع داریوس<sup>۱</sup> و ساونیوس<sup>۲</sup> ساخته می‌شوند؛ اگرچه در سال‌های اخیر نوع ترکیبی، یعنی ترکیب دو نوع روتور ذکر شده، تجاری سازی شده است. بهبود عملکرد توربین‌های بادی ساونیوس با تغییر پروفیل پره‌ها موضوع تحقیقات بسیاری [۱-۵] در گذشته بوده است.

مناطق شهری، بویژه شهرهای امروزی، مملو از ساختمان‌هایی با ارتفاع مختلف می‌باشند. در چنین محیط‌هایی، به دلیل برخورد مکرر باد با این ساختمان‌ها، جریان آن اغلب بشکل ناپایا و آشفته می‌باشد. برای تولید برق پراکنده با توربین‌های مقیاس کوچک می‌بایست عملکرد آن‌ها در مجاورت ساختمان‌های شهری مورد بررسی قرار گیرد. با بررسی ادبیات فن می‌توان

بسیاری از کشورهای پیشرفته فاقد منابع انرژی‌های فسیلی می‌باشند. از سوی دیگر، قواعد سخت گیرانه‌ای در قبال آلودگی‌های ناشی از سوخت‌های فسیلی دارند. از این رو، از دیرباز به دنبال منابع انرژی پاک بوده‌اند که هم نیاز انرژی خود را بصورت پایدار مرتفع کرده و هم آلودگی محیط زیست را به حداقل برسانند. در میان اقدامات صورت گرفته در این کشورها، تولید برق پراکنده یکی از بخش‌های جدایی ناپذیر در تأمین بخشی از برق مورد نیاز محسوب می‌شود. تولید برق پراکنده از منابع پاک عمدتاً از طریق باد و خورشید صورت می‌گیرد. در حوزه انرژی خورشیدی معمولاً با نصب نیروگاه‌های محلی با خروجی محدود و در حوزه انرژی باد با نصب توربین‌های بادی با مقیاس کوچک می‌توان به این هدف دست یافت. توربین‌های بادی مقیاس کوچک به دو صورت محور افقی که در آن محور چرخش روتور موازی جریان باد و محور عمودی که در آن محور چرخش روتور عمود بر جریان باد می‌باشد، ساخته می‌شوند. هر یک از این توربین‌ها نسبت به یکدیگر دارای

1 Darrius  
2 Savonius

<sup>\*</sup> نویسنده عهده‌دار مکاتبات: r.hassanzadeh@uut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



به شکل سقف و همچنین جهت آن بستگی دارد. بر اساس میزان شدت تلاطم و سرعت بالای سقف، نشان داده شد که سقف مسطح مناسبترین انتخاب می‌باشد. کیم و همکاران<sup>۵</sup> [۱۰] جریان باد حول دو ساختمان مرتفع متصل به هم با مقطع دایروی را بررسی کردند. چیدمان ساختمان‌ها و زاویه جریان باد از دیگر متغیرهای مطالعه آن‌ها بود. بیان شد که مناطق متعددی با سرعت باد محلی بالا برای استفاده بهینه از توربین‌های بادی در اطراف ساختمان وجود دارد. علاوه بر این، زمانی که فضای شکاف برابر با  $0.67$  برابر قطر هر ساختمان باشد، در زاویه باد صفر درجه، حداکثر سرعت متوسط باد در اطراف ساختمان نسبت به موارد دیگر ایجاد می‌شود. تأثیر اصلاح گوشه‌های ساختمان بر شرایط باد توسط میتال و همکاران<sup>۶</sup> [۱۱] بررسی شد. مطالعه آن‌ها به طور سیستماتیک شرایط جریان هوا را در اطراف ساختمان‌ها، مورد بررسی قرار داد. نتایج متعددی در تحقیقات آن‌ها ارائه شده است. مثلاً، ضریب افزایش متوسط برای سرعت بادهای بالاتر در ساختمان‌های مدور اصلاح شده تقریباً ۳ درصد کاهش می‌یابد و برای سرعت‌های باد کم به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

برخی از مطالعات پیشین نیز به عملکرد توربین‌های بادی مقیاس کوچک در مجاورت ساختمان‌ها پرداخته‌اند. بعنوان مثال، ویژگی‌های آشفستگی و کارایی توربین بادی داریوس دو پره بین دو ساختمان مرتفع در کنار هم مطالعه‌ای بود که توسط سپهریان‌آذر و همکاران<sup>۷</sup> [۱۲] انجام شد. آن‌ها سرعت باد آزاد را ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه، فضاهاى شکاف بی‌بعد را  $1/5$  و  $3$  و مقادیر سرعت نوک بی‌بعد<sup>۸</sup> را  $3$  و  $5$  در نظر گرفتند. با بررسی نتایج به دست آمده برای فضاهاى شکاف بی‌بعد  $1/5$  و  $3$ ، به ترتیب  $75$  و  $45$  درصد افزایش در سرعت باد محلی، بین دو ساختمان مشاهده شد. آن‌ها همچنین نشان دادند که حداکثر بهبود در بازده روتور مورد نظر  $21/8$  و  $15/1$  درصد به ترتیب برای فواصل شکاف بی‌بعد  $1/5$  و  $3$  بدست می‌آید. در مطالعه‌ای دیگر ژو و همکاران<sup>۹</sup> [۱۳]، از روش حل عددی برای بررسی عملکرد توربین‌های بادی در کنار ساختمان‌ها استفاده کردند. در ابتدا ۵ ناحیه جریان در اطراف ساختمان مشخص شد. در مرحله دوم توربین‌های بادی داریوس در اطراف ساختمان قرار گرفتند. نتایج نشان داد که در ناحیه باد انتهایی ساختمان، انرژی خروجی از توربین  $120$  درصد افزایش یافته است. مرحله سوم، چندین توربین با آرایش‌های مختلف در اطراف ساختمان قرار

دریافت که در سال‌های گذشته تحقیقات محدودی در این راستا صورت گرفته است. برخی از این تحقیقات در ارتباط با بررسی پتانسیل سرعت در اطراف ساختمان‌ها می‌باشد. بعنوان مثال، بالدوزی و همکاران<sup>۱</sup> [۶] با استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی جریان باد در پشت بام یک ساختمان در محیط شهری در حضور ساختمان‌هایی با ارتفاع مختلف در بالادست ساختمان مورد نظر پرداختند. آن‌ها پارامترهای همچون ارتفاع، عرض و فاصله ساختمان بالادست از ساختمان مورد نظر را مطالعه کردند. همچنین، دو نوع سقف برای ساختمان مورد نظر اعم از مسطح و شیب دار را در نظر گرفتند. نتایج بدست آمده مشخص نمود که برای اجتناب از نوعی اثر بنام رمپ آیرودینامیکی، نسبت ارتفاع بین ساختمان مورد نظر و ساختمان بالادستی بایستی تابعی از فاصله نسبی آن‌ها باشد. همچنین، حداکثر افزایش سرعت برای سقف شیبدار با زاویه شیب  $8$  درجه گزارش گردید. حسن‌زاده<sup>۲</sup> [۷] به بررسی جریان باد حول یک ساختمان منفرد با مقطع مربعی و نسبت ارتفاع به عرض  $3$  پرداخت. در محدوده سرعت  $2$  تا  $10$  متر بر ثانیه، مشخص گردید که بهترین محل برای نصب توربین بادی در پشت بام ساختمان در خط عرضی عبوری از مرکز ساختمان قرار دارد. همچنین، در طرفین ساختمان، فاصله‌ای برابر با نصف عرض ساختمان بعنوان مناسبترین محل نصب با حداکثر سرعت افزوده و کمترین شدت آشفستگی تشخیص داده شد. در تحقیقی دیگر ابو‌هلا و همکاران<sup>۳</sup> [۸]، شش نوع سقف مسطح، گنبدی، شیروانی، هرمی، طاقدار بشکهای و گوه‌ای را برای یک ساختمان با هدف یافتن بهترین پروفیل سقف برای نصب توربین بادی مورد مقایسه قرار دادند. برای همه سقف‌های مورد بررسی، مشاهده شد که ناحیه حداکثر شدت آشفستگی مستقیماً از بالای سقف تا فاصله  $1/3$  برابر ارتفاع ساختمان گسترش می‌یابد، که به این معنی است که برای همه موارد، یک توربین بادی روی سقف باید در ارتفاعی برابر یا بیشتر از  $1/3$  برابر ارتفاع ساختمان قرار گیرد. به عنوان نتیجه‌ای دیگر از نظر سرعت جریان، تمام اشکال سقف بررسی شده اثر شتاب‌دهنده‌ای بر سرعت باد داشتند. لدو و همکاران<sup>۴</sup> [۹] یک مطالعه عددی بر روی ویژگی‌های جریان باد در سه جهت، بالای سقف‌های شیبدار، سقف‌های هرمی و سقف‌های مسطح انجام دادند. بر اساس نتایج محاسباتی آن‌ها، محل نصب توربین بادی در بالای این سقف‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد که شدت تلاطم باد به شدت

5 Kim et al.  
6 Mittal et al.  
7 Sepehrianazar et al.  
8 Tip speed ratio  
9 Xu et al.

1 Balduzzi et al.  
2 Hassanzadeh  
3 Abohela et al.  
4 Ledo et al.

بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این راستا، فرض شده است که ارتفاع ساختمان به اندازه کافی از ارتفاع روتور مورد نظر بزرگتر بوده و توربین به اندازه کافی از سطح زمین و سقف ساختمان مورد نظر فاصله دارد تا بتوان از اثرات لایه مرزی زمین، گردابه‌های نعل اسبی<sup>۲</sup> و گردابه‌های نوک<sup>۳</sup> صرف‌نظر شود. پارامترهای مختلفی همچون زوایای نصب ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه برای توربین حول ساختمان مورد نظر، دو جهت چرخش ممکن روتور، یعنی چرخش رو به داخل<sup>۴</sup> و چرخش رو به خارج<sup>۵</sup> و سه سرعت نوک بی‌بعد رایج ۰/۴، ۰/۸ و ۱/۲ برای توربین‌های ساونوس مطالعه شده است. شکل ۱ جزئیات زاویه نصب و مفهوم چرخش رو به داخل و چرخش رو به خارج را بطور شماتیک نشان می‌دهد.

فاصله بی‌بعد ثابت ( $S/D$ ) برابر با ۲، برای استقرار توربین در اطراف ساختمان در نظر گرفته شده است. کلیه محاسبات برای سرعت جریان آزاد باد ۶ متر بر ثانیه انجام شده است. برای مقایسه عملکرد توربین بادی ساونوس رایج در مجاورت ساختمان مورد نظر با شرایط مرجع (توربین بادی نصب شده در جریان آزاد باد بدون حضور ساختمان)، ابتدا شرایط مرجع برای روتور بادی یکسان مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۲ و جدول ۱ به ترتیب شماتیک توربین بادی ساونوس رایج و جزئیات ابعادی آن را نشان می‌دهند.

برای انجام این شبیه‌سازی، مشابه با تحقیقات پیشین [۱۶-۱۹]، یک دامنه محاسباتی مستطیلی شکل بصورت دوبعدی با ابعاد  $D$  ۱۴ در  $D$  ۶ به ترتیب در جهت جریان و جهت عمودی تعریف شده است که  $D$  قطر روتور می‌باشد. مرکز روتور مورد نظر در  $(D/3, D/3)$  قرار گرفته است. در شبیه‌سازی عددی جریان حول یک توربین بادی، دامنه محاسباتی به دو ناحیه دوار (نزدیک روتور) و ناحیه ساکن (دور از روتور) تقسیم می‌شود. برای دامنه محاسباتی تعریف شده، شرط سرعت یکنواخت ۶ متر بر ثانیه با شدت آشفتگی ۰/۵ در مرز ورودی، شرط فشار خروجی در مرز خروجی، شرط تقارن در مرزهای جانبی، شرط عدم لغزش روی پره‌های روتور و شرط مرز مشترک بین ناحیه دوار و ناحیه ساکن اعمال شده است.

دادند و خروجی آن‌ها با هم مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از ۶ توربین در نواحی سمت عرضی و عقبی، بهترین خروجی را دارد. در کار دیگری [۱۴]، ویژگی‌های توانی توربین‌های بادی در آرایه‌ها و آرایش‌های مختلف بین دو ساختمان بررسی شد. در مرحله اول دو آرایه از توربین‌های بادی در یک خط عمود بر جریان باد قرار گرفتند. پس از انتخاب آرایه با ضریب توان بالاتر، در مرحله دوم، توربین‌های بادی در پنج موقعیت مختلف بین دو ساختمان در نظر گرفته شد و بهترین موقعیت را از نظر حداکثر ضریب میانگین توان پیشنهاد گردید. در مرحله سوم تأثیر جهت باد بر حداکثر ضریب توان میانگین، بررسی و نشان داده شد که این پارامتر در زاویه باد ۱۵ درجه حداکثر است. انبارسوز و امیری<sup>۱</sup> [۱۵] افزایش پتانسیل انرژی باد را بین دو ساختمان و اگر مورد بررسی قرار دادند. شبیه‌سازی آن‌ها برای ساختمان با دو ارتفاع ۳۰ و ۶۰ متر با زاویه واگرایی ثابت ۴۵ درجه انجام شده است. آن‌ها سپس قطعاتی با انتهای واگرا به ساختمان‌ها اضافه کردند. بررسی آن‌ها نشان داد که افزودن این قطعات می‌تواند حداکثر نسبت سرعت را ۸/۷٪ در ساختمان ۳۰ متری و ۱۰/۲٪ در ساختمان ۶۰ متری افزایش دهد. همچنین این قطعات برای ساختمان‌های با ارتفاع ۳۰ و ۶۰ متر، باعث افزایش میانگین توان بادی جذب شده به ترتیب ۸ و ۲۲ درصد، گردید.

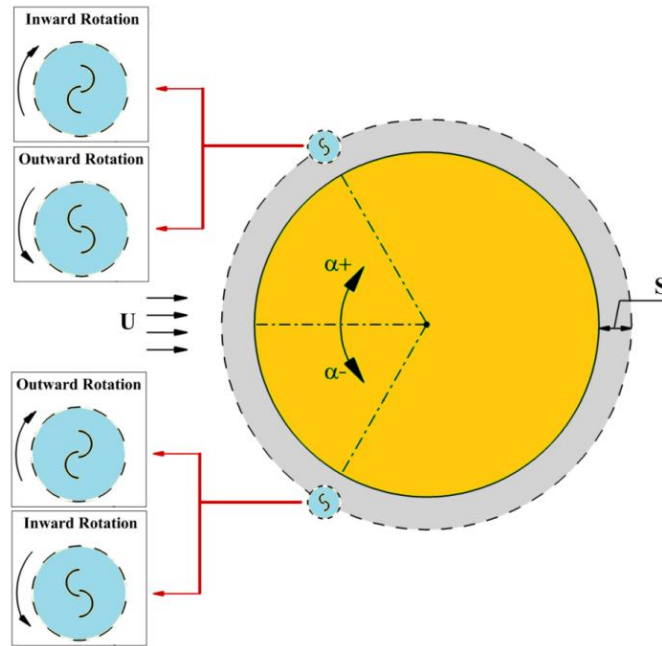
در بررسی جامع ادبیات فن می‌توان دریافت که مطالعه حاضر از جهات مختلفی دارای نوآوری می‌باشد. در این زمینه، تعداد مطالعات انجام گرفته بسیار محدود می‌باشد. همانطوریکه در پاراگراف قبلی اشاره گردید از جمله مطالعات قبلی می‌توان به مراجع ۱۲ و ۱۳ در این زمینه اشاره کرد که در مورد اول، عملکرد توربین بادی دایوس بین دو ساختمان بلند مرتبه با مقطع مستطیلی مورد ارزیابی قرار گرفته است و در مورد دوم، عملکرد تعدادی از توربین‌های دایوس نصب شده حول یک ساختمان با مقطع دایروی مطالعه شده است. در این پژوهش، عملکرد توربین ساونوس رایج حول یک ساختمان بلند مرتبه با مقطع دایروی مورد مطالعه قرار گرفته و پارامترهایی همچون، جهت چرخش روتور رو به داخل و رو به خارج، زاویه نصب ۳۰ تا ۹۰ درجه و سرعت نوک بی‌بعد ۰/۴ تا ۱/۲ مورد بررسی دقیق قرار گرفته‌اند که در پژوهش‌های پیشین سابقه نداشته است.

## ۲- هندسه مساله و جزئیات روش عددی حالت مرجع

در این پژوهش، به کمک دینامیک سیالات محاسباتی، عملکرد توربین بادی ساونوس رایج در مجاورت یک ساختمان با مقطع دایروی بصورت دو

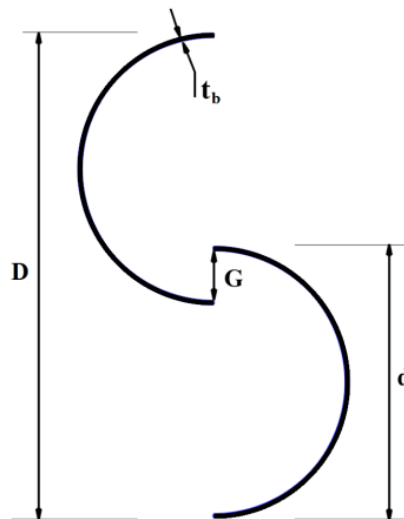
- 2 Horseshoe vortices
- 3 Tip vortices
- 4 Inward rotation
- 5 Outward rotation

1 Anbarsooz and Amiri



شکل ۱. شماتیک زاویه نصب، چرخش رو به داخل و رو به خارج و فاصله مرکز روتور تا جداره ساختمان

Fig. 1. Schematic of the installation angle, inward and outward rotations, and the gap space between the rotor center and building envelope



شکل ۲. شماتیک توربین بادی ساوونیوس رایج

Fig. 2. Schematic of conventional Savonius wind turbine

جدول ۱. جزییات پارامترهای هندسی بکار رفته در این پژوهش

Table 1. Details of the geometrical parameters applied in the present study

اندازه	پارامتر
۰/۱۶ متر	قطر پره ها ( $d$ )
۰/۲	نسبت هم پوشانی پره ها ( $G/d$ )
۱/۷۸۷۵d	قطر روتور ( $D$ )
۰/۰۱۲۵d	ضخامت پره ها ( $t$ )
۲D	فاصله بین جداره ساختمان و مرکز روتور ( $S$ )
۲۰ متر تقریباً معادل با $۷۰D$	قطر ساختمان ( $D_B$ )
۶ متر بر ثانیه	سرعت جریان آزاد باد ( $U$ )
۰/۴، ۰/۸، ۱/۲	سرعت نوک بی بعد ( $TSR$ )

درجه از دوران روتور لحاظ شده است که بسیار کمتر از مقادیر پیشنهادی در مطالعات قبلی می باشد.

علاوه بر معادلات حاکم بر مساله، پارامترهای ارزیابی توربین بادی همچون ضریب توان، ضریب گشتاور و سرعت نوک بی بعد از روابط زیر حاصل می شوند [۳]:

$$C_p = \frac{P_{rotor}}{P_{available}} = \frac{M\omega_0}{0.5\rho AU^3} \quad (۳)$$

$$C_M = \frac{M_{rotor}}{M_{available}} = \frac{M}{0.5\rho ARU^2} \quad (۴)$$

$$TSR = \frac{\omega_0 D}{2U} \quad (۵)$$

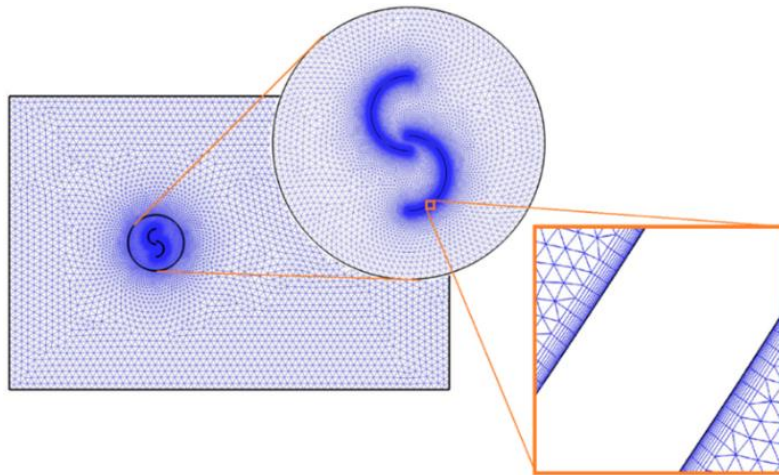
شکل ۳ جزییات شبکه بندی غیر سازمان یافته برای دامنه محاسباتی مورد نظر در حالت مرجع را نشان می دهد. همانطوری که مشاهده می شود،

معادلات پیوستگی و ممتوم متوسط زمانی حاکم بر جریان غیر قابل تراکم بصورت زیر می باشند [۳]:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j}) \quad (۲)$$

در معادله (۲)، عبارت آخر معرف تنش های رینولدز می باشد که با روش  $SST k-\omega$  شبیه سازی شده است. این مدل آشفتگی در مطالعات قبلی مربوط به شبیه سازی توربین های بادی [۱۹-۱۶] به کرات مورد استفاده قرار گرفته است. برای گسسته سازی معادلات حاکم بر مساله، از روش بالادست مرتبه دوم برای عبارات ادوکشن و روش گسسته سازی مرکزی برای عبارات نفوذ استفاده شده است. برای اتصال میادین سرعت و فشار، الگوریتم سیمپل [۲۰] بکار گرفته شده است و معیار همگرایی حل عددی برای کلیه معادلات  $10^{-8}$  می باشد. گام زمانی برای حل عددی معادل با  $0/۳$



شکل ۳. جزییات شبکه بندی استفاده شده برای توربین بادی ساوونیوس رایج بدون حضور ساختمان

Fig. 3. Grid distributions for the conventional Savonius wind turbine in the absence of the building

جدول ۲. استقلال نتایج از شبکه بندی برای توربین بادی ساوونیوس رایج بدون حضور ساختمان

Table 2. Grid size independence study for a conventional Savonius wind turbine in the absence of the building

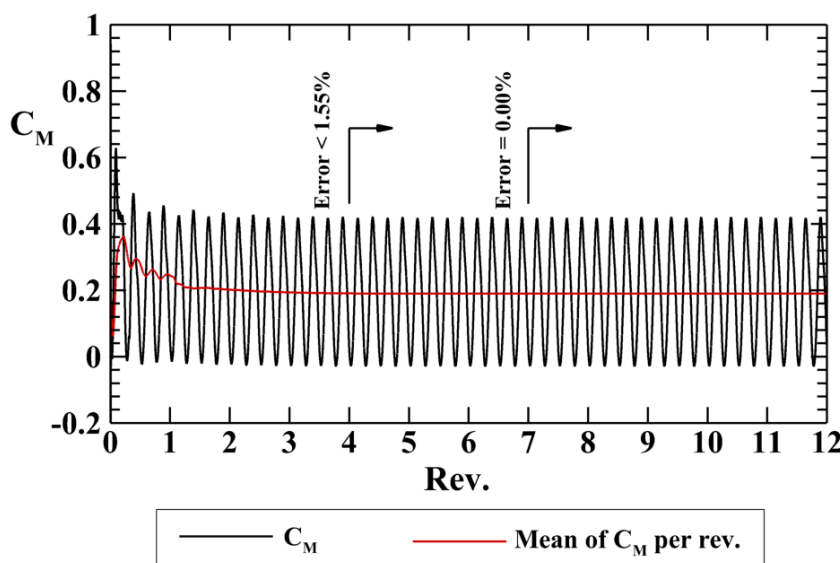
شماره شبکه بندی	تعداد گره‌ها	$C_p$	خطا (%)	$y^+_{max}$
۱	۸۲،۷۵۱	۰/۱۹۴	---	۰/۴۱۱۵
۲	۱۰۱،۳۵۲	۰/۱۹۲	۱/۰۳	۰/۴۱۰۱
۳	۱۱۱،۲۴۱	۰/۱۹۰	۱/۰۴	۰/۴۱۰۹
۴	۱۱۸،۱۶۴	۰/۱۸۹	۰/۵۲	۰/۴۱۳۷
۵	۱۲۷،۷۲۸	۰/۱۸۸	۰/۵۲	۰/۴۱۱۹

می‌باشد خطای حاصل شده بعد از شبکه بندی شماره ۴ با ۱۱۸،۱۶۴ گره برای ضریب توان متوسط به اندازه ۰/۵۲ درصد رسیده است. همچنین، مقدار حداکثر تابع دیواره برابر با ۰/۴۱۳۷ برای شبکه بندی مورد نظر بدست آمده است. لذا، شبکه بندی شماره ۴ برای شبیه‌سازی توربین بادی مورد نظر در جریان آزاد باد (بدون حضور ساختمان) در نظر گرفته شده است.

۲-۱- تحلیل حساسیت نتایج نسبت به تعداد چرخش روتور و قطر ناحیه چرخان برای حالت مرجع  
از جمله مواردی که تاثیر بسزایی در دقت نتایج بدست آمده برای

گره‌ها در اطراف پره‌های روتور بسیار نزدیک به هم بوده و با دور شدن از پره‌ها به سمت مرز مشترک و سپس ناحیه ساکن، فاصله گره‌ها به تدریج افزایش می‌یابد. برای کنترل مقدار تابع دیواره روی پره‌ها و شبیه‌سازی دقیق جریان آشفته نزدیک آن‌ها از گره‌های مرزی<sup>۱</sup> استفاده شده است. برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر با توجه به امکانات محاسباتی و تقلیل هزینه محاسباتی، مطالعه‌ای روی استقلال نتایج از شبکه بندی برای سرعت نوک ۰/۸ انجام گرفته است. در این راستا، پنج شبکه بندی با وضوح مختلف با هم مقایسه شده و نتایج در جدول ۲ ارائه شده است. همانگونه که قابل مشاهده





شکل ۴. مقادیر ضریب گشتاور لحظه‌ای و متوسط برای یک توربین بادی ساوونیوس رایج بدون حضور ساختمان

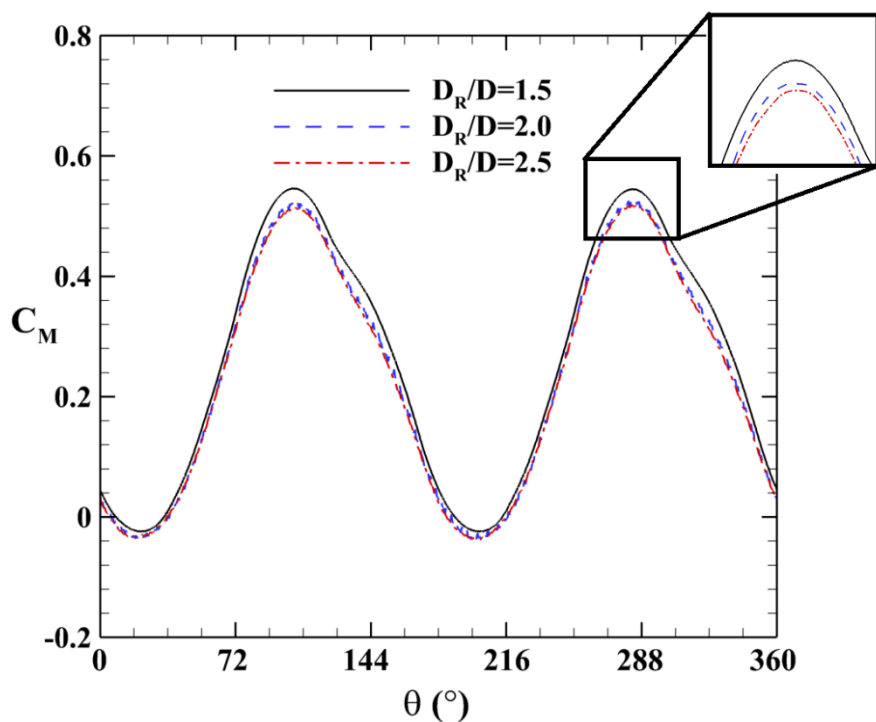
**Fig. 4. Variation of the instantaneous and mean torque coefficients for a conventional Savonius wind turbine in the absence of the building**

برای اعتبارسنجی کد عددی استفاده شده در شبیه‌سازی توربین بادی ساوونیوس رایج بدون حضور ساختمان، نتایج بدست آمده برای ضریب توان متوسط با داده‌های موجود در ادبیات فن به ازای مقادیر مختلف سرعت نوک بی‌بعد در جدول ۳ مقایسه شده است. بررسی این مقایسه حکایت از مطابقت منطقی بین نتایج بدست آمده با یافته‌های قبلی دارد.

### ۳- شبیه‌سازی جریان حول ساختمان با مقطع دایروی

در این پژوهش، عملکرد توربین بادی ساوونیوس رایج حول یک ساختمان با مقطع دایروی بررسی شده است. با توجه به اینکه قطر ساختمان مورد نظر برابر ۲۰ متر یعنی حدوداً ۷۰ برابر قطر روتور (مطابق جدول ۱) لحاظ شده است، می‌بایست جریان حول ساختمان بدون حضور توربین با یافته‌های قبلی اعتبارسنجی شود. برای این منظور، مساله جریان حول یک ساختمان منفرد بصورت دو بعدی بدون حضور توربین‌های بادی مورد بررسی قرار گرفته است. اساساً جریان حول یک ساختمان با مقطع دایروی به لحاظ هندسی بسیار شبیه جریان حول یک استوانه است. لذا، از داده‌های مربوط به جریان حول استوانه برای اعتبارسنجی استفاده شده است. برای شبیه‌سازی جریان حول ساختمان با مقطع دایروی به شکل دو بعدی، از یک دامنه محاسباتی مستطیلی شکل به ابعاد  $27 D_B$  در جهت جریان و  $14 D_B$  در جهت عمودی

شبیه‌سازی توربین بادی دارد تعداد چرخش روتور و اندازه قطر ناحیه چرخان می‌باشد. برای این منظور، در مطالعه حاضر، تحلیل حساسیت نسبت به این دو مورد انجام گرفته است. شکل ۴ مقادیر ضریب گشتاور لحظه‌ای و متوسط را برای توربین بادی مورد نظر تا ۱۲ دور کامل روتور در سرعت نوک  $0.8$  نشان می‌دهد. همانطوری که مشاهده می‌شود بعد از نوسانات ابتدایی، رفتار شبه پایا بر عملکرد توربین حاکم می‌شود. بررسی نتایج بدست آمده از این حساسیت سنجی نمایانگر آن است که خطا در مقادیر ضریب گشتاور متوسط بعد از دور چهارم به  $1/55$  درصد و بعد از دور هفتم به صفر می‌رسد. لذا برای داشتن نتایج دقیق‌تر، داده‌های بدست آمده بایستی بعد از دور هفتم گزارش گردند. با اینحال، برای اطمینان بیشتر، کلیه داده‌های روتور مورد نظر در جریان آزاد بعنوان حالت مرجع در دور دهم ارائه شده است. همچنین برای حساسیت سنجی اندازه قطر ناحیه چرخان بر نتایج بدست آمده، سه قطر مختلف  $1/5 D$ ،  $2 D$  و  $2/5 D$  مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. نتایج این مقایسه برای یک دور کامل توربین در شکل ۵ ارائه شده است. مشخص است که بین دو قطر ناحیه چرخان  $1/5 D$  و  $2 D$  خطای قابل توجهی وجود دارد که این میزان خطا بین دو قطر ناحیه چرخان  $2 D$  و  $2/5 D$  به حداقل می‌رسد. لذا، از اندازه قطر چرخان  $2 D$  برای انجام شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است.



شکل ۵. مقادیر ضریب گشتاور لحظه‌ای برای توربین بادی ساوونیوس رایج بدون حضور ساختمان در اندازه‌های مختلف ناحیه چرخان

Fig. 5. Instantaneous torque coefficient values for a conventional Savonius wind turbine in the absence of the building in different sizes of rotating zone

جدول ۳. اعتبارسنجی کد عددی استفاده شده در این پژوهش برای توربین بادی ساوینیوس رایج بدون حضور ساختمان

Table 3. Validation of the applied numerical code for conventional Savonius wind turbine in the absence of the building

$C_P$						$Re$	محقق
درصد خطا	$TSR=0.18$	درصد خطا	$TSR=0.16$	درصد خطا	$TSR=0.14$		
۲/۰۹	۰/۲۳۹	۱۶/۵۳	۰/۲۴۸	۱۶/۲۳	۰/۱۹۱	$8.63 \times 10^4$	روی و ساها <sup>۱</sup> [۲۱]
۰	۰/۲۴۴	۵/۰۵	۰/۲۱۸	۵/۳۳	۰/۱۶۹	$8.63 \times 10^4$	تهانی و همکاران <sup>۲</sup> [۲۲]
۲/۵۲	۰/۲۳۸	۵/۹۱	۰/۲۲۰	۶/۴۳	۰/۱۷۱	$8.63 \times 10^4$	حسن زاده و محمدنژاد <sup>۳</sup> [۴]
۱/۶۷	۰/۲۴۰	۶/۷۶	۰/۲۲۲	۶/۹۸	۰/۱۷۲	$8.63 \times 10^4$	اسدی و حسن زاده <sup>۴</sup> [۱۹]
---	۰/۲۴۴	---	۰/۲۰۷	---	۰/۱۶۰	$8.63 \times 10^4$	مطاله حاضر

<sup>1</sup> Roy & Saha.

<sup>2</sup> Tahani et al.

<sup>3</sup> Hassanzadeh & Mohammadnejad.

<sup>4</sup> Asadi & Hassanzadeh.



جدول ۴. استقلال نتایج از شبکه بندی برای ساختمان با مقطع دایروی بدون حضور توربین بادی

Table 4. Grid size independence for the building with a circular cross-section in the absence of the wind turbine

$y^+_{max}$	$LS/DB$	$C'_{L,max}$	$C_D$	تعداد گره‌ها	شماره شبکه بندی
۱/۴۹۸	۰/۸۳۰	۰/۰۲۱	۰/۴۷۰	۵۵۸،۵۴۰	۱
۱/۴۹۶	۰/۸۵۲	۰/۲۶۶	۰/۴۶۷	۶۰۳،۶۴۸	۲
۱/۴۹۴	۰/۸۵۰	۰/۲۸۲	۰/۴۷۳	۷۲۰،۳۰۹	۳

نتایج متوسط زمانی بدست آمده برای ضریب پسا، حداکثر نوسان ضریب برآ، موقعیت افقی نقطه زینی<sup>۳</sup> و مقدار حداکثر تابع دیواره در جدول ۴ مقایسه شده است. همانگونه مشاهده می‌شود علارغم وجود خطای قابل توجه بین شبکه بندی‌های ۱ و ۲، بین شبکه بندی‌های ۲ و ۳ خطای مشاهده شده قابل چشم پوشی است. لذا شبکه بندی شماره ۲ برای شبیه‌سازی جریان حول ساختمان با مقطع دایروی انتخاب شده است.

برای اعتبار سنجی ساختمان با توجه به شبیه بودن این جریان به جریان دوبعدی حول استوانه، از داده‌های موجود در مطالعات گذشته در مورد جریان آشفته حول استوانه‌ها استفاده شده است. با توجه به بالا بودن عدد رینولدز در این مطالعه، سعی شده است مطالعات نزدیک به این عدد رینولدز در این بخش استفاده شود. جدول ۵، اعتبارسنجی جریان سیال حول یک استوانه در اعداد رینولدز مختلف برای ضریب پسای متوسط زمانی را نشان می‌دهد. نتایج اعتبار سنجی برای اعداد رینولدز بررسی شده نشان از دقت خوب کد عددی استفاده شده می‌دهد.

۴- بررسی عملکرد توربین بادی ساونیوس رایج در مجاورت یک ساختمان با مقطع دایروی

در این بخش، جزییات شبیه‌سازی توربین بادی رایج ساونیوس در مجاورت یک ساختمان با مقطع دایروی ارائه می‌شود. برای شبیه‌سازی توربین بادی در مجاورت ساختمان مورد نظر، پارامترهایی همچون سرعت نوک بی‌بعد، جهت چرخش (رو به داخل و رو به خارج) و زاویه نصب در سرعت جریان آزاد ثابت ۶ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، از یک دامنه محاسباتی دو بعدی به شکل مستطیل مطابق شکل

استفاده شده است که  $D_B$  قطر ساختمان می‌باشد. ابعاد دامنه محاسباتی در این بخش بر اساس پژوهش صورت گرفته توسط اونگ و همکاران<sup>[۲۳]</sup> انتخاب شده است. فاصله مرکز ساختمان از مقطع ورودی برابر  $7 D_B$  می‌باشد. معادلات حاکم، مدل آشفتگی و شرایط مرزی همانند جریان حول توربین بادی در بخش قبلی می‌باشد بجز اینکه هیچ ناحیه چرخان در درون دامنه محاسباتی لحاظ نشده و لذا شرط مرزی مرز مشترک وجود ندارد. برای شبیه‌سازی جریان حول ساختمان مورد نظر بشکل دو بعدی، از گام زمانی معادل با عدد کورانت<sup>۲</sup> یک استفاده شده است که نسبت به گام زمانی در نظر گرفته شده برای جریان حول توربین مرجع (بخش قبلی) مقدار بزرگتری دارد. علاوه بر معادلات حاکم بر مساله، از پارامترهای بی‌بعد زیر برای محاسبه ضرایب پسا و برا در این بخش استفاده شده است<sup>[۱]</sup>:

$$C_D = \frac{F_D}{0.5\rho U^2 A} \quad (6)$$

$$C_L = \frac{F_L}{0.5\rho U^2 A} \quad (7)$$

به منظور بررسی دقیق‌تر، جریان حول ساختمان منفرد در دو عدد رینولدز  $6/85 \times 10^6$  و  $13/7 \times 10^6$  بترتیب معادل با سرعت جریان آزاد باد ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه، شبیه‌سازی شده است. استقلال نتایج از شبکه بندی در سه شبکه بندی با وضوح مختلف تحت عدد رینولدز  $13/7 \times 10^6$  صورت گرفته است.

- 1 Ong et al.
- 2 Courant number

جدول ۵. اعتبارسنجی کد عددی استفاده شده برای ساختمان با مقطع دایروی بدون حضور توربین بادی با داده‌های قبلی

Table 5. Validation of the numerical code used for the building with a circular cross-section in the absence of the wind turbine with previous data

$C_D$				محقق
$Re$				
$10^6$	$2 \times 10^6$	$6/85 \times 10^6$	$7 \times 10^6$	
۰/۳۴	۰/۲۹	---	۰/۴۱	جیمز و همکاران ۵ [۲۴]
۰/۲۱	۰/۳۶	---	۰/۵۳	چیو ۶ [۲۵]
---	۰/۵۱	---	۰/۷۱	روشکو ۷ [۲۶]
۰/۵۹	---	---	---	سینگ و میتال ۸ [۲۷]
۰/۶۳	۰/۷۴	---	---	آچنباخ ۹ [۲۸]
۰/۵۲	۰/۴۷	---	---	اونگ و همکاران ۱۰ [۲۳]
۰/۵۶	۰/۷۱	۰/۵۳	---	مطالعه حاضر

<sup>5</sup> James et al.

<sup>6</sup> Schewe

<sup>7</sup> Roshko.

<sup>8</sup> Singh & Mittal.

<sup>9</sup> Achenbach.

<sup>10</sup> Ong et al.

این نکته لازم است که این تحلیل حساسیت هم برای چرخش رو به داخل و هم برای چرخش رو به خارج در سرعت نوک بی‌بعد  $0/8$  و زاویه نصب  $60^\circ$  درجه انجام گرفته است. نتایج بدست آمده برای ضریب گشتاور متوسط در یک دور کامل در جدول ۶ ارائه شده است. بررسی نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که برای هر دو جهت چرخش روتور، مقدار خطا به ازای مقادیر گام زمانی کوچکتر از  $0/3$  درجه به کمتر از  $0/48$  و  $0/61$  درصد به ترتیب برای چرخش رو به خارج و چرخش رو به داخل بدست می‌آید. لذا گام زمانی  $0/3$  درجه برای شبیه‌سازی توربین بادی در مجاورت یک ساختمان با مقطع دایروی انتخاب شده است.

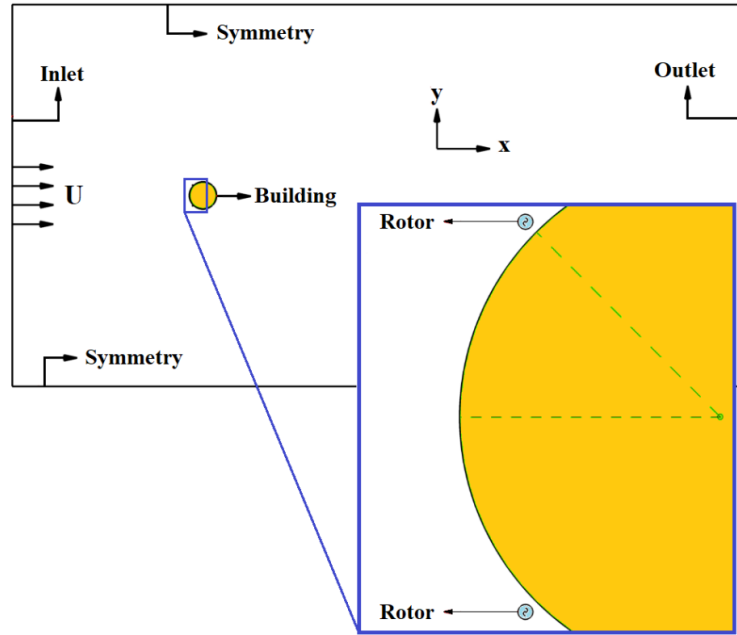
#### ۵- نتایج و بحث

در این بخش عملکرد توربین بادی ساونیوس رایج در مجاورت یک ساختمان با مقطع دایروی مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارامترهایی همچون جهت چرخش روتور، زاویه نصب و سرعت نوک بی‌بعد بطور مجزا بحث می‌شود.

۶ استفاده شده است. ابعاد دامنه محاسباتی و شرایط مرزی اعمال شده به ترتیب مطابق با بخش ۳ و بخش ۲ می‌باشند. معادلات حاکم نیز همانند بخش‌های قبلی می‌باشد. برای شبیه‌سازی دقیق جریان حول توربین بادی در مجاورت ساختمان، مطابق شکل ۷ ابتدا جریان حول ساختمان و توربین تا زمان بی‌بعد  $4195/8$  حل شده، سپس رفتار شبه پایای توربین بادی در هر دور کامل مورد بررسی قرار گرفته و داده‌های لازم استخراج شده است. شبکه بندی صورت گرفته برای این حالت مطابق با شبکه بندی استخراج شده از بخش‌های ۲ و ۳ می‌باشد.

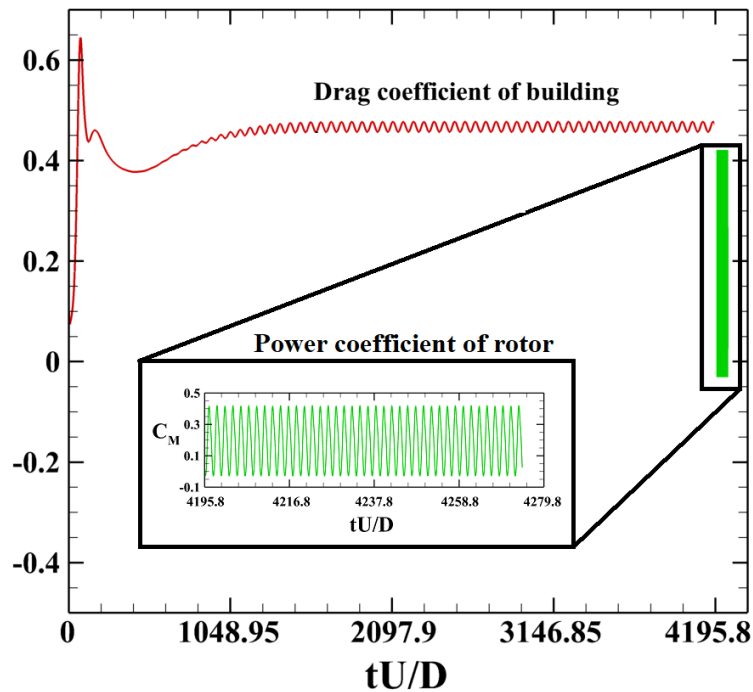
#### ۴-۱- تحلیل حساسیت به گام زمانی

اگرچه در بخش ۲ اندازه گام زمانی با استناد به کارهای قبلی انتخاب شد، لیکن با قرار گیری توربین بادی در مجاورت ساختمان نمی‌توان اندازه گام زمانی را به یافته‌های قبلی برای شبیه‌سازی توربین بادی در غیاب یک ساختمان ارجاع داد. به این دلیل، حساسیت سنجی نسبت به گام زمانی برای مساله حاضر با چهار اندازه گام  $0/5$ ،  $0/4$ ،  $0/3$  و  $0/2$  انجام گرفته است. ذکر



شکل ۶. دامنه محاسباتی بکار رفته برای شبیه‌سازی توربین بادی ساوونیوس رایج در مجاورت یک ساختمان با مقطع دایروی

Fig. 6. Computational domain used to simulate the conventional Savonius wind turbine in the vicinity of a building with a circular cross-section



شکل ۷. تغییرات لحظه‌ای ضریب پسای ساختمان و ضریب گشتاور توربین بادی ساوونیوس رایج به ازای زاویه نصب  $60^\circ$  و سرعت نوک بی‌بعد  $0.8$  در حالت چرخش رو به داخل

Fig. 7. Variation of building drag coefficient and the conventional Savonius wind turbine torque coefficient for installation angle of  $60^\circ$  and tip speed ratio of 0.8 in inward rotation

جدول ۶. نتایج بدست آمده از تحلیل حساسیت‌نگام زمانی توربین بادی ساوونیوس رایج در مجاورت ساختمان در زاویه نصب ۶۰ درجه و سرعت نوک بی‌بعد ۰/۸

Table 6. Results obtained from the sensitivity analysis to time step size for the conventional Savonius wind turbine in the vicinity of the building at the installation angle of 60° and the tip speed ratio of 0.8

خطا (%)	$C_M$ (چرخش رو به خارج)	خطا (%)	$C_M$ (چرخش رو به داخل)	گام زمانی (درجه)
---	۰/۶۴۸	---	۰/۸۰۲	۰/۵
۰/۴۶	۰/۶۵۱	۱/۱۲	۰/۸۱۱	۰/۴
۰/۳۰	۰/۶۵۳	۱/۱۰	۰/۸۲۰	۰/۳
۰/۶۰	۰/۶۵۷	۰/۴۸	۰/۸۲۴	۰/۲

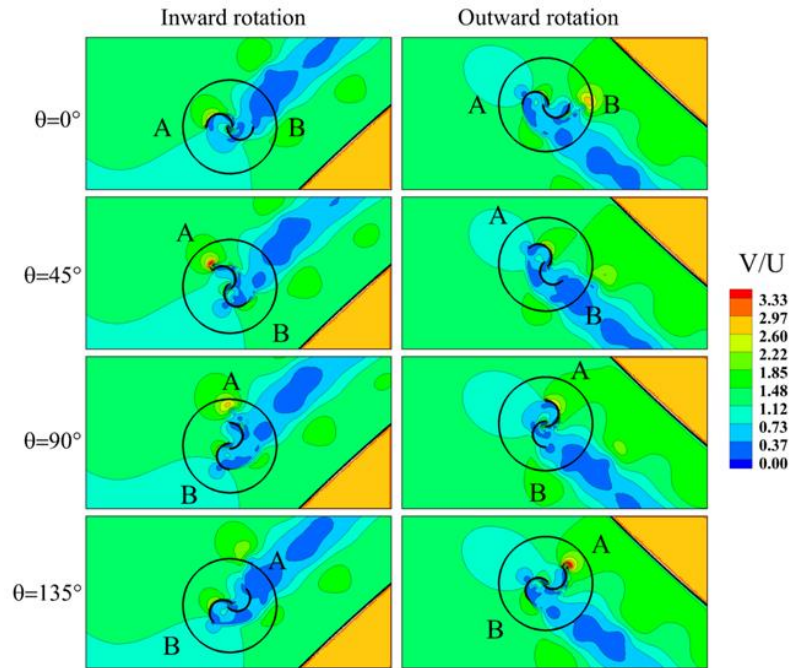
بیان داشت که تاثیر جهت چرخش روتور بستگی زیادی به زاویه فضایی روتور دارد. به عبارت دیگر، در برخی از زوایای فضایی، چرخش رو به داخل و در برخی دیگر، چرخش رو به خارج ارجحیت دارد. لذا، انتخاب بین چرخش رو به داخل و چرخش رو به خارج نیازمند تحلیل بیشتری می‌باشد که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

برای بررسی بیشتر تاثیر جهت چرخش در مشخصه‌های توانی روتور، تغییرات ضریب گشتاور در یک دور کامل برای دو حالت چرخش رو به داخل و چرخش رو به خارج در شکل ۹ ارائه شده است. با هدف مقایسه، مقادیر متناظر با حالت مرجع (روتور ساوونیوس در جریان آزاد باد بدون حضور ساختمان) نیز ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، در حالت مرجع، گشتاور روتور بادی در برخی از زوایای فضایی، وارد ناحیه مرده (مقدار ضریب گشتاور منفی) می‌شود که رخداد منفی محسوب می‌شود. این رخداد منفی برای روتور نصب شده در مجاورت ساختمان بدون توجه به جهت چرخش روتور مشاهده نمی‌شود. از سوی دیگر، ضریب گشتاور روتور نصب شده در مجاورت ساختمان بدون توجه به جهت چرخش آن به مقدار قابل توجهی نسبت به حالت مرجع بیشتر می‌باشد. اما در مقایسه دو روتور نصب شده در مجاورت ساختمان، همانگونه که قبلاً اشاره شد در برخی از زوایای فضایی چرخش رو به داخل و در برخی دیگر چرخش رو به خارج گشتاور بیشتری را تولید می‌نماید. در مقایسه کلی می‌توان اظهار داشت که در این زاویه نصب و سرعت نوک بی‌بعد، مطابق نتایج ارائه شده در شکل ۹، ضریب گشتاور کلی

#### ۵-۱- اثر جهت چرخش روتور

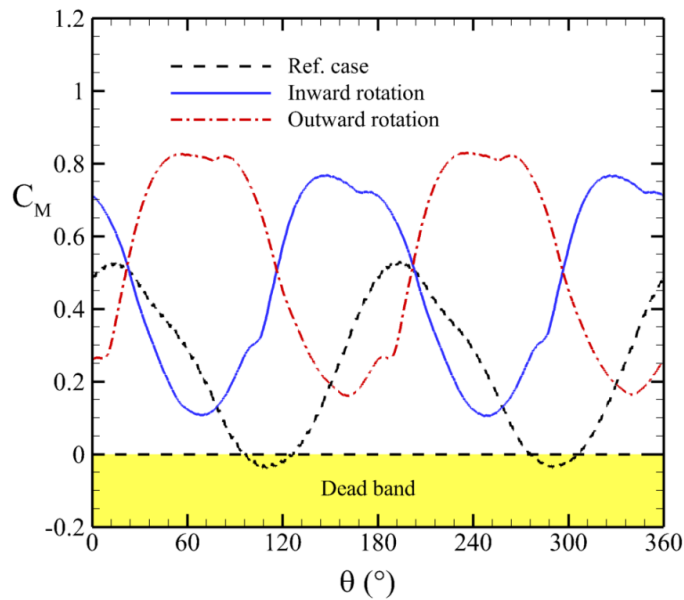
شکل ۸ میدان سرعت بی‌بعد حول توربین بادی مورد نظر در مجاورت ساختمان را برای دو جهت چرخش رو به داخل و رو به خارج در زوایای فضایی<sup>۱</sup> مختلف به ازای زاویه نصب ۴۵ درجه و سرعت نوک بی‌بعد ۰/۸ نشان می‌دهد. در این پژوهش، میدان سرعت با توجه به سرعت جریان آزاد باد، بی‌بعد سازی شده است. همانطور که مشخص است، در چرخش رو به بیرون، میدان سرعت بین روتور و جداره ساختمان قویتر از حالت چرخش رو به داخل در کلیه زوایای فضایی است. در زاویه فضایی صفر درجه، در چرخش رو به داخل میدان سرعت در قسمت محدب پره  $A$  قویتر از حالت چرخش رو به خارج است. این رخداد موجب کاهش پسای منفی پره  $A$  و افزایش گشتاور کلی روتور برای چرخش رو به داخل می‌شود. در زاویه فضایی ۴۵ درجه این رخداد معکوس شده و روی قسمت محدب پره  $A$  میدان سرعت برای چرخش رو به خارج بیشتر می‌شود. همانطوریکه در شکل ۸ مشاهده می‌شود، این پدیده مثبت روی قسمت محدب پره  $A$  برای چرخش رو به خارج در زاویه فضایی ۹۰ درجه ادامه پیدا می‌کند. در زاویه فضایی ۱۳۵ درجه، جهت چرخش، میدان سرعت قسمت محدب پره  $B$  را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این زاویه فضایی، در چرخش رو به داخل، میدان سرعت در قسمت محدب پره  $B$  تقویت شده و این امر موجب افزایش گشتاور کلی روتور نسبت به چرخش رو به خارج می‌شود. بعنوان یک نتیجه کلی می‌توان

1 Azimuth angle



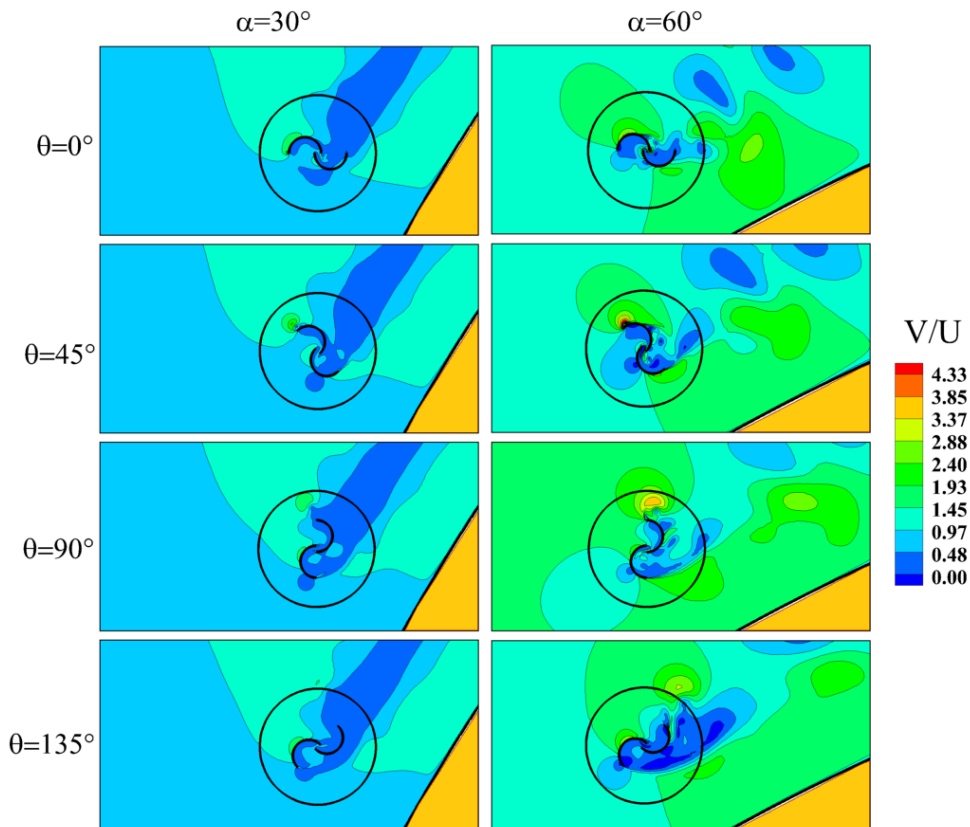
شکل ۸. اثر جهت چرخش روتور ساوونیوس در مجاورت ساختمان بر میدان سرعت بی‌بعد در زاویه نصب ۴۵ درجه و سرعت نوک بی‌بعد ۰/۸

Fig. 8. The effect of the direction of rotation of the Savonius rotor in the vicinity of the building on the normalized velocity magnitude at the installation angle of 45° and the tip speed ratio of 0.8



شکل ۹. اثر جهت چرخش روتور ساوونیوس در مجاورت ساختمان بر ضریب گشتاور لحظه‌ای در زاویه نصب ۴۵ درجه و سرعت نوک بی‌بعد ۰/۸

Fig. 9. The effect of the direction of rotation of the Savonius rotor in the vicinity of the building on the instantaneous torque coefficient at the installation angle of 45° and the tip speed ratio of 0.8



شکل ۱۰. اثر زاویه نصب روتور ساوونیوس در مجاورت ساختمان در میدان سرعت بی‌بعد برای چرخش رو به داخل و سرعت نوک بی‌بعد ۰/۸ \*

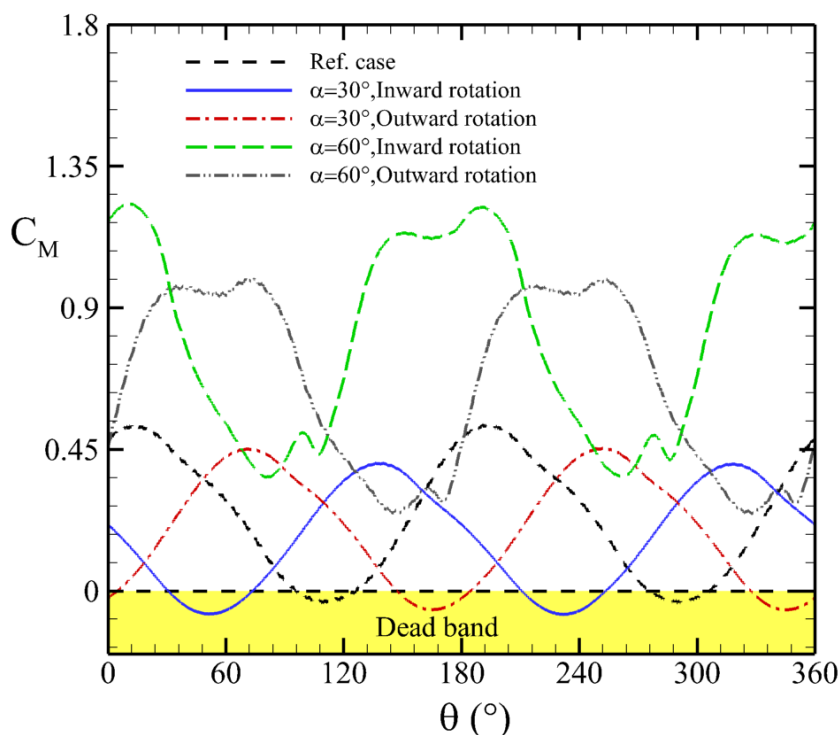
**Fig. 10. The effect of the Savonius rotor installation angle in the vicinity of the building on the normalized velocity magnitude for inward rotation and tip speed ratio of 0.8**

مشاهده گردد. دلیل این رخداد اینست که جریان از نقطه سکون جلویی که در آن سرعت جریان صفر می باشد، به سمت طرفین ساختمان منحرف شده و به دلیل وجود گرادیان فشار مطلوب سرعت آن با افزایش زاویه فضایی افزایش می یابد. به همین دلیل، می توان انتظار داشت که میدان سرعت در زاویه ۳۰ درجه به مراتب کمتر از آن در زاویه ۶۰ درجه باشد. وجود میدان سرعت قویتر در اطراف روتور باعث تزریق جریان با انرژی جنبشی بالاتر به درون قسمت مقعر پره پیشرو (افزایش گشتاور مثبت) و قسمت محدب پره برگشتی (کاهش گشتاور منفی) شده و در نتیجه گشتاور حاصل از روتور را افزایش دهد. این رخداد مثبت در تمام زوایای فضایی روتور قابل مشاهده است. لذا می توان پیش بینی کرد که روتور نصب شده در زاویه ۶۰ درجه گشتاور بیشتری نسبت به روتور نصب شده در زاویه ۳۰ درجه تولید نماید. برای بررسی دقیق تر، تغییرات ضریب گشتاور لحظه ای در یک دور کامل

برای چرخش رو به خارج بیشتر از حالت چرخش رو به داخل است.

#### ۵-۲- اثر زاویه نصب روتور در مجاورت ساختمان

پارامتر دیگری که در این بخش به آن پرداخته می شود زاویه نصب روتور در مجاورت ساختمان می باشد که می تواند تاثیر بسزایی در عملکرد روتور ساوونیوس داشته باشد. شکل ۱۰ میدانی سرعت بی بعد را برای دو زاویه نصب ۳۰ و ۶۰ درجه برای چرخش رو به داخل و سرعت نوک بی بعد ۰/۸ در زوایای فضایی مختلف مقایسه می کند. بررسی نتایج ارائه شده در این شکل به روشنی تاثیر قابل توجه زاویه نصب روتور ساوینیوس در مجاورت ساختمان را نشان می دهد. واضح است که در تمام زوایای فضایی، میدان سرعت در زاویه نصب ۶۰ درجه بطور قابل توجهی از حالت زاویه نصب ۳۰ درجه قویتر است. این پدیده در جریان حول ساختمان بدون حضور توربین بادی نیز می تواند



شکل ۱۱. اثر زاویه نصب روتور ساوونیوس در مجاورت ساختمان در ضریب گشتاور لحظه‌ای برای چرخش رو به داخل و رو به خارج و سرعت نوک بی‌بعد ۰/۸

Fig. 11. The effect of the installation angle of the Savonius rotor in the vicinity of the building on the instantaneous torque coefficient for inward and outward rotations and the tip speed ratio of 0.8

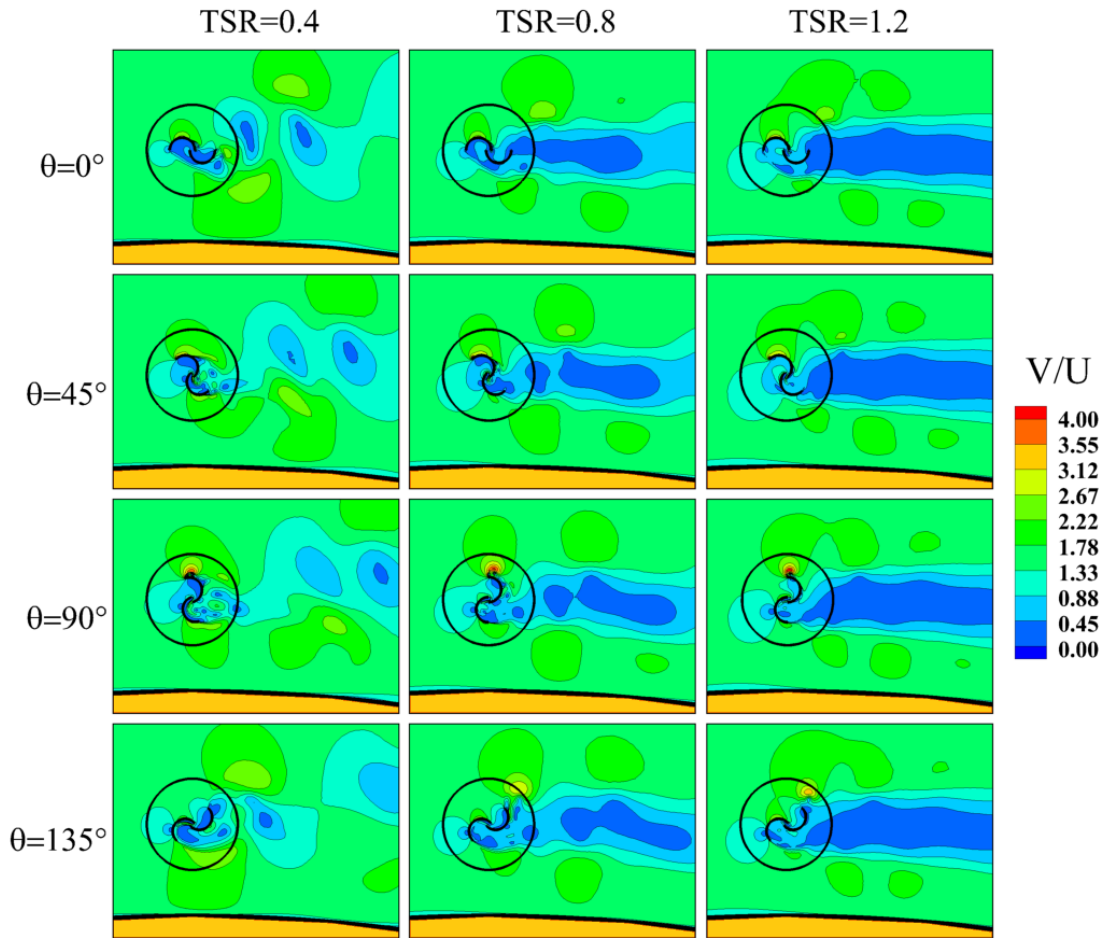
رخداد منفی محسوب می‌شود. در مقایسه روتورهای نصب شده در زاویه ۶۰ درجه، مشاهده می‌شود که گشتاور تولید شده در حالت چرخش رو به داخل بیشتر از حالت چرخش رو به خارج است. این پدیده می‌تواند بیانگر وجود میدان سرعت قویتر برای چرخش رو به داخل نسبت به چرخش رو به خارج در زاویه ۶۰ درجه باشد. همچنین در این زاویه نصب، مطابق شکل ۱۱، گشتاور منفی برای روتور مشاهده نمی‌شود.

#### ۵-۳- اثر سرعت نوک بی‌بعد

پارامتر دیگری که نقش مهمی در عملکرد روتور ساوونیوس دارد سرعت نوک بی‌بعد می‌باشد. در این پژوهش سه سرعت نوک بی‌بعد رایج در توربین‌های ساوونیوس یعنی ۰/۴، ۰/۸ و ۱/۲ مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱۲ میدان سرعت بی‌بعد در زوایای فضایی مختلف برای سه سرعت

برای دو زاویه نصب ۳۰ و ۶۰ درجه و دو جهت چرخش رو به داخل و رو به خارج در شکل ۱۱ با حالت مرجع مقایسه شده است. همانطوریکه پیش بینی شد، در مجاورت ساختمان، ضریب گشتاور روتور نصب شده در زاویه ۶۰ درجه در اکثر زوایای فضایی به میزان قابل توجهی از آن در زاویه نصب ۳۰ درجه بیشتر است. دلیل این مساله، وجود میدان سرعت قویتر در زاویه ۶۰ درجه نسبت به زاویه ۳۰ درجه می‌باشد که در شکل ۱۰ مورد بحث قرار گرفت. از سوی دیگر، تغییرات ضریب گشتاور برای زاویه نصب ۳۰ درجه در یک دور کامل روتور در دو حالت چرخش رو به داخل و رو به خارج بسیار مشابه یکدیگر است، اگرچه در چرخش رو به خارج اندکی بیشتر از چرخش رو به داخل است. بعلاوه، با نصب روتور ساوونیوس در مجاورت ساختمان در زاویه نصب ۳۰ درجه، ناحیه مرده در هر دو چرخش رو به داخل و رو به خارج نسبت به حالت مرجع توسعه پیدا می‌کند، که برای عملکرد روتور بادی یک





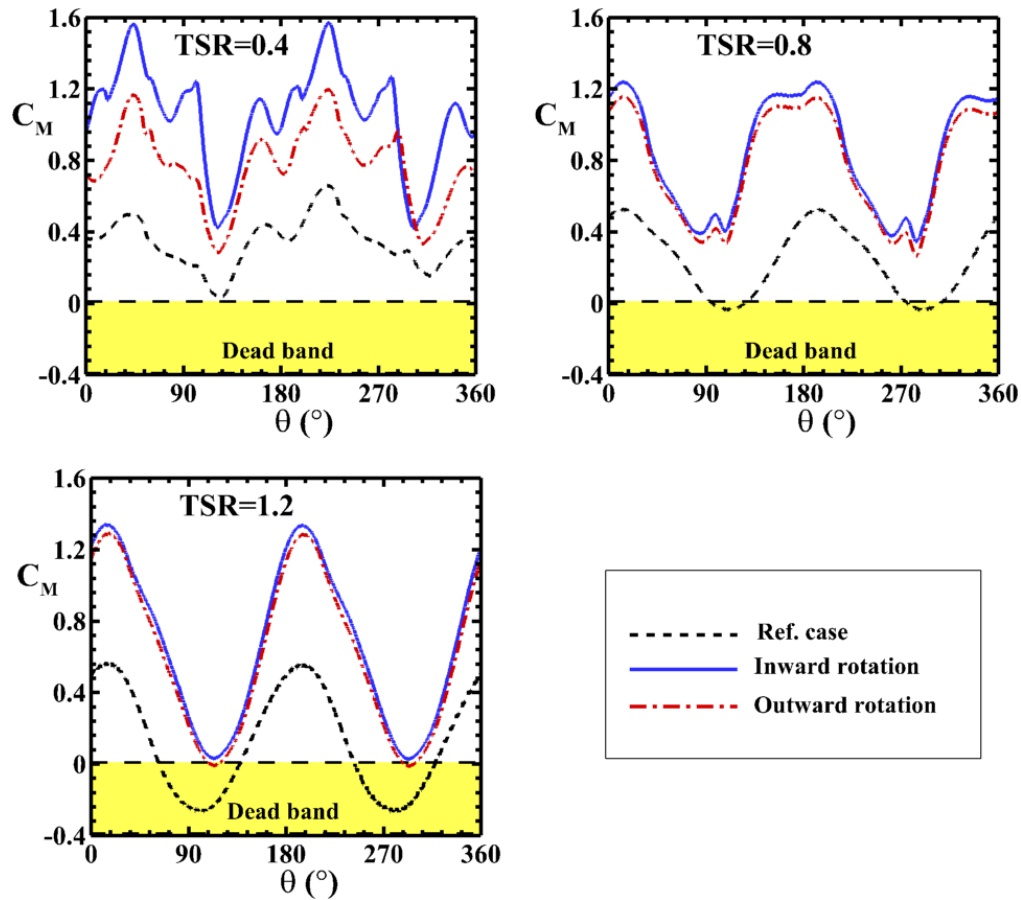
شکل ۱۲. اثر سرعت نوک بی‌بعد بر میدان سرعت بی‌بعد برای چرخش رو به داخل و زاویه نصب ۹۰ درجه

Fig. 12. Tip speed ratio effect on the normalized velocity magnitude for inward rotation and the installation angle of 90°

گردابه‌ها از دو جهت پرها رخ می‌دهد که موجبات افزایش ارتعاش در روتور و در نتیجه کاهش عمر آن می‌شود. در سرعت نوک بی‌بعد متوسط ۰/۸، با کاهش جریان تزریقی به داخل روتور، دنباله‌ای یکنواخت‌تر و قویتر در پایین دست روتور حاکم می‌شود. نهایتاً، در سرعت نوک بی‌بعد ۱/۲، مقدار جریان تزریقی به داخل روتور به حداقل رسیده و در این شرایط، یکنواختی بیشتری در دنباله ایجاد شده که در پایین دست روتور قابل مشاهده است.

شکل ۱۳ ضرب گشتاور لحظه‌ای را در یک دور کامل روتور برای سه سرعت نوک بی‌بعد ۰/۴، ۰/۸ و ۱/۲ در دو جهت چرخش رو به داخل و رو به خارج و زاویه نصب ۹۰ درجه مقایسه می‌کند. در سرعت نوک بی‌بعد ۰/۴،

نوک بی‌بعد بیان شده را برای زاویه نصب ۹۰ درجه در حالت چرخش رو به داخل به تصویر کشیده است. با بررسی میدان سرعت ارائه شده در این شکل می‌توان دریافت که با افزایش سرعت نوک بی‌بعد، دنباله ایجاد شده در پایین دست روتور شکل یکنواخت‌تر و قویتری به خود می‌گیرد. دلیل این امر آن است که با افزایش سرعت نوک بی‌بعد، نفوذ جریان باد به داخل روتور و در نتیجه اندرکنش جریان باد با پرها تقلیل یافته و روتور رفتار یک جسم صلب را بخود می‌گیرد. در سرعت نوک بی‌بعد کم همچون ۰/۴، جریان تزریق شده به داخل روتور بیشتر بوده و اندرکنش قابل توجهی بین جریان تزریق شده و پره‌های روتور وجود دارد. در این حالت، با وجود مقدار گشتاور بیشتر، ریزش



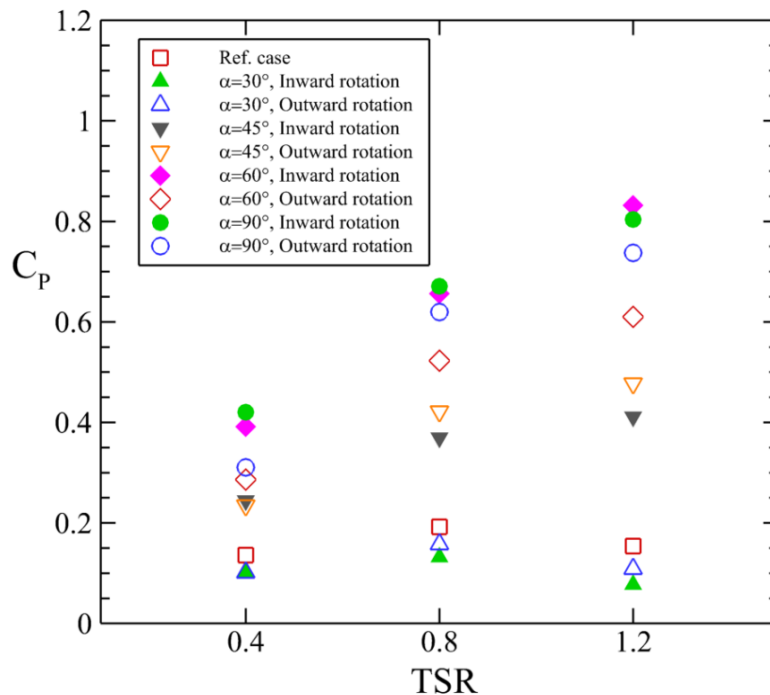
شکل ۱۳. اثر سرعت نوک بی‌بعد بر ضریب گشتاور لحظه‌ای برای چرخش رو به داخل و رو به خارج به ازای زاویه نصب ۹۰ درجه

Fig. 13. Effect of tip speed ratio on instantaneous torque coefficient for inward and outward rotations for 90° installation angle

#### ۵-۴- ضریب توان متوسط

بطور رایج، عملکرد یک توربین بادی توسط ضریب توان متوسط ارزیابی می‌شود. در این پژوهش، همگام با پژوهش‌های پیشین، از این متغیر در ارزیابی توربین بادی ساونوس رایج در مجاورت یک ساختمان با مقطع دایروی استفاده شده است. شکل ۱۴ تغییرات ضریب توان متوسط را با سرعت نوک بی‌بعد در کلیه زوایای نصب و دو جهت چرخش روبه داخل و رو به خارج نشان می‌دهد. با بررسی نتایج بدست آمده می‌توان دریافت که حداقل ضریب توان متوسط متعلق به زاویه نصب ۳۰ درجه بدون توجه به جهت چرخش روتور و سرعت نوک بی‌بعد می‌باشد. در این زاویه نصب مقادیر

بدلیل اندرکنش قابل توجه بین جریان تزریق شده به درون روتور و پره‌های توربین، تغییرات ضریب گشتاور لحظه‌ای برای هر دو جهت چرخش و حالت مرجع نوسانی است. با افزایش سرعت نوک بی‌بعد تا ۰/۸ شاهد تقلیل در نوسانات ضریب گشتاور روتور بوده و نهایتاً رفتار شبه پایا در روتور در سرعت نوک بی‌بعد ۱/۲ حاکم می‌شود. با این حال، با افزایش سرعت نوک بی‌بعد مقادیر حداقل ضریب گشتاور به سمت ناحیه مرده توسعه می‌یابند که یک پدیده نامطلوب بشمار می‌رود. نهایتاً، روتور با چرخش رو به داخل نسبت به حالت رو به خارج مقدار ضریب گشتاور بیشتری تولید می‌کند. نکته قابل توجه اینکه با افزایش سرعت نوک بی‌بعد، تاثیر جهت چرخش روتور تقلیل می‌یابد.



شکل ۱۴. تغییرات ضریب توان متوسط توربین بادی در مجاورت ساختمان با سرعت نوک بی‌بعد برای کلیه زوایای نصب و چرخش رو به داخل و رو به خارج

Fig. 14. Variations of the mean power coefficient of the wind turbine in the vicinity of the building with tip speed ratio for all installation angles and inward and outward rotations

#### ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش عددی، به کمک دینامیک سیالات محاسباتی، عملکرد توربین بادی ساونیوس رایج در مجاورت یک ساختمان با مقطع دایروی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، توربین بادی در فاصله بی‌بعد ثابت  $S/D=2$  نسبت به جداره ساختمان و زوایای نصب مختلف همچون  $30^\circ$ ،  $45^\circ$  و  $60^\circ$  درجه مطالعه گردید. همچنین، دو جهت چرخش ممکن رو به داخل و رو به خارج برای توربین مورد نظر در سرعت جریان آزاد باد ثابت  $6$  متر بر ثانیه و سه سرعت نوک بی‌بعد رایج برای توربین‌های ساونیوس یعنی  $0.4$ ،  $0.8$  و  $1.2$  بررسی گردید. نتایج بدست آمده به روشنی اهمیت جهت چرخش روتور و زاویه نصب را نشان داد. در کلیه زوایای نصب که عملکرد روتور در مقایسه با حالت مرجع بهتر بوده است، چرخش رو به داخل نسبت به چرخش رو به خارج منجر به بهبود بیشتر در مشخصه های توانی روتور گردید. همچنین، مشخص گردید که بدلیل وجود پتانسیل باد ضعیفتر، نصب توربین ساونیوس در مجاورت ساختمان مورد نظر در زاویه  $30^\circ$  درجه منجر به

ضریب توان در تمامی سرعت‌های نوک بی‌بعد حتی کمتر از حالت مرجع می‌باشد. در نتیجه، این زاویه نصب برای توربین بادی ساونیوس در مجاورت ساختمان مورد نظر توصیه نمی‌شود. از سوی دیگر، بیشترین ضریب توان متعلق به حالت چرخش رو به داخل در زوایای نصب  $60^\circ$  و  $90^\circ$  درجه بسته به سرعت نوک بی‌بعد بدست می‌آید. در مقادیر سرعت نوک بی‌بعد کم و متوسط ( $0.4$  و  $0.8$ )، زاویه نصب  $90^\circ$  درجه در حالت چرخش رو به داخل و در سرعت نوک بی‌بعد زیاد ( $1.2$ )، زاویه نصب  $60^\circ$  درجه در حالت چرخش رو به داخل بیشترین ضریب توان را برای توربین بادی ساونیوس رایج در مجاورت ساختمان مورد نظر فراهم می‌کنند. لذا، این زوایای نصب و جهت چرخش برای داشتن بالاترین عملکرد روتور بادی مورد نظر در مجاورت ساختمان توصیه می‌شوند. موارد بهینه ذکر شده به ترتیب  $20.8/72$ ،  $24.9/35$  و  $43.9/95$  درصد بهبود در ضریب توان را نسبت به حالت مرجع به خود اختصاص می‌دهند.

علائم انگلیسی

$S$	فاصله بین مرکز روتور و جداره ساختمان، m
$t$	زمان، s
$t_b$	ضخامت پره، m
$TSR$	سرعت نوک بی بعد
$u$	مولفه سرعت افقی، m/s
$u'$	مولفه سرعت نوسانی، m/s
$U$	سرعت جریان آزاد باد، m/s
$V$	مقدار سرعت، m/s
$x$	مختصات افقی، m
$y$	مختصات عمودی، m
$y^+$	تابع دیواره
علائم یونانی	
$\rho$	چگالی، kg/m <sup>3</sup>
$\nu$	ویسکوزیته سینماتیکی، m <sup>2</sup> /s
$\omega$	سرعت دورانی روتور، rad/s
$\alpha$	زاویه نصب توربین
$\theta$	زاویه فضایی

توسعه ناحیه مرده و کاهش ضریب توان نسبت به حالت مرجع خواهد شد. لذا این زاویه نصب برای توربین بادی در مجاورت ساختمان مورد نظر قابل توصیه نمی‌باشد. از سوی دیگر، بسته به مقدار سرعت نوک بی بعد، زوایای نصب ۶۰ و ۹۰ درجه در حالت چرخش رو به داخل بالاترین عملکرد را داشته و بهبودی بین ۲۰۸/۷۲ تا ۴۳۹/۹۵ درصد در ضریب توان متوسط را نسبت به حالت مرجع فراهم می‌کنند که برای نصب توربین بادی ساونیوس رایج در مجاورت ساختمان مورد نظر توصیه می‌شوند.

اگرچه پارامترهای متعددی همچون جهت چرخش رو به داخل و رو به خارج، زاویه نصب و سرعت نوک بی بعد در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت، برای کارهای آتی پیشنهاد می‌شود جریان باد با زوایای مختلف و ساختمان با اشکال مختلف مورد بررسی قرار گیرد. همچنین، کارهای پیش رو می‌توانند تأثیر تعداد پره های توربین بادی و عملکرد سایر توربین‌ها همچون نوع داریوس را در مجاورت ساختمان مورد بررسی قرار دهند.

۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی

$A$	مساحت، m <sup>2</sup>
$C_D$	ضریب پسا
$C_L$	ضریب برا
$C_M$	ضریب گشتاور
$C_P$	ضریب توان
$d$	قطر پره، m
$D$	قطر روتور، m
$D_I$	قطر ناحیه چرخان، m
$D_B$	قطر ساختمان، m
$D_R$	قطر ناحیه چرخان، m
$F_D$	نیروی پسا
$F_L$	نیروی برا
$G$	مقدار همپوشانی پره‌ها، m
$i$	بردار واحد در جهت افقی
$j$	بردار واحد در جهت عمودی
$L_s$	موقعیت افقی نقطه زینی، m
$p$	فشار، Pa
$P$	توان، N
$Re$	عدد رینولدز

منابع

- [1] C.M. Chan, H.L. Bai, D.Q. He, Blade shape optimization of the Savonius wind turbine using a genetic algorithm, *Applied energy*, 213 (2018) 148-157.
- [2] S. Roy, A. Ducoin, Unsteady analysis on the instantaneous forces and moment arms acting on a novel Savonius-style wind turbine, *Energy Conversion and Management*, 121 (2016) 281-296.
- [3] R. Hassanzadeh, M. Mohammadnejad, S. Mostafavi, Comparison of various blade profiles in a two-blade conventional Savonius wind turbine, *Journal of Energy Resources Technology*, 143(2) (2021) 021301.
- [4] R. Hassanzadeh, M. Mohammadnejad, Effects of inward and outward overlap ratios on the two blade Savonius type of vertical axis wind turbine performance, *International Journal of Green Energy*, 16(15) (2019) 1485-1496.
- [5] N. Alom, U.K. Saha, Influence of blade profiles on Savonius rotor performance: Numerical simulation

- [15] M. Anbarsooz, M. Amiri, Towards enhancing the wind energy potential at the built environment: Geometry effects of two adjacent buildings, *Energy*, 239 (2022) 122351.
- [16] M. Asadi, R. Hassanzadeh, On the application of semicircular and Bach-type blades in the internal Savonius rotor of a hybrid wind turbine system, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 221 (2022)104903.
- [17] A. Rezaeiha, I. Kalkman, B. Blocken, 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*, 107 (2017) 373–385.
- [18] A. Rezaeiha, H. Montazeri, B. Blocken, Towards accurate CFD simulations of vertical axis wind turbines at different tip speed ratios and solidities: Guidelines for azimuthal increment, domain size and convergence, *Energy Conversion and management*, 156 (2018) 301-316.
- [19] M. Asadi, R. Hassanzadeh, Effects of internal rotor parameters on the performance of a two bladed Darrieus-two bladed Savonius hybrid wind turbine. *Energy Conversion and Management* 238 (2021) 114109.
- [20] S. Patankar, *Numerical heat transfer and fluid flow*, (2018) Taylor & Francis.
- [21] S. Roy, U.K. Saha, Wind tunnel experiments of a newly developed two-bladed Savonius-style wind turbine, *Applied Energy*, 137 (2015)117–125.
- [22] M. Tahani, A. Rabbani, A. Kasaeian, M. Mehrpooya, M. Mirhosseini, Design and numerical investigation of Savonius wind turbine with discharge flow directing capability, *Energy*, 130 (2017) 327-338.
- [23] M.C. Ong, T. Utnes, L.E. Holmedal, D. Myrhaug, B. Pettersen, Numerical simulation of flow around a smooth circular cylinder at very high Reynolds numbers, *Marine Structures*, 22(2) (2009)142-153.
- [24] W.D. James, S.W. Paris, G.N. Malcolm, Study of viscous crossflow effects on circular cylinders at high Reynolds numbers, *Aiaa Journal*, 18 (9) (1980) 1066-1072.
- and experimental validation, *Energy Conversion and Management*, 186 (2019) 267-77.
- [6] F. Balduzzi, A. Bianchini, L. Ferrari, Microeolic turbines in the built environment: Influence of the installation site on the potential energy yield, *Renewable Energy*, 45 (2012) 163-74.
- [7] R. Hassanzadeh, Best location of the small wind turbine around a single high-rise building, *International Journal of Green Energy*, 14(2) (2017)196-204.
- [8] I. Abohela, N. Hamza, S. Dudek, Effect of roof shape, wind direction, building height and urban configuration on the energy yield and positioning of roof mounted wind turbines, *Renewable Energy*, 50 (2013) 1106-1118.
- [9] L. Ledo, P.B. Kosasih, P. Cooper, Roof mounting site analysis for micro-wind turbines, *Renewable energy*, 36(5) (2011) 1379-1391.
- [10] B. Kim, K.T. Tse, A. Yoshida, Z. Chen, P. Van Phuc, H.S. Park, Investigation of flow visualization around linked tall buildings with circular sections, *Building and Environment*, 153 (2019) 60-76.
- [11] H. Mittal, A. Sharma, A. Gairola, Numerical simulation of pedestrian level wind flow around buildings: Effect of corner modification and orientation, *Journal of Building Engineering*, 22 (2019) 314-326.
- [12] F. Sepehrianazar, R. Hassanzadeh, I. Mirzaee, Turbulence and Energy Assessment of a Two Bladed H-Type Vertical Axis Wind Turbine Between Two High-Rise Buildings, *International Journal of Heat and Technology*, 37(4) (2019) 948-957.
- [13] W. Xu, G. Li, X. Zheng, Y. Li, S. Li, C. Zhang, F. Wang, High-resolution numerical simulation of the performance of vertical axis wind turbines in urban area: Part I, wind turbines on the side of single building, *Renewable Energy*, 177 (2021) 461-474.
- [14] W. Xu, Y. Li, G. Li, S. Li, C. Zhang, F. Wang, High-resolution numerical simulation of the performance of vertical axis wind turbines in urban area: Part II, array of vertical axis wind turbines between buildings, *Renewable Energy*, 176 (2021) 25-39.

- [27] S.P. Singh, S.A. Mittal, Flow past a cylinder: shear layer instability and drag crisis, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 47(1) (2005) 75-98.
- [28] E. Achenbach, Distribution of local pressure and skin friction around a circular cylinder in cross-flow up to  $Re= 5 \times 10^6$ , *Journal of Fluid Mechanics*, 34(4) (1968) 625-639.
- [25] G. Schewe, On the force fluctuations acting on a circular cylinder in crossflow from subcritical up to transcritical Reynolds numbers, *Journal of Fluid Mechanics*, 133 (1983) 265-285.
- [26] A. Roshko, Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number, *Journal of Fluid Mechanics*, 10(3) (1961) 345-356.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. Darvishyadegari, R. Hassanzadeh, Evaluation of a Savonius Wind Turbine in the Vicinity of a Circular Cross-sectional Building, Amirkabir J. Mech Eng., 55(11) (2024) 1373-1394.*

DOI: [10.22060/mej.2024.22931.7695](https://doi.org/10.22060/mej.2024.22931.7695)



