انــرژی بــاد

اصول، تحلیل منابع و اقتصادسنجی

مؤلف:

ساتیاجیت متئو

مترجمان:

وحید ربیعی فرادنبه

سعید ربیعی

نشر دانشگاهی فرهمند

نام کتاب: انرژی باد اصول، تحلیل منابع و اقتصادسنجی

مترجمان: وحید ربیعی فرادنبه و سعید ربیعی

ویراستاران: علیرضا فرهمندزادگان و شهرام یوسفی

سال چاپ: ۱۴۰۳

نوبت چاپ: اول

شمارگان: ۱۰۰

شابک: ۸-۱۶-۴۹۸۰-۶۲۲-۹۷۸

حق چاپ برای نشر دانشگاهی فرهمند محفوظ می‌باشد.

نشانی: تهران، خیابان انقلاب، روبروی در اصلی دانشگاه، پاساژ فروزنده، طبقه اول، واحد ٤١٩

تلفن : ٦٦٤١٠٦٨٨ -٦٦٩٦٨٦١٤

www.farbook.ir

telegram: @farhamandpress

Instagram: @nashr.farahmand

پیشگفتار مترجمان

در دنیای امروز، انرژی یکی از مهم‌ترین عوامل توسعه اقتصادی و اجتماعی است. با افزایش روزافزون تقاضا برای انرژی و نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی، توجه به منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی باد بیش از پیش اهمیت یافته است. انرژی باد به عنوان یکی از پاک‌ترین و پایدارترین منابع انرژی، در سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته و به یکی از ارکان اصلی سیاست‌های انرژی در بسیاری از کشورها تبدیل شده است.

کتاب حاضر، با عنوان **"انرژی باد: مبانی، تحلیل منابع و اقتصاد"**، نوشته **ساتیاژیت متیو**، یکی از جامع‌ترین منابع در زمینه انرژی باد است که به بررسی اصول پایه‌ای، روش‌های تحلیل منابع بادی و جنبه‌های اقتصادی این فناوری می‌پردازد. این کتاب نه تنها برای دانشجویان و پژوهشگران رشته‌های مهندسی انرژی و محیط‌زیست مفید است، بلکه برای متخصصان و فعالان صنعت انرژی باد نیز مرجعی ارزشمند محسوب می‌شود.

در این کتاب، نویسنده با زبانی ساده و علمی، مفاهیم پایه‌ای انرژی باد، تئوری‌های آیرودینامیکی توربین‌های بادی، روش‌های اندازه‌گیری و تحلیل داده‌های باد، و همچنین سیستم‌های تبدیل انرژی باد به برق و آب را تشریح می‌کند. علاوه بر این، مباحثی مانند تأثیرات زیست‌محیطی انرژی باد و تحلیل اقتصادی پروژه‌های بادی نیز به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

ترجمه این کتاب با هدف دسترسی بیشتر جامعه فارسی‌زبان به دانش روز انرژی باد و کمک به توسعه این فناوری در کشور انجام شده است. امیدواریم این اثر بتواند گامی هرچند کوچک در جهت افزایش آگاهی و دانش در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر و توسعه پایدار بردارد.

در پایان، از تمامی عزیزانی که در فرآیند ترجمه و انتشار این کتاب همکاری کرده‌اند، صمیمانه تشکر می‌کنیم. همچنین از خوانندگان گرامی تقاضا داریم که با ارائه نظرات و پیشنهادات خود، ما را در بهبود کیفیت آثار آینده یاری نمایند.

وحید ربیعی فرادنبه

سعید ربیعی

پیش‌گفتار مؤلّف

افزایش تقاضای انرژی و آگاهی نسبت به مسائل محیط زیست، علاقه انسان به انرژی باد را مجددا برانگیخته است. در نتیجه، باد بعنوان منبع انرژی با سریع‌ترین رشد در جهان امروز محسوب می‌شود. در حال حاضر چارچوب‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌های عملی متعددی برای تامین حداقل ۲۰ درصد از تقاضای انرژی از طریق انرژی‌های تجدیدپذیر تا سال ۲۰۱۰ تدوین شده است و در این میان انرژی باد نقش‌آفرینِ اصلی خواهد بود.

با توجه به رشد سریع صنعت باد، دانشگاه‌های سراسر جهان در دوره های کارشناسی و کارشناسی ارشد خود تاکید زیادی بر فن‌آوری انرژی بادی دارند. برنامه‌های دانشگاهی، دانشجویان از رشته‌های متنوع از علوم اجتماعی گرفته تا مهندسی و فن آوری را جذب می‌کنند. مبانی و اصول تبدیل انرژی باد که در فصل های اولیه این کتاب مورد بحث قرار می‌گیرند، این دانشجویان را بعنوان گروه هدف در نظر دارند. ابزارهای تحلیل منابعِ پیشرفتهِ بکار گرفته شده در این کتاب، برای دانشگاهیان و محققانی که در این حوزه کار می‌کنند، بسیار مفید هستند. نرم افزار تحلیل منابع انرژی بادی (WERA) که در این کتاب ارائه شده است، ابزاری موثر برای متخصصان انرژی باد جهت ارزیابی پتانسیل انرژی و شبیه سازی عملکرد توربین در آینده محسوب می‌شود.

فصل مقدماتی، تاریخچه توسعه فن آوری انرژی باد به همراه وضعیت کنونی و چشم انداز آینده آن را روایت می‌کند. پس از آن فصل دوم اصول اساسی تبدیل انرژی باد را ارائه می دهد. توضیحات مربوط به انواع مختلف ماشین های بادی و عملکرد آن‌ها در این فصل خلاصه شده اند. اصول آیرودینامیک روتور بادی و کاربرد آن در طراحی توربین نیز در این فصل ارایه شده اند.

فصل سوم به روش‌های اندازه‌گیری و تحلیل طیف‌های باد برای استفاده از انرژی اختصاص دارد. روش‌های آماری برای تحلیل انرژی باد در اینجا معرفی می‌شوند. این روش‌ها بیشتر برای توسعه مدل‌هایی جهت تخمین پتانسیل انرژی باد گسترش می یابند.

ویژگی‌های ساختاری سیستم‌های مختلف و زیرسیستم‌های یک سیستم تبدیل انرژی بادی (WECS) در فصل چهارم شرح داده شده اند. در کنار ژنراتورهای الکتریکی بادی، سیستم‌های پمپاژ آب با نیروی باد نیز در نظر گرفته می‌شوند. ویژگی‌های مزارع بادی، هم ساحلی و هم فراساحلی نیز در این فصل مورد بحث قرار می گیرند.

فصل پنجم به مدل‌های عملکرد WECS می پردازد. ابزارهای ویژه برای شبیه سازی عملکرد میدانی ژنراتورهای بادی و پمپ‌های آب در این بخش ارایه شده اند. تطبیق بهینه WECS با سایت (محل نصب) نیز مورد بحث قرار گرفته است.

فصل ششم به جنبه های زیست محیطی تبدیل انرژی باد اختصاص دارد. اگرچه مزایای زیست محیطی مربوط به انرژی باد را برجسته می‌کند، اما نگرانی های اخیر در مورد مسائل پرندگان، اثرات بصری، نویز

و غیره هم نادیده گرفته نمی‌شوند. یک رویکرد مبتنی بر چرخه حیات برای این مباحث اتخاذ شده است. اقتصاد تبدیل انرژی بادی در فصل هفتم، با پیروی از روش ارزش فعلی[۱] تحلیل شده است. عوامل موثر بر هزینه ها و منافعِ برق تولید شده توسط باد مورد بحث قرار می گیرند و شاخص های ارزیابی اقتصادی تکامل می یابند. نرم افزار تحلیل منابع انرژی بادی (WERA) که همراه با این کتاب عرضه می‌شود، برای خوانندگانی که با تکنیک های عددی بکار رفته در تحلیل منابع بادی آشنا نیستند، مفید است. مثال های موجود در تمام فصل‌ها مکمل مفاهیم ارائه شده در متن هستند.

موضوعات ارائه شده در این کتاب در درجه اول برگرفته از تجربیات من در آموزش دانشجویان کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی هستند. تحقیقات و تجربیات میدانی من در زمینه WECS نیز در تدوین مطالب ارائه شده مفید بودند. علاوه بر این، خدمتگذاری چندین ساله من بعنوان یک شخص مرجع در برنامه های مختلف آموزشی در اتخاذ یک رویکرد چندرشته‌ای برای پرداختن به موضوعی مانند انرژی باد مفید بوده است. از این رو می خواهم از همه دانشجویانم به خاطر کمک هایشان تشکر کنم.

جمع آوری اطلاعات از منابع مختلف برای تدوین چنین کتابی ضروری است. از نویسندگان مقالات و گزارش های پژوهشی که در فصل های مختلف این کتاب به آن‌ها اشاره شده است، تشکر می کنم. چندین صنعت و سازمان با ارائه اطلاعات و مطالبی که برای این پروژه ضروری بودند، از من حمایت کردند. من بصورت ویژه از شرکت برق هاوایی، شرکت سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر، شرکت ابزار دقیق تالس[۲]، وایسالا اویج[۳]، انرژی باد زیمنس[۴]، ریسافت[۵] و ویکی پدیا در این زمینه تشکر می کنم.

خوشبختانه من از حمایت همه جانبه اساتید و همکارانم برای این پروژه برخوردار بودم. اجازه دهید از پروفسور کی. آی. کوشی، پروفسور سی. پی. محمد و پروفسور جیپو جاکوب به خاطر مطالعه و بررسی این دست نوشته تشکر کنم. از همکاری پروفسور آنیلکومار و دکتر دامودار رائو در توسعه WERA صمیمانه تشکر می کنم. همچنین از پروفسور جان دی برتون، پروفسور کی پی پاندی، پروفسور آشوک الکس فیلیپ، پروفسور ویشنو بی، دکتر دالین دی و نیشا تی وی، برای کمک به مراحل مختلف این کار صمیمانه قدردانم.

از پیشنهادهای شما برای بهبود محتوای این کتاب در آینده استقبال می‌کنیم.

ساتیاجیت متئو

---

[۱] Present worth method

[۲] THALES instruments

[۳] Vaisala Oyj

[۴] Siemens Wind Power A/S

[۵] ReSoft

فهرست مطالب

۱ فصل اول : مقدمه ۹
۲ فصل دوم: اصول تبدیل انرژی باد ۱۹
۲,۱ انرژی موجود در طیف های باد ۱۹
۲,۲ انرژی و گشتاور توربین بادی ۲۲
۲,۳ طبقه بندی توربین‌های بادی ۲۴
۲,۴ مشخصه‌های روتورهای بادی ۳۱
۲,۵ آیرودینامیک توربین‌های بادی ۳۲
۲,۶ طراحی روتور ۴۳
۲,۷ عملکرد روتور ۴۹
۳ فصل سوم: تحلیل رژیم های باد ۵۳
۳,۱ باد ۵۴
۳,۲ اندازه گیری باد ۶۳
۳,۳ تحلیل داده های باد ۷۲
۳,۴ تخمین انرژی رژیم های باد ۹۰
۴ فصل چهارم: سیستم تبدیل انرژی بادی ۹۹
۴,۱ ژنراتورهای الکتریکی بادی ۱۰۰
۴,۲ مزارع بادی ۱۲۸
۴,۳ مزارع بادی فراساحلی ۱۳۲
۴,۴ پمپ‌های بادی ۱۳۵
۵ فصل پنجم: عملکرد سیستم‌های تبدیل انرژی بادی ۱۵۵
۵,۱ منحنی توان توربین بادی ۱۵۶
۵,۲ انرژی تولید شده توسط توربین بادی ۱۶۰
۵,۳ ضریب ظرفیت ۱۶۴
۵,۴ تطبیق توربین با رژیم باد ۱۶۸
۵,۵ عملکرد سیستم‌های پمپاژ با نیروی باد ۱۷۳
۶ فصل ششم: انرژی باد و محیط زیست ۱۸۷
۶,۱ مزایای زیست محیطی انرژی باد ۱۸۸

۶,۲ تحلیل چرخه حیات ۱۹۱
۶,۳ مشکلات زیست محیطی انرژی باد ۲۰۱
۷ فصل هفتم: اقتصاد انرژی باد ۲۱۷
۷,۱ عوامل موثر بر اقتصاد انرژی باد ۲۱۸
۷,۲ رویکرد «ارزش فعلی» ۲۲۴
۷,۳ هزینه انرژی باد ۲۲۸
۷,۴ منافع حاصل از انرژی باد ۲۳۴
۷,۵ معیارهای شایستگی اقتصادی ۲۳۵
۷,۶ کاهش مالیات به دلیل استهلاک سرمایه گذاری ۲۴۱
۸ پیوست ۲۴۵

فصل اول : مقدمه

«از میان تمام نیروهای طبیعت، به نظر من باد بیش ترین قدرت را در خود جای داده است»
آبراهام لینکلن

انرژی یکی از نهاده های حیاتی برای توسعه اجتماعی - اقتصادی است. نرخ مصرف انرژی یک ملت اغلب نشان‌دهنده سطح رفاهی است که می‌تواند بدست یابد. رفاه اجتماعی و اقتصادی را می توان با شاخص توسعه انسانی (HDI) اندازه‌گیری کرد. این شاخص تحت برنامه توسعه سازمان ملل متحد (UNDP) توسعه یافته است. ثابت شده است اکثر کشورهای توسعه یافته با HDI بالا، مصرف سرانه انرژی در محدوده ۴۰۰۰ تا ۹۰۰۰ کیلوگرم نفت در سال دارند [۱۴]. از سوی دیگر، کشورهای در حال توسعه با مصرف سرانه انرژی کمتر (کمتر از ۵۰۰ کیلوگرم نفت برای اکثر کشورها) می‌توانند به HDI کمتر از ۰,۵ دست یابند. برای HDI بالاتر از ۰,۸، مصرف سرانه انرژی باید حداقل تا سطح ۱۰۰۰ کیلوگرم نفت افزایش یابد. جمعیت جهان روز به روز در حال افزایش است. رشد جمعیت در کشورهای در حال توسعه سریع تر از کشورهای صنعتی است [۴]. در نتیجه این رشد جمعیت و فعالیت های توسعه ای، تقاضای انرژی نیز در حال افزایش است. در طول ۱۰ سال گذشته، مصرف انرژی در کشورهای صنعتی با نرخ ۱,۵ درصد در سال افزایش یافته است. همین تغییر در کشورهای در حال توسعه ۳,۲ درصد است [۱۴]. با حاکم شدن این روند، تقاضای جهانی انرژی در سال های آینده به طور قابل توجهی افزایش خواهد یافت. پیش‌بینی آینده نشان می دهد که کل عرضه انرژی اولیه (TPES) باید تا سال ۲۰۱۰ به ۱۲۱۰۰ مگا تن نفت و تا سال ۲۰۳۰ به ۱۶۳۰۰ مگا تن نفت افزایش یابد [۵]. تقاضای جهانی انرژی از منابع مختلفی تامین می‌شود. سوخت های فسیلی شامل زغال سنگ، نفت و گاز طبیعی حدود ۸۰ درصد از نیازها را برآورده می‌کنند [۱۵]. سهم انرژی هسته ای تقریبا ۷ درصد است. انرژی های تجدیدپذیر ۱۳,۷ درصد از تقاضا را تامین می‌کنند که زیست‌توده و انرژی آبی سهم عمده ای از آن را به خود اختصاص می دهند. در حال حاضر، سهم انرژی های تجدیدپذیر جدید (بادی، خورشیدی و غیره) تنها ۲,۲ درصد است. از این رو، اگر سناریوی فعلی ادامه پیدا کند، باید برای تامین نیازهای انرژی خود به شدت به سوخت های فسیلی متکی باشیم.

متاسفانه سوخت های فسیلی منابع محدودی هستند و روزی به طور کامل از بین خواهند رفت. ذخایر اثبات شده زغال سنگ تنها ۵۶۶ میلیارد گیگا تن هستند. به طور مشابه، ذخایر نفت و گاز طبیعی به ترتیب محدود به ۱۴۳ گیگا تن و ۱۳۸ گیگا تن هستند. حتی با نرخ مصرف فعلی ۲,۲۶ گیگا تن در سال، ذخیره زغال سنگ تنها برای ۲۵۰ سال آینده کافی است.

ذخایر نفت و گاز طبیعی نیز با وضعیت مشابهی روبرو هستند. اگرچه ما می توانیم ذخایر جدیدی از این منابع را کشف کنیم، اما میزان کشف در ۴۰ سال گذشته رو به کاهش بوده است. از این رو، اگرچه تقاضای

انرژی ما روز به روز در حال افزایش است، اما منابع موجود در حال از بین رفتن هستند. این مساله قطعا ما را به سمت بحران انرژی مورد بحث سوق خواهد داد. با این حال، این بحران ممکن است قریب الوقوع نباشد زیرا مقیاس زمانی ممکن است به دلیل کشف منابع جدید طولانی تر شود. اثرات نامطلوبِ زیست محیطی نیروگاه های مبتنی بر سوخت فسیلی، به این مشکل می افزاید. این نیروگاه ها جو را از گازهای گلخانه ای (GHG) و ذرات معلق پر می‌کنند که منجر به گرم شدن کره زمین و تغییرات آب و هوایی می‌شود. تولید و مصرف انرژی مسئول ۵۰ تا ۶۰ درصد از GHG آزاد شده در جو هستند. انتظار می رود با افزایش مصرف انرژی، آلودگی های جوی بخش انرژی در آینده نزدیک بیشتر شود. مطالعات متعددی در سطح جهانی در حال انجام هستند تا ابزارها و اقداماتی را برای کاهش سطح آلودگی جوی ناشی از فعالیت های انسانی ارائه کنند. پروتکل کیوتو و اجلاس ژوهانسبورگ چند گام مثبت به سوی جهانی عاری از کربن محسوب می‌شوند. به طور گسترده توافق شده است که برای کاهش سطح آلایندگی، حداقل ۱۰ درصد از تامین انرژی ما باید از منابع تجدیدپذیر باشد.

اینجاست که به اهمیت منابع انرژی پایدار مانند باد می رسیم. کوانتوم انرژی مرتبط با باد بسیار زیاد است. با فن آوری امروز، باد یک منبع انرژی سازگار با محیط زیست و اقتصادی است که می‌تواند در مقیاس تجاری مورد استفاده قرار گیرد. تاریخچه تبدیل انرژی بادی به همراه وضعیت کنونی و چشم انداز آینده بطور خلاصه در بخش های ذیل مورد بحث قرار می گیرند.

۱,۱ تاریخچه انرژی باد

تلاش های بشر برای مهار انرژی باد به دوران باستان بر می گردد، زمانی که از بادبآن‌ها برای پیش راندن کشتی ها و قایق ها استفاده می شد. بعدها، انرژی باد با راه اندازی آسیاب های غلات و پمپ های آب به بشر خدمت کرد. این فن آوری در طول تحول خود از دستگاه های خام و سنگین به ماشین های کارآمد و پیچیده امروزی، مراحل مختلفی از توسعه را پشت سر گذاشت. در مورد منشا مفهومِ استفاده از باد بعنوان مولد نیروی مکانیکی اختلاف نظر وجود دارد. برخی بر این باورند که این مفهوم از بابل باستان نشات گرفته است. حمورابی امپراتور بابل قصد داشت از نیروی باد برای پروژه جاه طلبانه آبیاری خود در قرن هفدهم قبل از میلاد استفاده کند [۳]. برخی دیگر استدلال می‌کنند که محل تولد آسیاب های بادی کشور هندوستان است. در آراتاسترا، یک اثر کلاسیک به زبان سانسکریت نوشته شده توسط کاتیلیا در طول قرن چهارم قبل از میلاد، اشاراتی به بالا بردن آب با کمک باد شده است [۱۲]. با این حال، هیچ سندی وجود ندارد که ثابت کند این مفاهیم به سخت افزارهای واقعی تبدیل شده اند.

اولین طرحِ مستند از آسیاب بادی به ۲۰۰ سال قبل از میلاد بازمی گردد. ایرانیان در این دوره از آسیاب های بادی برای آسیاب کردن غلات استفاده می کردند. آن‌ها ماشین های محور عمودی بودند که بادبآن‌هایی با دسته های نی یا چوبی داشتند. سنگ آسیاب به محور عمودی متصل بود. بادبان‌ها با استفاده از پایه‌های افقی به شفت مرکزی متصل می شدند.

شکل ۱,۱: آسیاب بادی باستانی در جزایر بریتانیا

اندازه بادبآن‌ها با استفاده از مواد به کار رفته در ساخت آن تعیین می شد که معمولا ۵ متر طول و ۹ متر ارتفاع دارند. تا قرن سیزدهم، آسیاب های غلات در بیشتر اروپا محبوب بودند. فرانسوی ها این فن آوری را تا سال ۱۱۰۵ میلادی و انگلیسی ها تا سال ۱۱۹۱ میلادی به کار بردند برخلاف طرح ایرانی که مبتنی بر محور عمودی بود، آسیاب‌های اروپایی محور افقی داشتند. این آسیاب ها سازه های زیبایی داشتند. سطح مقطع برج مدور یا چند ضلعی بود و با چوب یا آجر ساخته می‌شد. جهت گیری روتور به سمت باد با تنظیم دستی بخش دم انجام می‌شد. آسیاب با چرخش روتور بر خلاف جهت باد یا برداشتن پارچه پوشاننده روتور، در برابر بادهای شدید محافظت می شد. هلندی ها با طراح مشهور خود یان آدریاتیک، پیشگامان ساخت این آسیاب ها بودند. آن‌ها به پیشرفت های زیادی در طراحی رسیدند و چندین نوع آسیاب اختراع کردند. نمونه هایی از این نوع آسیاب ها، آسیاب‌های Tjasker و Smock هستند. روتورها با پروفیل ایرفویل خام برای بهبود کارایی ساخته شدند. جدای از آسیاب کردن غلات، آسیاب های بادی برای تخلیه زمین های باتلاقی در هلند به کار گرفته می شدند. این آسیاب های بادی تا اواسط سال

۱۷۰۰ از طریق مهاجران هلندی به آمریکا رسیدند.

شکل ۱,۲: یک مزرعه بادی قدیمی اسپانیایی

پس از آن آسیابِ بادی پمپاژکننده آب مطرح شد که هنوز هم بعنوان یکی از موفق ترین کاربردهای نیروی باد در نظر گرفته می‌شود. توربین بادی چندپره آمریکایی تا اواسط سده ۱۸۰۰ در تاریخچه انرژی بادی مطرح شد. روتورهای نسبتا کوچک تر، با قطر یک تا چند متر، برای این کاربرد مورد استفاده قرار گرفتند. انگیزه اصلی، پمپاژ آب از چند متر پایین‌تر از سطح زمین برای مصارف کشاورزی بود. این پمپ های آب، با پره‌های فلزی و طراحی مهندسی بهتر، عملکرد میدانی مطلوبی داشتند. تنها در ایالات متحده، بین سال های ۱۸۵۰ تا ۱۹۳۰، بیش از شش میلیون از این واحدها نصب شدند. دوران ژنراتورهای الکتریکی بادی نزدیک به سال ۱۹۰۰ آغاز شد. اولین توربین بادی مدرن که به طور خاص برای تولید برق طراحی شده بود، در سال ۱۸۹۰ در دانمارک ساخته شد و برق مناطق روستایی را تامین کرد. در همین دوره، یک ژنراتور الکتریکی بادی بزرگ با روتور ۱۷ متری «حصارپیچ» در کلیولند اوهایو ساخته شد. برای اولین بار جعبه‌دنده شتاب‌گر[۶] در این طرح معرفی شد. این سیستم به مدت ۲۰ سال کار کرد و توان اسمی ۱۲ کیلووات را تولید کرد. در این دوره روش‌های سیستماتیک تری برای طراحی مهندسی توربین‌ها اتخاذ شدند. این سیستم‌ها با روتورهای کم-صلبیت[۷] و پره‌های آیرودینامیکی می توانند عملکرد میدانی

[۶] Speed-up

[۷] Low-Solidity

چشمگیری داشته باشند. تا سال ۱۹۱۰، صدها دستگاه از این نوع، برق روستاهای دانمارک را تامین می کردند. تا حدود سال ۱۹۲۵، ژنراتورهای الکتریکی بادی به صورت تجاری در بازار آمریکا در دسترس قرار گرفتند. به طور مشابه، توربین‌های پره‌ای دو و سه پره با ظرفیت ۰,۲ تا ۳ کیلووات برای شارژ باتری ها در دسترس قرار گرفتند.

توربین‌هایی با ظرفیت بیشتر نیز در این دوره توسعه یافتند. اولین سیستم در مقیاس خدمات شهری در سال ۱۹۳۱ در روسیه نصب شد. یک توربین ۱۰۰ کیلوواتی در ساحل دریای خزر نصب شد، دو سال کار کرد و در حدود ۲۰ هزار کیلووات برق تولید کرد. پس از آن نیروگاه های بادی آزمایشی در کشورهای دیگر مانند ایالات متحده، دانمارک، فرانسه، آلمان و بریتانیای کبیر ساخته شدند. یک پیشرفت قابل توجه در سیستم‌های مقیاس بزرگ، توربین ۱۲۵۰ کیلوواتی بود که توسط پالمر سی. پوتمن ساخته شد. این توربین در سال ۱۹۴۱ در ناوب گرندپا در نزدیکی روتلند، ورمونت مورد استفاده قرار گرفت [۸]. روتور ۵۳ متری آن روی یک برج ۳۴ متری نصب شد. این دستگاه می توانست با تغییر تاب پره به سرعت ثابت روتور دست یابد. این دستگاه در طول پنج سال آینده، یعنی تا زمانی که پره‌ها در سال ۱۹۴۵ شکسته شدند، به مدت ۱۱۰۰ ساعت کار کرد. این پروژه یک موفقیت بزرگ محسوب می‌شود زیرا می‌تواند امکان سنجی فنی تولید برق بادی در مقیاس بزرگ را نشان دهد.

در این دوره طرح های جالبی از توربین بادی آزمایش شدند. داریوس جی جی ام، مهندس فرانسوی، طرح توربین داریوس را در سال ۱۹۲۰ به ثبت رساند که در سال ۱۹۳۱ در ایالات متحده بعنوان یک اختراع جدید ثبت شد [۹]. برخلاف روتورهای محور افقی رایج، توربین‌های داریوس پره‌های منحنی باریکی داشتند که حول محور عمودی خود می چرخیدند. در همین دوره، جولیوس دی ماداراس توربینی اختراع کردند که روی اثر مگنوس کار می کرد. اثر مگنوس اساسا از نیروی وارد بر یک استوانه چرخان قرار گرفته در جریان هوا به دست می آید. پیشرفت مهم دیگر در این زمان روتور ساوونیوس در فنلاند بود که توسط اس جی ساوونیوس اختراع شد. این روتور از دو نیمه یک استوانه که به صورت طولی از هم جدا شده اند و به صورت شعاعی روی یک شفت عمودی قرار گرفته اند، ساخته شد. سطح مقطع عرضی روتور شبیه حرف S است. روتور توسط اختلاف در نیروهایِ پسا[۸] اعمال شونده بر روی نیمه های مقعر و محدب آن در مقابل باد هدایت می‌شود.

تحقیقات گسترده ای در مورد رفتار توربین‌های بادی در طول دهه ۱۹۵۰ صورت گرفت. مفهوم توربین‌های کم-صلبیت با نسبت سرعت نوک بالا در این دوره معرفی شدند. بعنوان مثال، روتورهای سرعت ثابت با وزن سبک در سال ۱۹۶۸ در آلمان توسعه یافتند. آن‌ها پره‌های شیشه‌ای فیبری داشتند که به برج های توخالی ساده متصل شده بودند و توسط طناب های محکم حمایت می شدند. بزرگ ترین توربین از این

[۸] Drag

نوع ۱۵ متر قطر داشت و توان خروجی اش ۱۰۰ کیلووات بود.

در سال های بعد، برق ارزان تر و قابل اطمینان تری که از نیروگاه های مبتنی بر سوخت فسیلی تولید می شد، در دسترس قرار گرفت. هنگامی که در سال ۱۹۴۰ برق تولید شده از باد ۱۲ تا ۳۰ سنت بر کیلووات ساعت هزینه داشت، همان برق تولید شده از منابع دیگر با ۳ تا ۶ سنت بر کیلووات ساعت در دسترس بود [۷]. هزینه برق حاصل از سوخت‌های فسیلی نیز تا سال ۱۹۷۰ به کمتر از ۳ سنت بر کیلووات ساعت کاهش یافت. سوخت های فسیلی در آن زمان به مقدار زیاد با نرخ نسبتا ارزان تر در دسترس بودند. چندین پروژه انرژی هسته ای نیز آغاز شدند، با این باور که منبع نهایی برای تامین نیازهای انرژی آینده خواهند بود. بنابراین، علاقه به انرژی باد به تدریج به ویژه تا سال ۱۹۷۰ کاهش یافت.

با این حال، بحران نفت در سال ۱۹۷۳، دانشمندان، مهندسان و سیاست گذاران را مجبور کرد تا تفکر خود در مورد وابستگی به سوخت های فسیلی را تغییر دهند. آن‌ها متوجه شدند که سیاست‌ها می توانند دسترسی را محدود کرده و هزینه سوخت های فسیلی را افزایش دهند. علاوه بر این، مشخص شد که ذخیره سوخت های فسیلی روزی تمام خواهد شد. انرژی هسته ای به دلایل ایمنی برای بسیاری غیرقابل قبول بود. این عوامل باعث احیای علاقه به انرژی باد شد. تحقیقات در مورد تحلیل منابع، توسعه سخت افزار و تکنیک‌های کاهش هزینه تشدید شدند. ایالات متحده توسعه توربین‌های بادی بزرگ را به سازمان ملی هوانوردی و فضایی (ناسا) خود سپرد.

شکل ۱,۳: توربین بادی MOD OA

در نتیجه، مجموعه‌ای از توربین‌های محور افقی به نام‌های $MOD-0$، $MOD-1$، $MOD-2$ و $MOD-5$ توسعه یافتند [۶]. این پروژه ها به دلایل مختلف تا اواسط دهه ۱۹۸۰ متوقف شدند. در همین دوره، دانشمندانِ آزمایشگاه های سندیا تحقیقات خود را بر روی طراحی و توسعه توربین داریوس متمرکز کردند [۱۱]. آن‌ها در طول دهه ۱۹۸۰ چندین مدل از دستگاه داریوس را در اندازه های مختلف ساختند. تحقیقات و توسعه در زمینه انرژی باد در سال های بعد شدت گرفتند. چندین مفهوم نوآورانه مانند توربین ورتکس، طراحی تقویت شده با پخش‌کننده[۹]، روتور ماسگروو و غیره نیز در این دوران مطرح شدند. نمونه های اولیه این توربین‌ها ساخته و آزمایش شدند. با این حال، تنها طراحی پروانهِ محور افقی در مقیاس تجاری با موفقیت ظاهر شد.

۱,۲ وضعیت کنونی و چشم انداز آینده

با توجه به تعهد ما برای کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و تامین انرژی کافی برای جهانِ در حال توسعه، تلاش هایی برای تکمیل پایگاه انرژی با منابع تجدیدپذیر در حال انجام هستند. چندین کشور در حال حاضر چارچوب های سیاست خود را تدوین کرده اند تا اطمینان حاصل کنند که انرژی های تجدیدپذیر نقش موثری در سناریوی انرژی آینده ایفا می‌کنند. به عنوان مثال، اتحادیه اروپا قصد دارد تا سال ۲۰۱۰، ۲۲ درصد از تقاضای خود را از انرژی های تجدیدپذیر تامین کند.

شکل ۱,۴: یک مزرعه بادی

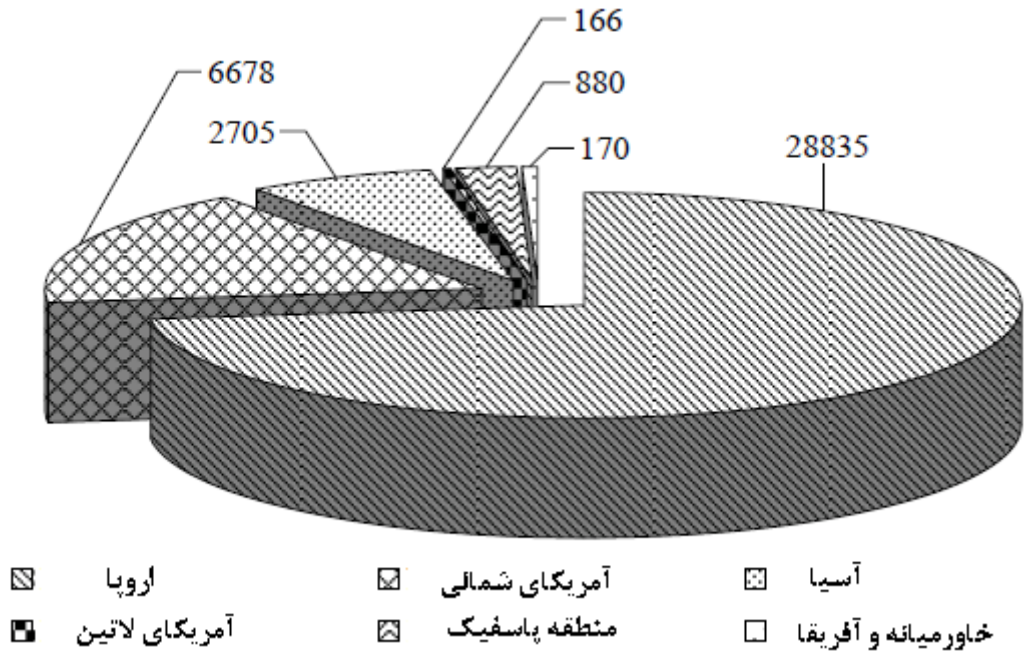
باد، به عنوان یک منبع تجدیدپذیر مقرون به صرفه و اقتصادی، نقش آفرین اصلی در رسیدن به این هدف خواهد بود. امروزه باد سریع ترین منبع انرژیِ در حال رشد جهان است و در پنج سال گذشته این جایگاه

[۹] Diffuser Augmented Design

را به صورت متوالی حفظ کرده است. ظرفیت جهانی انرژی بادی در طول پنج سال گذشته با ضریب ۴,۲ افزایش یافته است. کل ظرفیت نصب شده جهانی ۳۹۴۳۴ مگاوات در سال ۲۰۰۴ است. ظرفیت نصب شده در مناطق مختلف در شکل ۱,۵ نشان داده شده است. بیش از ۷۳ درصد از تاسیسات جهانی در اروپا هستند. آلمان پیشرو اروپاست و پس از آن اسپانیا و دانمارک قرار دارند. پنج کشور پیشرو در تولید انرژی بادی در جدول ۱,۱ فهرست شده اند. با افزایش فشار بر انرژی های تجدیدپذیر و کاهش هزینه برق تولید شده توسط باد، رشد انرژی بادی در سال های آینده ادامه خواهد یافت. براساس گزارش انجمن انرژی بادی اروپا (EWEA)، تاسیسات بادی با تولید ۲۳۰،۰۰۰ مگاوات می توانند ۱۲ درصد از تقاضای جهانی انرژی را تا سال ۲۰۱۰ تامین کنند [۱]. یعنی این بازاری به ارزش حدود ۲۵ میلیارد یورو است. ظرفیت نصب شده ممکن است تا سال ۲۰۲۰ به سطح ۱,۲ میلیون مگاوات برسد.

جدول ۱,۱: پیشروان جهانی در تولید انرژی بادی

کشور	ظرفیت نصب شده، مگاوات
آلمان	۱۴۶۰۹
آمریکا	۶۳۵۲
اسپانیا	۶۲۰۲
دانمارک	۳۱۱۵
هند	۲۱۲۰



شکل ۱,۵: ظرفیت انرژی بادی نصب شده (MW) در مناطق مختلف [۱۳]

همگام با رشد این صنعت، فن آوری انرژی بادی نیز در حال تغییر است. یکی از تغییرات ظاهری، گرویدن به سمت تاسیسات فراساحلی است و چندین پروژه جاه طلبانه دریایی در این زمینه مطرح شده اند. برای مثال، ۲۰ پروژه فراساحلی برای نصب در انگلستان تا سال ۲۰۰۶ برنامه ریزی شده اند با مجموع ظرفیت ۱۴۰۰ مگاوات [۱۶]. در آلمان، حدود ۳۰ پروژه فراساحلی به ارزش ۶۰،۰۰۰ مگاوات در مراحل مختلف ساخت قرار دارند. در ایالات متحده نیز فعالیت‌های فراساحلی در حال تشدید است. روند دیگر در این صنعت، رفتن به سمت دستگاه های بزرگ تر است. از آنجا که توربین‌های بزرگ تر از لحاظ هزینه واحد کیلووات ارزان تر هستند، این صنعت از مقیاس مگاواتی به مقیاس چندمگاواتی در حال رشد است. بخش ۲ مگاواتی به سرعت در حال رشد است. چندین کارخانه مانند RE Power Systems AG در حال ساخت توربین‌هایی حتی با اندازه ۵ مگاوات هستند. مدل RE Power به یک روتور بزرگ ۱۲۵ متری مجهز است که هر پره آن وزنی در حدود ۱۹ تن دارد. تلاش ها برای کاهش جرم کل سر (THM) (مجموع جرم ناسل و روتور) نیز ادامه دارد. کاهش در THM تاثیر مثبتی بر دینامیک سیستم دارد. همچنین NEG Micon با طراحی مهندسی هوشمندانه توانست THM مدل ۴,۲ مگاواتی خود را به ۲۱۴ تن محدود کند که دستاورد قابل توجهی است. به دلیل پشتیبانی از شبکه فعال و کارایی بهتر، گزینه سرعت متغیر با ژنراتور القایی از دوسو تغذیه[۱۰] اهمیت بیشتری در این صنعت پیدا می‌کند. مفهوم نوآورانه دیگری

[۱۰] Double fed induction generator

که ممکن است در آینده موثر واقع شود، ماشین‌های محرک مستقیم[۱۱] است.

فهرست مراجع

1. de Azua CR, Colasimone L (2003) Record growth for global wind power in 2002; 28% increase, wind technology worth $7.3 billion installed last year. AWEA-EWEA News release, Global Wind Power Installations, http://www.ewea.org
2. de Vries E (2003) Wind turbine technology trends – review 2003. Renewable Energy World 6(4): 154-167
3. Golding E (1976) The generation of electricity by wind power. Halsted Press, New York
4. International Energy Agency (2003) Energy balances of non-OECD Countries 2000-2001, Paris : IEA and OECD
5. International Energy Agency (2003) Key world energy statistics. France, http://www.iea.org
6. Johnson GL (2001) Wind energy systems. http://www.rpc.com.au
7. Kloeffler RG, Sitz EL (1946) Electric energy from winds. Kansas State College of Engineering Experiment Station Bulletin 52, Manhattan, Kans
8. Putnam PC (1948) Power from the wind. Van Nostrand, New York
9. Ramler JR, Donovan RM (1979) Wind turbines for electric utilities: Development status and economics. DOE/NASA/1028-79/23, NASA TM-79170, AIAA-79-0965
10. Savonius SJ (1931) The S-rotor and its applications. Mechanical Engineering 53(5) :333-338
11. Sheldahl RE, Blackwell BF (1977) Free-air performance tests of a 5-meter-diameter darrieus turbine. Sandia Laboratories Report SAND 77-1063
12. Sorensen B (1995) History of, and recent progress in, wind-energy utilization. Annual Review of Energy and the Environment 20(1) : 387-424
13. The Windicator (2005) Wind energy facts and figures from windpower monthly. Windpower Monthly News Magazine, Denmark, USA : 1-2
14. UNDP, World Energy Council (2004) World energy assessment: overview 2004 update. Bureau for development policy, New York : 25-31
15. World Energy Council (2000) World Energy Assessment: Energy and the challenge of sustainability. New York
16. Zaaijer M, Henderson A (2003) Offshore update – A global look at offshore wind energy. Renewable Energy World 6(4): 102-119

[۱۱] Direct drive machines