

دانشگاه پیام نور

مقدمه‌ای بر سیستم‌های انرژی باد (مبانی، فناوری و بهره‌برداری)

هرمان - ژوزف واگنر جیوتیرمی ماتور

ترجمه

دکتر سید محمد حسین موسی کاظمی محمدی

امروز کتابخوانی و علم‌آموزی نه تنها یک وظیفه‌ی ملی، که یک واجب دینی است.^۱

مقام معظم رهبری

در عصر حاضر یکی از شاخصه‌های ارزیابی رشد، توسعه و پیشرفت فرهنگی هر کشوری میزان تولید کتاب، مطالعه و کتابخوانی مردم آن مرز و بوم است. ایران اسلامی نیز از دیرباز تاکنون با داشتن تمدنی چندهزارساله و مراکز متعدد علمی، فرهنگی، کتابخانه‌های معتبر، علما و دانشمندان بزرگ با آثار ارزشمند تاریخی، سرآمد دولت‌ها و ملت‌های دیگر بوده و در عرصه فرهنگ و تمدن جهانی به‌سان خورشیدی تابناک همچنان می‌درخشد و با فرزندان نیک‌نهاد خویش هنرنمایی می‌کند. چه کسی است که در دنیا با دانشمندان فرزانه و نام‌آور ایرانی همچون ابوعلی سینا، ابوریحان بیرونی، فارابی، خوارزمی و ... همچنین شاعران برجسته‌ای نظیر فردوسی، سعدی، مولوی، حافظ و ... آشنا نباشد و در مقابل عظمت آنها سر تعظیم فرود نیاورد. تمامی این افتخارات ارزشمند، برگرفته از میزان عشق و علاقه فراوان ملت ما به فراگیری علم و دانش از طریق خواندن و مطالعه منابع و کتاب‌های گوناگون است. به شکرانه الهی، تاریخ و گذشته ما، همیشه درخشان و پر بار است. ولی اکنون در این زمینه در چه جایگاهی قرار داریم؟ آمار و ارقام ارائه‌شده از سوی مجامع و سازمان‌های فرهنگی در مورد سرانه مطالعه هر ایرانی، برایمان چندان امیدوارکننده نمی‌باشد.

کتاب، دروازه‌ای به سوی گستره دانش و معرفت است و کتاب خوب، یکی از بهترین ابزارهای کمال بشری است. همه دستاوردهای بشر در سراسر عمر جهان، تا آنجا که قابل کتابت بوده است، در میان دست‌نوشته‌هایی است که انسان‌ها پدید آورده و می‌آورند. در این مجموعه بی‌نظیر، تعالیم الهی، درس‌های پیامبران به بشر، و همچنین علوم مختلفی است که سعادت بشر بدون آگاهی از آنها امکان‌پذیر نیست. کسی که با دنیای زیبا و زندگی‌بخش کتاب ارتباط ندارد بی‌شک از مهم‌ترین دستاورد انسانی و نیز از بیشترین معارف الهی و بشری محروم است. با این دیدگاه، به‌روشنی می‌توان ارزش و مفهوم رمزی عمیق در این حقیقت تاریخی را دریافت که اولین خطاب خداوند متعال به پیامبر گرامی اسلام (ص) این است که «بخوان!» و در اولین سوره‌ای که بر آن فرستاده عظیم‌الشأن خداوند، فرود آمده، نام «قلم» به تجلیل یاد

1. <https://farsi.khamenei.ir/message-content?id=2696>

شده است: «إِقْرَأْ وَ رَبُّكَ الْأَكْرَمُ. الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ» در اهمیت عنصر کتاب برای تکامل جامعه انسانی، همین بس که تمامی ادیان آسمانی و رجال بزرگ تاریخ بشری، از طریق کتاب جاودانه مانده اند.

دانشگاه پیام نور با گستره جغرافیایی ایران شمول خود با هدف آموزش برای همه، همه جا و همه وقت، به عنوان دانشگاهی کتاب محور در نظام آموزش عالی کشورمان، افتخار دارد جایگاه اندیشه سازی و خردورزی بخش عظیمی از جوانان جویای علم این مرز و بوم باشد. تلاش فراوانی در ایام طولانی فعالیت این دانشگاه انجام پذیرفته تا با بهره گیری از تجربه های گرانقدر استادان و صاحب نظران برجسته کشورمان، کتاب ها و منابع آموزشی درسی شاخص و خودآموز تولید شود. در آینده هم، این مهم با هدف ارتقای سطح علمی، روزآمدی و توجه بیشتر به نیازهای مخاطبان دانشگاه پیام نور با جدیت ادامه خواهد داشت. به طور قطع استفاده از نظرات استادان، صاحب نظران و دانشجویان محترم، ما را در انجام این وظیفه مهم و خطیر یاری رسان خواهد بود. پیشاپیش از تمامی عزیزانی که با نقد، تصحیح و پیشنهادهای خود ما را در انجام این وظیفه خطیر یاری می رسانند، سپاسگزاری می نمایم. لازم است از تمامی اندیشمندانی که تاکنون دانشگاه پیام نور را منزلگاه اندیشه سازی خود دانسته و ما را در تولید کتاب و محتوای آموزشی درسی یاری نموده اند، صمیمانه قدردانی گردد. موفقیت و بهروزی تمامی دانشجویان و دانش پژوهان عزیز آرزوی همیشگی ما است.

دانشگاه پیام نور

فهرست مطالب

پیشگفتار	نُه
فصل اول. وضعیت کنونی انرژی باد.....	۱
۱-۱ وضعیت.....	۱
۲-۱ مزایا و معایب سیستم‌های انرژی باد.....	۳
۱-۲-۱ مزایا.....	۴
۲-۲-۱ معایب.....	۴
۳-۱ انواع مختلف مبدل‌های انرژی باد: یک مرور کلی.....	۵
منابع.....	۸
فصل دوم. باد: منشأ و اثرات محلی.....	۹
۱-۲ در دسترس بودن جهانی و سرچشمه.....	۹
۲-۲ جریان‌های مختلف باد.....	۱۰
۳-۲ مکان‌های جذاب برای انرژی باد.....	۱۳
۴-۲ اثرات محلی بر جریان باد.....	۱۳
۲-۴-۱ طول زبری و تغییر ناگهانی جهت باد (برش یا قیچی باد).....	۱۴
۲-۴-۲ تغییر سرعت باد.....	۱۴
۲-۴-۳ آشفتگی.....	۱۵
۲-۴-۴ موانع جریان باد.....	۱۶
۲-۴-۵ اثر دنباله‌ای باد و پارک بادی.....	۱۷
۲-۴-۶ اثر تونل و اثر تپه.....	۱۸
۲-۵ انتخاب محل توربین.....	۱۹
منابع.....	۲۰

۲۱	فصل سوم. فیزیک انرژی باد.....
۲۱	۱-۳ محتوای انرژی در باد.....
۲۵	۲-۳ تبدیل انرژی در تیغه.....
۲۷	۳-۳ ضرایب توان و اصول طراحی.....
۲۷	۱-۳-۳ ضریب توان C_p و قانون بتز.....
۲۸	۲-۳-۳ نسبت سرعت نوک.....
۲۸	۳-۳-۳ بازدهی برق.....
۳۰	۴-۳-۳ اصول طراحی.....
۳۱	۴-۳ تغییرات باد.....
۳۱	۱-۴-۳ برش باد با ارتفاع.....
۳۴	۲-۴-۳ تأثیر توزیع وایبول.....
۳۶	منابع.....

۳۷	فصل چهارم. اجزای یک مبدل انرژی باد.....
۳۷	۱-۴ تیغه‌های روتور.....
۴۰	۲-۴ گیربکس.....
۴۱	۳-۴ ژنراتورها.....
۴۵	۴-۴ برج‌ها.....
۴۷	۵-۴ اجزای متفرقه.....

۵۷	فصل پنجم. ملاحظات طراحی.....
۵۷	۱-۵ ناحیه روتور توربین‌ها.....
۵۸	۲-۵ تعداد تیغه.....
۶۰	۳-۵ توربین محور افقی یا عمودی.....
۶۳	۴-۵ توربین در خلاف باد یا در جهت باد.....
۶۵	۵-۵ ملاحظات بار برای انتخاب توربین.....
۶۷	۶-۵ توربین‌های بادی: با گیربکس یا بدون گیربکس.....
۷۰	۷-۵ نیاز شبکه برق، ژنراتورهای سنکرون یا آسنکرون.....
۷۶	۸-۵ موضوع سروصدا و کنترل آن.....
۷۹	منابع.....

۸۱	فصل ششم. بهره‌برداری و کنترل مبدل‌های انرژی باد.....
۸۱	۱-۶ منحنی قدرت و فاکتور ظرفیت.....
۸۱	۱-۱-۶ منحنی قدرت.....
۸۳	۲-۱-۶ فاکتور ظرفیت.....
۸۵	۲-۶ کنترل قدرت توربین‌های بادی.....

۸۷.....	۶-۲-۱ کنترل گام.....
۸۸.....	۶-۲-۱-۱ راه‌اندازی توربین کنترل‌شده با گام در سرعت متغیر.....
۸۹.....	۶-۲-۲ کنترل واماندگی (استال).....
۹۰.....	۶-۲-۲-۱ کنترل واماندگی غیرفعال.....
۹۰.....	۶-۲-۲-۲ کنترل فعال واماندگی.....
۹۱.....	۶-۲-۳ کنترل انحراف.....
۹۲.....	۶-۳ اتصال به شبکه.....
۹۲.....	۶-۳-۱ کاربردهای مبدل‌های انرژی باد.....
۹۳.....	۶-۳-۲ ولتاژ مورد نیاز.....
۹۵.....	۶-۳-۳ جنبه‌های خاص اتصال پارک‌های بادی فراساحلی.....
۹۶.....	منابع.....

۹۷.....	فصل هفتم. مسائل اقتصادی و سیاسی.....
۹۷.....	۷-۱ هزینه توربین‌های بادی.....
۹۷.....	۷-۱-۱ هزینه اولیه توربین بادی.....
۹۹.....	۷-۱-۲ هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری توربین‌های بادی.....
۱۰۱.....	۷-۲ تعرفه‌های برق.....
۱۰۶.....	۷-۳ سازوکارهای حمایت مالی.....
۱۰۶.....	۷-۳-۱ اعتبار ظرفیت.....
۱۰۷.....	۷-۳-۲ اعتبار زیست‌محیطی و سازوکار توسعه شفاف.....
۱۰۸.....	۷-۳-۳ مزایای مالیاتی.....
۱۰۸.....	۷-۴ اقتصاد انرژی باد.....
۱۰۸.....	۷-۴-۱ تأمین مالی پارک بادی (مطالعه موردی برای هند).....
۱۰۹.....	۷-۴-۲ تأمین مالی یک پارک بادی (شرح یک مورد در آلمان).....
۱۱۲.....	۷-۵ توربین‌های بادی پس از عمر بهره‌برداری.....
۱۱۳.....	منابع.....

۱۱۵.....	فصل هشتم. ارزیابی چرخه حیات یک مزرعه بادی.....
۱۱۵.....	۸-۱ هدف‌ها و رویکرد اساسی.....
۱۱۶.....	۸-۲ مطالعه موردی آلفا ونتوس.....
۱۱۶.....	۸-۲-۱ تعریف هدف و محدوده.....
۱۱۸.....	۸-۲-۲ تجزیه و تحلیل فهرست کالا.....
۱۱۹.....	۸-۲-۳ ارزیابی عوارض.....
۱۲۰.....	۸-۲-۴ تفسیر و نتایج.....

۸-۳ زمان بازپرداخت..... ۱۲۲

منابع..... ۱۲۴

فصل نهم. چشم انداز..... ۱۲۵

منابع..... ۱۲۶

پیشگفتار

نخستین به کارگیری انرژی باد توسط ایرانیان باستان برای آبیاری مزارع بود. آن‌ها از توان باد برای به حرکت درآوردن چرخ‌هایی استفاده می‌کردند تا آب را به سطح زمین و مزارعشان بیاورند. از آنجایی که منابع فسیلی مانند نفت و گاز تجدیدنپذیر بوده و روزی به پایان می‌رسند، باد به عنوان یک منبع انرژی پاک محسوب شده و هزینه تولید برق به وسیله آن کمتر از تولید برق با به کارگیری سوخت‌های فسیلی است و همچنین آلودگی و گاز گلخانه‌ای کمتری تولید می‌کند.

نویسندگان کتاب سعی کرده‌اند تعادلی بین یک فصل کوتاه کتاب و یک کتاب بسیار مفصل برای متخصصان موضوع ایجاد کنند. سه دلیل اصلی در پشت انجام این کار وجود داشت: دلیل اول اینکه این تخصص کاملاً بین رشته‌ای است و نیاز به ارائه ساده برای فردی از رشته غیرتخصصی دارد. دلیل دوم برای این نسخه کوتاه از یک کتاب کامل این است که نویسندگان دانش‌پژوهان و همچنین افرادی با گرایش فنی در جست‌وجوی این نوع کتاب در مورد انرژی باد را مدنظر قرار داده‌اند. دلیل و انگیزه سوم در نظر گرفتن مهندسانی بود که در صنعت باد کار خود را آغاز می‌کنند. هدف این کتاب ارائه یک پس‌زمینه شروع خوب به چنین متخصصانی است. مترجم ویرایش سوم این اثر را ارائه می‌نماید.

دکتر موسی کاظمی

فصل اول

وضعیت کنونی انرژی باد

۱-۱ وضعیت

انرژی باد یکی از قدیمی‌ترین منابع انرژی مورد استفاده بشر است، که فقط با بهره‌گیری از نیروی حیوانات و زیست‌توده قابل‌مقایسه است. فرهنگ‌های باستانی با قدمت چندین هزار ساله، از انرژی باد برای به حرکت درآوردن کشتی‌های بادبانی خود استفاده می‌کردند. در مراجعی به آسیاسازی فارسی در سال ۶۴۴ پس از میلاد و آسیاهای بادی در ایران در سال ۹۱۵ میلادی اشاره شده است. این مبدل‌های اولیه انرژی باد، برای پمپاژ آب و آسیای غلات ضروری بودند. در اروپا و پس از جنگ‌های صلیبی در حدود ۱۲۰۰ سال قبل از میلاد، چرخ‌های بادی شاید به‌عنوان یک محصول به شرق معرفی شدند. این آسیاهای بادی اروپایی به‌طور عمده برای آسیا مورد استفاده قرار می‌گرفتند؛ به‌جز در هلند که چرخ‌های بادی نیروی پمپاژ آب رودخانه را به زمین‌های پایین‌تر از سطح دریا تأمین می‌کردند. بین سال‌های ۱۷۰۰ تا ۱۸۰۰ پس از میلاد، هنر ساخت آسیای بادی به اوج خود رسید. دانش ساخت‌وساز به نسبت بالا بود و از طریق آزمون و خطا بهبود یافت. بعدها نظریه‌هایی مثل اویلر توسعه یافتند، که ابزارهایی را برای معرفی طرح‌های جدید و در نتیجه بهبود قابل‌ملاحظه کارایی تبدیل انرژی فراهم می‌کنند. در قرن هجدهم، آسیاهای بادی بسیاری در دانمارک، انگلستان، آلمان و هلند ساخته و مورد بهره‌برداری قرار گرفتند. در سال ۱۷۵۰، هلند به‌تنهایی بین ۶۰۰۰ تا ۸۰۰۰ آسیای بادی فعال داشت. تعداد آسیاهای بادی در آلمان در سال ۱۸۹۵ حدود ۱۸۰۰۰، در سال ۱۹۱۴ حدود ۱۱۴۰۰ و در سال ۱۹۳۳ بین ۴۰۰۰ تا ۵۰۰۰ تخمین زده شده است.

در آغاز قرن بیستم، آسیاهای بادی بهبود یافتند و طراحی یک مزرعه آسیای بادی چند پره در آمریکا آغاز شد. تا اواسط قرن، بیش از ۶ میلیون آسیای بادی در آمریکا کار می‌کردند. بسیاری از این چرخ‌های بادی در سرتاسر جهان برای تولید نیروی مکانیکی یا به‌عنوان تأمین‌کننده غیرمتمرکز برق در مزارع بزرگ مورد استفاده قرار گرفتند. هنگامی که در آغاز قرن بیستم شبکه برق سراسری به همه خانه‌های کشاورزی رسید، به‌کارگیری برق تولید شده توسط آسیاهای بادی به‌سرعت کاهش یافت و مبدل‌ها به‌محض انجام تعمیرات بعدی از فعالیت خارج شدند. در دهه ۱۹۵۰، پیشگامانی مانند هوتر^۱ در دانشگاه اشتوتگارت آلمان، دوباره شروع به توسعه و آزمایش چرخ‌های بادی مدرن کردند. طراحی آن‌ها کاملاً متفاوت از طرح قبلی است. تنها دو یا سه تیغه با مشخصه‌های آیرودینامیکی بسیار خوب وجود دارد، که می‌توانند با سرعت بالا بچرخند. با توجه به چرخش زیاد، تنها به یک ژنراتور کوچک برای تولید برق نیاز است. با این وجود، حتی در دهه‌های پنجاه و شصت قرن بیستم، فروش اقتصادی برق تولید شده بادی امکان‌پذیر نبود. پس از بحران موسوم به نفت در دهه هفتاد، جهشی برای توسعه و بازاریابی چرخ‌های بادی، به‌ویژه در ایالات متحده آمریکا، دانمارک و آلمان ایجاد شد. این بر پایه درک این موضوع بود که در آینده منابع انرژی بیشتر با انتشار کمتر آلودگی ضروری است. با توجه به قانون‌های مالیاتی مطلوب در دهه هشتاد، حدود ۱۲۰۰۰ مبدل بادی در کالیفرنیا نصب شد، که توان ۲۰ کیلووات تا حدود ۲۰۰ کیلووات را تأمین می‌کردند. در اروپا، پول مالیات زیادی صرف توسعه مبدل‌های بادی بزرگ‌تر و بازاریابی آن‌ها شد. همان‌طور که در جدول ۱-۱ نشان داده شده است، در ابتدای سال ۲۰۱۷ و در سراسر جهان بیش از ۳۴۰۰۰۰ آسیای بادی با ظرفیت تولید برق نصب‌شده و با ظرفیت در حدود ۴۸۷ گیگاوات در حال بهره‌برداری هستند. باید توجه داشت که تولید برق در اصل متناسب با ظرفیت نصب‌شده نیروی باد نیست. این عدم تطابق حاکی از یک ملاحظات بسیار مهم در انتخاب مکان و نوع آسیای بادی و ضریب به‌کارگیری ظرفیت است، که در ادامه این کتاب به‌طور مفصل توضیح داده شده است.

آلمان تا سال ۲۰۰۷ از نظر ظرفیت نصب‌شده پیشرو بود. سپس، ایالات متحده آمریکا برای چند سال پیشرو شد. چین در اواخر سال ۲۰۱۰، به پیشرو جهان تبدیل شد

جدول ۱-۱. به کارگیری انرژی باد در جهان

وضعیت نیروگاه‌های بادی نصب شده		
ظرفیت نامی (۲۰۱۶/۱۲/۳۱) (GW)	سهم جهانی	
۱۶۹	۳۵	چین
۸۲	۱۷	آمریکا
۵۰	۱۰	آلمان
۲۹	۶	هند
۲۳	۵	اسپانیا
۱۵	۳	انگلستان
۱۲	۳	فرانسه
۱۲	۲	کانادا
۱۰	۲	برزیل
۹	۱	ایتالیا
۷۶	۱۶	سایر کشورها
۴۸۷	۱۰۰	مجموع

و تا به امروز همچنان پیشتاز است. از مجموع ۴۸۷ گیگاوات ظرفیت نصب شده در سراسر جهان تا پایان سال ۲۰۱۶، چین به تنهایی ۱۶۹ گیگاوات داشت، که بیش از کل ظرفیت نصب شده در کل اروپا است. در روزهای اولیه، توربین‌های بادی با ظرفیت چند صد کیلووات در بازار موجود بودند، که اکنون به ظرفیت بیش از ۸ مگاوات رسیده است.

عرضه تجاری انرژی باد در کشورهای صنعتی و همچنین در کشورهای توسعه یافته‌ای مانند هند، در حال انجام است. در پایان سال ۲۰۱۶، بخش انرژی باد در هند دارای ظرفیت نصب شده ۲۹ گیگاوات بود. از نظر ظرفیت نصب شده برق بادی، هند پس از چین، ایالات متحده آمریکا و آلمان در رتبه چهارم جهان قرار دارد. با این حال، کل پتانسیل انرژی باد در کشور هند به پایان نرسیده است.

۲-۱ مزایا و معایب سیستم‌های انرژی باد

انرژی باد مزایای بسیاری دارد، که رشد سریع آن در جهان را توجیه می‌کند. تلاش‌های پژوهشی با هدف بررسی چالش‌های افزایش به کارگیری انرژی باد در حال انجام است.

۱-۲-۱ مزایا

- انرژی سیستم‌های انرژی باد توسط جریان طبیعی باد تأمین می‌شود؛ بنابراین، می‌توان آن را به‌عنوان یک منبع انرژی پاک در نظر گرفت. انرژی باد مانند نیروگاه‌هایی که به احتراق سوخت‌های فسیلی مانند زغال‌سنگ یا گاز طبیعی متکی هستند، هوا را آلوده نمی‌کند. توربین‌های بادی انتشارات جوی تولید نمی‌کنند، که باعث باران اسیدی یا گازهای گلخانه‌ای شود.
- انرژی باد به‌عنوان یک منبع انرژی داخلی در بسیاری از کشورهای جهان در دسترس است و مانند نفت تنها به کشورهای معدودی محدود نمی‌شود.
- انرژی باد یکی از کم‌هزینه‌ترین فناوری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر موجود امروزی است.
- توربین‌های بادی را می‌توان در مزارع یا دامداری‌ها نیز ساخت؛ در نتیجه، در مناطق روستایی (مکان‌های بهترین سایت‌های بادی)، به‌کارگیری آن‌ها اقتصادی است. کشاورزان و دامداران می‌توانند به به‌کارگیری زمین خود ادامه دهند؛ زیرا توربین‌های بادی تنها از بخش کوچکی از زمین استفاده می‌کنند. صاحبان نیروگاه‌های بادی برای به‌کارگیری زمین به کشاورز یا دامدار اجازه‌بها می‌دهند.

۱-۲-۲ معایب

- نیروی باد باید از نظر هزینه با منابع تولید برق معمولی رقابت کند. بسته به مشخصات باد در سایت، مزرعه بادی ممکن است با یک نیروگاه بر پایه سوخت فسیلی هزینه رقابتی داشته باشد، یا نداشته باشد. حتی با وجود کاهش هزینه برق بادی در ۱۰ سال گذشته، این فناوری برای تأمین برق به سرمایه‌گذاری اولیه بالاتری نسبت به سوخت فسیلی نیاز دارد.
- چالش اصلی به‌کارگیری باد (که متناوب است) به‌عنوان منبع انرژی این است، که ممکن است همیشه و در صورت نیاز به برق نوزد. انرژی باد قابل ذخیره نیست و نمی‌توان همه بادهای را برای پاسخ‌گویی به جدول زمانی نیازهای برق مهار کرد. گزینه ذخیره انرژی در باتری‌های ذخیره‌سازی فراتر از محدودیت‌های ممکن اقتصادی برای توربین‌های بادی بزرگ است.

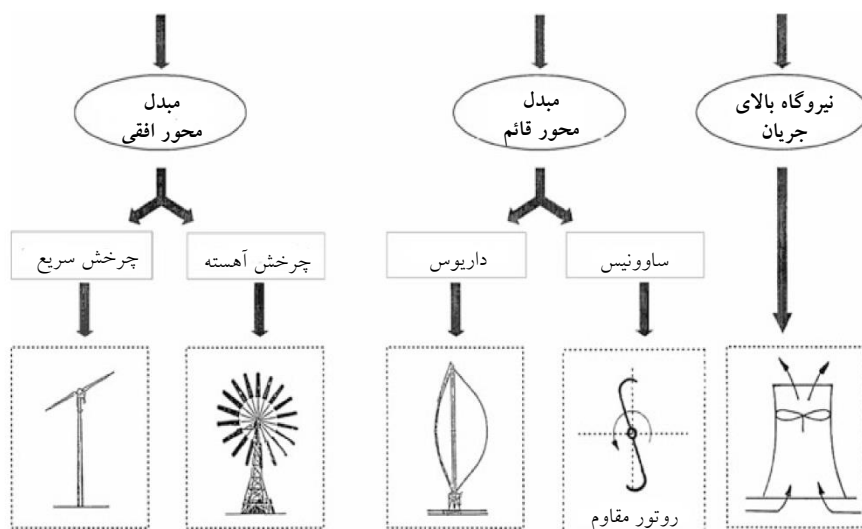
- سایت‌های بادی خوب اغلب در مکان‌های دور افتاده قرار دارند؛ یعنی دور از شهرهایی که به برق نیاز است. در کشورهای روبه‌پیشرفت، برای اتصال نیروگاه‌های بادی همیشه هزینه اضافی نصب شبکه از راه دور به شبکه تأمین وجود دارد.
- توسعه منابع بادی ممکن است با دیگر کاربری‌های زمین رقابت کند، که ممکن است ارزش بیشتری نسبت به تولید برق داشته باشند.
- اگرچه نیروگاه‌های بادی در مقایسه با سایر نیروگاه‌های معمولی تأثیر به نسبت کمی بر محیط‌زیست دارند، نگرانی‌هایی در مورد سروصدای تولید شده توسط پره‌های روتور و اثرات زیبایی‌شناختی (بصری) وجود دارد. بسیاری از این مشکلات از طریق توسعه فناوری یا با مکان‌یابی مناسب نیروگاه‌های بادی حل شده و یا تا حد زیادی کاهش یافته‌اند.

۱-۳ انواع مختلف مبدل‌های انرژی باد: یک مرور کلی

امروزه، انواع مختلفی از مبدل‌های انرژی باز در حال کار هستند (شکل ۱-۱ یک نمای کلی را نشان می‌دهد). مبدل محور افقی رایج‌ترین دستگاه است. این مبدل از نظر آیرودینامیکی فقط از چند تیغه روتور بهینه‌شده تشکیل شده است، که بیشتر اوقات برای تنظیم می‌توان آن‌ها را حول محور بلند خود چرخاند (تنظیم گام). یکی دیگر از روش‌های ارزان‌تر برای تنظیم، طراحی تیغه‌ها به گونه‌ای است که جریان هوا در امتداد پره‌ها در سرعت معینی به تلاطم تبدیل شود (تنظیم واماندگی). این مبدل‌ها می‌توانند توانی از ۱۰ کیلووات تا چند مگاوات را ارائه دهند. در بازار اروپا، بزرگ‌ترین مبدل قدرتی بیش از ۸ مگاوات دارد. بازدهی این نوع مبدل‌های انرژی باد در مقایسه با سایر آسیاهای بادی بسیار بالاست. یکی دیگر از انواع معمولی (قدیمی) روتور محور افقی، مبدل انرژی باد چند پره است، که اولین بار حدود صد سال پیش ساخته شد. چنین آسیاهای بادی دارای گشتاور راه‌اندازی بالایی هستند، که آن‌ها را برای هدایت پمپ‌های آب مکانیکی مناسب می‌کند. تعداد چرخش‌ها کم است و تیغه‌ها از ورق‌های ساده با هندسه آسان ساخته شده‌اند. برای پمپاژ آب، سیستم تنظیم چرخش نیاز نیست؛ اما برای محافظت مبدل در برابر آسیب در برابر طوفان، یک سیستم ایمنی مکانیکی نصب شده است. با به‌کارگیری پره در جهت مخالف باد، روتور در جهت باد چرخانده می‌شود. پایداری مکانیکی چنین «مبدل‌های سرعت آهسته» بسیار بالا است. برخی از

آن‌ها بیش از ۵۰ سال مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. به‌منظور افزایش تعداد چرخش، این نوع مبدل بهبود یافته و مجهز به تیغه‌های آیرودینامیکی کارآمدتری با مساحت کوچک‌تری شده‌اند، که تولید برق را تسهیل می‌کند.

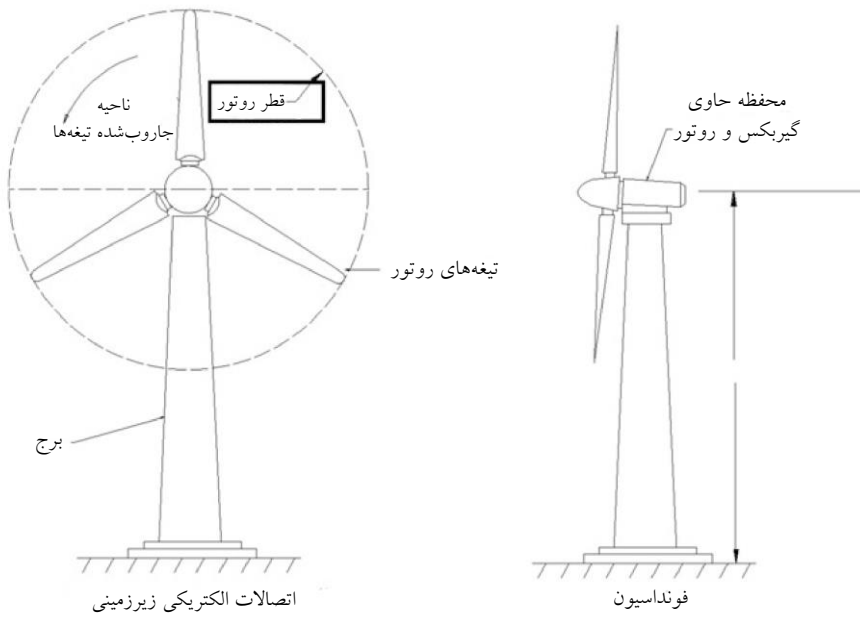
نوع سوم مبدل، به نام داریوس شناخته می‌شود، که یک ساختار محور عمودی دارد. مزیت آن‌ها این است که به‌جهت باد وابسته نیستند. به‌دلیل گشتاور راه‌اندازی کم خود، برای شروع به کار به‌کمک یک ژنراتور که به‌عنوان موتور کار می‌کند یا به‌کمک روتور ساوونیس نصب‌شده در بالای محور عمودی نیاز دارند. در دهه ۱۹۸۰، تعداد معقولی مبدل داریوس در کالیفرنیا نصب شد؛ اما در سراسر جهان، گسترش بیشتر و در محدوده توان بالاتر صورت نگرفت. شاید یکی از دلایل این عدم توسعه، افزایش قابل‌توجه سرعت باد با ارتفاع است، که به‌کارگیری چرخ‌های محور افقی روی برج‌ها را اقتصادی‌تر می‌کند. اصلاح روتور داریوس به‌شکل روتور H است (به‌شکل ۳-۵ مراجعه کنید)؛ اما در مقایسه با سایر مبدل‌های بادی، تنها تعداد کمی از روتورهای H وجود دارد که همه آن‌ها دارای ظرفیت زیر ۱ مگاوات هستند. آزمایش نمونه اولیه برای این نوع با موفقیت به پایان رسید؛ اما مرحله تجاری هنوز دیده نشده است. روتور ساوونیس به‌عنوان دستگاهی اندازه‌گیری، به‌ویژه برای سرعت باد استفاده می‌شود. همچنین، برای تولید برق در ظرفیت‌های بسیار کوچک زیر ۱۰۰ وات استفاده می‌شود.



شکل ۱-۱. مروری بر انواع مختلف مبدل‌های انرژی باد

آخرین تکنیکی که با آن سروکار داریم، به عنوان نیروگاه جریان بالارونده یا برج حرارتی شناخته می‌شود. در اصل، می‌توان آن را به عنوان ترکیبی بین مبدل باد و جمع‌کننده^۱ خورشیدی در نظر گرفت. بالای یک برج باریک و مرتفع یک چرخ باد در یک محور عمودی وجود دارد، که توسط هوای گرم فزاینده حرکت می‌کند. یک جمع‌کننده خورشیدی نصب شده در اطراف پای برج، هوا را گرم می‌کند. طراحی جمع‌کننده ساده است. یک فویل پلاستیکی شفاف چندین متر بالاتر از سطح زمین به صورت دایره‌ای در اطراف برج به صورت ثابت نصب شده است؛ بنابراین، ایستگاه به فضای زیادی نیاز دارد و برج باید بسیار بلند باشد. چنین سیستمی بازده بسیار ضعیفی تنها در حدود یک درصد دارد. مزیت چنین طرحی سادگی فنی آن است، که ممکن است کشورهای روبه پیشرفت را قادر سازد تا خودشان آن را بسازند. تاکنون تنها یک نیروگاه برج حرارتی در سرتاسر جهان با طراحی یک شرکت آلمانی ساخته شده است. این طرح از سال ۱۹۸۱ به طور رضایت بخشی در مانزارنا اسپانیا کار کرد؛ اما در سال ۱۹۸۸ توسط آب و هوای بد ویران شد. این ایستگاه دارای توان الکتریکی ۵۰ کیلووات، ارتفاع برج حدود ۲۰۰ متر و قطر جمع‌کننده کم‌وبیش ۲۴۰ متر بود. یک نیروگاه برج حرارتی دیگر با عملکرد الکتریکی حدود ۲۰۰ مگاوات در هند برنامه ریزی شده بود. مطالعات امکان سنجی دیگری نیز در استرالیا و نامیبیا انجام شده است؛ اما هیچ پروژه‌ای از این نوع محقق نشده است.

در سرتاسر این کتاب، سه اصطلاح «مبدل انرژی باد»، «آسیاهای بادی» و «توربین‌های بادی» به جای یکدیگر به کار رفته‌اند. اولین عبارت نام فنی سیستم است، در حالی که دو اصطلاح دیگر اصطلاحات رایج هستند. شکل ۱-۲ محبوب ترین نوع مبدل انرژی باد سه پره محور افقی برای تولید برق را در سراسر جهان نشان می‌دهد. این شکل، نمای جلو و جانبی مبدل انرژی باد سه پره محور افقی را نشان می‌دهد. جزئیات در مورد بخش‌های اصلی آن و عملکرد آن‌ها در فصل‌های بعدی مورد بحث قرار می‌گیرد.



شکل ۱-۲. مبدل انرژی باد سه پره محور افقی

منابع

Global Wind Report: Annual Market Update 2016. Global Wind Energy Council, <http://www.gwec.net>
[gwec.net/global-figures/wind-in-numbers](http://www.gwec.net/global-figures/wind-in-numbers) 27 June 2017

فصل دوم

باد: منشأ و اثرات محلی

تمام انرژی‌های تجدیدپذیر (به‌جز نیروی جزر و مد و زمین‌گرایی)، و حتی انرژی موجود در سوخت‌های فسیلی، در نهایت از خورشید می‌آیند. حدود ۱ تا ۲ درصد از انرژی حاصل از خورشید به انرژی باد تبدیل می‌شود. این فصل علت جریان باد و عوامل مؤثر بر الگوی جریان را توضیح می‌دهد. درک این موارد برای انتخاب مکان‌های مناسب برای توربین‌های بادی ضروری است.

۱-۲ در دسترس بودن جهانی و سرچشمه

مناطق اطراف استوا و در عرض جغرافیایی صفر درجه، بیشتر از بقیه کره زمین توسط خورشید گرم می‌شوند. هوای گرم سبک‌تر از هوای سرد است و تا ارتفاع تقریبی ۱۰ کیلومتری به آسمان خواهد رفت و به سمت شمال و جنوب گسترش می‌یابد. اگر کره زمین نمی‌چرخید، هوا به سادگی به قطب شمال و قطب جنوب می‌رسید، نزول می‌کرد و به استوا بازمی‌گشت.

از آنجایی که کره زمین در حال چرخش است، اگر از موقعیت خود روی زمین به آن نگاه کنیم، هر حرکتی در نیم کره شمالی به سمت راست منحرف می‌شود (در نیم کره جنوبی به سمت چپ مایل می‌شود). این نیروی خمشی ظاهری به نام نیروی کوریولیس^۱ شناخته می‌شود، که به نام ریاضیدان فرانسوی گوستاو گاسپارد کوریولیس^۲ نام‌گذاری شده است.

1. Coriolis Force

2. Gustave Gaspard Coriolis

در نیم‌کره شمالی، باد تمایل دارد به یک منطقه کم‌فشار نزدیک شود و در خلاف جهت عقربه‌های ساعت بچرخد. در نیم‌کره جنوبی، باد حول مناطق کم‌فشار و در جهت عقربه‌های ساعت می‌چرخد.

باد از سمت خط استوا خیز می‌گیرد و در لایه‌های بالاتر جو به سمت شمال و جنوب حرکت می‌کند. در حدود ۳۰ درجه عرض جغرافیایی در هر دو نیم‌کره، نیروی کوریولیس از حرکت بسیار دورتر هوا جلوگیری می‌کند. در این عرض جغرافیایی، یک منطقه با فشار بالا وجود دارد؛ زیرا هوا دوباره شروع به نزول می‌کند. وقتی باد از خط استوا بلند می‌شود، نزدیک به سطح زمین منطقه کم‌فشار وجود دارد، که بادهای شمال و جنوب را جذب می‌کند. در قطب‌ها به دلیل خنک شدن هوا فشار زیادی وجود دارد. جدول ۱-۲ جهت غالب بادهای جهانی را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۲. جهت باد غالب جهانی

عرض جغرافیایی	۹۰-۶۰°N	۶۰-۳۰°N	۳۰-۰°N	۰-۳۰°S	۳۰-۶۰°S	۶۰-۹۰°S
جهت	NE	SW	NE	SE	NW	SE

جهت‌های باد غالب هنگام قرار دادن توربین‌های بادی مهم هستند؛ زیرا بدیهی است که می‌خواهید آن‌ها را نسبت به جهت باد غالب، در مناطقی با کمترین موانع قرار دهید.

۲-۲ جریان‌های مختلف باد

بادهای در ارتفاعات تا ۱۰۰ متر بسیار تحت تأثیر سطح زمین هستند. بادهای به دلیل ناهمواری‌های سطح زمین و موانع کاهش می‌یابند. ممکن است به دلیل چرخش زمین (نیروی کوریولیس) بین جهت بادهای جهانی یا ژئوستروفیک^۱ و جهت بادهای نزدیک به سطح، تفاوت‌های قابل توجهی وجود داشته باشد. در نزدیکی سطح زمین، اثرات زیر بر الگوی جریان باد تأثیر می‌گذارند:

الف) نسیم دریا: در طول روز و توسط خورشید، خشکی سریع‌تر از دریا گرم می‌شوند. هوا بالا می‌رود، به سمت دریا می‌ریزد و فشار کمی در سطح زمین ایجاد