

بررسی آزمایشگاهی تاثیر زاویه و تعداد پره در استحصال توان در توربین های پرپره بادی

علیرضا کیهانی^۱، محمود رضا گلزاریان^۲ و رضا علیمردانی^۳
۱، ۲، ۳، استادیار، دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و دانشیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران
تاریخ پذیرش مقاله ۸۳/۳/۶

خلاصه

محدود، گران و تجدید ناپذیر بودن منابع انرژی فسیلی از یکسو و در دسترس، ارزان، تجدید پذیر و تمیز بودن انرژیهای نو از سوی دیگر انسانها را بر آن داشت تا نسبت به استحصال این گونه انرژیهای خدادادی از قبیل انرژی باد، با روشهایی کارآتر اقدام نمایند. استفاده روزافزون بسیاری از کشورها از انرژیهای پاک بویژه در کشاورزی مانند تامین انرژی لازم پمپهای آبیاری و خشک کردن محصولات کشاورزی محققین بخش کشاورزی را به چالش فرا خوانده است. طراحی ساده توربینهای پرپره بادی و متناسب بودن این توربینها برای بسیاری از مناطق ایران که دارای باد شدید نمیباشند از یکسو و هزینه بالای انتقال برق از نیروگاهها به جاههای پراکنده آب بویژه در نقاط دور دست از جمله دلایلی هستند که زمینه را برای انجام این تحقیق فراهم نمودند. با توجه به بازده کمتر توربینهای پرپره نسبت به توربینهای کم پره، به عنوان یک تحقیق مقدماتی و آزمایشگاهی، محدوده زاویه بهینه پره، متناسب با تعداد پرها در این نوع توربین با صلیبیت ۱۰۰٪ جهت افزایش بازده و استحصال بهتر انرژی به دست آمدند. در یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی در سه تکرار با فاکتورهای سرعت باد در سه سطح (۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ متر بر ثانیه)، زاویه پره در پنج سطح (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه) و تعداد پره در سه سطح (۸، ۱۶ و ۲۴ پره)، توان تولید شده توسط توربین مدل شده در تونل باد دانشکده هوا - فضای دانشگاه امیر کبیر مورد بررسی قرار گرفت. مجموعه پرها صاف و از جنس آلومینیوم و با قطر خارجی ۲۵۶ میلی متر ساخته شدند. تجزیه واریانس دادهها مشخص نمود که در سطح احتمال ۱٪ کلیه فاکتورها و برهمکنش کلیه ترکیبهای آنها تاثیر معنی داری بر توان تولید شده داشتند. در محدوده زاویه ۲۰ الی ۳۰ درجه برای هر سه سطح تعداد پرها بیشترین توان تولید گردید. در کلیه سطوح پرها، تا زاویه ای نزدیک به ۴۰ درجه، افزایش توان با افزایش تعداد پره همراه بود و در زوایای بالاتر، این نتیجه برعکس شد. از طرف دیگر، مشخص شد که برای دسترسی به توان مشابه، در صورتی که پره در زاویه ای قبل از پدیده مجزا شدن (در این آزمایش ۴۰ درجه) و بعد از زاویه بهینه برای کسب بیشینه توان قرار داشته باشد، می توان از توربین مشابه با تعداد پره های کمتر استفاده کرد. انتظار می رود که در شرایط واقعی و داشتن پره های پیچ دار، محدوده زوایایی که نتایج مشابه با نتایج حاصل از این تحقیق داشته باشند فرق کند اما روند و نحوه تفسیر نتایج یکسان باشد. البته برای دستیابی به نتایج واقعی تر، به کارگیری روشهایی چون شبیه سازی و آنالیز ابعادی مورد نیاز است.

واژه های کلیدی: توربین پرپره بادی، توان باد، صلیبیت، زاویه پره، پدیده مجزا شدن، بازده

مقدمه

بزرگترین جهش‌های جوامع انسانی، با کشف منابع تازه انرژی و دستگاه‌های مبدل انرژی همراه بوده است. ماشین بخار جامعه صنعتی مدرن را به وجود آورد و انرژی هسته‌ای، افق نوینی را در برابر چشمان بشر گشود. سرانجام، فنآوری پیشرفته امروزی این امکان را فراهم آورد که بدون کاستن از رفاهی که به برکت بر خورداری از انرژی به دست آمده بود، گام‌های بلندی بسوی استفاده روز افزون از پرتوان‌ترین سرچشمه‌های انرژی طبیعی موسوم به انرژی‌های نو نظیر خورشید و باد، برداشته شود.

انرژی‌های نو را گاه انرژی‌های پاک یا انرژی‌های طبیعی نیز می‌نامند، زیرا این گروه از انرژی‌ها با طبیعت هماهنگی داشته و کمتر به محیط زیست زیان می‌رسانند. انرژی خورشید، انرژی باد، انرژی زمین گرمایی، انرژی حاصل از مواد موجودات زنده یا زی - توده (بیوماس) و... از جمله این گونه انرژی‌ها محسوب می‌شوند

(۷). افزایش روزافزون استفاده از انرژی‌های پاک بویژه در بخش کشاورزی مانند استفاده از انرژی باد جهت تامین توان لازم برای پمپاژ آب جهت آبیاری (۶، ۱۸) و یا جمع آوری انرژی خورشیدی و استفاده از آن به عنوان منبع انرژی حرارتی در خشک کن‌های محصولات کشاورزی (۱۶) در بسیاری از کشورهای در حال توسعه و حتی پیشرفته جهان، محققین بخش کشاورزی را همواره به چالش کشانده است.

محدود، گران و تجدیدنپذیر بودن منابع انرژی فسیلی از یکسو و در دسترس، ارزان، تجدید پذیر و تمیز بودن انرژی‌های نو از سوی دیگر انسانها را بر آن داشت تا نسبت به استحصال این گونه انرژی‌های خدادادی از قبیل انرژی باد، با روش‌هایی کارآتر اقدام نمایند (۱۱، ۱۲، ۱۹). البته باید توجه داشت که این دسته از انرژی‌ها هنوز در هیچ جای دنیا سهم چندانی نسبت به کل مصرف انرژی ندارند و این سهم معمولاً در بهترین حالت از ۲ درصد کل انرژی مصرفی فراتر نمی‌رود (۷). اما با توجه به دلایل ذکر شده کلیه سازمان‌های بین‌المللی، بویژه سازمان ملل متحد سالهاست در پی تشویق کشورها به استفاده از اینگونه انرژی‌هاست.

باد، یکی از منابع طبیعی انرژی است که خود حاصل گرمای خورشید و گرم شدن هواست. دو درصد از انرژی خورشید که به زمین می‌رسد به انرژی باد تبدیل می‌شود. بنا بر محاسبات علمی، میزان تولید انرژی بالقوه باد در دنیا، حداقل دو برابر تولید برق کنونی است (۲۷).

سابقه آسیاب‌های بادی در ایران به قرن هفتم میلادی در شرق و در منطقه سیستان برمی‌گردد. در قرن هجدهم پیشرفت قابل ملاحظه‌ای در فنآوری استفاده از آسیابهای بادی صورت گرفت و در دوران اخیر استفاده از این نوع انرژی از نیمه دوم قرن نوزدهم میلادی ابتدا در آمریکا و سپس در سایر کشورهای پیشرفته بکار گرفته شد (۲۴).

ایران در معرض وزش بادهایی قرار دارد که در زمستان از اقیانوس اطلس و از شمال شرقی یعنی آسیای مرکزی و در تابستان از شمال غربی یعنی حدود ایسلند و اسکاندیناوی و نیز از جنوب یعنی اقیانوس هند می‌وزند و کلیه جریانهای جوی تحت تاثیر این وضع قرار دارند (۱). در مورد بادهای ایران مطالعات و بررسی‌های علمی زیادی صورت نگرفته است. تنها چند منطقه خاص از جمله دشت قزوین، دره منجیل و اخیراً منطقه اطراف زابل و دیزباد خراسان جهت نصب توربینهای بادی و استحصال انرژی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (۴، ۵، ۱۰). با این حال بطور خلاصه می‌توان گفت که در بعضی نقاط ایران بادهای شدیدی وجود دارد و می‌توان انرژی موجود در آن را مورد بهره‌برداری قرار داد. در ایران یک جبهه باد دائم و گاهی شدید در مناطق آذربایجان، منطقه رودبار، منجیل، تاکستان، شهریار، ورامین و کویر در حرکت است. در چنین مناطقی می‌توان با نصب پروانه‌های بادگیر روی برجهای بلند و استفاده از حرکت دورانی حاصل، برق محدودی ایجاد کرد و با کمک باتری به آن مداوم بخشید. تولید چنین انرژی‌ای برای روستاها بویژه در نقاط دور افتاده بسیار نافع است (۱، ۴، ۶، ۱۲).

به طور کلی توربین‌های بادی به دو نوع محور افقی و محور عمودی تقسیم می‌شوند. توربین‌های بادی با محور افقی نیز به دو دسته توربین‌های با سرعت بالا و توربین‌های با سرعت پایین تقسیم می‌شوند. در توربین‌های بادی با سرعت بالا تعداد پرها معمولاً کم بوده و محدود به یک الی سه پره است. در این

تحقیقات بسیار زیادی در رابطه با توربین‌های بادی با محور افقی انجام شده است (۱، ۱۸، ۲۱، ۲۲، ۲۳) اما تنها در سالهای اخیر طراحی توربین‌های پرپره و کم پره در ایران مورد توجه قرار گرفته و کارهایی در این زمینه انجام شده است که علاقه‌مندان می‌توانند برای جزئیات بیشتر به نمونه‌ای از منابع داده شده مراجعه نمایند (۲، ۳، ۴، ۶، ۸، ۱۰).

شروع یک تحقیق در زمینه انرژی باد معمولاً از مدل‌های کوچک آغاز و در تونل‌های باد انجام می‌شود. انواع و اقسام تونل‌های باد با امکانات از ساده تا پیشرفته ساخته شده و حداقل آنچه که از یک تونل باد انتظار می‌رود تولید جریان بادی یکنواخت با سرعت قابل کنترل است (۱۷).

طراحی ساده توربین‌های پر پره بادی و مناسب بودن این توربینها برای بسیاری از مناطق ایران که دارای باد شدید نمی‌باشند از یکسو و هزینه بالای انتقال برق از نیروگاه‌ها به چاه‌های پراکنده آب بویژه در نقاط دور دست از جمله دلالتی‌اند که زمینه را برای انجام این تحقیق فراهم نمودند. با توجه به بازده کمتر توربینهای پرپره نسبت به توربین‌های کم پره، به عنوان یک تحقیق مقدماتی و آزمایشگاهی، تعیین زاویه و یا محدوده زاویه بهینه پره، متناسب با تعداد آنها همراه با تعیین روند تغییرات در این نوع توربین جهت افزایش بازده و استحصال بهتر انرژی امری ضروری می‌نمود که به عنوان اهداف این پروژه در نظر گرفته شد.

مواد و روش‌ها

کلیه آزمایشها در تونل باد دانشکده هوا فضای دانشگاه امیر کبیر انجام گرفت (شکل ۱) که مشخصات آن به شرح ذیل می‌باشد:

- نوع تونل باد: مدار بسته دهشی
- علامت تجاری: PLINT، ساخت کشور انگلستان، محصول سال ۱۹۹۰
- ابعاد مقطع آزمایش: ۴۶۰×۴۶۰ میلی متر
- موتور: ۲۵kW، ۱۷۵۰ دور در دقیقه
- پنکه (فن): سه فاز (۳۸۰ - ۴۴۰ ولت)، ۵۰ هرتز
- برق ورودی: سه فاز، ۵۰ هرتز، با برق کمکی ۲۴۰ ولت تک فاز

توربین‌ها طراحی پره پیچیده بوده و با توجه به تولید گشتاور کم و دور بالا، بیشتر در مناطقی با سرعت باد نسبتاً زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرند. توربین‌های بادی در سرعت پایین، به دلیل پر پره بودن گشتاور نسبتاً بالایی تولید می‌کنند و بیشتر در مناطقی با سرعت باد متوسط بویژه برای تامین انرژی لازم جهت پمپاژ آب از چاه مورد استفاده قرار می‌گیرند (۳).

در طراحی یک توربین کامل و یا مجموعه‌ای از توربین‌ها عواملی چون سرعت، جهت، پروفیل و مدت باد نقش اساسی را به عنوان داده‌های ورودی ایفا می‌کنند و اندازه‌گیری این عوامل روش‌های خاص خود را دارد (۸). معمولاً مجموعه پرها شامل پره‌ها و فلنج اتصال، مجموعه محفظه اصلی شامل کلاهک، محور اصلی، جعبه دنده، ژنراتور، سیستم ترمز، یاتاقان‌ها و کویلینگ‌ها و مجموعه برج شامل برج اصلی و پی به عنوان اجزاء اصلی توربین محسوب می‌شوند که بسته به شدت باد منطقه با قابلیت تولید توان‌هایی تا بالاتر از ۵۰۰kW نیز ساخته می‌شوند (۸، ۲۵).

طبق قانون بتز^۱ فرضیات زیر در شرایط ایده آل بیشینه ضریب توان (ضریب توان عبارت است از آن مقدار توان باد که به صورت توان الکتریکی یا مکانیکی قابل حصول است) حاصل از سرعت‌باد در توربین‌های محور افقی برابر ۰/۵۹۲۶ است (۱۵، ۲۰):

- روتور توربین بادی ایده آل باشد (دارای بی‌نهایت پره بوده و مقاومتی در مقابل عبور هوا از خود نشان ندهد).

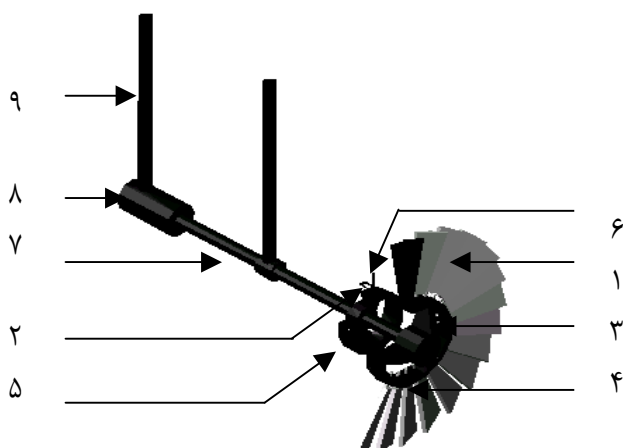
- جهت سرعت باد در تمام نقاط سطح پره‌ها افقی و مقدار آن یکسان باشد.

- جریان هوا تراکم ناپذیر باشد.

- شرایط جریان هوا در تمام سطحی که توسط پره‌ها جاروب می‌شود یکسان باشد.

بنابراین، با توجه به ایده آل بودن فرضیات فوق، تنها نزدیک به ۶۰٪ انرژی موجود در باد از لحاظ نظری قابل استحصال است. لذا کلیه سعی محققین می‌بایست معطوف به تمهیداتی جهت نزدیک‌تر کردن ضریب توان به ضریب نظری شود.

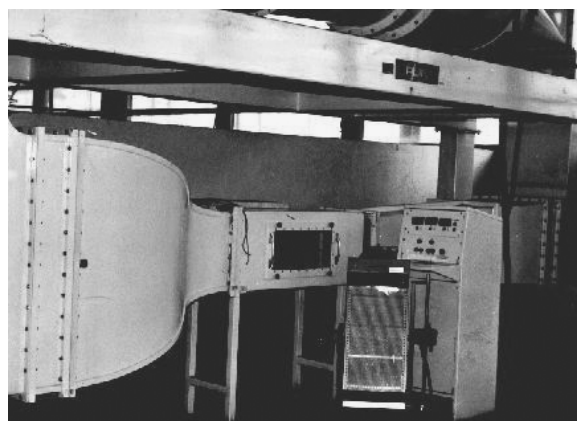
(صلبیت نسبت سطح پره‌ها به سطح جاروب شده است). توربین مدل شده در صلبیت ۱۰۰٪ با تعداد پره‌های ۸، ۱۶ و ۲۴ و با قطر یکسان ۲۵۶ میلی‌متر ساخته شد. پره‌ها برای سادگی، صاف و با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر و از جنس آلومینیوم تهیه شدند (شکل ۲).



شکل ۲ - طرحواره توربین مدل شده و قطعات بکار رفته در آن:
 ۱- پره، ۲- تسمه فلزی شکافدار، ۳- سه شاخه رابط حلقه به محور اصلی، ۴- حلقه اصلی، ۵- حلقه حامل مکانیزم تغییر هماهنگ زاویه، ۶- میله واسط تغییر زاویه، ۷- محور اصلی توربین، ۸- ژنراتور، ۹- میله‌های نگهدارنده توربین به مقطع آزمایش تونل باد.

هر پره روی یک میله فولادی قرار گرفت و کلیه پره‌ها از طریق حلقه‌ای با سه شاخه آلومینیومی به محور اصلی توربین وصل شدند. چون تغییر زاویه پره‌ها به صورت هماهنگ بسیار وقت گیر بود، مکانیزمی جهت تغییر هماهنگ و همزمان پره‌ها طراحی شد (شکل ۲). با چرخش حلقه دوم (قطعه شماره ۵ از شکل ۲) میله‌های نصب شده روی آن که نقش واسط را ایفا می‌کنند، در تسمه‌ای شکافدار (قطعه شماره ۲ از شکل ۲) میله‌های حامل پره‌ها را به طور هماهنگ می‌چرخانند. زاویه چرخش از طریق علامت‌های روی حلقه واسط کنترل می‌شود.

برای تبدیل انرژی باد به انرژی الکتریکی، مجموعه پره‌ها به یک موتور الکتریکی ۱۲ ولت جریان مستقیم که برای پنکه داخلی خودروهای سواری مورد استفاده قرار می‌گیرد متصل شد. از آنجا که آهنربای بکار رفته در استاتور موتور الکتریکی از نوع



شکل ۱- نمایی از تونل باد دانشکده هوا فضای دانشگاه امیر کبیر

ابعاد پره‌های توربین ساخته شده با توجه به محدودیت ابعاد مقطع آزمایش تونل باد (۴۶۰×۴۶۰ میلی‌متر) مدل شد. جهت حذف اثر اغتشاش و لایه‌های مرزی که در یکنواختی سرعت باد تاثیر نامطلوب می‌گذارند، با کسب نظر مسئول آزمایشگاه (۱۳) تنها از مقطع ۲۵۶×۲۵۶ میلی‌متر استفاده شد. با تعیین بیشینه قطر ۲۵۶ میلی‌متر برای پره‌ها، مدل آزمایشگاهی توربین تقریباً با مقیاس ۱ به ۲۰ ساخته شد. در مقیاس واقعی قطر توربین ۲۰/۵ متر خواهد بود که در محدوده مرسوم قرار دارد (۱). پره‌ها در توربین‌های پرپره در مقیاس واقعی، بنا به دلایلی چون میل کردن سرعت دوران نقاط روی پره از مقدار بیشینه در نوک به سمت صفر در مرکز، ایجاد مانع در برابر حرکت باد از میان توربین و نیاز به تقویت و اتصال پره‌ها به یکدیگر، معمولاً تا مرکز دوران ادامه ندارند (البته انواع معدودی که با طراحی آیرودینامیکی و تعداد پره‌های کمتر، پره‌ها تا مرکز دوران کشیده شده باشند نیز وجود دارد). استاندارد خاصی برای نسبت قطر خارجی به قطر داخلی در بررسی‌های به عمل آمده و جداول یافت نشد اما با مراجعه به شکل‌های طرحواره و واقعی این نوع توربین‌ها، محدوده ۲/۳ الی ۳/۸ مشاهده شد (۱، ۲۶، ۲۷). این نسبت در توربین مدل شده برابر ۲/۶ است که نسبتی معقول در محدوده توربین‌های پرپره محسوب می‌گردد.

چون ترکیب فراوانی می‌توان از انواع توربین‌های پرپره داشت، برای مقایسه منطقی‌تر، مبنای داشتن گشتاور بالا گذاشته شد. برای داشتن گشتاور بالا صلبیت^۱ ۱۰۰٪ در نظر گرفته شد

نتایج و بحث

آزمون نرمال روی داده‌های به دست آمده توسط نرم افزار Mini-tab انجام شد و با استفاده از نرم افزار SAS داده‌ها مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. در جدول ۱ نتایج آنالیز واریانس نشان داده شده است. در این تجزیه و تحلیل مشخص شد که اختلاف موجود در بین توان‌های به دست آمده در سرعت‌های مختلف باد و در زوایا و تعداد پره‌های مختلف دارای اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ است. همچنین اختلاف معنی‌داری در همین سطح احتمال در برهمکنش کلیه فاکتورها و در کلیه ترکیب‌ها مشاهده گردید. این موضوع اهمیت کلیه فاکتورها را در اثر گذاری بر متغیر وابسته (توان تولید شده) نشان می‌دهد.

در نمودارهای مربوط به سرعت‌های ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ متر بر ثانیه (شکل‌های ۴ الی ۶) مشخص شد که توان تولید شده با افزایش سرعت باد افزایش یافته و توان بیشینه در محدوده زاویه پره ۲۰ الی ۳۰ درجه اتفاق خواهد افتاد. البته در نمودار مربوط به سری ۸ پره و در سرعت باد ۷/۵ متر بر ثانیه، بیشینه توان به طور حتم در محدوده زاویه ۱۰ الی ۲۰ درجه قرار دارد. به دلیل محدودیت‌های مالی و امکانات ساخت، دقت تنظیم زاویه پره‌ها در حد ۱۰ درجه بود و در نتیجه امکان تعیین نقطه بیشینه ممکن نشد و به ذکر محدوده زاویه برای بیشینه توان قناعت گردید. بطور حتم اگر دقت تنظیم زاویه پره‌ها در حد ۵ درجه و یا کمتر بود، توان بیشینه با تنظیم پره‌ها در زاویه‌های کوچکتر، دقیق‌تر به دست می‌آمد و محدوده زاویه کوچکتری ذکر می‌شد.

جدول ۱- تجزیه واریانس توان تولید شده توسط توربین در سطوح

مختلف سرعت، زاویه و تعداد پره

منابع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	احتمال
زاویه	۴	۰/۵۱۵۵	۰/۱۲۸۹	۰/۰۰
سرعت	۲	۰/۳۶۵۰	۰/۱۸۲۵	۰/۰۰
تعداد پره	۲	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰
زاویه×سرعت	۸	۰/۰۰۹۹	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰
زاویه×تعداد پره	۸	۰/۰۵۲۰	۰/۰۰۶۵	۰/۰۰
سرعت×تعداد پره	۴	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰
زاویه×سرعت×تعداد پره	۱۶	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰

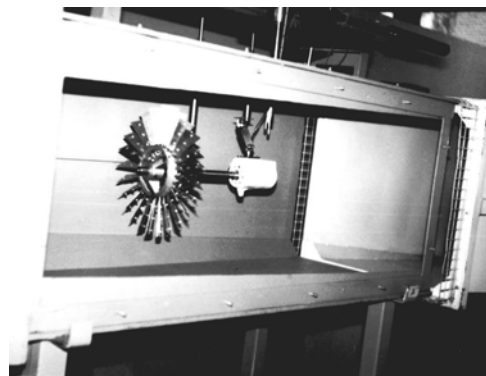
دائمی بود، تبدیل این موتور به یک ژنراتور میسر گردید. از طریق نصب یک مقاومت در مدار الکتریکی، ولتاژ و شدت جریان قابل اندازه‌گیری بود که در نهایت با حاصلضرب آنها توان تولید شده (هر چند کم) جهت مقایسه مورد استفاده قرار گرفت.

طرح آماری اجرا شده آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار با فاکتورهای ذیل بود:

- سرعت باد در سه سطح ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ متر بر ثانیه
- زاویه پره در پنج سطح ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه
- تعداد پره در سه ترکیب ۸، ۱۶ و ۲۴ پره ای

لازم به ذکر است که در ابتدا سرعت باد ۵ متر بر ثانیه نیز جزو سطوح سرعت باد در نظر گرفته شده بود که به دلیل وجود ارتعاش شدید و پدیده تشدید^۱ در توربین مدل شده در تونل باد، از داده‌های مربوطه صرف نظر گردید. ضمناً دلیل انتخاب این سرعت‌ها این بود که در محدوده سرعت‌های متوسط باد قرار داشتند (۲، ۳، ۴، ۵).

باد سنج مورد استفاده از نوع سیم داغ همراه با حسگر دما با مارک فلومستر^۲ محصول شرکت دانتک^۳ بود که قابلیت اندازه‌گیری سرعت را از ۰/۱ الی ۳۰ متر بر ثانیه و دما را از ۱۵ الی ۸۵ درجه سلسیوس دارا بود. احتمال خطا در قرائت سرعت در محدوده سرعت‌های آزمایش ۲/۵±٪ و دقت در قرائت دما در محدوده دماهای آزمایش ۵/۵±٪ درجه سلسیوس بود. با توجه به ثابت بودن دما در کلیه آزمایشها، اصلاحیه‌ای در داده‌های سرعت انجام نگرفت. شکل ۳ نحوه قرارگیری مدل را در تونل باد نشان می‌دهد.



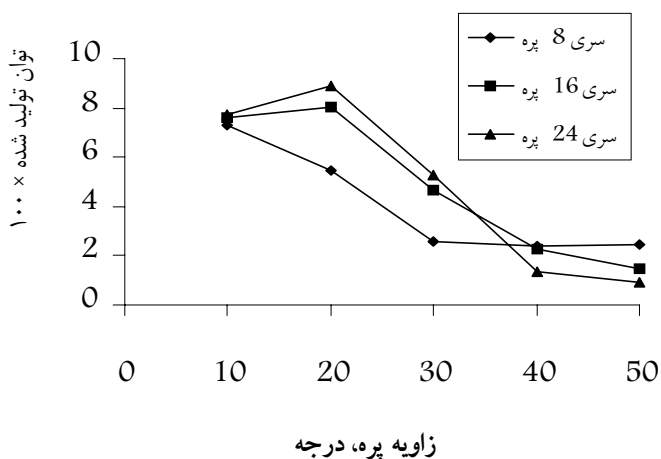
شکل ۳- نحوه استقرار مدل در تونل باد

1. Resonance
2. FlowMaster
3. Dantec

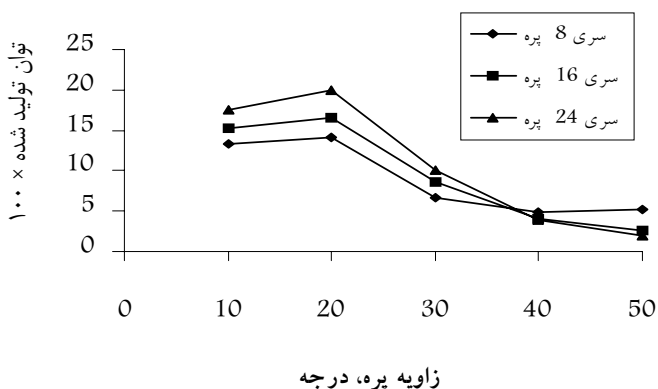
در کلیه نمودارها تا زاویه‌ای نزدیک به ۲۰ درجه، افزایش توان با افزایش تعداد پره همراه است. در زوایای بالاتر، این نتیجه برعکس می‌شود یعنی با افزایش تعداد پره، توان کاهش می‌یابد. در شرایط آزمایش عمده‌ترین دلیل این امر پدیده ایست موسوم به مجزا شدن^۱. در این پدیده به دلیل کمتر شدن پهنای پره‌ها در مجموعه ۲۴ پره‌ای نسبت به ۱۶ پره‌ای و ۱۶ پره‌ای نسبت به ۸ پره‌ای، در زوایای بالاتر، جریان هوا زمان لازم را برای طی کردن مسیر روی پره ندارد و از روی آن (قبل از طی شدن مسیر) کنده می‌شود. لذا پیوستگی جریان روی پره به تدریج از بین می‌رود و این عدم پیوستگی جریان موجب عدم وجود اختلاف اندازه حرکت جریان در "ورود به - خروج از" پره را به دنبال دارد. در نتیجه، نیروی اصلی وارد بر پره‌ها که ناشی از وجود اختلاف اندازه حرکت جریان هوا روی پره‌هاست وجود نخواهد داشت (مجموعه پره‌ها آهسته‌تر می‌چرخند). از پدیده مجزا شدن می‌توان برای جلوگیری از فشار بیش از اندازه به توربین و ساختمان حامل استفاده نمود و با تغییر زاویه پره‌ها باد را تقریباً بدون استخراج انرژی و بدون هیچ مقاومت قابل ملاحظه‌ای از میان پره‌ها عبور داد.

از طرف دیگر، شکل‌های ۴ الی ۶ بیانگر این موضوعاند که برای دسترسی به توان مشابه، در صورتی که پره در زاویه‌ای قبل از ۴۰ درجه و بعد از زاویه بهینه برای کسب بیشینه توان، قرار داشته باشد، می‌توان از توربین مشابه با تعداد پره‌های کمتر استفاده کرد. تعداد کمتر پره‌ها هزینه‌های تولید توربین را کاهش می‌دهد. البته باید انتظار داشت که در شرایط واقعی و داشتن پره‌های پیچ دار، محدوده زوایایی که نتایج مشابه با نتایج حاصل از این تحقیق داشته باشند، فرق کند. اما انتظار می‌رود که روند و نحوه تفسیر نتایج تا حدودی یکسان باشد. تجزیه و تحلیل و تفسیر دقیقتر نتایج باید با تحلیل ابعادی و در نظر گرفتن نسبت مدل با اندازه واقعی انجام گیرد. در طراحی یک توربین، بیشینه سرعت باد بیشتر در رابطه با استقامت سازه و قطعات مد نظر قرار می‌گیرد و بیشتر از جهت و سرعت غالب باد که از گلبادهای هر منطقه به دست می‌آید استفاده می‌شود.

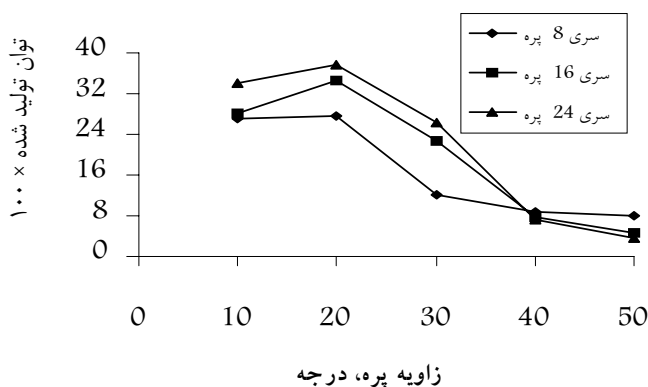
1. Separation



شکل ۴- توان تولید شده توسط توربین در سرعت باد ۷/۵ متر بر ثانیه



شکل ۵- توان تولید شده توسط توربین در سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه



شکل ۶- توان تولید شده توسط توربین در سرعت باد ۱۲/۵ متر بر ثانیه

بنابراین چنانچه در منطقه‌ای نیاز به استفاده از توربین‌های با صلیبیت ۱۰۰٪ برای داشتن گشتاور بالا مد نظر باشد، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که برای صرفه‌جویی اقتصادی می‌توان از توربین‌هایی با تعداد پره کمتر برای تولید توان یکسان استفاده نمود. مزیت دیگر این کار نیاز به سرعت کمتر باد برای

با نتایج به دست آمده، ایده طراحی مکانیزمی خودکار جهت تغییر هماهنگ زاویه پرها چه برای استحصال بیشینه توان در سرعت‌های مختلف باد و چه برای محافظت از ساختمان توربین در سرعت‌های بسیار بالای باد تقویت می‌گردد.

سپاسگزاری

نتایج این تحقیق مستخرج از طرح پژوهشی به شماره ۷۱۹/۳/۵۴۲ مورخ ۸۱/۱/۱ می‌باشد که با پشتیبانی مالی معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تهران به انجام رسید. بدین وسیله از آن حوزه مراتب قدردانی و تشکر خود را ابراز می‌دارد.

راه‌اندازی مجموعه پره‌های توربین با تعداد پره‌های کمتر است (با توجه به داشتن لختی یا اینرسی کمتر مجموعه پرها). از اهداف این تحقیق مقایسه بین نتایج تیمارهای مختلف و روند تغییرات بود که به دلیل محدودیت ابعاد تونل باد به ابعادی مشخص (و در واقع تحمل شده) برای مدل دست یافتیم. برای داشتن نتایجی دقیقتر و بطور کامل قابل مقایسه با نتایج واقعی، در صورتی که امکانات و ابعاد تونل باد عامل محدود کننده‌ای به حساب نیایند، می‌بایست از روش آنالیز ابعادی استفاده شود که در این صورت ساخت پرها نیز با پیچش مشخص طبق استانداردهای موجود الزامی خواهد بود.

REFERENCES

مراجع مورد استفاده

۱. ثقفی، م. ۱۳۷۱. انرژی باد و کاربرد آن در کشاورزی. انتشارات دانشگاه تهران.
۲. جعفری، ع. ۱۳۷۷. طراحی، ساخت و آزمایش توربین مولد الکتریسیته با قدرت ۳ کیلو وات. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز.
۳. رحمانیان، م. ۱۳۷۸. طراحی و بررسی ساخت توربین بادی پره برای پمپ کردن آب. پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی اصفهان.
۴. رستمی، م. ۱۳۸۰. نیروگاه‌های بادی و بررسی امکان کاربرد آن در ایران. پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد.
۵. روابط عمومی. ۱۳۸۰. سیستان، خاستگاه آسیابهای بادی در جهان. دانشگاه زابل.
۶. شمس آبادی، ح. ۱۳۷۳. بررسی و طراحی توربین بادی بهینه برای پمپاژ آب در مناطق بادخیز ایران. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس.
۷. شیرین پور، م، ع. محمود مصلحی فرد. ۱۳۶۷. انرژی. انتشارات نیما.
۸. عامری، م. ۱۳۷۳. بررسی و مقایسه سیستمهای مختلف مولدها و توربینهای بادی. مرکز تحقیقات نیرو(متن).
۹. عامری، م. ۱۳۷۴. شناسایی روشهای اندازه گیری مختصات باد و ابزارهای آنها. مرکز تحقیقات نیرو(متن).
۱۰. عامری، م. ۱۳۷۴. ارزیابی فنی - اقتصادی توربین های بادی و تعیین محل و ظرفیت نیرو گاه. مرکز تحقیقات نیرو(متن).
۱۱. فدایی، د. ۱۳۷۶. کاربرد انرژیهای نو در زندگی. بهسامان (بهینه سازی مصرف انرژی) - موسسه کتاب همراه.
۱۲. فکوهی، ن. ۱۳۷۴. سوخته‌های فسیلی و انرژیهای نو. بهسامان (بهینه سازی مصرف انرژی) - موسسه کتاب همراه.
۱۳. گیلی، ح. ۱۳۸۰. درس نامه آزمایشگاه آیرودینامیک، دانشکده هوا و فضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
۱۴. والی پور، ع. ۱۳۶۹. انرژی - توان و جامعه. جامعه مشاوران ایران.
15. Ackerman, L. T. 2000. Wind energy technology and current status: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 4:315-374.
16. Ayensu, A. 1997. Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. Solar Energy, 59(406): 121-136.
- 17-. Farooq, M., D. Wulfson, & R. J. Ford. 1996. Wind Tunnel For Spray Drift Studies. Canadian Agricultural Engineering. Vol 38 (4): 283-289.

18. Fernandez, R. D., R. J. Mantz, & P. E. Battatotto. 2003. Sliding mode control for efficiency optimization of wind electrical pumping systems. *Wind Energy*, 6(2): 161-178.
19. Flavin, C. 1996. *Power Shock: The Next Energy Revolution*. World Watch Institute. Washington. pp:1-13.
20. Gustafson, R.J. 1988. *Fundamentals of Electricity for Agriculture*. 2nd ed. An ASAE Textbook.
21. Lab Report.1998. Optimizing Windmill Blade Efficiency(Electronic document at <http://www.west.net/vcsf/windmill.html>).
22. Musial, W. D. & S. M., Hock. 1995. *Wind Energy*. The American Society of Mechanical Engineers.
23. Pandey, G. N. 1997. *A Text Book On Energy Systems Engineerng*. VLKAS Publishing House PVT LTD. Delhi.
24. Spiegel, H. J. & A. Gruber. 1983. *From Weather Vanes to Satellites*. John Wiley & Sons Inc.
25. Walker, J. F. & N. Jenkins. 1998. *Wind Energy Technology*. John Wiley & Sons Inc.
26. Windmills. 2003. JL Company. www.pondwindmills.com, USA.
27. WindPower . 2003. Guided Tour. www.WindPower.org, Denmark.

A Laboratory Study of the Effects of Angle and Number of Blades on Power Extraction in Windmill Turbines

A. KEYHANI¹, M. R. GOLZARIAN² AND R. ALIMARDANI³

**1, 2, 3, Assistant Professor, Former Graduate Student and Associate Professor,
Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran**

Accepted. May. 26, 2004

SUMMARY

Limited, expensive and nonrenewable fossil energy resources have forced man to seek and exploit other and new forms of God granted energies. Wind energy, if employed through more efficient methods is one of such energies. Simplicity in design and suitability of windmill turbines for many parts of Iran where no intense wind is available along with, high cost of electricity transmission from power plants to scattered water wells, especially in remote areas, were among reasons to have this study initiated. Considering the lower efficiency of windmill turbines as compared to propelled ones, an introductory laboratory study was conducted to determine the optimized range of blade angle in relation to the number of blades in windmill turbines with close to 100% solidity lead to increase in efficiency and better exploitation of energy. A factorial experiment in a completely randomized design of three replications with three treatments of wind speed in three levels (7.5, 10, 12.5 m/s), blade angle in five levels (10, 20, 30, 40 and 50 degrees) and three levels of blade number (8, 16 and 24) was carried out. Power generated by the modeled turbine when made to operate in the wind tunnel of the Faculty of Aerospace Engineering lab in Amir Kabir University was recorded and analyzed. All blade sets were built flat from aluminum with an outer diameter of 256 mm. Analysis of variance showed that, at probability level of 1%, all factors including interaction combinations significantly affected on the produced power. For all three sets of blades, in the range of 20-30 degree blade angles the maximum power was produced. Also, for all sets of blades, up to near 40 degrees, the increase in produced power was accompanied by increase in number of blades, but at higher angle, settings, inverse results were obtained. Also, it was revealed that one can obtain a similar power with lower number of blades if the blade angle is set next after the optimum angle but before the angle in which the separation phenomenon (in this case around 40 degrees) occurs. One should expect different results in real situations where blades take their real dimensions and are not made flat, but it is expected that the trend and interpretation of results would follow the same, although a more detailed investigation is needed through incorporating simulation and dimensional analysis methods.

Key words: Windmill turbine, Wind power, Solidity, Blade angle, Separation phenomenon, Efficiency.