

بررسی اثر زاویه حمله و نسبت مخروطی پره بر توان تولیدی در توربین‌های بادی محور افقی سه پره با پره‌های مستوی

کوروش عزت‌الهی¹، مرتضی الماسی²، علی محمد برقعی³، سعید مینایی⁴

چکیده

از آن جا که ایران به دلیل مجاورت با دریا و همچنین وجود فلات‌های البرز و زاگرس، کشوری بادخیز محسوب می‌شود، دور از ذهن نیست که در آینده نزدیک استفاده از فناوری انرژی باد در کشور توسعه چشم‌گیری یابد. در این پژوهش تعیین بهترین زاویه پره و نسبت مخروطی پره یکی از راه‌های مناسب جهت افزایش توان تولیدی مطرح شده است. ابتدا سه مدل توربین‌های بادی سه پره ساخته شد. تمامی پره‌ها دارای ضخامت 20% و حداکثر قوس 6% از طول وتر می‌باشند. این مدل‌ها در مقابل سیستم مکانیزم تولید باد قرار گرفتند. با چرخش پره‌ها، میزان ولتاژ و جریان تولیدی توسط ولت‌متر و آمپر متر اندازه‌گیری شد و از حاصل ضرب ولتاژ و شدت جریان، میزان توان تولیدی به دست آمد. تمامی داده‌های برداشت شده از آزمایش، با استفاده از نرم‌افزارهای *Mstat - C* و *Excel* و روش آماری آزمون دانکن مورد بررسی قرار گرفتند. تجزیه و تحلیل داده‌ها روشن ساخت که اختلاف موجود در بین توان-های به دست آمده از آزمایش در سرعت‌های باد در سه سطح (8، 10 و 12 m/s)، زاویه حمله پره در پنج سطح (5، 10، 15، 20 و 25 درجه) و نسبت مخروطی در سه سطح (0%، 50% و 100%) از طول وتر معنی‌دار است. آزمون دانکن، تعیین کرد که در مدل توربین بادی سه پره، از بین پنج سطح زاویه حمله پره، زاویه 15 درجه با میانگین توان 0/8612 وات، از بین سه سطح نسبت مخروطی پره، نسبت 100% با میانگین توان 0/668 وات و از بین سه سطح سرعت باد، سرعت 12 m/s با میانگین توان 1/078 وات بیش-ترین توان تولیدی را داشته است. همچنین تعیین شد مدلی که نسبت مخروطی آن 100% از طول وتر است در زاویه حمله 15 درجه و سرعت باد 12 m/s نسبت به دو مدل دیگر بیش‌ترین توان تولیدی را داشته است که برابر با 2/304 وات در سطوح یاد شده است.

واژه‌های کلیدی: توربین بادی، زاویه حمله، نسبت مخروطی پره، سرعت باد، توان و پره‌های مستوی

1. استادیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان
2. استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران، اهواز
3. استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران
4. استادیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

مقدمه

پروژه‌های تحت عنوان بررسی فنی و طراحی مقدماتی یک نیروگاه بادی برای مناطق مختلف ایران مورد بررسی قرار دادند. در این پروژه ابتدا لزوم استفاده از انرژی‌های نو بجای انرژی‌های فسیلی و به‌طور کلی انرژی‌های تجدید پذیر بجای انرژی‌های تجدید ناپذیر مورد بحث و بررسی قرار گرفته، و نهایتاً به این مسئله توجه شده است که انرژی باد به‌عنوان یک انرژی تجدید پذیر بایستی مورد توجه قرار گیرد تا از این نیروی خدادادی به نحو احسن استفاده شود (برنگی، 1375).

مقطع آیرودینامیکی

ایرفول¹ یک مقطع خاصی است که در صورت عبور هوا از اطراف آن با تولید اختلاف فشار در بالا و پایین مقطع، نیرویی را که نیروی آیرودینامیکی نام دارد تولید می‌کند. این مقطع به‌طور کلی بشکل دوک است که قسمت ضخیم‌تر آن در جلو قرار می‌گیرد. هنگامی که جریان هوا از بالا و پایین ایرفول عبور می‌کند، در سطح بالای ایرفول غلظت هوا کم بوده و سرعت افزایش یافته و فشار کاهش می‌یابد. در سطح پایین متقابلاً غلظت افزایش یافته، سرعت کاهش یافته و فشار افزایش می‌یابد. بنابراین ایرفول تولید اختلاف فشار می‌نماید. از این فشارها می‌توان انتگرال گرفته و تبدیل به یک نیرو نمود که آن را نیروی آیرودینامیکی می‌نامند. لذا مهم‌ترین سطوح طراحی بررسی و مورد تشریح قرار می‌گیرد. لبه حمله: اولین نقطه‌ای از مقطع عمودی که قبل از هر قسمت دیگر با هوا برخورد می‌کند. شکل لبه حمله بر حسب این که ایرفول برای سرعت‌های زیاد یا متوسط مورد استفاده قرار می‌گیرد، متفاوت است.

لبه فرار: آخرین نقطه‌ای از مقطع عمودی ایرفول که با هوا در تماس است یا به‌عبارتی، نقطه‌ای که هوا ایرفول را ترک می‌کند.

وتر: خط مستقیمی است که لبه حمله را به لبه فرار متصل می‌نماید. اندازه این خط بسیار مهم است و تمام اندازه‌های مهم مقطع عمودی را بر حسب درصدی از طول وتر بیان می‌کنند.

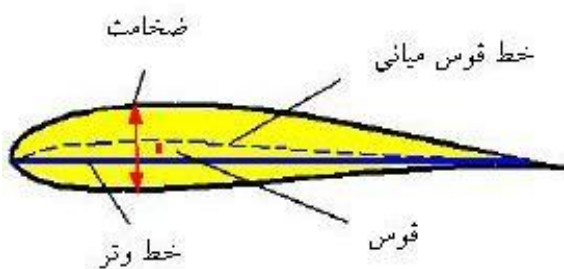
طبق مطالعات اولیه ظرفیت انرژی باد ایران $6500 MW$ است. چنان‌چه بررسی و مطالعات وسیع‌تری انجام شود، مشخص خواهد شد که ظرفیت بالقوه این انرژی در کشور به مراتب بیش از رقم یاد شده است (ثقفی، 1371). با توجه به این‌که انرژی باد از جمله انرژی‌های تجدید پذیر است و به علت گستردگی و اقتصادی بودن و این‌که در مقایسه با دیگر انرژی‌های تجدید پذیر در ابعاد وسیع‌تری مورد استفاده و بهره‌برداری قرار گرفته است عملاً از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است که می‌تواند به عنوان ضرورت‌های خاص انجام پژوهش مطرح شود (والکر، 1998).

پروژه طراحی، ساخت و آزمایش توربین بادی محور افقی سه پره طراحی و ساخته شد. این توربین توانایی تولید برقی با توان $3 kw$ در بادی با سرعت $8 m/s$ را دارا بود. با استفاده از چنین توربینی، در منطقه‌ای با وزش باد متوسط، به راحتی می‌توان نیاز یک یا چند خانوار روستایی به انرژی الکتریکی را برآورده ساخت (جعفری، 1377).

پروژه‌های تحت عنوان بررسی و طراحی توربین بادی بهینه برای پمپاژ آب در مناطق بادخیز ایران اجرا شد. در این پژوهش یک آسیاب بادی محور عمودی سه پره با مقطع ایرفول متقارن با استفاده از مشخصات $NACA0012$ طراحی شد که پره‌ها توسط 6 بازو (3 بازو در بالا و 3 بازو در پایین پره‌ها) دو به دو تحت زاویه 120 درجه حول محور اصلی قرار می‌گرفتند (شمس آبادی، 1373).

پروژه‌های تحت عنوان محاسبه، طراحی و تست توربین بادی $10 kw$ اجرا شد. در این پروژه پس از تعیین توربین بادی محور افقی به عنوان توربین مطلوب، اقدام به طراحی مفصل و دقیق آیرودینامیکی پره‌های توربین بادی $10 kw$ شد. در این راستا، در ابتدا آیرودینامیک توربین‌های محور افقی به‌طور مفصل مورد مطالعه قرار گرفت و سپس، گرداب‌های جریان در پشت روتور و اثرات آن‌ها در روابط آیرودینامیکی حاکم بر روتور و مشخصه‌های هندسی در مقاطع مختلف پره‌ها مورد مطالعه قرار گرفت (سلیمانی، 1377).

وتر ممکن است در تمام طول پره ثابت باشد و یا این که بتدریج تغییر کند (نسبت مخروطی) و پره ممکن است مستوی یا در امتداد محور طولی تاب داشته باشد یا اصطلاحاً پیچیده باشد. خط مستقیمی است که لبه حمله را به لبه فرار متصل می‌نماید. اندازه این خط بسیار مهم است و تمام اندازه‌های مهم مقطع عمودی را بر حسب درصدی از طول وتر بیان می‌کنند. مشخصات یک ایر فول در شکل 1 نشان داده شده است (بی نام، [Http://club.cycom.co.uk/windturbinedesign.html](http://club.cycom.co.uk/windturbinedesign.html)).



شکل 1: مشخصات یک ایر فول

نحوه کار توربین بادی

به‌طور کلی وقتی یک مولد انرژی بادی به‌وسیله نیروی باد به حرکت درمی‌آید قدرت به‌وسیله روتور آن به خارج داده می‌شود. نیروی باد دو نیروی برا و پسا بر توربین ایجاد می‌نماید، درحقیقت رشته‌های هوا هنگام برخورد با لبه پره توربین بادی که به فرم مخصوصی ساخته شده‌اند، هنگام خروج در قسمت بالا و در قسمت پایین اندکی تغییر مسیر داده و سپس به‌هم می‌پیوندند به نسبت فرم پره توربین، جریان هوایی که از بالای آن می‌گذرد مسیر طولانی‌تری را طی کرده در نتیجه رقیق گشته و روی پره تولید مکش می‌کند و برعکس آن جریان هوایی که از زیر پره می‌گذرد مسیر کمتری داشته و در نتیجه غلیظ بوده و به پره فشار وارد می‌آورد. نیروی برا سبب چرخش پره‌های توربین می‌گردد و تولید قدرت می‌کند و نیروی پسا که عمود بر سطح دایره گردش پره‌ها است به‌وسیله پره‌های نگهدارنده توربین خنثی می‌شود. در طراحی توربین‌های سه پره سعی می‌شود که نیروی رانش کمتر شود. شکل‌های 2 و 3 (خاندوزی، 1375).

خط متوسط مقطع: مکان هندسی نقاطی که در وسط فاصله منحنی فوقانی و تحتانی قرار دارد. در صورتی که خط متوسط ایر فول به صورت یک خط صاف درآید، ایر فول را متقارن و در غیر این صورت به آن ایر فول نامتقارن گویند.

زاویه حمله: زاویه حاده‌ایست که بین امتداد وتر و باد نسبی به‌وجود می‌آید.

نسبت مخروطی: نسبت طول وتر در نوک به طول وتر در ریشه پره را نسبت مخروطی (I) گویند و این مقدار بین $(0 \leq I \leq 1)$ متغییر است. هرچه نسبت مخروطی کاهش یابد وزن پره کاهش می‌یابد، لذا مسائل سازه‌ای کمتری مورد توجه است.

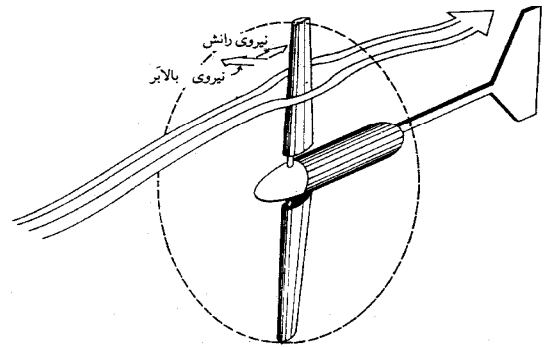
ضخامت ماکزیمم: حداکثر فاصله عمودی بین انحنای بالایی و تحتانی پروفیل را ضخامت ماکزیمم گویند. ضخامت ماکزیمم بسته به طرح ایر فول معمولاً برای پره‌های توربین بادی در فاصله 20% الی 30% از طول وتر می‌باشد و سبب پایداری و محکمی پره می‌شود.

قوس: بیش‌ترین قوسی که خط وتر با خط متوسط مقطع می‌سازد، قوس نامیده می‌شود (صدرایی، 1376).

به مجموعه پره‌ها و تویی وسط آن‌ها روتور گفته می‌شود. یک توربین بادی محور افقی به‌طور خلاصه متشکل از تعدادی پره می‌باشد که به‌طور شعاعی در اطراف یک محور که موازی با سمت باد قرار می‌گیرد، نصب شده‌اند و بدین ترتیب روتوری را تشکیل می‌دهند که عمود بر جهت باد دوران می‌کند (خاندوزی، 1375). معمولاً روتور توسط یک برج در ارتفاع مناسبی نسبت به زمین قرار می‌گیرد و البته پیش‌بینی‌های لازم برای هم‌جهت شدن امتداد محور با جهات مختلف باد و هم‌چنین برای کنترل سرعت آن انجام می‌شود و قدرت جذب شده توسط این روتور مستقیماً و یا توسط یک سیستم مکانیکی به ماشینی که قرار است رانده شود منتقل می‌گردد. پره‌ها ممکن است متشکل از قابی باشد که توسط یک پوسته نازک و مناسب پوشانده شده باشد. تعداد پره‌ها ممکن است بین 2 تا 12 متغییر باشد (بی نام، [Http://www.windstuffnow.com/main/wind.html](http://www.windstuffnow.com/main/wind.html)). طول



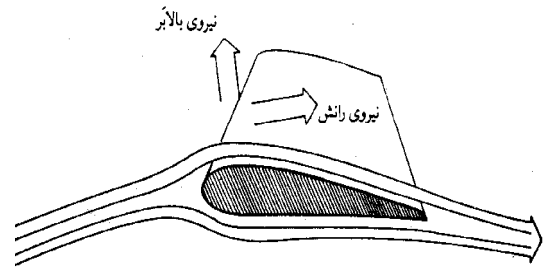
شکل 4: اجزاء مختلف مدل ساخته شده



شکل 2: نحوه تولید نیروی برا و پسا



شکل 5: بادسنج پروانه‌ای دیجیتالی پره



شکل 3: نیروهایی که روی پره توربین بادی اثر می‌کند

در این طرح 3 مدل از پره‌های توربین بادی سه‌پره (مدل اول با نسبت مخروطی 0% از طول وتر، مدل دوم با نسبت مخروطی 50% از طول وتر و مدل سوم با نسبت مخروطی 100% از طول وتر)، که شامل 9 عدد پره می‌باشد با توجه به پارامترهای یاد شده ساخته شد. تمامی پره‌ها دارای ضخامت حداکثر 20% از طول وتر، حداکثر قوس 6% از طول وتر، طول وتر 5/5 cm، طول پره 30 cm و از جنس چوب (چوب روسی) می‌باشند. دلایل انتخاب این اعداد به‌خاطر راحتی ساخت پره‌ها است، اگر از اعداد کوچک‌تری استفاده می‌شد خطای ساخت در پره‌ها افزایش می‌یافت و نتیجه مطلوبی حاصل نمی‌شد. در ساخت پره‌ها می‌توان از سطوح بیشتری استفاده کرد اما به‌دلیل افزایش تعداد سطوح مراحل انجام آزمایش پیچیده‌تر می‌شد و بررسی اثر متقابل پارامترها به‌سادگی امکان‌پذیر نبود. مشخصات پره‌ها با توجه به خصوصیات ساخت آن‌ها عبارتند از:

- پره با ویژگی‌های نسبت مخروطی در سه سطح (صفر، 50% و 100% از طول وتر) که در شکل‌های 6، 7، 8 و 9 نشان داده شده است.

اهدافی که در این پژوهش نهفته است عبارتند از:

- تعیین بهترین سطح زاویه حمله پره
 - تعیین بهترین سطح نسبت مخروطی پره
- که با تعیین جایگاه موثر این سطوح، می‌توان به بهبود توان تولیدی در توربین‌های بادی کم‌پره با پره‌های مستوی¹ رسید.

مواد و روش‌ها

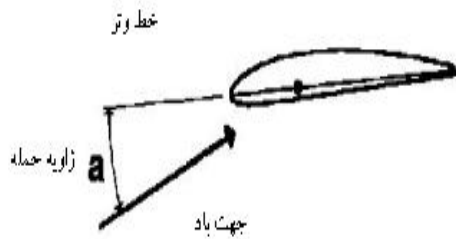
ساخت مدل

نمونه توربین بادی ساخته شده در شکل 4 نشان داده شده است. این نمونه پره، ژنراتور الکتریکی، تویی، محور یا روتور، تسمه لاستیکی، بلبرینگ، شاسی یا برج، مدار الکتریکی، سیستم افزایش دور می‌باشد.

بادسنج²

در این تحقیق بادسنج پروانه‌ای دیجیتالی مدل (Lutron AM-4200) ساخت کشور تایوان با محدوده اندازه‌گیری 0/8 تا 30 متر بر ثانیه مطابق شکل 5 مورد استفاده قرار گرفت.

1. Plane-form
2. Anemometer



شکل 10: زاویه حمله پره

ژنراتور الکتریکی

در این پژوهش از یک ژنراتور (دینام) دوچرخه (کوهستان)، 6 ولت مطابق شکل 11 استفاده شد.



شکل 11: ژنراتور (دینام) 6 ولتی استفاده شده در مدل توربین بادی

سیستم افزایش دور ژنراتور

در این سیستم از دو پولی به ترتیب با قطرهای 1 و 15 cm که اولی به سر ژنراتور و دومی به انتهای محور روتور متصل شده است که بدین ترتیب دور ژنراتور 15 مرتبه افزایش می‌یابد. با توجه به این که راندمان ژنراتور کمی پایین بود به‌ناچار می‌بایست دور افزایش می‌یافت تا در مدار الکتریکی لامپ 3 ولتی به اندازه کافی روشنایی پیدا می‌کرد. با ساخت پولی‌های مختلف با قطرهای متفاوت، قطر 15 cm برای کار انتخاب شد که در شکل‌های 4 و 11 نشان داده شده است.

توپی

توپی در این پژوهش برای مدل 3 پره ساخته شد. روتور به داخل مرکز توپی از طریق پیچ‌های جانبی آلن متصل شد. بر روی توپی محل‌هایی برای قراردادن پره وجود دارد که با زاویه 120 درجه تعبیه شده است و توپی ساخته شده از جنس آلومینیم می‌باشد. با توجه به این که آلومینیم فلزی سبک است مناسب کار بود. در ابتدا توپی از جنس چوب روسی ساخته شد اما به دلیل



شکل 6: پره با نسبت مخروطی 0% از طول وتر



شکل 7: پره با نسبت مخروطی 50% از طول وتر



شکل 8: پره با نسبت مخروطی 100% از طول وتر



شکل 9: تمامی پره‌ها با 3 نسبت مخروطی

بررسی اثر زاویه حمله و نسبت مخروطی پره بر توان تولیدی در توربین‌های بادی ...

با نصب شبکه یکنواخت کننده جریان باد، سرعت باد به‌طور تقریباً یکسان در فواصل مشخصی از شبکه یکسان شد. جهت تعیین سرعت باد، مدل در سه وضعیت مختلف در مقابل مکانیزم سرعت باد قرار داده شد که عبارتند از:

- در فاصله 35 cm از شبکه سرعت 12 m/s
- در فاصله 68 cm از شبکه سرعت 10 m/s
- در فاصله 93 cm از شبکه سرعت 8 m/s

روش کار

برای اندازه‌گیری سرعت باد از وسیله‌ای به نام بادسنج استفاده شد. حس‌گر موجود در دسته بادسنج، به‌منظور اندازه‌گیری سرعت باد مورد استفاده قرار گرفت. متغیرهای مستقل این آزمایش در جدول 1 عبارتند از:

جدول 1: متغیرهای مستقل آزمایش

سطوح	سطوح					α	β
	5	4	3	2	1		
1	-	-	50%	40%	30%	ن-م	1
2	25	20	15	10	5	ز-پ	2
3	-	-	12	10	8	س-ب	3

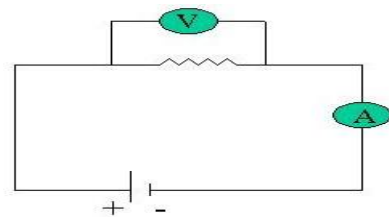
ن-م = نسبت مخروطی، درصدی از طول وتر.
 ز-پ = زاویه پره (درجه)
 س-ب = سرعت باد (متر بر ثانیه)

برای اندازه‌گیری توان خروجی مدل‌ها در سرعت‌های مختلف باد، ابتدا توسط ژنراتور مذکور نیروی مکانیکی 3 مدل به انرژی الکتریکی تبدیل گردید و سپس توسط یک مدار الکتریکی میزان انرژی دریافتی در واحد زمان (که همان توان می‌باشد) اندازه‌گیری شد. با چرخش روتور جریانی مستقیم از دو سیم خروجی دینام گرفته شد. از دو سر مولد الکتریسیته، ولتاژ به-سادگی به‌دست آمد. اما ولتاژ به‌تنهایی کارساز نیست و برای اندازه‌گیری توان بایستی جریان یا آمپر نیز اندازه‌گیری شود و با حاصل ضرب جریان در ولتاژ، توان به‌دست آمده و جریان در صورتی به‌دست می‌آید که مصرف‌کننده‌ای در مدار وجود داشته باشد. لذا از یک

باز و بسته کردن پره‌ها روی آن، پره شل می‌شد و کیفیت کار پایین می‌آمد (شکل 1).

مدار الکتریکی

جهت بدست آوردن میزان توان تولیدی از مدار ساده‌ای که در شکل 12 نشان داده شده است استفاده شده است. در این مدار از یک لامپ 3 ولتی به عنوان مقاومت استفاده شده و محل قرار گرفتن آمپر متر و ولت‌متر که به ترتیب در مدار بصورت سری و موازی قرار می‌گیرند تعیین شده است.



شکل 12: مدار الکتریکی مورد استفاده در مدل

مکانیزم تولید باد

در این پژوهش برای نیل به 3 سرعت باد مورد آزمایش، سیستم تولید باد، طراحی و ساخته شد. با توجه به این‌که هدف از این پژوهش ساخت سیستم مکانیزم تولید باد نبود و هم‌چنین کمبود امکانات آزمایشگاهی، استفاده از تونل باد امکان‌پذیر نبود لذا طراحی سیستم مکانیزم تولید باد با سعی و خطا انجام شد. این سیستم شامل قسمت‌های زیر می‌باشد (شکل 13):

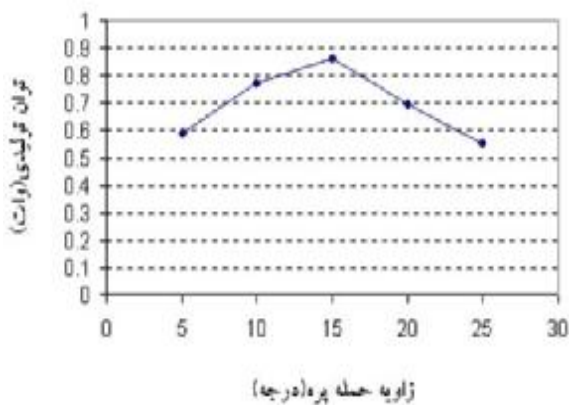
الکتروموتور با مشخصات 1 اسب بخار، 220 ولت و تک‌فاز، فن دمنده با قطر 75 cm ، شبکه یک‌نواخت کننده جریان باد و شاسی نگهدارنده سیستم فن و شبکه.



شکل 13: مکانیزم تولید باد

جدول 2: تجزیه واریانس

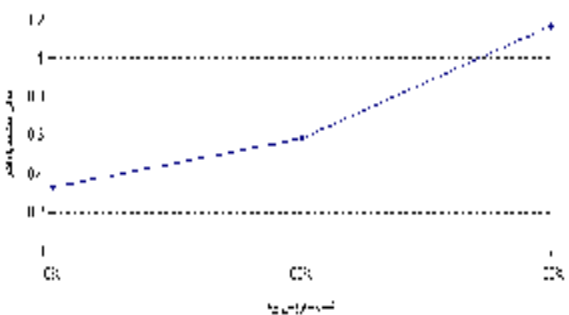
ANALYSIS OF VARIANCE TABLE						
Y	Source	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pv.
1	Replication	2	0.048	0.024	35.9817	0.0000
2	Factor A	4	52.71	13.1775	3892.8235	0.0000
3	Error	8	0.003	0.0003		
4	Error D	2	4.284	2.142	59.67934	0.0000
5	AC	8	0.184	0.023	0.6633	0.0000
6	Factor C	7	71.77	10.2529	2927.7871	0.0000
10	AC	8	0.003	0.0003	0.872693	0.0000
11	BC	4	1.28	0.32	0.9168	0.0000
14	ABC	16	0.022	0.0013	0.37	0.0000
16	Error D	2	0.016	0.008	22.92241	0.0000
18	AC	8	1.28	0.16	0.4576	0.0000
20	BC	4	0.48	0.12	0.3408	0.0000
21	ABC	16	0.022	0.0013	0.368	0.0000
24	CD	4	11.45	2.8625	82.2205	0.0000
26	ACD	16	0.18	0.0112	0.3184	0.0000
28	BCD	8	0.22	0.0275	0.7782	0.0000
31	ABC	16	0.022	0.0013	0.37	0.0000
31	Error	36	0.174	0.0048		
Total		134	105.92			



شکل 14: اثر زاویه حمله پره بر توان خروجی

تأثیر نسبت مخروطی پره بر توان خروجی

با مشاهده نتایج حاصل از آزمون دانکن و شکل 15 در سطح 5%، تعیین شد که در نسبت مخروطی سطح 100%، مدل بیشترین توان خروجی را داشته است.



شکل 15: اثر نسبت مخروطی پره بر توان خروجی

لامپ 3 ولتی به عنوان مصرف کننده استفاده شد. ولتاژ و شدت جریان از روی ولت متر و آمپر متر در سرعت های مختلف باد اندازه گیری شد.

روش آماری

بر اساس اطلاعات به دست آمده، طرح آماری به- کار رفته، یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی در سه تکرار با استفاده از آزمون دانکن¹ است. نتایج میانگین توان ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح 5% با هم مقایسه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

در این آزمایش، سه مدل توربین های بادی سه پره، در مکانیزم سیستم تولید باد قرار داده شد. این آزمایش در سه تکرار اجرا و مقادیر ولتاژ و شدت جریان اندازه گیری شد. با حاصل ضرب ولتاژ در شدت جریان، مقدار توان تولیدی تا چهار رقم اعشار محاسبه گردید.

نتایج و بحث

تمامی داده های برداشت شده از این آزمایش از طریق آزمون دانکن با استفاده از نرم افزارهای *Mstat-C* و *Excel* مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. و روشن شد که اختلاف موجود در بین توان های بدست آمده از آزمایش در سرعت های مختلف باد، زوایا، نسبت مخروطی پره معنی دار است با استفاده از جدول 2 تجزیه واریانس معنی دار است.

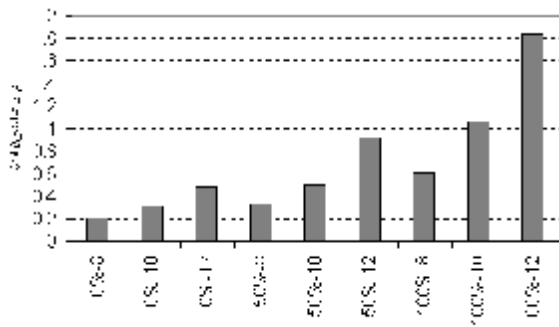
همان طور که از جدول تجزیه واریانس مشاهده می شود مقدار *F* محاسبه شده در جدول 2 به مراتب از مقدار *F* جدول مرجع بالاتر است و نشان دهنده این است که تیمارها با هم اختلاف معنی داری دارند.

اثر متغیرها برای میزان توان تولیدی

تأثیر زاویه حمله پره بر توان خروجی

با مشاهده نتایج حاصل از آزمون دانکن و شکل 14 در سطح 5%، تعیین شد که زاویه حمله 15 درجه بیشترین توان خروجی را داشته است.

1. Duncan



بر شبیه‌سازی نسبت مخروطی پره و سرعت باد در توربین بادی

شکل 18: اثر متقابل نسبت مخروطی پره و سرعت باد بر توان خروجی

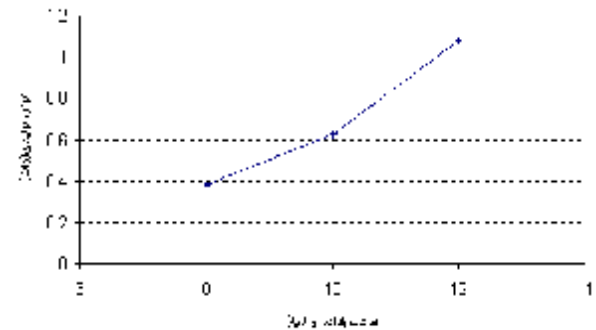
با استفاده از نتایج آزمون دانکن، تعیین شد که در مدل توربین بادی سه پره، از بین پنج سطح زاویه حمله پره، زاویه 15 درجه با میانگین توان 0/8612 وات و از بین سه سطح نسبت مخروطی، سطح 100% با میانگین توان 1/17 وات و از بین سه سرعت باد، سطح 12 m/s با میانگین توان 1/078 وات بیش‌ترین توان تولیدی را داشته است. همچنین تعیین شد که اثر متقابل بین متغیرها (زاویه حمله پره، نسبت مخروطی پره و سرعت باد) معنی‌دار بوده و در مدل سه پره، مدلی که زاویه حمله آن 15 درجه، نسبت مخروطی 100% و سرعت باد 12 m/s است، با توانی برابر 2/304 وات به عنوان بهترین مدل برای تولید توان بیشتر از بین سطوح انتخابی ارائه گردید (جدول 3).

با مشاهده داده‌های به‌دست آمده از جدول 3 مشخص است که میانگین توان‌های ردیف 27 بیش‌ترین مقدار توانی را به خود اختصاص داده است. به عبارت دیگر ردیف 27 ردیفی است که در آن زاویه حمله 15 درجه، نسبت مخروطی پره در سطح 100% از طول وتر و سرعت باد 12 m/s است. در ارتباط با تاثیر زاویه حمله پره بر توان خروجی، بهترین زاویه حمله 15 درجه می‌باشد و اگر سطوح بیش‌تری (بیش از پنج سطح) در آزمایش مورد بررسی قرار می‌گرفت تاثیری نداشت و هم‌چنان زاویه 15 درجه به عنوان بهترین زاویه در افزایش توان تولیدی تاثیرگذار بود. این عمل می‌تواند به نیروهای آیرودینامیکی برا و پسای پره مربوط باشد. با توجه به این‌که زاویه حمله پره، زاویه‌ای است که خط

تاثیر سرعت باد بر توان خروجی

با مشاهده نتایج حاصل از آزمون دانکن در

شکل 16 در سطح 5%، معلوم شد که سرعت باد m/s 12 بیشترین توان خروجی را تولید کرده است.

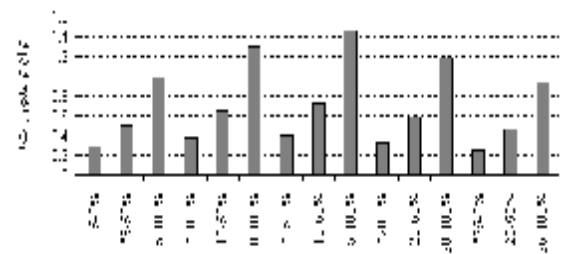


شکل 16: تاثیر سرعت باد بر توان خروجی

اثر متقابل زاویه حمله پره و نسبت مخروطی بر توان خروجی

با مشاهده نتایج حاصل از آزمون دانکن در

شکل 17 معلوم شد که مدل در زاویه حمله 15 درجه و نسبت مخروطی پره در سطح 100% بیشترین توان خروجی را داشته است.



بر شبیه‌سازی نسبت مخروطی پره و سرعت باد در توربین بادی

شکل 17: اثر متقابل زاویه حمله پره و نسبت مخروطی بر توان خروجی

اثر متقابل نسبت مخروطی و سرعت باد بر توان خروجی

با مشاهده نتایج حاصل از آزمون دانکن در

شکل 18 معلوم شد که مدل در نسبت مخروطی 100% و سرعت باد 12 m/s بیش‌ترین توان خروجی را داشته است.

جدول 3: مقایسه میانگین توان‌های حاصل از آزمون دانکن

Data File :Turbine	
Title : power	
Case Range : 611 - 655	
Error Mean Square = 0/001000	
Error Degrees of Freedom = 260	
No. of observations to calculate a mean = 9	
Duncan's Multiple Range Test	
LSD value = 0/02935	
s _e = 0/01054 at alpha = 0.050	
x	
Ranked Order	Original Order
Mean 27 = 2/304 A	Mean 1 = 0/1843 Z
Mean 18 = 2/041 B	Mean 2 = 0/2654 ZZ
Mean 36 = 1/863 C	Mean 3 = 0/4117 U
Mean 9 = 1/550 D	Mean 4 = 0/2877 YZ
Mean 45 = 1/461 E	Mean 5 = 0/4234 U
Mean 26 = 1/321 F	Mean 6 = 0/7851 M
Mean 17 = 1/175 G	Mean 7 = 0/5009 S
Mean 24 = 1/126 H	Mean 8 = 0/8870 L
Mean 35 = 1/071 I	Mean 9 = 1/550 D
Mean 15 = 1/019 J	Mean 10 = 0/2417 ZY
Mean 33 = 0/9213 K	Mean 11 = 0/3420 WX
Mean 8 = 0/8870 L	Mean 12 = 0/5408 R
Mean 44 = 0/8618 L	Mean 13 = 0/3731 V
Mean 6 = 0/7851 M	Mean 14 = 0/5536 QR
Mean 25 = 0/7482 N	Mean 15 = 1/019 J
Mean 42 = 0/7224 N	Mean 16 = 0/6604 O
Mean 16 = 0/6604 O	Mean 17 = 1/175 G
Mean 23 = 0/6226 P	Mean 18 = 2/041 B
Mean 34 = 0/6114 P	Mean 19 = 0/2612 ZZ
Mean 21 = 0/5820 Q	Mean 20 = 0/3740 V
Mean 14 = 0/5536 QR	Mean 21 = 0/5820 Q
Mean 12 = 0/5408 R	Mean 22 = 0/4123 U
Mean 32 = 0/5047 S	Mean 23 = 0/6226 P
Mean 7 = 0/5009 S	Mean 24 = 1/126 H
Mean 43 = 0/4930 ST	Mean 25 = 0/7482 N
Mean 30 = 0/4688 T	Mean 26 = 1/321 F
Mean 5 = 0/4234 U	Mean 27 = 2/304 A
Mean 22 = 0/4123 U	Mean 28 = 0/2108 YZ
Mean 3 = 0/4117 U	Mean 29 = 0/3011 Y
Mean 41 = 0/4004 UV	Mean 30 = 0/4688 T
Mean 20 = 0/3740 V	Mean 31 = 0/3331 X
Mean 13 = 0/3731 V	Mean 32 = 0/5047 S
Mean 39 = 0/3691 VW	Mean 33 = 0/9213 K
Mean 11 = 0/3420 WX	Mean 34 = 0/6114 P
Mean 31 = 0/3331 X	Mean 35 = 1/071 I
Mean 29 = 0/3011 Y	Mean 36 = 1/863 C
Mean 4 = 0/2877 YZ	Mean 37 = 0/1671 ^
Mean 2 = 0/2654 ZZ	Mean 38 = 0/2400 ZY
Mean 19 = 0/2612 ZZ	Mean 39 = 0/3691 VW
Mean 40 = 0/2597 ZZ	Mean 40 = 0/2597 ZZ
Mean 10 = 0/2417 ZY	Mean 41 = 0/4004 UV
Mean 38 = 0/2400 ZY	Mean 42 = 0/7224 N
Mean 28 = 0/2108 YZ	Mean 43 = 0/4930 ST
Mean 1 = 0/1843 Z	Mean 44 = 0/8618 L
Mean 37 = 0/1671 Z	Mean 45 = 1/461 E

وتر پره با جهت باد می‌سازد، لذا نیروی آیرودینامیکی در یک زاویه مشخص می‌تواند بیش‌ترین نیروی برا را تولید نماید و این عمل در زاویه 15 درجه رخ داد. هم‌چنین اثر نسبت مخروطی پره بر توان تولیدی نشان داد که نسبت مخروطی پره در سطح 100% بیش‌ترین توان تولیدی را از خود نشان داده است و این مسئله بیانگر این است که با افزایش نسبت مخروطی پره از صفر% به 100%، افزایش توان تولیدی را دارا بوده است و هیچ‌گاه نسبت-های مخروطی زیر 100% مطلوب نبوده است. این امر می‌تواند مستلزم این باشد که هرچه نسبت مخروطی کمتر باشد پره دارای وزن کم‌تری است و نمی‌تواند نیروی باد را به‌خوبی دریافت کند. با توجه به کم شدن صلبیت پره‌ها نیروی بالابری کم‌تری تولید می‌گردد، لذا در سرعت‌های مختلف باد دوران کم‌تری خواهد داشت. هم‌چنین تعیین شد که هرچه سرعت باد بیشتر باشد توربین، توان تولیدی بیشتری را خواهد داشت و البته این امر از قبل نیز تعیین بود (سلیمانی، 1377). پارامتر باد پارامتری بود که می‌بایست به عنوان متغییر مستقل در آزمایش دخالت داده شود.

منابع

- برنگی، م. و مانی، م. 1375. بررسی فنی و طراحی مقدماتی یک نیروگاه بادی برای مناطق مختلف ایران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- بصیری، ع. 1373. طرح‌های آماری در علوم کشاورزی. انتشارات دانشگاه شیراز.
- ثقفی، م. 1371. انرژی باد و کاربرد آن در کشاورزی. انتشارات دانشگاه تهران.
- جعفری، ع. و زارعیان، س. 1377. طراحی، ساخت و آزمایش توربین‌های بادی مولد الکتریسیته. پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه شیراز.
- خاندوزی، س. و گنج‌علیخانی نسب، ا. 1375. انرژی باد و توربین‌های بادی. پایان‌نامه کارشناسی دانشگاه آزاد اسلامی کرمان.
- سلیمانی، غ. و ریاحی، م. 1377. محاسبه، طراحی و تست توربین‌های بادی 10 kW . پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران.
- شمس‌آبادی، ح. و مینایی، س. 1373. بررسی و طراحی توربین‌بادی بهینه برای پمپاژ آب در مناطق بادخیز ایران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس.
- صدراپی، م. 1376. طراحی هواپیما. انتشارات دانشگاه امام حسین (ع).
- Basic blade design. Available on, <Http://www.windstuffnow.com/main/wind.html>.
- Walker, J. and Nicholas, F. 1998. Wind energy technology. John Wiley & Sons. Inc. Wind turbine design tool. Available on, <Http://club.cycom.co.uk/windturbinedesign.html>.

Review of Angles of Attack Blade and Camber Maximum Location in Horizontal Axis Wind Turbines With Plane-Form Blades

Ezzatollahi¹, K., Almasi², M., Borghei³, A. M. and Minaee⁴, S.

Abstract

Since Iran is a windy country due to the adjacency to the sea and the existence of Alborz and Zagros plateau, it is expected that the use of wind energy will be developed in near future. The present study aimed at finding the best blade Angle and the best location maximum camber from the chord from among selective levels. Determining the above levels can lead to an increase in few-bladed wind turbines. At first, 3 models of 3-bladed wind turbines, each with %20 thickness from chord and camber was made in %6. These models were put in wind production mechanism. All data from experiment were statistically analyzed by *Mstat-C* software & *Excel* software and *Duncan* test. The results showed a significant difference between power from the experiment in different wind speeds and location maximum camber. From Duncan test, it was found out that in 3-bladed wind turbines among five levels of angle of attack, angle 15° with an average power of 0.8612 watt, and among 3 levels of maximum camber level of %30 with an average power of **0.8139** watt and among three levels of wind speed, level of 12m/s with an average power 1.078 watt produced the largest among of power from among selective levels. Also it was found out that interaction between variables (angle of attack, location maximum camber and speed) was significant and the model with an angle of attack of 15° , location maximum camber of %30 and wind speed of 12m/s was presented with power of **1.537** watt as the best model for the largest amount of power.

Keywords: Wind turbine, Angle of attack, Location maximum camber, Wind speed, Power and Plane-form

1. Assistant Professor of Islamic Azad University, Kerman Branch

2. Professor of Ahvaz university

3. Professor of Tehran University

4. Assistant Professor of Tarbiat-Modarres University
