

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دانشکده برق

پایان نامه کارشناسی ارشد برق گرایش قدرت

کنترل فازی ژنراتور القایی تغذیه دوگانه متصل به توربین بادی
به روش کنترل مستقیم گشتاور

نگارش : محمد ضیایی موید

استاد راهنما : دکتر حسن رستگار

دی ماه ۸۶



شماره مدرک:

فرم اطلاعات
پایان نامه
کارشناسی- ارشد
و دکترا

مشخصات دانشجو		نام خانوادگی : ضیایی مویذ	نام : عماد	شماره دانشجویی: 84123026
عنوان		کنترل فازی ژنراتور القای تغذیه دوگانه متصل به توربین بادی به روش کنترل گشتاور مستقیم		
Title		Direct torque control of doubly fed induction generator connected to wind turbine with fuzzy controller		
استاد راهنما	نام خانوادگی:	رتبه و درجه و	رتبه و درجه و	نام خانوادگی:
	نام:	استاد راهنما	استاد راهنما	نام: حسن
استاد مشاور	نام خانوادگی:	رتبه و درجه و	رتبه و درجه و	نام خانوادگی:
	نام:	استاد مشاور	استاد مشاور	نام:
دانشنامه	<input type="radio"/> ارشد * <input type="radio"/> کارشناسی		دکترای	سال تحصیلی:
نوع پروژه	<input type="radio"/> نظری * <input type="radio"/> کاربردی		توسعه ای	بنیادی
مشخصات ظاهری	تعداد صفحات 127	تصویر <input type="radio"/> نقشه <input type="radio"/>	جدول <input type="radio"/> واژه نامه <input type="radio"/>	تعداد مراجع 19
زبان متن	<input checked="" type="radio"/> فارسی * <input type="radio"/> انگلیسی		چکیده	<input checked="" type="radio"/> فارسی * <input type="radio"/> انگلیسی *
یادداشت				
توصیفگر				
کلید واژه فارسی	انرژی باد، ماشین القای، ماشین القای تغذیه دوگانه، کنترل گشتاور مستقیم، کنترلکننده فازی			
Key word of English	Wind Energy, Induction Machine, Doubly Fed Induction Machine, Direct Torque Control, Fuzzy Controller			

تقدیم به خانواده عزیزم که همواره مشوقم بوده‌اند.

با تشکر از اساتید گرامی که اینجانب را راهنمایی کردند
و دانشگاه امیرکبیر که فرصت این تحقیق را فراهم آورد.

چکیده

با توجه به رویکرد جهانی به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، در این تحقیق سعی شده است نوع خاصی از ژنراتورهای متصل به توربین‌های بادی که استفاده روزافزونی در این صنعت دارند مورد بررسی قرارگیرد. این تحقیق شامل سه قسمت است. در فصل اول به بررسی توربین باد و تولید انرژی الکتریکی توسط این واحدها پرداخته می‌شود. در قسمت دوم ماشین‌های القایی تغذیه دوگانه مدلسازی و شبیه‌سازی شده‌اند که نمودارهای عملکردی بدست آمده برای اولین بار در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش سوم تحقیق با توجه به نتایج دو بخش پیشین مدارهای کنترلی مناسب برای کنترل کامل یک واحد بادی با ژنراتور القایی تغذیه دوگانه طراحی و با دو نوع کنترل کننده تناسبی - انتگرالی و فازی شبیه‌سازی شده است.

واژگان کلیدی : انرژی باد، ماشین القایی، ماشین القایی تغذیه دوگانه، کنترل گشتاور مستقیم، کنترل‌کننده فازی

Key Words: Wind Energy, Induction Machine, Doubly Fed Induction Machine, Direct Torque Control, Fuzzy Controller

فهرست

مقدمه	۱
فصل اول : ساختار نیروگاه بادی	۳
۱-۱. مقدمه	۳
۲-۱. ساختار باد	۱۰
۱-۲-۱. انرژی باد	۱۰
۲-۲-۱. وزش باد	۱۵
۳-۱. توربین بادی	۱۷
۴-۱. کنترل توربین بادی [۸]	۲۶
۱-۴-۱. اهداف کنترل	۲۶
۲-۴-۱. حالت‌های کارکردی	۲۸
۳-۴-۱. استراتژی کنترل توربین باد VS-VP	۲۸
۵-۱. ژنراتورهای بادی [۸]	۳۱
۶-۱. سیستم کنترل زاویه پره ها	۳۳
فصل دوم : مدلسازی و شبیه سازی ماشین القایی تغذیه دوگانه	۳۴
۱-۲. مدل سازی ریاضی	۳۴
۱-۱-۲. نظریه قاب های گردان [۱۰]	۳۵
۲-۱-۲. مدل $qd0$ ژنراتوری ماشین القایی تغذیه دوگانه	۳۸
۲-۲. نتایج شبیه سازی	۴۵
۱-۲-۲. عملکرد حالت دائم	۴۵
۲-۲-۲. عملکرد دینامیکی	۵۹
۳-۲-۲. مدل مبنای واحد (PU)	۶۵
۳-۲. روش های کلیدزنی اینورتر	۶۷

۷۰	.....[۱۵] SPWM روش کلیدزنی
۷۳	..... SVM روش کلیدزنی
۷۳	..... مدل کلیدزنی انتخابی
۷۵	..... فصل سوم : کنترل ژنراتور القایی تغذیه دوگانه متصل به توربین باد
۷۵	..... ۱-۳ طراحی سیستم کنترل WTDFIG به روش کنترل مستقیم گشتاور
۸۰	..... ۲-۳ نتایج شبیه سازی با کنترل کننده PI
۸۶	..... ۲-۳ نتایج شبیه سازی با کنترل کننده فازی
۹۲	..... ۴. نتیجه گیری و پیشنهادها
۹۲	..... ۱-۴ بحث و نتیجه گیری
۹۴	..... ۲-۴ پیشنهادها
۹۵	..... ۵. مراجع
۹۷	..... پیوست الف. روشهای کنترل اسکالر و برداری
۱۲۴	..... پیوست ب. کنترل کننده فازی [۱۹]

مقدمه

استفاده وسیع از توربین‌های باد برای تولید انرژی الکتریکی در حجم‌های بالا و نو بودن این تحقیقات در سطح مراکز علمی - تحقیقاتی جهان و توجه داخلی به آینده این صنعت، موجب شد که برای این تحقیق موضوعی در این زمینه انتخاب شود. از میان موارد مختلفی که قابل بررسی بود مانند باد، توربین، ژنراتور، اتصال به شبکه، مزارع باد و موارد دیگر، بررسی نوع بسیار جدید ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه متصل به توربین باد که امروزه در صدر تحقیقات قرار دارد انتخاب شد تا به تفصیل مورد بررسی قرار بگیرد.

این ماشین در تحقیقات داخل کشور تا به حال بررسی نشده است اما در سطح جهان این بررسی‌ها چند سالی است که شروع شده و همچنان ادامه دارد و تقریباً به نقطه مطلوبی از نظر مدل‌سازی ریاضی رسیده است اما بررسی آزمایشگاهی یا شبیه‌سازی رایانه‌ای آن هنوز جای تحقیق دارد. این بررسی جدید به عنوان گام دوم تحقیق در نظر گرفته شد.

به عنوان گام اول و شروع تحقیق تشخیص داده شد که بررسی کافی توربین باد و منحنی‌های عملکرد آن لازم است. در ابتدا تصور بر این بود که در این زمینه منابع فارسی هم کفایت کند اما در حین کار متوجه شدیم که مقالات انگلیسی نیز بسیار مختصر به موضوع پرداخته شده است و نیاز بررسی بیشتر دارد.

پس از انجام دو گام اول، هدف طراحی و شبیه‌سازی مدار کنترلی برای ژنراتور القایی متصل به توربین باد بود که بتواند منحنی بهینه عملکرد توربین را تأمین کند. از میان روش‌های کنترل ماشین القایی مناسب یعنی کنترل برداری جهت‌یابی میدان و کنترل برداری مستقیم شار، تنها مورد اول در مقالات خارجی قرار گرفته بود، به همین خاطر با توجه به عملکرد بهتر روش کنترل دوم در ماشین‌های القایی معمولی تصمیم گرفته شد تا مطابق روش گشتاور مستقیم سیستم کنترل طراحی شود. پس از انجام گام دوم تحقیق و بررسی دو روش کنترل برداری پیش گفته مشخص شد که روش انتخابی بسیار مناسب‌تر است.

در مورد کنترل‌کننده‌ها نیز تحقیقات انجام گرفته تنها بر روی کنترل‌کننده‌های تناسبی - انگرالی معمولی بود و آخرین کار انجام شده از یک کنترل‌کننده تطبیقی چند پله استفاده کرده بود. با توجه به غیرخطی بودن منحنی عملکرد بهینه توربین باد و غیرخطی بودن ماشین القایی، حدس زده شد که استفاده از کنترل‌کننده فازی نتیجه بسیار بهتری خواهد داشت.

مسیر تحقیقات مطابق با طرح پیشنهادی انجام گرفته است. بدین صورت که در فصل اول مفصلاً باد و سیستم تبدیل انرژی باد به انرژی الکتریکی مرور شده است و منحنی عملکرد بهینه توربین باد و سناریوی کنترل آن مشخص شده است.

در فصل دوم مدلسازی ریاضی ماشین القایی تغذیه دوگانه به تفصیل مرور شده و منحنی‌های عملکرد آن به شکلی کاملاً جدید و مفید شبیه‌سازی و بررسی شده است. نتایج جالبی نیز از این قسمت بدست آمده است مانند اینکه مدل زمانی ماشین القایی **MATLAB** در تحلیل تغذیه دوگانه عملکرد صحیحی ندارد و اینکه حد گشتاور تولیدی به سرعت وابسته نیست.

در فصل سوم سیستم‌های کنترلی متناسب با روش کنترل مستقیم گشتاور برای تحقق منحنی بهینه عملکرد توربین باد طراحی شده و در دو حالت استفاده از کنترل‌کننده‌های معمولی و کنترل‌کننده‌های فازی مقایسه شده است.

فصل اول : ساختار نیروگاه بادی

۱-۱. مقدمه

منابع انرژی های سنتی، سوخت های فسیلی و برق حاصل از شکافت هسته ای و انرژی آبی (بزرگ) (نیروگاه های برق آبی) عملاً بر تصویر عرضه انرژی جهان تسلط دارند. دیگر منابع انرژی هنوز به مقدار کافی توسعه پیدا نکرده اند. در بین این انرژی ها گروهی از انرژی ها هستند که به آنها عنوان انرژی های نوین و تجدید پذیر داده شده است. به عنوان یک گروه مقایسه آنها با انرژی های معمولی مشکل است زیرا که این انرژی ها به طور وسیع توزیع شده و نسبتاً پراکنده هستند. این انرژی ها از نظر تجاری هنوز بطور جزئی توسعه یافته اند. این منابع اساساً نامحدود می باشند. لکن با درک موجود، گران و غیر قابل اعتماد تلقی میشوند. اغلب آنها از نظر زیست محیطی بی خطر بوده یا می توانند بی خطر باشند. لازم است که استانداردهای زیست محیطی قوی در توسعه انرژی تجدیدپذیر، به صورت جزئی از یک فرآیند پیوسته در راستای عرضه و بهره برداری از انرژی در جهان اعمال شود به هر حال هزینه های سرمایه ای به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافته است. برای نمونه هزینه مدول های فتوولتایی بین سالهای ۱۹۷۰ تا ۱۹۹۰ به یک دهم کاهش

یافته است و در ادامه روند فوق در آینده نیز دور از انتظار نیست. قابلیت اعتماد نیز افزایش خواهد یافت. از آنجا که تعادل بین محیط زیست و اقتصاد انرژی در حال حاضر و در آینده مورد بحث خواهد بود بنابراین امکانات بالقوه و سهمی که این منابع تجدیدپذیر در تأمین انرژی جهان خواهند داشت یک بخش کلیدی برای مباحثات آینده خواهد بود.

انرژی باد نظیر سایر منابع انرژی تجدیدپذیر، بطور گسترده ولی پراکنده در دسترس می باشد. قبل از انقلاب صنعتی بعنوان یک منبع انرژی به میزان زیاد مورد بهره برداری قرار می گرفت ولی انقلاب صنعتی سوخت های فسیلی به دلیلی ارزانی و قابلیت اطمینان بالا جایگزین انرژی باد شدند. با این وجود بحران نفتی باعث ایجاد تمایلات جدیدی در زمینه تکنولوژی انرژی باد جهت تولید برق منصل به شبکه، پمپاژ آب و تأمین انرژی الکتریکی نواحی دورافتاده گردید. در سالهای اخیر مشکلات زیست محیطی و مسأله تغییر آب و هوای کرده زمین به علت استفاده از منابع انرژی متعارف این علایق را تشدید کرده است. همچنین اخیراً مشخص شده که توربین های بادی بخصوص در ابعاد بزرگ و تعداد زیاد در اماکنی که چشم انداز از اهمیت زیادی برخوردار است، باعث بهم خوردن شدید منظره می شوند. گاه صدای آنها نیز مسأله ساز است. از قرنهای پیش باد به عنوان منبع انرژی در دریانوردی مورد استفاده قرار می گرفته و ملتها پیشرفت و سعادت خود را مدیون پیشرفتشان در دریانوردی بوده اند. بر اساس مدارک موجود، پیشینه استفاده از انرژی بادی به ۵۰۰۰ سال پیش از میلاد و مسیح و به کشتیهای بادبانی شناور بر رود نیل باز میگردد. طولی نکشید که باد جای خود را در خشکی ها نیز باز نمود و تا پیش از رواج موتورهای بخار در نیمه اول قرن نوزدهم، انرژی آبهای روان و باد تنها منابع مهم تولید انرژی به شمار میرفتند.

اولین آسیاهای بادی از نوع محور افقی بوده اند و گفته میشود که هامورابی امپراتور بابل در قرن هفدهم پیش از میلاد برای اجرای طرحهای بزرگ کشاورزی و آبیاری خود تصمیم به استفاده از آسیاهای بادی گرفته است. در حدود ۲۰۰ سال پیش از میلاد مسیح اولین آسیای بادی برای آرد کردن غلات توسط ایرانیان ساخته شد و در جریان جنگهای صلیبی این فن آوری به اروپا انتقال پیدا نمود. گفته میشود که در قرن هفتم پس از میلاد آسیا سازی در ایران از صنایع پر رونق به شمار میرفته است. فاصله تاریخی زیادی بین آسیاهای ایرانی و آنچه آسیای اروپایی نامیده میشود وجود دارد آسیاهای اروپایی دارای محور افقی بوده و هنوز هم مورد

استفاده واقع میشوند. یکی از اولین کسانی که به تحقیقات علمی بر روی آسیاهای بادی پرداخت اسمیتون انگلیسی بود که با بکارگیری نتایج تحقیقات مکلورن در زمینه آیرودینامیک به محاسباتی در زمینه سرعت باد و پره‌ها، فشار باد و همچنین زاویه پره‌ها پرداخت. اسمیتون دریافت که قدرت آسیاها با مکعب سرعت باد متناسب میباشند.[۱]

اولین آسیای بادی جهت تولید الکتریسیته در سال ۱۸۹۰ برای کارهای روستایی و کشاورزی در آمریکا ساخته شد، در همین زمان در دانمارک فردی به نام پروفوسور لاکور (**La Cour**) یک آزمایشگاه تحقیقاتی تاسیس نمود و تا زمان مرگ خود به سال ۱۹۰۷ به تحقیقاتی در این زمینه پرداخت. آسیای او روتوری به قطر ۲۲/۸ متر و پره‌هایی به عرض ۲/۵ متر داشته و دو دینام به قدرت **۹ kW** را تغذیه مینمود. [۲] امروزه با توجه به پیشرفتهای صورت گرفته در این زمینه انواع و اقسام توربینها در اندازه‌های از چندین کیلووات تا چند مگاوات ساخته شده و مورد بهره‌برداری قرار میگیرند. اصولاً توربینها به سه دسته کوچک، متوسط و بزرگ تقسیم می‌شوند که به ترتیب در اندازه‌های کمتر از **۲۵ kW**، **۲۵ kW** تا **۱۵۰ kW** و از **۱۵۰ kW** تا بیش از **۲ MW** بصورت متصل یا جدا از شبکه در حال کار میباشند. قطر بهینه روتورها بین ۶۰ تا ۱۰۰ متر، توان بهینه بین ۱ تا ۳ مگاوات و طول عمر متوسط نیز بین ۲۰ تا ۳۰ سال محاسبه شده‌است.[۲]

جدول ۱-۱: هزینه ویژه احداث مزارع بادی با توجه به توان نامی توربین [۲]

توان نامی (kW)	هزینه ویژه احداث (\$/kW)
کمتر از ۵۰	۱۲۰۰ تا ۲۲۰۰
۵۰ تا ۱۰۰	۱۷۰۰ تا ۱۰۰۰
۱۰۰ تا ۵۰۰	۱۰۰۰ تا ۷۵۰
۵۰۰ تا ۱۰۰۰	۸۰۰ تا ۶۵۰
۱۰۰۰ تا ۲۵۰۰	۱۰۰۰ تا ۷۵۰

به لطف تحقیقات فراوان به عمل آمده در زمینه ساخت نیروگاههای بادی هزینه ساخت این نیروگاهها از ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ \$/kW در سال ۱۹۸۰ به کمتر از ۵۰۰ \$/kW در آغاز قرن بیست و یکم و هزینه تولید آنها نیز از تا ۴۰ cent/kWh در سال ۱۹۸۰ به کمتر از ۴ cent/kWh کاهش یافته است. [۲] همچنین برای تعمیر و نگهداری آنها نیز رقمی حدود ۱ cent/kWh در نظر گرفته میشود. [۲]

جدول ۱-۲: روند کاهش هزینه‌های برق بادی^۱ از ۱۹۸۰ تا بعد از سال ۲۰۰۰ [۳]

سال	۱۹۸۰	۱۹۹۷	بعد از ۲۰۰۰
هزینه تولید (cent/kWh)	۳۰ تا ۴۰	۵ تا ۷	کمتر از ۴
هزینه سرمایه گذاری (\$/Kw)	۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰	۵۰۰ تا ۸۰۰	کمتر از ۵۰۰
عمر بهره‌برداری (سال)	۵ تا ۷	۲۰	۳۰
ضریب ظرفیت	۱۵٪	۲۵٪ تا ۳۰٪	بیش از ۳۰
دسترسی	۵۰٪ تا ۶۵٪	۹۵٪	بیش از ۹۵٪
رنج اندازه (kW)	۵۰ تا ۱۵۰	۳۰۰ تا ۱۰۰۰	۵۰۰ تا ۲۰۰۰

از جمله دلایل کاهش این هزینه‌ها میتوان به استفاده از کامپوزیتهای مقاوم و ارزان قیمت جهت ساخت توربینهای بزرگ، کاهش قیمت ادوات الکترونیک قدرت، استفاده از ژنراتورهای دور متغیر جهت استفاده از حداکثر توان باد، افزایش ضریب دسترسی این نیروگاهها، اقتصادی‌تر شدن این نیروگاهها با افزایش اندازه آنها و ... نام برد. [۲] حدود ۷٪ کل انرژی تابشی خورشید به انرژی بادی تبدیل میشود و حداقل سرعت وزش باد برای تولید اقتصادی برق ۵/۱ m/sec و برای کار پمپها و شارژرها حدود ۳ m/sec میباشد. حدود ۵۰٪ سطح زمین دارای سرعت متوسط سالانه‌ای بین ۴/۴ تا ۵/۱ m/sec بوده و کشور ما نیز از این نظر در سطح متوسطی واقع شده است. ایران پتانسیل نصب ۶۵۰۰ MW نیروگاه بادی را دارا بوده که در حال حاضر حدود ۱۰۰ MW از این ظرفیت در دست بهره‌برداری و یا در حال نصب میباشد.

^۱ برای مناطق با سرعت متوسط ۷ m/sec و ارتفاع برج ۳۰ متر

جدول ۱-۳: سرعت باد و چگالی توان باد در نقاط مختلف کشور [۲]

چگالی توان (W/m^2)	میانگین سرعت باد در دراز مدت (m/sec)	نام شهر
۸۹	۵/۸	دزفول
۱۵	۲/۸	رامسر
۱۳۱	۶/۱	زابل
۹۱	۵/۳	زاهدان
۱۰۷	۵/۶	سبزوار
۳۵	۶/۷	سنندج
۱۶۲	۶/۴	کرمان
۵۷	۴/۴	کرمانشاه
۶۶	۴/۷	بندر لنگه
۵۶	۵	بندر عباس
۷۹	۵	تبریز
۳۱	۳/۶	ترت حیدریه
۴۲	۴/۲	تهران (مهرآباد)
۲۷۱	۷/۵	اهواز

منطقه منجیل با دارا بودن سرعت متوسط $5/4 \text{ m/sec}$ و تداوم سرعت بین ۴ تا 8 m/sec در حدود ۸۹٪ سال از بهترین مناطق جهت ساخت مزارع بادی در کشور به شمار میرود که کار ساخت نیروگاه بادی در آن از سال ۱۳۷۲ و با خرید دو توربین 500 kW از دانمارک، توسط سازمان انرژی اتمی آغاز شده و اکنون بیش از ۲۰ توربین با قدرتهای ۵۰۰، ۵۵۰ و 300 kW بطور متصل به شبکه در حال تولید انرژی میباشند. [۱] در آمریکا در سال ۱۹۷۹ یک ماشین 2 MW بصورت متصل به شبکه به صورت موفقیت آمیزی مورد آزمایش قرار گرفت. ظرفیت نصب شده این کشور در سال ۱۹۹۵، 1630 MW ، سال ۲۰۰۰، 2000 MW و در سال ۲۰۰۶، 6000 MW بوده و پیش بینی میشود تا سال ۲۰۱۵ این میزان به 12000 MW افزایش پیدا کند. در اروپا نیز ظرفیت نصب شده در سال ۱۹۹۵، 2000 MW ، سال ۹۷، 4700 MW ، سال ۲۰۰۰، 8000 MW بوده و پیش بینیها نشان میدهد که این ظرفیت در سالهای ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ به ترتیب به ۴۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ مگاوات بالغ خواهد شد.

جدول ۱-۴ : اهداف آینده موسسه انرژی بادی اروپا (EWEA) [۳]

سال	ظرفیت نصب شده	نرخ رشد سالانه
۱۹۹۷	۴۴۲۵ MW	مرجع
۲۰۰۰	۸۰۰۰ MW	۲۱/۸٪
۲۰۱۰	۴۰۰۰۰ MW	۱۷/۵٪
۲۰۲۰	۱۰۰۰۰۰ MW	۱۰٪

لازم به ذکر میباشد که آلمان، آمریکا و دانمارک جزء پیشتازان این صنعت در دنیا می‌باشند. در آسیا نیز هند با داشتن ظرفیت ۵۶۵ و ۱۰۰۰ MW ظرفیت نصب شده در سالهای ۹۵ و ۹۷ و دارا بودن پتانسیل تولید ۲۰۰۰۰ MW سردمدار استفاده از نیروگاههای بادی میباشد. [۳]

جدول ۱-۵ : درصد تامین انرژی الکتریکی از طریق باد [۳]

آینده	۱۹۹۷	
۵۰٪ تا سال ۲۰۳۰	۶٪	دانمارک
۲۰٪ تا ۲۵٪ تا سال ۲۰۱۰	۱۰٪	آلمان
۱۰٪ تا سال ۲۰۱۰	کمتر از ۱٪	آمریکا
۵ تا ۱۰٪ تا سال ۲۰۱۰	-----	ایرلند

به نظر میرسد که تنها منبع انرژی تجدیدپذیری که میتواند از نظر اقتصادی با انرژیهای فسیلی مقایسه شود انرژی بادی باشد، چراکه انرژی دریافتی آن بصورت مکانیکی بوده و به راحتی و با کمترین تبدیلات و تلفات قابل تبدیل بصورت الکتریکی میباشد. به علاوه از لحاظ زیست محیطی نیز جز پاکترین انواع انرژی بوده و مضاف بر عدم تولید گاز و ذرات معلق در صورت نصب در نزدیکی محل بار به علت عدم نیاز به ساخت خطوط فشار قوی باعث کاهش تشعشعات الکترومغناطیسی نیز میشود.

جدول ۱-۶: هزینه نهایی تولید نیروگاههای مختلف کشور بر حسب ریال به کیلووات ساعت [۲]

نوع نیروگاه	هزینه نهایی	هزینه نهایی با احتساب هزینه‌های اجتماعی و کنترل آلودگی
بخاری با سوخت نفت کوره	۱۲۲/۷	۲۱۸/۷
بخاری با سوخت گاز	۸۶	۱۲۸/۴
بخاری با سوخت زغالسنگ	۱۰۰/۲	۲۱۴/۸
سیکل ترکیبی	۵۹/۸	۸۹/۵
گازی با سوخت گاز (بار پایه)	۶۱/۱	۱۰۱/۳
گازی با سوخت نفت گاز (بار پایه)	۱۷۴/۴	۲۶۵/۲
گازی با سوخت گاز (بار پیک)	۷۸/۸	۱۳۳/۳
گازی با سوخت نفت گاز (بار پیک)	۱۹۹/۲	۲۹۵/۶
آبی یک منظوره	۵۵۵/۱	
آبی دو منظوره (بخش برق)	۴۲/۸	
آبی کوچک	۱۰۷/۵	
هسته‌ای	۲۶۸/۷	
خورشیدی فوتوولتائیک	۱۸۹۹/۷	
خورشیدی سهموی دراز	۵۳۱/۹	
خورشیدی هلیواستاتی	۶۶۴/۹	
خورشیدی دیش استرلینگ	۱۰۴۴/۸	
زمین گرمایی	۵۹۰	
زیست توده	۲۵۰/۴	
بادی	۱۶۰/۷	

جدول ۱-۷: میزان تولید آلاینده‌های زیست محیطی نیروگاهی در ایران و آمریکا

آلاینده	ایران سال ۱۳۸۱ [۲]		آمریکا سال ۱۹۹۵ [۳]	
	میلیون تن	درصد از کل	میلیون تن	درصد از کل
NO _x	۰/۱۲۳	۱۱٪	۶	۲۹٪
SO ₂	۰/۳۲۰	۲۷٪	۱۵	۶۶٪
CO ₂	۸۰	۲۴٪	۲۰۰۰	۳۶٪

۲-۱. ساختار باد

دو مطلب در مورد باد مهم است. یکی نحوه تغییر وزش آن است و دیگری توانی که می‌توان از آن استحصال کرد.

۱-۲-۱. انرژی باد

انرژی جنبشی مقداری از هوا به جرم m کیلوگرم که با سرعت u متر بر ثانیه در حال حرکت میباشد، برابر خواهد بود با:

$$E = \frac{1}{2} m.v^2 \quad ۱-۱$$

بنابر این توان همان مقدار از هوا برابر میشود با:

$$P = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} v^2 \quad ۲-۱$$

حال اگر فرض شود که هوای در حال حرکت دارای چگالی ρ (kg/m^3) بوده و سطحی برابر A متر مربع را در بر گرفته باشد، آنگاه نرخ تغییرات جرم هوای در حال حرکت برابر میشود با:

$$\frac{dm}{dt} = \rho.A.v \quad ۳-۱$$

و سرانجام رابطه نهایی بدست آمده برای توان باد به شکل زیر بیان میگردد:

$$P = \frac{1}{2} \rho.A.v^3 \quad ۴-۱$$

برای بیان توان باد در هر منطقه از توان ویژه آن سایت و یا به عبارتی از چگالی سطحی باد در آن سایت بصورت زیر استفاده میشود:

$$P_s = \frac{1}{2} \rho.v^3 \quad ۵-۱$$

همانطور که مشاهده میشود توان باد ناشی از دو پارامتر چگالی و سرعت هوا است. چگالی هوا وابسته به پارامترهای فشار و دمای هوا در هر نقطه بوده و براساس رابطه ۶-۱ بیان میشوند:

$$\rho = \frac{p}{R.T} \quad 6-1$$

که در این رابطه p برابر فشار هوا بر حسب پاسکال، T دمای مطلق هوا بر حسب کلوین و R نیز ثابت جهانی گازها میباشد.

دما، چگالی و سرعت با تغییر ارتفاع تغییر میکنند. اگر دما، چگالی و سرعت هوا (باد) را در ارتفاع مرجع (h_0)، به ترتیب برابر T_0 ، ρ_0 و V_0 در نظر گرفته شوند در ارتفاع h پارامترهای فوق با روابط زیر بیان خواهند شد:

$$T = T_0 6.5 \times 10^{-3} h \quad 7-1$$

$$\rho = \rho_0 e^{0.974 \times 10^{-4} h} \quad 8-1$$

$$V = V_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha \quad 9-1$$

لازم بذکر است که α پارامتری بدون بعد بوده و از آن به عنوان ضریب اصطکاک نام برده میشود. جدول ۸-۱ نشان دهنده بعضی مقادیر α میباشد.

جدول ۸-۱: برخی مقادیر α مربوط به رابطه ۹-۱

α	نوع زمین
0.10	دریاچه، اقیانوس، زمین هموار و سخت
0.15	علفزار و مرتع
0.20	گیاهان، پرچینها و بوته‌های بلند
0.25	زمینهای پر درخت
0.30	شهرهای کوچک با درخت و بوته
0.40	محیطهای شهری با ساختمانهای بلند

رابطه ۱-۹ نیز پس از خطی سازی و کمی تقریب به صورت زیر نیز قابل بیان خواهد بود:

$$\rho = \rho_0 10^4 h \quad 10-1$$

همچنین در مرجع [۳] نیز رابطه ای بصورت زیر برای محاسبه سرعت باد در ارتفاع h ارائه شده است:

$$v = v_0 \frac{\ln \frac{h}{z_0}}{\ln \frac{h_0}{z_0}} \quad 11-1$$

که در عبارت فوق z_0 برابر با ارتفاع ناهمواریهای زمین میباشد. لازم به ذکر است که منحنیهای بدست آمده از روابط ۱-۹ و ۱۱-۱ تقریباً بر یکدیگر منطبق می باشند. مثلاً $z_0 = 10^3$ هم ارز با $\alpha=0.1$ می باشد. کاهش سرعت باد در نزدیکی سطح زمین ناشی از اصطکاک بوجود آمده در اثر تماس یا برخورد جریان باد با سطح زمین میباشد و نیز اشاره به این نکته نیز حائز اهمیت بوده که روابط ۱-۹ و ۱۱-۱ تا ارتفاع حدود ۴۵۰ تا ۵۰۰ متری زمین قابل قبول میباشند و با عبور از این ارتفاع سرعت باد دوباره کاهش میابد. [۱]

اساس تبدیل انرژی توسط توربینهای بادی بر کاهش انرژی جنبشی هوای در حال حرکت استوار است. توان بدست آمده از باد برابر اختلاف توان باد، پیش و پس از عبور از توربین میباشد. لازم به ذکر است که هیچ توربینی حتی در بهترین شرایط نیز نمیتواند تمام انرژی باد را دریافت نماید، چرا که در این صورت باد پس از عبور از میان پره های توربین کل انرژی خود را از دست داده و متوقف میگردد. با وجود این با طراحی بهتر میتوان به بازده ایده آلی که مقدار آن در ادامه محاسبه خواهد شد رسید.

نخستین کسی که بطور علمی بر روی محاسبه انرژی باد کار کرد، یک آلمانی به نام بتز بود. بتز تئوری خود را پایه اصل برابری نیرو با آهنگ تغییرات اندازه حرکت بنا نهاد. باتوجه به شکل ۱-۱ فرض کنید که به ترتیب سرعت و سطح مقطع باد پیش از برخورد با توربین برابر با u_1 و A_1 ، در فضای بین پره ها برابر با v و A و پس از عبور از توربین برابر با v_2 و A_2 باشد.

فرض میکنیم که جرم مفروض Δm کیلوگرم از هوا (باد)، در طی زمانی برابر Δt ثانیه از فضای بین پره های توربین گذشته و سرعتش از u_1 به v_2 کاهش پیدا کرده است. تغییرات انرژی جنبشی برای این مقدار هوا بصورت زیر محاسبه میگردد:

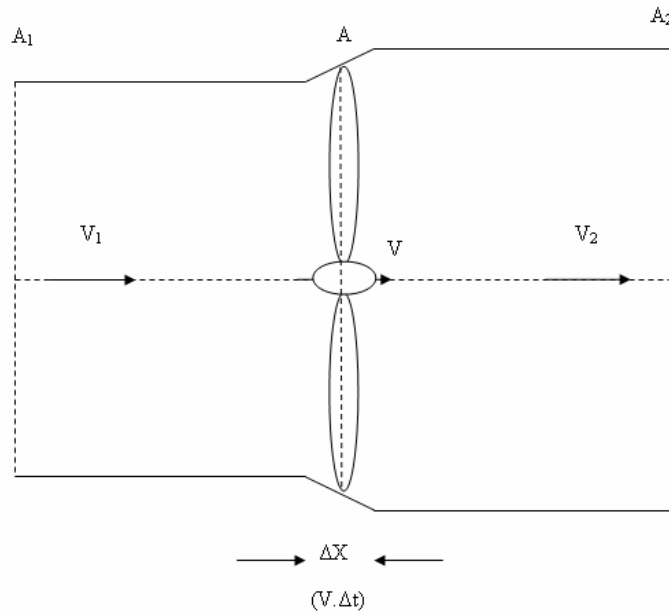
$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{1}{2} \Delta m (v_1^2 - v_2^2) \quad ۱۲-۱$$

در نتیجه توان متوسط تبدیل شده در توربین برابر خواهد بود با نسبت بین تغییرات انرژی جنبشی هوا به زمان این تغییرات. یعنی:

$$\bar{P} = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1}{2} \frac{\Delta m}{\Delta t} (v_1^2 - v_2^2) \quad ۱۳-۱$$

با فرض ثابت بودن سرعت باد در تمام فضای بین پره‌ها، $\frac{\Delta m}{\Delta t}$ به $\frac{dm}{dt}$ (رابطه ۱-۳)، و \bar{P} نیز به P تبدیل شده و در نتیجه رابطه ۱۳-۱ به شکل زیر در خواهد آمد:

$$\bar{P} = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} (v_1^2 - v_2^2) \quad ۱۴-۱$$



شکل ۱-۱: برخورد ستونی از باد با روتور ایده‌آل برای ارائه تئوری بتز [۱]

برای بدست آوردن v بدین شکل عمل میشود. با فرض اینکه توان تبدیل شده در توربین از رابطه زیر قابل محاسبه باشد. و از طرفی اگر نیروی وارد به پره‌ها برابر با تغییرات اندازه حرکت جرم Δm از هوا قبل و بعد از برخورد با پره‌ها باشد. آنگاه F بصورت زیر قابل محاسبه خواهد بود: