مجله علمی ترویجی انجمن مهندسان مکانیک ایران
ISSN: 1605-9719
سال ۲۷، شماره ۱۱۸، صفحات ۳۲–۳۷

امکان سنجی فنی و اقتصادی ساخت و تولید توربین بادی عمود محور مقیاس کوچک خانگی برای استفاده در مناطق استان یزد

شهریار کوراوند

استادیار گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران

skouravand@ut.ac.ir

چکیده

استفاده از انرژی باد موجب افزایش بهره وری و کاهش آلودگی محیط زیست می شود. بنابراین مهمترین اقدام در این زمینه طراحی و امکان سنجی بهره برداری دستگاههای تولید برق خانگی می باشد. در این مقاله هدف امکان سنجی ساخت و استفاده از توربینهای کوچک بادی مولد برق خانگی مناسب مناطق استان یزد می باشد. با توجه به اینکه تعداد مشترکان برق خانگی استان یزد در حدود ۴۵۰ هزار مشترک می باشند چنانچه نوع طراحی توربین بادی متناسب با شرایط باد استان یزد طراحی شود می توان از نتایج این طرح صرفه جویی اقتصادی کرد. برای این منظور منطقه مروست به عنوان پایلوت طراحی در نظر گرفته شده است. طرح روتور توربین تلفیقی از روتورهای ساونیوس و داریوس می باشد که اولی دارای گشتاور تولیدی بالا و خود شروع کننده در سرعت های باد پایین است و دومی دارای کارایی بالا می باشد که ایرفویل حاصل به شکل *J* می باشد. امکان سنجی های تئوری، تکنولوژیکی و فنی انجام و سپس تحلیل های اقتصادی بودن توربین ها برای سرعت باد متناسب با منطقه مروست در استان یزد انجام شده است. هزینه ساخت توربین حدود ۱۳۰۰ دلار خواهد بود که برای آن عمر مفید ۱۵ ساله در نظر گرفته شده است. پیش بینی می گردد این استان با استفاده از نتایج این طرح بتواند سهم مناسبی از تولید برق حاصل از انرژی باد در کشور را به خود اختصاص دهد.

واژگان کلیدی

توربین
انرژی باد
امکان سنجی
تحلیل اقتصادی

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۷/۰۸
تاریخ پذیرش ۱۳۹۷/۰۴/۱۱

۱ مقدمه

با توجه به نیاز روز افزون بشر به انرژی و محدودیت انرژی فسیلی و تبعات جبران ناپذیر استفاده از انرژیهای فسیلی نیاز به استفاده از انرژیهای تجدید پذیر روز به روز بیشتر و حادتر می شود. همچنین برای کاهش هزینه های اجرای شبکه برای مشترکین دوردست، نیازبه تولید پراکنده برق می باشد. باتوجه به مشکلات بهره برداری و حفظ پایداری شبکه‌های گسترده، به وسیله تولید پراکنده برق از میزان اتکا به شبکه‌های طولانی کاسته شده و بدلیل تقلیل تلفات شبکه انتقال و توزیع و افزایش پایداری در شبکه، هزینه تمام شده برق به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می یابد. یکی از بهترین نوع تولید پراکنده، توربین های بادی است که نه تنها به لحاظ مکان تولید برق بلکه به لحاظ منابع اولیه هم پراکنده‌اند و به عنوان یکی از مهمترین تدابیر پدافند غیر عامل و تامین محلی برق در شرایط بحرانی محسوب می‌شود. استفاده از توربین بادی علاوه بر توجیه اقتصادی برای صیانت از محیط زیست نیز توصیه می شود [۱]. مطالعات زیادی پیرامون انتخاب مواد برای پره های توربین های باد با توجه به شرایط آب و هوایی انجام شده است [۲]. در برنامه پنجم توسعه کشور برای انرژی حاصل از باد یک سهم ۴۵۰۰ مگاواتی پیش بینی شده و از آنجا که بازار نیروگاه‌های بادی در ایران رو به شکوفایی است، ورود به این بازار می‌تواند آینده خوبی را در دراز مدت برای سرمایه گذاران تضمین کند. استفاده از این انرژی موجب افزایش بهره وری تولید، کاهش آلودگی محیط زیست، دستیابی به حداکثرپتانسیل و در نتیجه حداکثرظرفیت تولید خواهد گردید. مسایل اقتصادی توربین های بادی در تحقیقهای زیادی مورد بررسی قرار گرفته است [۳]. از نظر ساختمان، انواع توربین های بادی به دودسته توربین های محور افقی و محور عمودی دسته بندی می شوند [۴، ۵]. محققان به این نتیجه رسیده اند که استفاده از ترکیب داریوس و ساوانیوس را باعث بهره وری از گشتاور راه انداز توربین ساوانیوس برای برطرف کردن مشکل راه اندازی توربین داریوس است [۶، ۷]. گوپتا و همکاران ترکیب توربین ساوونیوس با دو ایرفویل و داریوس را به صورت تجربی در تونل باد مورد مطالعه قرار داده‌اند [۸]. آنها دریافته‌اند که ترکیب دو توربین توان بیشتری نسبت به توربین ساوونیوس به تنهایی را تولید می‌کند. فردریکوس و همکاران کارایی توربین ساوونیوس را از لحاظ تعداد بهینه ایر فویل مورد بررسی قرار داده‌اند [۹]. در این تحقیق توربین با ۲، ۳ و ۴ ایرفویل مورد بررسی قرار گرفته است که در نتیجه بهترین راندمان توربین در سرعت‌های بالا برای توربین با ۳ ایرفویل بدست آمده است.

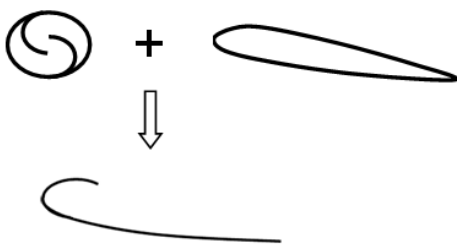
در این پژوهش ایستگاه مروست در استان یزد به عنوان پایلوت طراحی مورد مطالعه قرار می گیرد. دهقان و همکاران مشخصات نهایی مروست را مورد مطالعه قرار داده اند [۱۰]. بنابراین مهمترین اقدام در این زمینه طراحی و امکان سنجی بهره برداری دستگاههای تولید برق خانگی با استفاده از انرژی باد می باشد. با توجه به اینکه تعداد مشترکان برق خانگی استان یزد در حدود ۴۵۰ هزار مشترک می باشند چنانچه نوع طراحی توربین بادی متناسب با شرایط باد استان یزد طراحی شود می توان از نتایج این طرح صرفه جویی

اقتصادی کرد.

۲ روش تحقیق

اولین قدم برای طراحی یک توربین بادی انتخاب شرایط بادی از قبیل سرعت و سمت باد می باشد. برای بدست آوردن عدد نهایی از بین داده های خام ایستگاه مورد نظر تحلیل داده ها با استفاده از معادلات و شیوه های معمول می باشد. در این پژوهش ایستگاه مروست در استان یزد به عنوان پایلوت طراحی مورد مطالعه قرار می گیرد. با پتانسل سنجی استفاده از توربین های کوچک باد در استان یزد با تحلیل داده های پنج ساله باد در فاصله سالهای ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۵ که در جدول ۱ مشاهده می شود. با توجه به مشاهدات می توان نتیجه گرفت که سرعت نامی باد یعنی سرعت بادی که حداکثر انرژی الکتریکی را در خروجی ایجاد می کند برای منطقه مروست به طور متوسط برای سالهای ذکر شده ۷/۶ m/s می باشد. محتمل ترین سرعت باد ۴/۴ m/s می باشد. میانگین سرعت باد نیز ۵/۵ m/s می باشد. بر اساس تابع چگالی احتمال ویبول میانگین چگالی انرژی باد در مروست بر اساس داده های سالهای ذکر شده ۱۵۶ وات بر متر مربع می باشد.

در این پژوهش پس از مطالعه روی انواع روتور توربین ها و خصوصیات هر یک برای طراحی و تحلیل عملکرد توربین بادی کوچک برای منطقه مروست به عنوان پایلوت طراحی به صورت ذیل تصمیماتی اتخاذ شده است. به دلیل محدوده توان و هزینه تولید پایینتر و استفاده راحت تر توسط مصرف کننده نوع توربین عمودی انتخاب می شود. در اینجا چون با سرعت های پایین باد سر و کار داریم بنابر این نیاز به پروفیلی است که بتواند گشتاور راه انداز خوبی داشته باشد که یک انتخاب برای این کار رو تور ساوانیوس می باشد [۱۱–۱۳] از طرفی روتور ساوانیوس پس از راه اندازی کارایی بالایی ندارد. بنابر این طرح توربینی که که در اینجا ارائه می شود یک روتور هیبریدی با گشتاور راه انداز است. این روتور ترکیبی از روتورساونیوس، که درسرعت های باد پایین گشتاور خود شروع کننده بالا دارد، با روتور داریوس که در حین کار دارای کارایی بالا می باشد. به این صورت که روتور ساونیوس نیروی محرکه لازم برای شروع حرکت روتور داریوس را تامین نماید و ترکیب روتورها باعث افزایش قدرت توربین در سرعت های باد پایین می گردد. برای کمتر کردن پیچیدگی بهتر است از یک روتور استفاده شود و در عوض ایرفویل این روتور ترکیبی از ایرفویلهای روتور های داریوس و ساوانیوس همانند شکل ۱ باشد که به این ایرفویل J شکل گویند.



شکل ۱: شماتیک یک ایرفویل هیبریدی تولیدی J شکل

به دلیل اینکه محور توربین داریوس همواره عمود بر جهت باد است زاویه حمله مدام تغییر می کند و گشتاور منفی ایجاد می شود. از آنجا که همیشه یک پره در پایین دست پره دیگر روی محیط دوران در حال حرکت است بنابن وقتی باد به پره بعدی میرسد انرژی آن گرفته شده است. بنابراین به دلیل گشتاور منفی در پایین دست توربین گشتاور کمی تولید میکند. یک روش برای غلبه براین مشکل استفاده از ایرفویل J شکل میباشد که همزمان از هر دو نیروی برا و پسا استفاده می کند. ایرفویل J شکل با برش بخشی از یک سمت ایرفویل ایجاد می شوند.در این حالت می توان علاوه بر کاهش پیچیدگی توربین هزینه تولید آن را نیز کاهش داد. بدین ترتیب از مزیت پروفیلهای ساوانیوس برای تحریک و ایجاد گشتاور راه اندازی استفاده می گردد و باعث می شود توربین در ناحیه مرده قرار نگیرد.

با شروع حرکت به دلیل مشابهت این نوع ایرفویل با ایرفویلهای داریوس کارایی آن بالا می رود. بر اساس تحقیقات گذشته حالت بهینه برای مقاطع J شکل با حذف ایرفویل از محل بیشینه ضخامت ایرفویل اولیه ایجاد می شود و بیشترین توان خروجی با آن حاصل میگردد. با این کار به جای استفاده از مکانیزمهای گران و بعضا با عدم قطعیت و یا باحذف ترکیب توربین های ساوانیوس مشکل راه اندازی توربین با تقویت گشتاور راه اندازی حل می گردد. بنابر این در این طرح از ایرفویل J شکل استفاده می شود که پس از انتخاب نوع ایرفویل اولیه از محل بیشترین ضخامت برش داده می شود و روی آن تحلیل صورت می پذیرد.

شکل ۲: ایرفویل J شکل با برش از محل بیشینه ضخامت

برای برخی پروفیلهای متقارن NACA بخاطر اعداد رینولدز کم خلا داده تجربی در ناحیه پیش استال وجود دارد. برای مقایسه حداقل کیفیت مقاطع ایرفویل متفاوت و طرح های توربین، بهتر است از یک ابزار منحصر به فرد استفاده شود که این ابزار باید به زمان پردازش کوتاهی داشته باد به همین دلیل در نرم افزار Qblade از ابزار XFoil Direct Analysis انتخاب شده است. XFoil کدی برای شبیه سازی ویژگی های آیرودینامیکی مقاطع ایرفویل متفاوت در اعداد رینولدز اختیاری می باشد که از قابلیتهای نرم افزار Qblade می باشد. خروجی های این قسمت ضرایب لیفت آیرودینامیکی در مقابل زاویه حمله در ناحیه پیش استال می باشد. با فرضیات زیر عد رینولدز برای سرعت های متفاوت منطقه مروست انتخاب شده است:

۱. چگالی هوا در دمای ۲۵ درجه سلسیوس برابر ۱/۲۰۴ می باشد (جداول استاندارد خواص هوا). چگالی هوا متناسب با فشار و دمای تعریف شده در قانون گاز کامل می باشد. رابطه چگالی هوا و فشار هوا برای نقاط مختلف از رابطه (۱) بدست می آید:

$$p = \rho \frac{R}{M} T \qquad (۱)$$

در این رابطه p فشار هوا و ρ چگالی هوا و R ثابت گاز و M جرم مولی و T دمای هوا می باشند.

۲. لزجت در شرایط استاندارد برابر ۰/۰۰۰۰۱۷۸۹ می باشد.

جدول ۱: جدول اندازه گیری های اماری سرعت باد در ایستگاه همدیدی مروست در دوره آماری ۲۰۱۵ – ۲۰۱۰

ردیف	دسته‌های سرعت $V[M/S]$	سرعت میانه دسته‌های سرعت $Vi[M/S]$	فراوانی f_i	احتمال (بر مبنای ۱) $P(VI)$	احتمال تجمعی (بر مبنای ۱) $P(V)$	احتمال بر حسب مدل ویبول (بر مبنای ۱) Pw
۱	۱/۵ – ۰/۵	۱	۹۰۷	۰/۰۸۳۵۹۴	۰/۸۳۵۹۴	۰/۱۸۰۹۴۶
۲	۲/۵ – ۱/۵	۲	۲۹۵۴	۰/۲۷۲۲۵۸	۰/۳۵۵۸۵۳	۰/۲۱۸۶۵۴
۳	۳/۵ – ۲/۵	۳	۲۶۷۹	۰/۲۴۶۹۱۲	۰/۶۰۲۷۶۵	۰/۱۹۶۴۹۴
۴	۴/۵ – ۳/۵	۴	۱۷۳۷	۰/۱۶۰۰۹۲	۰/۷۶۲۸۵۷	۰/۱۴۸۹۶۳
۵	۵/۵ – ۴/۵	۵	۱۲۸۶	۰/۱۱۸۵۲۵	۰/۸۸۱۳۸۲	۰/۰۹۹۵۳۸
۶	۶/۵ – ۵/۵	۶	۵۳۷	۰/۰۴۹۴۹۳	۰/۹۳۰۸۷۶	۰/۰۵۹۹۱۹
۷	۷/۵ – ۶/۵	۷	۳۵۱	۰/۰۳۲۳۵	۰/۹۶۳۲۲۶	۰/۰۳۲۹۲۱
۸	۸/۵ – ۷/۵	۸	۱۸۵	۰/۰۱۷۰۵۱	۰/۹۸۰۲۷۶	۰/۰۱۶۶۵۳
۹	۹/۵ – ۸/۵	۹	۱۰۱	۰/۰۰۹۳۰۹	۰/۹۸۹۵۸۵	۰/۰۰۷۸۰۵
۱۰	۱۰/۵ – ۹/۵	۱۰	۶۰	۰/۰۰۵۵۳	۰/۹۹۵۱۱۵	۰/۰۰۳۴۰۶
۱۱	۱۱/۵ – ۱۰/۵	۱۱	۱۹	۰/۰۰۱۷۵۱	۰/۹۹۶۸۶۶	۰/۰۰۱۳۸۹
۱۲	۱۲/۵ – ۱۱/۵	۱۲	۱۳	۰/۰۰۱۹۸	۰/۹۹۸۰۶۵	۰/۰۰۰۵۳۱
۱۳	۱۳/۵ – ۱۲/۵	۱۳	۹	۰/۰۰۰۸۲۹	۰/۹۹۸۸۹۴	۰/۰۰۰۱۹۱
۱۴	۱۴/۵ – ۱۳/۵	۱۴	۸	۰/۰۰۰۷۳۷	۰/۹۹۹۶۳۱	۰/۰۰۰۰۶۴
۱۵	۱۵/۵ – ۱۴/۵	۱۵	۴	۰/۰۰۰۳۶۹	۱	۰/۰۰۰۰۲۰۶

براساس تحلیل های انجام شده طرح کلی انجام شده مطابق جدول ۲ خواهد بود که بر این اساس مدلسازی هندسی انجام شده است. جنس ورق ایرفویل و مواد اولیه بر اساس آلومینیوم طراحی شده است. ورق دور پره با دستگاه برش بریده می شود و سپس به ریب ها با پرچ متصل می شود. ماشینکاری ریب ها و شفت اصلی باید توسط فرز CNC[1] انجام شود. اتصال نقاطی که در نقشه به صورت پیچ و مهره نیستند به صورت پرچ کاری می باشد تا هزینه تولید کاهش یابد.پس از طراحی توربین لازم است شناخت جامعی درمورد جوانب مختلف آن و فرآیندهای ساخت تهیه گردد. این اطلاعات تمهیدات لازم جهت تکوین محصول با کیفیت و قیمتی اقتصادی در نظر می گیرد. همچنین مشکلات که در حین ساخت بروز می کند را پیش بینی کرده و روشهای پیش گیری از آن را در نظر می گیرد.

جدول ۲: پارامترهای طراحی نهایی

مشخصه	نوع و مقدار
تعداد پره	۳
نسبت سرعت نوک TSR	۲/۵
طول پره ها	۲/۸ متر
شعاع پره ها	۱ متر
ایرفویل پره ها	J شکل ازبرش NACA0016
ایرفویل استرات ها	NACA0025
طول وتر پره	۰/۳۵۶ متر
Cp	۰/۳۴

قبل از ساخت محصول حتما باید یک نمونه آزمایشگاهی ساخته و تحلیل شود. پس از عیب یابی و رفع نواقص در پروژه نمونه آزمایشگاهی گام بعدی که تولید محصول و تولید نمونه صنعتی است می تواند آغاز شود.برخی تمهیدات تکنولوژیکی از نقطه نظر فرآیندهای ساخت باید در ساخت توربین مد نظر قرار گیرد. از نظر مشخصات باید فرآیندهای ساخت ویژگیهای ذیل را داشته باشد:

الف) سادگی ساخت

ب) بالاترین دقت ساخت

ج) کمترین استفاد از پروسه های حرارتی بدلیل لینکه منطقه متاثر از حرارت ایجاد می کنند.

بدین منظور عملیات ماشینکاری استرات ها و ساخت ایرفویل دقیق در ریبهای ابتدا و انتها و همچنین ریب های میانه برای افزایش استحکام سازه پره توسط دستگاههای فرز و برش CNC انجام خواهد شد. عملیات لازم برای اتصال ورق پره و ریب ها به صورت پرچ کاری می باشد که قطعات را دچار اعوجاج و تنشهای پسماند حرارتی نمی کند. همچنین از نظر سادگی و کم هزینه بودن دارای اهمیت است. ضمن اینکه اتصال استرات به شافت و بدنه پره به صورت اتصال پیچی خواهد بود. عملیات مورد نیاز و دستگاه و تجهیزات لازم به صورت جدول ۳ تعیین شده است.

مواد اولیه مورد نیاز که اکثرا پروفیل یا ورق آلومینیوم می باشد همگی با ابعاد مطلوب در کشور موجود می باشد و نگرانی در این مورد وجود ندارد. همچنین دستگاهها و تجهیزات مورد اشاره فوق که برای ساخت روتور مورد نیاز است و نیز نیروی انسانی متخصص ساخت دقیق همگی و به وفور در کشور وجود دارد. مجموعه عملیات های ساخت فوق نیازمند ارزیابی و انجام آزمایشات عملکردی می باشد. از این رو تجهیزات کنترلی و آزمایشگاهی که باید در عملیات ساخت مورد استفاده قرار گیرند به شرح جدول ۴ خواهد بود. این آزمایشات از دو منظر باید انجام گردد. اول از نظر دقت در ساخت که با دستگاههای اندازه گیری ابعادی نظیر ماشین CMM[2] انجام میگیرد و با توجه به تلورانس های داده شده در نقشه های ساخت میزان و درصد خطا تعیین می گردد. دوم باید از نظر فنی و عملکردی مورد بررسی قرار گیرد که این کار از طریق ارزیابی فاکتورهای خروجی نظیر دوران و گشتاور و توان خروجی می تواند ارزیابی گردد.

۳ یافته ها

باتوجه به مشکلات بهره برداری و حفظ پایداری شبکه‌های گسترده، به وسیله تولید پراکنده برق از میزان اتکا به شبکه‌های طولانی کاسته شده و بدلیل تقلیل

[1]Computer Numerical Control [2]Coordinate Measuring Machine

جدول ۳: ترتیب عملیاتهای مورد نیاز برای ساخت روتور

شماره	نوع فعالیت	نوع عملیات لازم
۱	ساخت ورق پره	برش ورق اولیه
۲	ساخت ورق ریب های میانه	برش CNC
۳	ساخت ریب های انتهایی	برش CNC
۴	ساخت اتصال زانویی	برش تسمه
۵	ساخت اتصال زانویی	سوراخکاری ورق اولیه
۶	ساخت نهایی ورق ریب های میانه	فرم دهی با خمکاری ورق اولیه
۷	ساخت اتصال زانویی	فرم دهی با خمکاری تسمه اولیه
۸	اتصال ریب های میانه و انتهایی به ورق پره	اتصال پرچکاری
۹	ساخت استرات	فرزکاری CNC شمش اولیه مطابق ایرفویل استرات
۱۰	ساخت استرات	سوراخکاری بازوی ابتدایی
۱۱	ساخت شفت	فرزکاری CNC شمش اولیه مطابق ایرفویل استرات
۱۲	ساخت شفت	سوراخکاری شفت ابتدایی
۱۳	اتصال شفت و پره و استرات	اتصال پیچی

جدول ۴: تجهیزات و آزمایشهای کنترلی لازم جهت تست توربین

تجهیزات	فعالیت
اندازه گیری ابعادی نظیر CMM	کنترل دقت ساخت ایرفویلها و روتور
کارت DAQ و ترمینالهای مورد نیاز	انتقال داده های اخذ شده به کامپیوتر جهت پردازش
ترکمتر	اندازه گیری تورک خروجی
روتاری انکودر	برای اندازه گیری حرکت دورانی شفت
سرو موتور	ایجاد گشتاور مقاوم در مقابل حرکت روتور برای تخمین گشتاور استارت
بادنما بادسنج	سنجش سرعت و جهت باد
دیتا لاگر	برای جمع آوری داده های سنسورها
جیگ و فیکسچر	نگهداری روتور روی تست استند
دستگاه تست خستگی	تست خستگی پره ها
پاور آنالایزر	اندازه گیری توان و جریان

تلفات شبکه انتقال و توزیع وافزایش پایداری در شبکه، هزینه تمام شده برق به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می یابد. در برنامه پنجم توسعه کشور برای انرژی حاصل از باد یک سهم ۴۵۰۰ مگاواتی پیش بینی شده و از آنجا که بازار نیروگاه‌های بادی در ایران رو به شکوفایی است، ورود به این بازار می‌تواند آینده خوبی را در دراز مدت برای سرمایه گذاران تضمین کند.استفاده از این انرژی موجب افزایش بهره وری تولید، کاهش آلودگی محیط زیست، دستیابی به حداکثر پتانسیل و در نتیجه حداکثرظرفیت تولید خواهد گردید. بنابراین مهمترین اقدام در این زمینه طراحی و امکان سنجی بهره برداری دستگاههای تولید برق خانگی با استفاده از انرژی باد می باشد. نواحی مسکونی استان یزد سرعت های باد بالایی ندارند.

هزینه ساخت تولید انبوه یک توربین به صورت جدول ۵ خواهد بود. هزینه بقیه قطعات کوچک نظیر پیچ و مهره و اتصالات پرچی درون هزینه ماشینکاری قطعات لحاظ شده اند.

بدیهی است که این برآورد هزینه فقط برای تولید انبوه پیش بینی شده است. در صورتی که تولید تکی هزینه بسیار زیادی را تحمیل می کند. ساخت آزمایشی نمونه اولیه نیز علاوه بر هزینه های ساخت شامل هزینه های آزمایش و تجهیزات آزمایشگاهی نیز خواهد شد که از نظر هزینه تفاوت بسیار زیادی با تولید تکی دارد.

انرژی سالانه یک توربین به صورت زیر محاسبه می شود [۱۴]:

جدول ۵: تخمین هزینه ساخت توربین در تولید انبوه به ریال

نام قطعات	مبلغ هزینه	موارد شمول
ورق پره ها	۹۰۰۰۰۰۰	هزینه ورق آلومینیوم و هزینه ماشینکاری
ریب ها	۸۰۰۰۰۰۰	هزینه مواد اولیه و ماشینکاری ایرفویل
استرات ها و اتصالات	۴۰۰۰۰۰۰	هزینه ساخت و ماشینکاری
شفت	۵۰۰۰۰۰۰	هزینه مواد اولیه و ماشینکاری ساخت
هزینه یاتاقان بندی	۱۰۰۰۰۰۰	نصب یاتاقان و تنظیم الاین
هزینه ساخت برج	۸۰۰۰۰۰۰	هزینه لوله ها و نصب یا جوشکاری
ژنراتور	۵۰۰۰۰۰۰	ژنراتور
مجموع	۴۰۰۰۰۰۰۰	کل هزینه مواد اولیه و ماشینکاری و ساخت

$$\bar{P}_{tot} = N \times \Delta t \times \int_{\circ}^{\infty} f\left(u\right) P\left(U\right) dU \qquad (۲)$$

در اینجا N تعداد کل اندازه گیری ها در یک سال و Δt بازه زمانی اندازه گیری ها و $f(u)$ تابع توزیع ویبول برای منطقه مورد نظر و $P(U)$ معادله منحنی مشخصه توان توربین بادی است.

هزینه تولید این توربین بادی حدود ۷/۶ میلیون تومان خواهد بود. در تحقیقات گذشته هزینه تعمیر و نگهداری یک توربین را حدود ۲ درصد هزینه

سالانه یک توربین در نظر گرفته اند. بنابر این هزینه توربین باد برای n سال از رابطه (۳) بدست می آید

$$C_{OM} = mC_I \qquad (۳)$$

که در اینجا C_I سرمایه گذاری اولیه شامل ساخت و نصب توربین و C_{OM} هزینه تعمیر و نگهداری و m درصدی است که C_{OM} را به عنوان تابعی از C_I معرفی می کند و عواملی چون هزینه تعمیر و نگهداری تعیین کننده این ضریب است. ارزش هزینه کارکرد برای n سال به کمک رابطه (۴) بدست می آید

$$PW(C_{OM})_{۱-n} = mC_I \left[\frac{(۱+I)^n - ۱}{I(۱+I)^n}\right] \qquad (۴)$$

که در آن I نرخ سود سالانه است که با توجه به نرخ سود سالیانه اعلام شده توسط بانک ملی برای سال ۹۵ برابر ۱۵ درصد در نظر گرفته می شود. ارزش فعلی هزینه کل شامل تعمیر و نگهداری و سرمایه گذاری اولیه از معادله (۵) قابل محاسبه است:

$$NPW(C_A)_{۱-n} = C_I \left[۱ + m\frac{(۱+I)^n - ۱}{I(۱+I)^n}\right] \qquad (۵)$$

ارزش فعلی خالص هزینه سالانه عملکرد توربین را می توان از رابطه زیر بدست آورد

$$\begin{aligned} NPW\,(C_A) &= \frac{NPW(C_A)_{۱-n}}{n} \\ &= \frac{C_I}{n}\left[۱ + m\frac{(۱+I)^n - ۱}{I(۱+I)^n}\right] \end{aligned} \qquad (۶)$$

همچنین انرژی تولیدی در طول یک سال از رابطه (۷) محاسبه می شود

$$E_I = ۸۷۶۰ \times P_R \times C_F \qquad (۷)$$

که در آن PR و CF به ترتیب توان اسمی توربین انتخابی و ضریب ظرفیت هستند. ضریب ظرفیت از رابطه (۸) بدست می آید

$$CF = \frac{P\ MWh}{(۳۶۵days) \times \left(\frac{۲۴h}{day}\right) \times (P_R kW) \times ۱MW/۱۰۰۰kW} \qquad (۸)$$

با استفاده از روابط فوق هزینه تولید یک کیلو وات ساعت برق از رابطه (۹) بدست می آید:

$$\begin{aligned} C &= \frac{NPW\,(C_A)}{E_I} \\ &= \frac{C_I}{۸۷۶۰n}\left(\frac{۱}{P_R CF}\right)\left[۱ + m\frac{(۱+I)^n - ۱}{I(۱+I)^n}\right] \end{aligned} \qquad (۹)$$

هزینه سرمایه گذاری اولیه همان هزینه ساخت و نصب می باشد. هر توربین برای عمر مفید ۱۵ سال طراحی می شود. هزینه ساخت توربین حدود ۴۰ میلیون ریال می باشد. با نرخ دلار بانک مرکزی که حدود ۳۰۷۹۰ ریال می باشد هزینه ساخت توربین معادل ۱۳۰۰ دلار خواهد بود هزینه های اولیه دیگر مانند حمل و نصب حدود ۴۰ درصد هزینه توربین می شود. با فرض اینکه هزینه ای بابت اجاره محوطه پرداخت نشود. هزینه تعمیر و نگداری حدود دو درصد هزینه توربین می باشد. چنانچه هزینه خرید هرکیلو وات را ۳۰ سنت دلار در نظر بگیریم با تقسیم هزینه اولیه بر سود سالیانه زمان برگشت سرمایه اولیه بدست خواهد آمد. پیش بینی می گردد این استان با استفاده از نتایج این طرح بتواند سهم مناسبی از تولید برق حاصل از انرژی باد در کشور را به خود اختصاص دهد.

۴ نتیجه گیری

در این مقاله با عنایت به خصوصیات و اطلاعات هواشناسی منطقه مروست و ضرورت ساخت توربین مناسب جهت تولید برق در مقیاس خانگی، طراحی و تحلیل عملکرد یک توربین کوچک باد انجام و مورد ارزیابی قرارگرفت. ابتدا مطالعات اولیه و بررسی نیازهای باد منطقه انجام گردید. سپس به بررسی انواع توربین و طراحی اولیه آن پرداخته شد. با بررسی استانداردهاو مشخصات فنی، اجزای مورد نیاز سیستم به منظور انتخاب بهینه اجزا سیستم بدست آمد. در ادامه طراحی انجام شده و امکان سنجی ساخت و مراحل مورد نیاز برای ساخت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می دهد استان یزد با استفاده از این طرح می تواند سهم مناسبی از تولید برق حاصل از انرژی باد در کشور را به خود اختصاص دهد.

۵ تقدیر و تشکر

بدینوسیله از شرکت توزیع نیروی برق استان یزد برای حمایت مالی پروژه تشکر و قدردانی به عمل می آید.

مراجع

[1] J.Pirkandi, R. H. Monfared, New wind turbines and their role in the future of energy systems, Mechanical Engineering Journal, Vol. 25(108), pp. 23-31, 2016. (in Persian فارسی)

[2] N. Habibi, D. Vahdatpanah, K. Zandipour, Material selection for wind turbine blades according to the manjil weather conditions, Mechanical Engineering Journal, Vol. 26, No. 114, pp. 37-46, 2017. (in Persian فارسی)

[3] M. Gholamifard, H. Sharifzadeh, N. Amjadi, Optimal probability distribution to determine local marginal prices in the presence of wind production, Modellingin Engineering Journal, Vol. 13(40), pp. 59-67, 2015. (in Persian فارسی)

[4] E. Hau, Wind Turbines, Fundamentals, Technologies Application Economics, Springer, Berlin, 2006

[5] A.R. Jha, Wind Turbine Technology, CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 2011

[6] O. Hammond, Design of an alternative hybrid vertical axis wind turbine, B.S. Major Qualifying Report, Worcester Polytechnic Institute, 2014

[7] J. Kumbernuss, Ch. Jian, J. Wang, H.X. Yang, W.N. Fu, A novel magnetic levitated bearing system for Vertical Axis Wind Turbines (VAWT), Applied Energy, Vol. 90(1), 2012, Pp. 148–153.

[8] R. Gupta, R. Das & K.K. Sharma, Experimental Study of a Savonius – Darrieus Wind Machine, Proceedings of the International Conference on Renewable Energy for Developing Countries-2006

[9] Frederikus Wenehenubun, Andy Saputra, Hadi Sutanto, An experimental study on the performance of savonius wind turbines related with the number of blades, Energy Procedia, Volume 68, April 2015, Pages 297-304

[10] K. Omidvar , M. Dehghan Tezerjani, Evaluation of the wind power potential and wind characteristics for the generation of energy at yazd synoptic stations, Geographical Research, vol. 27 (2) , pp. 149-168, 2013. (in Persian فارسی)

[11] H. A. Khojasteh, Design, Construction and testing of a Darius small wind turbine, Master thesis, Sharif University of Technology, 1392.

[12] O. Hammond, Design of an alternative hybrid vertical axis wind turbine, B.S. Major Qualifying Report, Worcester Polytechnic Institute, 2014.

[13] J. Kumbernuss, Ch. Jian, J.Wang, H.X.Yang, W.N. Fu, A novel magnetic levitated bearing system for Vertical Axis Wind Turbines (VAWT), Applied Energy, Vol. 90, pp. 148–153, 2012.

[14] E. Hau, Wind Turbines Fundamentals, Technologies Application Economics, Springer, Berlin, 2006.