

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۷/۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۷

## استفاده از پره‌های راهنما برای بهبود عملکرد توربین بادی ساونئوس

وحید اعتماداصل<sup>۱</sup>، رسول اسمعیل نژاد<sup>۲\*</sup>، بابک فرزانه حمیدآباد<sup>۳</sup>، محرم جعفری<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری تبدیل انرژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

v.etemadeasl@ut.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده فنی مهندسی میانه، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

rasool\_ra@tabrizu.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی اردبیل، اردبیل، ایران

b\_farzaneh\_ms@yahoo.com

<sup>۴</sup> دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

mjafari@tabrizu.ac.ir

**چکیده:** استفاده از پره‌های راهنما روشی مناسب برای بهبود عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی ساونئوس است. پره‌های راهنما انرژی جریان باد اطراف توربین جریان باد را جمع‌آوری و به سمت قسمت مقعر روتور هدایت می‌کنند که موجب افزایش ضریب توان توربین می‌شود. در این مقاله، تأثیر پره راهنما بر روی عملکرد توربین ساونئوس مورد ارزیابی عددی قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی جریان آشفته و گذرا در اطراف توربین از نرم‌افزار آنسیس فلونت استفاده شده است. طرح‌های پیشنهادی برای پره‌های راهنما شامل تعداد پره‌های ۴، ۵ و ۶ می‌باشند که در هر کدام از آنها، پره‌ها در زوایای ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه قرار گرفته‌اند. نتایج عددی ضرایب توان و گشتاور نشان‌دهنده این است که پره‌های راهنما، باعث بهبود قابل توجه عملکرد توربین ساونئوس می‌شوند. برای توربین دارای ۵ پره راهنما که در زاویه قرارگیری ۳۰ درجه، ماکزیمم ضریب توان ۰/۵۱ می‌باشد که نشان‌دهنده افزایش ۱۸۳ درصدی در مقایسه با توربین بدون پره راهنماست. ماکزیمم ضرایب توان برای توربین با تعداد پره‌های راهنمای ۴ و ۶ به ترتیب ۰/۴۲ و ۰/۴۹ است که در مقایسه با توربین ساونئوس بدون پره‌های راهنما به ترتیب به مقدار ۱۳۳ و ۱۷۲ درصد افزایش یافته‌اند.

**واژه‌های کلیدی:** توربین بادی، ساونئوس، پره راهنما، عملکرد آیرودینامیکی.

## ۱. مقدمه

دو پره‌ای را ارزیابی کردند؛ نتایج کار آن‌ها نشان می‌دهد که برای نسبت تداخل ۰/۱۵ برابر قطر روتور، عملکرد توربین بادی ساونبوس بهینه است [۸-۱۰]. جابر حسین‌زاده گروهی و همکاران [۱۱] در یک پژوهش تجربی و عددی، به بررسی تأثیر نسبت تداخل بر روی عملکرد توربین بادی ساونبوس پرداخته‌اند؛ آن‌ها در این پژوهش مقدار ۰/۲ را به‌عنوان نسبت تداخل بهینه پیشنهاد داده‌اند. مودی و همکاران [۱۲] با تغییر شکل پره‌های روتور ساونبوس توانستند بازدهی توربین بادی را تا میزان ۱۵٪ بهبود دهند. کاموجی و همکاران [۱۳] نیز با تغییر شکل پره‌های روتور ساونبوس توانستند به ماکزیمم ضریب توان ۲۱٪ برسند.

روش دیگر برای بهبود عملکرد توربین‌های بادی ساونبوس استفاده از پره‌های راهنما در اطراف روتور است. ایربو و همکاران [۱۴] با استفاده از دو پره راهنما در اطراف روتور ساونبوس ضریب توان را تا ۱/۵ برابر بهبود بخشیده‌اند. العسکری و همکاران [۱۵] نیز کار مشابهی را انجام دادند؛ آن‌ها توانستند ضریب توان را تا حدود ۵۲٪ برسانند. محمد و همکاران [۱۶] نشان دادند که با استفاده از پره راهنما و حذف درگ مخالف در پره توربین بادی ساونبوس می‌توان ضریب توان آن را به ۰/۲۷ افزایش داد. آلتان و همکاران [۱۷] نیز کار مشابهی را انجام دادند.

همچنین وجود سازه‌های اطراف توربین نیز می‌تواند موجب بهبود عملکرد توربین‌های بادی ساونبوس شود. گودرزی و همکاران [۱۸] نشان دادند که میدان جریان در اطراف برج خنک‌کن نیروگاه موجب بهبود عملکرد توربین ساونبوس می‌شود. شاهین و همکاران [۱۹] نشان داده‌اند که استفاده از دو روتور ساونبوس در کنار یکدیگر تأثیر مثبتی بر رو عملکرد هرکدام از روتورها دارد، به‌طوری که با چینش مناسب روتورها می‌توان ضریب توان را به میزان ۳۴٪ افزایش داد.

با مرور پژوهش‌های مختلف می‌توان دریافت که منحرف نمودن باد به طرف مقعر روتور ساونبوس موجب بهبود عملکرد توربین ساونبوس می‌شود. با این حال استفاده از چندین پره راهنما (استاتور) اطراف روتور، می‌تواند منجر به هدایت بهتر جریان در صورت تغییر جهت جریان باد شود. هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی عملکرد توربین بادی ساونبوس استاتوردار با تعداد و زوایای مختلف قرارگیری پره‌های راهنماست. در مورد عملکرد توربین ساونبوس استاتوردار پژوهش‌هایی صورت گرفته است که در آن‌ها یک تعداد خاص پره‌های راهنما مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲۰-۲۱]. با این حال در این پژوهش‌ها اثر تغییر تعداد پره‌ها و همچنین زوایای قرارگیری آن‌ها مورد بررسی قرار نگرفته است. روند بررسی عددی بدین صورت است که ابتدا جریان اطراف یک توربین ساونبوس بدون پره‌های راهنما با استفاده از نرم‌افزار آنسیس فلوئنت، شبیه‌سازی شده است. نتایج عددی به‌دست‌آمده با استفاده از

انرژی باد یکی از منابع تجدیدپذیر انرژی است که به‌علت توزیع ناهمگون دما و فشار در نواحی مختلف زمین ایجاد می‌شود. صنعت توربین‌های بادی در سال‌های اخیر توسعه یافته است و توربین‌های بادی ارزان‌تر و با عملکرد بهتر ارائه شده‌اند. توربین‌های بادی به دو گروه عمده با محور عمودی و محور افقی تقسیم‌بندی می‌شوند و در گروه توربین‌های بادی با محور عمودی، توربین ساونبوس از جمله توربین‌های بادی با شکل و روش ساخت ساده است [۱-۲]، عملکرد توربین‌های بادی ساونبوس مستقل از جهت باد است. این نوع توربین‌ها از دو قسمت مقعر و محدب تشکیل شده‌اند که اختلاف ضریب درگ بین آن‌ها باعث ایجاد گشتاور حرکتی می‌شود [۳]. این نوع از توربین‌ها دارای ضریب توان کمتر نسبت به توربین‌های بادی با محور افقی هستند ولی مزیت آن‌ها نسبت به توربین‌های بادی با محور افقی، کم‌هزینه بودن و سرعت پایین باد مورد نیاز برای راه‌اندازی است [۴]. در کار حاضر، از پره‌های راهنما برای افزایش ضریب توان این نوع از توربین‌ها استفاده شده و تأثیر انواع مختلف پره‌های راهنما بر روی عملکرد توربین ساونبوس بررسی شده است.

تحقیقات مختلفی به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف هندسی بر روی عملکرد توربین ساونبوس صورت گرفته است. میزان تداخل بین پره‌ها  $(a/D)$ ، نسبت ارتفاع به قطر  $(H/D)$ ، هندسه پره‌ها و همچنین اختلاف فاز بین پره‌ها از جمله پارامترهای مؤثر بر روی عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی ساونبوس هستند. به‌منظور ارزیابی عملکرد توربین‌های بادی ساونبوس، از تست‌های تجربی در داخل تونل بادی استفاده می‌شود. یکی از مهم‌ترین کارهای صورت‌گرفته در این زمینه مربوط به فوجیساوا [۵] است. در این کار، تأثیر پارامترهای هندسی روتور مانند تداخل بین پره‌ها و نسبت ارتفاع به قطر پره‌ها بر روی عملکرد توربین بررسی شده و مقادیر بهینه‌ای برای این پارامترها به دست آمده است.

جی هون لی و همکاران [۶] اثر پیچش پره‌های توربین بادی بر روی عملکرد توربین بادی ساونبوس را بررسی کردند؛ بر اساس نتایج آن‌ها مقدار ضریب توان در زاویه پیچش ۴۵ درجه، بیشینه است. البته بر اساس نتایج آن‌ها پیچش پره‌های توربین همیشه موجب افزایش بازدهی توربین‌های بادی ساونبوس نمی‌شود و حتی در زاویه پیچش ۹۰ و ۱۳۵ درجه، ضریب توان توربین از توربین بدون پیچش ساونبوس کمتر است. آکوا و همکاران [۷] تأثیر تداخل بین دو پره روتور در توربین ساونبوس

در این نوع از توربین‌ها ضریب توان و ضریب گشتاور به صورت زیر محاسبه می‌شود:

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

$$C_T = \frac{4T}{\rho D^2 HU^2} \quad (2)$$

سرعت بی‌بعد نوک پره نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\lambda = \frac{D\omega}{2U} \quad (3)$$

در این روابط،  $T$  گشتاور وارد بر روتور،  $\omega$  سرعت زاویه‌ای روتور و  $\rho$  چگالی هواست.

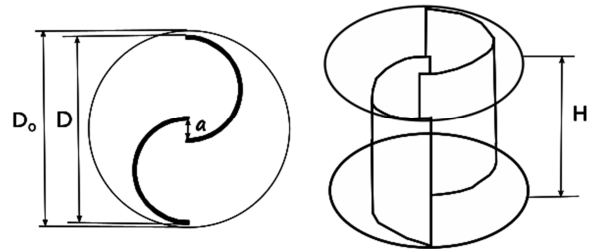
## ۲.۲. ناحیه محاسباتی و شبکه‌بندی

دوران توربین ساونیوس و قرارگیری آن در موقعیت‌های زاویه‌ای مختلف، باعث می‌شود تا میدان جریان حول توربین ذاتاً وابسته به زمان باشد که نیاز به شبیه‌سازی گذرا دارد. تغییرات میدان جریان در هر ۱۸۰ درجه دوران روتور تکرار می‌شود. همچنین، میدان جریان در اطراف توربین به علت اثرات ناشی از دوران و جدایش لایه مرزی بر روی پره‌ها کاملاً آشفته است. در این مقاله، برای شبیه‌سازی جریان گذرای آشفته در اطراف روتور توربین از نرم‌افزار ANSYS-Fluent 16 استفاده شده است. ناحیه محاسباتی در نظر گرفته شده در اطراف روتور و همچنین شرایط مرزی مورد استفاده در شکل (۳) ارائه شده است. همان طور که از شکل (۳) معلوم است، در ورودی شرط مرزی سرعت و در خروجی به صورت فشار ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین بر روی قسمت‌های بالایی و پایینی ناحیه محاسباتی نیز شرط مرزی سرعت ثابت در راستای محور طولی (x) استفاده شده است. سرعت باد در ورودی ناحیه محاسباتی مشابه کار تجربی صورت گرفته توسط فوجیساوا [۵]،  $U=6\text{m/s}$  فرض شده است. به طور کلی، ناحیه محاسباتی به نواحی دورانی مربوط به روتورها و ناحیه ساکن تقسیم‌بندی می‌شود. از مدل استاندارد k-w SST برای مدل‌سازی آشفتگی استفاده شده است. این مدل مزایای مدل استاندارد k-w و مدل استاندارد k-ε را توأم دارد. همچنین نتایج پژوهش صورت گرفته توسط العسکری و همکاران [۱۵] نشان‌دهنده این است که نتایج حاصل از این مدل نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی دقت بیشتری دارد.

نتایج تجربی ارائه شده توسط فوجیساوا [۵] اعتبارسنجی شده‌اند. سپس عملکرد توربین ساونیوس استاتور با طرح‌های مختلف به صورت عددی بررسی شده است.

## ۲. مدل‌سازی

هندسه روتور ساونیوس معمولی مورد استفاده در این مقاله به صورت شماتیک در شکل (۱) آمده است. ابعاد هندسی روتور و پره راهنما مورد استفاده نیز در جدول (۱) ارائه شده است.

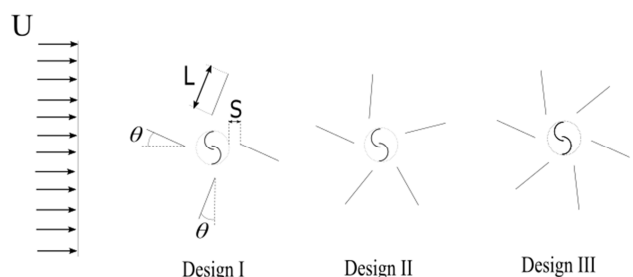


شکل (۱): هندسه اولیه توربین ساونیوس معمولی

جدول (۱): مقادیر هندسه پره و پره راهنما

مقادیر	پارامترهای هندسی
۰٫۳۳m	قطر روتور (D)
۰٫۳۳m	قطر محیط چرخان (D0)
۰٫۱۵	نسبت همپوشانی پره‌ها (a/D)
۱	نسبت ارتفاع به قطر روتور (H/D)
۰٫۲	نسبت فاصله پره‌های راهنما (S/D)
۱	نسبت طول پره‌های راهنما (L/D)
۳۰-۴۰-۵۰-۶۰ درجه	زاویه پره‌های راهنما (θ)

طرح‌های ارائه شده پره راهنما به صورت طرح‌واره در شکل (۲) نشان داده شده است. وقتی جریان باد به روتور برخورد می‌کند، اختلاف نیروی درگ حاصل در قسمت مقعر و محدب روتور موجب ایجاد گشتاور در روتور شده و باعث چرخش روتور در جهت خلاف عقربه‌های ساعت می‌شود.



شکل (۲): نحوه قرارگیری دو توربین ساونیوس معمولی در کنار همدیگر

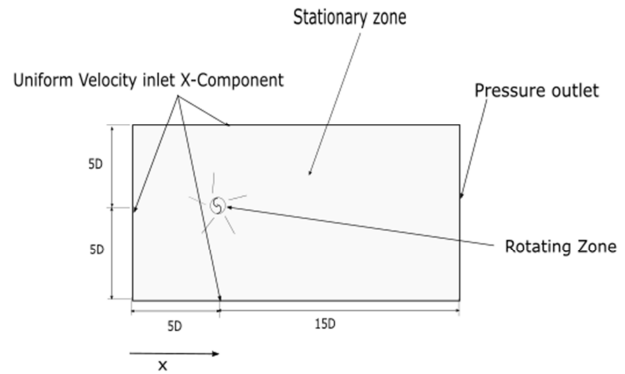
## ۲.۱. ضرایب عملکردی توربین بادی

به طور کلی، معیار عملکرد توربین‌های بادی را به صورت نسبت انرژی مفید استخراج شده توسط توربین به انرژی موجود باد تعریف می‌کنند.

بر روتور به دست آمد، سپس از مقادیر به دست آمده متوسط گشتاور وارد بر روتور استخراج و از روی همین گشتاور، مقادیر ضرایب گشتاور و توان محاسبه شد. شبیه‌سازی گذرای جریان در سرعت‌های دورانی مختلف روتور صورت گرفته است. برای انتقال داده در فصل مشترک بین نواحی دورانی و ساکن از روش مش لغزان<sup>۱</sup> استفاده شده است. در روش مش لغزان، مش‌های مربوط به نواحی دورانی و ساکن بر روی فصل مشترک دو ناحیه، نسبت به یکدیگر جابه‌جا می‌شوند. در این جابه‌جایی هیچ گونه تغییری در اندازه المان‌های مش به وجود نمی‌آید. برای فعال‌سازی مش لغزان در نرم‌افزار فلوئنت، از قسمت شرایط نواحی سلولی<sup>۲</sup> با استفاده از گزینه حرکت مش<sup>۳</sup> سرعت دورانی به مش ناحیه اطراف روتور اعمال می‌شود. حداکثر مقدار باقی‌مانده‌ها برای همگرایی معادلات پیوستگی، تکانه<sup>۴</sup> و معادلات آشفتگی<sup>۴-۱۰</sup> در نظر گرفته شده است. ضرایب زیر تخفیف مربوط به پارامترهای فشار، چگالی، تکانه، انرژی جنبشی آشفتگی<sup>۵</sup> به ترتیب ۰/۳، ۱/۰، ۰/۷، ۰/۸ در نظر گرفته شده‌اند. برای همبستگی<sup>۶</sup> فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل<sup>۷</sup> استفاده شده است. در جداسازی معادلات فشار، تکانه و انرژی جنبشی آشفتگی به ترتیب روش‌های مرتبه دو، مرتبه دو پادبادسو<sup>۸</sup> و مرتبه اول پادبادسو مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به منظور اعتبارسنجی نتایج عددی به دست آمده، شبیه‌سازی بر روی یک روتور بدون پره راهنما در چندین دور مختلف صورت گرفت و نتایج عددی به دست آمده با نتایج تجربی ارائه شده توسط فوجیسواوا [۵] مقایسه و اعتبار روش عددی اثبات شد.

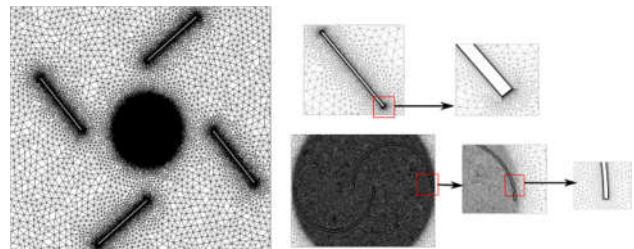
#### ۴.۲. اعتبارسنجی

فوجیسواوا با تست تجربی بر روی یک توربین ساونبوس بدون پره راهنما با ابعاد  $D=H=32\text{cm}$  و  $a=0.15D$  در تونل باد مجهز به دینامومتر، مقادیر ضرایب توان و گشتاور را برای دورهای مختلف روتور ارائه کرده است. در این مقاله، ضریب توان به عنوان معیاری برای اعتبارسنجی عددی انتخاب شد. مقایسه نتایج عددی ضریب توان با نتایج تجربی در شکل (۵) ارائه شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در نسبت سرعت‌های مختلف نوک (λ) نتایج عددی تطابق مناسبی با نتایج عددی دارند.



شکل (۳): محدوده حل و شرایط مرزی

شبکه‌بندی ایجادشده در ناحیه محاسباتی در شکل (۴) آمده است. در نقاط مجاور دیواره پره‌ها از مش لایه‌مرزی استفاده شده است. با توجه به اینکه تقسیم‌بندی روی پره‌های روتور بسیار ریز شده بود، مقدار  $y+$  کمتر از ۱ می‌باشد.



شکل (۴): مش‌بندی اطراف روتور ساونبوس

به منظور اثبات عدم وابستگی نتایج به شبکه تولیدشده، ضریب توان روتور به عنوان معیار بررسی استقلال از شبکه مورد استفاده قرار گرفته است. در جدول (۲)، مقادیر ضریب توان برای روتور بدون پره راهنما در سرعت نوک پره  $\lambda=1.0$  آمده است. همان طور که در این جدول مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد المان‌ها به مقادیر بیش از ۳۴۲۸۶۲ مقدار ضریب توان ثابت می‌ماند.

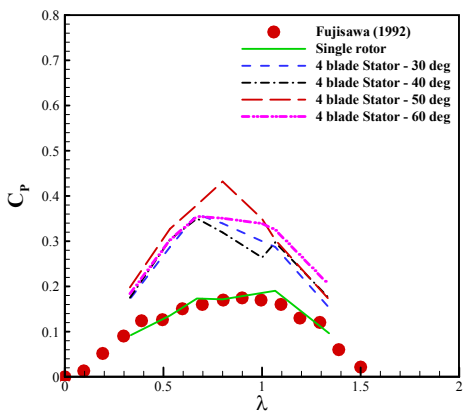
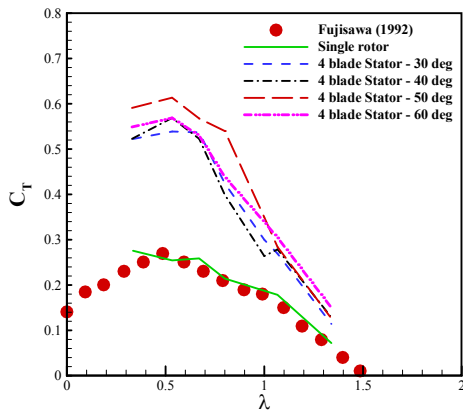
جدول (۲): مقادیر ضریب توان در سطوح مختلف شبکه‌بندی

تعداد المان‌ها	$C_p$	
۱۳۵۶۰۰	۰/۱۹۵	۱
۲۲۶۵۶۶	۰/۱۹۲	۲
۳۴۲۸۶۲	۰/۱۸۹	۳
۴۲۹۷۲۲	۰/۱۸۹	۴
۶۱۹۸۴۵	۰/۱۸۹	۵

#### ۳.۲. روش عددی

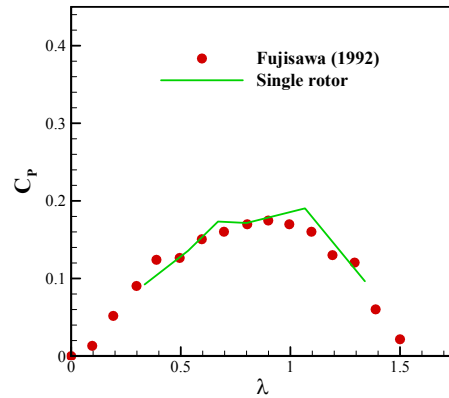
برای بررسی عملکرد روتور توربین بادی ساونبوس، جریان آشفته گذرا در اطراف روتور ساونبوس به صورت دوبعدی شبیه‌سازی شد. بدین صورت که در موقعیت‌های مختلف دوران روتور، مقادیر گشتاور وارد

1. Sliding Mesh
2. Cell Zone Conditions
3. Mesh Motion
4. Momentum
5. Turbulence Kinetic Energy
6. Coupling
7. SIMPLE
8. Upwind



شکل (۴): نمودارهای تغییرات ضرایب گشتاور و توان توربین با استاتور ۴ پره در زوایای مختلف قرارگیری پره‌های راهنما

در شکل (۷)، میدان سرعت در اطراف روتور معمولی و روتورهای دارای پره راهنما در زوایای مختلف قرارگیری پره راهنما ارائه شده‌اند. نیروی درگ وارد بر قسمت مقعر روتور باعث ایجاد گشتاور در جهت دوران روتور می‌شود. همچنین نیروی درگ وارد بر قسمت محدب نیز یک گشتاور در خلاف جهت دوران توربین ایجاد می‌کند. نیروی وارد بر قسمت مقعر روتور به علت ضریب درگ بیشتر، بزرگ‌تر است که این اختلاف بین نیروها باعث ایجاد یک گشتاور خالص در جهت دوران توربین می‌شود. از مقایسه کانتور سرعت برای روتور بدون استاتور و روتورهای استاتوردار می‌توان دریافت که در توربین‌های بادی استاتوردار، سرعت جریان باد در محل تولید درگ منفی (که باعث تولید گشتاور منفی می‌شود) نزدیک صفر است و استاتور به خوبی جریان باد را به سمت قسمت مقعر روتور منتقل می‌کند در واقع استاتور به خوبی مقدار گشتاور منفی را کاسته و مقدار گشتاور مثبت ایجاد شده در روتور ساونیوس را افزایش می‌دهد. در پره‌های راهنما با زوایای ۳۰ و ۴۰ درجه، پره راهنما نتوانسته است به طور مناسب جریان باد را هدایت کند؛ در نتیجه قسمتی از درگ مخالف از بین نرفته که باعث عملکرد ضعیف‌تر توربین در این حالت شده است. در استاتور با زاویه ۵۰ درجه،



شکل (۵): نمودار تغییرات ضریب توان روتور بدون پره راهنما برای نسبت‌های مختلف سرعت نوک پره

### ۳. بحث و نتایج

در این مقاله، تعداد پره‌ها در سه حالت ۴، ۵ و ۶ تغییر داده شد و برای هر یک از این حالات چهار زاویه ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه مورد بررسی قرار گرفتند. پره‌های استاتورهای استفاده شده در تمام طرح‌ها بدون انحنا هستند. در هر کدام از این حالت‌ها مقادیر ضرایب توان و گشتاور توربین محاسبه شده و با یکدیگر مقایسه و بحث و بررسی صورت گرفته است.

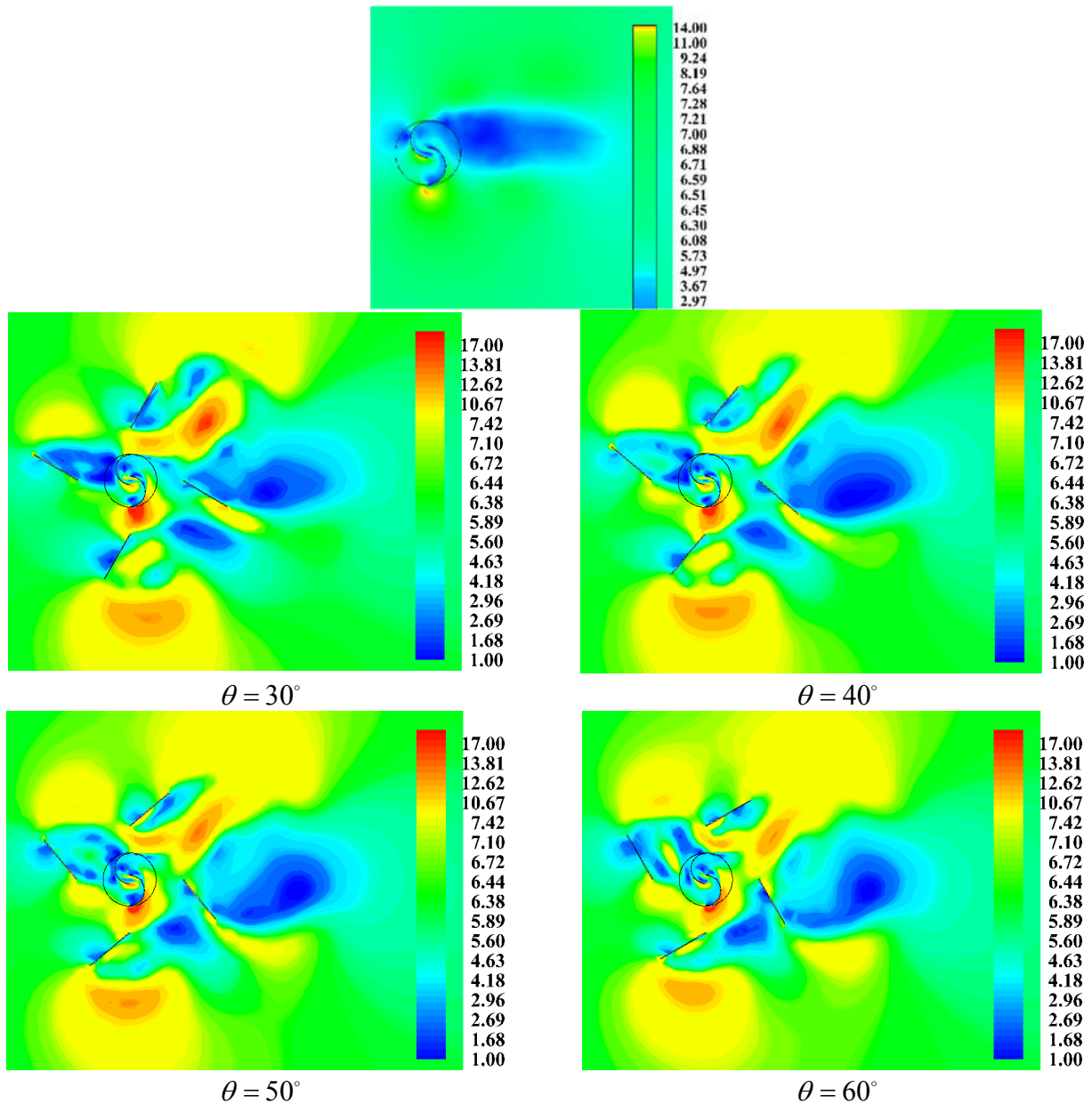
#### ۳.۱. بررسی اثر زاویه پره‌های راهنما برای استاتور چهار پره

عملکرد توربین بادی در زوایای ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه پره‌های راهنما برای تعداد ۴ پره در این بخش ارزیابی شده است. در شکل (۶) مقادیر ضرایب گشتاور و توان در سرعت‌های مختلف دوران روتور برای حالت روتور ساونیوس معمولی و چهار حالت روتور دارای پره راهنما ارائه شده‌اند.

بررسی نمودارهای شکل (۶) نشان می‌دهد که مقادیر ضریب گشتاور روتورهای دارای پره راهنما به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از مقدار آن برای حالت بدون پره راهنماست. طرح با زاویه پره راهنمای ۵۰ درجه دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر طرح‌هاست که بیشترین مقدار ضریب گشتاور ( $C_T=0.471$ ) در  $\lambda=0.53$  می‌باشد که در مقایسه با توربین‌های معمولی در همان  $\lambda$  افزایش ۱۰۸ درصدی را نشان می‌دهد. در  $\lambda$ های بزرگ‌تر از یک مقدار ضریب گشتاور برای طرح با زاویه پره راهنمای ۶۰ درجه عملکرد بهتری دارد و مقدار ضریب گشتاور آن اندکی بیشتر از سایر طرح‌هاست. ضریب توان رفتاری مشابه ضریب گشتاور دارد و بهترین عملکرد برای زاویه پره راهنمای ۵۰ درجه است که بیشترین مقدار ضریب توان برای این طرح در  $C_p=0.44$  در  $\lambda=0.75$  می‌باشد که در مقایسه با توربین‌های معمولی در همان  $\lambda$  افزایش ۱۳۳ درصدی را نشان می‌دهد.

افزایش ولی در ناحیه محدب قدرت آن کاهش یابد؛ این پدیده تأثیر مثبتی بر روی عملکرد روتور در حالت استاتوردار دارد. همچنین انتقال جریان باد به سمت روتور توسط پره‌های راهنما موجب افزایش سرعت محلی در محل روتور شده است که این پدیده باعث افزایش توان خروجی توربین بادی می‌شود. در واقع توربین استاتوردار سطح بیشتری از جریان باد را جاروب و به سمت روتور منتقل می‌کند که نتیجه آن کاهش وزن و حجم قسمت چرخان توربین بادی است.

انحراف جریان باد از اطراف و از طرف محدب به مقعر به خوبی صورت گرفته و موجب عملکرد بسیار مناسب توربین استاتوردار در این حالت شده است و در استاتور با زاویه ۶۰ درجه استاتور جریان باد را بیش از حد منحرف کرده است که موجب برخورد کمتر جریان باد در جهت مقعر روتور و موجب عملکرد نسبتاً ضعیف توربین استاتوردار ۶۰ درجه شده است. در روتور معمولی گردابه ایجاد شده در قسمت‌های محدب و مقعر روتور دارای قدرت نزدیک به همدیگرند؛ ولی در روتور استاتوردار وجود پره‌های راهنما باعث می‌شود که قدرت گردابه در قسمت مقعر



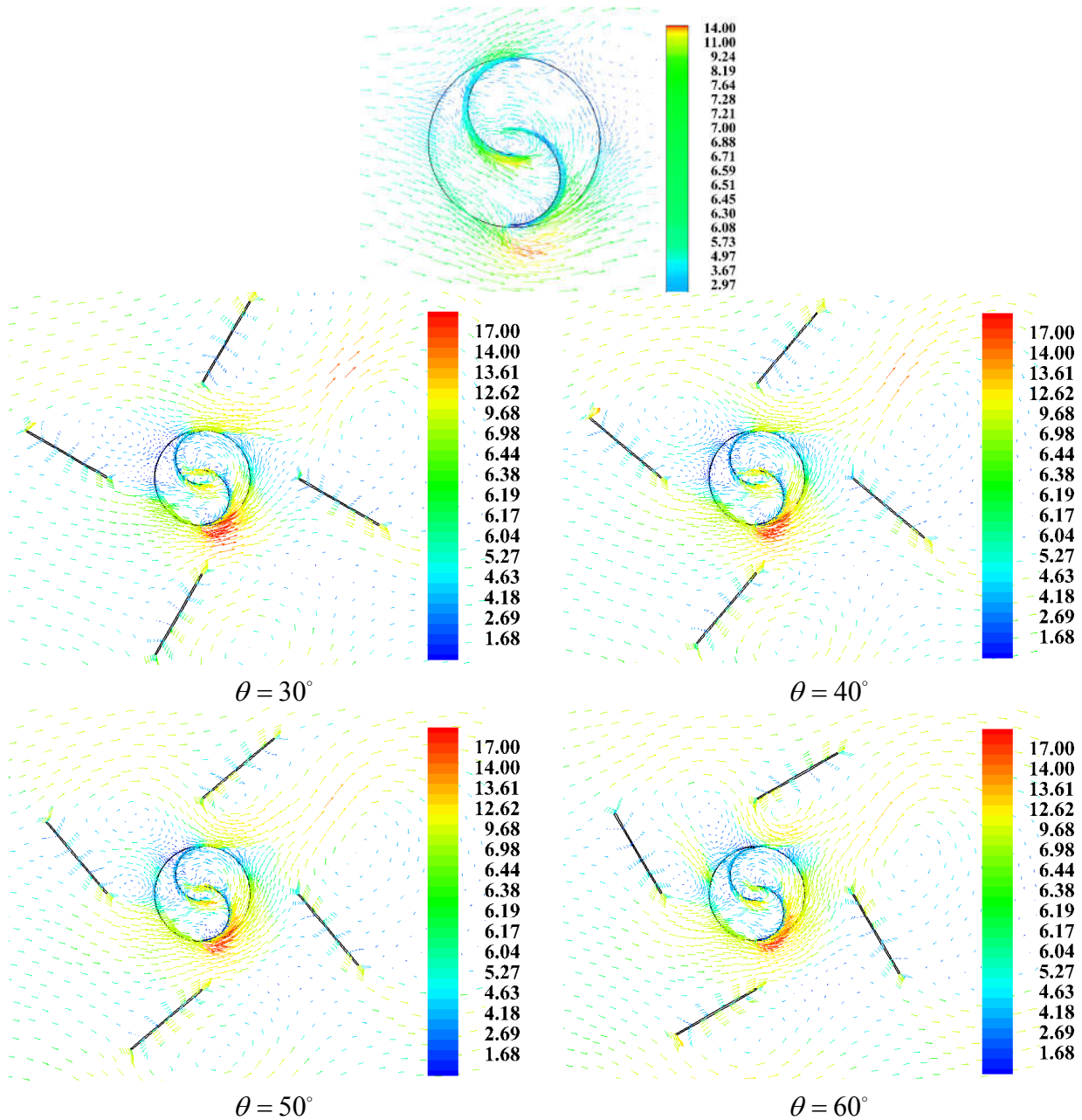
شکل (۷): کانتور سرعت در اطراف روتور معمولی و زوایای مختلف زاویه پره استاتور ۴ پره

مشخص است. با مقایسه جریان باد در اطراف روتور بدون استاتور و استاتوردار می‌توان دریافت که پره‌های راهنما باعث تغییر جهت جریان باد از اطراف و از طرف قسمت محدب روتور به قسمت مقعر آن

در شکل (۸)، بردارهای مربوط به توزیع سرعت در اطراف روتور و استاتور ۴ پره‌ای در زوایای مختلف قرارگیری پره استاتور ارائه شده است. در این شکل، برای حرکت جریان باد در اطراف پره‌های توربین

افزایش می‌یابد و جهت جریان نیز مناسب‌تر است؛ این امر در انتهای قسمت‌های مقعر مشهودتر است.

می‌شوند. همچنین با مقایسه این بردارها در حالت‌های بدون استاتور و استاتوردار معلوم می‌شود که مقادیر مطلق سرعت در قسمت‌های مقعر



شکل (۸): بردارهای سرعت برای روتور معمولی و استاتوردار در زوایای مختلف زاویه پره استاتور ۴ پره

عملکرد توربین بادی نسبت به حالت بدون پره شده است. همچنین با مقایسه نتایج ارائه شده در این شکل‌ها با نتایج شکل‌های (۹) و (۱۰) می‌توان دریافت که حالت ۵ پره دارای عملکرد بهتری نسبت به حالت چهار پره است.

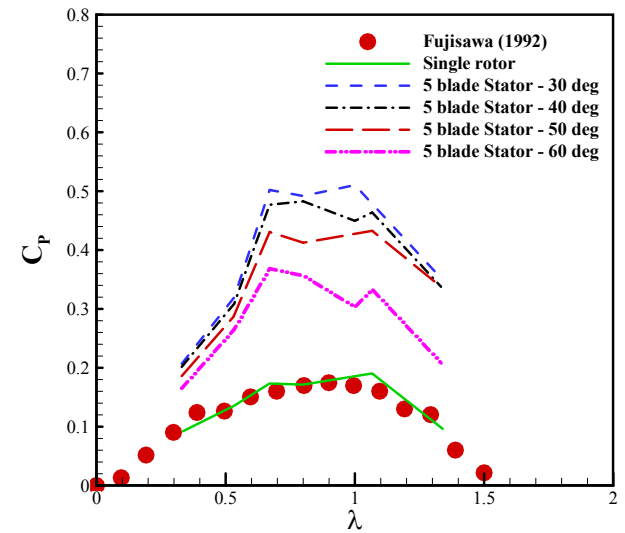
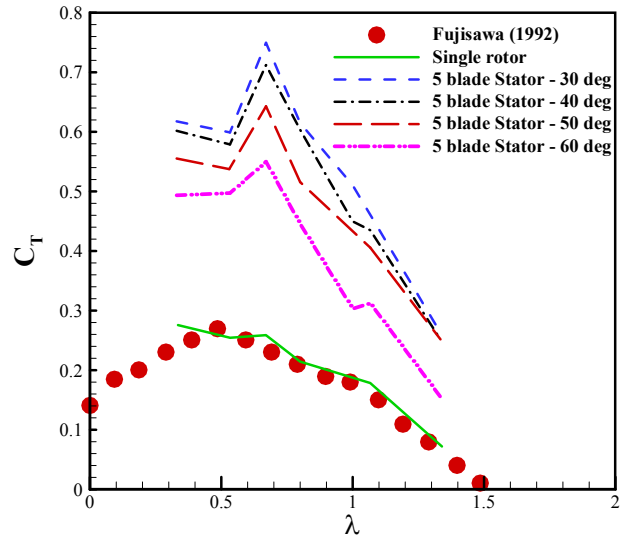
### ۳. بررسی عملکرد در حالت پنج پره و زوایای مختلف

#### قرارگیری

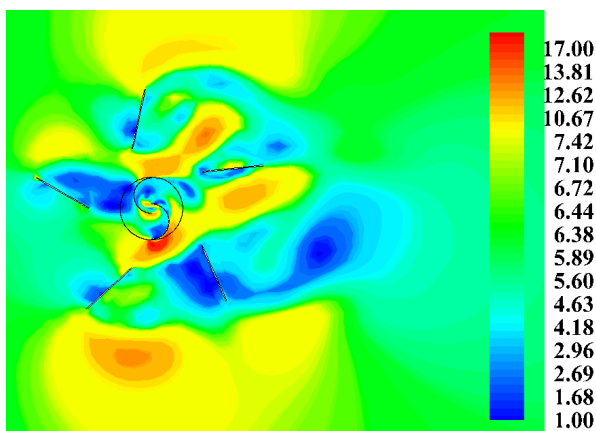
شکل (۹) نمودار ضریب گشتاور و توان توربین بادی دارای ۵ پره راهنما را برای چهار زاویه مختلف قرارگیری پره به همراه روتور بدون استاتور نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج روتور استاتوردار با نتیجه روتور بدون استاتور می‌توان دریافت که وجود ۵ پره راهنما موجب بهبود

در این حالت، مقدار بیشینه ضرایب توان و گشتاور در  $\lambda$ های بزرگ‌تری نسبت به حالت ۴ پره رخ می‌دهد و مقادیر ضرایب توان و گشتاور در این حالت نیز اندکی بهبود یافته است. همچنین  $C_p$  در محدوده  $\lambda=0.63$  تا  $\lambda=1.18$  مقادیر بالاتر از 0.45 دارد و این محدوده در حالت ۴ پره خیلی محدودتر است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود در پره راهنما با  $\theta=30^\circ$  بیشترین مقدار ضریب توان و گشتاور مشاهده می‌شود و با افزایش زاویه راهنما عملکرد پره‌ها تضعیف شده و مقادیر ضریب گشتاور و توان کاهش می‌یابند.

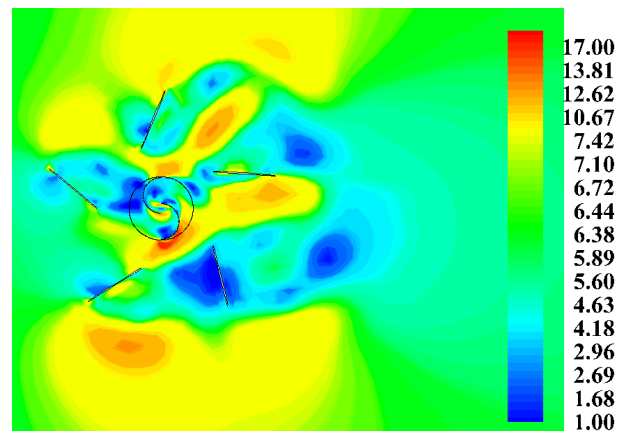
شکل (۱۰) کانتورهای مربوط به توزیع سرعت و در شکل (۱۱) بردارهای مربوط به آن، اطراف روتور و استاتور در زوایای مختلف قرارگیری پره را نشان می‌دهد. توزیع سرعت و بردارهای آن برای توربین با استاتور ۵ پره مشابه با رفتار توربین دارای استاتور ۴ پره است. برای مقادیر  $\theta > 30^\circ$  اثرات جدایش جریان از پره راهنما بیشتر شده و منجر به تشکیل گردابه می‌شود که این گردابه در زوایای بالاتر تقویت می‌شود. تشکیل گردابه در پشت پره راهنما (محل برخورد جریان باد به قسمت محدب) و برخورد آن به قسمت محدب، موجب تضعیف اثر توربین در زوایای بالاتر پره راهنما ( $\theta$ ) می‌شود. همچنین در زوایای کمتر پره‌های راهنما، جریان باد به صورت مناسب‌تری از اطراف جمع آوری شده و به سمت مقعر روتور منتقل می‌شود که این کار در مقادیر بیشتر  $\theta$ ، به صورت ضعیف‌تری صورت می‌گیرد.



شکل (۹): نمودارهای تغییرات ضرایب گشتاور و توان توربین با استاتور ۵ پره در زوایای مختلف قرارگیری پره‌های راهنما

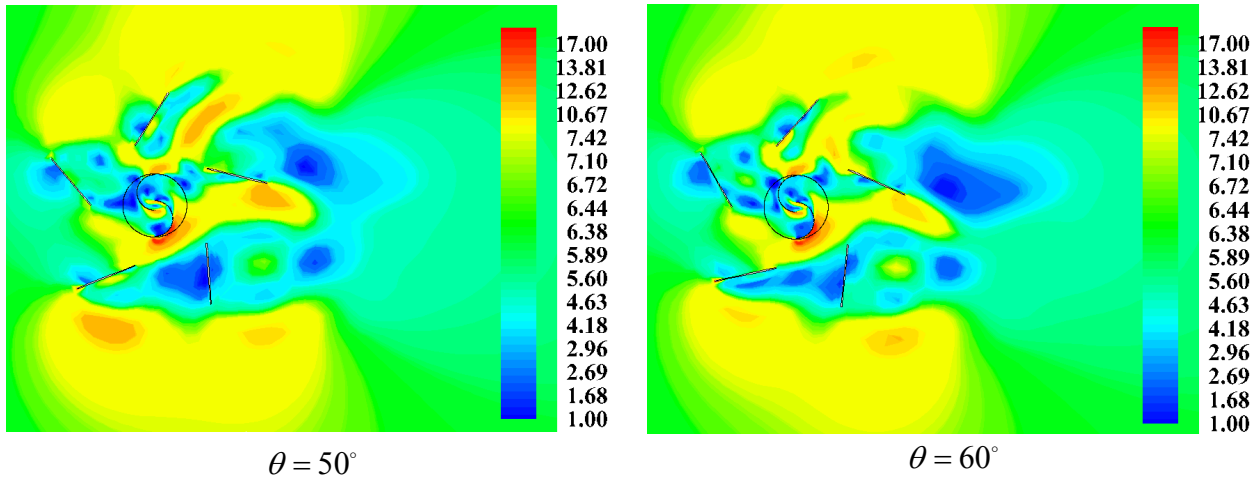


$\theta = 30^\circ$

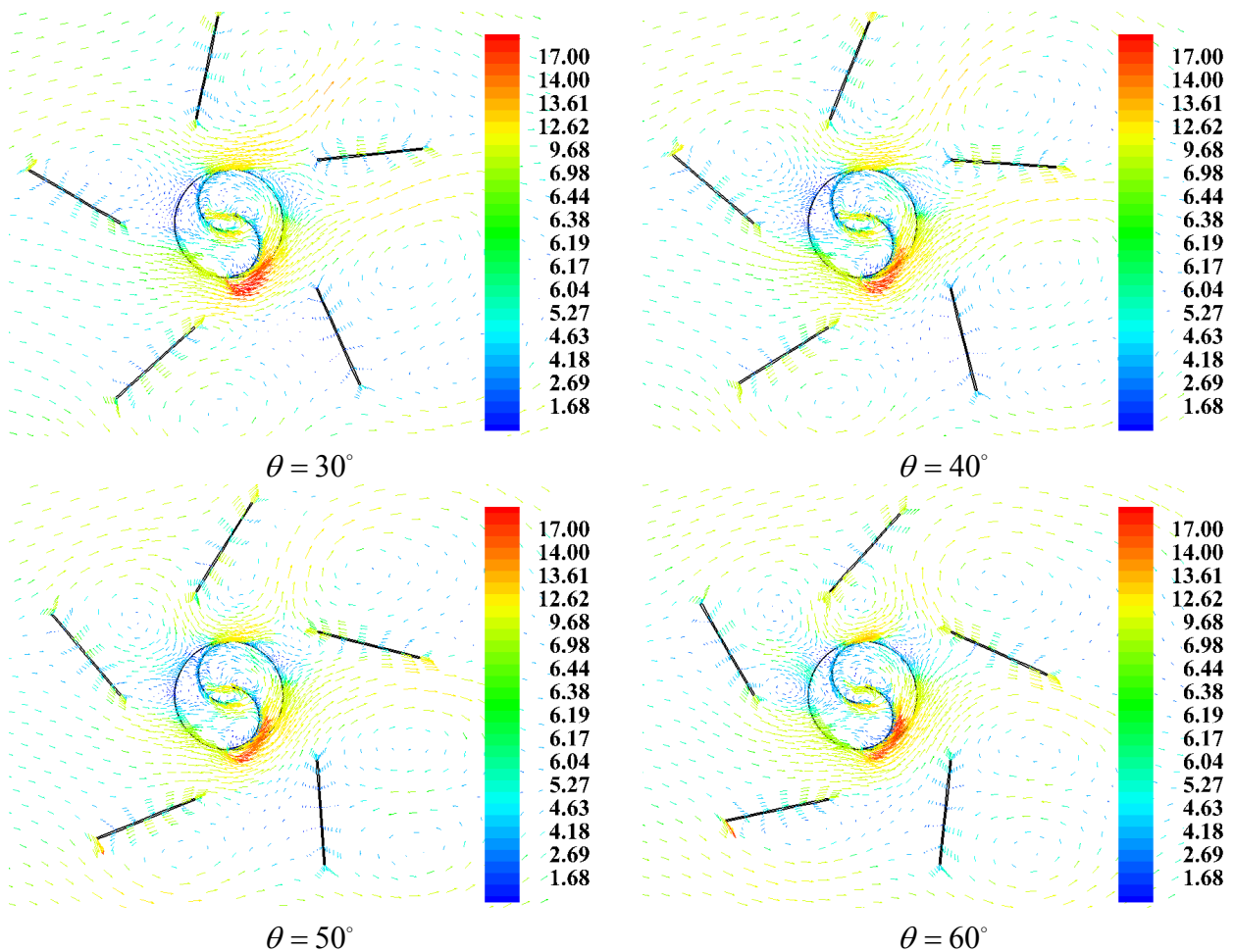


$\theta = 40^\circ$





شکل (۱۰): کانتور سرعت در زوایای مختلف زاویه پره استاتور ۵ پره



شکل (۱۱): بردارهای سرعت در زوایای مختلف زاویه پره استاتور برای استاتور ۵ پره

در استاتور ۶ پره توربین دارای عملکرد ضعیف‌تری نسبت به حالت استاتور ۵ پره است. ولی به صورت کلی عملکرد توربین دارای استاتور بهتر از عملکرد روتور تنهای بدون استاتور است. در حالت استاتوردار ۶ پره مقادیر ماکزیمم ضرایب توان و گشتاور در  $\lambda$  های

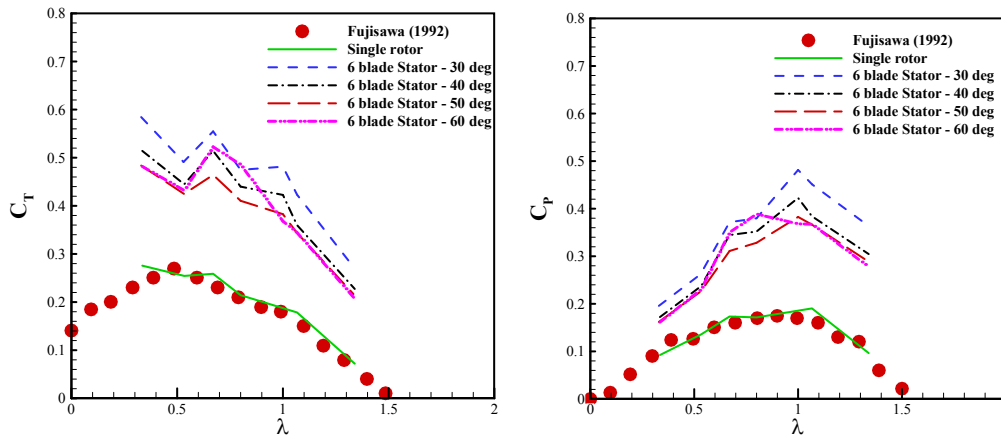
### ۳.۳. بررسی عملکرد در حالت شش پره و زوایای مختلف قرارگیری

در شکل (۱۲) نمودارهای ضرایب گشتاور و توان توربین بادی دارای استاتور ۶ پره را در چهار  $\theta$  مختلف ارائه شده‌اند.

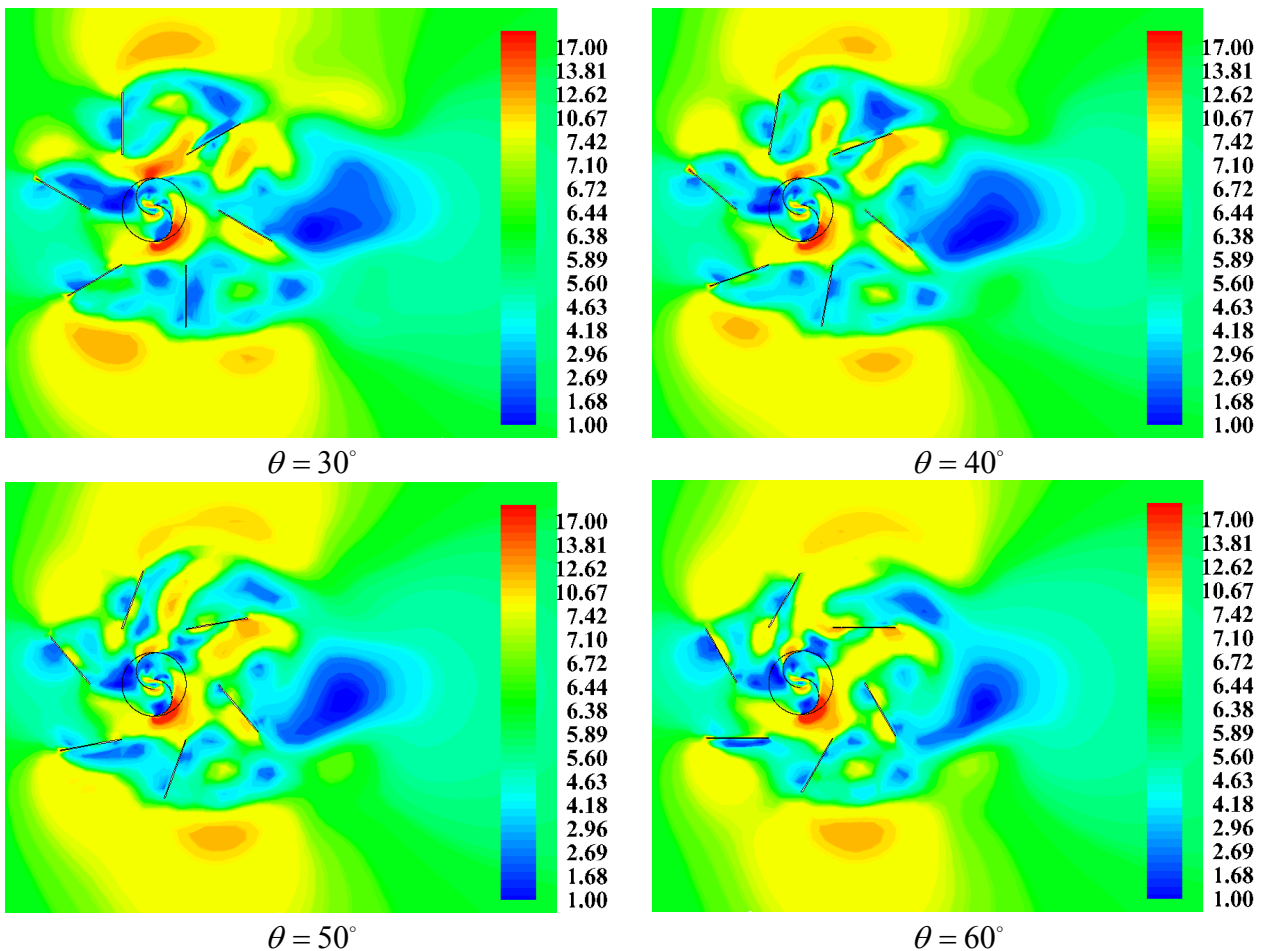
و استاتور در زوایای مختلف قرارگیری پره ارائه شده‌اند. با افزایش تعداد پره‌های راهنما، جریان باد کمتری به پره‌های توربین باد منتقل می‌شود و در واقع پره‌های راهنما موجب انسداد مسیر باد در رسیدن به پره‌های توربین بادی می‌شوند و به همین دلیل با افزایش تعداد پره‌های راهنما از ۵ پره به ۶ پره عملکرد توربین بادی تضعیف می‌شود.

بزرگ‌تر نسبت به حالت ۵ پره رخ داده است و مقدار آن نیز اندکی کاهش یافته است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در استاتور با زاویه  $\theta=30^\circ$  بیشترین مقدار ضرایب توان و گشتاور مشاهده می‌شود و با افزایش  $\theta$ ، عملکرد توربین تضعیف شده و مقادیر ضرایب گشتاور و توان کاهش می‌یابند.

در شکل (۱۳) کانتورهای مربوط به توزیع سرعت در اطراف روتور



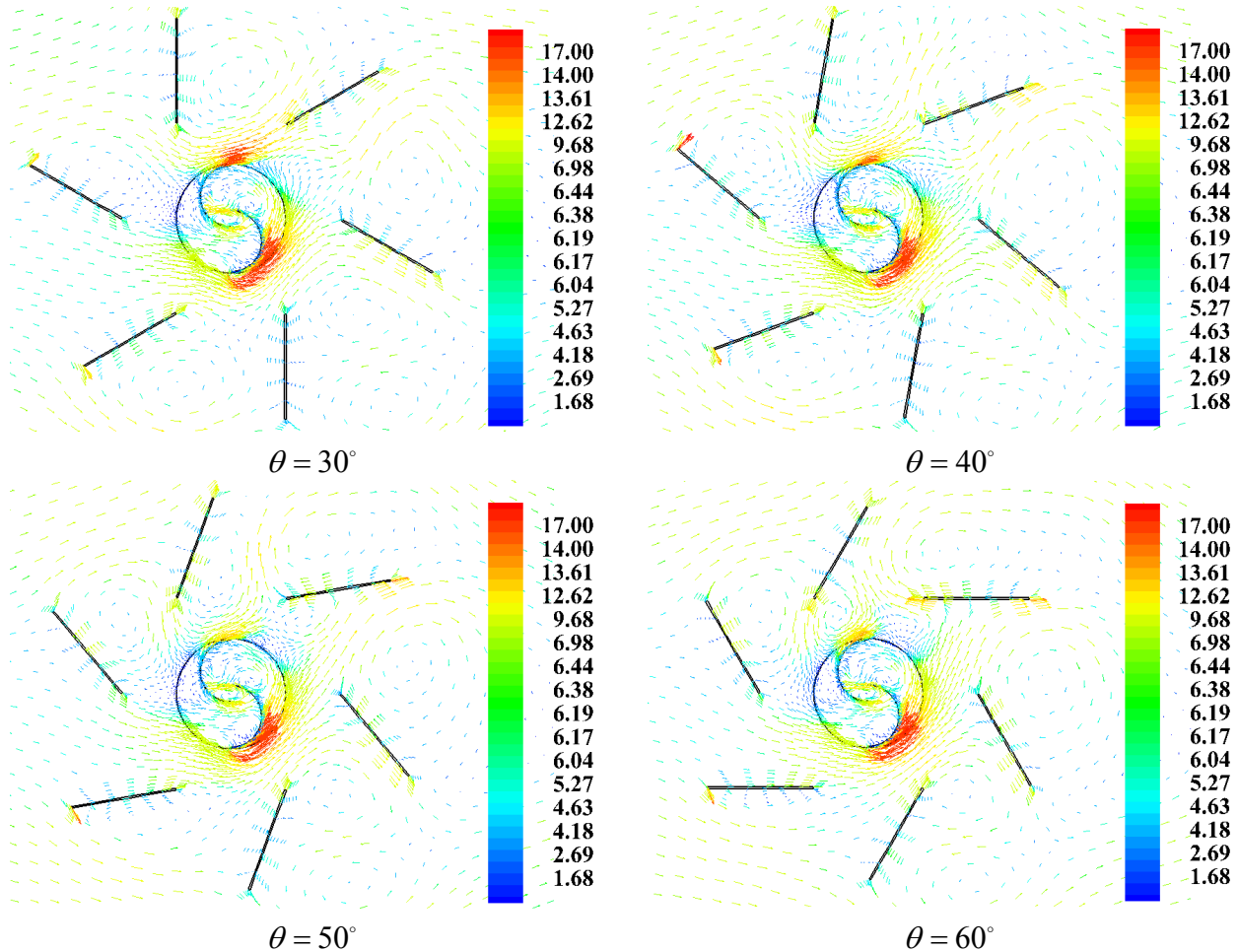
شکل (۱۲): نمودارهای تغییرات ضرایب گشتاور و توان توربین با استاتور ۶ پره در زوایای مختلف قرارگیری پره‌های راهنما



شکل (۱۳): کانتور سرعت در زوایای مختلف زاویه پره استاتور ۶ پره

مشاهده می‌شود که وجود این گردابه‌ها موجب افزایش درگ منفی می‌شود با افزایش زاویه پره‌های راهنما این گردابه‌ها تقویت شده و در نتیجه عملکرد آیرودینامیکی توربین تضعیف می‌شود.

در شکل (۱۴) بردارهای مربوط به توزیع سرعت در اطراف روتور و استاتور در زوایای مختلف قرارگیری پره ارائه شده‌اند. در این حالت گردابه‌های بیشتر در قسمت‌های برخورد جریان باد به قسمت محدب



شکل (۱۴): بردارهای سرعت در زوایای مختلف زاویه پره استاتور ۶ پره

می‌کاهند. نتایج تحلیل عددی نشان داد که در حالت استاتور ۴ پره، توربین در  $\theta=50^\circ$  عملکرد بهینه دارد. در حالت ۵ و ۶ پره نیز نمودارهای ضرایب توان و گشتاور مربوط به  $\theta=30^\circ$  تقریباً در تمامی نسبت‌های سرعت نوک بالاتر از زوایای دیگر قرار می‌گیرند. ماکزیمم ضریب توان  $C_p=0.51$  بین تمامی طرح‌ها در حالت استاتور ۵ پره و با زاویه قرارگیری  $\theta=30^\circ$  و  $\lambda=1$  به دست آمده است. با افزایش تعداد پره‌های راهنما به بیش از ۵، جریان باد کمتری به پره‌های توربین منتقل می‌شود و در واقع پره‌های راهنما موجب انسداد مسیر جریان در رسیدن به پره‌های توربین می‌شوند.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر پره‌های راهنما بر عملکرد توربین بادی ساونیوس مورد بررسی قرار گرفته است. پره‌های راهنمای استفاده‌شده در تمام طرح‌ها بدون انحنا هستند. در این پژوهش تلاش بر این بود که با تغییر تعداد پره‌های راهنما و زاویه قرارگیری آن‌ها، بازدهی توربین بادی ساونیوس افزایش داده شود. نتایج تحلیل عددی نشان‌دهنده این است که مقادیر ضرایب گشتاور و توان روتورهای دارای پره راهنما به‌طور چشمگیری بیشتر از روتور معمولی بدون پره‌های راهنما هستند. بررسی جریان باد در اطراف روتور و پره‌های راهنما نشان داد که دو پدیده مهم در بهبود عملکرد توربین اثرگذار است: ۱. پره‌های راهنما جریان اطراف روتور را جمع‌آوری و به سمت قسمت مقعر روتور هدایت می‌کنند؛ ۲. پره‌های راهنما از میزان برخورد جریان باد به قسمت محدب روتور

## فهرست علائم

$S$	فاصله روتور از استاتور، $m$	$A_S$	مساحت جاروب پره توربین، $m^2$
$T$	گشتاور، $N.m$	$C_P$	ضریب توان
$P$	توان، $W$	$C_{P_{Average}}$	ضریب توان میانگین
$U$	سرعت باد محلی، $m/s$	$C_T$	ضریب گشتاور
	علائم یونانی	$d$	قطر پره‌ها، $m$
$\rho$	چگالی، $kg/m^3$	$D$	قطر روتور، $m$
$\lambda$	سرعت بی‌بعد نوک پره	$D_o$	قطر محیط چرخان، $m$
$\omega$	سرعت زاویه‌ای، $rad/s$	$a/D$	نسبت همپوشانی پره‌ها
$\theta$	زاویه قرارگیری پره‌های استاتور، $deg$	$H$	ارتفاع روتور، $m$
	زیرنویس	$R$	شعاع روتور، $m$
$Average$	میانگین		

## مراجع

- [1] Spera, D. A., "Introduction to Modern Wind Turbines. Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering", pp. 47-72, 1994
- [2] Schubel, P. J. and Crossley, R. J., "Wind Turbine Blade Design", Energies, Vol. 5, No. 9, pp. 3425-3449, 2012.
- [3] White, F. M., "Fluid Mechanics", WCB, Ed McGraw-Hill Boston, 1999.
- [4] Paraschivoiu, I., "Wind Turbine Design: With Emphasis on Darrieus Concept", Presses Inter Polytechnique, 2002.
- [5] Fujisawa, N., "On the Torque Mechanism of Savonius Rotors", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 40, No. 3, pp. 277-292, 1992.
- [6] Lee, J. H., Lee, Y. T. and Lim, H. C., "Effect of Twist angle on The Performance of Savonius Wind Turbine", Renewable Energy, Vol. 89, pp. 231-244, 2016.
- [7] Akwa, J. V., da Silva Júnior, G. A. and Petry, A. P., "Discussion on The Verification of The Overlap Ratio Influence on Performance Coefficients of a Savonius Wind Rotor Using Computational Fluid Dynamics", Renewable Energy, Vol. 38, No. 1, pp. 141-149, 2012.
- [8] Morshed, K. N., "Experimental and Numerical Investigations on Aerodynamic Characteristics of Savonius Wind Turbine with Various Overlap ratios", 2010.
- [9] Kumbernuss, J., Chen, J., Yang, H. X. and Lu, L., "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, Vol. 107, pp. 57-75, 2012.
- [10] Ghatage, S. V. and Joshi, J. B. (2012)., "Optimization of Vertical Axis Wind Turbine: CFD Simulations and Experimental Measurements", The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 90, No. 5, pp. 1186-1201, 2012.
- [11] حسن‌زاده گروی، جابر، نصرت‌اللهی، مهران، محمودی، مصطفی، «بررسی عددی و تجربی تأثیر نسبت همپوشانی بر عملکرد توربین بادی خانگی»، مهندسی و مدیریت انرژی، ۱۳۹۴، جلد ۵، شماره ۱، صفحه ۴۴-۵۳.
- [12] Modi, V. J. and Fernando, M. S. U. K., "On the performance of the Savonius wind turbine", Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 111, No. 1, pp. 71-81, 1989.
- [13] Kamoji, M. A., Kedare, S. B. and Prabhu, S. V., "Experimental Investigations on Single Stage Modified Savonius Rotor", Applied Energy Vol. 86, No. 7-8, pp. 1064-1073, 2009.
- [14] Irabu, K. and Roy, J. N., "Characteristics of Wind Power on Savonius Rotor Using a Guide-Box Tunnel", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 32, No. 2, pp. 580-586, 2007.
- [15] El-Askary, W. A., Nasef, M. H., Abdel-Hamid, A. A. and Gad, H. E., "Harvesting Wind Energy for Improving Performance of Savonius Rotor", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 139, pp. 8-15, 2015.
- [16] Mohamed, M. H., Janiga, G., Pap, E. and Thévenin, D., "Optimization of Savonius Turbines Using an Obstacle Shielding The Returning Blade", Renewable Energy, Vol. 35, No. 11, pp. 2618-2626, 2010.
- [17] Altan, B. D. and Atilgan, M., "An Experimental and Numerical Study on The Improvement of the Performance of Savonius Wind rotor", Energy Conversion and Management, Vol. 49, No. 12, pp. 3425-3432, 2008.
- [18] Goodarzi, M. and Keimanesh, R., "Numerical Analysis on Overall Performance of Savonius Turbines Adjacent to a Natural Draft Cooling Tower", Energy Conversion and Management, Vol. 99, pp. 41-49, 2015.
- [19] Shaheen, M., El-Sayed, M. and Abdallah, S., "Numerical Study of Two-Bucket Savonius Wind Turbine Cluster", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 137, pp. 78-89, 2015.
- [20] Korprasertsak, N. and Leephakpreeda, T., "CFD-Based Power Analysis on Low Speed Vertical Axis Wind Turbines with Wind Boosters", Energy Procedia, Vol. 79, pp. 963-968, 2015.
- [21] Korprasertsak, N. and Leephakpreeda, T., "Analysis and Optimal Design of Wind Boosters for Vertical Axis Wind Turbines at Low Wind Speed", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 159, pp. 9-18, 2016.