



KNO-1202-4802

افزایش بهره‌وری توربین بادی عمود محور

علیرضا محمودی فرد^{۱*}، alireza10.m10@gmail.comسینا کندری^۲، sinkondori2020@gamail.com^۱مدرس مدعو دانشگاه ملی مهارت-دانشکده فنی انقلاب اسلامی، تهران، ایران^۲دانشجوی کاردانی گرایش الکتروتکنیک، دانشگاه ملی مهارت-دانشکده فنی انقلاب اسلامی، تهران، ایران

چکیده: محدودیت منابع انرژی‌های تجدیدناپذیر و همچنین افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف سوخت‌های بی‌رویه فسیلی آثار اساسی و اغلب فاجعه آمیزی اعم از اثرات پدیده گلخانه‌ای، باران‌های اسیدی، افزایش میزان انتشار گاز کربن دی اکسید به همراه داشته است، که همگی ضرورت توجه به استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر را ایجاد می‌کنند. در این میان، پژوهش درخصوص امکان‌سنجی و بررسی مزایا و محدودیت‌های استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان بنیادی‌ترین گام در توسعه انرژی‌های نو محسوب می‌شود، که هدف اصلی در این پژوهش، مطالعاتی بر روی خواص عملیاتی در افزایش بازدهی و بهره‌وری توان مؤثر خروجی توربین‌های بادی در نقاط اقلیمی ایران بوده که می‌تواند گام مهمی در توسعه این نوع از انرژی‌های پاک باشد.

کلید واژه‌ها: توربین بادی، توربین ساونینوس، ساختار، گشتاور، بهره‌وری، انرژی‌های تجدیدپذیر

۱. مقدمه

• ۱.۱. توصیف

- امروزه با توجه به عواقب آشکار و ملموس ناشی از مخاطرات زیست‌محیطی، توجه به محیط زیست به‌عنوان یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های جوامع، افزایش یافته است. در این خصوص می‌توان به پدیده گرمایش زمین به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین این مخاطرات، اشاره کرد. با توجه به اینکه استفاده از انرژی‌های فسیلی علاوه بر محدودیت منابع، یکی از بزرگ‌ترین علل ایجاد پدیده گرمایش زمین محسوب می‌شود، روی آوردن به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک، راهکاری است که می‌تواند علاوه بر نامحدود بودن استفاده از آن آثار مخرب، استفاده از انرژی‌های فسیلی بر محیط زیست را به حداقل رسانده و در بسیاری از موارد، عواید اقتصادی قابل توجهی نیز به بار آورد؛ توسعه و توسعه پایدار در دهه‌های اخیر به‌تدریج به الگوهای اساسی در جهت پیشرفتی هماهنگ با محیط زیست مورد توجه جوامع قرار گرفته است. توسعه را می‌توان به معنای ارتقای مستمر کل جامعه و نظام اجتماعی به‌سوی زندگی بهتر و انسانی‌تر تعبیر نمود. انرژی باد به‌عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر در حال توسعه است [۱].
- تامین انرژی الکتریکی با استفاده از انرژی‌های پاک مانند انرژی آب، باد و خورشید، باعث کاهش میزان آلاینده‌های تولیدی می‌گردد. در میان انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد به‌دلیل دسترسی آسان، کم هزینه بودن و عدم ایجاد آلودگی برای محیط زیست، می‌تواند جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی باشد. با پی بردن به اهمیت استفاده از انرژی باد و پیشرفت تکنولوژی بهره‌برداری از آن، استفاده از انرژی باد برای تولید الکتریسیته در جهان با سرعت زیادی رو به افزایش است [۱].
- همچنین در دهه‌های اخیر به‌دلیل کاهش منابع فسیلی، ملاحظات محیط زیستی و توسعه پایدار و الزامات بین‌المللی مانند پیمان پاریس که تولید گازهای گلخانه‌ای را محدود کرده است، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مورد توجه بسیاری از کشورها قرار گرفته است؛ البته، توسعه فناوری و کاهش قیمت‌های تمام شده احداث نیروگاه‌های تجدیدپذیر نیز به این جایگزینی تدریجی سوخت‌های فسیلی با منابع پاک کمک کرده است. در این میان، انرژی باد یکی از مطلوب‌ترین منابع انرژی جهت تولید برق محسوب می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، براساس گزارش GWR 2019 ظرفیت کل نیروگاه‌های بادی دنیا از ۲۴ گیگاوات در سال ۲۰۰۱ به ۶۵۱ گیگاوات در سال ۲۰۱۹ رسیده و روندی رو به رشد داشته،

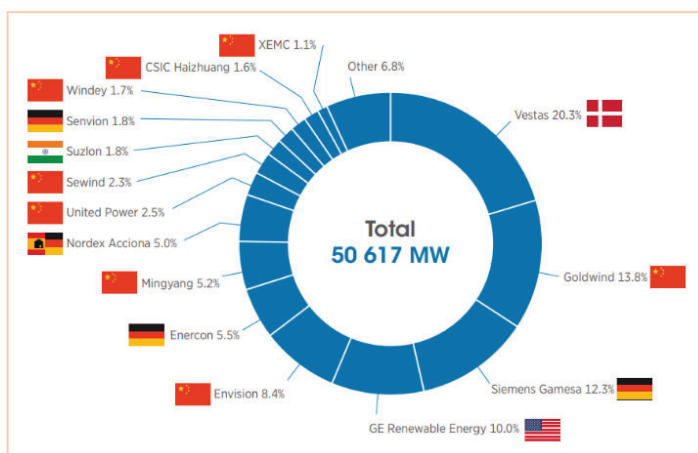


به‌طوری‌که در دو سال پایانی ۱۰٪ افزایش در کل ظرفیت و ۱۹٪ رشد در ایجاد نیروگاه‌های جدید رخ داده است. با بررسی این نمودار و تحلیل بازار تولید انرژی تجدیدپذیر، پیش‌بینی می‌شود در سال‌های آتی نیز این روند صعودی ادامه یابد [۲].



شکل ۱: ظرفیت نیروگاه‌های بادی دنیا از سال ۲۰۰۱ تا سال ۲۰۱۹ [۲]

در این میان چین، ایالات متحده آمریکا و آلمان به ترتیب رکورددار بیشترین ظرفیت نیروگاه‌های بادی هستند (شکل ۲). در ایران براساس اطلس باد کشور، ۱۸ هزار مگاوات انرژی قابل استحصال از باد تخمین زده شده است، که در حال حاضر بخش کمی از آن در حدود ۲۵۰ مگاوات بهره‌برداری می‌شود؛ لذا، در حوزه تولید برق از انرژی باد، ظرفیت استفاده نشده زیادی به‌ویژه در مناطق بادخیز مانند خراسان جنوبی و سیستان و بلوچستان وجود دارد، که باید از آن استفاده کرد؛ مخصوصاً این که عمده تولید برق بادی در فصول گرم سال است که مصرف برق در کشور افزایش می‌یابد و این منابع می‌توانند بخش زیادی از این اضافه مصرف را پوشش دهند [۳].



شکل ۲: ظرفیت تولیدی نصب شده توسط شرکت‌های مختلف در جهان (سال ۲۰۱۹-۲۰۱۸) [۲]

• ۲.۱. بررسی

در کل، با توجه به تغییرات اقلیمی و نیاز به منابع انرژی پایدار، توربین‌های بادی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تولید انرژی تجدیدپذیر شناخته می‌شوند. با افزایش توجه به مسائل زیست‌محیطی و کاهش منابع فسیلی، انرژی بادی به یکی از سریع‌ترین منابع رشد انرژی تجدیدپذیر تبدیل شده است. بهره‌وری توربین‌های بادی به عوامل مختلفی همچون طراحی، تکنولوژی، شرایط محیطی و نگهداری مرتبط است. افزایش بهره‌وری این توربین‌ها می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش هزینه‌های تولید و افزایش تولید انرژی داشته باشد.



• ۱.۲.۱. روش های افزایش بهره‌وری

* بهینه‌سازی طراحی توربین

طراحی بهینه برای تیغه‌های توربین‌ها و استفاده از مواد سبک و مقاوم می‌تواند به افزایش بهره‌وری کمک کند. تحقیقات نشان داده‌اند که طراحی‌های هوشمند می‌توانند بازده انرژی را تا ۳۰٪ افزایش دهند (Zhao et al., 2021).

* استفاده از تکنولوژی‌های جدید

به‌کارگیری تکنولوژی‌های نوین مانند کنترل هوشمند بر اساس داده‌های پیش‌بینی شده سرعت باد و شرایط جوی، می‌تواند عملکرد توربین‌ها را بهبود بخشد (González et al., 2020).

* نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه

رویکردهای نگهداری پیشگیرانه و استفاده از داده‌های اینترنت اشیا (IoT) برای نظارت بر وضعیت قطعات و پیش‌بینی خرابی‌ها می‌تواند منجر به افزایش عمر مفید و کارایی توربین‌ها شود (Mann & Eicher, 2022).

* مدیریت پارک‌های بادی

مدیریت بهینه پارک‌های بادی و چیدمان مناسب توربین‌ها برای کاهش تداخل و بهره‌مندی از الگوهای باد می‌تواند تا ۱۵٪ کارایی کلی یک مجموعه را افزایش دهد (Liu et al., 2019).

• ۲.۲.۱. چالش‌ها

- تغییرات آب و هوایی: ناپایداری و تغییرات جوی باعث بروز چالش‌هایی در پیش‌بینی و استفاده بهینه از انرژی بادی می‌شود.
 - محدودیت‌های تکنولوژیکی: برخی از تکنولوژی‌های نوین هنوز در مرحله توسعه یا آزمایش قرار دارند و ممکن است در مقیاس‌های بزرگ عملیاتی نشوند.
 - مسائل اقتصادی: هزینه‌های اولیه بالا برای نصب و نگهداری تجهیزات جدید می‌تواند مانع از پذیرش سریع این تکنولوژی‌ها شود.
- من‌حیث‌المجموع، افزایش بهره‌وری در توربین‌های بادی یک ضرورت برای پاسخگویی به نیازهای انرژی آینده است. با استفاده از طراحی‌های نوین، تکنولوژی‌های جدید و مدیریت بهینه، می‌توان به بهبود کارایی این سیستم‌ها دست یافت؛ همچنین، توجه به چالش‌ها و یافتن راه‌حل‌های مناسب در این زمینه، امری ضروری است.

• ۲. متن اصلی

• ۱.۲. تاریخچه و پیشینه موضوع

• ۱.۱.۲. انرژی باد

انرژی باد، یکی از انواع اصلی انرژی‌های تجدیدپذیر است که از دیرباز ذهن بشر را به خود معطوف کرده است، به‌طوری‌که محققین همواره به فکر کاربرد این انرژی در صنعت هستند. انسان از انرژی باد برای به حرکت در آوردن قایق‌ها و کشتی‌های بادبانی و آسیاب‌های بادی استفاده می‌کرده است.

در شرایط کنونی نیز با توجه به موارد ذکر شده و توجیه‌پذیری اقتصادی انرژی باد در مقایسه با سایر منابع انرژی‌های نو، پرداختن به انرژی باد امری حیاتی و ضروری به نظر می‌رسد.

در کشور ما ایران قابلیت‌ها و پتانسیل‌های مناسبی جهت نصب و راه‌اندازی توربین‌های برق بادی وجود دارد، که با توجه به توجیه‌پذیری آن و تحقیقات، مطالعات و سرمایه‌گذاری که در این زمینه صورت گرفته است. توسعه و کاربرد این تکنولوژی، چشم‌انداز روشنی را فراروی سیاست‌گذاران بخش انرژی کشور در این زمینه قرار داده است [۱].



- هنگامی که تابش خورشید به‌طور نامساوی به سطوح ناهموار زمین می‌رسد، سبب ایجاد تغییرات در دما و فشار می‌شود و در اثر این تغییرات باد به‌وجود می‌آید؛ همچنین اتمسفر کره زمین به‌دلیل حرکت وضعی زمین گرما را از مناطق گرمسیری به مناطق قطبی انتقال می‌دهد، که این امر نیز باعث به‌وجود آمدن باد می‌شود. جریانات اقیانوسی نیز به‌صورت مشابه عمل نموده و عامل ۵۱٪ انتقال حرارت کلی در جهان است.
- در مقیاس جهانی، این جریانات اتمسفری به‌صورت یک عامل قوی جهت انتقال حرارت و گرما عمل می‌کند. دوران کره زمین نیز می‌تواند در برقراری الگوهای نیمه دائم جریانات سیاره‌ای در اتمسفر، انرژی مضاعف ایجاد نماید [۴]. برخی از مزایای تولید و استفاده از این انرژی عبارتند از:

۱. عدم نیاز توربین‌های بادی به سوخت و در نتیجه کاهش میزان مصرف سوخت‌های فسیلی
۲. رایگان بودن انرژی باد
۳. توانایی تأمین بخشی از تقاضای انرژی برق
۴. کمتر بودن نسبی قیمت انرژی حاصل از باد نسبت به انرژی‌های فسیلی
۵. کمتر بودن هزینه‌های جاری و هزینه‌های سرمایه‌گذاری انرژی باد در بلندمدت
۶. تنوع بخشیدن به منابع انرژی و ایجاد سیستم پایدار انرژی
۷. قدرت مانور زیاد، جهت بهره‌برداری در هر ظرفیت و اندازه (از چند وات تا چندین مگاوات)
۸. عدم نیاز به آب
۹. عدم نیاز به زمین زیاد برای نصب
۱۰. نداشتن آلودگی محیط زیست نسبت به سوخت‌های فسیلی

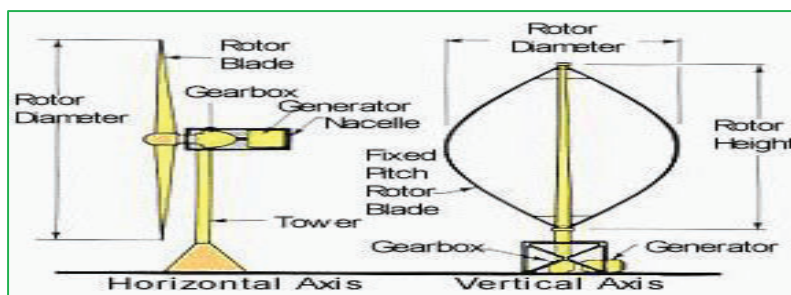
• ۲.۱.۲. توربین‌های بادی

تکنولوژی انرژی بادی در سال‌های اخیر به‌سرعت رشد کرده است و اروپا در راس این صنعت قرار گرفته است. توربین‌ها در حال ارزان‌تر و قدرتمندتر شدن هستند، با طول پره بیشتر که قادر است از مقدار باد زیادتری استفاده کند و بنابراین الکتریسیته بیشتری تولید می‌نماید و هزینه تولید برق از منابع غیر قابل تجدید را کاهش دهد.

توربین‌های بادی با استفاده از نیروی طبیعی باد برای به حرکت درآوردن ژنراتور الکتریسیته تولید می‌کنند. باد یک منبع سوخت پاک و پایدار است که مواد دفعی ندارد و هرگز تمام نخواهد شد، چون دائماً توسط انرژی خورشید تجدید می‌شود؛ از بسیاری جهات توربین‌های بادی، تکامل طبیعی آسیاب‌های بادی سنتی هستند. اما اکنون معمولاً سه پره دارند، که حول یک حلقه مرکزی افقی می‌چرخند که به نیروی الکترونیکی واقع در موتورخانه که در نوک برج فولادی قرار دارد، اتصال دارند.

بیشتر توربین‌های بادی، زمانی که سرعت باد حدود ۳-۴ متر در ثانیه است، شروع به تولید برق می‌نمایند و حداکثر مجاز برق را در حدود ۱۵ متر در ثانیه تولید می‌کنند و برای جلوگیری از خسارات حاصل از طوفان، در ۲۵ متر در ثانیه و یا بیشتر، متوقف شده و از کار می‌ایستند [۲]. باد از پره‌ها عبور کرده و یک نیروی چرخش‌دهنده ایجاد می‌کند. پره‌های چرخان، پروانه داخل موتور که به جعبه‌دنده می‌رود، را می‌چرخاند. جعبه‌دنده سرعت چرخش برای ژنراتور را افزایش می‌دهد. ژنراتور از میدان مغناطیسی برای تبدیل انرژی چرخشی به انرژی الکتریکی استفاده می‌کند. نیروی خروجی تولید شده به یک ترانسفورماتور می‌رود. ترانسفورماتور، انرژی حاصل از ژنراتور که حدود ۷۰۰ ولت است را به ولتاژ مناسب برای سیستم توزیع که معمولاً ۳۳۰۰۰ ولت (۳۳ کیلو ولت) است تبدیل می‌کند.

شبکه‌های توزیع برق منطقه‌ای یا شبکه ملی الکتریسیته را به سراسر کشور انتقال می‌دهند. دو قسمت دیگر، سنسورهای اندازه‌گیری که شامل دو سنسور سرعت‌سنج و جهت‌نما و موتور انحراف که پره‌ها را در جهت (metsys way) وزش باد قرار می‌دهد. دو مدل اصلی از توربین‌های الکتریکی بادی وجود دارد. در شکل ۴، تصویری از توربین‌های بادی محور عمودی و توربین‌های بادی با محور افقی ارائه شده است، که موضوع مورد بررسی این پژوهش، توربین‌ها با محور عمودی می‌باشد.



شکل ۳: توربین‌های بادی محور عمودی و توربین‌های بادی با محور افقی

• ۲.۲. مروری بر کارهای انجام شده در خصوص این موضوع

توربین‌های بادی از نظر ساختار، به دو دسته‌ی محور افقی و محور عمودی تقسیم‌بندی می‌شوند، که در نوع محور افقی، محور چرخش شفت که به مبدل الکتریکی متصل می‌شود، موازی خط افق و در نوع عمودی، عمود بر آن است.

توربین‌های محور افقی از نظر بازدهی یعنی میزان جذب انرژی مکانیکی باد و تبدیل آن به گشتاور دورانی بر توربین‌های محور عمودی برتری دارند و به‌طور عمده توربین‌های بادی بزرگ از نوع محور افقی ساخته می‌شوند. با این حال، این توربین‌ها با جریان آرام سازگاری دارند و استفاده از این توربین‌ها مستلزم هم راستاسازی محور توربین با جهت باد است.

در توربین‌های محور عمودی که به‌طور عمده در مقیاسی کوچک استفاده می‌شوند، کارکرد توربین، مستقل از جهت باد و پایداری جریان است و همچنین به‌دلیل نصب مبدل برق در نزدیکی سطح زمین، هزینه تعمیر و نگهداری پایین‌تری نسبت به توربین‌های محور افقی دارند. این مزایا همراه با سرعت حرکت اولیه پایین‌تر، باعث توجه پژوهشگران به طراحی، ساخت و بهینه‌سازی توربین‌های محور عمودی شده است. مجموعه توربین‌های محور عمودی، خود به دو دسته‌ی زیر تقسیم می‌شوند:

داریوس که کارکرد آن‌ها بر نیروی برآ استوار است و ساونیوس که کارکرد آن‌ها به‌ویژه در آغاز حرکت، مبتنی بر نیروی پسا است.



شکل ۴: نمونه‌ای از توربین بادی داریوس [۵] - نمونه‌ای از توربین بادی ساونیوس [۵]

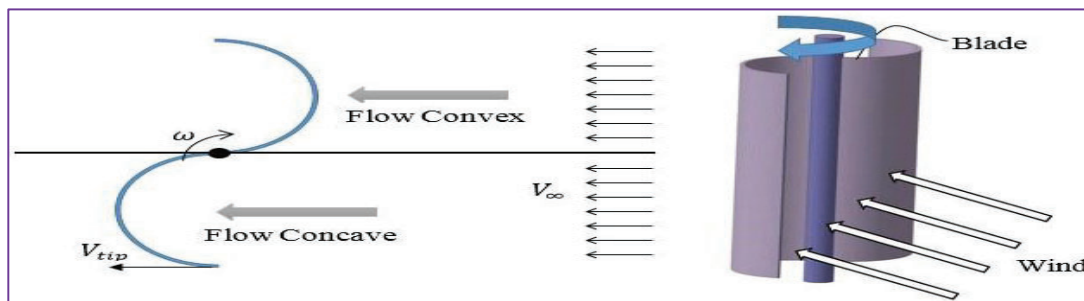
• ۳.۲. هدف کار: هدف افزایش بهره‌وری در توربین عمودی محور، ساونیوس

• ۱.۳.۲. اصول کارکرد توربین عمودی محور ساونیوس

توربین ساونیوس در سال ۱۹۳۱ میلادی توسط معمار و مخترع فنلاندی زیگورد یوهانس ساونیوس ابداع شد. این توربین در ساده‌ترین شکل خود، از دو نیم‌استوانه تشکیل شده است که در خلاف جهت هم با یک شفت به هم متصل شده‌اند، به‌طوری‌که اگر از بالا به آن نگاه کنیم، شکلی شبیه



حرف S لاتین خواهیم دید و به همین دلیل به آن روتور S گفته می‌شود. به هر یک از این استوانه‌ها، یک پره گفته می‌شود. شکل ۳ طرح‌واره‌ای از این توربین را نشان می‌دهد.



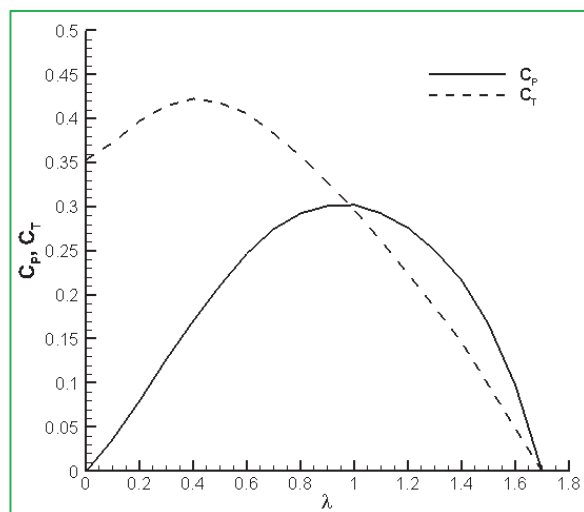
شکل ۵: طرح‌واره‌ای از توربین ساونیوس

همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود، پره‌ی پایینی در جهت باد مقعر است و بخشی از باد وارد آن شده و نیروی پسا ایجاد می‌کند. به این پره، پره‌ی پس‌رونده گفته می‌شود، چون نیروی پسای حاصل آن را دور می‌کند. پره‌ی بالایی که بخش محدب آن رو به جریان باد است و در حال نزدیک شدن است، پره‌ی بازگشتی نامیده می‌شود. چون سطح مقابل جریان پره‌ی بازگشتی، کمتر از پره‌ی پس‌رونده است، نیروی پسای پایینی، بیشتر از بالایی است و در نتیجه، گشتاوری حول محور توربین ایجاد شده و باعث چرخش پره‌ها در جهتی که مشخص شده، می‌شود. با فرض اینکه V سرعت

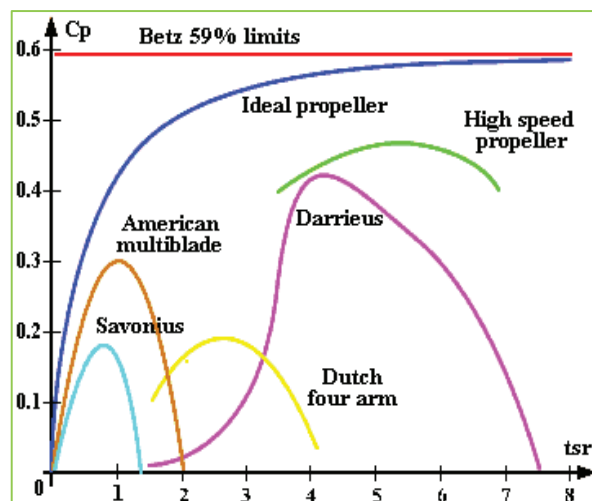
$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

باد ρ چگالی هوا و A مساحت یک پره توربین باشد، آنگاه توان موجود و قابل استفاده برای این پره، برابر است با:

به‌عنوان نمونه، نمودارهای ضریب توان و ضریب گشتاور یک توربین ساونیوس در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در این تصویر مشاهده می‌شود، ضریب توان و ضریب گشتاور در ازای یک نسبت سرعت نوک پره به بیشینه مقدار خود می‌رسند. در بیشتر مقالات از ضریب توان به‌عنوان معیار سنجش عملکرد توربین استفاده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، بیشینه‌ی ضریب توان این توربین در ازای برابر ۰٫۳ به‌دست $\lambda = 1$ آمده است. برای توربین‌های ساونیوس بیشینه ضریب توان در حدود ۰٫۳۵ گزارش شده است. به همین دلیل این توربین‌ها را دارای ۰٫۲۵ راندمان پایین می‌دانند و محققان همواره به‌دنبال راه‌کارهای ابتکاری برای افزایش آن هستند. در شکل ۷ مقایسه‌ای بین ضریب توان توربین باد ساونیوس و سایر توربین‌ها آورده شده است.



شکل ۶: نمونه‌ای از منحنی‌های ضریب توان و ضریب گشتاور برای یک نمونه توربین ساونیوس [۷]



شکل ۷: مقایسه ضریب توان توربین ساونیوس با سایر توربین‌ها [۶]

• ۲،۳،۲. عوامل موثر بر بازدهی توربین بادی ساونیوس

در این بخش با عوامل هندسی و ساختاری موثر بر عملکرد و بازدهی توربین ساونیوس آشنا شده و میزان این تاثیرات، بر اساس مراجع بررسی می‌شوند.

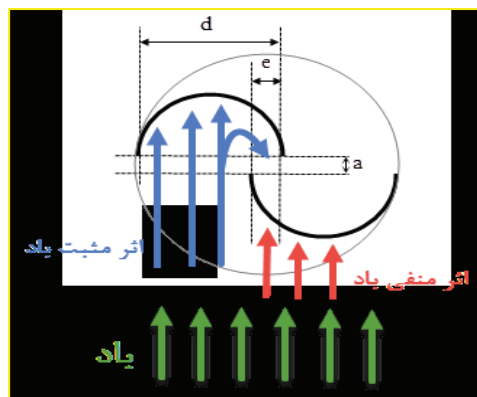
• ۱،۲،۳،۲. نسبت هم‌پوشانی

مطابق شکل ۶، فاصله افقی و عمودی بین دو نوک پره نسبت به هم به ترتیب گپ هم‌پوشانی اولیه (e) و ثانویه (a) نامیده می‌شوند.

تحقیقات نشان داده است که نسبت گپ هم‌پوشانی یعنی d/e تاثیر زیادی بر عملکرد توربین دارد.

در واقع این گپ همان‌طور که در شکل ۸ دیده می‌شود، باعث انتقال بخشی از باد به پشت پره‌ی بازگشتی شده و اثر منفی باد در سمت دیگر این پره را کاهش می‌دهد. یکی از اولین تحقیقات در این زمینه در مرجع [۸] گزارش شده است. در این مرجع، دو توربین ساونیوس دو و سه پره ساده با صفحات انتهایی مورد تست تجربی در تونل باد قرار گرفتند. توربین‌ها در ازای نسبت هم‌پوشانی اولیه‌ی ۰، ۰،۱، ۰،۱۵، ۰،۲ و آزمایش شده و نمودارهای ضریب توان و ضریب گشتاور برآورد شدند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در حالت دو پره، بهترین مقدار ضریب توان برای نسبت گپ هم‌پوشانی بین ۰،۱ و ۰،۱۵ به دست می‌آید و در مقدار بیشینه منحنی ضریب توان، تاثیر نسبت گپ هم‌پوشانی ۹ درصد است.

مرجع [۹] نیز به بحث تاثیر نسبت هم‌پوشانی پره بر متوسط گشتاور و ضریب توان پرداخته است. در این مقاله، معادلات دیفرانسیل حاکم بر مسئله شامل معادلات نویر-استوکس میانگین‌گیری شده‌ی رینولدز و پیوستگی با لحاظ کردن مدل آشفستگی انتقال تنش برشی $k - \epsilon$ به کمک نرم‌افزارهای تجاری دینامیک سیالات محاسباتی به صورت عددی حل شده و در نهایت متوسط ضریب گشتاور و ضریب توان در ازای ضرایب هم‌پوشانی مختلف بین ۰ تا ۰،۶ به دست آمده است.



شکل ۸: هندسه توربین ساونیوس ساده با هم پوشانی‌های اولیه و ثانویه

بر اساس نتایج این مقاله که با نتایج تجربی [۸] نیز سازگار است، بهترین مقدار ضریب هم پوشانی ۰,۱۵ برآورد شده است؛ همچنین بیشینه ضریب توان ۰,۳۱۶۱ در نسبت سرعت نوک پره ۰,۱۲۵ حاصل شده است.

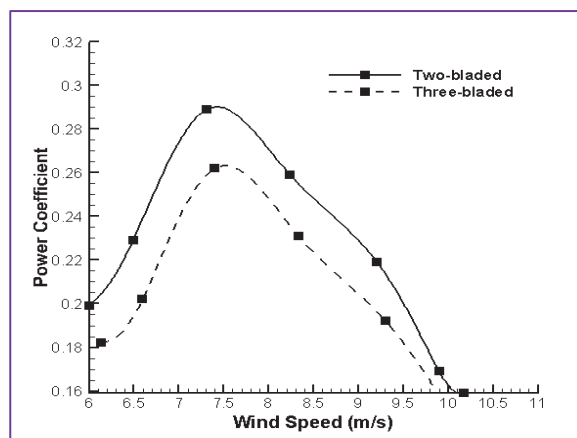
در مقاله [۷] نیز یک توربین ساونیوس دو طبقه مورد ارزیابی عملکرد قرار گرفته است، که یکی از عوامل بررسی، نسبت هم پوشانی بوده است. بر اساس نتایج شبیه سازی عددی دو بعدی که برای این توربین انجام شده، بهترین مقدار هم پوشانی ۰,۲۴۲ به دست آمده که به بیشینه ضریب توان ۰,۳۳ منجر شده است. مطالعاتی نیز روی تاثیر نسبت هم پوشانی مثبت و منفی به کمک شبیه سازی با نرم افزارهای تجاری و استفاده از معادلات نویر- استوکس با میانگین گیری رینولدز و مدل توربولانس قابل تحقق $k - \epsilon$ صورت گرفته، که بر اساس آن بهترین نسبت هم پوشانی برای نوع متداول توربین ساونیوس، ۰,۱۵ به دست آمده است [۱۰].

به عنوان یکی دیگر از مراجعی که به مطالعه تاثیر نسبت هم پوشانی توربین ساونیوس بر عملکرد آن پرداخته، می توان به [۱۱] اشاره کرد. در این تحقیق نوع متداول و یک نوع غیر متداول به نام توربین ساونیوس باخ به صورت عددی مورد ارزیابی قرار گرفته اند و مقادیر بهینه نسبت هم پوشانی برای این دو توربین به ترتیب ۰,۲ و ۰,۱ گزارش شده است.

• ۲,۲,۳,۲. تعداد پرها

شکل متداول توربین ساونیوس که در شکل ۶ آمده است، دارای دو پره است. تاکنون تحقیقاتی در خصوص افزودن تعداد پرها و تاثیر آن بر بازدهی توربین صورت گرفته است؛ از جمله می توان به مرجع [۸] اشاره کرد که توربین های با دو و سه پره را مورد تست تجربی قرار داده است. بر اساس نتایج این مرجع، بیشینه ضریب توان توربین دو پره ۱,۵ برابر بیشینه ضریب توان نوع سه پره بوده است. در نتیجه، از نظر عملکردی توربین دو پره بر سه پره ارجحیت دارد و تنها مزیت نوع سه پره در این است که کمینه گشتاور استاتیکی آن [۱۲] بالاتر است. یکی دیگر از مراجعی که در آن بررسی تجربی تاثیر تعداد پرها بر عملکرد توربین ساونیوس پرداخته شده است، مقاله [۱۲] است. طبق گزارش این مقاله، یک نمونه کوچک شده ی توربین ساونیوس به طول ۱۷ سانتیمتر در فاصله ۲ متری خروجی یک تونل باد قرار داده شده و در ازای باد با سرعت بین ۶ تا ۱۱ متر بر ثانیه، دور بر دقیقه و گشتاور استاتیکی و دینامیکی آن برآورد شده است. نتایج عملکرد توربین دو و سه پره در این تست نشان می دهد که عملکرد توربین با افزایش پرها از دو به سه کاهش می یابد. دلیل این امر این است که بادی که یک پره را به عقب می راند، به پره ی بازگشتی در جهت خلاف حرکت نیرو وارد می کند. در حالت سه پره، فاصله ی دو پره متوالی، کمتر است و اختلاف نیروهای درگ نسبت به حالت دو پره کمتر می شود. در شکل ۹ نمودار ضریب توان توربین های دو و سه پره در سرعت باد مختلف با هم مقایسه شده و برتری توربین دو پره مشهود است. بیشینه ضریب توان نوع دو پره برابر ۰,۲۸۹، در سرعت باد ۷,۳۱ متر بر ثانیه حاصل شده، در حالی که بیشینه ضریب توان نوع سه پره تقریباً ۹ درصد کمتر و برابر ۰,۲۶۲، در سرعت باد ۷,۴ متر بر ثانیه به دست آمده است.

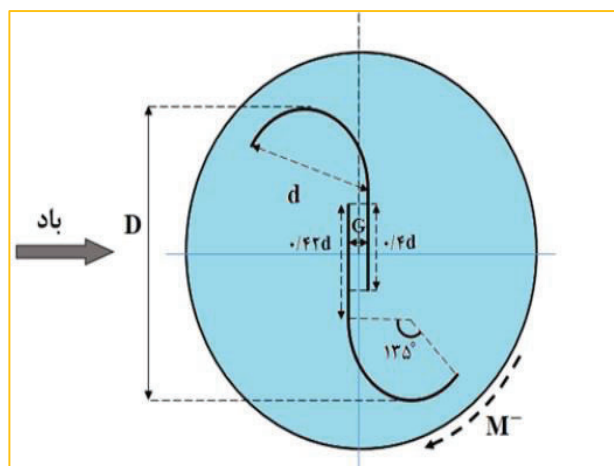
در مقاله [۱۳] نیز به مطالعه تاثیر تعداد پرها بر عملکرد توربین با رویکرد تجربی پرداخته اند. براساس گزارش این مقاله، توربین ساونیوس دو و سه پره ی هم اندازه با صفحه های انتهایی، به کمک یک تونل باد مادون صوت برای باد با سرعت ۲ تا ۶ متر بر ثانیه ارزیابی شده اند. نتایج این آزمون حاکی از کاهش ۱۹ درصدی بیشینه ضریب توان توربین سه پره نسبت به توربین دو پره است و نتایج سایر مراجع را تایید می کند.



شکل ۹: مقایسه ضریب توان دو توربین ساوینیوس ۲ و ۳ پره [۱۲]

• ۳.۲.۳.۲. نسبت منظری

نسبت منظری توربین که با تقسیم ارتفاع روتور توربین (H) به قطر روتور ($D = 2d - e$) تعریف می‌شود، یکی از عوامل هندسی در بازدهی آن است. از جمله نخستین مطالعات تجربی تاثیر این نسبت می‌توان به نتایج مندرج در [۸] اشاره کرد که دو توربین با ارتفاع ۱ و ۱.۵ متر و قطر یکسان ۰.۵ متر و سایر شرایط مشابه به کمک تونل باد ارزیابی شده‌اند. ضریب توان در حالتی که ارتفاع ۱.۵ متر بوده، یعنی نسبت منظری ۳ نسبت به حالت دیگر که در آن نسبت منظری ۲ بوده، حدود ۸ درصد افزایش در بیشینه ضریب توان و حدود ۱۰ درصد افزایش در ضریب گشتاور در محدوده‌ی $\lambda = 1$ داشته است؛ البته، در این مقایسه سطح تصویر شده (HD) متغیر بوده است و لازم است در بررسی اثر نسبت منظری، مساحت تصویر شده‌ی روتور برای نسبت‌های مختلف ثابت باشد. این کار در مرجع [۱۴] انجام شده است و یک توربین ساوینیوس متداول دو پره‌ای در ازای نسبت‌های منظری ۰.۴۸، ۰.۵۵، ۰.۶۴، ۰.۷۷ و ۰.۹۹ در تونل باد و در ازای تمام شرایط یکسان از جمله مساحت تصویر شده ارزیابی شده است. بر اساس نتایج این مرجع، بهترین نمودار ضریب توان در ازای نسبت منظری ۰.۷۷ به‌دست آمده است که بیشینه ضریب توان آن ۱۴ درصد بیشتر از توربین‌های با نسبت منظری ۰.۴۸ و ۰.۵۵ بوده است. این نتیجه تقریباً با نتیجه مرجع [۱۵] که بررسی اثر نسبت منظری را برای مقادیر بین ۰.۶ تا ۱.۰ به‌صورت تجربی مطالعه کرده و به مقدار بهینه ۰.۷ رسیده است، تایید می‌شود؛ البته باید توجه داشت که در این مراجع نسبت‌های بیشتر از ۱ ارزیابی نشده‌اند. مرجع [۱۶] اما به نسبت‌های منظری بالاتر از ۱ در مساحت تصویر شده‌ی یکسان (برابر واحد) پرداخته و نتیجه گرفته که برای نسبت‌های منظری ۰.۵ تا ۵ ضریب توان به‌دست آمده روندی صعودی دارد و بالاترین بازدهی برای نسبت منظری ۵ گزارش شده است. در مرجع [۱۱] با استفاده از شبیه‌سازی عددی، به بررسی تاثیر هم‌پوشانی داخلی بر عملکرد توربین بادی محور عمودی دو پره ساوینیوس با دو نوع روتور از نوع متعارف و باخ (شکل ۱۰) پرداخته شده است.



شکل ۱۰: شماتیک توربین بادی ساونیوس مدل باخ (با در نظر داشتن نسبت منطری توربین)

به این منظور مشخصه‌های توان توربین بادی در محدوده نسبت سرعت نوک پره از ۰٫۲ تا ۱٫۲ و سرعت باد ۵ و ۷ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است، رفتار لحظه‌ای جریان و داده‌های متوسط زمانی برای دو روتور مورد نظر یعنی نوع متعارف و نوع باخ ارائه شده است. نتایج به دست آمده از تحقیق محققان نشان می‌دهد که به ازای کلیه مقادیر سرعت نوک پره و سرعت باد، مقدار بهینه هم پوشانی به ترتیب برای روتورهای نوع متعارف و نوع باخ برابر ۰٫۲ و ۰٫۱ است. از طرفی، حداکثر ضریب توان روتور متعارف و باخ، بدون توجه به مقدار سرعت باد و نسبت هم پوشانی، به ترتیب در نسبت سرعت نوک پره ۰٫۸ و ۰٫۷ حاصل می‌شود؛ در نهایت، مشخص شد که به ازای هر مقدار نسبت سرعت نوک پره و نسبت هم پوشانی در هر دو نوع روتور، مقدار ضریب توان با افزایش سرعت باد افزایش می‌یابد.

• ۴٫۲٫۳٫۲. قطر شفت

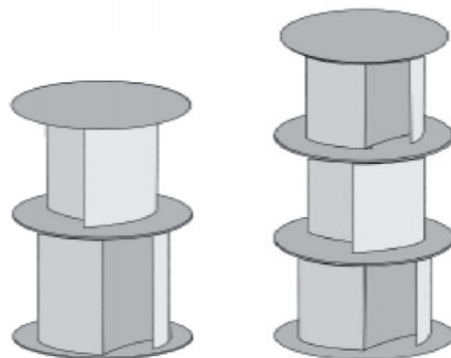
یکی از پارامترهای مورد مطالعه در منابع، قطر شفت توربین بوده است. در نوع متداول شفت به صورت مرکزی است، ولی طرح‌هایی نیز وجود دارد که در آن‌ها شفت توربین به صورت بیرونی است.

در حالت متداول که شفت مرکزی وجود دارد، قطر آن دارای اهمیت است، چون می‌تواند باعث انسداد جریان درون روتور شود. شکل ۸ شماتیک توربین بادی ساونیوس در مطالعاتی که بر اساس شبیه سازی دو بعدی در [۷] مدل باخ [۱۱] انجام شده، برای یک توربین دو طبقه، مقدار بهینه‌ی قطر شفت برابر یک پنجم هم پوشانی بهینه تخمین زده شده است.

• ۵٫۲٫۳٫۲. تعداد طبقات

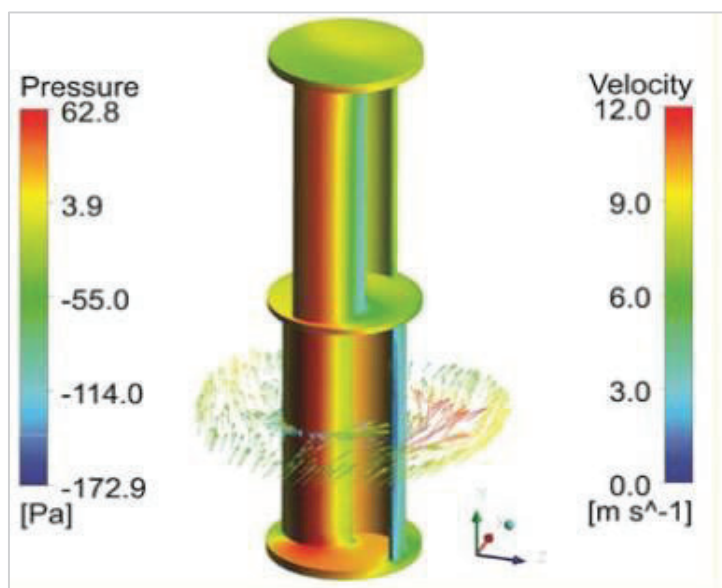
• یکی از راهکارهای افزایش بازدهی توربین ساونیوس، افزایش تعداد طبقات است؛ بدین معنی که مثلاً در حالت دو طبقه، دو توربین ساونیوس در راستای محوری مشترک روی هم قرار می‌گیرند؛ به عنوان نمونه در شکل ۱۱ طرح دو توربین دو طبقه و سه طبقه، نشان داده شده است. هم افزایی جذب و تبدیل انرژی این طبقات، متأثر از زوایای مختلف پره‌های هر طبقه نسبت به یکدیگر است. به گونه‌ای که مثلاً وقتی پره‌ی طبقه ی بالایی پشت به باد است، پره طبقه پایین رو به باد قرار می‌گیرد.

• اثر تعداد طبقات در مرجع [۱۲] بررسی شده و توربین‌های ۱، ۲، ۳ طبقه از نظر بازدهی در تونل باد ارزیابی شده‌اند. در این تحقیق، مساحت تصویر شده و نسبت منطری هر سه توربین و سایر مشخصات به جز تعداد طبقات، یکسان در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که توربین دو طبقه، بازدهی بالاتری نسبت به توربین یک طبقه دارد، ولی وقتی تعداد طبقات به سه افزایش می‌یابد، با افت ضریب توان مواجه می‌شویم، زیرا جرم اینرسی توربین اضافه می‌شود. بیشینه ضریب توان و برای توربین با دو پره یک طبقه، ۰٫۱۸، برای توربین دو طبقه ۰٫۲۹ و برای سه طبقه، ۰٫۲۲ حاصل شده است. سایر حالت‌ها از جمله پره‌های پیچیده نیز حاکی از بهینه بودن توربین دو طبقه است.



شکل ۱۱: نمونه توربین ساونیوس دو طبقه (سمت چپ) و سه طبقه سمت (راست)

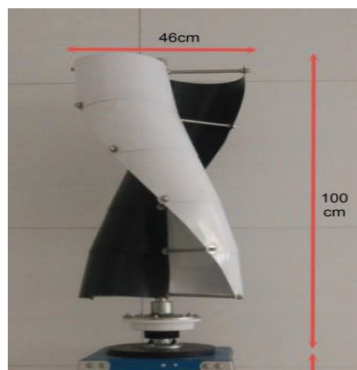
تحقیق دیگری نیز روی توربین دو طبقه به کمک شبیه سازی با نرم افزار تجاری اکس-فلو همراه با آزمون تجربی صورت گرفته که نتایج آن در [۱۷] منتشر شده است. در مرجع [۱۸] نیز یک توربین ساونیوس دو طبقه که هر طبقه آن دارای دو پره بدون صفحه های انتهایی است، به طور تجربی تحلیل شده است. نمونه توربین در یک تونل باد حلقه باز زیر صوت قرار داده شده و ضرایب توان و گشتاور به منظور بررسی اثر نسبت هم پوشانی اندازه گیری شده است. از جمله شبیه سازی های عددی روی توربین های دو طبقه می توان به [۱۹] اشاره کرد که در آن معادلات RANS به همراه با مدل توربولانس $k-\omega$ به روش حجم متناهی حل شده و بیشینه ضریب توان به کمک آن محاسبه شده است. شکل ۱۲ بردار سرعت و میدان فشار روی سطح توربین را برای یکی از نمونه های شبیه سازی شده در این تحقیق نشان می دهد.



شکل ۱۲: نمونه ای از نتایج شبیه سازی عددی توربین ساونیوس دو طبقه [۱۹]

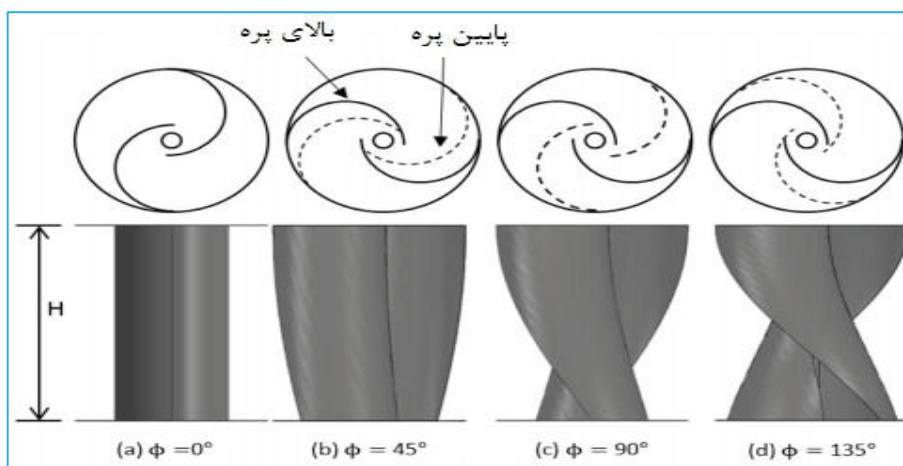
• ۶,۲,۳,۲. پیچش پره ها

نوع پره پیچیده در واقع تعمیم توربین های دو طبقه است. در توربین دو طبقه همان طور که دیدیم، دو روتور با زاویه ۹۰ درجه روی هم نصب می شوند، تا زمانی که یکی پشت به باد است، دیگری رو به باد واقع شود و بدین ترتیب گشتاور دورانی افزایش یابد. این تغییر زاویه در توربین پیچشی بر خلاف دو طبقه، به صورت پیوسته صورت گرفته است. در شکل ۱۱ نمونه ای از توربین ساونیوس پیچشی دو پره که در پژوهشگاه هوافضا ساخته شده، مشاهده می شود. زاویه پیچش این توربین ۱۳۵ درجه است.



شکل ۱۳: توربین ساوونیوس پیچشی پژوهشگاه هوافضا

مهم‌ترین عامل هندسی در توربین‌های پیچشی، زاویه دوران مقطع یک پره از بالا تا پایین است که بر شکل و عملکرد آن تاثیر دارد. در شکل ۱۳ چهار توربین با زوایای پیچش ۰ درجه، ۴۵ درجه، ۹۰ درجه و ۱۳۵ درجه نشان داده شده است. اگر از بالا و در راستای محور توربین به آن نگاه کنیم، خطوط پیوسته بالای پره و خطوط نقطه چین پایین پره را نشان می‌دهند که زاویه پیچش در واقع زاویه بین این خطوط است.



شکل ۱۴: توربین‌های پیچشی با زوایای پیچش مختلف [۲۰]

تاثیر زاویه پیچش روی عملکرد توربین در [۲۰] بررسی شده است. علاوه بر تحلیل عددی، مدل توربین با چهار زاویه پیچش بین ۰ و ۱۳۵ درجه در تونل باد تست شده است. نتایج این تست نشان می‌دهد زاویه پیچش باعث گردش بهتر جریان هوا شده و بازدهی را افزایش می‌دهد. بهترین ضریب توان در زاویه پیچش ۴۵ درجه به دست آمده است. زوایای پیچش ۰ و ۱۳۵ مقادیر ضریب توان کمتری نسبت به توربین بدون پیچش، ولی با بیشینه ضریب توان یکسان داشتند. در مرجع [۲۰] نیز یک توربین کوچک با پره‌های پیچیده به کمک نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی فلوئنت تحلیل شده است. بر اساس نتایج، این توربین در نسبت سرعت نوک پره ۰٫۴۵، به بیشینه ضریب توان ۰٫۱۷، رسیده است. توان خروجی الکتریکی توربین نیز به کمک یک موتور الکتریکی که با توربین کوپل شده حداکثر ۵۰ وات را در سرعت باد ۱۱ متر بر ثانیه نشان می‌دهد.

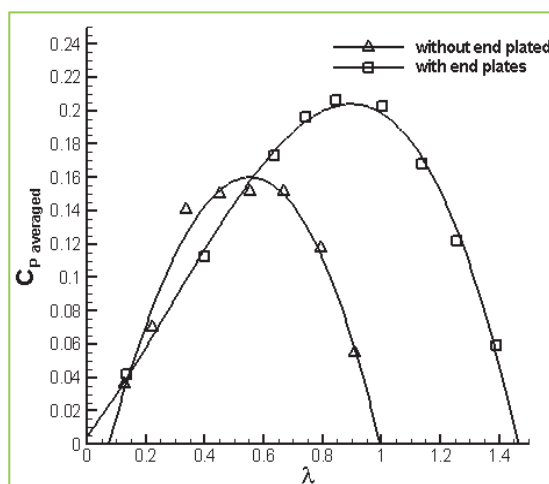


• ۷.۲.۳.۲. نصب صفحه در انتهای بالا و پایین

نصب صفحه‌های انتهایی ساده‌ترین روش افزایش کارایی توربین ساونیوس است. همان‌گونه که در شکل ۱۴ مشخص است، متوسط بیشترین ضریب توان با نصب صفحه در انتها، به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. توربین نیز با کارایی بیشتر و با نسبت سرعت نوک بالاتری کار می‌کند. نصب این صفحه‌ها، امکان گریز سیال از قسمت انتهایی بالا و پایین بخش مقعر پره را از بین برده و اختلاف فشار بین بخش‌های مقعر و محدب پره را در سطح قابل قبولی نگه می‌دارد. نکته جالب در مورد این صفحه، این است که اکثر محققین نظر یکسانی در مورد ابعاد بهینه این صفحه‌ها دارند. به نظر این محققین، شعاع این صفحه باید ۱٫۱ برابر شعاع توربین بوده و همچنین ضخامت بسیار کمی در مقایسه با ارتفاع توربین داشته باشد، زیرا در غیر این صورت، اینرسی توربین به صورت نامطلوبی بالا می‌رود [۲۱].

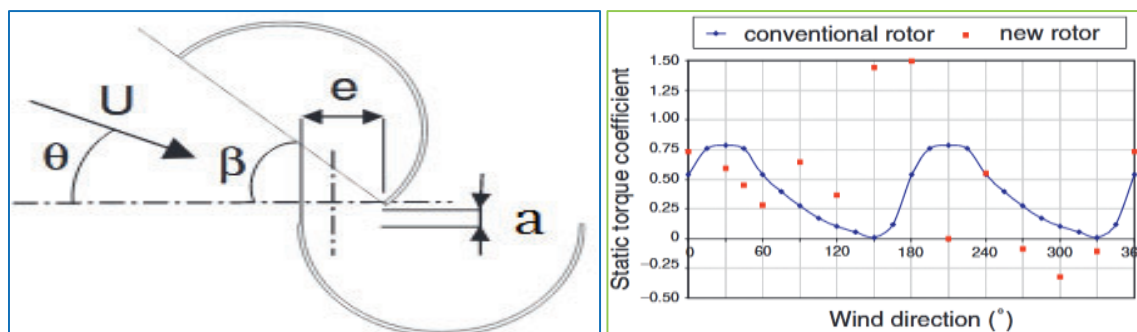
• ۸.۲.۳.۲. روتور ساونیوس اصلاح شده

روتور معمولی ساونیوس، از دو نیم‌سیلندر عمودی حول یک محور عمودی تشکیل می‌شود. برخی از محققان شکل دیگری از توربین ساونیوس را تحت‌عنوان روتور اصلاح شده ساونیوس پیشنهاد کرده‌اند؛ همان‌طور که در شکل ۱۵ نشان داده شده، این روتور با بهینه‌سازی سه پارامتر هندسی هم‌پوشانی اولیه e هم‌پوشانی ثانویه زاویه بین پره‌ها β اصلاح شده است. منحنی مشخصه این روتور (مقادیر ضریب گشتاور سکون C_m در مقابل زاویه باد) در شکل ۱۵ رسم شده است.



شکل ۱۵: تاثیر صفحه انتهایی بر ضریب توان [۲۲]

در مقایسه بیشینه گشتاور سکون این روتور با روتور معمولی ساونیوس، افزایش قابل توجهی مشاهده شده و این مقایسه، نتایج نسبتاً دل‌گرم‌کننده‌ای به دست می‌دهد. با این همه، گشتاورهای کم و گاهی منفی به‌ازای زاویه‌های متعدد، در این روتور نیز مشاهده می‌شود. در مجموع، مقدار متوسط گشتاور حدود ۶۲٪ نسبت به روتور معمولی افزایش یافته است؛ لذا، نیاز به مطالعات بیشتر به منظور بهبود تجزیه و تحلیل این روتور احساس می‌شود [۲۳].



شکل ۱۶: توربین ساونیوس اصلاح شده (راست) و گشتاور استاتیکی توربین اصلاح شده (چپ) [۲۳]

• ۴.۲. توربین پیشنهادی

علاوه بر بهینه‌سازی‌ها و تغییرات جزئی که در بخش‌های قبل مرور شد، ایده‌های دیگری نیز برای بهبود عملکرد توربین ساونیوس ارائه شده است، که ضمن ایجاد تغییرات کلی، آن‌ها را از حالت متداول خارج ساخته است. ارائه این پیشنهادات علاوه بر بازدهی بسیار بالا در این نوع توربین بادی، سازگاری بسیار بالایی با شرایط اقلیمی کشور ایران را دارا می‌باشد؛ لذا در بحران حال حاضر کشور ایران در مسئله انرژی، پیشنهاد می‌شود از نوع توربین بادی اصلاح شده استفاده شود، که علاوه بر تولید نیرو بر پایه تجدیدپذیر بتوان حداکثر توان خروجی را نیز دریافت نمود. همچنین تمامی اعداد و ارقام ذکر شده در این نوع توسعه‌یافته توربین توسط نرم‌افزارهای شبیه‌سازی مطرح یا رجوع به مقالات معتبر بین‌المللی بوده است. تعدادی از این نسخه‌های غیرمتداول توربین ساونیوس در این بخش معرفی می‌شوند.

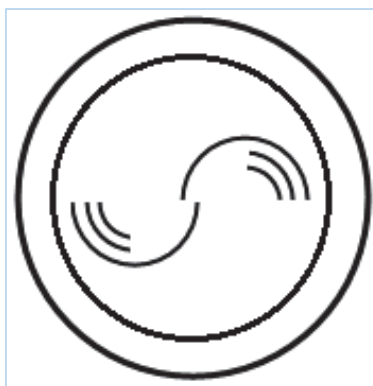
• ۱.۴.۲. پروفایل پره

یکی از عواملی که برای افزایش بازدهی توربین ساونیوس مورد توجه پژوهشگران بوده، پروفایل یا مقطع پره توربین بوده است. همان‌طور که در ابتدا اشاره شد، ساونیوس متداول دارای پره‌هایی نیم‌دایره است؛ با این حال مطالعاتی روی شکل مقطع پره و تاثیر آن بر بازدهی صورت گرفته است. از این میان، می‌توان به [۲۴] اشاره کرد که در آن رویکردی بر مبنای بهینه‌سازی پیشنهاد شده است. در این مرجع، پروفایل پره به کمک چندجمله‌ای‌های درجه ۳، ۴ و ۵ پارامتری شده و ضریب توان برای هر پره به کمک شبیه‌سازی با نرم‌افزار دینامیک محاسباتی کامسول محاسبه شده است. نتایج حاکی از بالاتر بودن عملکرد پروفایل درجه ۵ و رسیدن به بیشینه ضریب توان ۰.۳۴ بوده که نسبت به پرهی نیم‌دایره‌ای، ۴۷ درصد بهبود دارد. یکی دیگر از طرح‌های پروفایل پره که بازدهی بالاتری نسبت به پره متداول ساونیوس دارد و تقعر آن نیز کمتر است، به پرهی پیشرفته معروف است و کارهای تجربی و عددی روی آن در مراجع [۲۵] و [۲۶] انجام شده است. طبق نتایج [۲۵]، ضریب گشتاور استاتیکی پره پیشرفته ۱۱ درصد بیشتر از پرهی متداول است.

• ۲.۴.۲. افزونه‌ها

یک دسته دیگر از بهبودهایی که روی توربین ساونیوس انجام شده است، افزودن بخش‌های اضافی به منظور جریان بهتر هوا و افزایش قابلیت استخراج گشتاور مکانیکی از باد بوده است. به عنوان مثال، توربین ابداعی مرجع [۲۷] حاصل افزودن چهار پرهی یک‌چهارم به توربین متداول است که نمای بالایی آن را در شکل ۱۶ مشاهده می‌کنید.

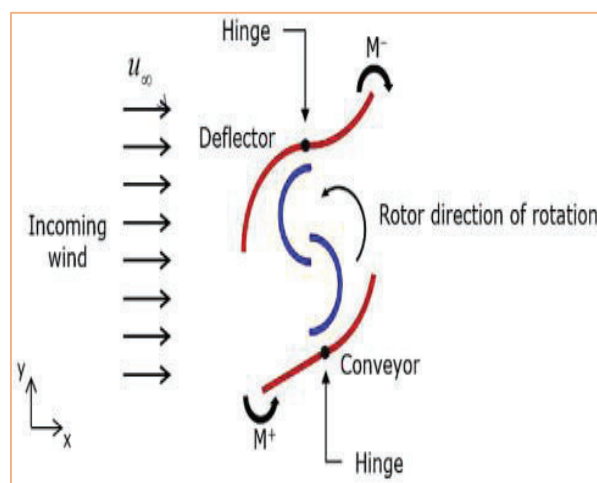
• براساس نتایج شبیه‌سازی صورت گرفته در این مرجع، بازدهی توربین جدید در بادهای مختلف، بین ۸.۹ تا ۱۳.۷ درصد نسبت به مدل متداول بیشتر است. یکی دیگر از طرح‌های ابتکاری، سیستم پرده است که در شکل ۱۵ نمایش داده شده است؛ در این سیستم دو پرده منحرف‌کننده و حمل‌کننده در دو طرف توربین نصب می‌شوند که هر یک به کمک یک لولا قابلیت گردش دارند. پرده‌ی حمل‌کننده که در سمت پرهی پس‌رونده نصب شده، باعث هدایت بهتر جریان باد به سمت پره می‌شود.



شکل ۱۷: نمای بالایی توربین پیشنهادی [۲۷]

در حالی که پرده‌ی منحرف‌کننده که در سمت پره‌ی بازگشتی است، سبب کاهش فشار دینامیکی روی این پره شده و در کل گشتاور دورانی بیشتری را موجب می‌شوند. یکی از ویژگی‌های این سیستم، قابلیت خودتنظیمی آن با جهت باد است.

شبیه‌سازی عددی و نتایج تست تونل باد نشان می‌دهد که توربین دارای سیستم پرده دارای ضریب توانی حدود ۲۴ درصد بیشتر از توربین متداول مشابه است. علاوه بر این، بیشینه ضریب توان که در توربین متداول در ازای نرخ سرعت نوک حدود ۰٫۸ به دست آمده در سیستم دارای پرده به نرخ سرعت نوک حدود ۰٫۷ منتقل شده است، که نشان می‌دهد این سیستم عملکرد توربین را برای بادهای با سرعت کم بهبود داده است. یکی دیگر از منابعی که در آن افزودن صفحه‌های هدایت‌کننده در جلوی توربین را بررسی کرده، مرجع [۲۸] است [۲۹]. در این تحقیق که بر مبنای شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی صورت پذیرفته، اندازه و موقعیت بهینه قرارگیری این صفحات نیز تعیین شده که در نهایت به ۳۸ درصد افزایش ضریب توان و بهبود گشتاور استاتیکی و در نتیجه وضعیت شروع به حرکت بهتر توربین منجر شده است.



شکل ۱۸: توربین مجهز به سیستم پرده

• ۳،۴،۲. پره‌های راهنما

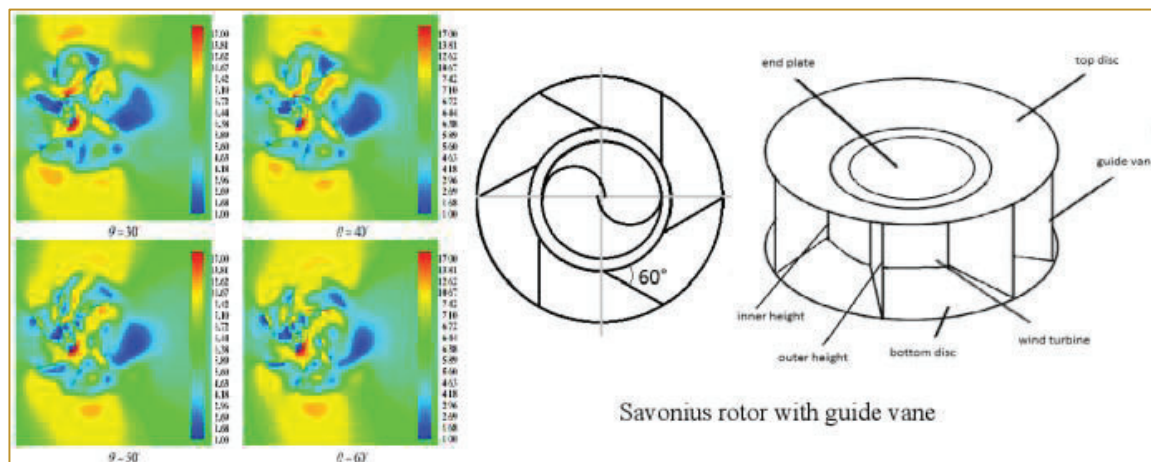
استفاده از پره‌های راهنما روشی مناسب برای بهبود عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی ساونیوس است (شکل ۱۸)؛ پره‌های راهنما انرژی جریان باد اطراف توربین را جمع‌آوری و به سمت قسمت مقعر روتور هدایت می‌کنند، که موجب افزایش ضریب توان توربین می‌شود. در مرجع [۳۰] به بررسی طرح‌های پیشنهادی با ۴، ۵ و ۶ پره‌ی راهنما پرداخته است که در هر کدام از آن‌ها، پره‌ها در زوایای ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه قرار گرفته‌اند. نتایج عددی ضرایب توان و گشتاور، نشان‌دهنده‌ی این است که پره‌های راهنما، باعث بهبود قابل توجه عملکرد توربین ساونیوس



می‌شوند. برای توربین دارای ۵ پرهی راهنما در زاویه‌ی قرارگیری ۳۰ درجه، بیشینه ضریب توان ۰,۵۱ است که حاکی از افزایش ۱۸۳ درصدی در مقایسه با توربین بدون پرهی راهنماست.

بیشینه ضرایب توان برای توربین با تعداد پره‌های راهنمای ۴ و ۶ به ترتیب ۰,۴۲ و ۰,۴۹ است که در مقایسه با توربین ساونیوس بدون پره‌های راهنما، به ترتیب به مقدار ۱۳۳ و ۱۷۲ درصد افزایش یافته‌اند.

همچنین 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؛ بنابراین، به‌طور خلاصه می‌توان در بررسی جریان باد در اطراف روتور و پره‌های راهنما نشان داد که دو پدیده‌ی 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 می‌کاهند.



شکل ۱۹: کانتور سرعت در زوایای مختلف موقعیت قرارگیری پره‌های یک توربین ساونیوس شش پره [۳۰]

۳. نتیجه‌گیری

در این مقاله، به توربین محور عمودی ساونیوس، اصول کارکرد آن و کمیت‌های اندازه‌گیری عملکرد آن پرداخته شد. سپس عوامل هندسی تاثیرگذار بر عملکرد توربین مانند نسبت هم‌پوشانی، نسبت منظری، تعداد پره‌ها و پیچش آن‌ها از رهگذر بررسی منابع مطالعه شد؛ همچنین مهم‌ترین طرح‌های خلاقانه‌ای که به منظور افزایش کارایی توربین ساونیوس ارائه شده‌اند، مرور شد. همان‌طور که مرور شد، این ابداعات و بهبودها، باعث افزایش ۳۸ درصدی بیشینه‌ی ضریب توان می‌باشد، که خود نشان‌دهنده توسعه شگرفی در این نوع توربین می‌باشد؛ امید است در آینده بتوان این ابداعات را به‌طور گسترده در توربین‌های بادی اجرا نمود.



مراجع

- [1] Future of wind deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects and I.R.E.A. (A Global Energy Transformation paper), Abu Dhabi, 2019.
- [2] Renewable Energy Market Update / 2021 Renewable electricity / Renewables deployment geared up in 2020.##
- [3] Y.-T. Wu, F. Porte-Agel, Atmospheric Turbulence Effects on Wind-Turbine Wakes: An LES Study, *Energies* 7017, 8181:0-8167;
- [4] G. Santiago, W. Hernandez, A. C. Costa de Araujo, M. Rosa, M. González, Application of product development process (PDP) in the construction of vertical axis wind turbine with movable blades, 21st International Conference on Engineering Design, ICED17, pp. 429-438, 2017
- [5] J. L. Menet, N. Bourabaa, Increase in the Savonius rotors efficiency via a parametric investigation, In European Wind Energy conference & exhibition, pp. 22-25. 2004.
- [6] B. F. Blackwell, R. E., Sheldahl, L. V., Feltz, Wind Tunnel Performance Data for Two- and {8} Three Bucket Savonius Rotors SAND 76-0131, pp. 1-107, 1977
- [7] J. V. Akwa, G. A. Júnior, A. P. Petry, Discussion on the verification of the overlap ratio {9} influence on performance coefficients of a Savonius wind rotor using computational fluid dynamics, *Renewable Energy*, Vol. 38, pp. 141-149, 2012
- [8] M. Ebrahimpour, R. Shafaghat, R. Alamian, M. Safdari Shadloo, Numerical Simulation of {10} Savonius Vertical Axis Wind Turbine and Evaluation of the Effect of Horizontal Overlap Parameter on its Performance, *Journal of Soft Computing and Information Technology*, Vol. 6, No. 2, pp. 40-50, 2018
- [9] R. Hassanzadeh, M. Mohammad Nejad, Effect of Overlapping Size on the Performance of the 11 Savonius Wind Turbine, in Both Conventional and the Bach-Type Models, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 19, No. 11, pp. 2599-2606, 2019. (in Persian)
- [10] U. K. Saha, S., Thotla, D. Maity, Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, No. 8-9, pp. 1359-1375, 2008
- [11] M. H. Ali, Experimental comparison study for Savonius wind turbine of two & three blades at low wind speed, *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, Vol. 3, No. 5, pp. 2978-2986, 2013
- [12] N. J., Roth, A Prototype Design and Performance of the Savonius Rotor Based Irrigation System, MSc Thesis, University of British Columbia, 1982.
- [13] M. A. Kamoji, S. B. Kedare, S. V. Prabhu, Experimental investigations on single stage modified Savonius rotor, *Applied Energy*, Vol. 86, pp. 1064-1073, 2009.
- [14] N. H. Mahmoud, A. A. El-Haroun, E. Wahba, M. H. Nasef, An experimental study on improvement of Savonius rotor performance, *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 51, pp. 19-25, 2012.



- [15] P. Chaisiroy, N. Tinnachote, S. Usajantragul, T. Leephakpreeda, Experimental Performance Investigation of Optimal Vertical Axis Wind Turbines under Actual Wind Conditions in Thailand, *Energy Procedia*, Vol. 138, pp. 651-656, 2017.##
- [16] K. K. Sharma, R. Gupta, A. Biswas, Performance Measurement of a Two-Stage Two-Bladed Savonius Rotor, *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol. 4, No. 1, pp. 115-121, 2014.##
- [17] L. B. Kothe, A. P. Petry, Numerical and Experimental Study of a Two-Stage Savonius Wind Turbine, *Engenharia Térmica*, Vol. 18, No. 2, p. 52-61, 2019.##
- [18] J. H. Lee, Y. T. Lee, H. C. Lim, Effect of twist angle on the performance of Savonius wind turbine, *Renewable Energy*, Vol. 89, pp. 231-244, 2016.##
- [19] H. Jang, I. Paek, S. Kim, D. Jeong, Performance Prediction and Validation of a Small-Capacity Twisted Savonius Wind Turbine Energies, pp. 1-12, 2019.##
- [20] J. V. Akwa, A. V. Horacio, A. P. Petry, A review on the performance of Savonius wind turbines, *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 16, No. 5, pp. 3054-3064, 2012.##
- [21] J. L. Menet, Aerodynamic Behaviour of a New Type of Slow- Running VAWT, In: Peinke, J., Schaumann, P., Barth, S. (eds) *Wind Energy*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-33866-6_43, 2007.##
- [22] Zhao, Y., Xu, Y., & Li, J. (2021). Advanced Design Approaches for Wind Turbine Blades: A Review. *Renewable Energy*, 163, 252-267.##
- [23] González, A., Maza, M., & García, L. (2020). Smart Control Strategies for Wind Turbines. *Energy*, 214, 118-130.
- Mann, M., & Eicher, M. (2022). Predictive Maintenance in Wind Energy: Leveraging IoT for Enhanced Performance. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 14(1), 011501.##
- [24] Liu, Y., Wang, S., & Zhang, X. (2019). Spatial Optimization of Wind Farms: A Comprehensive Review. *Wind Energy*, 22(2), 161-175.##