



بررسی عملی دو مدل توربین محور عمودی ساوینوس براساس نوع و تعداد پره در کاربردهای شهری

آرمان صادقی^{1*}، مفید گرجی بندپی

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک تبدیل انرژی، موسسه آموزش عالی صنعتی مازندران، بابل

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

* بابل، صندوق پستی: 4718978891، armansadeghy3@gmail.com

چکیده

امروزه با پیشرفت علم و تکنولوژی و با پدید آمدن انرژی‌های تجدیدپذیر جهان به دلیل گرم شدن و آلودگی‌های ناشی از مصرف بیش از اندازه‌ی انرژی‌های تجدیدناپذیر و سوخت‌های فسیلی فعالیت‌ها و سرمایه‌گذاری‌های زیادی در بخش انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، بادی، آبی و غیره کرده است و نیاز بشر به این انرژی‌ها روز به روز افزایش یافته است. در این تحقیق به مطالعه، طراحی، ساخت و آزمایش توربین‌های محور عمودی ساوینوس پرداخته شده است. این توربین‌ها جدا از استفاده از دو مدل ایرفویل نیم‌دایره‌ای و Du06 که در سایت جهانی Airfoiltools.com قرار دارند، بر اساس تعداد پره‌ها به دو صورت دو پره و سه پره با هم مورد مقایسه و آزمایش قرار گرفته‌اند. در این تحقیق اجزای تشکیل دهنده‌ی این توربین‌ها نشان داده شد و این توربین‌ها با شرایط و مشخصات آزمایشگاهی برابر در یک تونل باد واقع در دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل مورد آزمایش قرار گرفت و پارامترهای مختلف در این توربین‌ها ارزیابی شد. با توجه به نتایج نشان داده شده توربین‌های پره نیم‌دایره‌ای دارای عملکرد بهتری در بخش سرعت دورانی و ضریب توان نسبت به توربین‌ها با پره Du06 می‌باشند.

کلیدواژگان

انرژی باد، توربین بادی با محور عمودی، توربین ساوینوس، ایرفویل، عملکرد هیدرونامیکی

Practical investigation on two vertical axis savonius wind turbines based on types and numbers of blades for urban applications

Arman Sadeghy^{1*}, Mofid Gorji bandpy²

1- Department of Mechanical Engineering, Mazandaran Institute Of Technology, Mazandaran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Mazandaran, Iran

* P.O.B. 4718978891 Mazandaran, Iran, Armansadeghy3@gmail.com

Abstract

Nowadays with the development of science and technology and appearance of renewable Energy, Needless to say, world have plenty of activities and investments on renewable energy in terms of solar, wind, water and etc. because of the pollution and global warming, as a result human need this type of energy more than before. In this paper we studied, Designed, produced and analyzed a vertical axis wind turbine. According to airfoiltools.com, the turbines have been tested in terms of two different airfoils which are semi-circular airfoils and Du06 airfoils which are compared by the number of blades too. We considered two and three blades semi-circular and Du06 airfoils. In this research every part of wind turbine has been shown and these turbines have been tested in a wind tunnel located in Babol Noshirvani University of technology with the same situation and the same experiment information. Various parameters of turbine have been analyzed. All things considered, semi-circular airfoil turbines had showed better performance on rotation velocity and power coefficient than Du06 bladed turbines.

Keywords

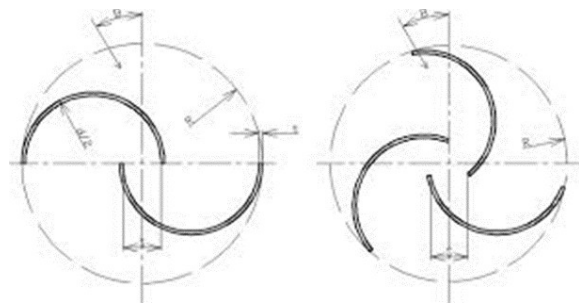
Wind Energy, Vertical Axis Wind Turbine, Savonius Turbine, Airfoil, Hydrodynamic Performance

1- مقدمه

تجهیزات و لوازم بهره برداری از این منابع تولید انرژی و پیشرفت و توسعه و ارتقای کیفی مربوط به آنها می باشد. انرژی باد یکی از انرژی‌های تجدیدپذیر، رایگان و پاکیزه می باشد. پیشرفت در زمینه ی مربوط به انرژی های بادی به پیشرفت در زمینه ی مولدهای مربوطه می باشد و مولد مورد استفاده جهت حصول انرژی از باد، توربین های بادی می باشند، بنابراین جهت پیشرفت در زمینه ی انرژی های بادی می بایست به پیشرفت در حوزه ی توربین های بادی دست یابیم، برای این مهم می بایست شناخت دقیق از توربین های بادی و اجزای مربوطه داشته باشیم.

از گذشته‌های نه چندان دور، راه‌حلهایی برای تولید انرژی از منابع طبیعی مورد مطالعه قرار گرفته و عناصری مانند، آفتاب (نور خورشیدی)، آب، باد و امواج اقیانوس‌ها مورد توجه قرار گرفته است و دانشمندان

آنچه اکنون به عنوان بزرگترین مشکل جهانی، بشر را تهدید می‌کند، کمبود انرژی و آلودگی هوا بر اثر استفاده از سوخت‌های فسیلی است. برای رفع این دو معضل بزرگ از مدتها پیش، پژوهشگران و دانشمندان مطالعه و تحقیق برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک را شروع کرده اند و اکنون که دشواری‌های گرانی و کمبود سوخت‌های فسیلی و حداقل در ۵۰ سال آینده، پایان یافتن این قبیل سوخت ها، پیش بینی شده و شدت آلودگی هوا، کلان شهرهای دنیا را بشدت تهدید می‌کند. انرژی‌های تجدیدپذیر روز به روز در حال پیشرفت و گسترش می باشند و این گسترش در کشورهای اروپایی بسیار مشهود می باشد. این پیشرفت ها ناشی از تحقیق و مطالعه در مورد انرژی های تجدیدپذیر و مهمتر از همه بررسی و تحقیقات پیرامون



شکل 1- شماتیک توربین بادی عمودی ساوینوس با 2 پره و 3 پره

2- پیشینه پژوهش

توربین ساوینوس توسط سیگارد جان ساوینوس در سال ۱۹۲۲ ابداع شد. از نظر آیرودینامیکی این نوع توربین از نوع درگ محور می باشد و از این نظر معروف است که برای شروع به کار نیازمند گشتاور کمتری می باشد. این نوع توربین دارای بازده کم و ضریب توان آن معمولاً بین ۱۵ تا ۳۵ درصد می باشد. ساوینوس عملکرد ۳۰ مدل مختلف از توربین اس شکل ساوینوس را در تونل باد و هوای آزاد مورد بررسی قرار داد که در نتیجه اعلام کرد، بالاترین ضریب توان این توربین در تونل باد و هوای آزاد به ترتیب ۰.۳۱ و ۰.۳۷ می باشد. در نیمه آخر قرن گذشته، آزمایش های مختلفی بر توربین های ساوینوس صورت گرفت که دریافتند مقدار ضریب توان در محدوده ۰.۱۵ تا ۰.۳۵ می باشد [۱]. روگوسکی و همکاران به صورت ۲ بعدی و با تحلیل سی اف دی یک توربین ساوینوس ۲ پره را مورد ارزیابی قرار دادند و با همان نمونه به صورت آزمایشگاهی مقایسه کردند، آنها به این نتیجه رسیدند که از روش تحلیلی سی اف دی می توان برای بهبود شکل روتور استفاده کرد [۲]. ونهوبون و همکاران بر روی عملکرد توربین ساوینوس با تعداد پره های ۲، ۳ و ۴ کار کردند تا سرعت نوک پره، ضریب توان و ضریب گشتاور را محاسبه کنند، آنها به وسیله شبیه سازی با نرم افزار انسیس توزیع فشار هوا را نمایش دادند، نتیجه آزمایشات آنها نشان داد که تعداد پره بر عملکرد توربین تأثیر دارد و همچنین مدل ۳ پره ای ساوینوس را با سرعت نوک پره ۰.۵۵۵ در سرعت باد ۷ متر بر ثانیه بهترین عملکرد اعلام کردند [۳]. علی و همکاران با مقایسه دو توربین ساوینوس ۲ پره و ۳ پره نشان دادند که توربین ۲ پره بسیار کاراتر از توربین ۳ پره می باشد، آنها افزایش گشتاور منفی با اضافه شدن پره سوم را دلیل بر کاهش توان توربین می دانستند [۴]. الکساندر و هولونیا تأثیر نسبت ابعاد تیغه، هم پوشانی، فضای بین تیغه ها و کم و زیاد کردن صفحات بالا و پایین توربین را آزمایش کردند، تست های آنها در تونل باد و سرعت باد آن در محدوده ۶ تا ۹ متر بر ثانیه انجام شد. آنها نتیجه گرفتند که عملکرد توربین با افزایش نسبت ابعاد بهبود پیدا می کند، آزمایش برای روتورهای ۳ و ۴ پره عملکرد خیلی ضعیفتری نسبت به ۲ پره داشتند. آنها همچنین دریافتند که توربین با اضافه کردن محافظ و صفحات بالا و پایین عملکرد بهتری دارند و ثابت کردند که افزایش هم پوشانی موجب بهبود عملکرد روتور می شود]

می کوشند با استفاده از این عناصر طبیعی، مشکل انرژی را حل کنند که پیامد آن، کاهش آلودگی هوا و محیط زیست سالم خواهد بود. استفاده از قایق ها و کشتی های بادبانی و آسیاب های بادی و آبی، استفاده وسیع از انرژی آفتاب در مقاصد گرمایش و سوزاندن چوب و امثال آن برای تولید حرارت، تعبیه بادگیرهای طبیعی برای سرمایه های مسکونی و بسیاری موارد دیگر از جمله مثال های بارز استفاده انسان از منابع انرژی طبیعی می باشد.

توربین یک دستگاه مکانیکی دوار است که انرژی را از یک جریان سیال استخراج می کند و آن را به کار مفید تبدیل می کند. کار تولید شده توسط توربین می تواند برای تولید برق در هنگام ترکیب با یک ژنراتور مورد استفاده قرار گیرد. یک توربین توربو ماشین با حداقل یک قسمت متحرک به نام روتور است که یک شفت با تیغه متصل است. سیال متحرک روی تیغه ها عمل می کند تا آنها حرکت کنند و انرژی روتاری را به روتور تحویل دهند. مراحل کار یک توربین کاملاً برعکس مراحل کار یک پنکه است. در پنکه انرژی الکتریسیته به انرژی مکانیکی تبدیل شده و باعث چرخیدن پره می شود. در توربین ها، چرخش پره ها انرژی جنبشی باد را به انرژی مکانیکی تبدیل کرده، سپس به الکتریسیته تبدیل می شود. باد به پره ها برخورد می کند و آن ها را می چرخاند. چرخش پره ها باعث چرخش محور اصلی می شود و این محور به یک ژنراتور برق متصل است. چرخش این ژنراتور، برق متناوب تولید می کند. توربین ها به چهار دسته تقسیم می شوند: توربین های بخار، توربین های گازی، توربین های آبی و توربین های بادی.

1-1 توربین های بادی محور عمودی ساوینوس :

مکانیزم تولید گشتاور در توربین های ساوینوس نیروی درگ می باشد، به طوریکه اختلاف ضریب درگ در دو سوی محور، منجر به دوران محور میشود. زوایای حمله ی کوچک نیروی لیفت نیز در تولید گشتاور موثر می باشد. مطالعات انجام شده بر روی توربین های مختلف نشان میدهد که در شرایط های یکسان، توربین های ساوینوس برای تولید برق محلی، بهتر از دیگر انواع توربین از جمله داریوس می باشد. این در حالی است که روتورهای ساوینوس در زوایای چرخش مختلف ضریب گشتاور استاتیکی متفاوتی دارند، به این صورت که در بعضی زوایا گشتاور استاتیکی و ضریب گشتاور استاتیکی بسیار مثبت و در بازه ای از زوایای چرخش مقدار منفی ای داراست و گشتاور استاتیکی منفی در عملکرد توربین های ساوینوس تأثیر منفی دارد. در شکل ۸ شماتیک توربین بادی عمودی ساوینوس با ۲ پره و ۳ پره نمایش داده شده است.

توربین‌های بادی محور عمودی نسبت به جهت وزش باد حساسیت نداشته و هزینه ساخت بسیار کمتری نسبت به توربین‌های بادی محور افقی دارند. یکی از دلایل کمتر بودن هزینه توربین‌های بادی، قرار گرفتن پره‌ها و ژنراتورها بر روی زمین می‌باشد. این در حالی است که پره‌ها و ژنراتور توربین‌های محور افقی بر روی برج نگهداری می‌شوند. حضور ژنراتور بر روی زمین سبب می‌گردد که هزینه و زمان تعمیر و نگهداری کاهش بسزایی داشته باشد. این توربین‌ها بر خلاف مدل افقی خود دارای آلودگی صوتی نبوده و تلاطم جریان‌های بادی تأثیر چشمگیر بر روی عملکرد آنها ندارد. توربین‌های محور عمودی ساوینوس اگرچه از لحاظ راندمان از توربین‌های محور عمودی داریوس ضعیف‌تراند، اما به دلیل کمتر بودن گشتاور شروع حرکت پایین‌تر نسبت به مدل داریوس کاربرد بیشتری در مناطق شهری دارند.

2-1-3 دلایل ابعادی :

هرچه توربین بادی از نظر ابعاد بزرگ‌تر باشد، هزینه ساخت مجموعه پره‌ها، محور، قاب و سیستم انتقال قدرت بالاتر خواهد بود. با توجه به چشم‌انداز شهری و موقعیت قرارگیری توربین‌های بادی بر روی سقف ساختمان‌ها، بحث محدودیت ابعادی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. کمبود فضا برای چند توربین بادی بر روی بهم منازل و تأثیر قرارگیری توربین‌ها بر روی چشم‌انداز، بشر را بیش از پیش به سمت استفاده از توربین‌های محور عمودی با ابعاد کوچک سوق می‌دهد.

زمان ساخت توربین‌ها نقش زیادی در افزایش هزینه ساخت توربین‌ها دارد. هرچه ابعاد بزرگ‌تر باشد، زمان ساخت توربین افزایش می‌یابد. توربین‌های عمود محور ساوینوس به دلیل سادگی فیزیکی و قرار گرفتن ژنراتور و پره‌ها بر روی زمین، از نظر هزینه ساخت و نگهداری از بقیه توربین‌ها پیشی می‌گیرد. از دیگر دلایل ابعادی انتخاب توربین‌های محور عمودی می‌شود به انتقال و حمل آسان آنها اشاره کرد. که امتیاز بسیار مهمی در یافت شهری دارد [15].

2-3 اجزای توربین ساوینوس :

در این تحقیق از یک توربین ساوینوس بدون مبدل جریان الکتریکی استفاده شده است و پارامترهای مختلف آیرودینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین اجزای توربین مدل شده به شرح زیر می‌باشد.

- 1- پره
- 2- محور یا شفت
- 3- صفحات نگهدارنده پره‌ها
- 4- قاب
- 5- پوش‌های
- 6- بلبرینگها

[5]. بلکول و همکاران گزارش دادند که هندسه دو مرحله ای دارای عملکرد آیرودینامیکی بهتری نسبت به سه مرحله دارد، به استثنای گشتاور شروع حرکت توربین. آنها همچنین به این نتیجه رسیدند که افزایش نسبت ابعاد، عملکرد روتور را بهبود می‌بخشد [6].

برای این موضوع ساها و راجیکومار پره‌های پیچ‌دار ساوینوس را مورد مطالعه قرار دادند و مشاهده کردند که این نوع توربین دارای بازده بالاتری نسبت به توربین متعارف می‌باشد [9]. لارین و همکاران به صورت عددی عملکرد یک توربین ساوینوس دو پره را در بالای پشت‌بام و در توربین جریان آزاد مقایسه کردند و پی بردند که عملکرد توربین در بالای پشت‌بام و تونل باد تغییر خاصی نمی‌کند، گرچه با افزایش تعداد پره‌ها از 6 عدد به 7 عدد افزایش گشتاور از 0.15 به 0.24 را شاهد بودند [10].

بهره‌گیری از توربین‌های بادی محور عمودی ساوینوسی در ساختمان‌ها به دلیل ساختار ساده و عملکرد مناسب با سرعت‌های پایین باد در مناطق شهری به‌منظور تولید توان و اهداف مختلف مورد توجه قرار گرفته است. از جمله ساختارهای نوآورانه پیشنهادی می‌توان به توربین بادی محور عمودی ساوینوسی دارای شفت مخروطی و دارای پیچش به‌منظور افزایش دبی خروجی از توربین جهت بهره‌گیری از جریان هوا برای تهویه مطبوع ساختمان اشاره نمود. در تحقیق راس و همکاران، با مطالعه سه پارامتر اصلی قطر، ارتفاع و زاویه پیچش به مدل‌سازی هندسه‌های مختلف به‌منظور دستیابی به حالتی بهینه پرداخته شده است. از جمله دیگر تحقیقات اخیر انجام گرفته در این زمینه تحلیل محاسباتی از پره توربین بادی را در زوایای حمله مختلف و عدد رینولدز پایین می‌باشد [11]. ماهاماراکالاگ و همکاران به صورت آزمایشگاهی و تحلیل هندسی پره‌ها تأثیر هم‌پوشانی، نسبت ابعادی و عدد رینولدز را روی توربین ساوینوس بررسی کردند. نتایج نشان داد که بهترین حالت توربین ساوینوس دارای فضای بین پره‌ها صفر، هم‌پوشانی صفر، نسبت ابعادی 0.77، زاویه قوس تیغه 135 درجه می‌باشد. روتور با ویژگی‌های بالا دارای بالاترین عملکرد بوده که ضریب توان آن حدود 0.32 در سرعت نوک پره 0.79 بوده است [12].

وانگ ژانگ با استفاده از تحلیل سه بعدی سی اف دی یک مدل توربین بادی ساوینوس با پره‌های لوتوس شکل را مورد بررسی قرار داده است. که به این نتیجه منجر شده است که عملکرد تیغه‌های نیمه دایروی تقریباً برابر عملکرد تیغه‌های نیمه استوانه‌ای بوده و در قیاس با تیغه‌های بیضوی پیچیده بازده کمتری داشته‌اند [13]. آکوا و همکاران در سال 2012 در بسیاری از توربین‌های ممکن بر روی هم‌پوشانی پره‌ها، شکل، مقطع، تعداد و ضخامت پره‌ها کار کردند، در نتیجه کارشان کارایی 50% را گزارش دادند [14].

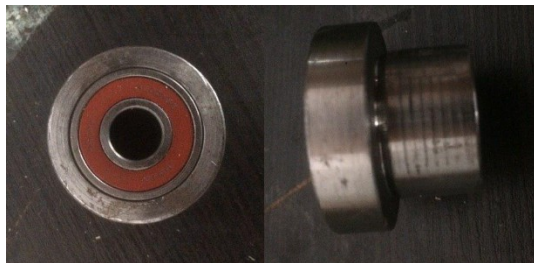
3- توربین عمود محور ساوینوس پیاده‌سازی شده و دلایل انتخاب آن

1-3 دلایل انتخاب توربین ساوینوس :

1-1-3 دلایل فیزیکی :



شکل 6- نمونه‌ای از بوش



شکل 7- نمونه‌ای از بولبرینگ که در بوش پرس شده

3-3 اسمبل :

تمامی قطعات فوق برای توربین‌ها با شرایط مختلف به صورت مجزا سرهم یا اسمبل گشته است. در ابتدا اولین چیزی که حایز اهمیت است نحوه قرار گیری قسمت دوار توربین می‌باشد. در اولین گام، بوش‌های متصل کننده روتور به شفت به صفحه‌های نگهدارنده پیچ می‌شوند، سپس پره‌ها را بر روی صفحه‌ها سوار می‌کنیم. به این صورت که پره‌های نیم دایره‌ای در داخل شیارهای تعبیه شده و پره‌های پروفیل ایرفویلی به وسیله میله‌های راهنمای در صفحه‌ها قرار می‌گیرند. سپس به آرامی و با ضربات کنترل شده شفت را وارد کرده و از صفحات عبور می‌دهیم. در این حالت پره‌ها و صفحات با استقامت پایینی روی هم قرار گرفته‌اند که با بستن پیچ بوش متصل به بدنه روتور موقعیت روتور را نسبت به هم‌دیگر و شفت ثابت می‌کنیم. در این حالت توربین به صلیبیت دلخواه رسیده و یکپارچه گشته است. در ادامه با ضربات کنترل شده روتور به ترتیب در بوش‌های پایینی و بالایی جا زده می‌شوند. نمونه‌ای از توربین اسمبل شده در شکل (8) نمایش داده شده است.

در ادامه نمونه‌ای از اجزای تشکیل دهنده توربین مورد بحث نمایش داده شده است :



شکل 2- نمونه‌ای از پره توربین



شکل 3- شفت توربین



شکل 4- نمونه‌ای از صفحات نگهدارنده



شکل 5- قاب

- است. در جدول زیر توربین‌ها به 4 نوع مختلف نامیده شده اند که انواع توربین به شرح زیر می‌باشد :
- 1- توربین نوع 1 : توربین سه پره با پروفیل پره‌ی نیم‌دایره‌ای
 - 2- توربین نوع 2 : توربین دو پره با پروفیل پره‌ی نیم‌دایره‌ای
 - 3- توربین نوع 3 : توربین سه پره با پروفیل پره‌ی Du06-W-200 VAWT Airfoil
 - 4- توربین نوع 4 : توربین دو پره با پروفیل پره‌ی Du06-W-200 VAWT Airfoil



شکل 8- نمونه‌ای از توربین اسمبل شده

ضریب توان نشان دهنده‌ی راندمان یا کارایی توربین‌ها می‌باشد که به وسیله‌ی معادله‌ی زیر قابل محاسبه است. و از سوی دیگر هرچه سرعت باد خروجی توربین کمتر باشد به این معنی است که توربین از باد ورودی حاصله از تونل باد استفاده‌ی بهتری کرده است و کارآمدتر بوده. جهت بررسی کارایی توربین محور عمود پیاده‌سازی شده، معیار ضریب توان طبق فرمول زیر محاسبه گردیده است :

در جدول فوق تمام وزن‌ها بر حسب گرم و طیف باد بر حسب متر بر ثانیه می‌باشد، ضمن اینکه منظور از طیف باد، شروع حرکت توربین تا حداکثر سرعت اندازه‌گیری شده در این تحقیق می‌باشد. لذا آزمایش‌های انجام شده در هر توربین در طیف مشخص شده‌ی جدول بالا انجام گشته و نتایج آن در ادامه ارائه می‌شود.

$$C_p = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{V}{V_0} \right) \left[1 - \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right]$$

نتایج حاصل از آزمایشات در فصل بعد به تفصیل بیان می‌شود.

2-4 سرعت باد :

سرعت باد ورودی به توربین مهمترین پارامتر تاثیر گذار بر روی توربین می‌باشد. در این تحقیق سرعت باد ورودی به توربین از 0 متر بر ثانیه تا 12 متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. ولی همانطور که در جدول فوق نشان داده شده است ؛ توربین‌های مختلف در سرعت جریان بادهای مختلف شروع به حرکت کرده‌اند و طیف سرعت باد آزمایش شده در هر توربین متفاوت است. سرعت جریان باد در فواصل 0.5 متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است تا خطای آزمایش را کمتر کند.

3-4 نتایج حاصل از نمودار ضریب توان بر حسب سرعت باد ورودی به توربین :

در این قسمت نمودارهای ضریب توان توربین محور عمودی ساوینوس بر حسب سرعت جریان باد ورودی به توربین یا به عبارتی دیگر سرعت جریان باد خروجی از تونل باد نمایش داده شده است.

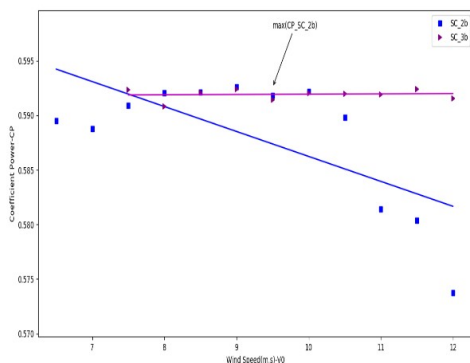
4- تحلیل نتایج حاصل از آزمایش‌ها

در بخش‌های گذشته به بررسی انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد و لزوم استفاده از آن پرداختیم. سپس به تحلیل توربین ساوینوس و معرفی آن به عنوان یک توربین مناسب برای مناطق شهری پرداختیم. در ادامه به توضیح در مورد توربین ساخته شده در این تحقیق پرداختیم و نحوه‌ی ساخت و اسمبل توربین ساوینوس را به تفصیل شرح داده شد. در ادامه به بررسی نتایج حاصله از این تحقیق می‌پردازیم و نتایج حاصله را با ذکر دلیل بیان می‌سازیم. در ابتدا شرایط و مشخصات فنی آزمایش‌های انجام شده به تفصیل بیان خواهد شد و سپس مراحل آزمایش و نتایج بدست آمده تحلیل و بررسی می‌شود.

1-4 مشخصات و شرایط فنی آزمایش :

برای ارائه و توضیح بهینه در این تحقیق، ابتدا به مشخصات فنی و شرایط آزمایش می‌پردازیم به این صورت که در جدول مشاهده می‌شود، توربین‌های بررسی شده بر اساس وزن و طیف باد مشخص شده

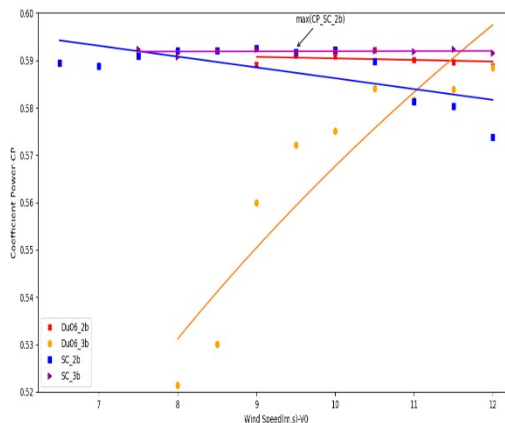
زیرا ضریب توان توربین بر اساس استفاده‌ی بهینه‌ی توربین از باد ورودی تعریف شده است و این امر طی بالاتر بردن سرعت دورانی بهبود یافته است.



نمودار 3- نمودار ضریب توان بر حسب سرعت باد برای توربین‌ها با پره نیم‌دایره

همانگونه که مشاهده می‌شود نمودار آبی رنگ مربوط به توربین دو پره پروفیل پره‌ی نیم‌دایره‌ای و نمودار بنفش مربوط به توربین سه پره با همین پروفیل پره می‌باشد. در این توربین‌ها سطح درگی مناسبی از نظر ایرودینامیکی وجود داشته و این امر موجب گشته است که سبک‌تر بودن توربین دو پره علاوه بر بوجود آمدن سرعت دورانی بالاتر، توربین نیز زودتر شروع به دوران کند. در توربین‌های پره نیم‌دایره‌ای توربین دو پره به دلیل بیشتر شدن سرعت باد خروجی از توربین دارای عملکرد نزولی در بخش ضریب توان داشته است و عملکرد توربین سه پره نسبتاً ثابت مانده است. این رفتار از این توربین‌ها به دلیل کمتر بودن سطح درگی در این توربین‌ها می‌باشد. در مدل سه پره سطح دریافت‌کننده انرژی باد بیشتر بوده و موجب نگه داشتن میزان ضریب توان در تمام طیف‌های بادی شده است ولی در توربین دو پره به دلیل کمتر بودن تعداد پره‌ها نسبت به مدل سه پره، طی افزایش سرعت باد ضریب توان کاهش یافته است.

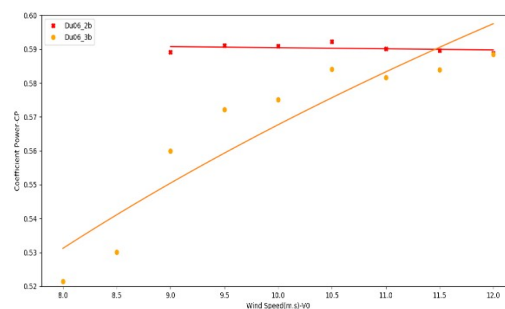
حال به مقایسه‌ی پروفیل پره‌های توربین‌ها پرداخته می‌شود. به این صورت که توربین‌های دو پره و سه پره را جدا ساخته و در نمودارهای مجزا مورد بررسی قرار داده.



نمودار 1- نمودار ضریب توان بر حسب سرعت باد ورودی

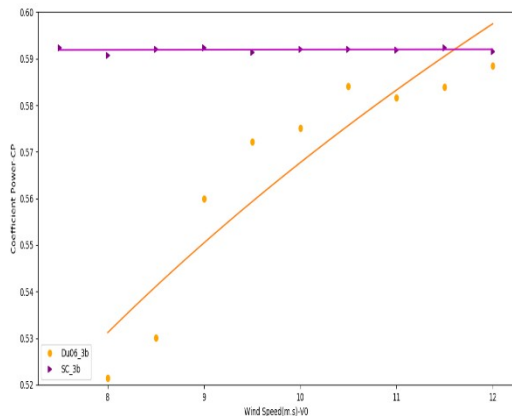
برای بررسی و مقایسه‌ی بهتر در این نمودار، این نمودار را به چند نمودار تبدیل کرده و پارامترها را با هم مقایسه می‌کنیم.

ابتدا نمودارهای توربین‌های دوپره و سه پره‌ی هر پروفیل خاص را مجزا تحلیل شده.



نمودار 2- نمودار ضریب توان بر حسب سرعت باد برای توربین‌ها با پره Du06

همانگونه که مشاهده می‌شود نمودار قرمز رنگ مربوط به توربین دو پره پروفیل پره‌ی Du06 و نمودار نارنجی مربوط به توربین سه پره با همین پروفیل پره می‌باشد. توربین سه پره Du06 در سرعت پایین‌تری نسبت به توربین دو پره شروع به حرکت می‌کند ولی دارای راندمان کمتری نسبت به توربین دو پره می‌باشد. دلیل این اتفاق این بوده که توربین دو پره‌ی Du06 دارای سطح بارگیری درگی کمتری نسبت به سه پره دارد و از این رو دیرتر به گشتاور لازم جهت شروع به حرکت می‌رسد ولی به دلیل سبک‌تر بودن سرعت دورانی بالاتری داشته است. در ضمن توربین‌های Du06 به دلیل داشتن پروفیل خاص در سیر سرعت باد بالاتر روند صعودی داشته اند.

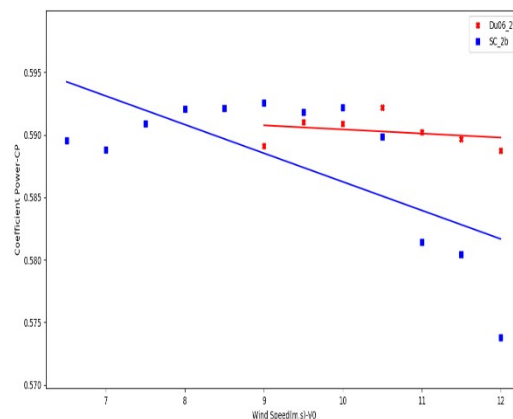


نمودار 5- نمودار ضریب توان بر حسب سرعت باد برای توربین‌ها سه پره

همانگونه که مشاهده می‌شود نمودار بنفش مربوط به توربین سه پره با پروفیل پره نیم‌دایره‌ای و نمودار نارنجی مربوط به توربین سه پره با پروفیل پره Du06 می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌شود در این نمودار نیز توربین پره نیم‌دایره‌ای در سرعت باد پایین‌تری نسبت به توربین با پره Du06 شروع به حرکت می‌کند. توربین با پره Du06 دارای راندمان پایین‌تر ولی صعودی بوده و توربین پره نیم‌دایره‌ای با یک راندمان ثابت بوده. توربین پره نیم‌دایره‌ای به دلیل داشتن سطوح ایرودینامیکی بهتر و جذب نیروی درگی بهتر واجد شرایط مساعدتری از لحاظ ثبات عملکرد بوده است.

5- نتایج

یکی از بزرگ‌ترین دغدغه‌های بشریت استفاده‌ی کمتر از سوخت‌های فسیلی و استفاده‌ی بیشتر از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد. به دلیل آلودگی و برگشت پذیر نبودن سوخت‌های فسیلی بشر روز به روز به استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر بیشتر ترغیب می‌شود. در این تحقیق به مطالعه، طراحی، ساخت و آزمایش یک توربین عمود محور ساوینوس پرداخته شد و پارامترهای مختلفی که بر عملکرد این توربین‌ها تاثیر می‌گذارد مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق دو مدل پره‌ی توربین عمودی با نام‌های پروفیل نیم‌دایره‌ای و پروفیل Du06 و با تعداد پره‌های دو و سه پره مورد ارزیابی قرار گرفت و به صورت مجزا با هم مقایسه شد. با توجه به نتایج نشان داده شده در بخش پیشین توربین‌های پره نیم‌دایره‌ای دارای عملکرد با ثبات‌تر و قابل اطمینان‌تری نسبت به توربین‌ها با پره ایرفویل Du06 داشته‌اند. توربین‌های نیم‌دایره‌ای به دلیل شروع به حرکت زودتر، انرژی بادی کمتر و راندمان قابل اطمینان‌تر برای بافت شهری بسیار مناسب می‌باشند.



نمودار 4- نمودار ضریب توان بر حسب سرعت باد برای توربین‌ها دو پره

همانگونه که مشاهده می‌شود نمودار قرمز رنگ مربوط به توربین دو پره پروفیل پره Du06 و نمودار آبی رنگ مربوط به توربین دو پره پروفیل پره نیم‌دایره‌ای می‌باشد. این نمودار برای مقایسه‌ی عملکرد توربین‌های که با تعداد پره‌های برابر ولی از لحاظ ایرودینامیکی متفاوت هستند ترسیم گشته است. با توجه به نقاط نمودار، منحنی‌های مشابه‌ای دارند با این تفاوت که نمودار توربین مدل نیم‌دایره‌ای سیر ضریب توان گسترده‌تری داشته است. توربین پره نیم‌دایره‌ای در جریان 6.5 متر بر ثانیه‌ای باد شروع به حرکت کرده در حالی که این سرعت برای توربین با پره Du06 9 متر بر ثانیه بوده است. دلیل این امر حجم بالاتر دریافت نیروی درگی می‌باشد.



6- مراجع

- [6] . F. Blackwell, R. F. Sheldahl, and L. V. Feltz, *Wind tunnel performance data for two-and three-bucket Savonius rotors*. Sandia Laboratories Springfield, VA, USA, 1977
- [7] S. Roy, U. K. J. R. Saha, and S. E. Reviews, "Review on the numerical investigations into the design and development of Savonius wind rotors," vol. 24, pp. 73-83, 2013
- [8] P. Larin, M. Paraschivoiu, C. J. J. o. W. E. Aygun, and I. Aerodynamics, "CFD based synergistic analysis of wind turbines for roof mounted integration," vol. 156, pp. 1-13, 2016
- [9] I. Ross, A. J. J. o. W. E. Altman, and I. Aerodynamics, "Wind tunnel blockage corrections: Review and application to Savonius vertical-axis wind turbines," vol. 99, no. 5, pp. 523-538, 2011
- [10] F. J. U. o. P. Mahamarakkalage, Srilanka, "On the Performance and Wake Aerodynamics of the Savonius Wind Turbine, a Thesis of Doctoral of Philosophy," vol. 1, no. 2, p. 3, 1980.
- [11] Y.-F. Wang, M.-S. J. E. Zhan, and Buildings, "3-Dimensional CFD simulation and analysis on performance of a micro-wind turbine resembling lotus in shape," vol. 65, pp. 66-74, 2013
- [14] S. J. W. E. Sivasegaram, "Concentration augmentation of power in a Savonius-type wind rotor," pp. 52-61, 1979'
- [15] I. J. E. f. S. D. Al-Bahadly, "Building a wind turbine for rural home," vol. 13, no. 3, pp. 159-165, 2009
- [1] A. J. P. o. t. I. o. M. E. Sayers, Part A: Power and P. Engineering, "Blade configuration optimization and performance characteristics of a simple Savonius rotor," vol. 199, no. 3, pp. 185-1985, 191
- [2] K. Rogowski, R. J. J. o. T. Maroński, and A. Mechanics, "CFD computation of the Savonius rotor," vol. 53, no. 1, pp. 37-45, 2015
- [3] F. Wenehenubun, A. Saputra, and H. J. E. P. Sutanto, "An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades," vol. 68, pp. 297-304, 2015.
- [4] M. H. J. I. J. o. M. E. R. Ali, "Experimental comparison study for Savonius wind turbine of two & three blades at low wind speed," vol. 3, no. 5, pp. 2978-2986, 2013
- [5] Alexander, B. J. J. o. W. E. Holownia, and I. Aerodynamics, "Wind tunnel tests on a Savonius rotor," vol. 3, no. 4, pp. 343-351, 1978
- [12] J. V. Akwa, H. A. Vielmo, A. P. J. R. Petry, and s. e. reviews, "A review on the performance of Savonius wind turbines," vol. 16, no. 5, pp. 3054-3064, 2012
- [13] S. J. W. e. Sivasegaram, "Design Parameters Affecting the Performance of Resistance-Type, Vertical-Axis Windrotors; An Experimental Investigation," pp. 207-217, 1977