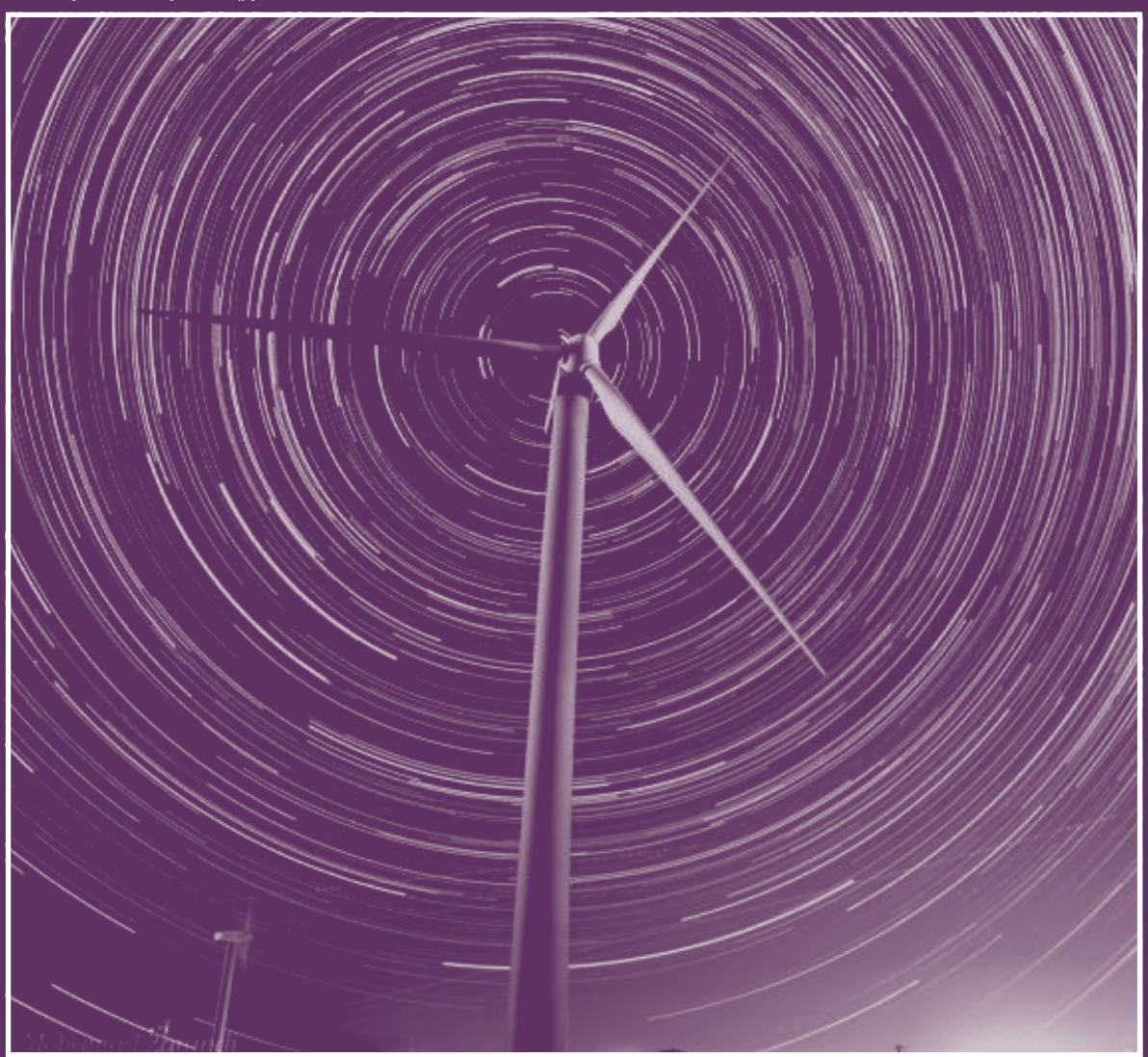
انرژی باد

- سیستم های باد
- توربین های بادی
- تکنولوژی استفاده از انرژی باد
- بررسی اقتصادی سیستم های بادی

نشریه شماره ۱۸، بهار ۱۳۷۳



RAH SHAHR
International Group
گروه بین المللی ره شهر

پیشگفتـــار

انرژی باد از زمـانهای دیر باز مـورد توجـه و اسـتـفادهٔ بشـر قـرار داشـتـه است که از آن جمله می‌توان به کشتیهای بادبانی و آسیابهای بادی اشاره کرد که سوابق بسیار دیرینه ای دارند.

استـفاده از انرژی باد در مـعماری، خود یکی از مـوارد اسـتـفاده این نـوع انرژی می‌باشد. بطور مثال بادگیرها در شهرهای حاشیهٔ کویر مرکزی ایران جهت سرمایش و تهویه ساختمانها طراحی و اجرا شده و می‌شوند.

در زمانی که از بادگیرها استفاده می‌شد، هنوز انرژی الکتریکی اختراع نشده بود ولی پس از اخـتـراع انرژی الکتـریکی، ابزار و ادواتی اخـتـراع گـردیدند کـه تـولیـد باد مـصنوعی می‌نمودند و از آنـها بـرای سـرمـایش و تهویه استفاده می‌شد.

با تـولیـد نیـروی برق، مـوفق شدند کـه انرژی باد را به انواع انرژیهـای دیگر تبدیل نمایند و بشر بالاخره به این مـهم دست یافت و دیگر مـشکلی بر سـر راه تبـدیل انـرژی به انواع دیگر وجـود نداشت، لیکن برای تولیـد انبوه الکتریسیته، نیاز بود که از سوخت های فسیلی استفاده گردد.

تولید الکتـریسیتـه با اسـتـفاده از نیـروی باد دارای مـحاسن زیادی است ولی جهت مصارف عمومی، فعلاً توجیه اقتصادی ندارد لیکن بشر متفکر خواهد توانست دامنهٔ ابداعات و اختـراعات خود را به حدی گسترش دهد که این نیز از نظر اقتصادی موجه گردد.

در کشور ما نیز مانند بسیاری از دیگر ممالك جهان، مناطق بادخیز وجود دارند و در بعضی از این نقاط که گاهاً دور افتاده نیز می‌باشند، مناطق مسکونی کم جمعیتی وجود دارد که نیاز به استفاده از الکتریسیته دارند و انتقال نیروی برق از طریق شبکهٔ سراسری و یا احداث نیروگاهی هر چند کوچك، هزینهٔ زیادی را به خود اختصاص می‌دهد که غیراقتصادی می‌باشد.

البته راههای دیگری برای تولید الکتریسیته وجود دارد که زیانی به محیط زیست نمی‌رسانند و آنها شامل استفاده از انرژیهای طبیعی از قبیل خورشید، امواج و گرمای زمین هستند ولی در این میان، استفاده از انرژی باد و انرژی خورشید در پیشرفته‌ترین مراحل تکامل خود هستند.

علیرغم اینکه ایران از نظر منابع سوختهای فسیلی یکی از غنی‌ترین کشورهای جهان است، ولی این رسالت بعهدهٔ نسل فعلی گذاشته شده که بهترین استفاده را از آنها بعمل آورد که البته سوزاندن نیست بلکه تبدیل آنها به مواد و مصالح جدید برای تقلیل میزان نیاز به انرژی و درعوض شناسائی راههای کسب انرژی از منابع جدید و کم زیان است.

سعید شهیدی

مدیر بخش تحقیقات و مطالعات

۱- انرژی باد

۱-۱- مقدمه

اختلاف حرارت حاصل از تابش خورشید در جو زمین باعث حرکت هوا می‌شود. این حرکت هوا را باد و انرژی حاصل از آن، انرژی باد نامیده می‌شود. از انرژی باد در زمانهای گذشته استفاده های مختلفی شده است که از مهمترین آنها می توان آسیاب های بادی و کشتیهای بادبانی را نام برد.

بادها را براساس سرعتشان به دسته های مختلفی می‌توان تقسیم‌بندی کرد. در جدول ۱-۱ بادها براساس دانسیتهٔ قدرت و سرعتشان به دو دسته یکی در ارتفاع ۱۰ متری و دیگری در ارتفاع ۵۰ متری تقسیم شده اند.

ارتفاع از سطح زمین	۱۰ متری (۳۳ فوت)		۵۰ متری (۱۶۴ فوت)	
انواع بادبر اساس قدرت	چگالی قدرت وات بر مترمربع	سرعت متر برثانیه	چگالی قدرت وات بر مترمربع	سرعت متربرثانیه
۱	۱۰۰	۴/۴	۲۰۰	۵/۶
۲	۱۵۰	۵/۱	۳۰۰	۶/۴
۳	۲۰۰	۵/۶	۴۰۰	۷/۰
۴	۲۵۰	۶/۰	۵۰۰	۷/۵
۵	۳۰۰	۶/۴	۶۰۰	۸/۰
۶	۴۰۰	۷/۰	۸۰۰	۸/۸
۷	۱۰۰۰	۹/۴	۲۰۰۰	۱۱/۹

جدول ۱-۱: تقسیم بندی‌بادها براساس چگالی قدرت و سرعت در ارتفاع ۱۰ و ۵۰ متری

در جدول ۲-۱ یك تقسیم بندی کلی نشان داده شده است.

سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری							اثرات قابل مشاهده	
درجه بندی بیوفورت	متربر ثانیه	کیلومتر ساعت	مایل بر ساعت	گره	توصیف	اثر باد بر روی توربین	امکان تولید قدرت برای متوسط سرعت	خشکی	دریا
۰	۰/۰ الی ۰/۴	۰/۰ الی ۱/۶	۰/۰ الی ۱	۰/۰ الی ۰/۹	آرام	بی‌تاثیر	ـــــ	دود سیگار عمودی بالا می‌رود	صاف مانند آینه
۱	۰/۴ الی ۱/۸	۱/۶ الی ۶	۱ الی ۴	۰/۹ الی ۳/۵	سبک	بی‌تاثیر	ـــــ	دود سیگار پراکنده می‌شود ولی بادنماها بی حرکت هستند	امواج کوچک
۲	۱/۸ الی ۳/۶	۶ الی ۱۳	۴ الی ۸	۳/۵ الی ۷	سبک	بی‌تاثیر	بی‌فایده	باد به شکل محسوسی در روی پوست احساس می‌شود ولی بادنماها بی‌حرکت هستند	امواج مشخص
۳	۳/۶ الی ۵/۸	۱۳ الی ۲۱	۸ الی ۱۳	۷ الی ۱۱	سبک	بعضی از توربین‌های ساخته شده برای بادهای کوچک استارت می‌شوند مانند پمپ آب	پمپ آب و قدرت الکتریکی جزئی	حرکت برگها، پرچمها حرکت می کنند	ستیغ امواج گاهی اوقات شکسته می‌شوند ولی دریا شفاف می‌باشد
۴	۵/۸ الی ۸/۵	۲۱ الی ۳۱	۱۳ الی ۱۹	۱۱ الی ۱۷	ملایم	توربین‌های چند پره‌ای استارت می‌شوند	تولید قدرت الکتریکی مفید	شاخه‌های کوچک حرکت می کنند، خاک بلند می‌شود و صفحات کتابها به هم می‌خورند	امواج بزرگتر شده و ستیغ امواج معمولاً سفید می‌باشد
۵	۸/۵ الی ۱۱	۳۱ الی ۴۰	۱۹ الی ۲۵	۱۷ الی ۲۲	تند	تولید قدرت مفید تا ۳۰ درصد ظرفیت کل	تولید قدرت الکتریکی کافی	درختان کوچک به حرکت در می‌آیند و باد برای عموم محسوس می‌باشد	ستیغ امواج در همه جا سفید می‌باشد

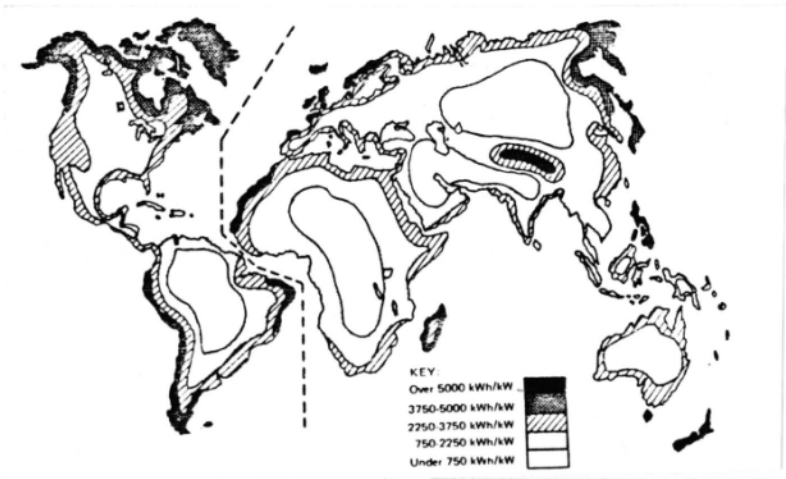
جدول ۲-۱: تقسیم بندی بادها براساس سرعت آنها

۶	۱۱ الی ۱۴	۴۰ الی ۱۵	۲۵ الی ۳۲	۲۲ الی ۲۸	قوی	قدرت اسمی	فقط برای ماشین‌های کوچک و تقویت شده	شاخه‌های بزرگ حرکت می کنند و خطوط تلفن سوت می‌زنند	امواج بزرگتر ظاهر می‌شوند و ستیغ امواج کف آلود می‌گردند
۷	۱۴ الی ۱۷	۵۱ الی ۶۳	۳۲ الی ۳۹	۲۸ الی ۳۴	قوی	درحداکثر ظرفیت	غیر قابل سکونت	تمام درختان به حرکت درمی‌آیند	کف امواج شروع به جدا شدن از سطح آنها می‌کند
۸	۱۷ الی ۲۱	۶۳ الی ۷۶	۳۹ الی ۴۷	۳۴ الی ۴۱	توفان	عملیات خروج از مدار اجرا می گردد	———	شاخه‌های کوچک شکسته می‌شوند و راه رفتن مشکل می‌گردد	رگه‌های متراکم کف بوسیلهٔ باد پرتاب می‌شود
۹	۲۱ الی ۲۵	۷۶ الی ۸۸	۴۷ الی ۵۵	۴۱ الی ۴۸	توفان	تمام ماشین‌ها تعطیل می‌شوند	———	خطرات ساختمانی کوچک مانند افتادن دودکش	پرتاب شدید کف
۱۰	۲۵ الی ۲۹	۸۸ الی ۱۰۳	۵۵ الی ۶۴	۴۸ الی ۵۶	توفان قوی	ضوابط خاص طراحی باعث رفع خطر می گردد	———	درختان از ریشه در می‌آیند و تخریب ساختمانی بسیاری بوجود می‌آید	موجهای بزرگ و بلند
۱۱	۲۹ الی ۳۴	۱۰۳ الی ۱۲۱	۶۴ الی ۷۵	۵۶ الی ۶۵	توفان قوی	فقط ماشین‌های تقویت شده جان سالم در می برند	———	تخریب فراوان	———
۱۲	بیشتر از ۳۴	بیشتر از ۱۲۱	بیشتر از ۷۵	بیشتر از ۶۵	گردباد	تخریب و خطر جدی	———	فقط درگرد بادهای استوانه‌ای اتفاق می‌افتد، نواحی روستایی ویران شده و شرایط فاجعه انگیزی بوجود می‌آید	کشتی‌ها در فرورفتگی امواج گم می‌شوند

ادامه جدول ۲-۱: تقسیم بندی بادها براساس سرعت آنها

براساس گزارشی که در کنفرانس انرژی باد در سال ۱۹۸۴ در اروپا ارائه شده است، حدود ۱۷۰۰۰ پتانسیل انرژی باد در کشورهای اروپایی برای سیستم‌های بادی با ارتفاع ۱۰۰ متر وجود دارد که دارای پتانسیل سالانه ۲×۱۰^{۱۲} کیلووات ساعت هستند و این خود دلیل خوبی است برای تداوم کار کسانی که سعی دارند از باد به عنوان منبع انرژی استفاده کنند.

کشورهای مختلف، نقشه‌هائی در مورد مناطق بادخیز تهیه کرده‌اند که می توان بوسیله آنها محل‌های مناسب جهت استفاده از انرژی باد را شناسائی نمود. در شکل ۱-۱ مناطق مختلف جهان براساس قدرت انرژی باد در آنها مشخص شده است.



منبع: وزارت انرژی ایالات متحده امریکا

شکل ۱-۱: برآورد انرژی باد در نقاط مختلف جهان

استفاده از انرژی باد در زمانهای گذشته اهمیت ویژه‌ای داشته است. به عنوان مثال در ابتدای قرن بیستم میزان استفاده از انرژی باد در دانمارک بین ۱۵۰ الی ۲۰۰ مگاوات بوده است و یك چهارم انرژی مربوط

به صنایع دانمارک از انرژی باد تامین شده است. با توسعه منابع نفتی و گازی، استفاده از انرژی باد کاهش یافت تا اینکه پس از بحران نفتی، مجدداً استفاده از این انرژی رو به صعود گذاشت.

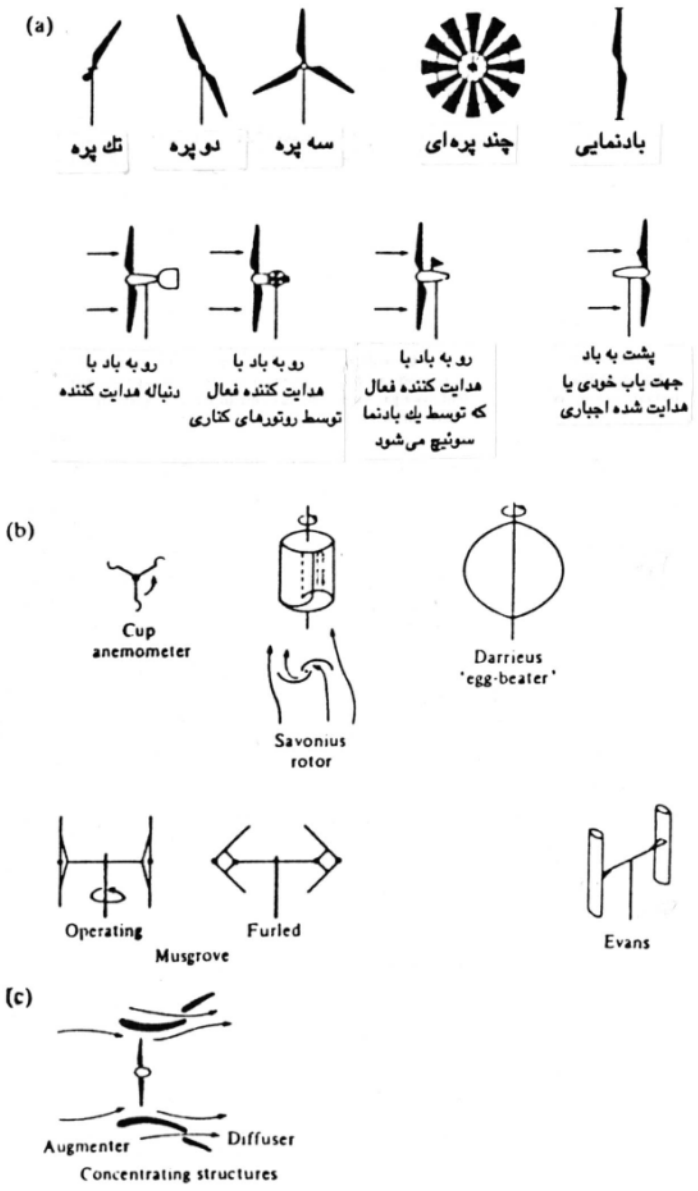
۲-۱- ساختمان توربین‌های بادی

درعصر حاضر برای استفاده از انرژی باد معمولاً از توربین های بادی استفاده می‌شود که این توربین‌ها بسته به جهت محور توربین، به دو دستهٔ توربین‌های افقی و عمودی تقسیم می‌شوند.

درشکل ۲-۱ انواع توربین‌های بادی مشخص شده‌اند. با توجه به شکل، سیستم‌های افقی از دو نوع رو به باد (Upwind) و پشت به باد (Downwind) هستند و سیستم‌های عمودی مختلفی نیز همچونMusgrove، Darrieus، Evansو Savonius و غیره وجود دارند. بجز سیستم (Darrieus) بقیه سیستم‌های عمودی نیاز به مطالعه و تحقیق بیشتری دارند که امید می‌رود در آینده این امکان بوجود آید.

سیستم‌های عمودی، به دلیل اینکه می‌توان در آنها بدون تغییر جهت محور حرکت، ژنراتور را در قسمت پایین و نزدیک زمین قرار داد و همچنین به موجب سهولت نگهداری، ارزان و ساده بودن ساختمان و اینکه عملکرد آنها به جهت باد بستگی ندارد، مورد اهمیت قرار گرفته‌اند.

سیستم‌هائی با قدرت بالاتر از ۲۰ کیلووات افقی، از سه بال استفاده می‌کنند و بال‌ها به صورت رو به باد (Upwind) قرار می‌گیرند (به علت اینکه در سیستم‌های پشت به باد (Downwind)، دکل باعث ایجاد اغتشاش



شکل ۲-۱: طبقه‌بندی توربین‌های بادی a) محور افقی b) محور عمودی c) متمرکز

در حرکت بادی که به بال ها می خورد، می‌شود). در سیستم‌های بزرگتر برای اینکه وزن بالها افزایش پیدا نکند، از دو بال استفاده می‌شود. هم‌اکنون در کشور آلمان سیستم‌هائی با تك بال نیز تحت مطالعه و ساخت هستند. جنس این بال ها می‌تواند از فایبرگلاس، آلومینیوم و یا چوب باشد.

سیستم های بادی بزرگ به صورت کوپل با ژنراتورهای AC طراحی شده‌اند. در ابتدا سیستم‌ها دارای ژنراتور DC بوده‌اند که استفاده از آنها به علت قدرت زیاد، راندمان و قابلیت خوب راه‌اندازی آنها بوده است ولی بعدها ژنراتورهای DC به علت گرانی بسیار و اینکه بایستی هر از چندگاه زغالهای آنها را عوض کرد و نیز برای اتصال آنها به شبکه باید از اینورتر استفاده شود، جای خود را به ژنراتورهای AC دادند.

در مورد قدرت توربین‌های بادی، می‌توان تقسیم‌بندی‌های متفاوتی را ارائه داد. به عنوان مثال می توان تقسیم‌بندی زیر را در نظر گرفت.

الف - خروجی کمتر از ۱۰ کیلووات، سیستم‌های بسیار کوچك

ب - خروجی بین ۱۰ الی ۱۰۰ کیلووات، سیستم‌های کوچك

ج - خروجی بین ۱۰۰ الی ۵۰۰ کیلووات، سیستم‌های متوسط

د - خروجی بیشتر از ۵۰۰ کیلووات، سیستم‌های بزرگ

۳-۱ کاربرد انرژی باد در کشورهای مختلف

از انرژی باد در زمینه‌های مختلفی استفاده می‌شود و می‌توان آنها را برحسب توان خروجی به سه دسته تقسیم بندی کرد.

الف - سیستم‌های خیلی کوچك (۱ الی ۲ کیلووات یا کمتر) که اغلب در

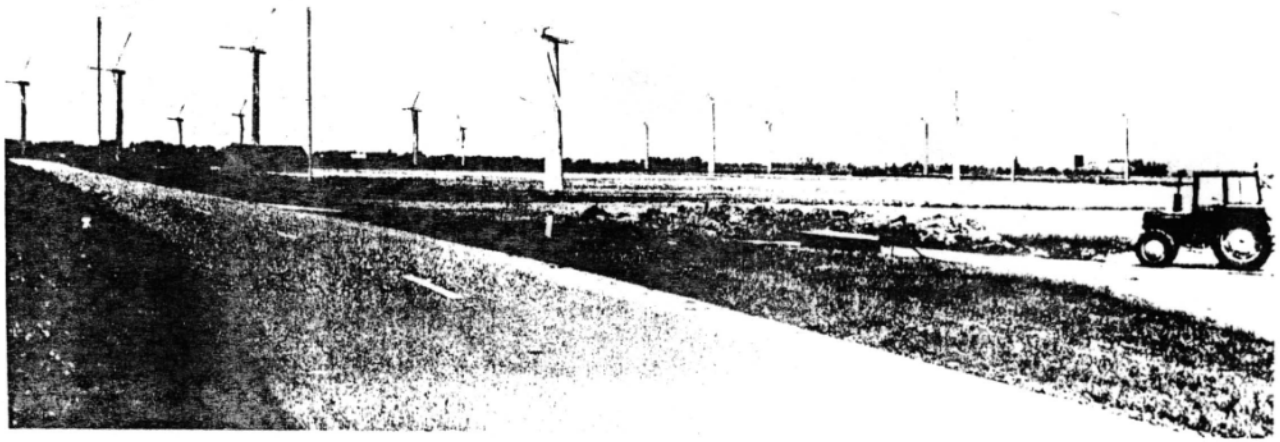
جاهای کوچك و دور افتاده مورد استفاده قرار می گیرند. این سیستم‌ها معمولاً در شارژ کننده باطری‌ها، سیستم‌های مخابراتی کوچك، تجهیزات نظامی و یا دریایی، و کاربردهای کوچك خانگی و یا آموزشی مورد استفاده واقع می‌شوند.

ب - سیستم‌های محلی و زراعتی (۳ الی ۴۰ کیلووات) که انرژی لازم برای ساختمانها، خشك‌کردن حبوبات و پمپاژ آب را تامین می‌کنند. این سیستمها می‌توانند جزئی از یك سیستم کوچك، که شامل دیزل ژنراتور و یا سیستم‌فتوولتائیك است، نیز باشند.

ج- سیستم‌های بزرگ (۱۵ الی ۱۰۰۰ کیلووات یا بیشتر) که الکتریسته تولید می‌کنند و به صورت یك واحد تنها و یا به صورت گروهی (که به آنها مزرعهٔ بادی Wind Farm گفته می‌شود) هستند.

شکل ۳-۱ یك مزرعه بادی در هلند را نشان می‌دهد که دارای هجده دستگاه توربین باد است وهرتوربین دارای قدرت ۳۰۰ کیلووات می‌باشد.

پس از بحران نفتی ۱۹۷۴، بسیاری از کشورها بر آن شدند که از انرژیهای غیر فسیلی مانند انرژی باد استفاده کنند که این خود باعث پیشرفت قابل ملاحظه‌ای در تکنولوژی استفاده از انرژی‌های بادی شد. از اینرو تنها در نیمه اول دههٔ‌هشتاد میلادی، حدود ۱۰۰۰۰ توربین باد در جهان نصب و راه اندازی شده است که بیشتر از نصف آنها دارای طول روتور (طول بالها) بیشتر از ۱۳ متر هستند.



شکل ۳-۱: شمای یك مزرعه بادی شامل ۱۸ توربین بادی که هر کدام دارای قدرت ۳۰۰ کیلووات می باشند

بعضی از کشورها در حال تشکیل انستیتوهایی برای آزمایش و وضع استانداردهایی برای تجهیزات بادی هستند. در اسکاتلند یك مرکز برای آزمایش توربین های کوچك و متوسط بادی بوسیله آزمایشگاه مهندسی ملی آن کشور تاسیس شده است. در دانمارك مرکز تست Ris استانداردهایی را برای توربین های تجارتی تدوین کرده است. در ایالات متحده کمیسیون انرژی کالیفرنیا، برنامه منظمی برای ارائه گزارش از نحوهٔ عملکرد مزارع بادی تنظیم کرده و دولت فدرال نیز خبرگزاری انرژی بادی آمریکا[1] را برای گسترش استانداردهای صنعتی ایجاد کرده است.

الف - انرژی بادی در ایالات متحده: جدول ۳-۱ نشان دهنده میزان انرژی بادی تولید شده در جهان در سال ۱۹۸۵ به صورت منطقه ای است. ملاحظه می شود که در حدود ۹۰ درصد انرژی حاصل از باد در مزارع بادی کالیفرنیا تولید شده است.

	شرکتهای سرمایه گذاری کالیفرنیا
۵۰/۰ درصد	ـ کمپانی برق و گاز پاسفیك
۳۸/۰ درصد	ـ کمپانی ادیسون در کالیفرنیای جنوبی
۵/۳ درصد	دانمارك
۱/۶ درصد	سازمان منابع آب کالیفرنیا
۱/۳ درصد	دیگر کشورهای اروپائی
۱/۳ درصد	دیگر مناطق ایالات متحده
۲/۸ درصد	بقیه جهان

منبع: موسسه انرژی باد امریکا

جدول ۳-۱: تولید انرژی باد در سال ۱۹۸۵ به صورت منطقه ای

۱- American Wind Energy Association

در پایان سال ۱۹۸۵، در حدود ۱۱۲۰ مگاوات انرژی بادی در ایالات متحده مورد بهره برداری قرار گرفته است که ۹۹ درصد این میزان، در مزارع باد کالیفرنیا بوده است. میزان انرژی حاصل از باد در آمریکا در سال ۱۹۸۵، در حدود ۶۶۲ میلیون کیلووات ساعت بوده است. براساس گزارش خبرگزاری انرژی باد ایالات متحده، از حدود ۱۳۰۰ژنراتور بادی در این کشور، انرژیی معادل ۱/۱ میلیون بشکه نفت حاصل شده است.

با گسترش مزارع بادی در ایالات متحده، تولید کنندگان نیز میزان قدرت دستگاههای خود را افزایش می‌دهند. در سال ۱۹۸۱ قدرت متوسط توربین‌ها ۵۲ کیلووات بوده است، درصورتی که درسال ۱۹۸۵ این میزان به ۱۱۲ کیلووات رسیده است.

تا سال ۱۹۸۵ در ایالات متحده حدود ۷۵ توربین با قدرت ۳۳۰ کیلووات از تولید کنندگان اروپایی خریداری شده است. سیستم‌های دانمارکی که وارد بازار آمریکا شده اند، دارای سه بال و از نوع پشت به باد (Downwind) هستند.

ژنراتورهای آنها آسنکرون و دکل‌های آنها فلزی است. سازندگان دانمارکی ترجیح می‌دهند که از سیستم هائی با زاویه بال متغیر استفاده کنند. (توضیح اینکه عمل تغییر زاویه برای کنترل و حفاظت سیستم در مقابل سرعتهای متفاوت است).

به منظور آشنایی با مشخصات سیستم‌های بادی، مشخصات چند توربین نصب شده در ایالات متحده را ذکر می کنیم.

- توربین با ۴۰ کیلووات قدرت و سرعت اسمی ۱۳/۴ متربرثانیه که در سرعت ۳/۶ متربرثانیه وارد مدار می‌شود و در سرعت ۲۲/۳ متربرثانیه از مدار خارج می‌شود. طول روتور آن ۱۳/۴ متر، از نوع پشت به باد (Downwind)، و دارای سه بال با زاویه متحرک است.

- توربین با ۱۰۰ کیلووات قدرت و سرعت اسمی ۱۲/۹ متربرثانیه که در سرعت ۵/۴ متربرثانیه وارد مدار شده و در سرعت ۱۸/۳ متربرثانیه از مدار خارج می‌شود. طول روتور آن ۱۷/۱ متر، از نوع پشت به باد (Downwind)، دارای سکان آزاد، کنترل کامپیوتری و برج سه پایه است.

- توربین با ۲۵۰ کیلووات قدرت و سرعت نامی ۱۷ متربرثانیه که در سرعت ۶/۳ متربرثانیه وارد مدار شده و در سرعت ۲۶/۸ متربرثانیه از مدار خارج می‌شود. از نوع توربین‌های عمودی است و طول روتور آن ۱۸/۳ متر است.

جدول ۴-۱، درصد سهم تولیدکنندگان جهان در ساخت توربین‌های بادی در سال ۱۹۸۵ را براساس میزان سطحی که بال‌ها جاروب می کنند نشان می‌دهد. نکته قابل توجه این است که فقط شرکت Flowind توربین‌هائی با محورهای عمودی تولید کرده است.

کمپانی	درصد شرکت در بازار
United States Windpower (US)	۲۰
Vestas (DK)	۱۳
Micon (DK)	۱۲
Flowind (US) (محور عمودی)	۷
ESI (US)	۷
Fayette (US)	۶
Bonus (DK)	۵
Nordtonk (DK)	۴
Wind - Matic (DK)	۴
Enertech (US)	۳
Howden (UK)	۳
دیگران	۱۸

منبع: موسسه انرژی باد امریکا

جدول ۴-۱ سازندگان پیشرو درساخت توربین‌های بادی
(برپایه سطح جارو شده توسط بال‌ها برای سال ۱۹۸۵)

ب - انرژی باد در دانمارک: استفاده از انرژی باد در دانمارک با نصب واحدهای تکی توربین‌های بادی آغاز شد و ۱۴۰۰ واحد به صورت جداگانه فروخته شد، سپس مزارع بادی شروع به کار کردند و در سال‌های ۱۹۸۴ و ۱۹۸۵، ۹ مزرعه بادی ساخته شد که قدرت توربین‌های انها بین ۵۵ تا ۹۵ کیلووات بود. توربین‌های ۷۵۰ مگاواتی و ۶۰۰ مگاواتی نیز برای مزارع جدیدتر درنظر گرفته شده‌اند.

در سال ۱۹۸۰، میزان قدرت انرژی بادی دانمارک ۵ مگاوات بوده است که

به ۳۶ مگاوات در سال ۱۹۸۴و۶۲ مگاوات در سال ۱۹۸۵ رسیده که این میزان برابر ۰/۳ تا ۰/۵ درصد کل انرژی مصرفی دانمارك بوده است. انرژی حاصل از ۱۱۶ توربین با ۷/۶ کیلووات قدرت در سال ۱۹۸۵ برابر ۱۲.۷۰۰.۰۰۰ کیلووات ساعت برآورد شده است.

انرژی بادی حاصل از توربین‌های ۵۵ کیلوواتی در سال ۱۹۸۵ برابر ۱۰۰ مگاوات ساعت بوده است. این میزان، رقمی در حدود دو برابر مقدارخود در سال ۱۹۸۰ یعنی ۵۰ مگاوات ساعت را نشان می دهد که این امر به دلیل بهبود تکنیکهای طراحی و ساخت، بدست آوردن قابلیت اطمینان بیشتر، برجهای بلندتر، افزایش سطحی که بالها جاروب می کنند، افزایش راندمان آئرودینامیکی و تبدیل انرژی، و انتخاب بهتر منطقه واحدها بوده است.

سیستم‌های ۷۵ و ۹۵ کیلوواتی با تکنولوژی جدیدتر به میزان ۶۰۰ تا ۷۰۰ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال انرژی تولید می کنند و این در مقابل ۵۵۰ کیلووات ساعت برمترمربع در سال ماشین‌های ۵۵ کیلوواتی، قابل توجه است.

جدول ۵-۱ هزینه نصب اجزاء یك توربین ۷۵ کیلوواتی دانمارکی را را براساس دلار ایالات متحده در سال ۱۹۸۵ نشان می‌دهد. با فرض هزینه نگهداری ۱۳۵۰ دلار در سال و ۲۰ سال عمر مفید و تولید سالانه ۱۵۰۰۰۰ کیلووات‌ساعت،هزینه‌انرژی‌این واحد برابر ۰/۶۲۵ دلار بر هر کیلووات ساعت خواهد بود.هدف دولت دانمارك این است که انرژیهای نو مخصوصاً انرژی باد، ۸ درصد انرژی آن کشور در سال ۲۰۰۰ را تامین کنند.

قیمت توربین باد	۵۸۱۲۵
پی و عملیات ساختمانی	۶۵۰۰
عملیات نصب	۵۰۰۰
شبکه برق	۵۰۰۰
هزینه مشاوره	۱۰۰۰
هزینه متفرقه	۱۲۵۰
کل	۸۱۸۷۵ دلار

جدول ۵-۱: هزینه نصب توربین های ۷۵ کیلوواتی دانمارکی
(براساس دلار سال ۱۹۸۵)

ج - انرژی باد در انگلستان: هزینه تولید الکتریسته توسط باد در سال ۱۹۸۹برابر ۳ تا ۵ پنس بر کیلووات ساعت بوده است که قابل مقایسه با واحدهای سوخت فسیلی و اتمی است. اگر توربین های بادی در انگلستان افزایش یابند می توانند انرژی معادل ۴۵ تراوات ساعت در سال تولید کنند که معادل ۱۷ درصد مصرف انرژی کنونی انگلستان است.

براساس مطالعاتی که انجام شده است، انرژی بادی می‌تواند از مصرف ۱ میلیون تن سوخت در سال ۲۰۰۰ جلوگیری کند و می‌تواند توانی معادل ۱۰۰۰ مگاوات را در سال ۲۰۰۵ تامین کند که معادل ۱ درصد انرژی الکتریکی لازم آن کشور است. اکنون چهارتوربین بادی آزمایشی در شمال منطقهٔ ولز کار می کنند و امید است دو عدد دیگر نیز اضافه شود. یك واحد سه مگاواتی نیز در اسکاتلند در حال کار است. سه مزرعه بادی

نیز در مرحله ساخت هستند که هر کدام دارای ۲۵ ماشین هستند و قدرت هر مزرعه برابر ۸ مگاوات خواهد بود.

لازم به توضیح است که اگر انرژی بادی بخواهد ۲۰ درصد نیاز کنونی انرژی را تامین کند، ۲۰۰۰۰ ماشین یك مگاواتی مشابه آنچه که اکنون در اسکاتلند مشغول بکار است، مورد نیاز می‌باشد. در انگلستان ۱۸۰۰۰۰ منطقه وجود دارد که برای توربین‌های بادی مناسب هستند ولی پارکهای ملی برای حفظ و زیبایی طبیعت، این مناطق را به ۱۴۴۰۰۰ منطقه ممکن کاهش داده اند.

د - دیگر کشورهای اروپایی نیز علاقمندی خود را نسبت به مزارع بادی نشان داده‌اند. کشور بلژیك در مرحلهٔ راه‌اندازی یك مزرعه بادی ۵ مگاواتی شامل بیست‌وپنج واحد توربین بادی است. هلند دارای یك مزرعهٔ بادی با قدرت ۲/۴ مگاوات است و درنظر دارد یك مزرعه بادی دیگر با قدرت ۵ مگاوات ایجاد کند. آلمان یك مزرعه بادی در یونان نصب کرده است تا شاید بتواند بازار مدیترانه را دراختیار بگیرد. در اسپانیا ۴ مزرعهٔ بادی کوچك در سال ۱۹۸۶ و شش مزرعهٔ دیگر درسال ۱۹۸۷ نصب شده است.

هـ - انرژی باددر آمریکای جنوبی: در آمریکای جنوبی امکان بهره برداری از انرژی باد برای استفاده در پمپ کردن آب چاهها و تولید الکتریسته با قدرتی در حدود ۱ الی ۲۰ مگاوات و با قیمت ارزان وجود دارد ولی دولتها هزینه‌ای برای این امر اختصاص نمی‌دهند و اکثر هزینه ساخت واحدهای بادی توسط دانشگاهها و یا انستیتوهای ملی تامین می‌شود.

براساس گزارش سازمان انرژی آمریکای جنوبی، چند ناحیه در مکزیک و نواحی ساحلی کلمبیا و ونزوئلا با سرعت متوسط باد ۵ متر بر ثانیه و بیشتر وجود دارد و چند ناحیه دارای باد با سرعت زیاد نیز در قسمت جنوبی آرژانتین و شیلی وجود دارد. براساس یك ارزیابی، ناحیه ای در آرژانتین وجود دارد که دارای دانسیتهٔ قدرت باد معادل ۵۰۰ وات بر مترمربع در ارتفاع ۵۰ متری می باشد.

پمپ های بادی هم اکنون در آمریکای جنوبی درجاهایی که فاقد شبکه برق است، به صورت وسیع (به عنوان نمونه در Pampas آرژانتین) مورد استفاده قرار می گیرند. با وجود این هنوز در بعضی موارد این پمپها خیلی گران هستند و برای سرعت های پائین قابل استفاده نمی باشند. در Las Gaviotas (کشو کلمبیا) پمپ های بادی با هزینه کم و برای سرعتهای پائین باد طراحی و ساخته شده است. این واحدها دارای ۵ بال با طول ۲/۲ متر بوده و قادر هستند با سرعت باد ۲ متر بر ثانیه نیز کار کنند. این سیستم ها می توانند در حالت عادی روزانه ۱۵۰۰ لیتر آب را از عمق ۱۰ متری پمپ کنند. حدود ۴۰۰۰ عدد از این نوع پمپها تا سال ۱۹۸۷ در آمریکای جنوبی نصب شده است و قصد بر آن بوده که هر ساله ۱۰۰۰ واحد دیگر نیز نصب و راه اندازی شود. در سال ۱۹۸۷ تعداد ۱۰۰ واحد از این توربین های بادی برای پمپ آب در آمریکای مرکزی نصب شده است.

از نظر تولید الکتریسته در آرژانتین، ۴ واحد ۱۰ کیلوواتی با ارتفاع ۱۰ متر و یك واحد با قدرت ۲۰ کیلووات از نوع توربین عمودی (Darrieus) نصب شده است. در برزیل واحدهائی بین ۲ الی ۲۰ کیلووات طراحی، ساخته و آزمایش شده اند و یك واحد بزرگ با قدرت ۱۰۰ کیلووات و

ارتفاع ۲۵ متر در مرحله طراحی است. در مکزیك دو مرکز آزمایش انرژی بادی وجود دارد، مرکز اول دارای قدرت ۸ کیلووات و طول بال ۵/۳ متر و مرکز دوم دارای دو توربین بادی است یکی با ارتفاع ۱۰ متر و قدرت ۱۰ کیلووات و دیگری یك پمپ آب با طول چهار متر و قدرت ۵ کیلووات. در یکی از دانشگاههای شیلی یك توربین از نوع (Darrieus) با بال های متغیر و یك توربین افقی با قدرت ۲۵ کیلووات طراحی و ساخته شده است.

و - انرژی باد در آسیا

کشور چین از نظر منابع انرژی باد دارای پتانسیل زیادی است. براساس بررسیهای انجام شده، متوسط دانسیتهٔ انرژی باد ۱۰۰ وات بر مترمربع و پتانسیل کلی آن کشور، $۱۰^{۹}$ کیلووات است.

براساس مطالعات انجام شده، مشخص گردیده است که بهترین نواحی چین از نظر انرژی باد، نواحی ساحلی و جزیره ای جنوب چین، نواحی ساحلی Bahai، قسمت شمالی مغولستان داخلی و چند ناحیهٔ دیگر است که متوسط سرعت باد در آن نواحی ۶ الی ۷ متربرثانیه است. بنابراین، کشور چین مستعد استفاده از انرژی بادی است.

این کشوراز نظر استفاده از انرژی باد دارای سابقهٔ تاریخی زیادی است. تا اواسط قرن حاضر هنوز چرخهای بادی سه باله زیادی در قسمت جنوبی چین بکار مشغول بودند. از سال ۱۹۶۰ که موتورهای الکتریکی و دیزلی گسترش پیدا کردند، استفاده از چرخهای بادی کمتر شد و از سال ۱۹۷۰ مجدداً استفاده از چرخهای بادی به عنوان انرژی کمکی رواج پیدا

کرد. هم اکنون اساساً از این انرژی برای تولید الکتریسته، پمپ آب و کشتیرانی استفاده می‌شود.

- انرژی الکتریکی

الکتریسته تولید شده از باد عمدتاً به صورت منبع انرژی در زندگی روزمره کشاورزان و دامداران درنقاط دور افتاده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سالهای اخیر ژنراتورهای مختلفی در چین مورد استفاده قرار گرفته است که ظرفیت آنها بین ۳۰ وات الی ۵۵ کیلووات بوده است. تا ماه آوریل سال ۱۹۸۵ میلادی، در چین حدود ۱۱۰۰۰ ژنراتور بادی نصب و راه‌اندازی شده است که حدود ۸۰۰۰ واحد از آنها در چراگاههای مغولستان داخلی نصب شده است. بیشتر این ژنراتورها دارای قدرت اسمی ۱۰۰ وات هستند. در این کشور ژنراتورهای با قدرت بیش از ۱ کیلووات نیز در حال توسعه هستند.

- پمپ آب

از هزاران سال پیش تاکنون از انرژی باد برای آبیاری مزارع استفاده شده است. تا سال ۱۹۵۹ حدود ۲۰۰۰۰۰ چرخ‌بادی سه باله در ایالت Jiansu در حال کار بوده که تا اواسط دههٔ شصت میلادی به خوبی از آنها استفاده می‌شده است. با افزایش موتورهای الکتریکی و دیزلی بسیاری از پمپ‌های بادی برداشته شدند. هم اکنون حدود ۱۰۰۰۰ پمپ بادی (شامل چرخهای بادی سه باله) درحال کار هستند.

از سال ۱۹۵۰ حدود ۲۰ نوع چرخ بادی سه باله و ۱۰ نوع پمپ بادی مدرن در این کشور طراحی و ساخته شده است.

- کشتیرانی

از ۱۸۰۰ سال پیش تاکنون قایق‌های بادی در چین مورد استفاده قرار می‌گرفته‌اند و اکنون نیز کشتی‌های بادی مدرن در آن کشور مورد استفاده قرار می‌گیرند که می‌توان به یك کشتی بادی ۴۵۰ تنی اشاره کرد. چین در نظر دارد یك کشتی بادی مدرن ۱۰۰۰ تنی نیز بسازد.

در آن کشور امکان استفاده از ژنراتورهای بادی در حدود ۱۰ کیلووات نیز وجود دارد که هنوز در این زمینه اقداماتی انجام نشده است.

در کشور هند بیشتر استفاده از انرژی باد به صورت پمپ‌های آب است. در پاکستان، در بعضی مناطق که دارای ظرفیت انرژی مناسب است، مطالعاتی انجام شده و درنظر است یك نیروگاه با قدرت یك مگاوات در آن کشور احداث شود. همچنین درنظر است که درنواحی ساحلی نیز دو واحد آزمایشی با قدرت ۵ کیلووات نصب شوند.

در کره جنوبی براساس ارزیابی مشترك آن کشور و آلمان، قرار است واحدهای متوسط (در حدود ۱۰۰ کیلووات) مورد استفاده قرار گیرند و پس از آن نیز از واحدهایی با توان بیشتر و تا حدود ۱ مگاوات نیز استفاده شود. درنظر است تا سال ۲۰۰۰، از حدود ۷ مگاوات انرژی بادی در این کشور بهره برداری شود.

در قسمت جنوبی ویتنام امکان استفاده از انرژی باد به علت ورزش متوالی و سریع آن زیاد است و توربین‌های بادی با طول ۲ تا ۶ متر برای پمپ آب و تولید الکتریسته مورد استفاده قرار می گیرند.

در تایلند، حدود ۱۸۰۰ واحد چرخ بادی از نوع فلزی و ۳۰۰۰ واحد چوبی ۲ الی ۴ باله‌ای وجود دارد. در این کشور، در زمینه انرژی باد و استفاده از آن مطالعاتی در دانشگاهها انجام می‌شود.

۴-۱- وضعیت تکنولوژی استفاده از انرژی باد

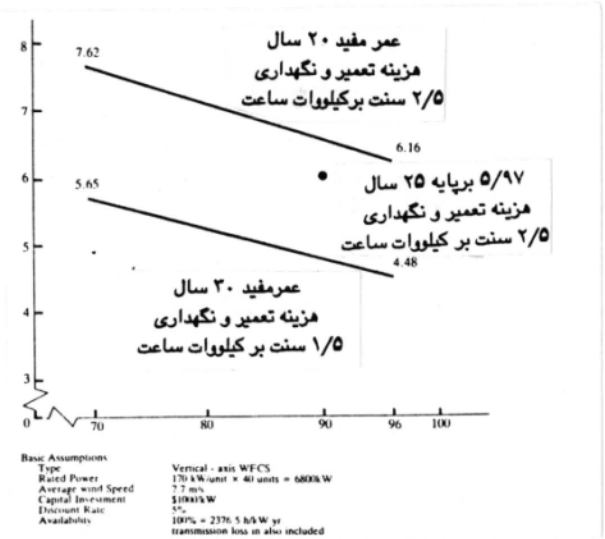
در جدول ۶-۱ وضعیت تکنولوژی تولید انرژی باد درسال ۱۹۸۴ و اهداف بعدی آن در ایالات متحده (که حدود ۹۵ درصد انرژی بادی جهان را در اختیار دارد) را نشان می‌دهد. با توجه به جدول، هدف آن است که هزینه تولید یك کیلووات ساعت انرژی به ۴ سنت کاهش پیدا کند.

اهداف تکنولوژیکی	تکنولوژی فعلی	مشخصات تکنولوژیکی
رنج از: ۹۰۰ کیلووات ساعت برمترمربع با هزینه ۴۵۰ دلار بر مترمربع تا ۱۵۰۰ کیلووات ساعت برمترمربع و هزینه ۷۵۰ دلار برمترمربع	رنج از: ۳۰۰ کیلووات ساعت بر مترمربع با هزینه ۶۰۰ دلار برمترمربع تا ۸۰۰ کیلووات ساعت بر مترمربع با هزینه ۱۱۰۰ دلار بر مترمربع	تولید انرژی سالانه (کیلووات ساعت) و هزینه نصب بر حسب دلار بر متر مربع سطح جاروب شده توسط پره‌ها
۰/۵ سنت بر کیلووات ساعت	۲ سنت بر کیلووات ساعت	هزینه تعمیر و نگهداری
بالای ۹۵ درصد	۸۵ الی ۹۵ درصد	دردسترس بودن
۳۰ سال ۳۰ سال	۵ سال ۳۰ سال	عمر مورد توقع - قسمت‌های عمده و متحرك - ساختمان اصلی
۴ سنت بر کیلووات ساعت	۱۰ الی ۱۵ سنت بر کیلووات ساعت	هزینه تولید الکتریسیته هموار شده برای ۳۰ سال

جدول ۶-۱ وضعیت و اهداف تکنولوژیکی انرژی باد
(براساس دلار سال ۱۹۸۴)

۵-۱- بررسی اقتصادی سیستم‌های بادی

سیستم‌های بزرگ WEC(Wind Energy Conversion) هنوز نیازمند تحقیق و مطالعه بیشتری است، ولی سیستم‌های متوسط و کوچك WECهم‌اکنون در بعضی از جاها (مانند کالیفرنیای آمریکا) به صورت تجارتی در آمده‌اند. شکل ۴-۱ بررسی اقتصادی یك نیروگاه WEC چند واحدی را نشان می‌دهد. مشخصات نیروگاه در قسمت پائین شکل نوشته شده است. هزینه سرمایه‌گذاری این نیروگاه ۱۰۰۰ دلار بر کیلووات و هزینه نگهداری و عملکرد این سیستم ۱/۵ الی ۲/۵ سنت بر هر کیلووات است که بوسیله انستیتو تحقیقاتی انرژی الکتریکی ایالات متحده محاسبه شده است. وضعیت قابلیت این سیستم‌ها هنوز نامعلوم است، ولی با وجود این، انستیتو برای واحدهای کوچك مقداری بین ۷۰ تا ۹۶ درصد تعیین کرده است. ضمناً عمر مفید واحدها هنوز مشخص نشده است. در شکل ۴-۱ عمر مفید بین ۲۰ تا ۳۰ سال درنظرگرفته شده است.



شکل ۴-۱: هزینه جاری نیروگاههای WEC براساس نمونه قابل دسترس در کالیفرنیا

در بهترین شرایط یعنی ۳۰ سال عمرمفید و هزینه نگهداری ۱/۵ الی ۲/۵ سنت و قابلیت ۹۶ درصد هزینه تولید برابر ۴/۴۸ سنت بر کیلووات ساعت خواهد بود که کمتر از هزینه فروش خود (که در حدود ۷/۳ سنت بر کیلووات ساعت) می‌شود. اگر ما وضعیت را به صورت قابلیت ۹۰ درصد و طول عمر مفید ۲۵ سال و هزینه نگهداری ۲/۵ سنت درنظر بگیریم، میزان هزینه تولید برابر ۵/۹۷ سنت خواهد بود که این میزان ۲۰ درصد کمتر از هزینه فروش ۷/۳ سنت خواهد بود. همچنین اگر سیستم بتواند به مدت ۳۰ سال به کار خود ادامه دهد، حتی اگر قابلیت نیز کمتر از ۷۰ درصد باشد)، هزینه تولید تقریباً برابر هزینه فروش خواهد بود.

با مقایسهٔ بین هزینه تولید انرژی باد و هزینه تولید و روشهای مدرن واحدهای نفتی (که برابر ۵ تا ۶ سنت برهر کیلووات ساعت)، می‌توان مشاهده کرد که واحدهای کوچك و متوسط بادی کاملاً قابل رقابت با سیستم‌های سنتی هستند.

میزان انرژی حاصل از باد بستگی بسیار زیادی به سرعت آن دارد، مثلاً در جایی که سرعت باد ۳ متربرثانیه است، میزان انرژی باد ۶۰۰۰ کیلووات ساعت است و این در صورتی است که یك سایت در سرعت باد ۶ متربرثانیه دارای میزان انرژی ۴۸۰۰۰ کیلووات ساعت است. این نشان می دهد که هزینه تولید می‌تواند به ۸۰ درصد کاهش یابد البته در صورتی که سرعت باد دو برابر شود.

هزینه سرمایه گذاری به ازای هر کیلووات نیز می‌تواند کاهش یابد و

حتی از ۱۰۰۰ دلار بر هر کیلووات نیز کمتر شود. این ادعایی است که یك شرکت دانمارکی کرده است، ولی آنچه که مسلماً امکان پذیر می‌باشد، افزایش قابلیت و کاهش هزینه نگهداری و تولید در این واحدها است. انستیتو انرژی ایالات متحده ادعا کرده است که قابلیت کنونی واحدها (که در حال حاضر در حدود ۷۰ تا ۹۶ درصد است) می تواند تا ۹۵ الی ۹۸ درصد افزایش یابد. اگر اینگونه باشد، سیستم‌های WEC می‌توانند بصورت منابع انرژی مطمئن تری نسبت به حال باشند. همچنین ۱۰ درصد افزایش قابلیت یك سیستم WEC می تواند هزینه تولید را به میزان ۱ سنت بر هر کیلووات ساعت کاهش دهد. بدون کاهش هزینه سرمایه‌گذاری اولیه (۱۰۰۰ دلار بر کیلووات)، اگرهزینه عملکرد و نگهداری به میزان ۱۰ تا ۷۰ درصد کاهش یابد و قابلیت به حدود ۹۸ درصد برسد، با درنظر گرفتن طول عمرمفید سیستم به صورت ۳۰ سال، هزینه تولید به مقدار ۴ سنت در هر کیلووات نیز خواهد رسید که دراین صورت این سیستم‌ها کاملاً قابل رقابت با سوختهای سنتی خواهند بود. این مطلب در جدول ۷-۱ نشان داده شده است.

اهداف آینده	شرایط فعلی	
۱۰۰۰	۱۰۰۰	سرمایه‌گذاری اولیه (دلار بر کیلووات)
۱/۰-۰/۷	۲/۵ - ۱/۵	هزینه های تعمیر و نگهداری (سنت بر کیلووات ساعت)
۹۸ - ۹۵	۹۶ - ۷۰	در دسترس بودن (درصد)
۴/۲ - ۳/۵	۷/۶۲ - ۴/۴۸	هزینه تولید (سنت بر کیلووات ساعت)

جدول ۷-۱: دورنمای آینده واحدهای WEC کوچك و متوسط

در مورد استفاده سیستم‌های بزرگ و با قدرت زیاد، هنوز شك و تردید زیادی وجود دارد، چون هزینه ساخت توربین MOD2، برابر ۴۰۰۰ دلار بر کیلووات شده است که با فرضیاتی که برای سیستم‌های کوچك درنظر گرفته شده است،هزینه تولید برابر ۲۰ سنت بر کیلووات ساعت می‌شود و در مقایسه با واحدهای سوخت فسیلی، حدود سه تا شش برابر است.

گروه بین‌المللی ره‌شهر تا کنون ۱۸ نشریه با عناوین زیر منتشر کرده است:

۱- کاربرد جدید شیشه در نمای ساختمان (تابستان ۱۳۷۱)

۲- پارکینگ مراکز تجاری (پائیز ۱۳۷۱)

۳- محافظت در مقابل زلزله (زمستان ۱۳۷۱)

۴- جمع آوری و دفع زباله و مسائل ناشی از آن (زمستان ۱۳۷۱)

۵- طرح اسکان و سریع (زمستان ۱۳۷۱)

۶- مجموعه مقالات راجع به ژئوسنتز (بهار ۱۳۷۲)

۷- مهار آب با آب (بهار ۱۳۷۲)

۸- تحول سبز در معماری (بهار ۱۳۷۲)

۹- روندیابی و مدیریت سیلاب (بهار ۱۳۷۲)

۱۰- مطالعات اقتصادی جهت احداث مراکز خرید (تابستان ۱۳۷۹)

۱۱- نگاهی کوتاه بر طراحی فضای سبز - "تجربیات کشورهای مختلف" (تابستان ۱۳۷۲)

۱۲- بازیافت آب در صنایع شن و ماسه‌شوئی (پائیز۱۳۷۲)

۱۳- بناهای چوبی (کنده‌ای) در ایران و تجربیات کشورهای دیگر (پائیز ۱۳۷۲)

۱۴- نکاتی در مورد طراحی ساختمان‌های بتنی پیش‌ساخته پیش‌تنیده در مناطق زلزله‌خیز (پائیز ۱۳۷۲)

۱۵- اتوماسیون و بهینه‌سازی در سیستم‌های توزیع الکتریکی (زمستان ۱۳۷۲)

۱۶- انرژی دریاها (زمستان ۱۳۷۲)

۱۷- پارکینگ‌های مکانیکی اتوماتیک و نیمه اتوماتیک (بهار ۱۳۷۳)

۱۸- انرژی باد (بهار ۱۳۷۳)